

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY APLIKACE SUPERTVRDÝCH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

TECHNOLOGICAL CONDITIONS APPLICATION SUPERHARD CUTTING MATERIALS

DIPLMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Adam Jelínek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Jaroslav Prokop, CSc.

BRNO 2013

ZADÁNÍ

LICENČNÍ SMLOUVA

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na aplikaci supertvrdých řezných materiálů, kam patří polykrystalický diamant a kubický nitrid boru. Jsou zde řešeny oblasti použití supertvrdých řezných materiálů, nejvhodnější řezné podmínky, technologicko – ekonomický pohled a dosahované parametry při obrábění (drsnost, geometrická tolerance). Cílem práce je definovat za jakých podmínek je výhodné použít supertvrdé řezné materiály a jaké jsou dosažené parametry.

Klíčová slova

Supertvrdé řezné materiály, řezné podmínky, drsnost.

ABSTRACT

Diploma thesis is intended on the application of superhard cutting material which contain polycrystalline diamond and cubic nitro nitride boron. There are solved area of using superhard cutting materials, optimal cutting conditions, technilgic – economic view and reached parameters during cutting (roughness, geometric tolerance). The aim of this is to define what are an achieved parameters.

Key words

Superhard cutting materials, cutting conditions, roughness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Jelínek, Adam. Technologické podmínky aplikace supertvrdých řezných materiálů: *Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 57 s., 2 přílohy. Vedoucí práce doc. Jaroslav Prokop, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Technologické podmínky aplikace supertvrdých řezných materiálů vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....
Adam Jelínek

Poděkování

Děkuji tímto doc. Jaroslavu Prokopovi, CSc. za jeho cenné připomínky a rady při řešení diplomové práce a taky, že si vždy našel čas na řešení problémů.

OBSAH

PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD	9
1 IDENTIFIKACE SUPERTVRDÝCH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ.....	10
1.1 Historie.....	10
1.1.1 Historie diamantu	11
1.1.2 Historie kubického nitridu boru.....	11
1.2 Struktura.....	11
1.2.1 Struktura diamantu.....	12
1.2.2 Struktura kubického nitridu boru	12
1.3 Vlastnosti	13
1.3.1 Vlastnosti diamantu.....	14
1.3.2 Vlastnosti kubického nitridu boru	15
1.4 Výroba.....	16
1.4.1 Výroba diamantu	16
1.4.1.1 Výroba polykrystalického diamantu - slinováním	17
1.4.2 Výroba kubického nitridu boru.....	18
1.4.2.1 Výroba polykrystalického nitridu boru - slinováním.....	19
2 OBLASTI NASAZENÍ SUPERTVRDÝCH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ	20
2.1 Použití diamantu	20
2.1.1 Diamant – břitové destičky.....	20
2.1.2 Diamant – frézovací nástroje	21
2.1.3 Diamant – brousící kotouče.....	22
2.2 Použití kubického nitridu boru.....	22
2.2.1 Kubický nitrid boru – břitové destičky	22
2.2.2 Kubický nitrid boru – frézovací nástroje	23
2.2.3 KNB – brousící kotouče	24
3 ŘEZNÉ PODMÍNKY PŘI APLIKACI NÁSTROJŮ ZE SUPERTVRDÝCH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ.....	25
3.1 Řezná rychlost.....	25
3.1.1 Řezná rychlost – diamantu	26
3.1.2 Řezná rychlost – PKNB.....	26
3.2 Třísky	27
3.2.1 Třísky – diamant.....	29
3.2.2 Třísky – PKNB	29
3.2.3 Utvařec.....	30
3.3 Opotřebení	31
3.4 Trvanlivost.....	33
3.5 Řezné prostředí.....	35
3.5.1 Řezné prostředí – nástroj diamant.....	37
3.5.2 Řezné prostředí – nástroj PKNB	38
4 TECHNOLOGICKO – EKONOMICKÁ ANALÝZA NASAZENÍ NÁSTROJŮ ZE SUPERTVRDÝCH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ	39
4.1 Náklady na strojní práci	39
4.2 Náklady na nástroj a jeho výměnu	40
4.3 Náklady na vedlejší práci.....	41

4.4 Náklady na řeznou kapalinu	42
4.5 Srovnání trvanlivosti a řezných podmínek	42
5 DOSAHOVANÉ PARAMETRY OBROBENÝCH PLOCH PŘI APLIKACI NÁSTROJŮ ZE SUPERTVRDÝCH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ	43
5.1 Drsnost	43
5.1.1 Střední aritmetická úchylka profilu Ra	43
5.1.2 Střední hodnota aritmetické výšky Rz	44
5.1.3 Nejvyšší výška profilu Rm.....	44
5.1.4 Střední rozteč profilu Sm	45
5.1.5 Dosahované drsnosti supertvrdých materiálu	45
6 EXPERIMENTÁLNÍ SROVNÁNÍ	46
6.1 Volba součást.....	45
6.2 Volba stroje	45
6.3 Volba řezných nástrojů	45
6.4 Řezné podmínky	45
6.5 Technicko – ekonomické zhodnocení	45
6.5.1 Technicko – ekonomické zhodnocení – diamant x SK.....	45
6.5.2 Technicko – ekonomické zhodnocení – PKNB x SK.....	45
6.6 Dosahované drsnosti	45
6.7 Dosahované rozměry	45
ZÁVĚR	53
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	54
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	56
SEZNAM PŘÍLOH	57

ÚVOD

Začalo to již v pravěku, kdy člověk potřeboval k přežití zbraně a nástroje. Proto použil kámen, který byl všude kolem něj a začal jej obrousit. V ten okamžik, aniž by si to uvědomil, započal éra „obrábění“. Postupem času své metody broušení zdokonaloval a začal používat nejtvrdší kameny, které našel. Začal hledat způsoby, čím nejlépe brousit a tak začal používat zrníčka písku. Taky zjistil, že jako chlazení je nejvhodnější voda.

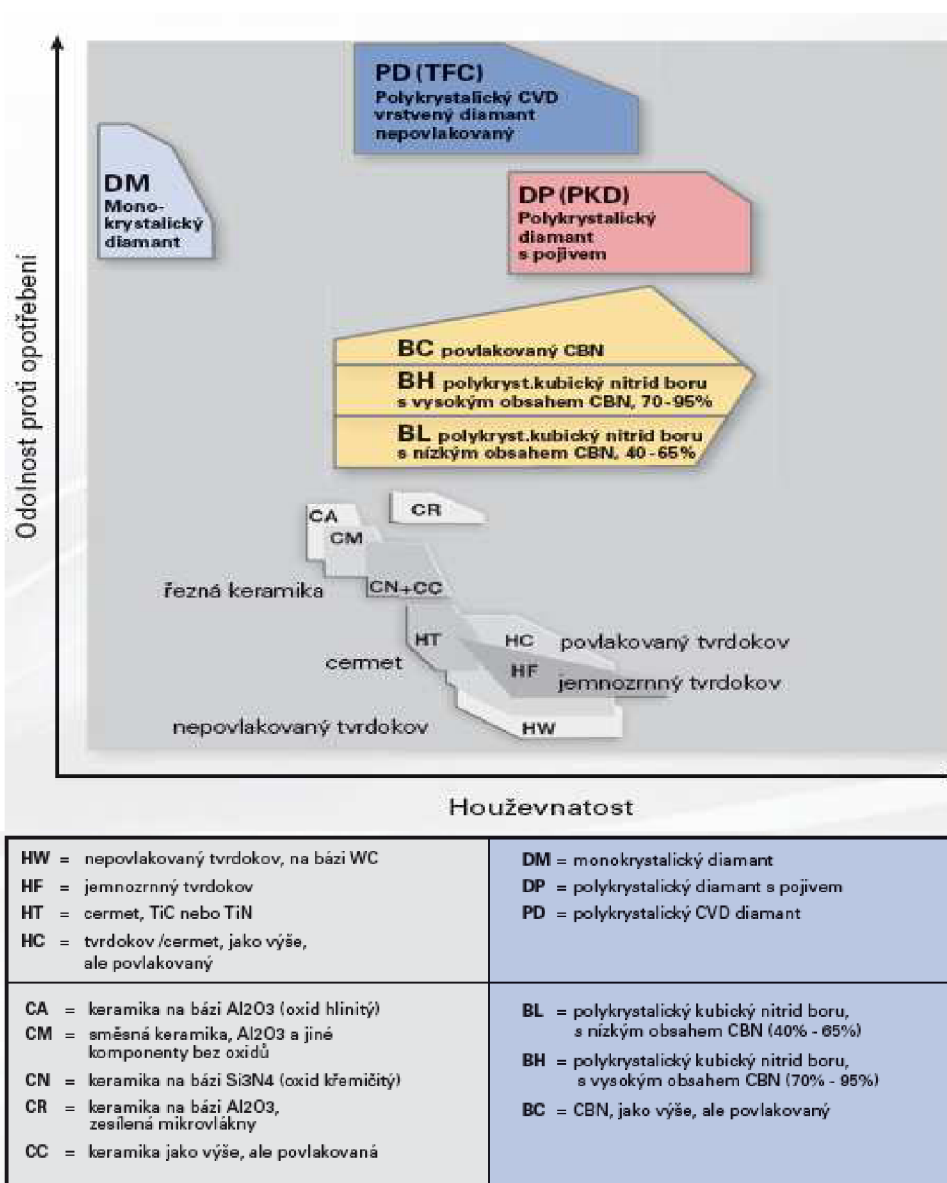
V dnešní době je obrábění již nedílnou součástí, která se dotýká všech oblastí, od automobilového průmyslu přes potravinářský až k lékařskému. Dnešní svět klade největší důraz na cenu a rychlost obrábění a proto se v oblasti obrábění v našem konkrétním případě – supertvrdých řezných materiálů hledají nové a vhodnější metody. Jde především o to, aby řezný materiál vydržel co nejdéle, měl nejlepší dosahované parametry a jeho pořizovací cena byla co nejnižší.

Supertvrde řezné materiály, kterým se věnuje závěrečná diplomová práce obsahuje polykrystalický diamant a kubický nitrid boru. Tyhle řezné materiály si našli hned od začátku své příznivce, ale taky i své odpůrce. Nespornou výhodou je, že diamant je nejtvrdším materiálem podle Mohsovy stupnice a patří mu 10. místo. Na druhou stranu, je diamant velmi drahý z pohledu ekonomického. V případě jeho použití je nutné obhájit, proč investovat do tak drahého řezného materiálu a zda není jiná metoda ve výsledku výhodnější - ekonomičtější.

1 IDENTIFIKACE SUPERTVRDÝCH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

Supertvrde materiály patří do velké skupiny nástrojových materiálů pro řezné nástroje (Obr. 1.1). Do skupiny nástrojových materiálů patří uhlíkové oceli, rychlořezné oceli (RO), stěliny, slinuté karbidy (SK), boridy, nitridy a taky supertvrde řezné materiály. [7]

Pod pojmem supertvrde řezné materiály jsou myšleny pouze dva materiály, které jsou vyráběny synteticky. První z nich je syntetický diamant, který se označuje PKD - polykrystalický diamant. Jedná se o řezný nástroj, kde jsou jednotlivé krystaly diamantu spojeny různými pojivy. Existuje i monokrystalický diamant - MKD a taky polykrystalické diamanty - CVD. Druhý ze skupiny supertvrдых řezných materiálů je kubický nitrid boru, který je značen KNB nebo PKNB. [2,8]



Obr. 1.1 Skupina řezných materiálů – DIN ISO 513 [7]

1.1 Historie

V případě, že se jedná o supertvrde řezný materiál je nutno si prvně uvědomit, že je velký rozdíl, pokud je myšlen diamant, který vznikl v zemské

kůře, tedy diamant přírodní nebo diamant, který byl vytvořený uměle. Syntetický kubický nitrid boru je pouze umělý a začal se vyrábět později, až po zkušenostech získaných z výroby syntetického diamantu.

1.1.1 Historie diamantu

Přírodní diamant vznikl přibližně před 3 300 miliony lety pod zemskou kůrou v hloubce více než 150 Km (Obr. 1.2). Přírodní diamant se používá jako drahokam (Obr. 1.3). První zmínky o vytvoření umělého (syntetického) diamantu se datují k roku 1880, kdy pan Hannay ve své laboratoři vyrobil umělý diamant – bohužel tahle skutečnost se nikdy nepotvrdila. Proto je za mezní událost v oblasti výroby umělého diamantu až rok 1953, kdy pánové Liander a Lundbland ze Švédska vyrobili diamant pomocí metody HPHT (High Pressure High Temperature). Ovšem až v roce 1955 byl firmě General Electric z USA udělen patent. V roce 1957 byl prvně vyrobený diamant na komerční úrovni. V Československu se díky firmě PRAMET (PRA – prášková, MET - metalurgie) začal vyrábět syntetický diamant v roce 1967. Poté se začal diamant používat v obrábění na brousící kotouče, vrtáky, frézy a později i jako povlaky. [2]

1.1.2 Historie kubického nitridu boru

Bor se vyskytuje v zemské kůře v podobě boritanových minerálů a borosilikátů. Až po objevení umělého diamantu a jeho komercializaci se firma General Electric orientovala na využití kubického nitridu boru. V roce 1957 se podařilo R.H. Wentorfovi provést transformaci hexagonální mřížky nitridu boru na kubickou mřížku. V roce 1966 se začal používat krystal kubického nitridu boru na komerční úrovni v podobě brousících kotoučů. Až v roce 1971 zjistili, že kubický nitrid boru je nejvhodnější aplikovat na obrábění kalených ocelí a tvrdých litin. Největší rozmach se datuje k roku 1986, kdy vznikly nové druhy polykrystalického nitridu boru v nichž se objevila keramika. [2]



Obr. 1.2 Přírodní diamant [9]



Obr. 1.3 Vybrúšený diamant [9]

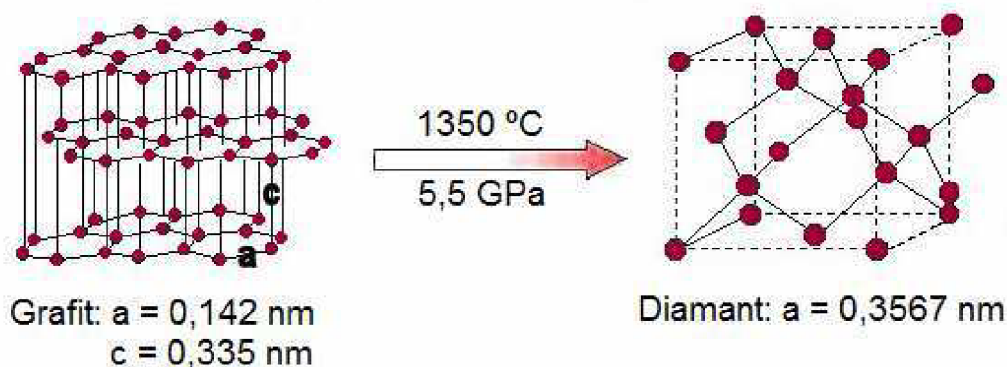
1.2 Struktura

Pomocí uspořádaných atomů v prostoru je definována struktura látek na úrovni krystalické mřížky, krystalického zrna, makro-objemu a v neposlední

řadě typu vazby. Tím má struktura největší vliv na kvalitu fyzikálních a mechanických vlastností konkrétní látky. [10]

1.2.1 Struktura diamantu

Diamant můžeme jednoduše popsat jako čistý prvek – uhlík. Aby byl co nejvíce přiblížen syntetický diamant je nutno začít od struktury grafitu. Grafit má hexagonální mřížku, kterou za vysokých teplot, tlaků a přítomnosti katalyzátoru přeměníme na kubickou mřížku diamantu (Obr. 1.4). [2]



Obr. 1.4 Přeměna hexagonální mřížky na mřížku kubickou [2]

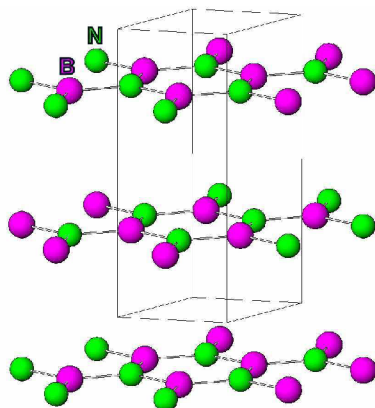
Dusík obsažen jak v přírodním tak i v syntetickém diamantu je převládající nečistotou a taky jeden z nejdůležitějších defektů. Mezi nečisty diamantu patří hliník, nikl, železo a další prvky. Celkem bylo napočítáno 25 minerálních látek. Diamantové krystaly se rozdělují do 4 skupin podle koncentrací dusíku a boru. [12]

- Typ I – Obsahuje dusík a nečistoty ve velkém množství, které jsou vylučovány ve formě malých shluků. Patří sem velká část přírodních diamantů.
- Typ II – Obsahuje dusík ve formě nečistot a ty jsou rozptýleny ve formě substituční. Patří sem většina syntetických diamantů.
- Typ III – Neobsahuje uhlíkové nečistoty. Jen výjimečně se objevuje v přírodní formě. Charakterizuje se lepšími optickými a tepelnými vlastnostmi.
- Typ IV – Jsou to velmi čisté diamanty, nejčastěji modré barvy, které se vyznačují vlastností polovodičů. Jsou velmi vzácné v přírodní formě. U syntetických diamantů je dosaženo polovodičových vlastností přítomností boru.

