

Supertvrde řezné materiály a jejich efektivní využití

Josef Vitr

Bakalářská práce
2006

 **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**
Fakulta technologická

nascannované zadání s. 1

nascannované zadání s. 2

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na supertvrde řezné materiály (polykrystalický diamant a polykrystalický kubický nitrid boru) a jejich efektivní využití. Zabývá se problematikou zvýšených nároků na proces obrábění a jeho racionalizaci, které souvisejí s narůstajícím využíváním těchto materiálů v procesu obrábění.

Klíčová slova: soustružení, diamant, kubický nitrid boru, řezné podmínky, řezná rychlost

ABSTRACT

The bachelory work is aimed to the superhard tool materials (polycrystalline diamond and polycrystalline cubic borone nitrid). The work is engaged in problems of increased demands on machining process and its racionalization, which are in coherence with growing of use of these tool materials at the machining process.

Keywords: turning operation, diamond, cubic boron nitride, cutting conditions, cut speed

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Sedřovi za projevení dobré vůle při poskytnutí odborného vedení, za mnohé cenné rady, připomínky a návrhy při vypracovávání své bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě SKD Bojkovice za poskytnutou pomoc a technické zázemí.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího bakalářské práce a ředitele ústavu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na celé bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně dne 7. 9. 2006

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 ZÁKLADNÍ POJMY PROCESU OBRÁBĚNÍ	11
1.1 ŘEZNÝ POHYB A PLOCHY OBRÁBĚNÉHO PŘEDMĚTU	11
1.2 GEOMETRIE ŘEZNÉHO KLÍNU	14
1.3 TECHNOLOGICKÉ ÚHLY ŘEZNÉHO KLÍNU PŘI OBRÁBĚNÍ.....	16
1.4 ŘEZNÝ ODPOR A ŘEZNÁ SÍLA	16
1.5 MĚRNÝ ŘEZNÝ ODPOR	17
2 SOUSTRUŽENÍ.....	21
2.1 PODSTATA SOUSTRUŽENÍ.....	21
2.2 SOUSTRUŽNICKÉ STROJE.....	22
2.3 DRUHY SOUSTRUŽNICKÝCH NOŽŮ	23
2.4 ÚHLY NOŽŮ A JEJICH VÝZNAM.....	24
3 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY	26
3.1 ROZDĚLENÍ NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLŮ.....	26
4 SUPERTVRDÉ ŘEZNÉ MATERIÁLY	29
4.1 DIAMANT.....	30
4.1.1 Fyzikálně mechanické vlastnosti diamantu	32
4.2 SYNTETICKÝ DIAMANT	35
4.2.1 Syntéza diamantu.....	35
4.2.2 Výroba diamantových povlaků metodou CVD	36
4.2.3 Krystaly syntetických diamantů.....	37
4.3 KUBICKÝ NITRID BÓRU	38
4.3.1 Syntéza kubického nitridu boru.....	42
5 DRSNOST POVRCHU	43
5.1 ZÁKLADNÍ POJMY	43
5.2 NORMALIZOVANÉ CHARAKTERISTIKY DRSNOSTI POVRCHU.....	44
5.3 NENORMALIZOVANÉ CHARAKTERISTIKY DRSNOSTI POVRCHU.....	46
II PRAKTICKÁ ČÁST	47
6 OBROBENÍ VZORKŮ	48

6.1	POUŽITÁ FRÉZKA	48
6.2	POUŽITÝ NÁSTROJ.....	49
6.3	MATERIÁL OBROBKU	50
6.4	ŘEZNÉ PODMÍNKY	50
7	MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	52
8	DISKUZE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....	53
8.1	PA 66	54
8.2	PVC	56
8.3	HLINÍK.....	58
8.4	MOSAZ	60
	ZÁVĚR	62
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	63
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	64
	SEZNAM OBRÁZKŮ	65
	SEZNAM TABULEK.....	66
	SEZNAM PŘÍLOH	67

ÚVOD

Strojírenská technologie - obrábění je průmyslovým odvětvím, které se v současné době velmi rychle rozvíjí a to jak v oblasti obráběcích strojů, tak zejména v oblasti řezných nástrojů.

Součásti z nových konstrukčních materiálů, jejichž hlavní charakteristikou je vysoká pevnost při nízké měrné hmotnosti, umožňují snižovat hmotnost a zvyšovat přesnost, výkon i spolehlivost všech strojírenských výrobků. Pro obrábění takovýchto součástí jsou zapotřebí nové nástrojové materiály s vyšší řezivostí a trvanlivostí, které spolu s novými konstrukcemi nástrojů a správnou volbou řezných podmínek mohou přinést podstatné zvýšení produkce a zlepšení ekonomických ukazatelů výroby. Na konstrukci nástrojů, nástrojové materiály a optimální podmínky jejich použití je proto zaměřena hlavní pozornost všech významných evropských i světových výrobců řezných nástrojů.

Velký podíl na celkovém čase obrábění mají tzv. vedlejší časy, mezi které lze mimo časů pro technologickou přípravu výroby, seřizování a údržbu obráběcích strojů, manipulaci s obrobkem, kontrolu, atd. zařadit též časy potřebné na přípravu, seřizování a výměnu nástrojů. Použitím nově vyvíjených rychlovýměnných modulárních nástrojových systémů, které mají ve svém výrobním programu prakticky všichni významní výrobci nástrojů, lze potřebu těchto časů snížit až o polovinu. Mezi hlavní přednosti těchto nástrojových systémů patří univerzálnost (lze je použít pro jakoukoli operaci obrábění a pro všechny typy nástrojů), flexibilita (pomocí různých redukčních či prodlužovacích nástavců se snadno mění rozměry nástroje a poloha jeho špičky), snadná a rychlá manipulace s nástroji a snížení zásob nástrojů.

U vyměnitelných břitových destiček je hlavní pozornost konstrukčních týmů výrobců nástrojů zaměřena především na vlastní tvar destičky, tvar jejích jednotlivých částí (ostří, špička, utvářec, upínací otvor, atd.) a velikost a způsob připojení špičky, pokud je destička vytvořena ze dvou rozdílných materiálů (např. slinutý karbid + polykrystalický diamant). Nepřehlédnutelnou technologickou úpravou je broušení čelních dosedacích ploch povlakovaných břitových destiček. Mimo nezanedbatelného vizuálního efektu zaručuje tato úprava vyšší stabilitu polohy destičky při upnutí v držáku a zlepšení odvodu tepla z destičky do držáku.

Současný poměrně široký sortiment materiálů pro řezné nástroje, od nástrojových ocelí až po syntetický diamant, je důsledkem celosvětového dlouholetého a intenzivního výzkumu a vývoje v dané oblasti a má úzkou souvislost s rozvojem konstrukčních materiálů určených pro obrábění, i s vývojem nových obráběcích strojů, zejména s číslicovým řízením. Hlavním problémem dnešní doby tedy není hledání absolutně nových, dosud nepoužívaných řezných materiálů, ale spíše zdokonalování technologie výroby a optimální využití již známých materiálů, s velmi přesným vymezením oblastí jejich aplikace.

Polykrystalický diamant (PD) a polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB) mají obzvláště vysokou tvrdost a vynikající odolnost proti opotřebení, ale vzhledem k ceně nástroje, malým možnostem změny jeho tvaru a někdy i ochotné reakci s některými obráběnými materiály jsou jejich současné aplikace omezeny pouze na speciální případy obrábění. Hlavní aplikací PD je proto vysokorychlostní obrábění neželezných slitin (zejména na bázi hliníku), obrábění keramiky a nekovových materiálů, zatímco PKNB je ideálním nástrojovým materiálem pro obrábění superslitin, kalených ocelí a litin.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADNÍ POJMY PROCESU OBRÁBĚNÍ

Obráběním nazýváme technologický proces, při kterém odebráním materiálu řezným nástrojem zpracováváme polotovary tak, aby dostal požadovaný tvar, rozměry a jakost obrobene plochy. Při obrábění vykonávají obráběný předmět a nástroj pohyb, při kterém řezná část nástroje, tzv. břit vniká do materiálu a odřezává jeho část ve tvaru třísek.

Obráběný předmět nazýváme obrobkem, hranu nástroje, která řeže, nazýváme řeznou hranou neboli ostřím a vzájemný pohyb nástroje a obrobku nazýváme řezným pohybem.

1.1 Řezný pohyb a plochy obráběného předmětu

Vzájemný pohyb obrobku a nástroje umožňující odřezávání určité vrstvy materiálu obrobku se skládá z hlavního pohybu a posuvu.

Hlavní pohyb je pohyb stroje, jemuž odpovídá větší rychlost, a na jehož uskutečnění se spotřebuje převážná část příkonu stroje.

Posuv je relativní pohyb obrobku vůči nástroji, který umožňuje postupné oddělování třísek.

Přísuv je vedlejší pohyb nástroje umožňující vzájemné přestavování obrobku vůči nástroji, nastavování hloubky řezu apod. Vzhledem k tomu, že se přísuv vykonává zpravidla přerušovaně mimo vlastní řezání (s výjimkou kopírování), neovlivňuje řezný pohyb.

Pracovní pohyby obrobku a nástroje jsou vykonávány obráběcím strojem. Všechna kinematická schémata obráběcích strojů používaných při obrábění jsou založena na kombinaci dvou elementárních pohybů: pohybu rotačního a pohybu přímého.

Hlavní pohyb a posuv může vykonávat jak obrobek, tak i nástroj. V teoretické analýze obrábění však budeme vždy předpokládat, že hlavní pohyb vykonává nástroj a posuv obrobek. Hlavní pohyb i posuv může být buď plynulý nebo přerušovaný.

Plynulému hlavnímu pohybu může odpovídat jak plynulý charakter oddělování třísek (soustružení), tak i charakter přerušovaného oddělování třísek.

Směr posuvu může souhlasit se směrem hlavního pohybu nebo může být na něj kolmý (soustružení). Směr přísuvu je zpravidla kolmý na povrch obrobku.

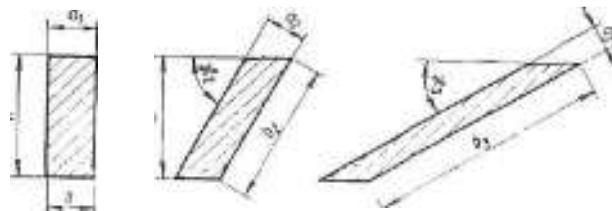
Velikost pracovních pohybů udáváme jejich rychlostmi.

Posuv f , hloubku řezu h společně s rychlostí hlavního pohybu v nazýváme technologické parametry řezání. Jejich velikosti se nastavují přímo na stroji a předpisují se v technologickém postupu.

Hodnotou rychlosti v a posuvu f je dána velikost řezného pohybu. Hodnotou posuvu f a hloubkou řezu h velikost průřezu odebíraného materiálu S :

$$S = h \cdot f \quad [\text{mm}^2] \quad (1)$$

Mechanika tvoření třísky, velikost řezných odporů i tepelné namáhání řezného klínu nezávisí však pouze na velikosti průřezu S , ale rovněž i na tvaru odebírané vrstvy. Tento tvar je udán tzv. fyzikálními parametry řezu: tloušťkou řezu a a šířkou řezu b . Řezem rozumíme tu část odřezávané vrstvy, která se odřezáváním mění na třísku. Tloušťka řezu a je vzdálenost dvou po sobě následujících ploch řezu.



Obr.1. Vliv úhlu nastavení χ na velikost fyzikálních parametrů řezu

Velikosti parametrů řezu a a b jsou funkcí posuvu, hloubky řezu a úhlu nastavení řezné hrany χ . Při konstantním posuvu, hloubce řezu a přímkové řezné hraně platí mezi fyzikálními a technologickými parametry následující závislosti.

$$a = f \cdot \sin \chi \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

$$b = \frac{h}{\sin \chi} \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

Při konstantním posuvu f a hloubce řezu h se s rostoucím úhlem nastavení řezné hrany χ tloušťka řezu zvětšuje a šířka řezu zmenšuje.

Dosazením do vzorce pro průřez odřezávané vrstvy S dostáváme:

$$S = h \cdot f = b \cdot \sin \chi \frac{a}{\sin \chi} = a \cdot b \quad [\text{mm}^2] \quad (4)$$

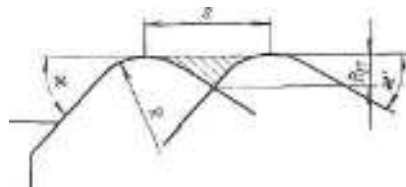
Tento vzorec platí pouze v případě, že $\chi = 0$. Při $\chi > 0$ je skutečný průřez odřezávané vrstvy:

$$S_{sk} = S - S_{zb} \quad [\text{mm}^2] \quad (5)$$

kde S_{zb} je zbytková plocha.

Výška zbytkové plochy S_{zb} udává teoretickou drsnost obrobené plochy R_{ZT} . V případě soustružení, kdy $f < R$, ($f = s$), obr.2,

$$R_{ZT} = \frac{f^2}{8R} \quad [\text{mm}^2] \quad (6)$$



Obr.2. Vliv geometrie břitu na tvar a velikost zbytkové plochy S_{zb}

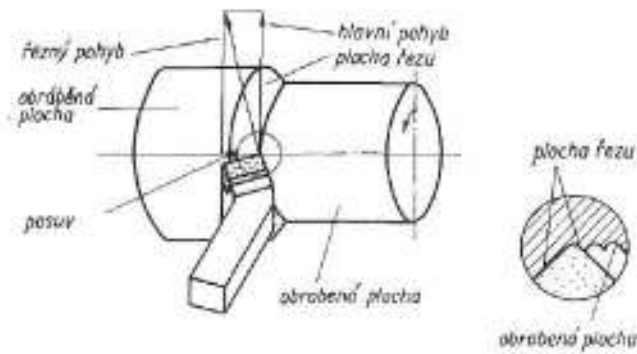
Na obráběném předmětu rozeznáváme tři plochy, obr.3.

Obráběnou plochu, z níž se při obrábění odstraňuje přebytečný materiál (přídavek).

Plochu řezu, vytvářenou bezprostředně za řeznou hranou, tvořící přechod mezi obráběnou plochou a obrobenou plochou, která vznikne po odstranění přebytečného materiálu.

Tvar obráběné plochy je dán tvarem polotovaru a může být ve většině případů libovolný.

Tvar plochy řezu je dán trajektorií pohybu řezné hrany vůči obrobku, tvarem řezné hrany, popř. umístěním řezné hrany vzhledem k ose rotace.



Obr.3. Plochy obrobku

Tvar obrobené plochy je dán tvarem obalové plochy řezu a, což je při podélném soustružení vnější plocha válcová; při vnitřním soustružení - vnitřní plocha válcová.

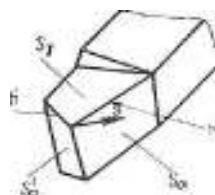
Ve skutečnosti se však plochy získané při obrábění ve větší či menší míře od ideálních geometrických tvarů liší. Je to způsobeno nepřesnostmi obráběcích strojů, stopami po nástroji, které vznikají na každé obrobené ploše atd.

1.2 Geometrie řezného klínu

Geometrický tvar řezné části nástroje, tzv. řezný klín, má na proces obrábění velký vliv. Na tvaru řezného klínu závisí nejen velikost řezných sil a energie potřebná k řezání, ale i jakost vyrobených součástí, trvanlivost břitu apod. Každý řezný nástroj se skládá z pracovní (řezné) části a z upínací části.

Řezným klínem (břitem) nazýváme tu část nástroje, která při obrábění vniká do materiálu a odřezává z něj třísku.

Plochou břitu, po které odchází tříska S_γ , nazýváme čelem; plochu břitu obrácenou k ploše řezu S_α nazýváme hřbetem. Průsečnice obou základních ploch břitu tvoří řeznou hranu neboli ostří h , obr.4.



Obr.4. Funkční plochy soustružnického nože

Ve většině případů však má břit nástroje dvě i více hřbetních ploch, a tak i řezná hrana se skládá z několika částí, obr.4. Hřbetní plochu S_{α} , přiléhající k ploše řezu, nazýváme hlavní hřbetní plocha a její průsečnice s rovinou čela tvoří hlavní řeznou hranu h .

Hřbetní plochu S'_{α} , obrácenou k obrobené ploše nazýváme vedlejší hřbetní plocha a její průsečnice s rovinou čela vytváří vedlejší řeznou hranu h' .

Napojení hlavního a vedlejšího ostří nazýváme vrcholem (špičkou) nástroje.

V praxi se často na břitu nástroje, kromě již uvedených ploch, vybrušují podél ostří různé plošky, tzv. fasetky. Podle umístění fasetky potom hovoříme o fasetce čelní nebo o fasetce hřbetní, obr.5.



Obr.5. Fasetka na čele 1 a fasetka na hřbetu 2

Další částí každého řezného nástroje je část upínací, kterou se nástroj upíná jak při jeho ostření, tak i při pracovní činnosti. Na pracovní část nástroje navazuje přímo a nebo prostřednictvím tělesa nástroje. Tvar upínacích částí řezných nástrojů je různý podle účelu a způsobu upnutí.

Vzájemnou polohu řezných hran, činných ploch řezné části nástroje a jejich orientaci vůči upínací části nástroje udává tzv. nástrojová geometrie řezného břitu.

Nástrojovou geometrii břitu tvoří soustava nástrojových úhlů, určující jednoznačně geometrický tvar břitu v soustavě souřadnicových rovin, vycházejících ze způsobu upnutí nástroje při ostření a na obráběcím stroji, a z předpokládaného směru hlavního pohybu a směru předpokládaného podélného posuvu. Nástrojové úhly břitu slouží tedy především ke zhotovení výkresů nástrojů, ke kontrole nástrojů apod.

Z řady souřadnicových systémů, které se v současné době ve světě používají, jsou základní tři:

Ortogonální systém, tvořený třemi navzájem kolmými rovinami, u něhož se měří nástrojové úhly v rovině kolmé na projekci řezné hrany do roviny základní.

Souřadnicový systém orientovaný podle os nástroje, tvořený rovněž soustavou tří rovin navzájem kolmých.

Kosouhlý systém normálových úhlů, v němž se nástrojové úhly měří v rovině kolmé na řeznou hranu.

1.3 Technologické úhly řezného klínu při obrábění

Proces oddělování třísky, zatížení řezného nástroje a jeho trvanlivost nezávisí pouze na geometrickém tvaru řezného klínu, vyjádřeném nástrojovou geometrií břitu, ale na poloze nástroje vůči obrobku a na jejich vzájemném pohybu.

Vzájemnou polohu funkčních ploch řezného klínu vůči obrobku udávají tzv. technologické (skutečné) úhly řezného klínu.

Tyto úhly měříme v souřadnicovém systému vztaženém k plochám obrobku vznikajícím v procesu obrábění, tj. k ploše řezu a k obrobené ploše. Poněvadž tyto plochy souvisejí s trajektorií řezného pohybu, vychází z ní i orientace systému souřadnicových rovin, nazývaných rovinami efektivními (technologickými).

