

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SUPERTVRDÉ MATERIÁLY A JEJICH EFEKTIVNÍ VYUŽITÍ

SUPERHARD CUTTING MATERIALS AND THEIRS EFFECTIVE USE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUKÁŠ VAMPOLA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lukáš Vampola

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Supertvrdé materiály a jejich efektivní využití

v anglickém jazyce:

Superhard cutting materials and theirs effective use

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na polykrystalický diamant a polykrystalický kubický nitrid boru z hlediska jejich označování, fyzikálních, mechanických a řezných vlastností, užití a současných trendů vývoje a výroby u renomovaných špičkových producentů nástrojů a nástrojových materiálů. Cílem práce je komplexní zpracování získaných technických poznatků a zejména vyhodnocení a porovnání pracovních podmínek (druh obráběného materiálu, řezné podmínky - vc, f, ap), které vybraní výrobci doporučují pro efektivní soustružnické aplikace svých druhů supertvrdých nástrojových materiálů.

Cíle diplomové práce:

1. Charakteristika supertvrdých řezných materiálů (druh, výroba, značení, fyzikálně mechanické vlastnosti)
2. Polykrystalický kubický nitrid boru a polykrystalický diamant v sortimentu výroby nejvýznamnějších světových producentů nástrojů a nástrojových materiálů
3. Hodnocení řezivosti nástroje
4. Doporučené pracovní podmínky pro efektivní využití supertvrdých řezných materiálů

Seznam odborné literatury:

1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
2. BROOKES, K.J.A. Hardmetals and other Hard Materials. Second Edition. Shrewsbury, England: European Powder Metallurgy Association, 1992. 198 p. ISBN 0 9508995 3 4.
3. BROOKES, K.J.A. World Directory and Handbook of Hardmetals and Hard materials. Sixth Edition. East Barnet Hertfordshire, United Kingdom: International Carbide Data, 1996. 220+528 p. ISBN 0 9508995 4 2.
4. ČSN-ISO 3685. Zkoušky trvanlivosti při soustružení jednobřítým nástrojem. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993.
5. HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. MM publishing s. r.o., Praha. 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
6. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2006. [online].
Dostupné na [www:](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf)
http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf.
7. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. MM Průmyslové spektrum - Speciální vydání. Září 2004. ISSN 1212-2572., s. 84-96.
8. KOČMAN, K. Speciální technologie obrábění. Druhé přepracované a doplněné vydání. Brno: PC-DIR Real, s.r.o. 1998, 213 s. ISBN 80-214-1187-2.
9. LEICHTFRIED, G., SAUTHOFF, G., SPRIGGS, G.E. Refractory, Hard and Intermetallic Materials. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2002. 267 p. ISBN 3-540-42961-1.
10. Technické materiály a prospekty firem Ceratizit, Iscar, Kennametal, Korloy, Mitsubishi, Pramet Tools, Sandvik Coromant, Seco, Walter, Widia.
11. Odborné časopisy International Journal of Refractory Metals & Hard Materials (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/02634368>), Journal of Materials Processing Technology (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09240136>), Materials Science and Engineering: A (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09215093>)

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Anton Humár, CSc.

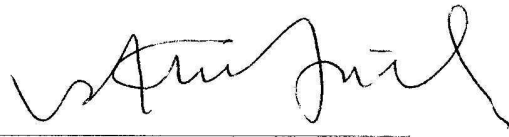
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.


prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu




prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Licenční smlouva

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřená na supertvrdé řezné materiály (polykrystalický diamant a polykrystalický kubický nitrid boru). Zabývá se jejich fyzikálními, mechanickými a řeznými vlastnostmi, výrobou a efektivním užitím. Hodnotí sortiment supertvrdých řezných materiálů předních světových producentů z hlediska řezných podmínek a druhu obráběných materiálů při soustružení.

Klíčová slova

Supertvrdé řezné materiály, polykrystalický diamant, polykrystalický kubický nitrid boru, vyměnitelné břitové destičky, řezné podmínky.

ABSTRACT

Diploma thesis is focused on cutting superhard materials (polycrystalline diamond and polycrystalline cubic boron nitride). It deals with physical, mechanical and cutting properties, production and effective use. Evaluative product range of superhard cutting materials of the prominent world producers in terms of cutting conditions and type of materials machined in turning.

Key words

Superhard cutting materials, polycrystalline diamond, polycrystalline cubic boron nitride, cutting inserts, cutting conditions.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VAMPOLA, Lukáš. *Supertvrdé materiály a jejich efektivní využití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 63 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Anton Humár, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Supertvrdé materiály a jejich efektivní využití* vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. května 2011

.....
Lukáš Vampola

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Antonu Humárovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	1
Prohlášení	2
Poděkování	3
Obsah	4
Úvod	6
1 Charakteristika supertvrdých řezných materiálů	7
1.1 Diamant	8
1.1.1 Struktura diamantu	8
1.1.2 Základní vlastnosti diamantu	9
1.1.3 Fyzikální a mechanické vlastnosti	10
1.1.4 Přírodní diamant	11
1.1.5 Syntetický diamant a jeho výroba	13
1.1.6 Výroba vyměnitelných břitových destiček z PKD	16
1.1.7 Diamantové povlaky	17
1.1.8 Efektivní využití PKD	18
1.2 Kubický nitrid boru	19
1.2.1 Struktura kubického nitridu boru	20
1.2.2 Základní vlastnosti KNB	20
1.2.3 Mechanické vlastnosti KNB	21
1.2.4 Syntetický KNB a jeho výroba	21
1.2.5 Výroba vyměnitelných břitových destiček z PKNB	23
1.2.6 Povlaky z KNB	25
1.2.7 Efektivní využití PKNB	27
2 Hodnocení řezivosti nástroje	28
2.1 Formy opotřebení řezných nástrojů	28
3 PKD a PKNB v sortimentu výroby nejvýznamnějších světových producentů nástrojů a doporučené pracovní podmínky	32
3.1 General Electric	32
3.1.1 Diamond Compax	32
3.1.2 Doporučené pracovní podmínky materiálů Compax	34
3.1.3 BZN Compacts	34
3.1.4 Doporučené pracovní podmínky materiálů BZN Compacts	37