1.2.2 Struktura kubického nitridu boru

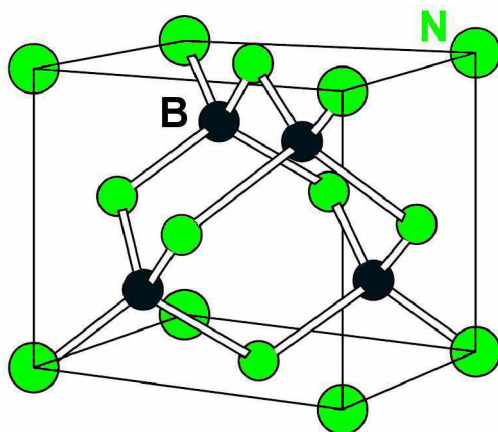
Kubický nitrid boru se skládá ze základního prvku - boru. V minulosti pojmenovali bor názvem „borax“, který byl používán ve sklářství. Je v mnoha ohledech podobný grafitu a liší se jen barvou a elektrickou nevodivostí. Nitrid boru má bílou barvu a grafit má černou barvu. Kubický nitrid boru je tvořen dvěma plošně středěnými mřížkami, které jsou úhlopříčně posunuty o čtvrtinu

tělesové úhlopříčky. Základní skladba nitridu boru je hexagonální mřížka, která se skládá z 18 atomů (Obr. 1.5). [2,11]



Obr. 1.5 Hexagonální mřížka nitridu boru [2]

Při pokusech na syntetickém diamantu s transformací na kubickou mřížku za působení vysokých tlaků a teplot zkusili, že stejná přeměna probíhá s nitridem boru a tím byla dosažena přeměna na kubickou mřížku (Obr. 1.6). Na obrázku je vidět konečnou strukturu kubického nitridu boru s velmi těsným uspořádáním vrstev. Je vidět atom B – boru, který je spojen se čtyřmi atomy N – dusíku jako vrchol čtyřbodové mřížky. [2,12]



Obr. 1.6 Kubický nitrid boru – kubická mřížka

1.3 Vlastnosti

Vlastnosti supertvrdých rezných materiálů je možno rozdělit do dvou základních skupin. První z nich jsou mechanické vlastnosti, kam patří hustota, pevnost v tlaku a ohybu, tvrdost a modul pružnosti. Druhou skupinou jsou elektrické vlastnosti, kam patří délková roztažnost, tepelná vodivost a teplotní stálost. Díky zmíněným parametrům je možno jednoduše identifikovat o jaký materiál se jedná a zda jsou dodrženy všechny vlastnosti, které jsou nezbytné pro jejich nejuvhodnější použití.

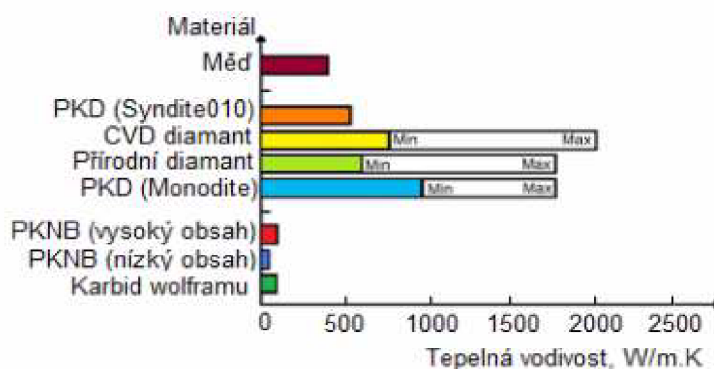
1.3.1 Vlastnosti diamantu

Diamant se vyznačuje jako nejtvrďší materiál na světě a patří mu nejvyšší pozice dle Mohsovy stupnice tvrdosti a to číslo 10 (Tab. 1.1). Mohsova stupnice udává schopnost vrypu jednoho materiálu do druhého materiálu. Ve srovnání s druhým nejtvrďším materiálem korundem je asi 150x tvrdší. To je dosaženo díky jeho blízké vazbě atomů. Tvrdost je jedna z největších výhod diamantu.

Tab. 1.1 Mohsova stupnice tvrdosti [9]

Tvrdost	Minerál	Absolutní tvrdost
1	Mastek	1
2	Sůl kamenná, Sádrovec	3
3	Kalcit - Vápenec	9
4	Fluorit	21
5	Apatit	48
6	Živec	72
7	Křemen	100
8	Topaz	200
9	Korund	400
10	Diamant	1500

Další výhodou je elektrická vodivost, která je u diamantu velmi dobrá. Látka je izolační až na Typ IV – kdy je diamant polovodičem. Tepelnou vodivost považujeme u diamantu za velmi dobrou a jak je vidět na obrázku (Obr. 1.7) je za působení normálních teplot nejvyšší. [14]



Obr. 1.7 Tepelná vodivost za normálních teplot [13]

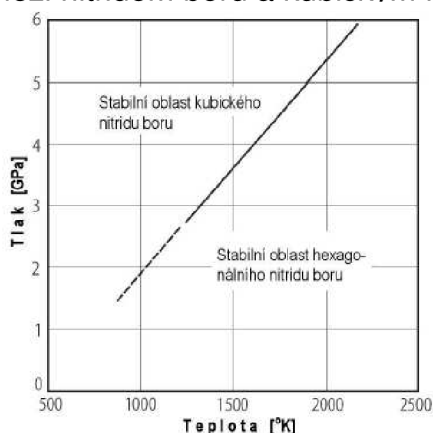
Na druhou stranu je velkou nevýhodou diamantu jeho nízká teplotní stálost. Jelikož při teplotě kolem 650 °C se začne měnit na grafit a z tohoto důvodu je velmi nízké použití diamantu – používá se jen u slitin hliníku. Seznam základních vlastností diamantu je uveden v tabulce (Tab. 1.2). [2]

Tab. 1.2 Vlastnosti syntetických diamantů [2]

Vlastnosti	Diamant	
	Monokrystalický	Polykrystalický
Měrná hmotnost [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	3,5150 – 4,5200	3,42 – 4,50
Délka strany kubické mřížky [nm]	0,3567	-
Pevnost v tlaku [GPa]	6,90 – 16,53	4,2 – 8,0
Pevnost v ohybu [MPa]	1350	1 200 – 1 700
Tvrdost [HV]	5 700 – 3 000	5 000 – 8 000
Modul pružnosti v tahu [GPa]	820 – 1 250	776 – 925
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	507	430
Lomová houževnatost K_{Ic} [$\text{Pa}\cdot\text{m}^{1/2}$]	3,4 – 4,2	6 – 11
Poissonova konstanta [-]	0,10 – 0,29	0,20
Součinitel délkové roztažnosti [$10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,8 – 4,8	3,2 – 4,6
Měrná tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	500 – 2 200	120 – 550
Teplotní stálost [$^{\circ}\text{C}$]	600 – 700	-

1.3.2 Vlastnosti kubického nitridu boru

Tvrdost kubického nitridu boru je definována pomocí vzdáleností atomů boru a dusíku. Z důvodu, že je až čtvrtina vazeb iontová nedosahuje kubický nitrid boru tvrdosti diamant. Nicméně se řadí v oblasti nástrojů na druhé místo v tvrdosti za diamant a je nejtvrdším nitridem kovu. Kubický nitrid boru je tepelně odolnější než diamant a to více než 2x. Je možno jej použít při teplotách kolem 1 300 – 1 400 $^{\circ}\text{C}$. Naproti tomu diamant maximálně kolem teploty 650 $^{\circ}\text{C}$. Při dosažení vyšších teplot s kubickým nitridem boru se stane, že v přítomnosti s uhlíkem se začne rozkládat na oxid boru a dusíku. Další výhodou je, že se nezačne rozpouštět v roztavených kovech ani v rozpouštědlech za vyšších teplot. Aby bylo možné posoudit, zda je stabilní oblast vniku kubického nitridu boru, je použit diagram (Obr. 1.8), kde je rovnovážná přímka mezi nitridem boru a kubickým nitridem boru. [2]



Obr. 1.8 Oblast stabilního KNB [2]

Elektrická vodivost je nižší než u diamantu. Základní vlastnosti kubického nitridu boru jsou uvedeny níže (Tab. 1.3).

Tab. 1.3 Vlastnosti kubického nitridu boru [2]

Vlastnosti	Kubického nitridu boru	
	Monokrystalický	Polykrystalický
Měrná hmotnost [g.cm^{-3}]	3,43 – 4,50	3,42 – 4,40
Délka strany kubické mřížky [nm]	0,3615	-
Pevnost v tlaku [GPa]	6,90	2,7 – 3,5
Pevnost v ohybu [MPa]	700	500 – 800
Tvrdost [HV]	4 000 – 7 500	2 700 – 3 500
Modul pružnosti v tahu [GPa]	650 – 850	587 – 800
Modul pružnosti ve smyku [GPa]		280
Lomová houževnatost K_{Ic} [$\text{Pa.m}^{1/2}$]		3,5 – 6,7
Poissonova konstanta [-]		0,20 – 0,22
Součinitel délkové roztažnosti [$10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$]	3,5 – 5,8	4,6 – 4,9
Měrná tepelná vodivost [$\text{W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	13 – 200	44 – 200
Teplotní stálost [$^{\circ}\text{C}$]	1 200 – 1400	-

1.4 Výroba

První pokusy o výrobu supertvrdých řezných materiálů se datují na konec 19. století. Na začátku se začal diamant vyrábět pro průmysl. Až o pár let později došlo i k výrobě kubického nitridu boru. Jedná se o náročný proces, kde musí být dodrženy všechny výrobní podmínky. U nás je nejznámější firma PRAMET Šumperk (PRA – prášková, MET – metalurgie). Ve strojírenství se používá pouze polykrystalický diamant (PKD) a polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB) v podobě řezných destiček, které se následně brousí. [18]

1.4.1 Výroba diamantu

V dnešní době je možné diamant vyrábět pouze pomocí dvou metod. Metody jsou podobné v tom, že se provádějí za vysokých tlaků a teplot. Samozřejmě je nutné dodržovat přesné technologické postupy a je zapotřebí specifických zařízení. Ač se to nezdá, tak je výroba celkem levná, ale na druhou stranu je bohužel velmi časově náročná. Výroba 0,1mm diamantu trvá asi hodinu. Je možnost zvýšit rychlost, ale to má za následek snížení kvality. Uplatnění diamantu nelézá pouze úzkou oblast využití. Naproti tomu uplatnění kubického nitridu boru je daleko větší a rozmanitější. Proto se na výrobu diamantu soustřeďuje jen velmi úzká část výrobců. [14,16]

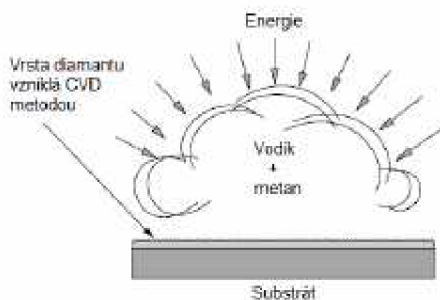
- Známější metoda HPHT (High Pressure High Temperature), která je ale starší a nedosahuje tak kvalitních výsledků jako CVD byla vynalezena v laboratořích firmy ASEA ve Švédsku. Nicméně až o dva roky později a to v roce 1955 se začala vyrábět v laboratořích firmy General Electric v Americe pro průmyslové využití. Metoda je

prováděna v určených zařízeních pro výrobu syntetického diamantu (Obr. 1.9). Při této metodě se uhlík stlačuje za přítomnosti roztaveného kovu a při definované chladicí teplotě. Proces je prováděn za vysokých tlaků kolem 5,5 GPa a teplota dosahuje přibližně 1 297 °C. [2]



Obr. 1.9 Zařízení na výrobu syntetického diamantu pomocí metody HPHT [15]

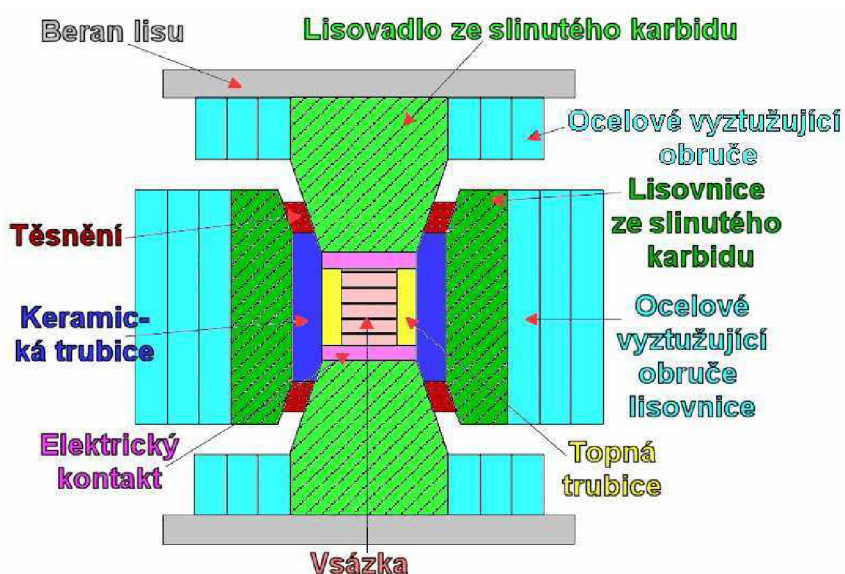
- Metoda CVD (Chemical vapour deposition) je charakterizována směsí vodíku a metanu, která je nastřelována plazmou (Obr. 1.10). Při této náročné reakci vznikají malé kapky uhlíku a ty po dopadu na povrch zkrystalizují a vytvoří se diamant. Pracuje se s diamanty, které se zahřívají až na teploty kolem 2 000 °C. Takle metoda dosahuje daleko lepších výsledků než HPHT. Je možno dosáhnout požadovaného tvaru, barva diamantu je bezbarvá. Tvrdost je vyšší nežli u přírodních i umělých diamantů. [2]