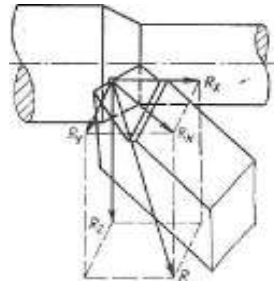
1.4 Řezný odpor a řezná síla

Při oddělování vrstvy materiálu obrobku, tvoření třísky a při jejím odchodu z místa řezu se spotřebovává určité množství práce. Tato práce se spotřebovává při vnikání břitu nástroje do materiálu obrobku, který klade odpor proti vnikání, zvaný řezný odpor, a ten je překonáván řeznou silou. Řezný odpor R je odpor, který klade materiál obrobku proti vnikání nástroje při tvoření a odchodu třísky z místa řezu. Řezná síla F je síla, kterou působíme na nástroj k překonání řezného odporu.

Musí tedy platit rovnováha sil:

$$F = -R \quad [\text{N}] \quad (7)$$

Soustava složek řezného odporu působících na nůž při řezání je znázorněna na obr.6



Obr.6. Složky řezného odporu (řezné síly)

Řezný odpor můžeme rozložit do složek přímo ovlivňujících potřebný výkon řezání. Při vázaném řezání se rozkládá řezná síla i řezný odpor do tří složek navzájem kolmých. Jsou to složky F_x , F_y , F_z resp. R_x , R_y , R_z . Lze tedy rovněž psát:

$$R = R_H + R_Z = R_x + R_y + R_z \quad [\text{N}] \quad (8)$$

Mechanika tvoření třísky je ve skutečnosti značně složitější než při volném řezání a uvažujeme-li všechny opravné hodnoty, jsou teoretické vzorce pro výpočet řezných sil pro jednotlivé způsoby obrábění příliš složité a prakticky pouze omezeně použitelné. Proto se spíše používají vzorce získané empiricky měřením složek řezné síly dynamometry.

1.5 Měrný řezný odpor

K hrubšímu určování složek řezné síly se často používá tzv. měrný řezný odpor. Každý obráběný materiál vyvíjí za určitých řezných podmínek zcela určitý tlak na nůž, který odpovídá vlastnostem materiálu. Pro každý materiál můžeme tedy zjistit jeho měrný řezný odpor p , tj. tangenciální řeznou sílu na nůž v N, připadající na 1 mm^2 průřezu řezu.

Tedy:

$$p = \frac{F_z}{S} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (9)$$

kde F_z je tangenciální složka síly [N], S je průřez řezu [mm²].

Měrný řezný odpor není však pro daný materiál hodnotou stálou, ale mění se v závislosti na velikosti a tvaru průřezu řezu, úhlech nože, nastavení nože a stavu jeho bříty, na řezné rychlosti atd. Nelze tedy o měrném řezném odporu mluvit jako o materiálové konstantě, ale musí být přihlíženo k četným činitelům, které mají vliv na jeho velikost. To znamená, že měrný řezný odpor můžeme vyjádřit jako funkci řady činitelů, tj.:

$$p = f(v, h, f, \chi, R, \gamma, a, \dots) \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (10)$$

kde v je řezná rychlost,

h - hloubka řezu,

f - posuv,

χ - úhel nastavení,

R - poloměr hrotu nože,

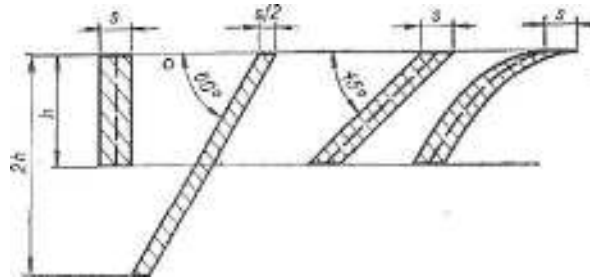
γ - úhel čela,

λ - úhel sklonu bříty,

a - tloušťka třísky

Poslední činitel a je uveden se zřetelem na to, že tvar průřezu třísky nelze vyjádřit jen jako funkci hloubky řezu, posuvu, úhlu sklonu bříty a poloměru hrotu nože jako např. u nožů tvarových.

Pokud jde o vliv průřezu třísky na velikost měrného odporu (hodnoty h , f), závisí především na tvaru třísky, ($f = s$), obr.7.



Obr.7. Různé tvary průřezu třísky

Převážná část řezného odporu je vyvolána deformací materiálu přecházejícího do třísky. Protože deformační práce pro každý z těchto průřezů bude jiná, budou i měrné řezné odpory různé. Čím větší délka břitu je v záběru, tj. čím větší je šířka třísky b , tím větší je řezný odpor. Tento vzrůst řezného odporu je téměř přímo úměrný šířce. To vyplývá ze skutečnosti, že zvláště při nižších a středních řezných rychlostech se převážná část práce spotřebuje na deformaci materiálu. Deformační práce bude tím větší, čím širší (tenčí) bude tříska. Na podkladě těchto úvah a praktických zkoušek se došlo dále k závěru, že při zvětšování tloušťky třísky a roste celkový řezný odpor pomaleji než tloušťka.

Měrný odpor je při tlusté tříse podstatně menší než při třisce tenké. Při odebrání tenké třísky ($a = 0,02$ až $0,03$ mm) nastává velmi rychle otupení nástroje. Příčina je v tom, že při odebrání příliš tenkých třísek nejde o pravé řezání, protože i zdánlivě dokonale nastřený nástroj nemá řeznou hranu absolutně ostrou, ale plocha čela nože přechází v plochu hřbetu malou ploškou (zaoblením) o poloměru asi $0,02$ mm. V důsledku toho jsou při zcela malých tloušťkách třísky (řádu $0,02$ až $0,03$ mm a tenčích) fyzikální podmínky řezání zcela jiné než při odebrání třísky o mnohonásobně větší tloušťce, než je poloměr zaoblení břitu. V důsledku toho břit klouže po povrchu obrobku, při čemž nastává značná deformace jeho povrchu a jeho zpevnování. Nástroj se rychle otupuje, čímž řezný odpor dále stoupá. V určitých intervalech nůž strhuje vrstvu zpevněnou nad mez pevnosti základního materiálu a pak znovu klouže po povrchu, čímž také vzniká nepravidelně drsný povrch.

Proto téměř všechna pravidla, odvozená v teorii řezání, neplatí pro tzv. minimální třísky.

Další činitele, které ovlivňují měrný řezný odpor, jsou řezná rychlost, úhel řezu, stav bříty, jakost povrchu činných ploch nože, povrch obráběného předmětu apod. V každém případě je nutno velikost měrného řezného odporu stanovit vždy pro konkrétní podmínky, neboť pouhý teoretický výpočet měrného řezného odporu nám nemůže dát přesné hodnoty, protože se zakládá na součinitelích stanovených za podmínek, které nemusí být totožné s podmínkami případu, který máme řešit.

2 SOUSTRUŽENÍ

2.1 Podstata soustružení

Při soustružení vniká řezná část nástroje do materiálu obráběné součásti a odřezává z něho přebytečnou vrstvu v podobě třísky. Tím dostane obrobek požadovaný tvar, rozměry a drsnost povrchu. Řezná část nástroje musí však být pevná, tvrdá a ostrá aby mohla překonat soudržnost částic odřezávaného materiálu.

K soustružení je třeba v podstatě dvou základních pohybů:

1. pohybu hlavního (pohyb do řezu)
2. pohybu vedlejšího (pohyb do záběru)

Hlavní pohyb - při obrábění je nutný k tomu, aby nůž odřízl

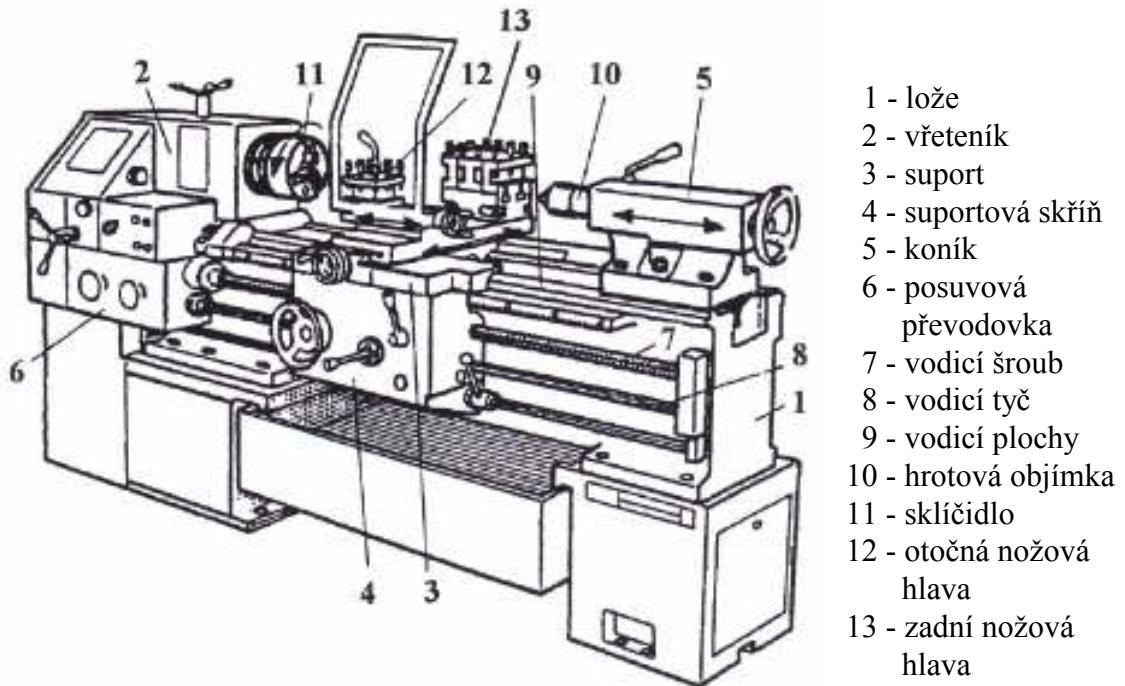
z obrobku třísku. Při soustružení je tento pohyb točivý' a nejčastěji jej koná obrobek.

Vedlejší pohyb - je potřebný k tomu, aby nůž postupně odřezával třísky v požadované délce obrobku. Tomuto pohybu se říká posuv nože. Vedlejší pohyb může být plynulý nebo přerušovaný.

Kromě hlavního a vedlejšího pohybu je třeba při strojním obrábění ještě dalšího pohybu, jímž lze měnit vzdálenost nástroje od obrobku. Tento pohyb může být buď hrubý a nebo jemný, kterému říkáme přísuv. Přísuv při soustružení koná nůž vzhledem k obrobku.

2.2 Soustružnické stroje

Z konstrukčně technologického hlediska se specifikují soustruhy hrotové, revolverové, svislé a speciální.



Obr.8. Univerzální hrotový soustruh

Hrotové soustruhy se využívají především v kusové a malosériové výrobě hřídelovitých a přírubovitých součástí. Vyrábějí se a dodávají jako hrotové soustruhy univerzální a hrotové soustruhy produkční.

Univerzální hrotové soustruhy mají široký rozsah technologických možností. Lze na nich obrábět vnější a vnitřní rotační plochy, rovinné plochy čelní a kuželové plochy. Jsou vybaveny velkým rozsahem otáček a posuvů a vodící šroub umožňuje řezat závity závětným nožem. Přehled základních soustružnických prací prováděných na univerzálních soustruzích.

Produkční hrotové soustruhy bývají, ve srovnání s univerzálními soustruhy, vybaveny náhonovým elektromotorem většího výkonu, mají hrubší odstupňování otáček i posuvů a nemají vodící šroub pro řezání závitů.

2.3 Druhy soustružnických nožů

Soustružnické nože musí:

- mít dobré řezné vlastnosti
- být tvrdší než obráběný materiál
- přiměřeně houževnaté, aby se tlakem třísky nevydrolovaly
- být dostatečně pevné
- být co nejodolnější proti opotřebením třením

Těchto vlastností můžeme dosáhnout při volbě materiálu k jeho výrobě a jednak jeho dalším zpracováním (kalením, popouštěním, ostřením atd.).

Velmi rozšířeným řezným materiálem je rychlořezná nástrojová ocel (RO). Potřebná tvrdost a houževnatost se získá kalením a popouštěním. Nože z RO jsou velmi odolné proti opotřebením. Soustružnické nože se vyrábějí buď celé z RO a nebo se pro úsporu materiálu vyrábějí z této oceli jen břitové destičky a ty se přivařují k samotnému tělesu nože z mnohem levnější konstrukční uhlíkové oceli.

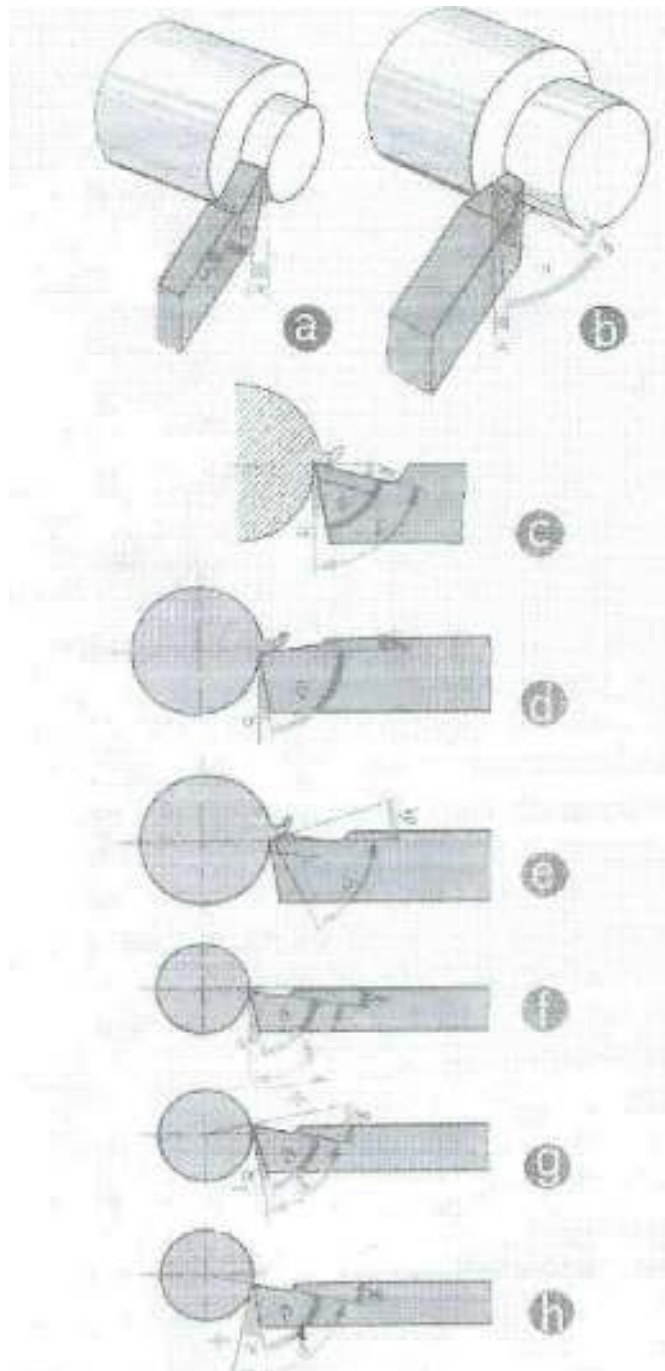
Kromě nástrojové oceli rychlořezné se k výrobě soustružnických nožů používají i jiné materiály jako jsou slinuté karbidy (SK) a slinuté korundy. Tyto řezné materiály mají lepší řezné vlastnosti než RO a proto je používáme při velkých řezných rychlostech.

Tvary a rozměry soustružnických nožů jsou normalizovány a dělíme je dle několika hledisek:

1. dle druhu obráběné plochy na nože vnější a vnitřní
2. dle velikosti odřezávané vrstvy materiálu na nože ubírací a hladící
3. dle směru posuvu na nože pravé a levé
4. dle vykonávané soustružnické práce na nože k podélnému soustružení, k soustružení čelních ploch, na nože zapichovací a upichovací, závitové, zaoblovací a drážkovací

2.4 Úhly nožů a jejich význam

Aby soustružnický nůž dobře obráběl musí mít jeho řezná část neporušené ostří, hladké čelo a hlavní hřbet a hlavně správnou geometrii neboli řezné úhly. Hlavními řeznými úhly jsou: úhel břitu, hlavní úhel hřbetu, úhel čela a úhel řezu.



Obr.9. Geometrie soustružnického nože

Úhel břitu β - je to úhel, který svírá hlavní hřbet s čelem nože. Velikost tohoto úhlu má vliv na odpor, který klade materiál obrobku noži při soustružení. Čím menší je úhel břitu, tím snáze břit nože vniká do materiálu. Avšak je-li úhel beta příliš malý, břit nože je málo pevný a poměrně hodně se při práci zahřívá. Může se snadno ulomit a příliš brzy se otupuje. Při soustružení měkkých materiálů volíme menší úhel břitu. Jeho velikost je nejčastěji 45° až 90°.

Hlavní úhel hřbetu α - je to úhel mezi hlavním hřbetem nože a tečnou k řezné ploše obrobku. Tento úhel má vliv na velikost tření mezi hlavním hřbetem a řeznou plochou. U nožů z RO bývá úhel a nejčastěji 6° až 10°.

Úhel čela χ - je to úhel mezi čelem nože a rovinou, procházejícím hlavním ostřím, která je kolmá k řezné ploše obrobku. Jeho velikost při soustružení má vliv na směr odvádění třísky a na odpor materiálu obrobku proti vnikajícímu břitu nože. Pro soustružení měkkých a málo pevných materiálů se volí poměrně velký úhel čela (až 40°), pro pevné a tvrdé materiály bývá jen několik stupňů popř. nulový.

Úhel řezu δ - je to úhel mezi čelem nože a tečnou k řezné ploše obrobku. Jeho velikost se rovná součtu úhlů hlavního hřbetu a břitu a bývá obvykle menší než 90°.

Vedlejší úhel nastavení - je to úhel mezi vedlejším ostřím a směrem posuvu nože.

Úhel špičky ε - je to úhel mezi hlavním a vedlejším ostřím nože měřený v průmětu do základní roviny. Čím větší je tento úhel, tím více hmoty má nůž ve špičce a méně se opotřebovává.

Úhel sklonu hlavního ostří λ - je to úhel mezi hlavním ostřím a rovinou rovnoběžnou s ložnou plochou nože a procházející jeho špičkou. Tento úhel může být buď kladný, je-li špička nože nejvyšším bodem ostří, nebo se může rovnat nule, je-li hlavní ostří rovnoběžné se základní rovinou, a nebo je záporný, je-li špička nože nejnižším bodem ostří.

3 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

Řezná část nástroje (případně celý nástroj) je zhotovena z nástrojového materiálu. K základním požadavkům na nástrojový materiál patří jeho tvrdost, pevnost v ohybu, houževnatost a odolnost proti otěru. Tyto vlastnosti musí nástrojový materiál zachovat při vysokých teplotách po dostatečně dlouhou dobu. Integrovaným vyjádřením vlastností řezného materiálu je jeho řezivost. Hodnocení řezivosti materiálů se provádí obvykle podle řezných rychlostí, při kterých mohou nástroje pracovat bez větších změn jejich tvrdosti.

Jako řezné materiály se využívají zejména nástrojové oceli, slinuté karbidy, cermety, řezná keramika, polykrystalický kubický nitrid bóru a polykrystalický diamant.