3.2 De Beers	37
3.2.1 Syndite	38
3.2.2 Doporučené pracovní podmínky materiálů Syndite.....	39
3.2.3 Amborite.....	39
3.2.4 Doporučené pracovní podmínky materiálů Amborite	40
3.2.5 Mono	40
3.3 Seco Tools AB.....	41
3.3.1 Secomax PCD	41
3.3.2 Doporučené pracovní podmínky materiálů Secomax PCD	42
3.3.3 Secomax CBN	42
3.3.4 Doporučené pracovní podmínky materiálů Secomax CBN	44
3.4 Sandvik Coromant.....	45
3.4.1 Materiály se syntetickým diamantem	45
3.4.2 Doporučené pracovní podmínky materiálů se syntetickým diamantem.....	45
3.4.3 Materiály s kubickým nitridem boru	46
3.4.4 Doporučené pracovní podmínky materiálů s KNB	46
3.5 Kennametal Hertel AG.....	47
3.5.1 Materiály se syntetickým diamantem	47
3.5.2 Doporučené pracovní podmínky materiálů se syntetickým diamantem.....	48
3.5.3 Materiály s kubickým nitridem boru	48
3.5.4 Doporučené pracovní podmínky materiálů s KNB	50
3.6 Vzájemné porovnání materiálů vybraných výrobců	50
Závěr	52
Seznam použitých zdrojů	53
Seznam použitých zkratk a symbolů	59

ÚVOD

Ve všech průmyslových odvětvích se lidé snaží neustále něco vylepšovat a zdokonalovat a jinak tomu není ani ve strojírenské technologii. Ať už to je oblast tváření, slévárenství nebo obrábění, neustále rostou požadavky na kvalitu, přesnost, výrobní náklady, pevnější a lehčí materiály a tomu musí odpovídat i použité technologie. K zefektivnění výrobního procesu můžeme přispět mimo jiné i kvalitnějšími nástroji. Při třískovém obrábění je tendence zkracování strojních časů (zvyšování řezných podmínek) při zachování nebo zlepšení jakosti obrobku. K tomu je zapotřebí kvalitních řezných nástrojů s lepšími vlastnostmi (tvrdost, trvanlivost nástroje, odolnost vůči tepelným a rázovým šokům, otěruvzdornost atd.). Takové nástroje pomáhají využít naplno potenciál moderních strojů a tím přispět ke snižování nákladů.

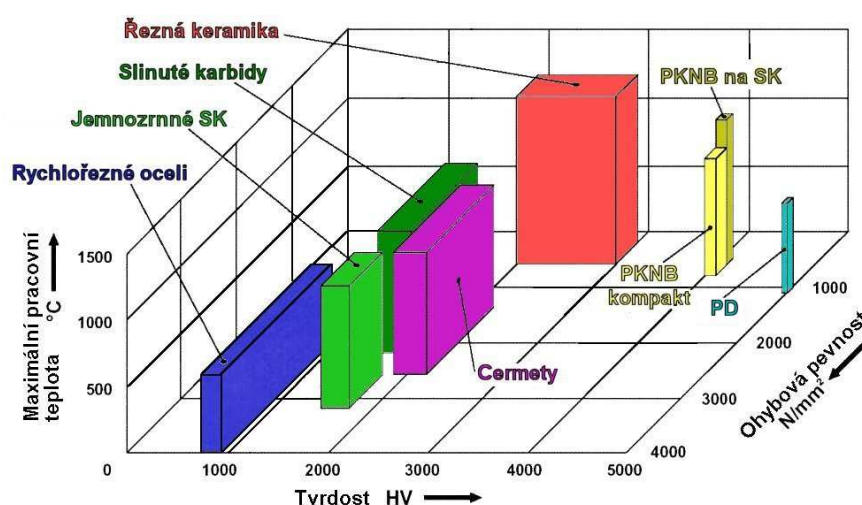
Z řezných materiálů vynikají svojí tvrdostí a odolností proti abrazivnímu opotřebení tzv. supertvrdé řezné materiály, mezi které se řadí polykrystalický diamant a polykrystalický kubický nitrid boru. Těmito vlastnostmi převyšují běžné nástrojové materiály, ale převyšují je svoji cenou (je dána náročnou výrobou) a specifickým použitím. Hlavní aplikace PKD je vysokorychlostní obrábění neželezných slitin (hlavně hliníku a mědi), plastů, keramiky a nekovových materiálů. PKNB je ideální pro obrábění kalených ocelí, litin a superslitin.

Supertvrdé řezné materiály se natrvalo usadily v sortimentu světových výrobců, kteří se je snaží více neustále inovovat a vyvíjet. Moderní trend je využití kombinace vlastností známých řezných materiálů, jako je povlakování slinutých karbidů syntetickým diamantem či kubickým nitridem boru, které je neustále ve vývoji.

Cílem této práce je porovnání sortimentu supertvrdých řezných materiálů významných světových výrobců z hlediska řezných podmínek a jejich efektivního užití pro soustružnické aplikace.

1 CHARAKTERISTIKA SUPERTVRDÝCH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

Pod obecný pojem supertvrdé řezné materiály se řadí dva synteticky vyrobené materiály. Jedná se o **diamant** a **kubický nitrid boru**, které se svojí tvrdostí vynikají nad všemi ostatními řeznými materiály (obr. 1.1), a blíží se tvrdosti monokrystalického diamantu. Díky svým vynikajícím mechanickým vlastnostem nacházejí své uplatnění i jako řezné nástrojové materiály zejména ve speciálních aplikacích.