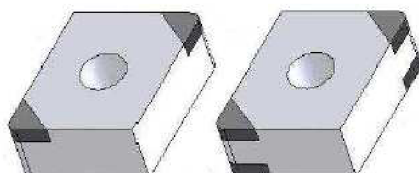
Obr. 1.10 Schéma CVD procesu [13]

1.4.1.1 Výroba polykrystalického diamantu - slinováním

Výroba polykrystalického diamantu je nedílnou součástí ve strojírenství, jelikož se používá pro obrábění na břitové destičky. Při výrobě PKD je výchozím materiálem monokrystalický diamant a pojivem kovový materiál (kobalt, nikl, železo), který se slinuje na lisech (Obr. 1.11) za teploty 1 300 – 1 800°C a tlaku kolem 5 GPa. Následně se vyleptá, vybrousí diamantovými kotouči a nakonec se zkontrolují jeho rozměrové parametry. Na destičky ze základního materiálu (slnutého karbidu) se napájí roubíky PKD (Obr. 1.12). [19]



Obr. 1.11 Slinování PKD [20]



Obr. 1.12 Napájené roubíky PKD [12]

1.4.2 Výroba kubického nitridu boru

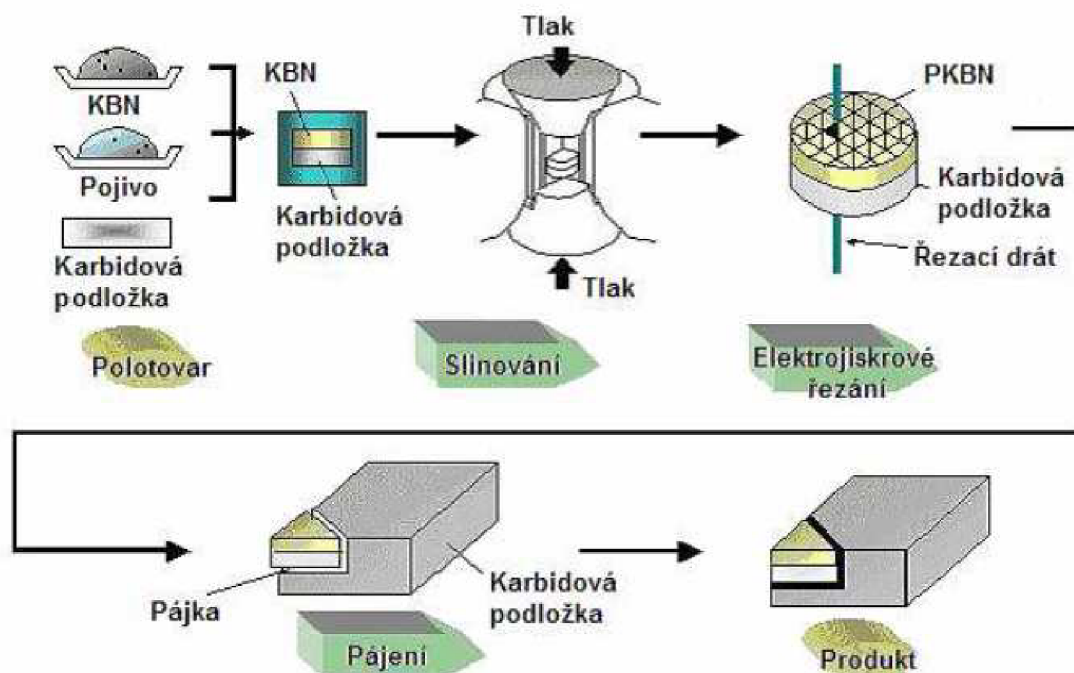
Kubický nitrid boru se vyrábí podobnými metodami jako syntetický diamant. Proto je možné najít podobnosti mezi diamantem a kubickým nitridem boru. Například tvrdost je o několik tisíc Vickersův nižší než u diamantu, ale i přesto je nejtvrdějším nitridem. Výroba kubického nitridu boru se datuje jen o několik let později a vznikla ve stejné laboratoři ve firmě General Electric v Americe. [2]

- První metoda výroby kubického nitridu boru je pomocí syntézy hexagonálního nitridu boru a přítomnosti katalyzátoru. U této metody je zapotřebí speciálních kádí a hydraulického lisu, který pracuje při vysokých teplotách a tlacích. Tvrdost kubického nitridu boru je dosažena až přeměnou z hexagonální mřížky na kubickou mřížku (tohle zjištění je známé z výroby diamantu). [2]
- Další metoda výroby kubického nitridu boru je nazývána přímou přeměnou. Kdy je přeměna hexagonální mřížky na kubickou

modifikaci při použití vysokých teplot, které musí být vyšší než 1 500 °C a tlaky 12 GPa. Důležitou podmínkou je, že se provádí bez rozpouštědel a katalyzátorů. Při nedodržení teploty je kubický nitrid boru degradován na Wurtzitickou modifikaci. [17]

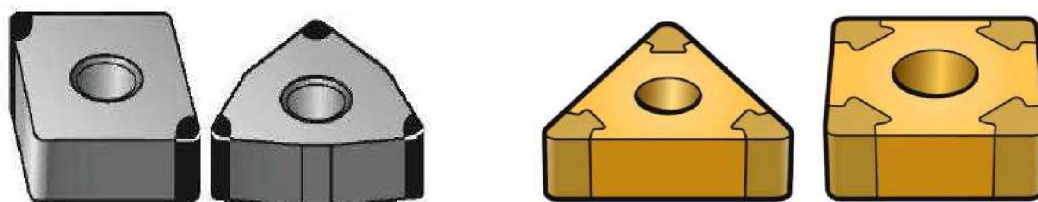
1.4.2.1 Výroba polykrystalického nitridu boru - slinováním

Výroba polykrystalického nitridu boru (PKNB) je podobná jako při výrobě PKD. Při slinování se používají podobná pojiva – hliník, kobalt, nikl. Schéma postupu slinování polykrystalického nitridu boru (Obr. 1.13). [18]



Obr. 1.13 Postup výroby PKNB [12]

Destičky se následně vyrábějí ve dvou formách. První metoda je pomocí pájení roubíku, která je častěji používána, kde je napájen roubík na vybrání a tvoří tak špičku břitové destičky (Obr. 1.14 - a). Druhá metoda výroby břitových destiček je použití zámkové konstrukce, která eliminuje nedostatky roubíkové břitové destičky při tepelně ovlivněné oblasti při soustružení (Obr. 1.14 - b). [12]



a) Břitová destička s pájeným roubíkem b) Břitová destička se zámkovou konstrukcí
Obr. 1.14 Typy břitových destiček PKNB [12]

2 OBLASTI NASAZENÍ SUPERTVRDÝCH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

Supertvrdé rezné materiály se staly nedílnou součástí našeho života. Diamant má velkou využitelnost v klenotnictví jako šperk, kde je díky své vysoké ceně často vyhledáván bohatými lidmi. Od téhle chvíle bude diamantu věnováno jen z pohledu strojírenského uplatnění a využití. Kubický nitrid boru má hlavní využití pouze ve strojírenství, v jiných oblastech není možno se s ním setkat.

2.1 Použití diamantu

Diamant je používán ve strojírenství v několika odlišných oblastech. V první z nich je diamant používán jako součást měřících přístrojů – indentory, doteky a rýsovací pomůcky. Druhou oblastí jsou diamantové nástroje pro soustružení, frézování, vrtání, vystružování, řezání závitů, a ostatní operace hlavně v sériové výrobě, tedy nástroje s definovanou geometrickou špičkou. Další využití je jako diamantové pasty a prášky, které se používají na brousící nástroje a řezací nástroje, což je nazýváno s nedefinovanou geometrií. [1]

2.1.1 Diamant – břitové destičky

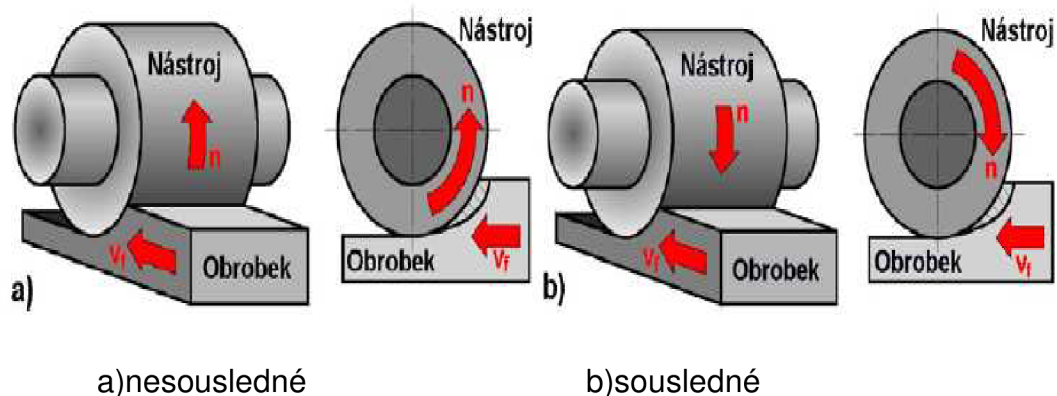
Diamantové břitové destičky pro soustružení vyrobené s polykrystalického diamantu mají hlavní využití v obrábění měkkých materiálů a houževnatých materiálů. Používají se hlavně pro slitiny hliníku (Obr. 2.1 – diamantová destička na obrábění hliníkových slitin od firmy Diamond tooling) a další neželezné kovy – měď, bronz, mosaz, titanové a zinkové slitiny. U soustružení se diamantové břitové destičky používají jako dokončovací práce, díky své vysoké přesnosti obrábění, což je velmi výhodné, ale z druhé strany je nutno si uvědomit vysokou pořizovací cenu. Hlavním důvodem, proč se používají diamantové břitové destičky u zmíněných materiálů je, že diamant má nízkou teplotní stálost a při zahřátí nad 650 °C se stává grafitem. Při nadměrném ohřevu dochází k chemickým reakcím a nástroj se rychleji opotřebovává. Proto se v žádném případě nemůže používat na materiál na bázi železa nebo na litiny. [2]



Obr. 2.1 Diamantová destička od firmy Diamond tooling [21]

2.1.2 Diamant – frézovací nástroje

Frézování je jedna z obráběcích metod, kde dochází k odebrání třísky pomocí rotujícího nástroje s břity. Hlavní pohyb koná obrobek. Frézování je možné rozdělit na dva pohyby obráběné – souměrné a nesouměrné. V případě souměrného obrábění dochází k pěchování plochy obrobku. V případě obrábění nesouslednou metodou je tříška z obráběného materiálu vytržená (Obr. 2.2). [20]



Obr. 2.2 Válcové frézování [20]

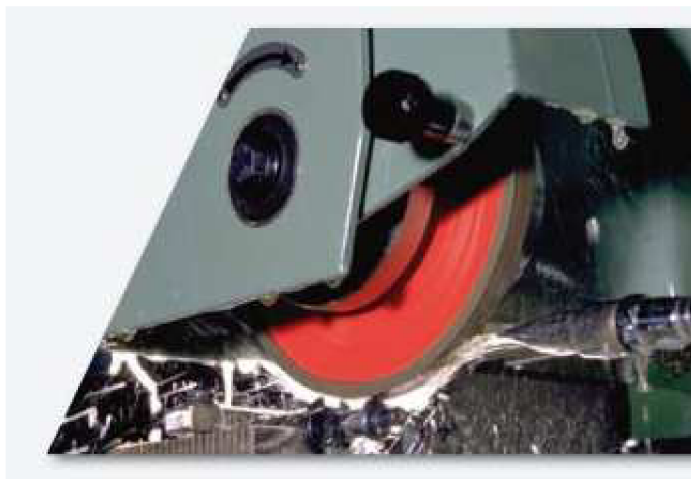
Při frézování diamantem se obrábějí nejčastěji hliníkové slitiny. Ve strojírenství je nejčastěji používán v oblasti automobilového a leteckého průmyslu na obrábění velkých dílců. Od firmy Iscar je frézovací hlava použita na obrábění motoru (Obr. 2.3).



Obr. 2.3 Frézování motoru – firma Iscar [32]

2.1.3 Diamant – brousící kotouče

Diamantové brousící kotouče se používají v konečné fázi obrábění a to na dokončovací operace, jelikož jeho použitím je docíleno vysoké přesnosti a kvalitního povrch. Provádí se na konci po tepelném obrábění a mají nejvyšší vliv na vlastnosti nástroje a jeho tvar (Obr. 2.3). Používají se na broušení nových nástrojů, ale taky na přebrušování již používaných nástrojů. Další možností je kotouč z diamantu využít na řezání a dělení materiálu. [22]



Obr. 2.4 Broušení – firma Norton [33]

2.2 Použití kubického nitridu boru

Kubický nitrid boru byl v podstatě vyvinut pro obrábění materiálů, kde je diamant nedostačující. Není tak příliš limitován jen na nekovové materiály. KNB se používá na stejné technologické operace jako diamant. Převážně pro obrábění litin a taky obrábění kalených ocelí. PKNB nachází využití i při obrábění obrobků, které dosahují vysokou tvrdost. Mezi obráběním litiny mají velké využití při obrábění šedých litin a to za použití vysokých rychlostí. Ve srovnání s cernetou nejsou dosahované tak vysoké rychlosti, ale cena cernetů je poněkud nižší. [2]

2.2.1 Kubický nitrid boru – břitové destičky

Při použití destičky z kubického nitridu boru je možno soustružit kalenou ocel od tvrdosti 45 HRC (jelikož pro nižší tvrdost je použití nástroje neekonomické) až do tvrdosti 65 HRC. Tímhle využitím na kalené oceli se řadí na špičku a je jeden z mála nástrojových rezných materiálů pro tohle použití. Při soustružení tvrzených litin je možné nahradit operaci broušení. Základní tvary břitových destiček z KNB (Obr. 2.5). [12]



Obr. 2.5 Základní tvary povlakovaných destiček [31]

2.2.2 Kubický nitrid boru – frézovací nástroje

Frézování ocelí je podobné jako u obrábění diamantem. Je použito vícebřitého nástroje, takže je efektivnější. Výrobou nástrojů pro frézování se zabývá celá spousta firem. Ke špičce patří firma Sandvik (Obr. 2.6).