3.1 Rozdělení nástrojových materiálů

Nástrojové oceli (NO) jsou zařazeny ve třídě 19 a člení se na nelegované (označení 19 0xx až 19 2xx) a legované (19 3xx až 19 8xx). Nástrojové oceli 19 8xx se označují jako rychlořezné (RO, HSS) a jsou využívány pro výrobu většiny řezných nástrojů pro strojní obrábění.

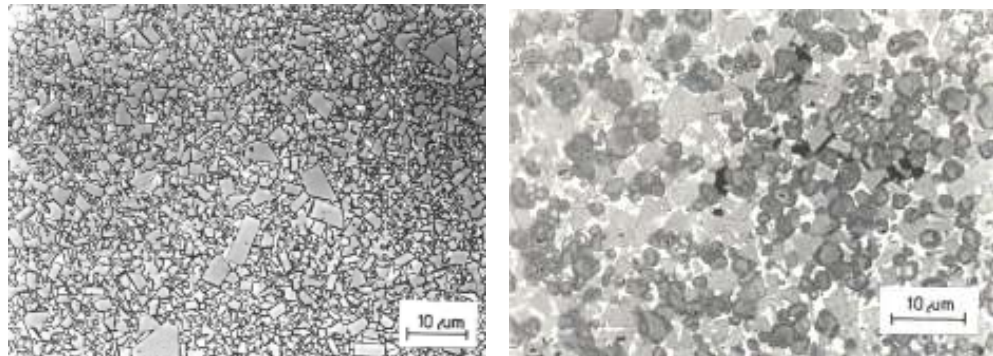
Slinuté karbidy (SK) jsou produktem práškové metalurgie a vyrábí se z různých karbidů (WC, TiC, TaC, NbC) a kovového pojiva (nejčastěji Co). Obsahové množství jednotlivých fází ovlivňuje tvrdost, houževnatost a odolnost proti otěru. Používají se pro výrobu břitových destiček různých tvarů, které se mechanicky upínají k příslušnému držáku. Nástroje menších rozměrů jsou dodávány také jako monolitní (celý nástroj, tj., řezná i nosná část jsou vyrobeny z jednoho druhu slinutého karbidu).

Základní skupiny slinutých karbidů:

skupina K - WC+Co (struktura na obr.10a)

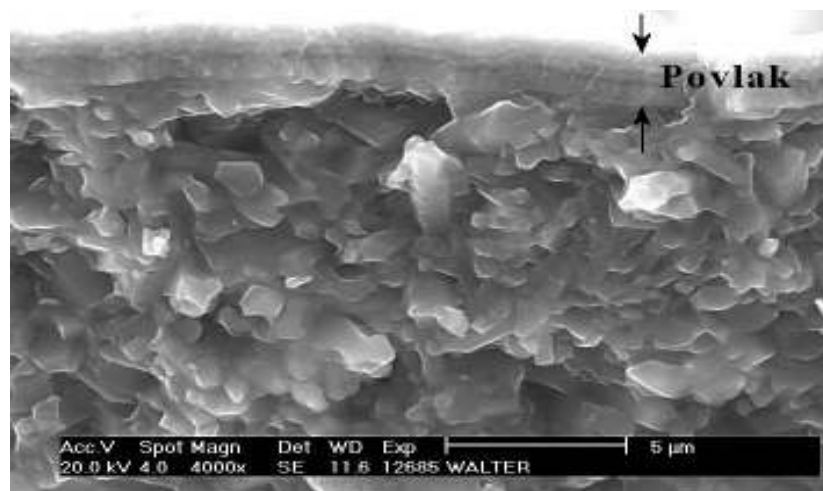
skupina P - WC+TiC+Co (struktura na obr.10b)

skupina M - WC+TiC+TaC.NbC+Co

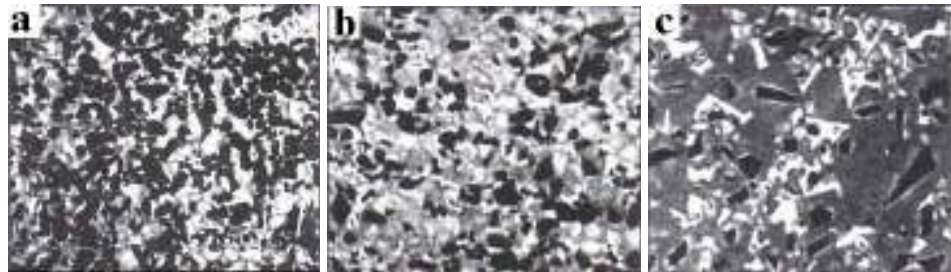


Obr.10. Struktura slinutých karbidů

Řezná keramika jako nástrojový materiál vykazuje vysokou tvrdost za tepla, avšak je po-měrně křehká a má nízkou tepelnou vodivost. Vyrábí se ve tvaru břitových destiček, které jsou mechanicky upínané v tělese nástroje. Pro výrobu řezných nástrojů se používá řezná keramika na bázi oxidu hlinitého Al_2O_3 , na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 (obr.11) a kombinace obou (keramika typu Sialon - toto slovo vyjadřuje složení křemík-hliník-kyslík-dusík).

Obr.11. Povlakovaná řezná keramika, povlak $\text{TiN}/\text{Al}_2\text{O}_3$

Cermety jsou řezné materiály vyráběné práškovou metalurgií, které jsou určeny zejména pro dokončovací obrábění. Název cermet vznikl složením prvních tří písmen slov „ceramics“ (keramika) a „metal“ (kov), což znamená, že mechanické vlastnosti tohoto nástrojového materiálu by měly vykazovat výhodnou kombinaci tvrdosti keramiky a houževnatosti kovu (praxe tento předpoklad bohužel nepotvrdila). Cermety obsahují tvrdé částice (TiC, TiN, TiCN, TaN) v kovovém pojivu (Ni, Mo, Co). Ukázky struktur cermetů jsou uvedeny na obrázku č.12.



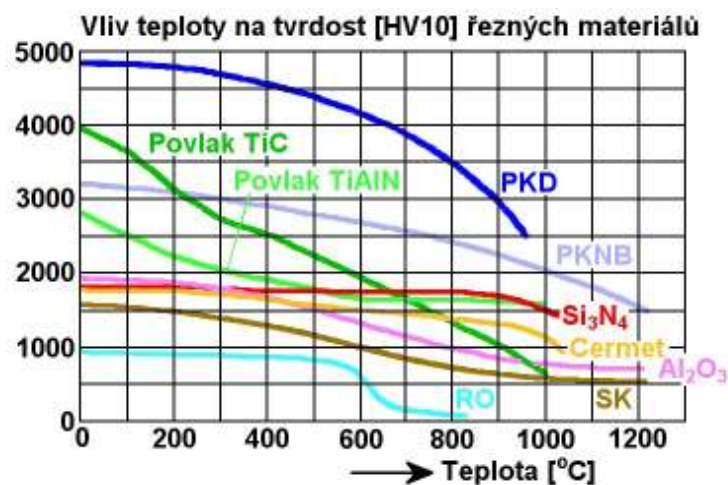
Obr.12. Ukázky struktur cermetů

4 SUPERTVRDÉ ŘEZNÉ MATERIÁLY

S pojmem supertvrde materiály se setkáváme od roku 1955, kdy byl vyroben první syntetický diamant. Jsou to materiály, které se svou tvrdostí blíží tvrdosti diamantu. Význam supertvrdých materiálů rostl v řadě průmyslových odvětví. K nejtvrdějším látkám patří diamant a kubický nitrid boru, proto se za supertvrde materiály považují veškeré materiály, které obsahují některou z těchto látek.

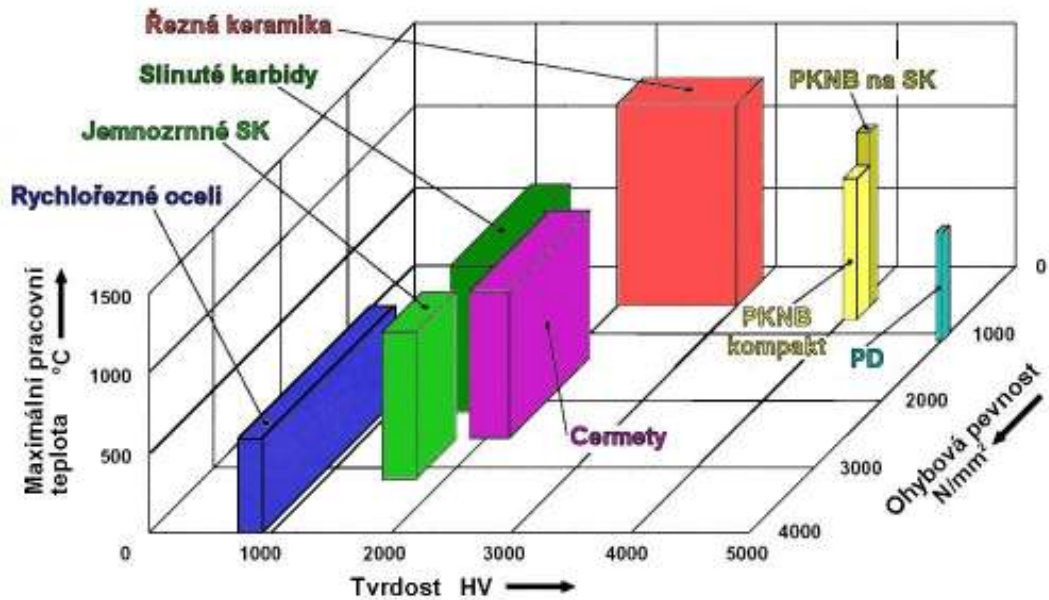
Supertvrde materiály se používají i ve strojírenské technologii. Do oblasti třískového obrábění se dostaly ve formě polykrystalických materiálů na bázi diamantu a kubického nitridu boru. Mělo to za následek zlepšení obrábění těžko obrobitelných materiálů. Další velkou výhodou bylo i zkrácení výrobní doby, neboť u nich lze používat vysokou řeznou rychlost. V porovnání s ostatními řeznými materiály vynikají především vysokou tvrdostí (blíží se jim jen keramické materiály). Jejich hlavní nevýhodou je vysoká cena, která klade mimořádné požadavky na posouzení konkrétní aplikace.

Supertvrde řezné materiály se, každý, různě chovají za vysokých teplot. Tato vlastnost je velmi důležitá, neboť část mechanické energie přeměněné na teplo může během obrábění způsobit nadměrné opotřebení nástroje a tím i pokles ekonomické efektivity obrábění. Z tohoto hlediska má nejlepší pozici kubický nitrid boru, jehož tepelná stálost je až 1600 °C, zatímco diamant se rozkládá při teplotách 700 °C. Pro jeho lepší využití je možné použít chladicí kapalinu. Toho se využívá zejména při obrábění vysokými rychlostmi, kdy je vývin tepla značný. Vliv teploty na řezné materiály je uveden na obr. 13.



Obr.13. Tvrdost v závislosti na teplotě

Rozsah mechanických vlastností supertvrдых materiálů je mnohem menší než u jiných materiálů. V porovnání s ostatními materiály mají také velmi malé hodnoty ohybové pevnosti, což má při obrábění za následek použití malého posuvu. Porovnání supertvrдых řezných materiálů s ostatními řeznými materiály je uvedeno na obr. 14.



Obr.14. Srovnání řezných materiálů

4.1 Diamant

Příčinou mimořádné tvrdosti diamantu (v Mohsově stupnici označen číslem 10) je skutečnost, že každý atom se váže se svými čtyřmi sousedními atomy čtyřmi dvojicemi valenčních elektronů. Proti korundu, který je v Mohsově stupnici na 9. místě, je diamant čtrnáctkrát tvrdší.

Přírodní diamanty se používají ke klenotnickým účelům a také k účelům technickým. Pro klenotnické účely se používají diamanty čiré nebo zbarvené. Pro klenotnické účely je podstatná velikost a tvar diamantu. S rostoucí velikostí roste i cena.

Technické diamanty se nepoužívají ke klenotnickým účelům. Rozdělují se do těchto skupin:

Karborando jsou často nazývané jako černé diamanty, pro svou černou barvu. Mají vysokou tvrdost v porovnání s ostatními skupinami technických diamantů. Vyskytují se velmi vzácně.

Dallasy vytváří drobné kulovité krystalky. Jsou charakteristické svou vysokou tvrdostí a pevností v porovnání s ostatními druhy technických diamantů. Jejich výskyt je zřídka.

Bort se v průmyslu využívá na výrobu nástrojů jako jsou průvlaky, brusné kotouče nebo hroty na měřidla. Do této skupiny patří čiré, barevné, průsvitné i neprůsvitné krystaly. Mají tvar pravidelných mnohostěnů, ale i nedokonalé tvary s různými plochami i oblými stěnami.

Krashing bort tvoří krystalky nepravidelných kulovitých tvarů. Jsou neprůhledné a obsahují až 20 % nečistot. Používají se nejvíce pro výrobu diamantového prachu, který se používá při broušení a leštění.

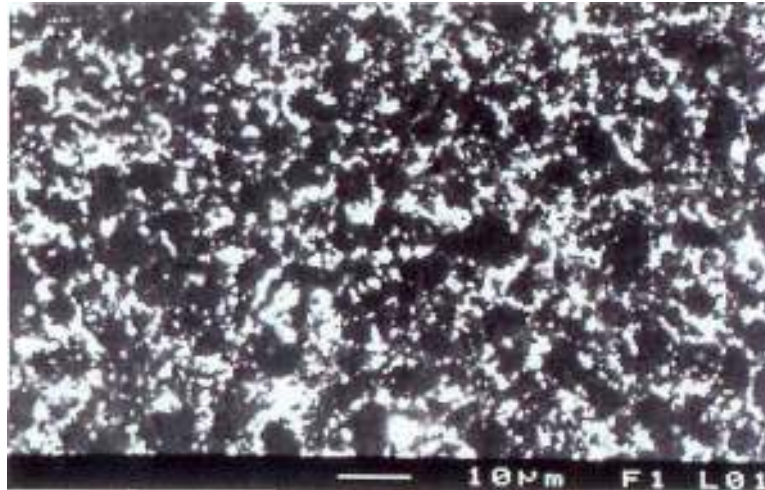
Největší rozmach technických diamantů začal v 19. století a to společně s rozvojem průmyslu a příbuzných odvětví.

V oblasti strojírenství se technické diamanty začaly používat nejprve ve formě brusných materiálů nebo past pro broušení velmi tvrdých materiálů. Před nástupem supertvrdých řezných materiálů bylo použití diamantových brusných materiálů jedinou možností, jak obrábět tvrdé materiály.

V oblasti tváření se začali používat technické diamanty pro výrobu průvlaků na tažení drátů a to i velmi tvrdých, jako jsou wolframová vlákna žárovek.

Vzrůstající spotřeba technických diamantů vedla k prvním pokusům výroby diamantu, které vyústily v první úspěšnou syntézu diamantu. Diamantové prášky získané syntézou plně vyhovovaly požadavkům mnoha průmyslovým odvětvím.

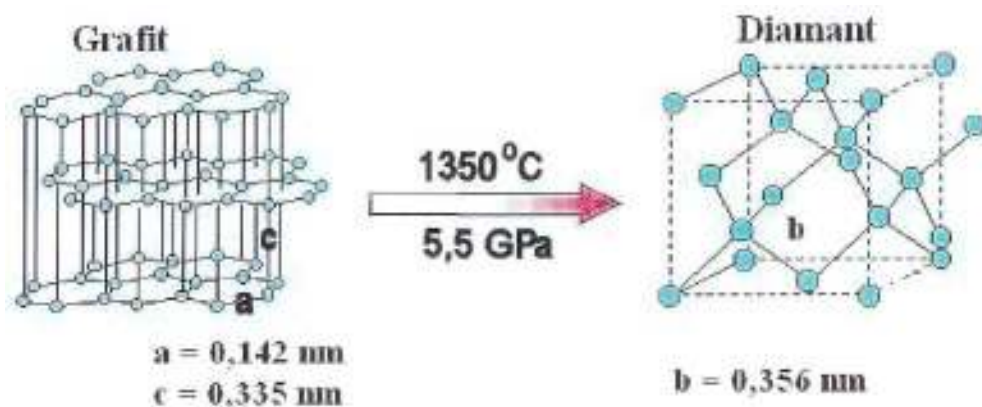
Po úspěšném zvládnutí průmyslové výroby diamantu byly prováděny první pokusy s výrobou polykrystalických materiálů na bázi diamantu. Výroba diamantů větších rozměrů byla nahrazena slinováním synteticky vyrobeného diamantového prášku spolu s pojivem. Zvládnutá výroba polykrystalických materiálů na bázi diamantu a vynikající mechanické vlastnosti polykrystalického materiálu rozšířily značně oblast používání diamantu v průmyslu. Strukturu polykrystalického diamantu můžeme vidět na obr. 15.



Obr.15. Struktura polykrystalického diamantu

4.1.1 Fyzikálně mechanické vlastnosti diamantu

Diamant, jako jedna z modifikací čistého uhlíku, krystalizuje v kubické soustavě, zatímco grafit, jako polymorfní modifikace uhlíku, krystalizuje v hexagonální soustavě, ve formě desek. Strukturu uspořádání uhlíkových atomů v elementární mřížce diamantu tvoří dvě plošně centrované kubické mřížky, které jsou proti sobě navzájem posunuty ve směru úhlopříčky tělesa o jednu čtvrtinu její délky, viz obr. 16. Strana elementární buňky má délku 0,356nm. Nejkratší vzdálenost mezi atomy je 0,154nm. Příčinou velké tvrdosti diamantu je skutečnost, že každý atom se váže se svými sousedními atomy čtyřmi dvojicemi valenčních elektronů.



Obr.16. Mřížka grafítu a diamantu

Experimentálně je možné broušením dokázat, že tvrdost diamantu není stejná na všech plochách diamantového monokrystalu. Objevují se rozdíly při změnách krystalografického směru, kterým působíme na diamant. Jestli brousíme např. plochu kostky tak, aby síla broušení působila ve směru její úhlopříčky, je množství broušeného diamantu asi 150krát menší, než při broušení ve směru hran. Podobně je to i při broušení ploch osmistěnu, kosočtverečného dvanáctistěnu. Směry, ve kterých se plochy diamantu brousí lehko, se obvykle nazývají měkké, a směry, ve kterých je opracování téměř nemožné, se nazývají obvykle tvrdými.

V běžných rozpouštědlech je diamant nerozpustný. V některých roztavených kovech (železo, kobalt, nikl, platina atd.) se však rozpouští a po jejich ochlazení se z nich vylučuje jako grafit. Tím je zásadně omezeno použití diamantových nástrojů. Při opracování železných materiálů dochází ke zvýšenému opotřebení funkční části nástroje v důsledku difúze uhlíku do materiálu obrobku a současně urychlení grafitizace diamantu. Při vysokých teplotách se slučuje s křemíkem, bórem, vodíkem, sírou a jinými prvky. Vlastnosti grafitu a diamantu jsou uvedeny v tab. 1.

S rostoucí teplotou dochází u diamantu na vzduchu k oxidaci povrchu. Při teplotě 700 °C se spaluje uhlík na oxid uhličitý. Současně s tím dochází ke grafitizaci diamantu, na kterou mají značný vliv nečistoty. Při teplotách nad 850 °C dochází za přítomnosti kyslíku ke vznícení diamantu.