Obr. 1.1 Vlastnosti nástrojových materiálů⁵

Do oblasti třískového obrábění se tyto materiály dostaly ve své polykrystalické formě. Pro řezné nástroje se užívají jednotlivé krystaly spojené různými pojivy do kompaktního celku. Takto připravené materiály se nazývají polykrystalický diamant a polykrystalický kubický nitrid boru (tab. 1.1). S nástupem těchto materiálů se podstatně zefektivnilo obrábění těžkoobrobitelných materiálů a díky možnému použití vysokých řezných rychlostí se zkrátí čas obrábění. Na druhé straně mají tyto materiály v porovnání s ostatními menší ohybovou pevnost a jsou podstatně dražší. Právě jejich cena je jedním z hlavních faktorů při zvažování jejich aplikace ve výrobním procesu.

Tab. 1.1. Dělení supertvrdých řezných materiálů⁵

Polykrystalický diamant	Česká zkratka	PKD
	Anglická zkratka	PCD
Polykrystalický kubický nitrid boru	Česká zkratka	KNB (PKNB)
	Anglická zkratka	CBN (c-BN)

1.1 Diamant

Diamant je nejtvrdší známá přírodní látka s teplotou tavení $>>4000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jedná se o jednu krystalickou podobu alotropické modifikace uhlíku. Tento prvek (značený C) se v přírodních podmínkách vyskytuje ve dvou modifikacích. V krychlové mřížce krystalizující již zmíněný diamant (více kapitola 1.1.1) a ve formě desek, krystalizující v hexagonální krystalové mřížce, grafit (obr 1.3).²⁹

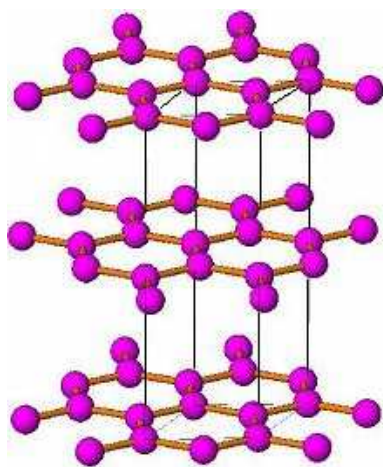
Diamanty se dělí do dvou skupin – přírodní a syntetické a oba druhy se vyskytují v monokrystalickém i polykrystalickém stavu. Přírodní diamanty se využívají zejména v klenotnictví, kde se dále upravují broušením do konečné podoby (např. briliantu). Ve volné přírodě se vyskytují nejčastěji ve vyvřelé hornině kimberlitu (obr. 1.2). Mezi největší a nejznámější oblasti těžby této horniny patří jižní Afrika (více kapitola 1.1.4).¹⁰



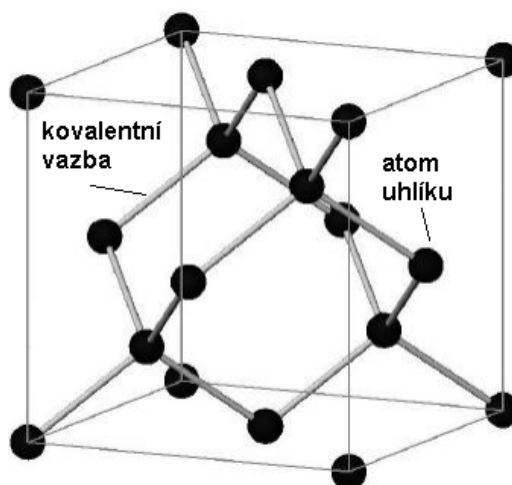
Obr. 1.2. Kimberlit³⁰

1.1.1 Struktura diamantu

Krystalografická mřížka diamantu se skládá z 18 atomů uhlíku uspořádaných tak, že 8 atomů je uloženo na vrcholech krychle, 6 ve středech stran a 4 uvnitř krychle. Každý atom uhlíku je vázán kovalentní vazbou ke 4 atomům, které jsou umístěny ve vrcholech čtyřstěnu, obr. 1.4. Délka strany mřížky elementární buňky je mezi $(0,356683 \pm 0,000001)\text{ nm}$ a $(0,356725 \pm 0,000003)\text{ nm}$ při teplotě $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nejkratší vzdálenost mezi sousedními atomy v mřížce je $0,154450 \pm 0,000005)\text{ nm}$ při teplotě $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.^{12,27,5}



Obr. 1.3. Krystalografická mřížka grafitu⁶



Obr. 1.4. Krystalografická mřížka diamantu³⁴

Mezi nejčastější nečistoty v krystalové struktuře přírodních i syntetických diamantů patří dusík (ovlivňuje mechanické, elektrické, optické i teplotní vlastnosti). Z dalších nečistot se objevují zejména železo, nikl, hliník a bor. Zároveň bylo identifikováno 25 minerálních látek (nečistot) ve formě vměstků. Rozdělení diamantových krystalů je v tab. 1.2.

Tab. 1.2. Rozdělení diamantových krystalů dle koncentrace dusíku a boru⁵

Typ diamantu	Popis
Diamanty typu I a	Patří sem většina přírodních diamantů. Obsahují dusík a nečistoty (až do 0,2%), které se vylučují ve formě malých shluků.
Diamanty typu I b	Obsahují dusík ve formě nečistot rozptýlených v substituční formě. Patří sem téměř všechny syntetické diamanty.
Diamanty typu II a	Téměř bez dusíkových nečistot. Lepší optické a tepelné vlastnosti. Velmi vzácné v přírodní formě.
Diamanty typu II b	Velmi čisté diamanty s vlastnostmi polovodičů, zpravidla modré barvy. Velmi vzácné v přírodní formě. Včleněním boru lze polovodičové vlastnosti vyvolat i u syntetických diamantů.