Obr. 2.6 Frézování oceli - Sandvik [34]

2.2.3 KNB – brousící kotouče

Brousící kotouče se hlavně používají pro ostření řezných nástrojů, broušení tvrdých materiálů a těžkoobrobitelných materiálů. Další použití je pro tvarové broušení. Uplatnění najde KNB taky v oblasti renovací nástrojů, kde je materiál ve tvrdém stavu. Díky možnosti použití kubického nitridu boru pro kalené oceli, není potřeba před jeho použitím materiál žíhat a po obrobení zušlechťovat. Díky tomu má kubický nitrid boru výhodné použití a taky je snížen nárok na energii a tím i na cenu celé operace. Velké množství tvarů brousících kotoučů o různých rozměrech nabízí firma Norton (Obr. 2.7). [33]



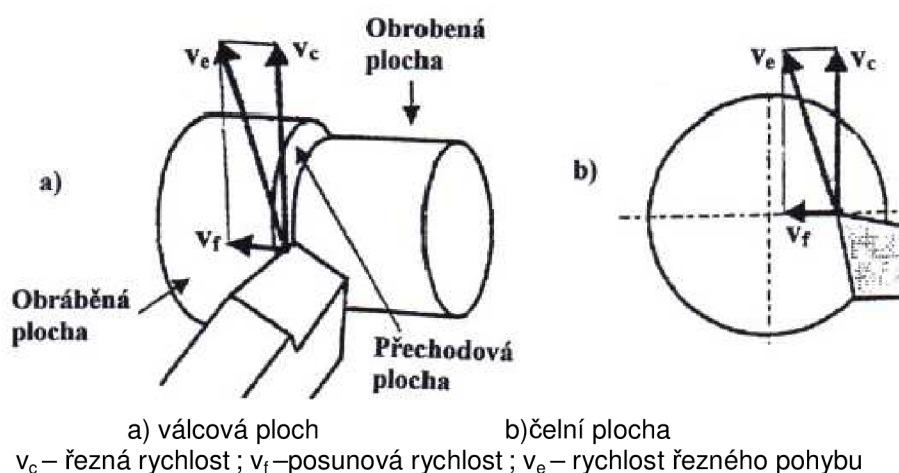
Obr. 2.7 Broušení KNB - Norton [33]

3 ŘEZNÉ PODMÍNKY PŘI APLIKACI NÁSTROJŮ ZE SUPERTVRDÝCH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

Řezné podmínky jsou nejdůležitější součástí řezného procesu. Dalo by se říci, že je to schopnost nástroje efektivně odebrat třísku z obráběného materiálu. Podle zvolených parametrů a obráběcích podmínek se stává obrábění snadným procesem nebo při špatně zvoleném nastavení řezného procesu můžeme dojít až ke zlomení nástroje, poškození stroje či dokonce zranění samotného pracovníka. Hlavní vliv na zvolení řezných podmínek má technolog. Musí vhodně zvolit metodu obrábění, nástroj, řeznou rychlost, otáčky, posuv, chladicí kapalinu a další parametry, aby dokázal obrobit výsledný produkt podle požadavků zákazníka. Vhodným nastavením ovlivňuje druh utvářené třísky a tím docílení finální drsnost a geometrické tolerance výrobku a rozměry.

3.1 Řezná rychlost

Řezná rychlost v_c definuje pohyb nástroje a je určena okamžitou řeznou rychlostí hlavního pohybu uvažovaného bodu na ostří ve vztahu k obrobku. Je možné ji určit za pomoci směru posuvové rychlosti a výsledného směru rychlosti řezného pohybu (Obr. 3.1, vzorec 3.1). Je to jeden z hlavních parametrů, který udává rychlost obrábění a je ve strojírenství velmi používaný. [24]



Obr. 3.1 Kinematika řezného procesu při soustružení [24]

Řezná rychlost :

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m/min}] \quad (3.1)$$

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

3.1.1 Řezná rychlost – diamantu

Řezná rychlost diamantu při obrábění dosahuje vysokých hodnot při srovnání s ostatními reznými materiály. Je to hlavně z důvodu, že při obrábění diamantem máme vysoké otáčky, jelikož u soustružení je prováděna dokončovací operace a není potřeba přebušovat. V některých případech lze při obrábění hliníkových slitin soustružit nebo frézovat reznou rychlostí přesahující $5\,000\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Příklad rezných podmínek pro soustružení a frézování, které doporučuje firma Sumitomo (Tab. 3.1). [2,22]

Tab. 3.1 Řezné podmínky pro soustružení a frézování od firmy Sumitomo [22]

Typ	Označení	Složka	Doporučená řezná rychlost [m·min ⁻¹] Soustružení	Doporučená řezná rychlost [m·min ⁻¹] Frézování
PKD	MD205	Al - SI	600 (200 -1000)	
		SK	15 (5 - 20)	
		KER	50 (30 – 80)	
	MD220	Al - SI	1000 (200 – 1 500)	
		Cu - SI	700 (200 – 1 200)	
		PI	600 (100 - 1 000)	
		V - PI	500 (100-800)	

Vysvětlivky :

Al-SI - slitiny hliníku, Cu - SI - slitiny mědi, KER - keramika, PI - tvrzené plasty, SK - slinuté karbidy, V – PI - vláknově vyztužené plasty,

3.1.2 Řezná rychlost – PKNB

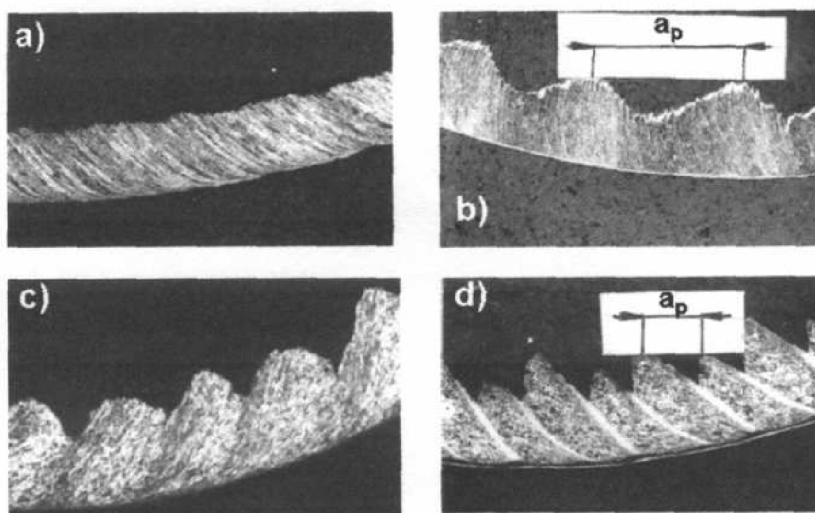
Řezná rychlost kubického nitridu boru je při standardních obráběcích metodách srovnatelná. Pro kalené oceli, které dosahují tvrdosti 60 – 68 HRC, je možné obrábět reznou rychlostí $45 - 60\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuv na otáčku je $0,2 - 0,4\text{ mm}$. Tyhle plochy už není potřeba přebušovat a nástroj se používá jako dokončovací nástroj, což je velmi využíváno při renovaci kalených forem. Pro srovnání s ostatními reznými materiály a jejich dosahovanými reznými rychlostmi je použita následující tabulka (Tab. 3.2). [1]

Tab. 3.2 Řezné rychlosti pro vybrané řezné materiály [1]

Řezný materiál	Řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	Posuv f [mm]
HSS	30 – 50	0,05 – 0,50
HSS + PVD	30 – 80	0,05 – 0,80
Slinutý karbid WC + CO	50 – 250	0,08 – 1,00
Slinutý karbid TiC + Co	80 – 250	0,05 – 0,40
Slinutý karbid + PVD	80 – 250	0,20 – 0,80
Slinutý karbid + PVD	100 – 350	0,02 – 1,20
Řezná keramika - oxidická	250 – 500	0,05 – 0,30
Řezná keramika – směsná	300 – 1 000	0,05 – 0,40
PKNB	400 – 1 200	0,20 – 0,60

3.2 Třísky

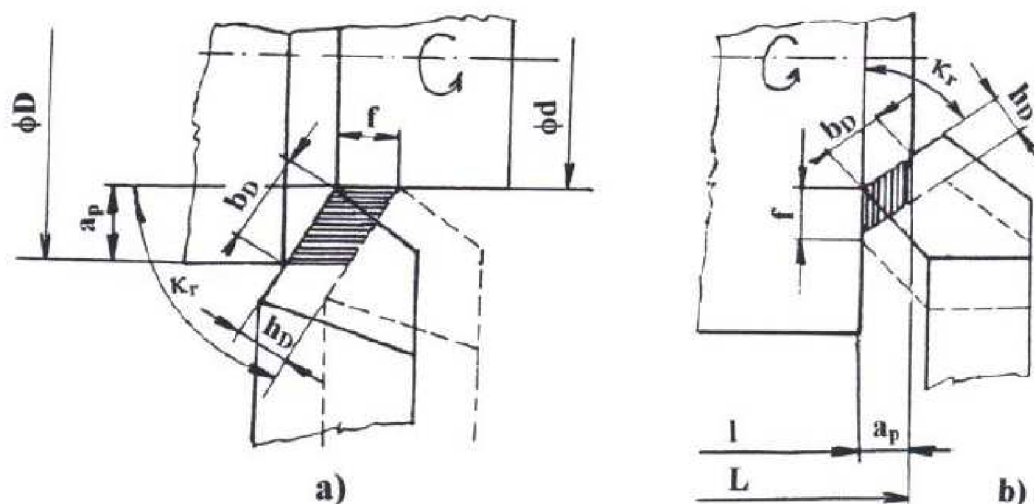
Při obráběcím procese je nedílnou částí odebíraná tříška. Je velmi důležitá pro odvod teploty z obráběného místa, ale taky má vliv na trvanlivost nástroje, dosahovanou finální drsnost obrábění plochy a je sníženo i ekonomické hledisko v množství a skladování samotné třísky. Třísky mají různý průřez, ale taky tvar a délku. Proces obrábění je možno vylepšit použitím utvářeče, který třísku zkrátí a může tak zachránit nástroj a zamezit namotání třísky na nástroj. Tvary třísek je možno rozdělit do čtyř skupin. Je to od třísky plynulé, která je ideální přes zvlněnou či článkovitou až ke třísce segmentové (Obr. 3.2). Nejideálnější jsou třísky, které jsou plynulé a zároveň krátké. Vždy to záleží na správně zvolených řezných podmínkách, jak ze strany obráběného materiálu, tak ze strany obráběcího nástroje. [25]



a) plynulá ; b) vlnitá ; c) elementární ; d) pilová

Obr. 3.2 Tvary třísek [25]

Definovat třísku z matematického pohledu je možno několika způsoby, ale nejčastěji se používá průřez třísky (vzorec 3.2), který je definovaný pomocí jmenovité šířky třísky a jmenovité tloušťky třísky. Případně se vyjadřuje pomocí šířky záběru a posuvu. To je v našem případě předvedeno na soustružení čelní plochy (Obr. 3.3). [20]



a) válcová plocha, b) čelní plocha,

a_p - šířka záběru ostří, b_D - jmenovitá šířka třísky, h_D - jmenovitá tloušťka třísky,
 κ_r - nástrojový úhel nastavení hlavního ostří, D - průměr obráběné plochy, d - průměr
 obrobené plochy, L - délka obráběné plochy, l - délka obrobené plochy

Obr. 3.3 Průřez třísky – soustružení válcové plochy [20]

Průřez třísky :

$$A_D = b_D \cdot h_D = a_p \cdot f \quad [mm^2] \quad (3.2)$$

Kde : b_D - Jmenovitá šířka třísky [mm]

h_D - Jmenovitá tloušťka třísky [mm]

a_p - Šířka záběru ostří [mm]

u podélného soustružení $a_p = 0,5 (D - d)$ [mm]

u čelního soustružení $a_p = L - l$ [mm]

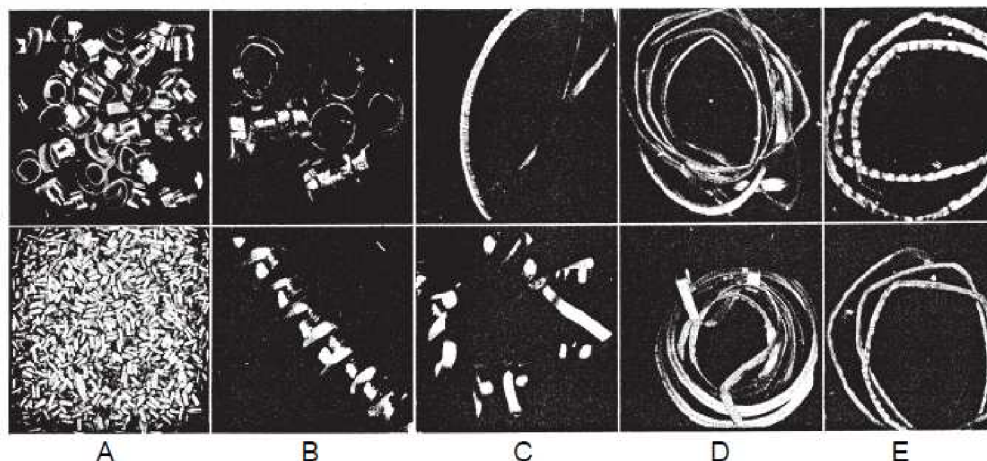
f - Posuv na otáčku obrobku [mm]

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad [mm] \quad (3.3)$$

$$h_D = f \cdot \sin \kappa_r \quad [mm] \quad (3.4)$$

3.2.1 Třísky – diamant

Dosahované třísky u obrábění diamantem záleží vždy na druhu materiálu a na řezných podmínkách. Skutečností ale zůstává, že diamantové nástroje jsou výhodné díky své vlastnosti nízké adheze. To znamená, že obráběný materiál se příliš nepřilepuje na nástroje. Jak už bylo řečeno, diamant se používá pro obrábění neželezných materiálů a to v největší míře pro obrábění hliníkových slitin. Proto budou vybrány některé slitiny hliníku za určitých parametrů jako řezná rychlost a otáčky (Tab. 3.3) a bude sledováno, jaké jsou docílené druhy třísek. Druhy třísek jsou rozděleny do pěti skupin pojmenovány od písmene A do písmene E (Obr. 3.4).