Tab.1. Porovnání vlastností grafitu a diamantu

Vlastnosti	Diamant	Grafit
Krystalická mřížka	Kubická	Hexagonální
Mřížková konstanta [nm]	b = 0,356	a = 0,142 c =
Hustota [g.cm ⁻³]	3,5	2,6
Tvrdost podle Vickerse	10 000 HV	12HV
Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	560	80 - 250
Délková roztažnost [K ⁻¹]	0,8 x 10 ⁻⁶	8,8 x 10 ⁻⁶

Značné rozdíly se objevují při porovnání mechanických vlastností monokrystalického diamantu a polykrystalického diamantu. Tyto rozdíly jsou způsobeny přítomností pojiva v polykrystalické kompozici a také i zrnitost diamantu. Rozdílné vlastnosti monokrystalického a polykrystalického diamantu jsou uvedeny v tab. 2. Dalším významným faktorem, který má vliv na mechanické vlastnosti je kvalita spojení pojiva a diamantových zrn, což lze ovlivnit během výroby polykrystalického diamantu. Při použití vyšších teplot při slinování dochází k lepšímu natažení diamantových zrn, která pak vytvoří pevnější vazbu s pojivem. K dalším vlivům patří i doba slinování, která musí být dostatečně velká, aby se zajistilo dokonalé prohrátí v celém objemu materiálu.

V porovnání s monokrystalický diamantem má polykrystalický diamant menší tvrdost, která činí asi 50 GPa (dle Knoop). Tvrdost polykrystalického diamantu závisí především na obsahu diamantu v polykrystalické kompozici (obvykle 90 %). Tepelná vodivost je velmi závislá na druhu a obsahu pojiví fáze. Kovová pojiva zlepšují odvod tepla z polykrystalického diamantu, pojiva keramická zapříčiňují horší odvod tepla a tím vzrůstá nebezpečí přehřátí nad grafitizační teplotu. Modul pružnosti v tahu se liší jen nepatrně. Při použití kovových pojiv je jeho pokles značně větší a naopak pojiva keramická se podílejí na snížení modulu pružnosti v tahu jen minimálně. To je dáno nižším modulem pružnosti u kovů.

Tab.2. Vlastnosti diamantu

	Diamant	PKD
Modul pružnosti v tahu [GPa]	964	840
Tvrdost dle Knoop [GPa]	56-102	50
Součinitel tepelné vodivosti [W.m ⁻¹]	600-2000	560
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	400	345
Poissonovo číslo [-]	0,07	0,09

4.2 Syntetický diamant

Od doby, kdy se zjistila chemická podstata diamantu, se začali vědci zabývat myšlenkou, jak vyrobit syntetické diamanty. Po řadě méně či více zdařilých pokusů se podařilo v laboratořích firmy General Electric roku 1955 vyrobit první diamantové zrna. Této úspěšné syntéze předcházela několikaletý vývoj speciálního tlakového zařízení, které bylo klíčovým prvkem pro syntézu. Po letech zkoušek bylo v roce 1954 zkonstruováno zařízení, které potřebné teploty okolo 1800 °C a tlaky okolo 6 GPa bylo schopno vytvořit a udržet je po určité dobu konstantní. Mezitím H. Tracy Hall vypracoval teoretickou studii, ve které vypočítal potřebné tlaky a teplotu pro úspěšnou syntézu. Ověřením jeho teoretických předpokladů se pak uskutečnila první úspěšná syntéza.

4.2.1 Syntéza diamantu

V současné době jsou známi tři metody výroby syntetického diamantu a to následující:

1. Výroba v oblasti termodynamické stability diamantu působením statických tlaků minimálně 6 000 MPa a teplot min. 2 000 K na grafit, v době několika sekund bez speciálního prostředí.

2. Výroba v oblasti termodynamické stability diamantu působením vysokých dynamických tlaků, kdy přechází grafit na diamant působením rázové detonační vlny, která vytváří potřebný tlak 75 000 až 100 000 MPa, jako i potřebně vysokou teplotu. Čas působení je jen několik mikrosekund, anebo zlomků mikrosekund, proto je takto získaný diamant jemnozrný.

3. Výroba v oblasti termodynamické stability grafitu probíhá při atmosférickém (nebo ještě nižším) tlaku a při teplotách 1400 až 1500 K epitaxiálním narůstáním diamantu v zárodcích.

Uhlík se vyskytuje ve dvou modifikacích. Jednou je i diamant. Princip syntézy pak spočívá v převedení hexagonální modifikace uhlíku (grafit) na modifikaci kubickou (diamant). Za atmosférické teploty a tlaku je stabilní fází grafit a nestabilní diamant. Diamant má proto snahu za normální teploty a tlaku přecházet do stabilní fáze - grafitu. Tento pro-

ces se označuje jako grafitizace a vede k postupné degradaci diamantu. Při vyšších teplotách a tlacích je však diamant fází stabilní a grafit má snahu přecházet v diamant. Rozhraní těchto dvou modifikací se ve fázovém diagramu se označuje jako Berman - Simonova křivka. Ta reprezentuje určité minimální množství energie, které je třeba látky dodat, aby přešla z jedné fáze do druhé. Toto množství energie je konstantní pro každou chemicky čistou látku. Pro jeden gram uhlíku je tato energie 2968J. Aby se syntéza diamantu zrychli-la používají se katalyzátory. Pro přeměnu grafitu na diamant se jako katalyzátory osvědčily prvky z osmé skupiny periodické tabulky prvků (železo, kobalt, nikl a další). Pro snazší označení se tyto prvky označují značkou Me.

Při syntéze se čistý grafit za zvýšené teploty a tlaku dostane do oblasti, kde je stabilní fází diamant. Z roztoku, který se vytvoří z roztaveného katalyzátoru a grafitu se s rostoucí teplotou začne vylučovat diamant ve formě krystalů. S postupujícím časem velikost krystalů diamantu narůstá a jejich velikost je pak dána prostorovým omezením. Běžně je doba syntézy několik desítek minut. Pro výrobu větších diamantů o velikosti několik milimetrů jsou syntézní časy až několik desítek hodin, což je při průmyslové výrobě neekonomické. Tento fakt vedl k vývoji polykrystalických diamantů. Po ochlazení a snížení tlaku se vzniklý diamantový prášek čistí od zbytků katalyzátorů a třídí podle velikosti.

4.2.2 Výroba diamantových povlaků metodou CVD

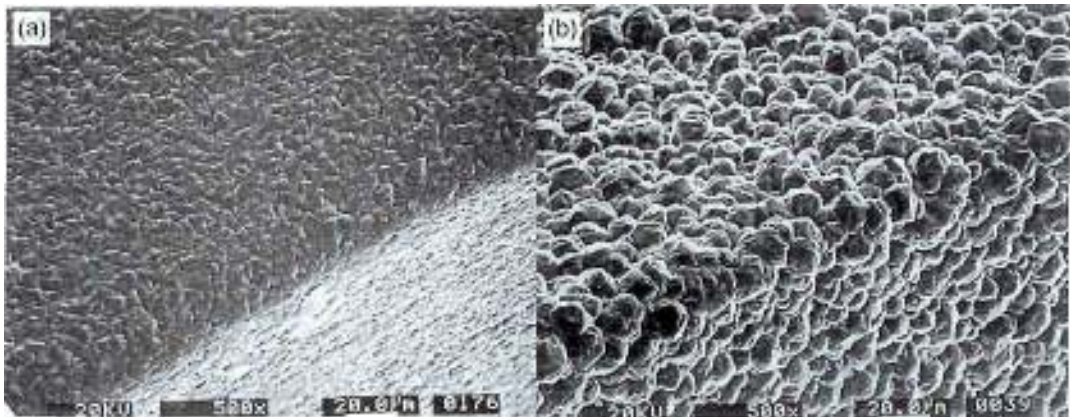
Metoda CVD (Chemical Vapour Depositions = chemické napařování z plynné fáze) je známa od padesátých let 20.století. Používá se k výrobě např. povlakovaných slinutých karbidů nebo pro přípravu tenkých vrstev různých materiálů v optice a elektronice.

Princip metody spočívá ve vytváření povlaků z plynné fáze na vhodném substrátu. Jako substrát se při výrobě diamantu používá karbid wolframu nebo křemík. Substrát je ve formě destičky vložen do plynného prostředí a zahřát na teplotu 2000 °C. Plynné prostředí se skládá z nosného plynu a aktivní plynné látky. Rozkladem aktivní plynné látky za vysokých teplot se na povrchu substrátu vylučuje vrstva diamantu.

Nejčastěji používaným nosným plynem je H_2 , aktivní látka je metanol, jehož páry se působením vysokých teplot rozkládají. Jedním z produktů rozkladu je i uhlík, který ve formě diamantu vytváří povlak na povrchu substrátu. K ohřevu plynné fáze se používá laser nebo častěji mikrovlnné záření. Proces probíhá při tlaku 15 kPa. Potřebný podtlak zajišťují

vývěvy. Regulace rychlosti napařování probíhá pomocí změny poměru nosného a aktivního plynu.

Předností takto vzniklého diamantu je jeho velmi dobrá adheze k podložce. Nevyskytují se vady struktury jako jsou póry. Na rozdíl od polykrystalického diamantu získaného slinováním je diamantový povlak homogenní. Diamantový povlak je zachycen na obr. 17.



Obr.17. Jemnozrnný (a) a hrubozrnný (b) diamantový povlak

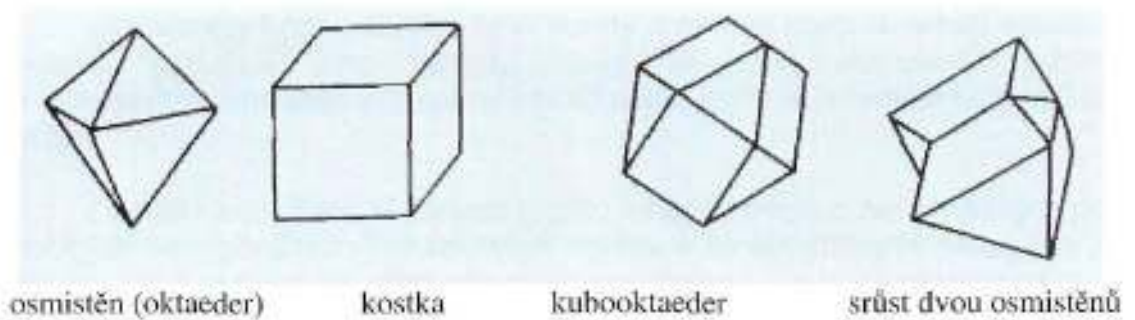
4.2.3 Krystaly syntetických diamantů

Základní tvary krystalů syntetických diamantů tvoří krychle, osmistěn a jejich kombinace, viz obr. 18. Tvary, jako rombododekaedr, tetraedr, trigontrioktaedr a jiné, ve kterých se vyskytují přírodní diamanty, nejsou typické pro syntetické diamanty. Osmistěny, krychle a kubooktaedry vytvářejí jednoduché spojení, které se tvoří obvykle po ploškách. Vzhledem na praktické použití přiřazujeme jednoduché spojení k monokrystalům. Spojení může být dokonalé, nedokonalé a neúplné. Mezi tvary syntetických diamantů se vyskytují také polykrystalické agregáty a zrna nepravidelného tvaru. Jsou to vícenásobná spojení monokrystalů anebo neúplných spojení. Na rozdíl od přírodních diamantů mohou mít syntetické diamanty i tvar skeletu.

Základní morfologické typy syntetických diamantů je možno rozdělit na 3 skupiny:

- monokrystal a jednoduchá spojení
- polykrystalické agregáty
- skeletové krystaly

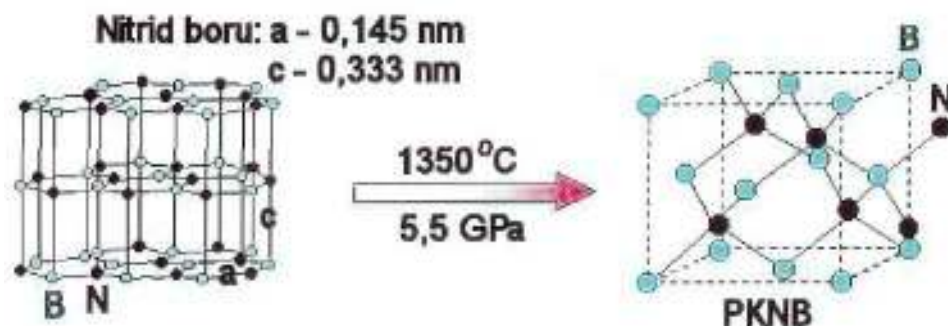
Tvar krystalů charakterizují jejich základní prvky, jakými jsou plošky, hrany a vrcholy.



Obr.18. Krystaly syntetických diamantů

4.3 Kubický nitrid bóru

Kubický nitrid bóru se v přírodě nenachází. Je však asi sto let známý nitrid bóru, který krystalizuje v hexagonální soustavě, podobně jako grafit. Nitrid bóru je chemická sloučenina, která se skládá ze 43,6 % bóru a 56,4 % dusíku. Sousední atomy v nitridu jsou vzdálené 0,145 nm (v grafitu 0,142 nm), čili jsou větší než-li v grafitu. Délka strany elementární buňky nitridu bóru je 0,333 nm (v grafitu 0,335 nm), teda menší než v grafitu. Přitom je v každém šestiúhelníku atom vázaný se třemi atomy bóru a naopak. Šestiúhelníky v soustavě nitridu bóru jsou sestavené tak, že atomy bóru a dusíku se střídají na vertikální ose, viz obr. 19.

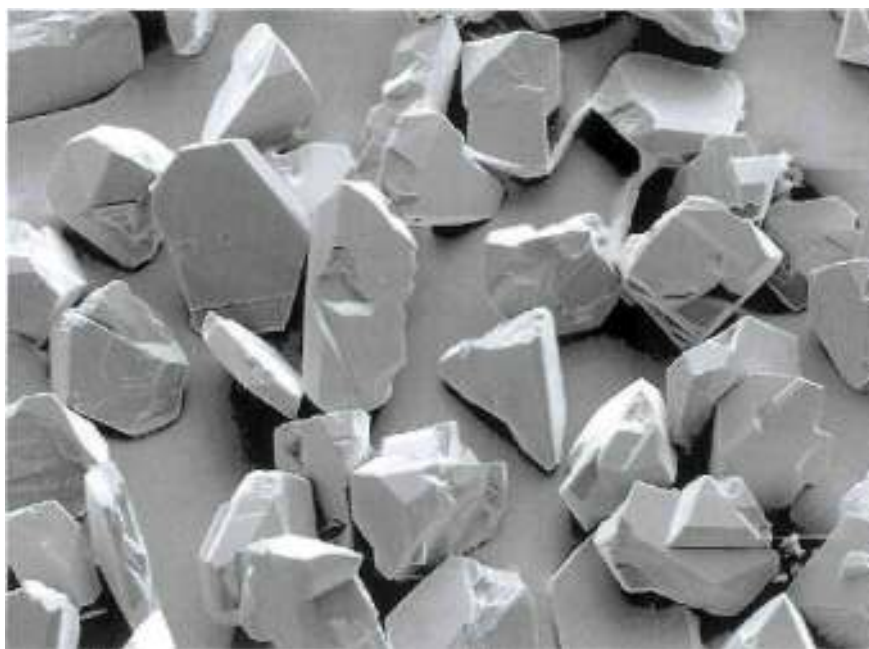


Obr.19. Krystalická mřížka nitridu boru

Nitrid bóru se vícerými vlastnostmi podobá grafitu. Např. je měkký a kluzký. V hexagonálním nitridu bóru, stejně jako i v grafitu, jsou plochy lehkého skluzu se slabou vazbou ve směru hrany základní hexagonální soustavy a podobně jako v grafitu se tyto plochy po sobě kloužou. Vzhledem na velkou příbuznost struktur a fyzikálních vlastností grafitu a nitridu bóru se nitrid bóru pro své zbarvení často nazývá bílý grafit.

Sloučeniny bóru a dusíku tvoří boridy a nitridy, které dosahují vysokou tvrdost, podobně jako karbidy, které se tvoří slučováním uhlíku s těžkotavitelnými kovy a dosahují pět až desetkrát vyšší tvrdost než základní kov.

Z podobnosti všech vlastností grafitu a nitridu bóru, a zejména jejich podobných hexagonálních krystalických mřížek a téměř stejnými parametry je možno předpokládat, že nitrid bóru může existovat i v kubické modifikaci.



Obr.20. Krystaly KNB

Tento předpoklad se však experimentálně dokázal až potom, co se mohlo používat zařízení, které umožňovalo vyvíjet tlak vysoko řádově několik desítek tisíc MPa a teplotu asi 2000 K, teda po uskutečnění syntetické výroby diamantu z grafitu. Podařilo se to v roce 1957 americkému vědci Robertovi Ch. Ventorfovi z General Electric. Takto vytvořený nový druh supertvrdeho materiálu nazvali Baryton. Kubický nitrid bóru vyrobený o tři roky později v bývalém Sovětském Svazu dostal název Elbor anebo Kubonit.

Tab.3. Vlastnosti diamantu a KNB

	Diamant	KNB
Typ mřížky	Kubická	Kubická
Délka strany mřížky [nm]	0,3567	0,3616
Hustota [g.cm ⁻³]	3,51	3,48
Tvrдость podle Knoop	8600 -10000	8000 -10000
Tepelná stálost [°C]	700 - 800	1500 -1600
Počet atomů v 1 cm ³	1,69 x 10 ²³	1,69 x 10 ²³

Výrobou kubického nitridu bóru ve speciálním zařízení při teplotách a tlacích přibližně stejných jako při syntetické výrobě diamantu se potvrdila hypotéza o možnosti vzniku kubického nitridu bóru, s vlastnostmi podobnými, jako má diamant a s parametry krystalické mřížky téměř stejnými, jako má mřížka diamantu. Strukturní mřížku tvoří atomy bóru a dusíku (zatím co mřížku diamantu pouze atomy uhlíku). Každý atom bóru se váže se čtyřmi atomy dusíku, rozloženými v prostoru na vrcholech čtyřstěnu. Takto se dokázalo, že nitrid bóru, stejně jako i uhlík, může existovat ve dvou modifikacích, a to v měkké - hexagonální a tvrdé - kubické.

Po získání prvních vzorků se zjistilo, že tvrdost kubického nitridu bóru je taková, že ním lze poškodit diamant a jeho práškem je možné brousit přírodní diamant.

Hustota obou látek je prakticky stejná a souvisí s počtem atomů v jednotce objemu. Diamant má vyšší počet atomů v jednotce objemu a tím i vyšší hustotu.

Kubický nitrid boru má oproti diamantu téměř dvojnásobnou tepelnou odolnost. Běžně vydrží kubický nitrid boru teploty 1500 až 1600 °C. Při vyšších teplotách se v přítomnosti vzdušného kyslíku rozkládá na oxidu dusíku a bor. Chemická stálost je u kubického nitridu boru značně lepší než u diamantu. Nerozpouští se v běžných rozpouštědlech ani za vyšších teplot. V roztavených kovech se nerozpouští. Dobrá tepelná odolnost a vysoká chemická stálost značně rozšiřuje oblasti použití kubického nitridu boru.