1.1.2 Základní vlastnosti diamantu

Diamant má vysoký index lomu s nízkou reaktivitou, je elektricky nevodivý a má nejlepší známou tepelnou vodivost. **Tepelná vodivost** je schopnost látky vést teplo (představuje rychlost šíření tepla mezi chladnější a teplejší částí látky). Součinitel tepelné vodivosti bývá přímo označován jako tepelná vodivost. **Lineární tepelná roztažnost** je jev, kdy těleso v důsledku změny své teploty mění i svojí délku. Většina látek se při zahřátí na vyšší teplotu rozpíná (molekuly se pohybují rychleji a dál od sebe).⁵

Při ohřevu na vysokou teplotu dochází u diamantu ke změnám, které výrazně závisí na okolním prostředí zejména kyslíku. Za jeho přítomnosti (nebo jiných aktivních činidel) se již při teplotě ~630 °C vytváří na povrchu diamantu černý povlak (nejedná se ovšem o skutečnou grafitizaci).

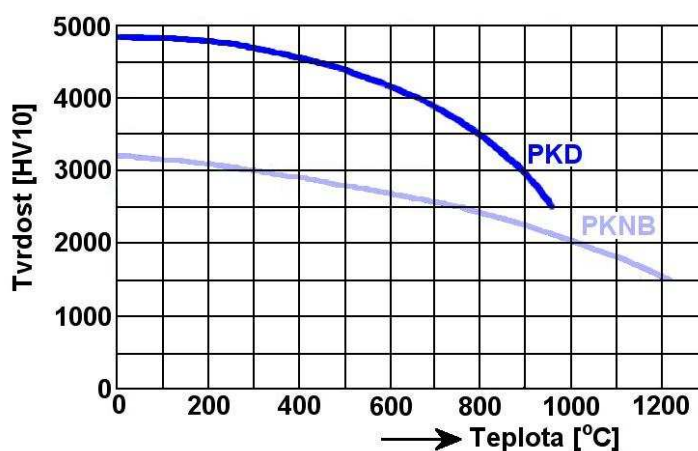
Grafitizace znamená přeměnu diamantu na grafit bez přítomnosti vnějších činidel. V inertním prostředí začíná při teplotě ~ 1530 °C a její rychlost rychle narůstá až do teploty ~ 2130 °C.²⁷

Diamant je výjimečně inertní látka, je **odolný proti chemické korozi** (působení kyselin nebo jiných chemických látek) s výjimkou oxidačních činidel. Pouze těmito látkami je možné na diamant působit při teplotách nižších než ~ 1000 °C za normálního tlaku. V kyslíkové atmosféře začínají diamanty oxidovat při ~630 °C.

Za vysokých teplot může být diamant napadán dvěma skupinami kovů. První skupina jsou karbidotvorné prvky (wolfram, tantal, titan a zirkonium) reagují za vysokých teplot za vzniku příslušných karbidů. Druhá skupina zahrnuje kovy, které v roztaveném stavu působí na uhlík jako rozpouštědlo (železo, kobalt, mangan, nikl, chrom a platinové kovy).⁵

1.1.3 Fyzikální a mechanické vlastnosti

Diamant je nejtvrdší látka vyskytující se v přírodě a vyniká i svoji otěruvzdorností. Vysoká **tvrdost** diamantu je dána kovalentní vazbou atomů, která se tvoří překrytím valenčních elektronů za vzniku elektronového páru. Tvrdost je definována jako odolnost materiálu proti vnikání cizího tělesa. Tvrdost není fyzikálně definovaná vlastnost, nýbrž je výslednicí několika fyzikálních vlastností. Naměřené hodnoty tvrdosti nezávisí pouze na čistotě diamantu (obsahu dusíku), ale i na krystalografickém směru a pohybují se v rozmezí ~ 6 000 – 10 000 HV (měření tvrdosti dle Vickerse). Tvrdost supertvrdých řezných materiálů v závislosti na teplotě obr. 1.5.¹⁴



Obr. 1.5. Závislost tvrdosti supertvrdých řezných materiálů na teplotě⁵

Stupnice **vrypové tvrdosti**, sestavená dle Fridricha Mohse (1773 – 1839) slouží k určování tvrdosti látek. Vyjadřuje schopnost materiálu rýpat do druhého, kdy každým z nich je možné udělat vryp do předcházejícího nerostu (tab. 1.3).¹³

Tab. 1.3. Mohsova stupnice tvrdosti¹³

Pořadí	Nerost
1	Mastek [$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$]
2	Sůl kamenná [NaCl]
3	Kalcit [CaCO_3]
4	Fluorit [CaF_2]
5	Apatit [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$]
6	Ortoklas [KAlSi_3O_8]
7	Křemen [SiO_2]
8	Topaz [$\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F}, \text{OH})_2$]
9	Korund [Al_2O_3]
10	Diamant [C]

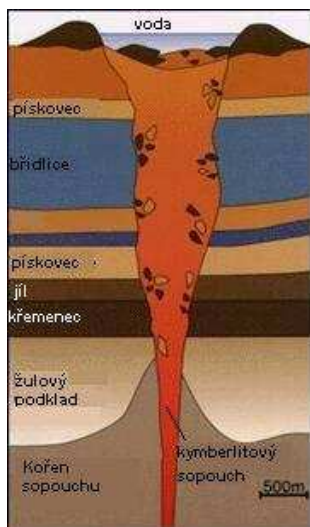
Mez pevnosti σ_p je jedna ze základních mechanických vlastností, která je ovlivněna poruchami, vměstky, nečistotami a krystalografickou rovinou, ve které je pevnost měřena. Rozlišuje se mez pevnosti v tahu, tlaku, smyku a ohybu (tab. 1.4).⁵

Tab.1.4. Hodnoty meze pevnosti monokrystalického diamantu⁵

Veličina	Hodnota
Pevnost v tahu (GPa)	4,74 - 190
Pevnost v tlaku (GPa)	6,90 – 16,53
Pevnost v ohybu (GPa)	1350
Pevnost ve smyku (GPa)	0,3 – 8,7