Obr. 3.4 Tvary třísek [26]

Pět základních skupin :

- A - velmi krátká a lámavá tříska, dobře obrobitelný materiál, vynikající jakost povrchu
- B - stočená nebo dělená tříska, dobrý až výborný povrch
- C - plynulá tříska, dobrá jakost povrchu
- D - plynulá tříska, vyhovující povrch
- E - špatná tříska, nutné nastavit podmínky obrábění, aby bylo dosaženo lepší třísky a lepší jakosti povrchu

Tab. 3.3 Řezné podmínky pro získání tvaru třísek [26]

Obrobitelná skupina	Slitina	Rychlost (m/min)	Posuv (mm/ot)	
			dolní snímek	horní snímek
A	2011-T3	120	0,066	0,152
B	2024-T4	30	0,152	0,264
C	6061-T6	120	0,152	0,264
D	3004-H32	120	0,152	0,264
E	1100-H12	120	0,152	0,264

3.2.2 Třísky - PKNB

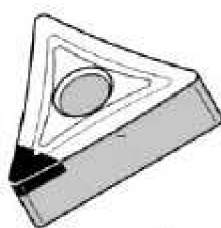
Proces obrábění při použití kubického nitridu boru je obdobný jako u diamantu. Při obrábění kalených ocelí tvrdostí do 65 HRC je upřednostňováno, aby byly třísky krátké a drobné, aby nedocházelo k poškození nástroje. Při obrábění litin je potřeba si uvědomit, že je zde velmi namáhán nástroj a taky, že litina obsahuje póry a nečisty. Nicméně na tvorbu třísky je to spíše přínosné, jelikož se třísky utrhnou díky pórům. V tabulce (Tab. 3.4) jsou uvedeny pro představu parametry obrábění kubickým nitridem bóru od firmy Kennametal, kde lze pozorovat výsledný průřez třísky. Řezná rychlost preferovaného typu KB9610 se pohybuje $v_c = 100 - 260 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Tab. 3.4 Doporučené pracovní podmínky a výsledná třísky [27]

Typ operace	Řezné podmínky		Typ řezu		
	a_p [mm]	f [mm]	Proměnlivý průřez třísky	Konstantní průřez třísky	Těžce přerušovaný řez
Jemné dokončování	0,1 – 1,0	0,1 – 0,4	KB9610	KB9610	-
Dokončování	0,1 – 0,5	0,063 – 0,25	KB5625	KB5625	KB5625
Polohrubování	1,0 – 4,0	0,1 – 0,4	KB9610	KB9610	KB9640

3.2.3 Utvařeč

Při obrábění je velký problém s třískou a tak byly vymyšleny utvařeče. Utvařeč třísky je definován jako oblast čelní plochy nástroje určeného pro lámání či smotávání třísky. Toho může být docíleno pomocí vhodně zvoleného tvarovaného čela nebo přiložením utvařeče. Na obrázku (Obr. 3.5) je vidět možnost provedení utvařeče vybroušeného přímo na vyměnitelné destičce. Další možnost je přidání mechanického utvařeče přímo na čelo nástroje. [20]



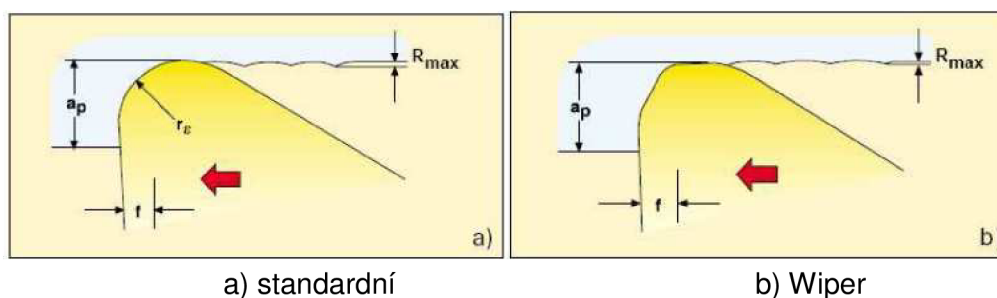
a) roubík PD, tvar T, utvařeč



b) monolitní PKNB - vybroušený utvařeč

Obr. 3.5 Vyměnitelné destičky [20]

Další velmi používanou metodou v praxi je použití hladící geometrie „WIPER“ přímo na vyměnitelnou břitovou destičku (Obr. 3.6). Díky použití této technologie je docíleno daleko lepších výsledných parametrů, jako je drsnost a tvrdost povrchu. Při použití této technologie není potřeba přebroušovat a odpadá zbytečná operace, která snižuje cenu výsledného produktu. Ve srovnání se standardní geometrií je vidět, že R_{max} je u metody Wiper lepší.

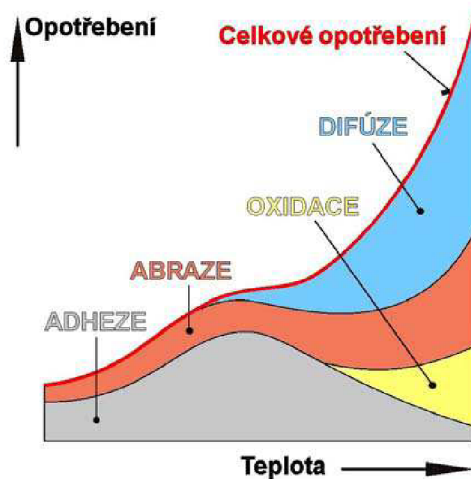


Obr. 3.6 Geometrie nástroje [28]

3.3 Opotřebení

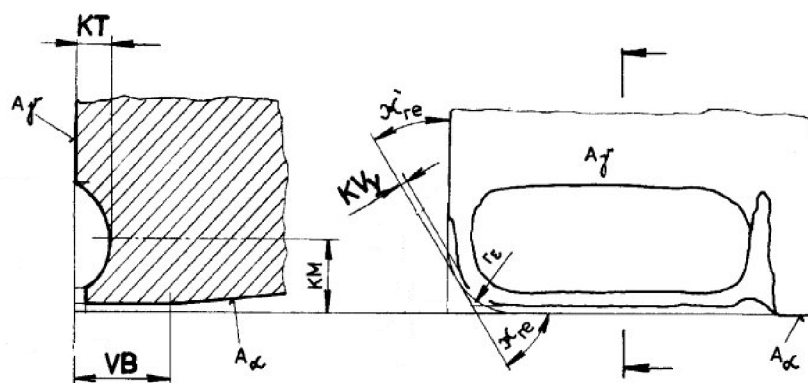
Na začátku je potřeba si dát pozor, ať se nespletou dva pojmy a to trvanlivost a opotřebení. Opotřebení je definováno jako výsledek, který je dosažen vzájemným kontaktem a relativním pohybem během obráběcího procesu mezi nástrojem, obrobkem a taky samozřejmě třísky. Opotřebení je velmi složitý děj, který může být ovlivněn několika faktory např. mechanickými vlastnostmi nástrojového a obráběného materiálu, geometrií nástroje, typu operace, řezným prostředím, ale taky chemickou reakcí mezi nástrojem a obrobkem. Hlavní mechanismy opotřebení v závislosti na čase (Obr. 3.7), kam patří: [20]

- abraze – je to brusný otěr, který vzniká z tvrdých částic obráběného materiálu i z nástroje
- adheze – jedná se o porušení mikro - sváru za působení vysokých teplot a tlaků a taky chemické příbuznosti materiálů
- difúze – je to migrace atomů mezi obráběným a nástrojovým materiálem
- oxidace – vznik chemických reakcí na povrchu z důvodu kyslíku v okolí
- plastická deformace – je způsobena vysokou teplotou a mechanickým zatížením, které může mít zapotřebí lavinové opotřebení
- křehký lom – způsoben vysokými mechanickými zatíženími (přerušovaný řez, vměstky a nečistoty v obráběném materiálu)
- mechanická únava – únava samotného materiálu



Obr. 3.7 Vliv teploty na jednotlivé opotřebení [20]

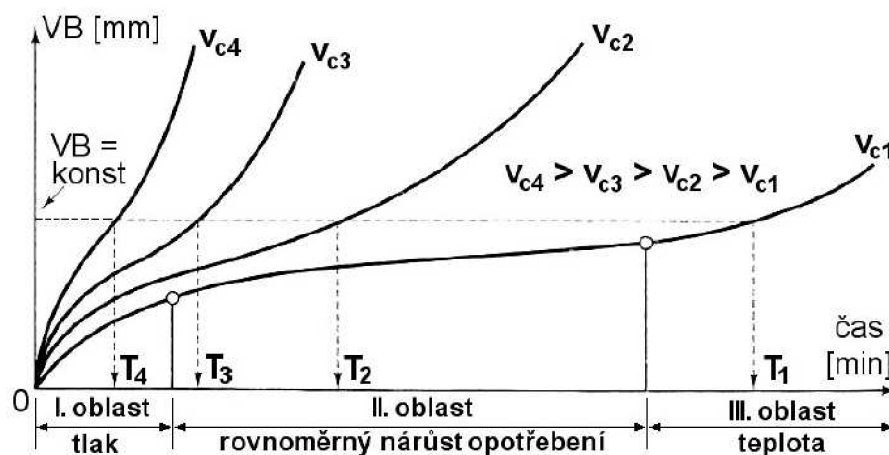
Opotřebení lze definovat podle několika kritérií a parametrů. Nejznámější a nejpoužívanější je použití šířky fazetky, hloubky výmolu a radiální opotřebení špičky. (Obr. 3.8). Bohužel tohle značení nekoresponduje s normou ČSN ISO 3685, která se liší převážně jen indexy např. VB_B - VB . [20]



Obr. 3.8 Kritéria opotřebení [20]

Kde : **VB** - šířka fazetky opotřebení na hřbetě [mm]
KT - hloubka výmolu na čele [mm]
KV_y - radiální opotřebení špičky [mm]

Nejlepší a nejvhodnější hodnota kritéria VB se pohybuje v rozmezí 0,2 – 0,8 mm. Na obrázku (Obr. 3.9) je znázorněn průběh obrábění materiálů na čase za konstantních řezných podmínek, ale za různých řezných rychlostí ($V_{c1} - V_{c4}$), kde V_{c1} je nejmenší řezná rychlost. [20]



Obr. 3.9 Časová závislost opotřebení [20]

Oblasti [20] :

- Oblast I – je charakterizována velkým nárůstem hodnoty VB a je způsobena velkým měrným tlakem, který vzniká díky styku hřebene nástroje a pěchovanou plochou
- Oblast II – je charakterizována rovnoměrným nárůstem, který je způsoben mechanickými vlastnostmi
- Oblast III – je charakterizována zvýšenou intenzitou opotřebení, která vzniká tepelným zatížením na nástroji

3.4 Trvanlivost

Definice trvanlivost řezného nástroje je součet všech „čistých“ časů řezání. A to od obrábění nového nástroje až k jeho opotřebování, které určuje výrobce. Každopádně to musí být do definovaného tvaru nástroje, jeho rozměru a zároveň musí nástroj po celou dobu trvanlivosti dosahovat kvalitu povrchu. Pro trvanlivost je používán symbol T a jeho jednotkou jsou minuty. Samozřejmostí je, že trvanlivost a opotřebení nástroje záleží na obráběcí metodě, zároveň na vlastnostech obráběného materiálu a materiálu nástroje a v neposlední řadě na řezných podmínkách. Jako první zjistil Frederick Winslow Taylor, že nejvíce ovlivňuje trvanlivost právě řezná rychlost a díky tomu vznikl vztah pro trvanlivost (vzorec 3.5). [20]

$$T = \frac{c_T}{v_C^m} \quad [\text{min}] \quad (3.5)$$

Kde : C_T - Konstanta [-]
 v_c - řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
 m - konstanta ($\text{tg } \alpha$) [mm]

Častěji se, ale využívá vzorec (3.6), jelikož konstanta C_T je vyjádřena v $10^9 - 10^{13}$. [20]

$$v_C = \frac{C_V}{T^{1/m}} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (3.6)$$

Kde : C_V - Konstanta [-]

Další možností využití vztahů převážně v praxi je pomocí závislostí $T-v_C$ (vzorce 3.7 a 3.8). Jelikož předchozí vztahy omezují použití posuvu, šířky záběru a kritérium opotřebení je konstantní. [20]

$$v_{cT} = \frac{C_{vT}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (3.7)$$

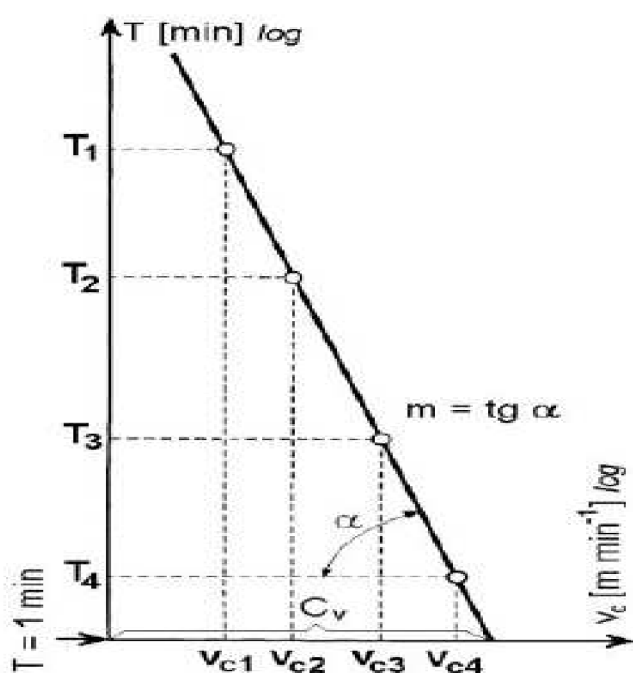
Kde : v_{cT} - řezná rychlost při konstantní trvanlivosti
 (např. v_{c30} znamená řeznou rychlost při trvanlivosti $T=30$ minut)
 [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

C_{vT} - konstanta [-]
 x_v - exponent, vyjadřuje vliv hloubky řezu [-]
 y_v - exponent, vyjadřuje vliv posuvu na otáčku [-]

$$v_c = \frac{c_{v1}}{T^{1/m} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (3.8)$$

Kde : c_{v1} - konstanta [-]

Na předem vybraných kritériích jsou vybrány hodnoty z časových křivek **VB** a jsou odečteny jednotlivé hodnoty trvanlivost $T_1 - T_4$, kterým patří konkrétní řezná rychlost $v_{c1} - v_{c4}$ z grafu (Obr. 3.10). Hodnoty jednotlivých řezných rychlostí a trvanlivostí jsou následně zaneseny do grafu, kde jsou jednotlivé hodnoty vyjádřeny v logaritmických jednotkách a kde následně vytvoří přímku. Hodnoty konstanty m je možné stanovit pomocí goniometrické hodnoty α . Poté je možné odečíst hodnotu C_v , která se nachází na ose řezných rychlostí v souřadnicích x . Další hodnotu C_T není možné z grafu vyčíst a proto se používá matematického výpočtu. Pro určení hodnot existuje několik možností. Je to metoda grafická, graficko – analytická nebo za použití počítače.