Všemi těmito vlastnostmi, jako i např. chemickou inertností kubického nitridu boru vůči železu je kubický nitrid boru nenahraditelným materiálem na obrábění ocelí, vhodnější než diamant. Vlastnosti kubického nitridu boru jsou uvedeny v tab. 3.

Při porovnání mechanických a fyzikálních vlastností kubické a hexagonální modifikace jsou patrné značné rozdíly. Ty jsou podobné rozdílům mezi diamantem a grafitem. Velmi velký je rozdíl ve tvrdosti. Kubický nitrid boru má vyšší hustotu a větší tepelnou vodivost.

V souvislosti s tendencí zvyšovat spolehlivost a životnost mechanismů a strojů se ve strojnictví nevyhnutně začaly používat speciální vysokolegované oceli a slitiny se zvýšenými fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, které je možné těžko obrobit i brusnými nástroji.

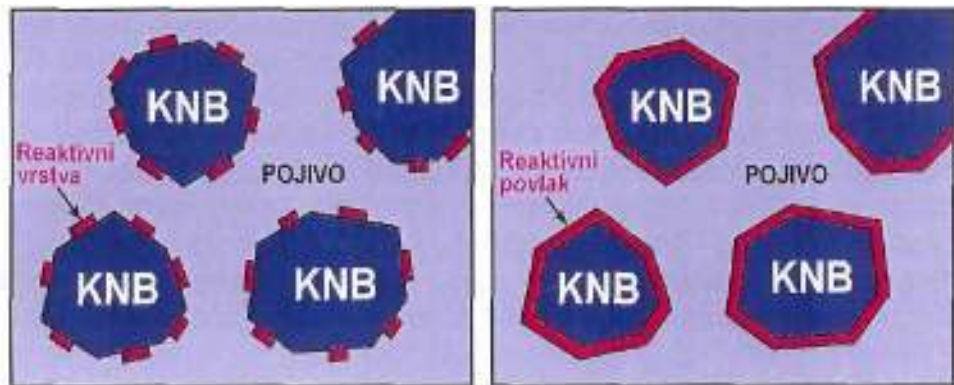
Tady vystupuje do popředí význam kubického nitridu bóru, který se vyznačuje vysokou tepelnou stálostí v chemicky agresivních prostředích. Kromě toho je chemicky inertní ke konstrukčním kovům.

V sedmdesátých letech začaly první pokusy ze syntetickou výrobou kubického nitridu boru. Snahou bylo vyrobit kubický nitrid boru v požadované velikosti. Výroba větších monolitických zrn se ukázala jako ekonomicky neefektivní a řešení se našlo podobně jako u polykrystalického diamantu v použití práškové metalurgie. Od té doby se oblast supertvrdých řezných materiálů rozšířila o nové materiály na bázi polykrystalického kubického nitridu boru.

V současnosti můžeme získat krystaly kubického nitridu bóru až do průměru 6mm. Tak je možné zabezpečit výrobu nožů, fréz a jiných nástrojů na rychlostní obrábění kalených ocelí, což naznačuje perspektivu v mnoha případech nahradit broušení běžným obráběním.

Polykrystalický kubický nitrid boru je materiál tvořený kubickým nitridem boru, který je spojen do kompaktního celku za použití pojiva. Pojiva značně ovlivňují mechanické a fyzikální vlastnosti výsledné polykrystalické kompozice. Množství pojiva se řídí předpokládanými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi a může dosáhnout až 50 % celkového objemu. Jako pojiva se nejčastěji používají kovy, karbidy, keramika případně i další látky. Z kovů se nejčastěji používá titan nebo i nitrid titanu. Méně se používá i nikl či jeho kombinace s titanem. Kovy významně ovlivňují mechanické vlastnosti jako jsou tepelná vodivost a houževnatost. Karbidy jsou nejčastěji zastoupeny karbidem wolframu a karbidem titanu. Keramické materiály zastupuje celá řada materiálů jak oxidických, tak i neoxidických.

Příkladem nového postupu výroby je výroba supertvrdých materiálů firmou Mitsubishi, která propaguje slinování aktivovaných částic polykrystalického kubického nitridu boru, jako metodu pro 21. století. Při této metodě jsou eliminovány všechny nečistoty a příměsi a na povrchu zrn z PKNB se vytvoří rovnoměrná reaktivní vrstva ve formě pláště, který kompletně obalí každé zrno. Princip metody je uveden na obr.21



Obr.21. Princip metody Particle activated sintering

4.3.1 Syntéza kubického nitridu boru

Při syntéze kubického nitridu boru se jako surovina používá hexagonální nitrid boru. Princip syntézy je stejný jako u diamantu. Odlišnosti jsou ovšem v chemických dějích, které při syntéze probíhají. Používají se jiné katalyzátory. Další odlišnosti jsou v syntetizačních teplotách. Syntéza kubického nitridu boru vyžaduje použití vyšších teplot a také vyšších tlaků. Tato skutečnost souvisí s větší hodnotou energie pro přeměnu na kubický nitrid boru. Vysoká hodnota energie pro přeměnu se projevila tím, že se kubický nitrid boru v přírodě nevyskytuje. Optimální podmínky pro syntézu kubického nitridu boru jsou při teplotách nad 1800 °C. Potřebné tlaky se pak pohybují nad hodnotou 5 GPa.

V průmyslové praxi je tato syntéza realizována na speciálním vysokotlakém zařízení, které se konstrukčně velmi podobá zařízení, na kterém se provádí syntéza diamantu. Obě se podobají velmi podobají zařízení, na němž se v roce 1955 uskutečnila první syntéza diamantu. Určitá shoda je i při porovnání se zařízeními pro výrobu polykrystalického diamantu a grafitu. Ta pramení z toho, že při výrobě polykrystalických materiálů je nutné dokonale natavit krystaly za vysokých teplot a tlaků, aby došlo k dobrému spojení s pojivem.

5 DRSNOST POVRCHU

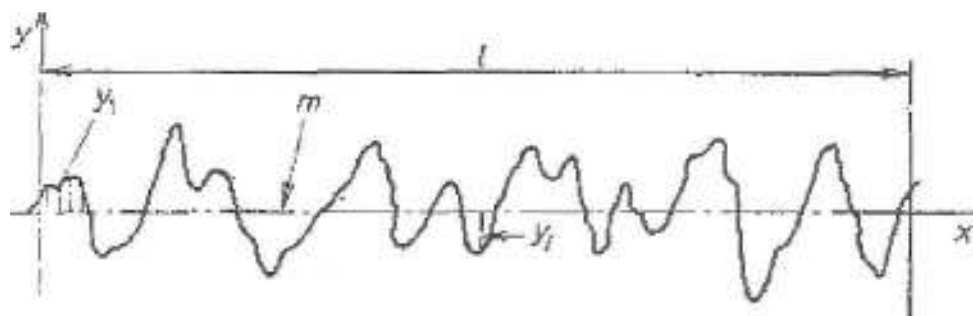
Nerovnosti, které se objevují na obrobené ploše, mají v mnoha případech určité charakteristické uspořádání, které je výsledkem vzájemných geometrických a kinematických vztahů nástroje a obrobku, doprovázených některými fyzikálními jevy. Podle podmínek obrábění, druhu materiálu obrobku, materiálu nástroje se to projeví buď na změně charakteru povrchu, nebo na změně vlastností povrchové vrstvy.

5.1 Základní pojmy

V důsledku používání různých technologických operací vznikají na povrchu součástí nerovnosti. Technologické faktory způsobující nerovnosti povrchu současně ovlivňují i vlastnosti povrchové vrstvy materiálu součástí.

Tvar nerovností povrchu je velmi rozmanitý, což záleží na dokončovací metodě obrábění.

Základní povrch je takový povrch, od kterého se vyhodnocují veličiny drsnosti povrchu. Vzdálenost mezi bodem skutečného profilu a základní čarou je úchylka profilu y .



Obr.22. Úchylka profilu

5.2 Normalizované charakteristiky drsnosti povrchu

Požadavky na drsnost povrchu se vyjadřují charakteristikou drsnosti povrchu podle ČSN 01 4451-ST SEV 638-77, číselnou hodnotou příslušné veličiny a základní délkou, na které se veličina určuje. Normalizované charakteristiky drsnosti povrchu jsou následující:

R_a - střední aritmetická úchylka profilu

R_z - výška nerovností profilu z deseti bodů

R_m - největší výška nerovností profilu

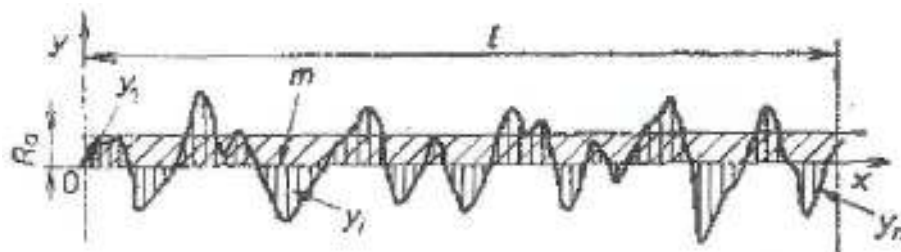
S_m - střední rozteč nerovností profilu

S - střední rozteč místních výstupků profilu

t_p - nosný podíl

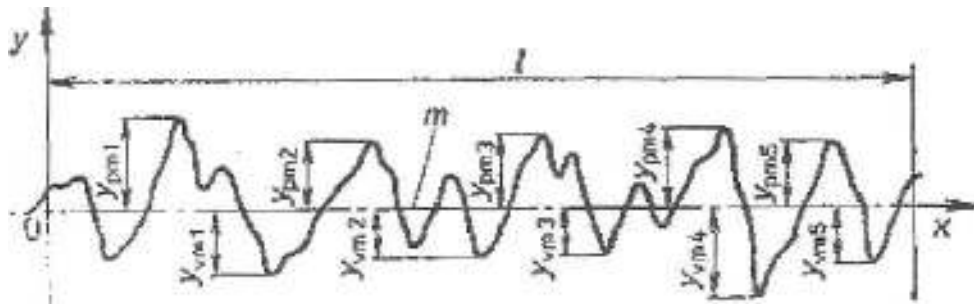
Střední aritmetické úchylka profilu R_a je přednostní výškovou charakteristikou drsnosti povrchu. Je to střední aritmetická hodnota absolutních úchylek profilu v rozsahu základní délky.

Geometricky se tento parametr interpretuje výškou obdélníku sestaveného na střední čáře a o stejné ploše jako nerovnosti profilu, uzavřené profilem od střední čáry.



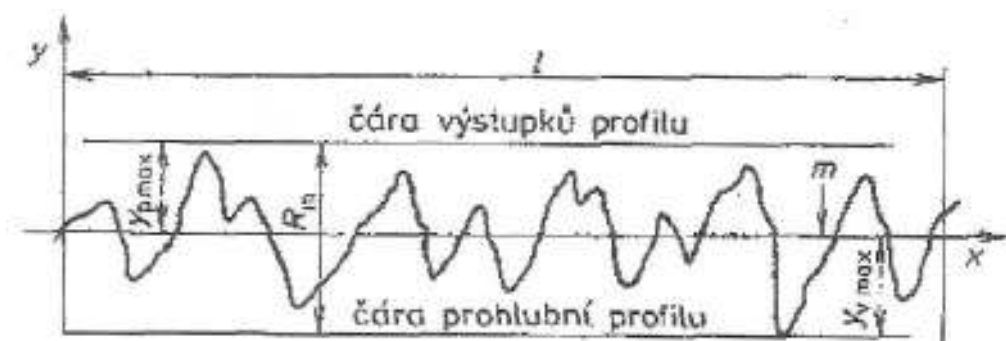
Obr.23. Vyjádření hodnoty R_a

Výška nerovností profilu z deseti bodů R_z je definována jako střední hodnota z absolutních hodnot výšek pěti nejvyšších výstupků profilu a hloubek pěti nejnižších prohlubní profilu v rozsahu základní délky.



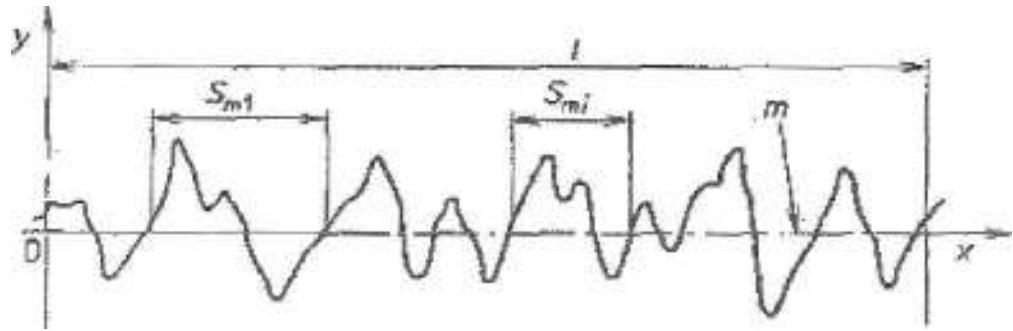
Obr.24. Vyjádření hodnoty R_z

Největší výška nerovností profilu R_m je výšková charakteristika drsnosti povrchu, určená vzdáleností mezi čarou výstupků profilu a čarou prohlubní profilu v rozsahu základní délky, tedy $R_m = y_{pmax} + y_{vmax}$



Obr.25. Vyjádření hodnoty R_m

Střední rozteč nerovností profilu S_m je charakteristikou drsnosti povrchu v podélném směru povrchu. Určuje se jako střední hodnota roztečí nerovností profilu S_{mi} v rozsahu základní délky



Obr.26. Vyjádření střední rozteče nerovností S_m

Střední rozteč místních výstupků S je charakteristikou drsnosti povrchu v podélném směru profilu. Určuje se jako střední hodnota roztečí místních výstupků, ležící v rozsahu základní délky.

Nosný podíl t_p je tvarovou charakteristikou profilu. Je definován jako poměr nosné délky profilu k základní délce.

5.3 Nenormalizované charakteristiky drsnosti povrchu

Střední kvadratická úchylka profilu R_q je směrodatnou odchylkou souřadnicí jednotlivých bodů profilu povrchu. Často se uvádí, že hodnoty R_a a R_q jsou prakticky rovnocenné při úvaze nepřesnosti vlastního měření nebo při výběru místa měření. Běžně se uvádí $R_q \sim 1,1 R_a$.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 OBROBENÍ VZORKŮ

Vzhledem k tomu, že experiment, při kterém měli být soustružením obrobny vzorky z hliníku AlCu4Mg, mosazi CuZn39Pb1, PVC a PA 66 břitovou destičkou z polykrystalického diamantu, vyžadoval velké nároky na řeznou rychlost, byl pokus proveden na frézovacím centru typu MAHO DECKEL DMU 60T v podniku SKD Bojkovice. K provedení experimentu bylo zapotřebí řezné rychlosti převyšující 20000 ot/min. a to konvenční soustružnická centra nedosahují. Proto byl projekt přepracován tak, aby bylo možné provést soustružení na uvedeném frézovacím centru za požadovaných řezných rychlostí.

6.1 Použitá frézka

K experimentální části byla použita frézka MAHO DECKEL DMU 60T, která slouží především pro výrobu forem na vstřikování plastů. Vyznačuje se zejména velkou přesností a vysokým výkonem. Vysoká tuhost stroje zaručovala úspěšné provedení experimentu.



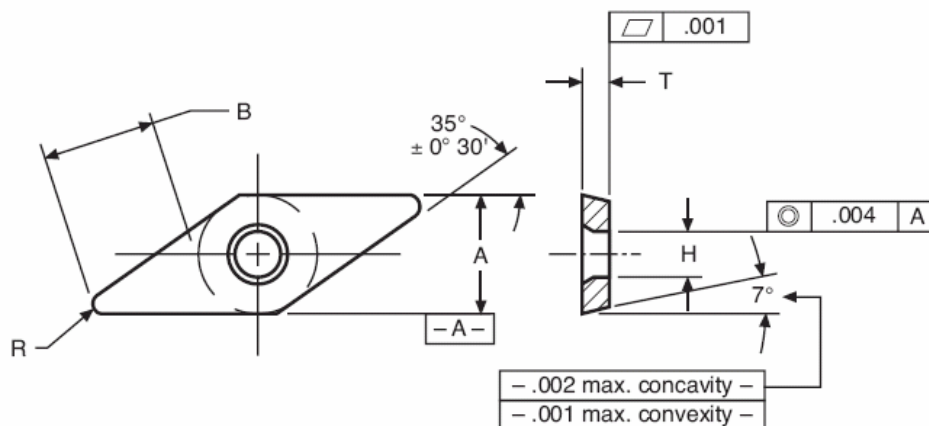
Obr.27. Frézka MAHO DECKEL DMU 60T

Tab.4. Základní parametry stroje

Nosnost	400 kg
x,y,z	600 x 400 x 400 mm
Výkon	28 kW
Točivý moment	280 Nm
Max. otáčky	42 000 ot/min
Max.. posuv	15 m/min

6.2 Použitý nástroj

Při provádění experimentů byla použita břitová destička firmy Sandvik Coromant, kterou poskytla firma SKD Bojkovice. Tato diamantová destička typu WCMW 332F CD10 se používá k obrábění barevných kovů, především hliníku a jeho slitin, mědi a jejích slitin, dále plastů a kompozitních materiálů.



Obr.28. Břitová destička Sandvik Coromant CD10

6.3 Materiál obrobku

Jako materiály obrobku byly zvoleny následující: Polyamid (PA 66), Polyvinylchlorid (PVC-U), hliník AlCu4Mg a mosaz CuZn39Pb1.

Volba těchto materiálů byla s ohledem na doporučené materiály výrobce Sandvik Coromant pro použitou diamantovou destičku. Obrábění těchto materiálů vybranou břitovou destičkou poskytuje nejefektivnější využití.

Tab.5. Základní vlastnosti PVC a PA66

Materiál	ρ [kg/m ³]	E [MPa]	σ [MPa]	Bod tání[°C]
PVC	1430	55	3000	80
PA 66	1140	55	1650	255

Tab.6. Základní vlastnosti hliníku a mosazi

Materiál	ρ [kg/m ³]	tažnost [%]	σ [MPa]	Bod tání[°C]
AlCu4Mg	2700	25	180-250	660
CuZn39Pb1	8400	15	300-400	940

6.4 Řezné podmínky

Řezné podmínky byly voleny dle doporučení výrobce břitové destičky a to v rozsahu mírně překračujícím dolní i horní extrémy, abychom získali objektivní informace efektivního využití nástroje. Jmenovité hodnoty řezných podmínek jsou v následujících tabulkách.