1.1.4 Přírodní diamant

Místem původního výskytu diamantů jsou ložiska magmatického původu, tzv. *primární ložiska*, kde jsou diamanty rozptýleny v tmavých horninách. Pocházejí ze svrchního zemského pláště a nazývají se kimberlity (kimberlit podle města Kimberley v Jihoafrické republice). K zemskému povrchu vystoupily ve formě mohutných těles komínovitého tvaru, tzv. sopouchy, které se směrem od povrchu zužují (obr. 1.6). Některé kimberlity ovšem diamanty vůbec neobsahují, jiné v koncentracích nebo vůbec a nejsou vhodné pro ekonomickou těžbu. Stáří kimberlitu, nalezeného v Africe, se odhaduje na 70 až 150 milionů let. Na obr. 1.7 je ruský diamantový důl Mirnyj (Sibiř).^{11,15,19}



Obr. 1.6 Průřez kimberlitovým sopouchem¹⁹



Obr. 1.7 Satelitní snímek diamantového dolu Mirnyj, Rusko¹⁸

Tak jako všechny horniny, tak i kimberlit podléhá zvětrávání a erozi vlivem přírodních sil jako jsou povětrnostní podmínky, srážky, sluneční záření, střídání denních a nočních teplot. Minerály se rozkládají a vytváří se zvětralina (v diamantových ložiscích nazývaná „žlutá zemina“). Tekoucí voda se odnáší do řek společně s diamanty, kde se v důsledku své hmotnosti usazují na dnech koryt řek nebo putují dále do ústí řek. V záhybech řek (meandrech) se zvyšuje jejich koncentrace a vznikají tzv. *sekundární ložiska*.¹⁰

Průzkum sopouchů vyhaslých sopek se provádí buď kopáním důlních podzemních chodeb, nebo povrchovou těžbou a následné těžení mateční horniny se provádí přímo z kimberlitové trubky. Vytěžená ruda je lámána a pomocí pásových dopravníků nebo nákladních aut neodvezena do místa zpracování, kde je rozmělněna, propláchnuta a stává se z ní diamantonosná usazenina. U sekundárních ložisek je těžba snazší. Při těžbě z náplavů řek plážových usazenin je využívána vysoká hustota diamantů, které jsou rýžovány podobně jako zlato. Někdy se též využívá vysoké přilnavosti diamantů ke všemu mastnému a diamantonosné sedimenty jsou plaveny přes žlaby potřené tukem a diamanty se na mastný povrch přilepí.

Mezi největší přírodní naleziště a největší producenty diamantů patří Austrálie (je zde několikanásobně větší koncentrace diamantů, než je světový průměr), Botswana, Jihoafrická republika (jsou zde největší diamantová ložiska obsahující diamanty vysoké kvality. V jihoafrických dolech byl nalezen největší surový diamant na světě), Kanada, Brazílie a další africké země viz. obr. (1.8).¹¹



Obr. 1.8. Světová ložiska diamantů¹¹

Největší surový diamant byl nalezen v dole Premiér firmy De Beers roku 1905 v Jihoafrické republice. Vážil 3106 ct (1 ct = 200mg = 0,2 g)¹⁵ a jeho rozměry byly cca 10 x 6 x 5 cm. Diamant byl nazván Cullinan na počest zakladatele dolu sira Thomase Cullinana.



Obr. 1.9 Cullinan I je součástí žezla anglických korunovačnických klenotů¹⁶



Obr. 1.10 Cullinan II jako součást anglické královské koruny¹⁷

Kámen byl darován anglickému králi Edwardu VII, který ho nechal v Amsterdamu vybrousit. Rozdělením vzniklo 9 velkých kamenů a okolo 100 malých. Největší dva Cullinan I, obr. 1.9 a Cullinan II, obr. 1.10, jsou součástí anglických korunovačních klenotů.^{11,15}

1.1.5 Syntetický diamant a jeho výroba

Výroba diamantu z grafitu principiálně spočívá v přeměně hexagonální mřížky grafitu na kubickou mřížku diamantu (obr. 1.11) za vysokých teplot a tlaků a za přítomnosti malého množství katalyzátorů, které rozpouštějí grafitický uhlík a umožňují jeho krystalizaci ve formě diamantu za nižších teplot než v přírodních podmínkách.⁵



Obr. 1.11. Změna hexagonální mřížky na kubickou²⁸

Jako katalyzátory se nejčastěji používají přechodové kovy (Mn, Co, Fe, Ni, Cr) nebo jejich slitiny (Mn – Ni, Co – Fe) nebo sloučeniny (Fe_3N). Od 90. let minulého století se ke kovovým katalyzátorům přidávají také nekovové sloučeniny (sulfáty, hydroxidy a uhličitany).

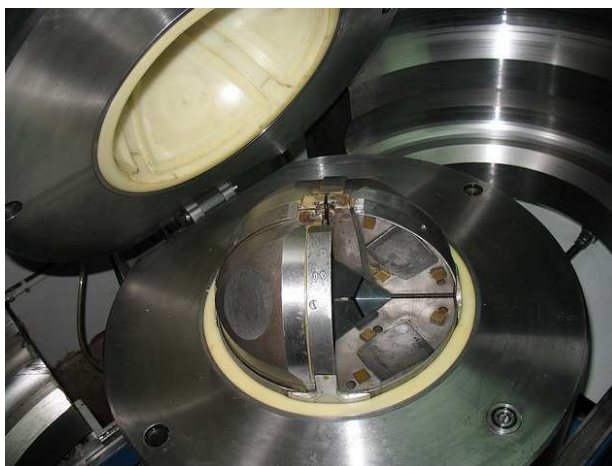
Pokusy o výrobu syntetického diamantu se datují již ke konci 19. století. Hannay (1880) a po něm i Moissan (1894) tvrdili, že vyrobili diamanty, ovšem jedná se o nepodložená tvrzení. První uměle vyrobené diamanty metodou HPHT (High Pressure/High Temperature) se datují k roku 1953. Vyrobili je Liander a Lundbland v laboratoři firmy ASEA ve Švédsku.⁵

Patentová práva na výrobu diamantu metodou HPHT byla udělena roku 1955 kolektivu vědeckých pracovníků laboratoře firmy General Electric v USA, kteří jako první popsali definovaný a opakovatelný vědecky podložený proces výroby.