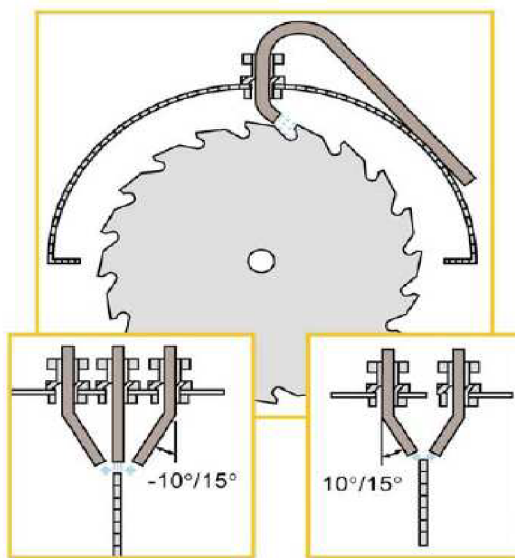


Obr. 3.10 Závislost $T - v_c$ [20]

3.5 Řezné prostředí

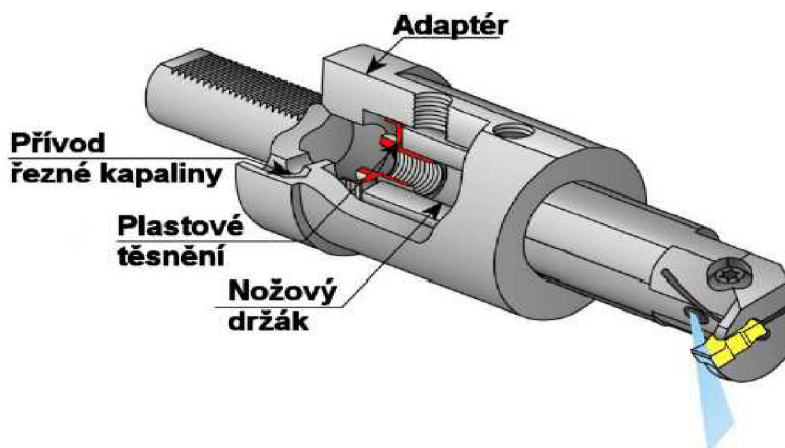
Při obrábění materiálu pomocí supertvrdých řezných materiálů je nedílnou součástí řezné prostředí. Jedná se o prostředí, které je přímo kolem obráběného místa – řezu. Jako řezné prostředí může být považován vzduch, který je všude přítomen. Tohle obrábění se nazývá obráběním suchým a je možné jej použít pouze u nástrojů, kde výrobce nedoporučuje chlazení. Další možností jsou chladicí vodní roztoky, emulzní kapaliny a oleje. Může být použito chlazení, jak v pevném stavu, tak i v kapalném. Chlazení slouží k odvodu tepla, které vzniká jak z řezného nástroje, obráběného materiálu a taky k odvodu třísky z místa obrábění. Emulze může být do místa přiváděna pomocí hadičky, kde proud odvádí třísku, ale taky je možné používat chlazení pod tlakem, kde je na místo obrábění zaměřen proud emulze, který odstříkne třísku z požadovaného místa.

Kapaliny můžou být do místa přiváděny pod tlakem standardním, ale taky pod tlakem 11 MPa či 20 MPa nebo dokonce i vyšším. Další možností je použití plynného prostředí, kde se používá CO₂ nebo je možnost použití dalších plynů jako např. Argon. V některých případech se používá i dusík – podchlazená kapalina. Další ne příliš známou metodou je použití chlazení „řeznou mlhou“ (Obr. 3.11). Tahle metoda je charakteristická přívodem kapaliny pod tlakem vzduchu, který vytéká rychlostí až 300 m za sekundu. [20]



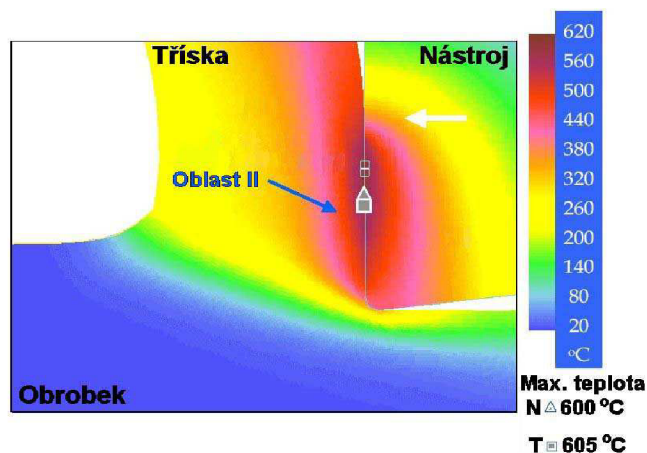
Obr. 3.11 Chlazení mlhou [20]

Jinou možností pro chlazení je vnitřní chlazení, kdy je v nástroji kanálek, kterým je kapalina dodávána až na břit nástroje a celá soustava je ukrytá uvnitř. Tahle metoda je stále vyhledávanější pro její elegantnost, ale taky díky své přednosti, že pokud jsou vrtány hluboké díry, neexistuje jiná možnost než použít nástroj s vnitřním chlazením. U soustružnického nože (Obr. 3.12) nabízí tuhle metodu firma Iscar. [20]



Obr. 3.12 Vnitřní nůž s chlazením [20]

Pro představu jaké jsou teploty jednotlivých částí při obrábění je uveden následující obrázek (Obr. 3.13). Na obrázku lze vidět, že nejvíce teplotně zatížená část je mezi nástrojem a třískou. To ovšem záleží taky na řezné rychlosti, jelikož v případě použití nízkých řezných rychlostí je nejvíce ovlivněna špička nástroje. S přirůstající rychlosti se nejvíce ovlivněná oblast posuje směrem od špičky. Dosahované teploty mezi obráběnou plochou mohou dosahovat až teplot kolem 1 200 °C.



Obr. 3.13 Teplotní pole [20]

3.5.1 Řezné prostředí – nástroj diamant

Existuje spousta názorů na to, zda při použití řezného materiálu diamantu provádět během obrábění chlazení. Jedna část je proti, ale většina oslovených se přiklání na stranu chladit. A to s použitím chlazení s nízkým množstvím kapaliny – hlavním důvodem je ekologičnost a náklady na likvidaci. Nebo chladit za pomoci vysokých tlaků kapaliny. Hlavním důvodem, proč používat chlazení při obrábění je, že při obrábění diamantem používáme velké řezné rychlosti a tím pádem jsou dosahovány i vysoké teploty. Výhody při nízkém tlaku a vysokém tlaku jsou srovnány v praktickém příkladě (Tab. 3.5). Při obrábění slitiny titanu za rozdílných tlaků nám proces umožňuje dvojnásobných dosahovaných hodnot. [29]

Tab. 3.5 Chladicí tlak kapaliny – vysoký a nízký [29]

Nástroj	PKD	PKD
Tlak chladicí kapaliny [MP]	0,3	7
Hloubka řezu [mm]	0,3	0,3
Délka řezu [mm]	12,7	12,7
Počet otáček [1/min]	1361	2722
Řezná rychlost [m/min]	45	90
Čas na operaci [s]	8	2,5
Počet kusů na nástroj	500	1000

3.5.2 Řezné prostředí – nástroj PKNB

Názor na používání chladicí kapaliny při použití kubický nitrid je podobný jako při použití PKD. Firmu CeramTec, která se hlavně zabývá nástroji z kubického nitridu boru má široký sortiment, v kterém nabízí jak výměnné destičky, tak i celistvé nástroje. Pro většinu svých nástrojů doporučuje používat chladicí kapalinu. Základní použití vybraných nástrojů od firmy CeramTec a aplikace řezného prostředí je uvedena v tabulce níže (Tab. 3.6).

Tab. 3.6 Použití chladicí kapaliny u nástrojů firmy CeramTec [30]

Obráběný materiál	Zkratka nástroje	Chlazení
Kalená ocel – dokončovací operace - přerušovaný řez	WBN550	Ano
Kalená ocel – dokončovací operace - plynulý řez	WBN600	Ano / ne
Kalená ocel - hrubování	WBN100	Ne

V praxi ale existuje i možnost bez použití chladicí kapaliny při obrábění materiálu při operaci soustružení (Obr. 3.14).



Obr. 3.14 Soustružení PKNB bez chladicí kapaliny [23]

4 TECHNOLOGICKO – EKONOMICKÁ ANALÝZA NASAZENÍ NÁSTROJŮ ZE SUPERTVRDÝCH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

Při použití rezného materiálu záleží vždy na vhodně zvolených rezných podmínkách. U obrábění ze supertvrдых rezných materiálů to platí dvakrát více nežli u standardních materiálů. Hlavním důvodem je pořizovací cena nástroje a ta v tomhle případě je vyšší. Z tohoto důvodů před koupí nebo použitím diamantového nástroje nebo nástroje z kubického nitridu boru musíme spočítat náklady a návratnost použitého nástroje. Jedná se o optimalizaci výrobních nákladů. Musíme určit, zda není jiná metoda obrábění jednodušší nebo levnější. Zda je potřeba používat jeden nástroj nebo dva. Taky si musíme určit reznou rychlost, otáčky a musíme počítat s trvanlivostí nástroje a taky zda budeme používat chladicí kapalinu nebo budeme obrábět bez ní. Z toho důvodu se v praxi používám výpočet (vzorec 4.1) pro výrobní náklady na jeden kus – N_c . [1]

$$N_c = N_s + N_n + N_v \quad [\text{Kč/ks}] \quad (4.1)$$

Kde : N_c - celkové operační výrobní náklady [Kč/ks]

N_s - náklady na strojní práci [Kč/ks]

N_n - náklady na stroj a jeho výměnu vztažené na 1 obráběný kus [Kč/ks]

N_v - náklady na vedlejší práci [Kč/ks]

4.1 Náklady na strojní práci

Za náklady na strojní práci (vzorec 4.2) považujeme čas automatického chodu stroje a musí zohlednit jak profil nástrojového břitu, tak dráhu nástroje během obrábění plus jeho náběh a přeběh. [1]

$$N_s = t_{AS} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = t_{AS} \cdot N_{sm} = \frac{l_n + l + l_p}{n \cdot f} \cdot N_{sm} \quad [\text{Kč/ks}] \quad (4.2)$$

Kde : t_{AS} - čas chodu stroje [min]

N_{SM} - minutová sazba stroje [Kč/min]

l_n - délka náběhu [mm]

l - délka obráběného materiálu [mm]

l_p - délka přeběhu [mm]

L - celková délka ($l_n + l + l_p$) [mm]

4.2 Náklady na nástroj a jeho výměnu

Do nákladů na nástroje (vzorec 4.3) je považována pořizovací cena rezného nástroje a náklady na jeho samotnou výměnu. Vztahuje se to vždy na trvanlivost jedné břitové destičky a kolik obrobím díky ní kusů.

$$N_N = \frac{N_T}{Q_T} \quad [\text{Kč/ks}] \quad (4.3)$$

Kde : N_T - náklady na nástroj a jeho výměnu [Kč]

Q_T - trvanlivost břitu a počet obrobených kusů [ks]

Pro vyměnitelnou destičku je v praxi častější výraz (vzorec 4.4), kde je možnost vycházet i z ceny držáku a jeho nastavením. [1]

$$N_T = \frac{N_1}{n_B} + \frac{N_2}{z} + N_S \quad [\text{Kč}] \quad (4.4)$$

Kde : N_1 - cena vyměnitelné břitové destičky [Kč]

N_2 - cena držáku [Kč]

n_B - počet břitů vyměnitelné břitové destičky [-]

z - životnost držáku [-]

N_S - náklady na seřízení držáku [Kč]

Další možností jak vypočítat trvanlivost břitu a počet obrobených kusů (vzorec 4.5). [1]

$$Q_T = \frac{T}{\lambda \cdot t_{AT}} \quad [\text{Ks}] \quad (4.5)$$

Kde : T - trvanlivost břitu [min]

$\lambda \cdot t_{AT}$ - čas řezání, kdy je nůž v záběru a vytváří třísku [min]

4.3 Náklady na vedlejší práci

Náklady na vedlejší práci jsou náklady, co jsou spojené s výrobou, ale nepatří do ceny stroje ani obrábění. Patří sem práce pracovníka a další náklady. Výraz pro výpočet vedlejších nákladů (vzorec 4.6) je obdobný jako náklady na strojní práci. [1]

$$N_V = t_{AS} \cdot \frac{D_V}{60} = t_{AS} \cdot N_{Vm} \quad [\text{Kč/ks}] \quad (4.6)$$

Kde : D_V - hodinová sazba na vedlejší práci [Kč/min]

N_{Vm} - minutová sazba na vedlejší čas [Kč/min]

Pro určení a zahrnutí dělníka je používán další výraz (vzorec 4.7). [1]

$$D_V = M \cdot \left(1 + \frac{R}{100}\right) \quad [\text{Kč}] \quad (4.7)$$

Kde : M - mzdový tarif pro dělníka [Kč]

R - režijní náklady dílny [Kč]

Konečný výraz pro výpočet celkových operačních nákladů v rozepsaném formátu (vzorec 4.8). [1]

$$N_c = N_s + N_n + N_v = \frac{L}{n \cdot f} \cdot N_{sm} + \frac{L}{T \cdot n \cdot f} \cdot N_T \cdot \lambda + t_{AT} \cdot N_{Vm} \quad (4.8)$$

[Kč/ks]

Pro výpočet n – otáček obrobku platí výraz (vzorec 4.9), který získáme ze základního vzorce pro řeznou rychlost. [1]

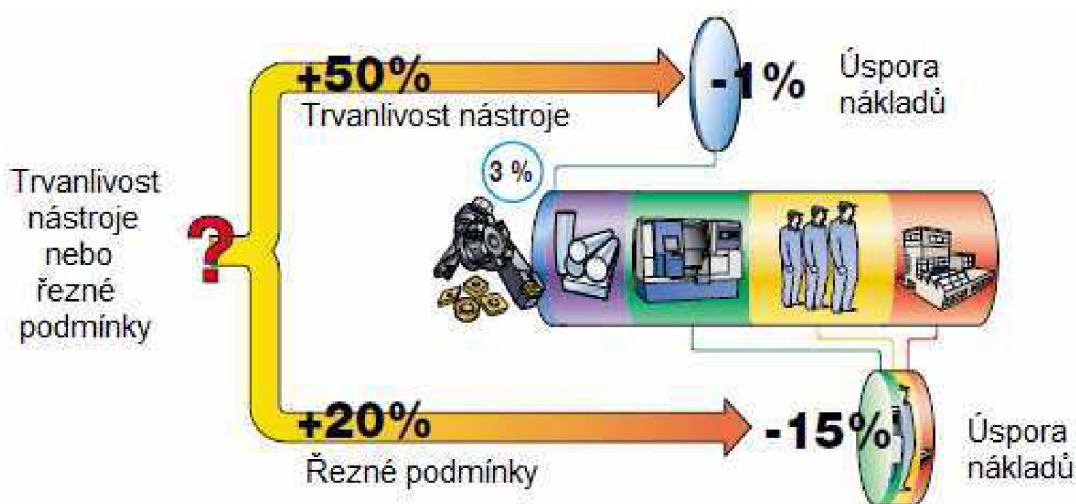
$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (4.9)$$

4.4 Náklady na řeznou kapalinu

Při obrábění je potřeba zvážit i zda použít chladicí kapaliny. V případě, že je použita chladicí kapalina je potřeba si uvědomit, zda kapalina proudí v uzavřeném systému nebo zda je přiváděna stále nová. Další náklady s použitím kapaliny jsou spojeny s ekologickým zničením kapaliny. Tyhle všechny aspekty je nutné zhodnotit a počítat s nimi.

4.5 Srovnání trvanlivosti a řezných podmínek

Při volbě nástroje – břitové destičky je zapotřebí zhodnotit i hlediska trvanlivosti a řezných podmínek, které se dotýkají ekonomie řezného procesu. Je potřeba si uvědomit, že v případě zvýšení trvanlivosti nástroje o 50 % dosáhneme úspory nákladů o jedno procento a to v oblasti nástroje a řezných destiček. V případě zvýšení řezných podmínek o 20 % dosáhneme úspory nákladů o 15% a to ovlivňuje stroj, operátory a úspora energie (Obr. 4.1).