Tab.7. Řezné podmínky při obrábění PVC a PA 66

Materiál: PVC, PA 66	
Posuv [mm/ot]	$f_1 = 0,1; f_2 = 0,2; f_3 = 0,3; f_4 = 0,4$
Řezná rychlost [m/min]	$v_{c1} = 100; v_{c2} = 500; v_{c3} = 1000; v_{c4} = 1500$
Hloubka záběru [mm]	$a_p = \text{konst.} = 0,5 \text{ mm}$

Tab.8. Řezné podmínky při obrábění hliníku

Materiál: hliník AlCu4Mg	
Posuv [mm/ot]	$f_1 = 0,1; f_2 = 0,15; f_3 = 0,2; f_4 = 0,25$
Řezná rychlost [m/min]	$v_{c1} = 800; v_{c2} = 1400; v_{c3} = 2000; v_{c4} = 2600$
Hloubka záběru [mm]	$a_p = \text{konst.} = 0,5 \text{ mm}$

Tab.9. Řezné podmínky při obrábění mosazi

Materiál: mosaz CuZn39Pb1	
Posuv [mm/ot]	$f_1 = 0,1; f_2 = 0,2; f_3 = 0,25; f_4 = 0,3$
Řezná rychlost [m/min]	$v_{c1} = 500; v_{c2} = 700; v_{c3} = 900; v_{c4} = 1200$
Hloubka záběru [mm]	$a_p = \text{konst.} = 0,5 \text{ mm}$

7 MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU

Pro měření drsnosti povrchu byl použit přístroj Mitutoyo SJ – 301. Jedná se o zařízení na měření drsnosti povrchu v dílenském prostředí. Snímacím hrotem dokáže měřit strukturu povrchu a charakterizovat ji za pomoci řady parametrů podle mezinárodních norem. Výsledky měření se zobrazují na digitální display nebo se pomocí vestavěné tiskárny vytisknou.

Měřeny byly tyto veličiny: R_a - střední aritmetická úchylka profilu

R_z - výška nerovností profilu z deseti bodů

R_q - střední kvadratická úchylka profilu

Tab.10. Základní specifikace přístroje SJ - 301

Snímací metoda	diferenciální indukční
Měřicí rozsah	300 mm
Materiál doteku	diamant
Poloměr snímacího hrotu	5 mm
Měřicí síla	4 mN
Poloměr snímací patky	40 mm
Rozsah posuvu snímače	21 mm
Rychlost posuvu měření	0,25mm/s; 0,5mm/s
Rychlost zpětného posuvu	1mm/s
Konfigurace spodní hrany	V profil

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Při obrábění každého druhu materiálu bylo použito celkem 16 vzorků o $\varnothing 40\text{mm}$ a délce 50mm, uchycených na speciálním přípravku pro upnutí do frézovacího centra. Každý vzorek byl obroben při rozdílných řezných podmínkách viz. tabulky 7-9.

Protože nebylo možné při manuálním ovládání stroje dosáhnout všech požadovaných řezných podmínek, byl experiment proveden jen v omezených relacích posuvů, za to při všech požadovaných hodnotách řezných rychlostí. Skutečnost, že zvýšením rychlosti posuvu se výrazně zhoršuje kvalita obrobeného povrchu, byl konečný počet vzorků pro objektivní posouzení vlivu řezných podmínek na jakost obrobeného povrchu vcelku dostatečný.

Na každém obrobeném povrchu byly 5x změřeny hodnoty drsnosti povrchu „Ra“, hodnoty největších výšek profilů „Rz“ a hodnoty střední kvadratické úchylnosti profilu „Rq“. Z naměřených hodnot se vypočetl průměr. Tyto průměrné hodnoty byly zaneseny do grafu, v němž byly v závislosti na příslušné hodnotě technologické podmínky.

Pro sledovaný materiál PA 66 z grafů vyplývá, že se zvyšující se řeznou rychlostí, blíží se maximální doporučené výrobcem, se kvalita povrchu zlepšuje a to až na $Ra = 1,06$ při řezné rychlosti 1500 m/min. Opačný trend je možné sledovat u materiálu PVC, když právě nejlepší kvality povrchu dosahujeme při velmi nízké řezné rychlosti $v_c = 100$ m/min. Závislost drsnosti povrchu na rychlosti posuvu je u obou plastů stejná, se zvyšující se řeznou rychlostí se drsnost výrazně zvyšuje.

Při obrábění hliníku diamantovou břitovou destičkou vykazuje povrch velmi dobrou kvalitu i při maximálních řezných rychlostech udávaných výrobcem. Při rychlosti 2600m/min byla drsnost povrchu $Ra = 1,31$. Obdobné výsledky je možné pozorovat i v závislosti na rychlosti posuvu, kde při rychlosti $f = 0,25$ je drsnost $Ra = 3,17$.

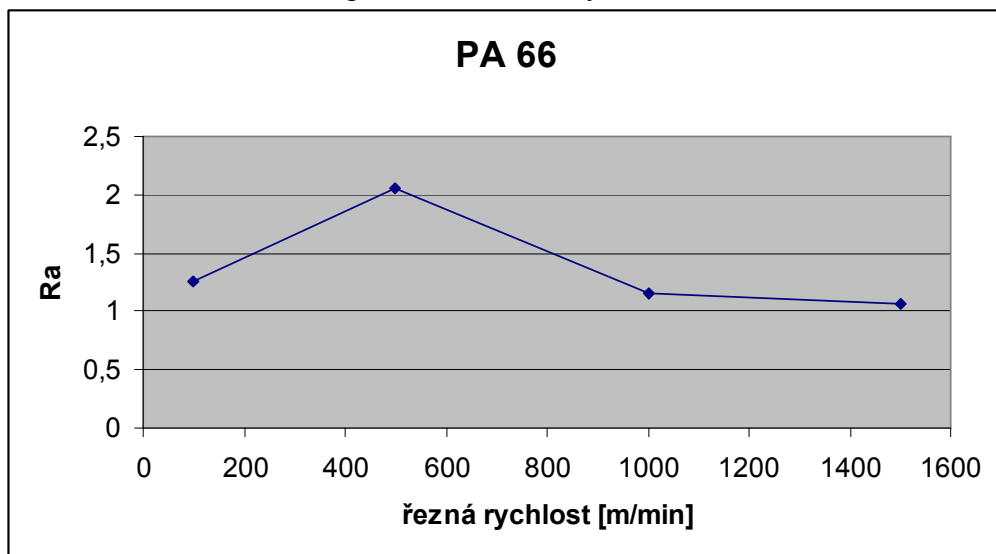
U mosazi se kvalita povrchu se zvyšující se řeznou rychlostí zlepšuje až na $Ra = 0,51$ při 1200m/min. Závislost drsnosti na posuvu vykazuje při posuvu $f = 0,3\text{mm}$ výrazné zhoršení drsnosti a to až na $Ra = 9,80$, když ještě při $f = 0,25\text{mm}$ byla drsnost $Ra = 2,55$.

8.1 PA 66

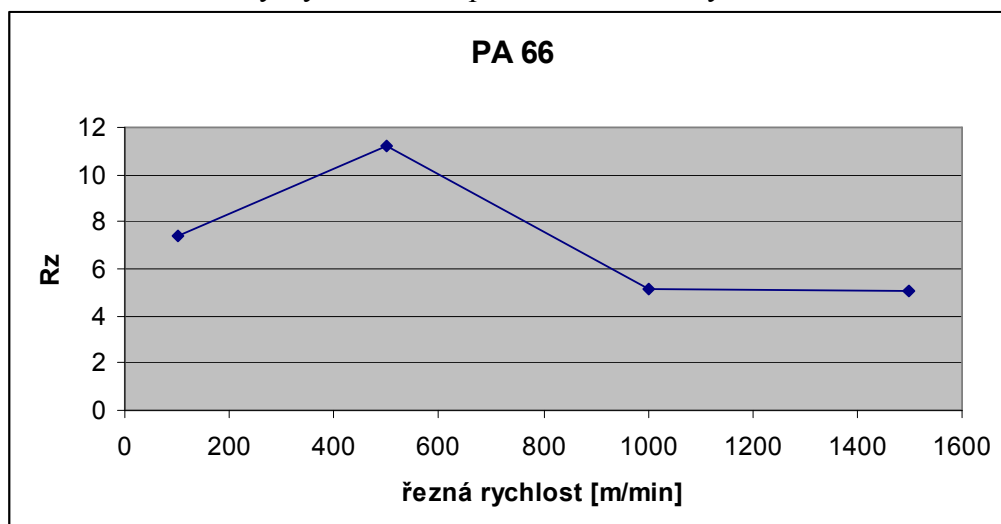
Tab.11. Průměrné hodnoty Ra, Rz vybraných řezných podmínek – PA 66

PA 66 ; $f_1 = 0,1 \text{ mm}$; $a_p = 0,5 \text{ mm}$				
	$v_{c1}=100\text{m/min}$	$v_{c2}=500\text{m/min}$	$v_{c3}=1000\text{m/min}$	$v_{c4}=1500\text{m/min}$
$\emptyset R_a$	1,26	2,06	1,15	1,06
$\emptyset R_z$	7,39	11,25	5,13	5,05

Graf 1. Závislost drsnosti povrchu na řezné rychlosti – PA 66



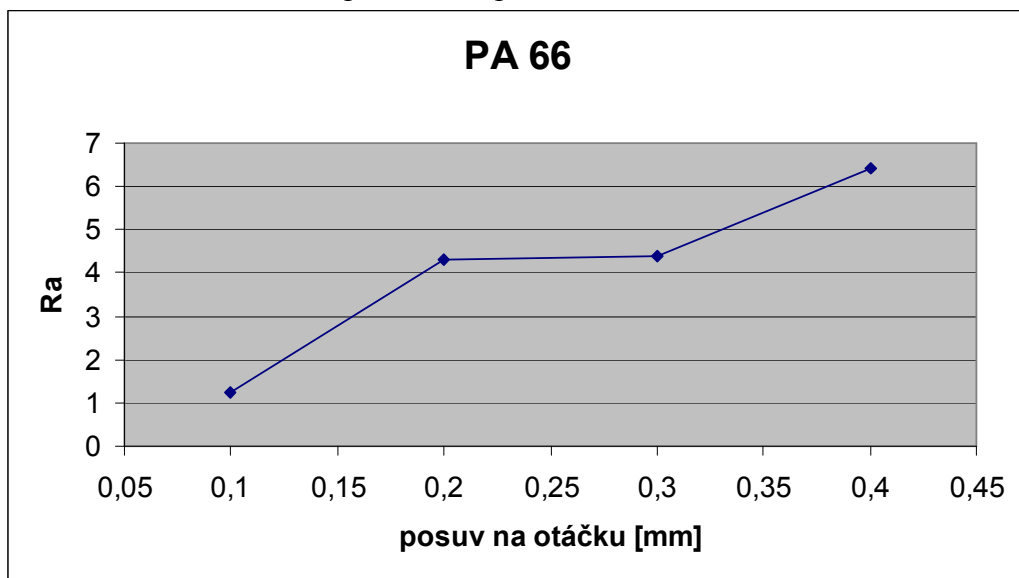
Graf 2. Závislost výšky nerovností povrchu na řezné rychlosti – PA 66



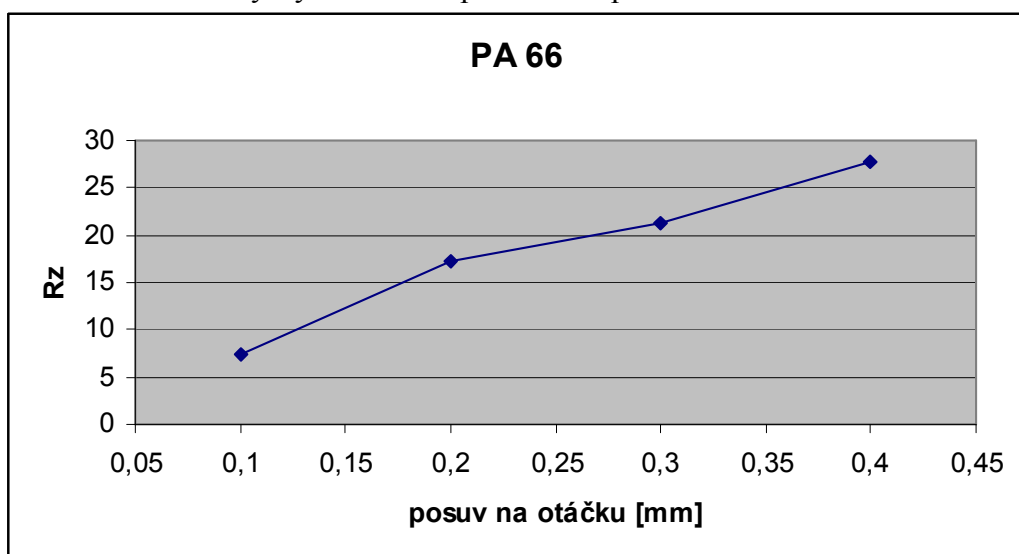
Tab.12. Průměrné hodnoty Ra, Rz vybraných řezných podmínek – PA 66

PA 66 ; $v_{c1} = 100 \text{ m/min}$; $a_p = 0,5 \text{ mm}$				
	$f_1=0,1\text{mm}$	$f_2=0,2\text{mm}$	$f_3=0,3\text{mm}$	$f_4=0,4\text{mm}$
$\emptyset R_a$	1,26	4,31	4,41	6,44
$\emptyset R_z$	7,39	17,32	21,20	27,81

Graf 3. Závislost drsnosti povrchu na posuvu – PA 66



Graf 4. Závislost výšky nerovností povrchu na posuvu – PA 66

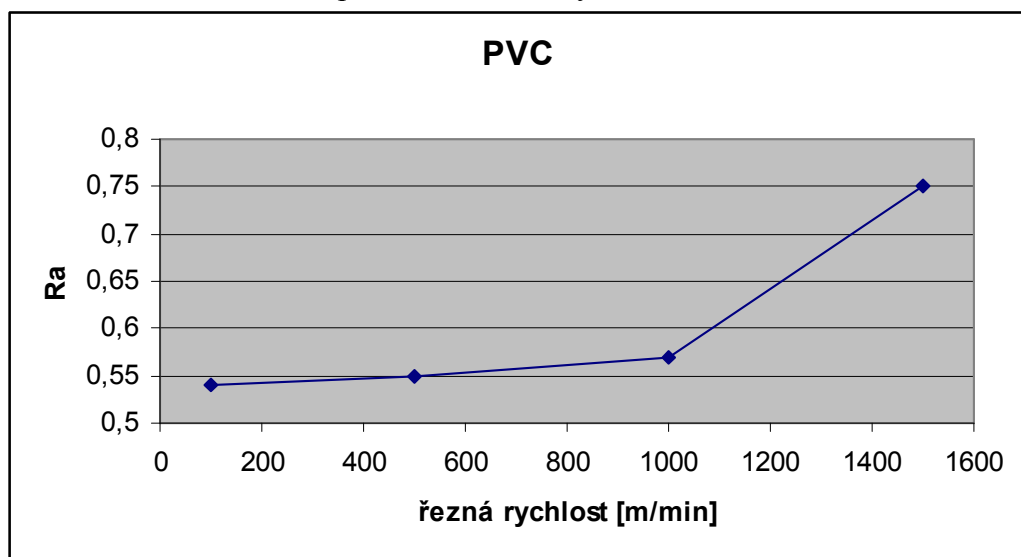


8.2 PVC

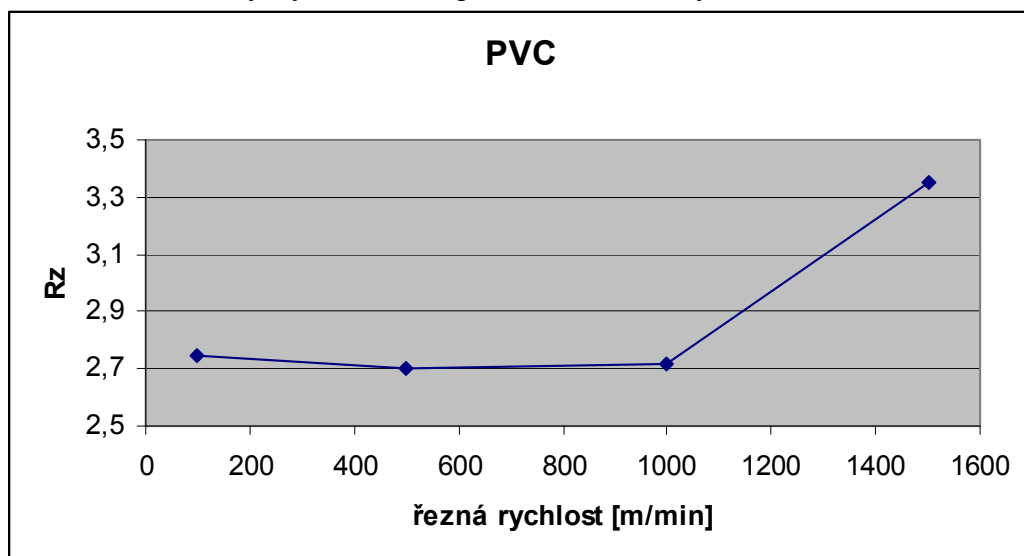
Tab.13. Průměrné hodnoty Ra, Rz vybraných řezných podmínek - PVC

PVC; $f_1 = 0,1 \text{ mm}$; $a_p = 0,5 \text{ mm}$				
	$v_{c1}=100\text{m/min}$	$v_{c2}=500\text{m/min}$	$v_{c3}=1000\text{m/min}$	$v_{c4}=1500\text{m/min}$
$\emptyset R_a$	0,54	0,55	0,57	0,75
$\emptyset R_z$	2,75	2,70	2,72	3,35

Graf 5. Závislost drsnosti povrchu na řezné rychlosti – PVC



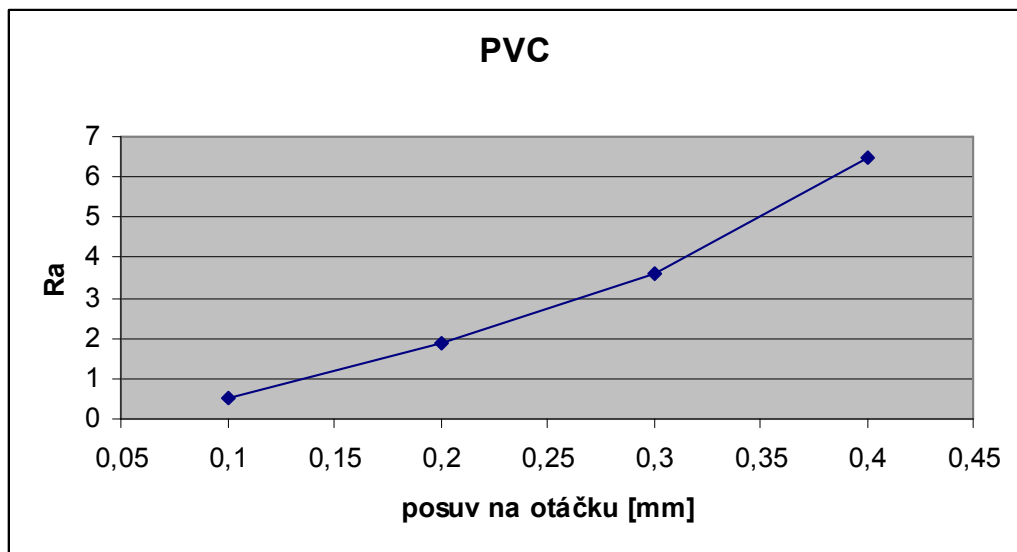
Graf 6. Závislost výšky nerovností povrchu na řezné rychlosti – PVC