Jak již bylo uvedeno, diamant lze vyrobit z grafitu za vysokého tlaku a teploty (HPHT) nejen za přítomnosti kovových, ale i nekovových katalyzátorů. Pro většinu systémů kovových katalyzátorů je tlaková a teplotní oblast tvorby ohraničena dvěma čarami (eutektickou čarou daného systému a čarou rovnováhy mezi diamantem a grafitem).⁵

V současné době jsou známy tyto metody výroby syntetického diamantu: ^{12,29}

Syntéza v oblasti termodynamické stability diamantu působením vysokých statických tlaků na grafit při výdrži minimálně několika sekund. Za přítomnosti kovového katalyzátoru – katalytická syntéza (tlak 4 – 7 GPa, teplota 1200 – 2200 °C). Bez přítomnosti cizí fáze (tlak > 13 GPa, teplota 2400 – 3400 °C). Zařízení pro výrobu syntetického diamantu je na obrázku 1.12.



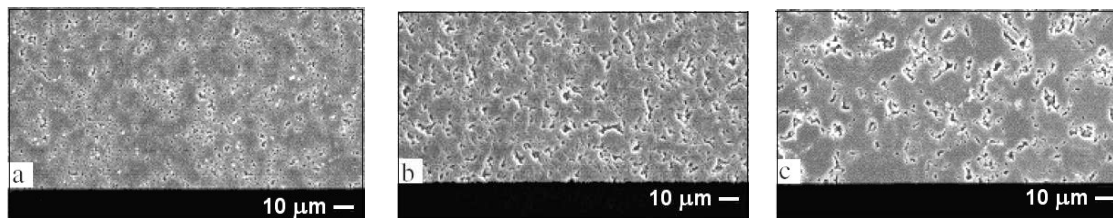
Obr. 1.12. Zařízení na výrobu syntetického diamantu metodou HPHT ⁹

Výroba v oblasti termodynamické stability diamantu působením vysokých dynamických tlaků bez přítomnosti cizí fáze. Přímou přeměnou se grafit transformuje na diamant působením rázové deformační vlny, která vytvoří nejen požadovaný tlak 75 – 100 GPa, ale i potřebnou vysokou teplotu. Takto získaný diamant je velmi jemnozrnný, protože čas působení je řádově několik mikrosekund nebo zlomek mikrosekund.

Výroba v oblasti termodynamické stability grafitu při atmosférickém tlaku nebo nižším při teplotách 1100 – 1200 °C epitaxiálním narůstáním diamantu v zárodcích (orientovaný růst monokrystalických vrstev na obvykle monokrystalické podložce).

Za atmosférického tlaku a teploty je stabilní fáze grafit a nestabilní diamant. Ten má proto snahu za normální teploty a tlaku přecházet do stabilní fáze grafitu. Tento proces degradace diamantu se nazývá grafitizace. Za vysokých teplot a tlaků má naopak grafit tendenci přecházet do stabilní fáze diamantu. Rozhraní těchto dvou modifikací určuje Berman – Simonova křivka. Tato křivka reprezentuje určité minimální množství energie, které je potřeba látky dodat, aby přešla z jedné fáze do druhé. Toto množství energie je pro každou chemicky čistou látku konstantní. Při syntéze se čistý grafit za zvýšeného tlaku a teploty dostane do oblasti, kde je stabilní fáze diamantu. Z grafitu a roztaveného katalyzátoru se vytvoří roztok, ze kterého se ze zvyšující teplotou začnou vylučovat krystalky diamantů. Ty postupem času narůstají a jejich velikost je dána prostorovými dispozicemi. Standardní doba syntézy je několik desítek minut.

Pro výrobu větších diamantů o velikosti několika milimetrů je zapotřebí čas až několik desítek hodin, což není v průmyslové výrobě ekonomické. Tento fakt vedl k výrobě polykrystalického diamantu (PKD) obr. 1.13.⁵



Obr. 1.13. Mikrostruktura materiálů z polykrystalického diamantu firmy De Beers Industrial Diamond Division (a – Syndite CTB 002, b - Syndite CTB 010, Syndite CTB 025)⁵

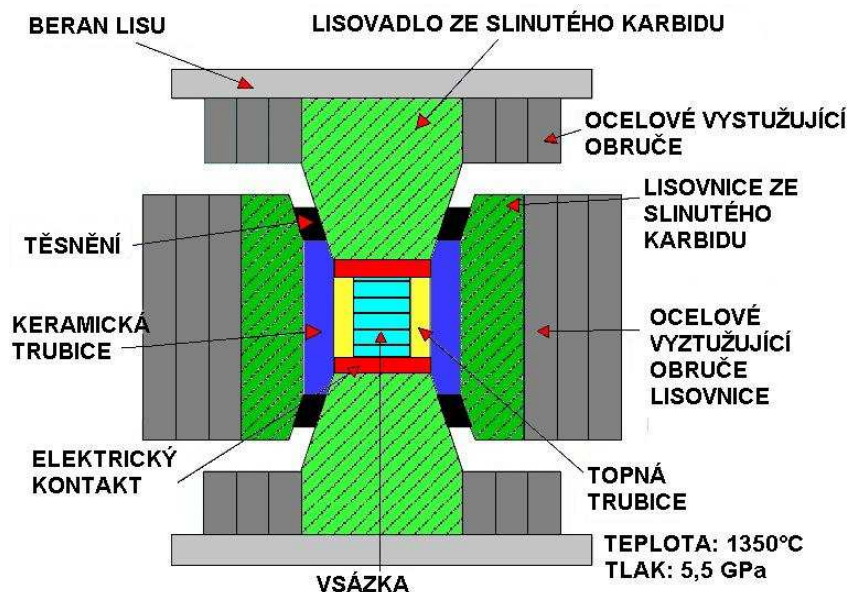
Polykrystalický diamant se vyrábí slinováním za vysokých teplot a tlaků a kombinuje vlastnosti krystalů diamantů a kovové pojící fáze. Rozdílné vlastnosti krystalů diamantu a polykrystalického diamantu viz tab. 1.5.