Obr. 3.13 Úspory nákladů [35]

5 DOSAHOVANÉ PARAMETRY OBROBENÝCH PLOCH PŘI APLIKACI NÁSTROJŮ ZE SUPERTVRDÝCH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

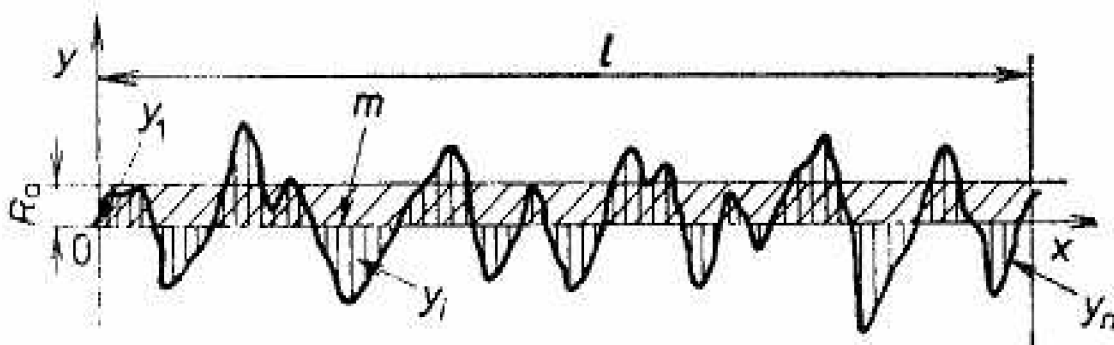
Při obráběcím procesu se hodnotí správně nastavené parametry, jakož je řezná rychlost, vhodně zvolený nástroj, obráběný materiál a další parametry. Jako výsledný ukazatel, zda byl řezný proces vhodně zvolen, je hodnocena dosahovaná drsnost obráběného výrobku a jeho tvarové rozměry. V případě špatně nastavených podmínek může dojít k tomu, že je předepsaná drsnost vyšší a tím může dojít k nefunkčnosti celého kompletu, kde je obrobek použit. V dalším případě, pokud je špatně zvolený stroj a metoda, není možné dosáhnout tvarového rozměru předem určené součásti a tak se stává celý výrobek nevyhovující a není možné jej použít.

5.1 Drsnost

Drsnost je na povrchu materiálu a je to nerovnost po obráběcí operaci. Drsnost je měřena kolmo na obráběnou stopu po obráběném nástroji. Velikost drsnosti je možné definovat několika parametry, přičemž v praxi je nečastěji uváděna drsnost R_a . Dalšími parametry pro určení drsnosti jsou R_z , R_m , S_m , R_t a V_{DI} .

5.1.1 Střední aritmetická úchylka profilu R_a

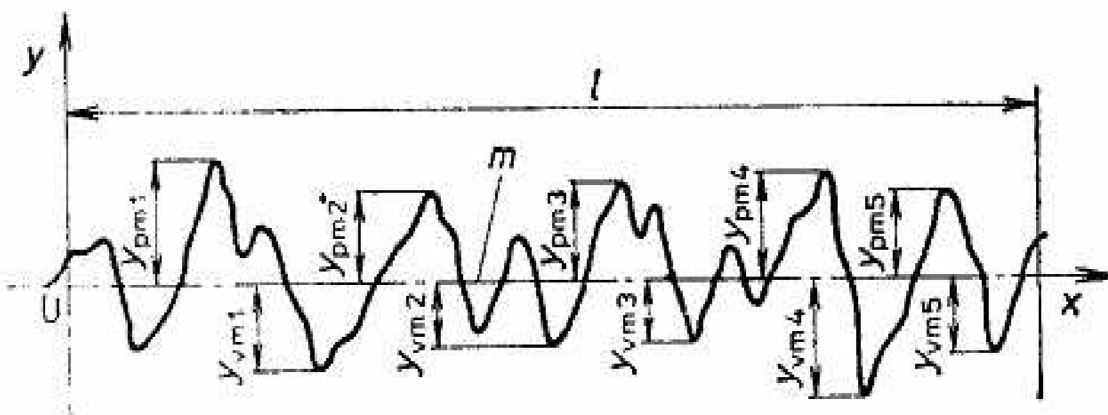
Je to střední aritmetická úchylka profilu v rozsahu základní délky. Bohužel tenhle parametr drsnosti je nepřesný a udává jen střední hodnotu vzdálenosti jednotlivých bodů od střední čáry (Obr. 5.1).



Obr. 5.1 Profil R_a [3]

5.1.2 Střední hodnota aritmetické výšky R_z

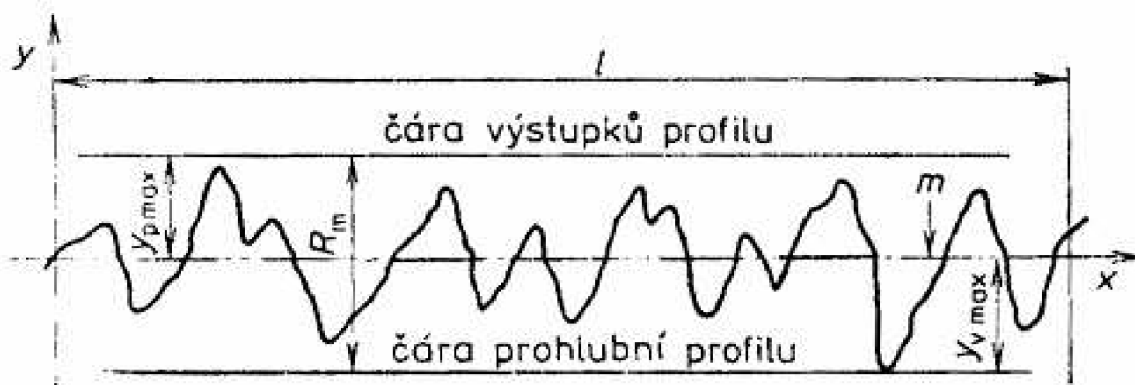
Z normy je střední hodnota aritmetické výšky R_z definována jako střední hodnota absolutních výšek pěti nejvyšších vrcholů a hloubek na měřené délce (Obr. 5.2). Používá se u povrchů, kde je hrubý povrch. [3]



Obr. 5.2 Profil R_z [3]

5.1.3 Nejvyšší výška profilu R_m

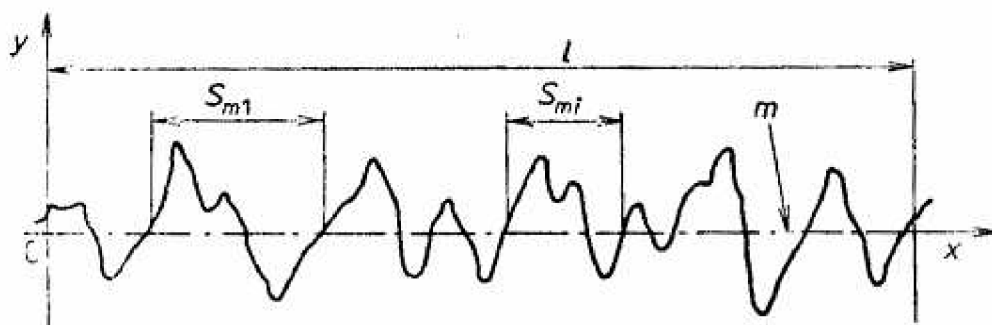
Nejvyšší výška profilu R_m je definována jako vzdálenost mezi nejvyšší čarou výstupku profilu a nejhlubší čarou prohloubení profilu (Obr. 5.3). Je použita jen jako doplňková hodnota měřeného profilu, protože ve velkém počtu případů nevyjadřuje správnou drsnost profilu. [3]



Obr. 5.3 Profil R_z [3]

5.1.4 Střední rozteč profilu S_m

Střední rozteč profilu S_m je definována jako střední hodnota rozteče nerovnosti profilu v rozsahu základní délky (Obr. 5.4). [3]



Obr. 5.4 Profil rozteče profilu S_m [3]

5.1.5 Dosahované drsnosti supertvrdých materiálu

Při obrábění supertvrdými reznými materiály záleží z pohledu drsnosti na několika vstupních parametrech. Jako je rezná rychlost, stav stroje – jeho kmitání, opotřebování nástroje a druhu materiálu. Pro představu srovnáme některé dosahované drsnosti dokončovacích operací u různých obráběcích operací (Tab. 5.1). U těchto operací je zapotřebí, aby bylo obrábění za vyšších rezných rychlostí, malé hloubky řezu a malé posuvy.

Tab. 5.1 Porovnání dokončovacích operací [33]

Způsob dokončování	IT	Ra [μm]
Jemné soustružení	3 - 5	0,2 ÷ 0,8
Jemné frézování	6 - 8	1,6
Jemné broušení	3 - 4	0,4

6 EXPERIMENTÁLNÍ SROVNÁNÍ

V praktické části je řešeno obrábění na dvou vzorcích hliníku pomocí nástroje z diamantu a slinutého karbidu. V druhém pokusu bude srovnána zakalená ocel a následné obrábění nástrojem z kubického nitridu boru a pomocí slinutého karbidu taky na dvou vzorcích. Na obráběcím centru je demonstrována operace soustružení a jeho dosahované parametry. Nástroje jsou od firmy Iscar, která je jedna ze špičkových firem na našem trhu zabývající se obráběcími nástroji.

6.1 Volba součásti

Při praktickém pokuse byl zvolen materiál slitiny hliníku s označením D16T a kalená ocel 19 312, která byla zakalena na tvrdost HRC 52. Výchozí průměr kulatiny u slitiny hliníku byl zvolen na průměr 130mm, který byl následně 3x obroben při použití slinutého karbidu (Tab. 6.1) a při použití diamantu 2x (Tab. 6.2). U druhého pokusu z kalené oceli byl výchozí průměr 40mm a byl následně obroben pomocí slinutého karbidu a kubického nitridu boru (Tab. 6.3) na průměr 38mm.

Tab. 6.1 Vzorek č.1 – Materiál obráběný slinutým karbidem

Materiál	Výchozí průměr [mm]	Konečný průměr [mm]	Obráběná délka [mm]
D 16T	130	124	80
	124	116	80
	116	114	40

Tab. 6.2 Vzorek č.2 – Materiál obráběný diamant

Materiál	Výchozí průměr [mm]	Konečný průměr [mm]	Obráběná délka [mm]
D 16T	130	127	80
	127	126	80

Tab. 6.3 Vzorek č.3,4 – Materiál obráběný SK a kubickým nitridem boru

Materiál	Výchozí průměr [mm]	Konečný průměr [mm]	Obráběná délka [mm]
19 312	40	38	50

6.2 Volba stroje

Pro obrábění součástí za použití supertvrdých řezných materiálů byl zvolen CNC soustruhu MASTURN MT 54/800 (Obr. 6.1), který je standardně používán ve firmě CSO Staré město. Parametry stroje jsou v tabulce níže (Tab. 6.4).

Tab. 6.4 Parametry obráběcího stroje

Parametr	Hodnota
Kategorie stroje	Soustruh - CNC
Typ	MASTURN MT 54/800
Výrobce	Kovosvit MAS
Rok výroby	2005
Oběžný průměr nad ložem	540 mm
Vzdálenost mezi hroty	800 mm
Oběžný průměr nad suportem	350 mm
Vrtání vřetene	82 mm
Rozměry stroje dxšxv	2538x1750x1795 mm
Hmotnost stroje	2730 kg
Řídicí systém	Heidenhain MANUAL PLUS 4110
Nástrojová hlava	SAUTER Mutlifix C



Obr. 6.1 Obrázek obráběcího stroje

6.3 Volba řezných nástrojů

Při volbě řezných nástrojů je potřeba vycházet z možností nástrojového držáku, který je možné použít ve stroji, aby byla možnost použít řezný plátek. Pro pokus byly použity následující držáky a řezné destičky (Tab. 6.5). Břitové destičky byly zvoleny podle použití a taky dostupnosti. Všechny použité nástroje jsou od firmy Iscar.

Tab. 6.5 Nožové držáky a řezný plátek od firmy Iscar

Nožové držáky	Řezný plátek	Druh řezného plátku
MTJNR 2020K 16W	TNMS 160408-12 IC20	Slinutý karbid
DCLNR 2020K -12	CNMA 120404D ID5	Diamant
MWLNR 2020K 08W	WNMG 080408-GNIC807	Slinutý karbid
MWLNR 2020K 08W	WNGA 080408-M6IB10HC	Kubický nitrid boru

6.4 Řezné podmínky

Důležitým faktorem pro obrábění jsou řezné podmínky. Při volbě řezných podmínek je nutno vycházet z možností stroje (max. otáčky, průměr obráběného materiálu, délka materiálu) a možností řezného nástrojového materiálu (Tab. 6.6). V našem případě byl limit 3 000 otáček za minutu.

Tab. 6.6 Řezné podmínky při obrábění vzorků

Vzorek	Síla třísky [mm]	Posuv [mm]	Otáčky [min^{-1}]	Řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Čas obrábění [s]
1	3	0,26	1592	650	11,59
	4	0,26	1875	730	9,85
	1	0,12	2004	730	9,98
2	1,5	0,16	2450	1000	12,25
	1,5	0,16	2257	900	13,29
3	1	0,22	360	45	38,06
4	1	0,15	2787	350	7,18

Z tabulky dosahovaných řezných podmínek byla použita nevyšší řezná rychlost u diamantu. V případě srovnání vzorků ze slitiny hliníku D16T lze vidět, že otáčky, řezné rychlosti a čas obrábění při použití SK a diamantu jsou srovnatelné. Avšak při použití SK a KNB je vidět, že otáčky při použití KNB jsou skoro 8x vyšší a obrobená součást je 5x rychleji obrobená.

6.5 Technicko – ekonomické zhodnocení

Při ekonomickém hodnocení je potřeba řešit hlavně cenu destičky, její trvanlivost, počet řezných hran – zda je možnost řeznou destičku otočit nebo má pouze jednu řeznou hranu. Tím pádem nemusí být nejlevnější destička nejlevnější celkově, ale je potřeba to analyzovat a zhodnotit i z pohledu dosahovaných drsností a požadavků na povrch.

6.5.1 Technicko – ekonomické zhodnocení – diamant x SK

V tabulce (Tab. 6.7) jsou uvedeny základní informace o druhu použité destičky, počtu řezných hran, trvanlivost, ceny destičky a časy obrábění pro diamant a slinutý karbid.

Tab. 6.7 Řezné podmínky při obrábění vzorků

Řezný plátek	Druh řezného plátku	Trvanlivost [mm]	Posuv [mm]	Řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Čas obrábění [s]	Cena destičky [Kč]	Počet řezných hran
TNMS 160408-12 IC20	SK	60	0,12	730	9,98	153	3
CNMA 120404D ID5	PKD	150	0,16	900	13,29	2 622	1

V tomto případě nebyla provedena technicko - ekonomická analýza z důvodu limitovaných parametrů obráběcího stroje a nevhodného využití diamantové destičky. Aby bylo možné dosáhnout ideální využití řezných podmínek diamantu, bylo potřeba dosáhnout minimální řezné rychlosti $1900 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a otáčky 4655 za sekundu. Bohužel stroj povoluje max. 3000 otáček (v našem případě bylo max. 2450 otáček). Z tabulky je vidět, že cena destičky diamantu je několikrát dražší a je možno ji použít pouze jednou díky jedné řezné hraně. Čas obrábění je dokonce ještě pomalejší ve srovnání se slinutým karbidem.