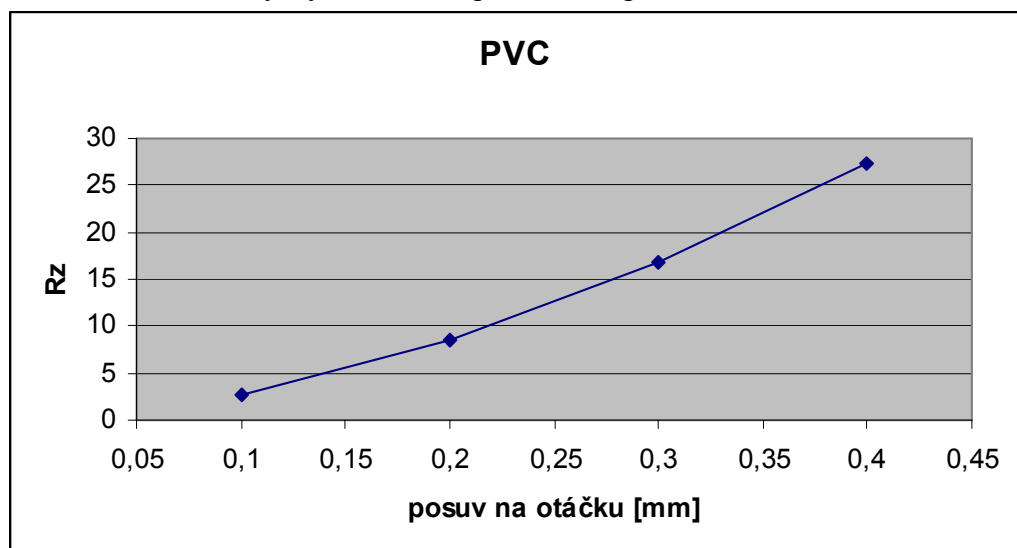
Tab.14. Průměrné hodnoty Ra, Rz za vybraných řezných podmínek - PVC

PVC; $v_{c1} = 100 \text{ m/min}$; $a_p = 0,5 \text{ mm}$				
	$f_1=0,1\text{mm}$	$f_2=0,2\text{mm}$	$f_3=0,3\text{mm}$	$f_4=0,4\text{mm}$
$\emptyset R_a$	0,54	1,87	3,62	6,50
$\emptyset R_z$	2,75	8,50	16,68	27,31

Graf 7. Závislost drsnosti povrchu na posuvu – PVC



Graf 8. Závislost výšky nerovností povrchu na posuvu – PVC

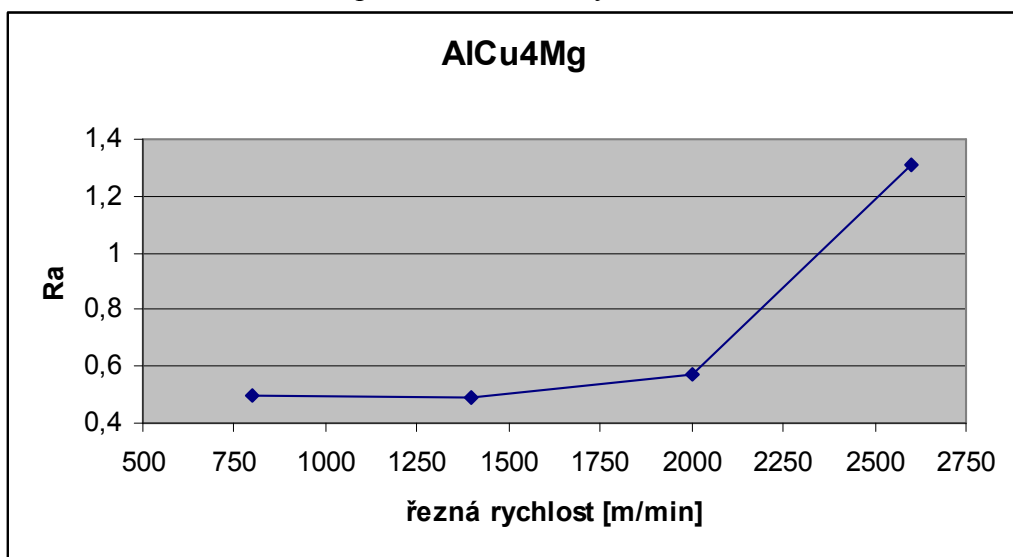


8.3 Hliník

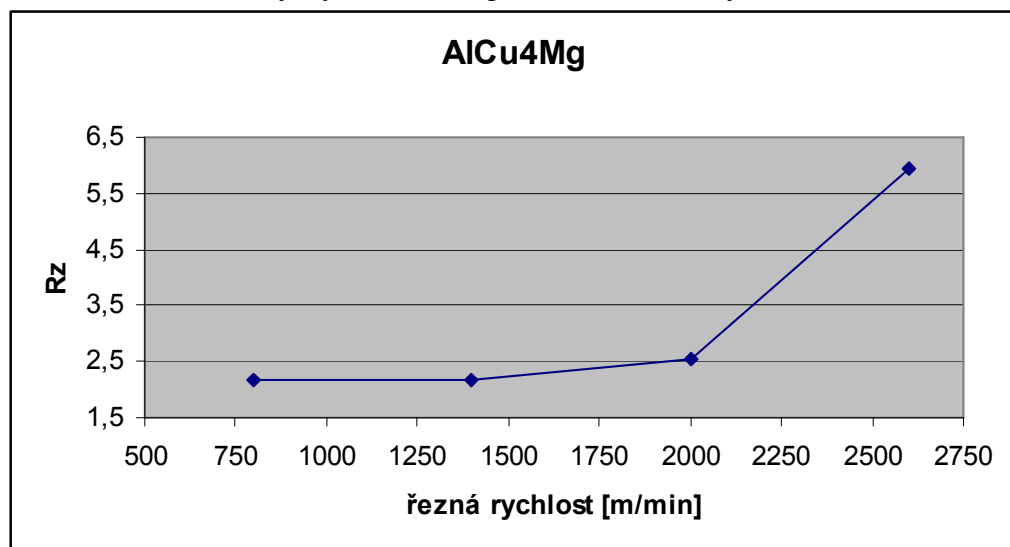
Tab.15. Průměrné hodnoty Ra, Rz za vybraných řezných podmínek - hliník

AlCu4Mg ; $f_1 = 0,1 \text{ mm}$; $a_p = 0,5 \text{ mm}$				
	$v_{c1}=800\text{m/min}$	$v_{c2}=1400\text{m/min}$	$v_{c3}=2000\text{m/min}$	$v_{c4}=2600\text{m/min}$
$\emptyset R_a$	0,50	0,49	0,57	1,31
$\emptyset R_z$	2,18	2,19	2,55	5,93

Graf 9. Závislost drsnosti povrchu na řezné rychlosti – hliník



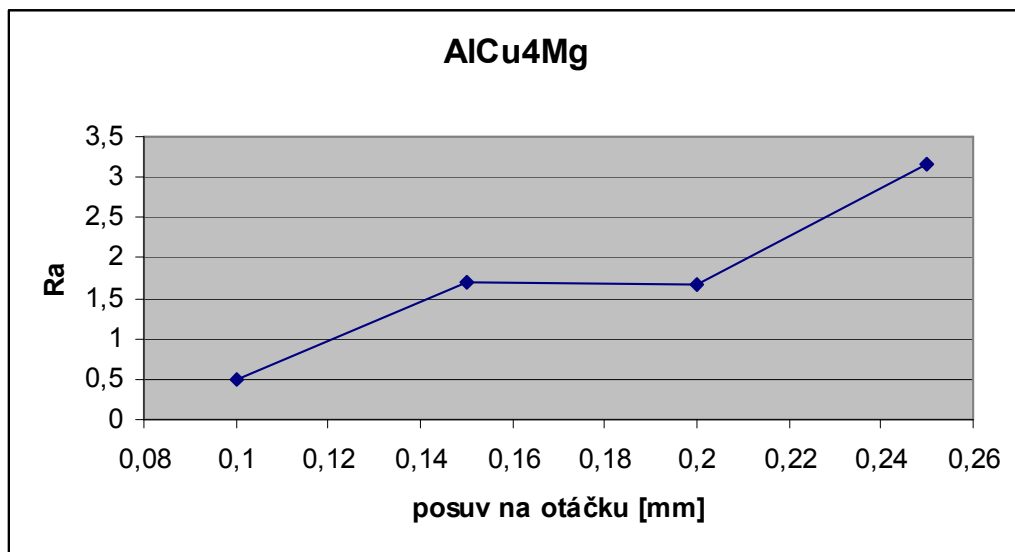
Graf 10. Závislost výšky nerovností povrchu na řezné rychlosti – hliník



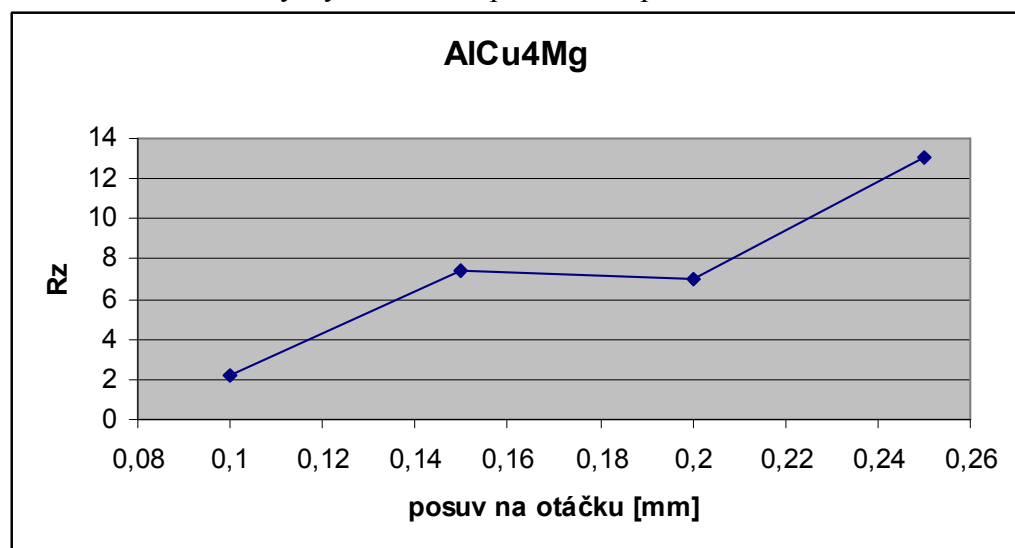
Tab.16. Průměrné hodnoty Ra, Rz za vybraných řezných podmínek - hliník

AlCu4Mg ; $v_{c1} = 800 \text{ m/min}$; $a_p = 0,5 \text{ mm}$				
	$f_1=0,1\text{mm}$	$f_2=0,15\text{mm}$	$f_3=0,2\text{mm}$	$f_4=0,25\text{mm}$
\bar{R}_a	0,50	1,71	1,67	3,17
\bar{R}_z	2,18	1,71	6,99	13,08

Graf 11. Závislost drsnosti povrchu na posuvu – hliník



Graf 12. Závislost výšky nerovností povrchu na posuvu – hliník

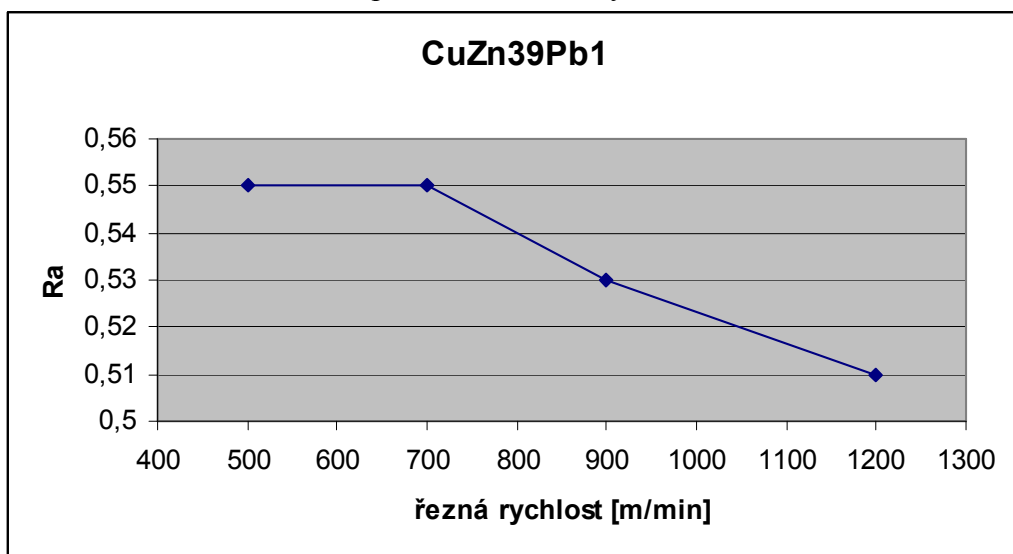


8.4 Mosaz

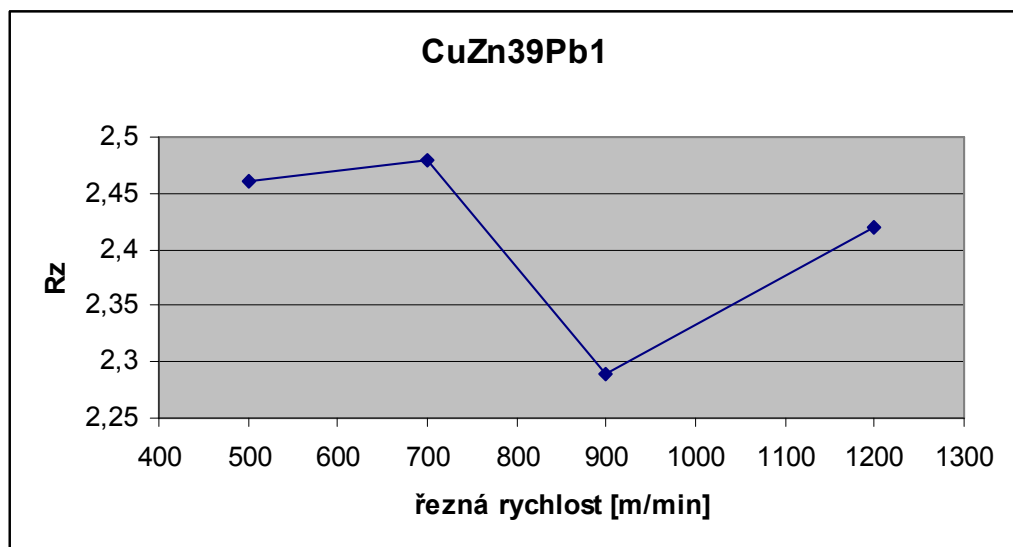
Tab.17. Průměrné hodnoty R_a , R_z za vybraných řezných podmínek - mosaz

CuZn39Pb1 ; $f_1 = 0,1 \text{ mm}$; $a_p = 0,5 \text{ mm}$				
	$v_{c1}=500\text{m/min}$	$v_{c2}=700\text{m/min}$	$v_{c3}=900\text{m/min}$	$v_{c4}=1200\text{m/min}$
$\emptyset R_a$	0,55	0,55	0,53	0,51
$\emptyset R_z$	2,46	2,48	2,29	2,42

Graf 13. Závislost drsnosti povrchu na řezné rychlosti – mosaz



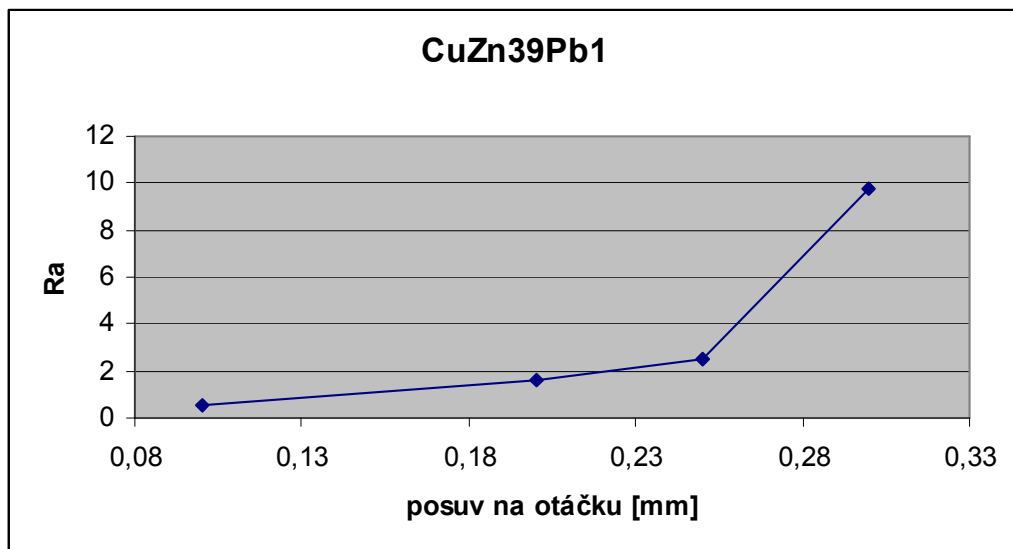
Graf 14. Závislost výšky nerovností povrchu na řezné rychlosti – mosaz



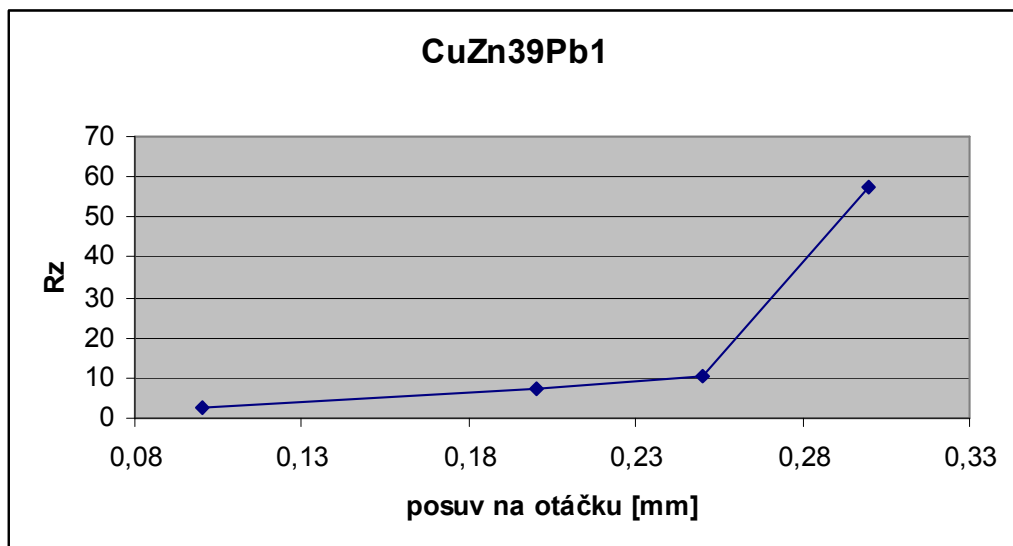
Tab.18. Průměrné hodnoty Ra, Rz za vybraných řezných podmínek - mosaz

CuZn39Pb1 ; $v_{c1} = 500 \text{ m/min}$; $a_p = 0,5 \text{ mm}$				
	$f_1=0,1\text{mm}$	$f_2=0,2\text{mm}$	$f_3=0,25\text{mm}$	$f_4=0,3\text{mm}$
$\emptyset R_a$	0,55	1,60	2,55	9,80
$\emptyset R_z$	2,46	7,20	10,49	57,55

Graf 15. Závislost drsnosti povrchu na posuvu – mosaz



Graf 16. Závislost výšky nerovností povrchu na posuvu – mosaz



ZÁVĚR

Supertvrde řezné materiály, jsou řezné materiály, které vynikají zejména svou vysokou tvrdostí a velkou odolností proti abrazivnímu opotřebení. Polykrystalický diamant je omezen reakcí se železnými materiály. Použití obou skupin supertvrdých materiálů (PKD a PKNB) omezuje především vysoká cena, která je důsledkem energeticky a technicky náročné výroby. Jsou to materiály, které mají do budoucna široké uplatnění v oblastech vysokorychlostního obrábění. Jistou překážkou jsou i poměrně vysoké nároky na obráběcí stroj, který je při tomto způsobu značně dynamicky namáhán.