Tab. 1.5 Vlastnosti monokrystalického a polykrystalického diamantu ⁵		
Vlastnost	Monokrystalický diamant	Polykrystalický diamant
Měrná hmotnost [g.cm^{-3}]	3,515 – 3,520	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	1200 – 1700
Tvrdost [HV]	5700 - 13000	5000 – 8000
Modul pružnosti v tahu [GPa]	820 – 1250	776 – 925
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	507	430
Lomová houževnatost K_{Ic} [$\text{MPa.m}^{1/2}$]	3,4 – 4,2	6,0 – 11,0
Poissonovo číslo [-]	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 [$\text{W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	500 - 2200	120 – 550

Jako kovová pojivová fáze se nejčastěji užívá Co, Si a SiC. PKD se vyznačuje vysokou trvanlivostí, tepelnou vodivostí, tvrdostí a houževnatostí spojovací fáze, ale je křehký.

Schéma přípravy PKD⁵

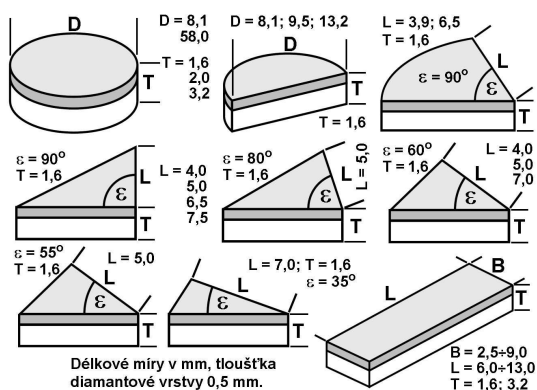
- 1) Příprava vstupní vsázky – diamantové monokrystaly a kovové pojivo (Co, Ni, Fe,...)
- 2) Vysokotlaké slinování (obr. 1.14) – tlak (5 – 8) GPa, teplota (1300 – 1800) °C, výdrž (5 – 30) minut

Obr. 1.14. Schéma zařízení pro slinování PKD ²⁸

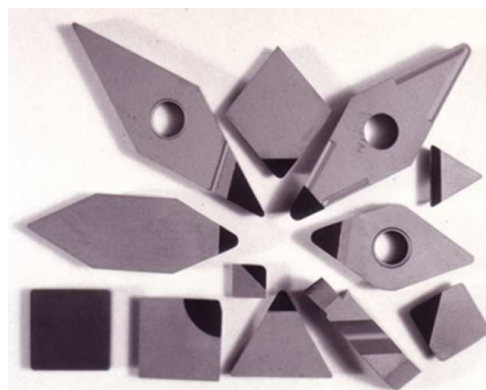
- 3) Leptání nebo mechanické čištění slinutého výrobku
- 4) Broušení diamantovými kotouči a lapování do konečného tvaru
- 5) Rozměrová a vizuální kontrola a měření tvrdosti

1.1.6 Výroba vyměnitelných břitových destiček z PKD

Výchozí materiál pro výrobu břitových destiček je polykrystalický diamant, spojovací fáze a karbidová podložka. Řezné, mechanické a tepelné vlastnosti jsou ovlivněny velikostí monokrystalů a použitým pojivem. Krystaly diamantu společně s pojivem jsou slinovány např. na podložce ze slinutého karbidu (zaručuje odolnost proti tepelným a rázovým šokům).



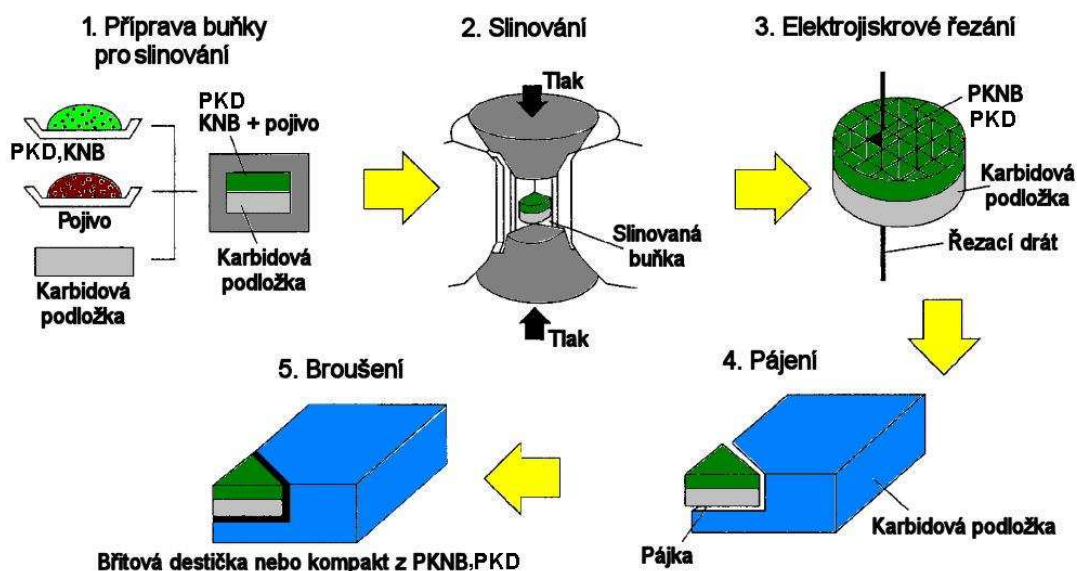
a)



b)

Obr. 1.15. a – Segmenty polykrystalického diamantu firmy Diamond Innovations ⁵
b – Připájené segmenty polykrystalického diamantu na destičky ze slinutého karbidu ³⁶

Tento kompozitní materiál je dále rozřezán na segmenty (obr. 1.15a) požadovaného tvaru, které se pájí na vyměnitelnou břitovou destičku jako roubík (obr. 1.15b). Nakonec se brousí nebo honují funkční plochy břitu. Technologie výroby PKD je shodná s technologií výroby PKNB, viz obr. 1.16.