6.5.2 Technicko – ekonomické zhodnocení – PKNB x SK

V tabulce (Tab. 6.8) jsou uvedeny základní informace o druhu použité destičky, počtu řezných hran, trvanlivost, ceny destičky a časy obrábění pro kubický nitrid boru a slinutý karbid.

Tab. 6.8 Řezné podmínky při obrábění vzorků

Řezný plátek	Druh řezného plátku	Trvanlivost [mm]	Posuv [mm]	Řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Čas obrábění [s]	Cena destičky [Kč]	Počet řezných hran
WNMG 080408-GNIC80 7	SK	30	0,22	45	38,06	271	6
WNGA 080408-M6IB10 HC	KNB	45	0,15	350	7,18	3848	6

Při srovnání kubického nitridu boru a slinutého karbidu je velký rozdíl v pořizovací ceně a době obrábění a trvanlivosti. Z pohledu počtu řezných hran jsou srovnatelné.

Náklady celkové

$$N_c = N_s + N_n + N_v \quad [\text{Kč/ks}] \quad (6.1)$$

Náklady na strojní práci

$$N_{S-SK} = t_{AS} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = t_{AS} \cdot N_{sm} = \frac{l_n + l + l_p}{n \cdot f} \cdot N_{sm} = \frac{5+40+0}{360 \cdot 0,22} \cdot 17 = 9,61$$

$$N_{S-KNB} = t_{AS} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = t_{AS} \cdot N_{sm} = \frac{l_n + l + l_p}{n \cdot f} \cdot N_{sm} = \frac{5+40+0}{2787 \cdot 0,15} \cdot 17 = 1,83 \quad (6.2)$$

[Kč/ks]

Náklady na nástroj a jeho výměnu

$$N_{T-SK} = \frac{N_1}{n_B} + \frac{N_2}{z} + N_S = \frac{271}{6} + \frac{1900}{1000} = 47,01$$

$$N_{T-KNB} = \frac{N_1}{n_B} + \frac{N_2}{z} + N_S = \frac{3848}{6} + \frac{1900}{1000} = 643,23 \quad (6.3)$$

[Kč]

$$Q_{T-SK} = \frac{T}{\lambda \cdot t_{AT}} = \frac{30}{38,06} = 0,79$$

$$Q_{T-KNB} = \frac{T}{\lambda \cdot t_{AT}} = \frac{45}{7,18} = 6,27 \quad (6.4)$$

[Ks]

Náklady na vedlejší práci

$$N_{V-SK} = t_{AS} \cdot \frac{D_V}{60} = t_{AS} \cdot N_{Vm} = 0,1 \cdot 1,6 = 0,16$$

$$N_{V-KNB} = t_{AS} \cdot \frac{D_V}{60} = t_{AS} \cdot N_{Vm} = 0,1 \cdot 1,6 = 0,16 \quad (6.5)$$

[Kč/ks]

$$D_{V-SK} = M \cdot \left(1 + \frac{R}{100}\right) = 250 \cdot \left(1 + \frac{650}{100}\right) = 1875$$

$$D_{V-SK} = M \cdot \left(1 + \frac{R}{100}\right) = 250 \cdot \left(1 + \frac{650}{100}\right) = 1875 \quad (6.6)$$

[Kč]

$$N_{c-SK} = N_s + N_n + N_v =$$

$$\frac{L}{n \cdot f} \cdot N_{sm-SK} + \frac{L}{T \cdot n \cdot f} \cdot N_{T-SK} \cdot \lambda + t_{AT} \cdot N_{Vm-SK} =$$

$$\frac{45}{360 \cdot 0,22} \cdot 9,61 + \frac{45}{30 \cdot 360 \cdot 0,22} \cdot 47,01 \cdot 1 + 38,06 \cdot 0,16 = 12,44$$

$$N_{c-KNB} = N_s + N_n + N_v = \quad (6.7)$$

$$\frac{L}{n \cdot f} \cdot N_{sm-KNB} + \frac{L}{T \cdot n \cdot f} \cdot N_{T-KNB} \cdot \lambda + t_{AT} \cdot N_{Vm-KNB} =$$

$$\frac{45}{2787 \cdot 0,15} \cdot 1,83 + \frac{45}{45 \cdot 2787 \cdot 0,15} \cdot 643,23 \cdot 1 + 7,18 \cdot 0,16 = 2,89$$

[Kč/ks]

Z výsledků je vidět, že daleko nižší náklady za vyrobený kus jsou při použití výměnné břitové destičky z kubického nitridu boru. Cena kusu je 2,89 Kč, v případě použití SK je cena o 10 Kč dražší a to 12,44 Kč. Bohužel jsou potřeby vyšší pořizovací náklady při použití KNB a to 3848 Kč a proto je ideální použití v sériové výrobě.

6.6 Dosahované drsnosti

Nedílnou součástí při obrábění jsou dosahované jakosti povrch – drsnost. Záleží na několika faktorech, z nichž je nejdůležitější řezná rychlost. Další vlivy ovlivňující drsnost povrchu jsou obráběný materiál, řezný materiál, možnosti řezného nástroje, opotřebením nástroje, možnosti stroje a tuhost soustavy, Vzorky byly měřeny na zařízení pro měření drsnosti – drsnoměr Hommel Tester T 2000 (Obr. 6.2) a parametr (Tab. 6.9).



Obr. 6.2 Drsnoměr Hommel T 2000

Tab. 6.9 Parametry drsnoměru Hommel T 2000

Rozlišení	0,01 μm
Hodnocená délka	0,025/ 0,08/ 0,25/ 0,8/ 2,5 mm
Pojezdová rychlost	0,05 / 0,15 / 0,5 m/s
Parametry	Ra, Rz, Rmax, Rt, R3z

Pro srovnání obrobených vzorků a dosažených jejich drsnosti je tabulka níže (Tab. 6.10).

Tab. 6.10 Dosahované drsnosti u obráběných vzorků

Vzorek	Síla třísky [mm]	Posuv [mm]	Otáčky [min^{-1}]	Řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Drsnost Ra [μm]
1	3	0,26	1592	650	-
	4	0,26	1875	730	3,01
	1	0,12	2004	730	0,78
2	1,5	0,16	2450	1000	-
	1,5	0,16	2257	900	0,79
3	1	0,22	360	45	1,9
4	1	0,15	2787	350	0,81

Pokud jsou srovnány vzorek ze slitiny hliníku D16T, které byly obráběny slinutým karbidem (vzorek 1) a diamantem (vzorek 2) jsou koncové dosažené drsnosti srovnatelné i když byla u diamantu zvolena vyšší řezná rychlost. V případě srovnání kalených vzorků obráběných slinutým karbidem (vzorek 3) a kubickým nitridem boru jednoznačně vyhrává dosažná drsnost u KNB – Ra 0,8, která je 2x menší.

6.7 Dosahované rozměry

V případě srovnání dosahovaných rozměrových parametrů byly rozdíly zanedbatelné. Pokus byl prováděn na CNC, které je velmi přesné a má vysokou opakovatelnost a kmitání a tuhost soustavy je kontrolována na revizních opravách a kalibracích.

ZÁVĚR

Diplomová práce měla přiblížit používání supertvrdých rezných materiálů. Byla řešena výroba, fyzikální a mechanické vlastnosti supertvrdých materiálu, kam patří diamant a kubický nitrid boru. Použití těchto materiálů je ve strojírenském průmyslu a to hlavně v leteckém a automobilovém průmyslu. Použití těchto materiálů je v různých formách, ať jako vyměnitelné břitové destičky, brusiva, prášky a pasty. Můžeme s nimi soustružit, frézovat, vrtat, vystružovat a brousit. Supertvrde rezné materiály se vyznačují vysokou tvrdostí a taky dosahují vyšší životnosti oproti ostatním rezným materiálům. Hlavní použití diamantu je pro obrábění hliníkových slitin a neželezných kovů, kde nedochází k nalepení na nástroj a taky nedochází k vysokému ohřívání. Diamant má největší nevýhodu v teplotní stálosti, kdy se kolem teploty 650 °C mění v grafit. Kubický nitrid boru má největší uplatnění v obrábění kalených ocelí, kde nejde srovnat s jiným rezným materiálem.

Důležitým parametrem při obrábění je rezná rychlost, které ovlivňuje celý rezný proces. Dalšími parametry jsou trvanlivost nástroje, opotřebení, tvorby tříšky a chladicí prostředí. Nejvhodnější kombinací těchto parametrů dosahujeme nejlepších výsledků jak z pohledu nákladů tak dosahovaných drsností.

Cílem diplomové práce byl praktický pokus, kde se porovnávaly náklady na obrábění pomocí rezných nástrojů a tím cena na jeden vyrobený kus při definovaných parametrech nástrojů od firmy Iscar. Obrábění bylo provedeno ve Starém Městě ve firmě CSO. Následně byly zhodnoceny dosahované parametry jednotlivých použitých rezných materiálů na vzorcích – drsnost. Z pokusu vyplývá, že musí být nastaveny ideální parametry na obrábění supertvrdými reznými materiály a hlavně za vysokých rezných rychlostí. Jinak není možná návratnost nákladů na pořízení drahých nástrojů, které jsou řádově 10x dražší než standardní nástroje. Proto je nutné používat supertvrde rezné nástroje jen pro sériovou výrobu a ne pro kusovou, kde je dostatečné nahrazení SK, který je levnější a eventuelní poškození či ulomení není až tak finančně náročné.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FOREJT, M. a PÍŠKA, M.: *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2006. ISBN 80-214-2374-9.
2. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. MM publishing, s.r.o. Praha 2008. 236 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
3. KOCMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2005. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
4. KRÍŽ, R. a VÁVRA, P. *Strojírenská příručka 7.svazek.1.vyd.* Praha: Scientia, spol. s.r.o. 1996. 212 s. ISBN 80-7183-024-0.
5. MÁDL, J. a kol.: *Jakost obráběných povrchů*. 1.vyd. Ústí nad Labem: UJEP. 2003. 180 s. ISBN 80-7044-639-4.
6. PÍŠKA, M. a kol.: *Speciální technologie obrábění*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Akademické nakladatelství CERN s.r.o. Brno. 2009. 252 s. ISBN 978-80.214-4025-8.
7. HAMERNÍK, J. *Základy obrábění 2004* [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://jhamernik.sweb.cz/obrabeni.htm>>.
8. BECKER. *Katalog* [online]. 2011. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.beckerdiamant.de>>.
9. DIAMANTOVÝ WEB. [online]. [cit. 20. dubna 2013]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.diamantovyweb.cz/index_soubory/Page339.html>.
10. PTÁČEK, L., aj. *Nauka o materiálu I*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
11. BARÁNEK, I. *Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie*. vyd. Trenčín: TnUAD, 2004. 112 s. ISBN 80-8075-013-0.
12. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Sylabus [online]. 2006, [cit. 2013-01-17]. Dostupné na World Wide Web: <http://ust.fme.vutbr./obrabeni/opory-save/mat_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf>.
13. DE BEERS. [online]. [cit. 10. března 2013]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.idrmag.com>>.
14. ZOUZALÍK, M., Umělý diamant: vítězství nad přírodou?. *21. STOLETÍ revue objevů, vědy, techniky a lidí*. Červenec/2004. ISSN 1214-1097.
15. FLICKR. [online]. [vid. 1. února 2013]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.flickr.com/photos/hphtdme/3098638244>>.
16. DIAMONDS. [online]. [cit. 1. leden 2013]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.diamonds.cz/Gemologie.html>>.
17. KUPČÍK, F., Vývoj supertvrdých materiálů v ČSSR. In *Řezné destičky z polykrystalických hutných modifikací nitridu boritého*. Ostrava: Dům techniky ČSVTS Ostrava, 1985. Část 3. s. 36–50.
18. LEICHTFRIED, G., SAUTHOFF, G., SPRIGGS, G. E. *Powder Metallurgy Data. Refractory, Hard and Intermetallic Materials* [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.springerlink.com/content/k4620423628m6284>>.
19. HAVLÍČEK, J. Polykrystalické materiály na bázi diamantu. In *Supertvrde materiály*. Ostrava: Dům techniky ČSVTS Ostrava, 1985. Část 2. 23–35.
20. HUMÁR, A. *Technologie I: Technologie obrábění – 1. část*. Sylabus [online]. 2003, Dostupné na World Wide Web: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/TI_TO-1cast.pdf>.

21. YARNEL, Amanda. The many facets of man-made diamonds. *Chemical and engenering news*. 2004. [online]. [vid. 30. ledna 2011]. Dostupné z:
22. ZEMČÍK, O. *Nástroje a přípravky pro obrábění - příloha*. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Dostupné na World Wide Web: <kst2.fme.vutbr.cz/obrabeni/publikace/data/nap.zip>.
23. SECO TOOLS AB, Fagersta, Sweden. *Secomax PCBN*. [online]. [vid. 12. Května 2013]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Advanced-cutting_materials/gb_cbn_chs_broschyr_lr.pdf>.
24. HUMÁR, A. *Výrobní technologie - sylaby pro bakalářské studium kombinované*. Sylabus [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://ust.fme.vutbr./obrabeni/opory-save/vyrobnitechnologi_II.pdf>.
25. BUMBÁLEK, B. *Fyzikální podstata řezání. Sylabus* [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://ust.fme.vutbr./obrabeni/opory-save/Opora05_Fyzikalni_podstata_rezani.pdf>.
26. MICHNA, Š. et al. *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd. Prešov: Adin, 2005. 700 s. ISBN 80-89041-88-4.
27. Kennametal, Latrobe, Pennsylvania, USA. *A08-01324_PCD a PCBN inserts*. [online]. [cit. 8. leden 2013]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.kennametal.com/en/pdf_library/pdf_library_section.jhtml?botnav=lathe&group=Metalworking&groupLink=/en/support/mssg_support.jhtml&useNav=mssg&expand=download§ion=support&showBy=pdfByAppLinks>
28. SECO TOOLS AB, Fagersta, Sweden. *Turning 2009*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://legacy.secotools.com/template/start.asp?id=9392>>.
29. HORTL.M, *TECHNOLOGICKÉ, EKONOMICKÉ A EKOLOGICKÉ ASPEKTY OBRÁBĚNÍ S VYSOCE* – Diplomová práce. Dostupné na World Wide Web: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15326>
30. CERAMTEC, Princeton, USA. *SPK-WURBON inserts (CBN)*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ceramtec.com/pdf/spk_tools_catalog/04_2005_wurbon_wsp.pdf>
31. MMSPEKTRUM .Dostupné na World Wide Web: <www.mmspektrum.com>
32. ISCAR . [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.iscar.com/tangmill-pcd-hi-pic_707_2-iscar>.
33. NORTON . [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.norton.com>>.
34. SANDVIK . [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.sandvik.com>>.
35. SANDVIK COROMANT AB, Sandviken, Sweden. *Turning 2009_CZ*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.coromant.sandvik.com/cz>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
PKNB	-	Polykrystalický nitrid boru
KNB	-	Kubický nitrid boru
HPHT	-	High Pressure High Temperature
CVD	-	Chemical vapour deposition
PKD	-	Polykrystalický diamant
MKD	-	Monokrystalický diamant

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 CHEMICKÉ SLOŽENÍ MATERIÁLŮ
Příloha 2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Příloha 1