Supertvrde řezné materiály lze efektivně používat, pokud jsou dodržována pravidla, které jsou určeny výrobcem. Slitiny hliníku lze polykrystalickým diamantem obrábět rychlostmi až 3000 m/min, a to při hrubování i obrábění načisto. Díky tak vysoké rychlosti se stává tento proces obrábění efektivním. PKD je také vhodným materiálem pro obrábění plastů s plnidly se skelnými či aramidovými vlákny. Výhodou obrábění těchto materiálů polykrystalickým diamantem je jeho odolnost proti abrazivnímu opotřebení i použití vyšších řezných rychlostí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Karel Kocman *Speciální technologie – obrábění*. Fakulta strojní VUT Brno, 1995
- [2] Imrich Lukovics *Konstrukční materiály a technologie*. Fakulta technologická VUT Brno, 1992
- [3] ŠVARAL, Š. *Obrábanie nástrojmi z diamantu a kubického nitridu boru*. Bratislava/Alfa, Vydavateľstvo technickej a ekonomickému literatúry, 1977
- [4] LUKOVICS, I. *Konstrukční materiály a technologie* [Skripta]. 1.vyd. Brno 1992, Vysoké učení technické v Brně, 1992 ISBN - 80-214-0399-3.
- [5] NESTUPA, Z. *Supertvrde materiály*. Ostrava – ČVTS, 1989
- [6] BEŇO, J. *Teória rezania kovov*. Strojnícka fakulta TU v Košiciach, Vienaľa Košice, 1999. ISBN 80-7099-429-0
- [7] Kocman, K., Prokop, J. *Technologie obrábění*. CERM, Brno, 2001. ISBN 80-214-1996-2
- [8] Limert, G., Drábek, F., Ondra, J., Vavřík I. *Obrábění*. SNTL/ALFA, Praha, 1974

Internetové zdroje:

Sandvik – Coromant: www.coromant.sandvik.com

Mitsubishi: www.mitsubishicarbide.com

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a	Tloušťka třísky
b	Šířka třísky
S	Průřez odebíraného materiálu
h	Hloubka řezu
r	Poloměr
f	Posuv na otáčku
v_c	Řezná rychlost
S_{zb}	Zbytková plocha
χ	Úhel nastavení
S_α	Plocha hřbetu
F_x	Axiální složka řezné síly
F_y	Radiální složka řezné síly
F_z	Tangenciální složka řezné síly
γ	Úhel čela
λ	Úhel sklonu břitu
p	Měrný řezný odpor
PA 6	Polyamid 6
PVC	Polyvinylchlorid
PD	Polykrystalický diamant
PKNB	Polykrystalický kubický nitrid boru

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1. Vliv úhlu nastavení χ na velikost fyzikálních parametrů řezu	12
Obr.2. Vliv geometrie břitu na tvar a velikost zbytkové plochy S_{zb}	13
Obr.3. Plochy obrobku	14
Obr.4. Funkční plochy soustružnického nože	14
Obr.5. Fasetka na čele 1 a fasetka na hřbetu 2	15
Obr.6. Složky řezného odporu (řezné síly).....	17
Obr.7. Různé tvary průřezu třísky	19
Obr.8. Univerzální hrotový soustruh.....	22
Obr.9. Geometrie soustružnického nože	24
Obr.10. Struktura slinutých karbidů	27
Obr.11. Povlakovaná řezná keramika, povlak TiN/Al_2O_3	27
Obr.12. Ukázky struktur cermetů	28
Obr.13. Tvrdost v závislosti na teplotě	29
Obr.14. Srovnání řezných materiálů.....	30
Obr.15. Struktura polykrystalického diamantu	32
Obr.16. Mřížka grafitu a diamantu.....	32
Obr.17. Jemnozrnný (a) a hrubozrnný (b) diamantový povlak	37
Obr.18. Krystaly syntetických diamantů	38
Obr.19. Krystalická mřížka nitridu boru	38
Obr.20. Krystaly KNB.....	39
Obr.21. Princip metody Particle activated sintering.....	42
Obr.22. Úchylka profilu	43
Obr.23. Vyjádření hodnoty R_a	44
Obr.24. Vyjádření hodnoty R_z	45
Obr.25. Vyjádření hodnoty R_m	45
Obr.26. Vyjádření střední rozteče nerovností S_m	46
Obr.27. Frézka MAHO DECKEL DMU 60T	48
Obr.28. Břítová destička Sandvik Coromant CD10.....	49

SEZNAM TABULEK

Tab.1. Porovnání vlastností grafitu a diamantu.....	33
Tab.2. Vlastnosti diamantu	34
Tab.3. Vlastnosti diamantu a KNB	40
Tab.4. Základní parametry stroje	49
Tab.5. Základní vlastnosti PVC a PA66	50
Tab.6. Základní vlastnosti hliníku a mosazi.....	50
Tab.7. Řezné podmínky při obrábění PVC a PA 66	51
Tab.8. Řezné podmínky při obrábění hliníku.....	51
Tab.9. Řezné podmínky při obrábění mosazi.....	51
Tab.10. Základní specifikace přístroje SJ - 301	52
Tab.11. Průměrné hodnoty Ra, Rz vybraných řezných podmínek – PA 66	54
Tab.12. Průměrné hodnoty Ra, Rz vybraných řezných podmínek – PA 66	55
Tab.13. Průměrné hodnoty Ra, Rz vybraných řezných podmínek - PVC	56
Tab.14. Průměrné hodnoty Ra, Rz za vybraných řezných podmínek - PVC	57
Tab.15. Průměrné hodnoty Ra, Rz za vybraných řezných podmínek - hliník.....	58
Tab.16. Průměrné hodnoty Ra, Rz za vybraných řezných podmínek - hliník.....	59
Tab.17. Průměrné hodnoty Ra, Rz za vybraných řezných podmínek - mosaz	60
Tab.18. Průměrné hodnoty Ra, Rz za vybraných řezných podmínek - mosaz	61

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Tabulky hodnot drsností, největších výšek profilů a středních kvadratických úchylek profilů

**PŘÍLOHA P I: TABULKY HODNOT DRSNOSTÍ, NEJVĚTŠÍCH
VÝŠEK PROFILŮ A STŘEDNÍCH KVADRATICKÝCH ÚCHYLEK
PROFILŮ**

PA6			
$v_{c1} = 100\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,30	8,23	1,61
2	1,29	7,80	1,55
3	1,30	7,19	1,52
4	1,19	7,03	1,43
5	1,24	6,70	1,46
\emptyset	1,26	7,39	1,51

PA6			
$v_{c2} = 500\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,89	9,20	2,23
2	2,02	12,26	2,53
3	2,33	13,03	2,80
4	2,17	11,20	2,56
5	1,89	10,57	2,27
\emptyset	2,06	11,25	2,48

PA6			
$v_{c3} = 1000\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,11	4,85	1,29
2	1,19	5,92	1,41
3	1,17	5,10	1,37
4	1,15	4,92	1,34
5	1,14	4,84	1,32
\emptyset	1,15	5,13	1,35

PA6			
$v_{c4} = 1500\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,04	5,03	1,22
2	1,07	4,95	1,25
3	1,08	4,90	1,26
4	1,05	4,99	1,22
5	1,07	5,37	1,26
\emptyset	1,06	5,05	1,24

PA6			
$v_{c1} = 100\text{m/min}$		$f_2 = 0,2\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	4,31	18,49	4,87
2	4,35	16,65	4,83
3	4,22	15,57	4,67
4	4,47	17,69	4,98
5	4,20	18,21	4,69
\emptyset	4,31	17,32	4,81

PA6			
$v_{c2} = 500\text{m/min}$		$f_2 = 0,2\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	2,14	11,04	2,71
2	2,11	11,56	2,70
3	2,06	10,88	2,59
4	2,14	11,16	2,69
5	2,10	10,87	2,64
\emptyset	2,11	11,10	2,67

PA6			
$v_{c3} = 1000\text{m/min}$		$f_2 = 0,2\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	2,02	10,44	2,39
2	2,02	11,19	2,42
3	2,04	10,16	2,41
4	1,97	9,53	2,34
5	2,02	9,30	2,37
\emptyset	5,04	10,12	2,39

PA6			
$v_{c1} = 100\text{m/min}$		$f_3 = 0,3\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	4,58	22,60	5,40
2	4,47	21,17	5,26
3	4,43	21,50	5,20
4	4,27	19,83	5,03
5	4,28	20,88	5,05
\emptyset	4,41	21,20	5,19

PA6			
$v_{c2} = 500\text{m/min}$		$f_3 = 0,3\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	4,27	21,44	5,06
2	4,35	22,56	5,18
3	4,34	22,51	5,17
4	4,32	22,04	5,13
5	4,31	21,87	5,12
\emptyset	4,32	22,01	5,13

PA6			
$v_{c1} = 100\text{m/min}$		$f_4 = 0,4\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	6,35	26,24	7,62
2	6,47	26,14	7,66
3	6,42	27,47	7,58
4	6,49	26,37	7,72
5	6,45	32,81	7,77
\emptyset	6,44	27,81	7,67

PVC			
$v_{c1} = 100\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	0,53	2,75	0,65
2	0,53	2,73	0,65
3	0,55	2,81	0,67
4	0,54	2,83	0,66
5	0,53	2,61	0,65
\emptyset	0,54	2,75	0,66

PVC			
$v_{c2} = 500\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	0,56	2,52	0,68
2	0,55	2,66	0,68
3	0,54	2,73	0,66
4	0,56	2,95	0,68
5	0,55	2,62	0,67
\emptyset	0,55	2,70	0,67

PVC			
$v_{c3} = 1000\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	0,55	2,73	0,68
2	0,59	2,85	0,72
3	0,57	2,70	0,69
4	0,57	2,69	0,68
5	0,57	2,61	0,68
Ø	0,57	2,72	0,69

PVC			
$v_{c4} = 1500\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	0,73	3,36	0,87
2	0,76	3,45	0,91
3	0,76	3,24	0,89
4	0,74	3,43	0,89
5	0,74	3,25	0,88
Ø	0,75	3,35	0,89

PVC			
$v_{c1} = 100\text{m/min}$		$f_2 = 0,2\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,89	8,42	2,21
2	1,89	8,34	2,24
3	1,82	8,48	2,17
4	1,91	8,70	2,26
5	1,86	8,55	2,21
Ø	1,87	8,50	2,22

PVC			
$v_{c2} = 500\text{m/min}$		$f_2 = 0,2\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,85	8,55	2,19
2	1,82	8,51	2,19
3	1,87	8,63	2,23
4	1,80	8,70	2,16
5	1,82	8,46	2,19
Ø	1,83	8,57	2,19

PVC			
$v_{c3} = 1000\text{m/min}$		$f_2 = 0,2\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,86	7,53	2,11
2	1,84	7,66	2,11
3	1,88	7,94	2,13
4	1,82	7,81	2,10
5	1,88	7,82	2,14
Ø	1,86	7,75	2,12

PVC			
$v_{c1} = 100\text{m/min}$		$f_3 = 0,3\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	3,67	17,46	4,37
2	3,56	16,23	4,17
3	3,57	16,41	4,20
4	3,64	16,62	4,28
5	3,64	16,67	4,27
Ø	3,62	16,68	4,26

PVC			
$v_{c2} = 500\text{m/min}$		$f_3 = 0,3\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	3,51	15,66	4,13
2	3,41	15,50	4,03
3	3,40	15,49	4,03
4	3,46	15,66	4,08
5	3,47	15,50	4,09
\emptyset	3,45	15,56	4,07

PVC			
$v_{c1} = 100\text{m/min}$		$f_4 = 0,4\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	6,45	26,29	7,47
2	6,51	26,96	7,66
3	6,45	27,53	7,64
4	6,64	28,10	7,71
5	6,46	27,67	7,63
\emptyset	6,50	27,31	7,62

Hliník			
$v_{c1} = 800\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	0,49	2,13	0,57
2	0,51	2,55	0,62
3	0,50	2,14	0,59
4	0,48	2,07	0,56
5	0,50	2,02	0,58
\emptyset	0,50	2,18	0,58

Hliník			
$v_{c2} = 1400\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	0,49	2,10	0,57
2	0,51	2,36	0,61
3	0,46	2,10	0,54
4	0,48	2,17	0,57
5	0,48	2,17	0,57
\emptyset	0,49	2,19	0,58

Hliník			
$v_{c3} = 2000\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	0,57	2,58	0,68
2	0,62	2,65	0,72
3	0,54	2,38	0,64
4	0,53	2,34	0,63
5	0,59	2,78	0,70
\emptyset	0,57	2,55	0,67

Hliník			
$v_{c4} = 2600\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,30	5,98	1,54
2	1,32	5,90	1,57
3	1,31	5,86	1,55
4	1,32	5,93	1,57
5	1,30	5,97	1,55
\emptyset	1,31	5,93	1,56

Hliník			
$v_{c1} = 800\text{m/min}$		$f_2 = 0,15\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,66	7,51	1,98
2	1,76	7,51	2,07
3	1,75	7,56	2,07
4	1,71	7,22	2,03
5	1,68	7,42	1,99
\emptyset	1,71	7,44	2,03

Hliník			
$v_{c2} = 1400\text{m/min}$		$f_2 = 0,15\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	0,97	4,24	1,14
2	0,98	4,38	1,15
3	0,98	4,37	1,15
4	0,97	4,42	1,14
5	0,99	4,56	1,17
\emptyset	0,98	4,39	1,15

Hliník			
$v_{c3} = 2000\text{m/min}$		$f_2 = 0,15\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,30	5,80	1,52
2	1,33	6,16	1,56
3	1,32	5,69	1,54
4	1,31	5,65	1,52
5	1,36	6,05	1,58
\emptyset	1,32	5,87	1,54

Hliník			
$v_{c1} = 800\text{m/min}$		$f_3 = 0,2\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,68	6,80	1,99
2	1,67	7,08	1,99
3	1,66	7,01	1,99
4	1,67	7,0	2
5	1,65	7,06	1,98
\emptyset	1,67	6,99	1,99

Hliník			
$v_{c2} = 1400\text{m/min}$		$f_3 = 0,2\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,36	5,91	1,59
2	1,35	6,14	1,59
3	1,36	5,84	1,59
4	1,37	5,94	1,61
5	1,39	6,08	1,63
\emptyset	1,37	5,98	1,60

Hliník			
$v_{c1} = 800\text{m/min}$		$f_4 = 0,25\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	3,18	12,91	3,71
2	3,19	13,68	3,73
3	3,16	12,83	3,69
4	3,16	12,92	3,69
5	3,16	13,05	3,69
\emptyset	3,17	13,08	3,70

Mosaz			
$v_{c1} = 500\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	0,55	2,45	0,66
2	0,54	2,39	0,66
3	0,55	2,50	0,67
4	0,54	2,47	0,67
5	0,55	2,51	0,67
\emptyset	0,55	2,46	0,67

Mosaz			
$v_{c2} = 700\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	0,55	2,47	0,68
2	0,55	2,44	0,67
3	0,55	2,46	0,67
4	0,55	2,52	0,67
5	0,55	2,52	0,67
\emptyset	0,55	2,48	0,67

Mosaz			
$v_{c3} = 900\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	0,53	2,26	0,62
2	0,53	2,23	0,62
3	0,53	2,37	0,63
4	0,53	2,26	0,62
5	0,54	2,31	0,62
\emptyset	0,53	2,29	0,62

Mosaz			
$v_{c4} = 1200\text{m/min}$		$f_1 = 0,1\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	0,50	1,98	0,58
2	0,52	2,87	0,63
3	0,52	2,22	0,61
4	0,51	2,14	0,60
5	0,52	2,89	0,61
\emptyset	0,51	2,42	0,61

Mosaz			
$v_{c1} = 500\text{m/min}$		$f_2 = 0,2\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,60	7,01	1,89
2	1,59	6,90	1,87
3	1,60	7,01	1,89
4	1,61	8,14	1,90
5	1,59	6,93	1,87
\emptyset	1,60	7,20	1,88

Mosaz			
$v_{c2} = 700\text{m/min}$		$f_2 = 0,2\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,72	7,76	2,01
2	1,75	7,18	2,04
3	1,75	7,15	2,04
4	1,70	7,09	1,99
5	1,69	7,13	1,98
\emptyset	1,72	7,26	2,01

Mosaz			
$v_{c3} = 900\text{m/min}$		$f_2 = 0,2\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,59	6,46	1,86
2	1,58	6,56	1,85
3	1,58	6,54	1,85
4	1,57	6,31	1,84
5	1,58	6,28	1,84
\emptyset	1,58	6,43	1,85

Mosaz			
$v_{c4} = 1200\text{m/min}$		$f_2 = 0,2\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	1,67	7,10	1,95
2	1,67	6,89	1,95
3	1,67	7,03	1,96
4	1,64	6,89	1,93
5	1,66	7,11	1,96
\emptyset	1,66	7,00	1,95

Mosaz			
$v_{c1} = 500\text{m/min}$		$f_3 = 0,25\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	2,57	10,37	2,99
2	2,58	10,50	3,00
3	2,54	10,43	2,96
4	2,54	10,49	2,97
5	2,54	10,50	2,96
\emptyset	2,55	10,49	2,98

Mosaz			
$v_{c2} = 700\text{m/min}$		$f_3 = 0,25\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	3,11	12,52	3,61
2	3,10	12,49	3,60
3	3,09	12,60	3,60
4	3,09	12,78	3,61
5	3,08	12,82	3,61
\emptyset	3,09	12,64	3,61

Mosaz			
$v_{c3} = 900\text{m/min}$		$f_3 = 0,25\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	6,16	24,50	7,02
2	6,43	25,99	7,34
3	6,25	25,03	7,14
4	6,31	25,49	7,24
5	6,13	24,55	7,04
\emptyset	6,26	25,11	7,16

Mosaz			
$v_{c1} = 500\text{m/min}$		$f_4 = 0,3\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	9,72	49,66	11,48
2	9,76	53,12	11,54
3	9,77	53,36	11,62
4	9,86	47,39	11,63
5	9,91	48,60	11,75
\emptyset	9,80	57,55	11,60

Mosaz			
$v_{c2} = 700\text{m/min}$		$f_4 = 0,3\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	3,58	14,74	4,18
2	3,66	15,04	4,28
3	3,61	14,86	4,22
4	3,63	15,06	4,24
5	3,73	15,11	4,35
Ø	3,64	14,96	4,25

Mosaz			
$v_{c3} = 900\text{m/min}$		$f_4 = 0,3\text{mm}$	
	R_a	R_z	R_q
1	3,33	14,13	3,88
2	3,32	14,20	3,88
3	3,32	14,13	3,88
4	3,32	14,39	3,87
5	3,29	13,85	3,84
Ø	3,32	14,14	3,87