Obr. 1.16. Proces výroby vyměnitelných břitových destiček z PCD a PKNB²⁸

1.1.7 Diamantové povlaky

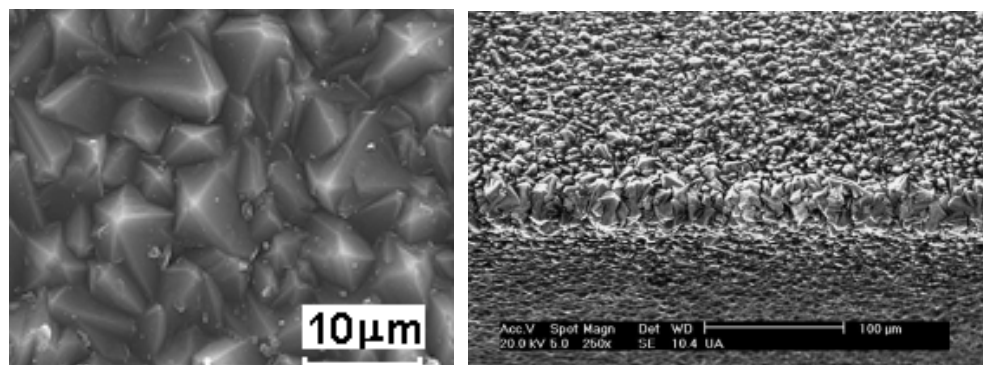
Pro zlepšení povrchové vrstvy nástrojových materiálů se používají různé povlaky, které zlepšují tvrdost, otěruvzdornost, trvanlivost, zajišťují lepší odvod třísky, menší tepelné namáhání nástroje, snižují difúzní opotřebení břitu atd. Užití diamantu při povlakování řezných nástrojů není výjimkou a tyto povlaky vynikají zejména vysokou tvrdostí, tepelnou vodivostí (rychlejší odvod tepla z místa řezu), odolností proti opotřebení a má velice malý koeficient tření.

Samotná výroba a nanášení se provádí metodou **CVD** (Chemical Vapour Deposition – chemická depozice z plynné fáze) nebo plazmaticky aktivovanými metodami PA-CVD, MW-CVD, ECR-CVD, RF-CVD nebo je jako zdroj tepla použito wolframové vlákno, které vydrží vysoké teploty HF-CVD, struktura viz. obr. 1.17a. Při výrobě se nejčastěji používá jako aktivní plynná látka CH_4 (metan), lze však využít i $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (ethanol) či $\text{C}_2\text{H}_2\text{OH}$ (acetylén). Nosný plyn, který je součástí plynného prostředí je H_2 . Rychlost růstu se pohybuje od $0,1 \mu\text{m}$ do $10 \mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$.³⁷

Princip metody spočívá v nanesení tenké vrstvy (povlaku) na vhodném substrátu. Jako substrát jsou vhodné karbidy Ti, Cr, Mo atd., které reagují s uhlíkem a vytváří se „mezivrstva“, která má dvě výhody. Lepší přilnavost diamantu k podkladu a větší rychlost nukleace. Na druhou stranu může karbidová změnit mechanické vlastnosti podkladové vrstvy. Substrát se ve formě destičky vloží do plynného prostředí a zahřeje se na teplotu cca 2000°C . V plynném prostředí se rozkladem aktivní plynné látky vylučuje na povrchu substrátu diamantová vrstva.³⁷

Ohřev plynné fáze je zajištěn wolframovým vláknem, laserem, plazmou nebo mikrovlnami. Potřebný tlak 15 kPa je zajištěn vývěvami. Poměrem aktivního a nosného plynu lze řídit rychlost růstu. Výhody takto vzniklého diamantového povlaku je dobrá adheze, nevznikají póry a povlak je na rozdíl od polykrystalického diamantu homogenní.

Na obr. 1.17b je zobrazena struktura diamantového povlaku vytvořena CVD metodou. Tloušťka povlaku je 30 μm , poloměr řezné hrany asi 30 μm a velikost diamantového zrna 15 μm .³⁸



Obr. 1.17a. Diamantový povlak vyrobený metodou HF-CVD³⁹

Obr. 1.17b. Diamantový povlak břitů řezného nástroje³⁸

1.1.8 Efektivní využití PKD

Tento řezný materiál vyniká zejména svojí tvrdostí, velkou odolností proti abrazivnímu opotřebení a vůbec nejvyšší tepelnou vodivostí ze všech řezných materiálů, což umožňuje rychlý odvod tepla z ostří. Jeho použití je však limitováno vysokou afinitou k železným kovům, tudíž ho není možné použít pro obrábění slitin na bázi železa. Není také vhodný pro obrábění houževnatých materiálů s vysokou pevností. Při nasazení nástrojů z PKD je také nutno zvážit jeho pořizovací cenu, která je podstatně vyšší, než u ostatních řezných materiálů (je důsledkem technologicky a energeticky náročné výroby). Tento faktor je i hlavní příčinou zastoupení PKD a PKNB v celosvětové produkci nástrojů, kde zaujímá pouhých 4% z celkové výroby.

Díky vyšší křehkosti PKD se při obrábění vyžadují stabilní řezné podmínky, tuhé stroje a nástroje a vysoké řezné rychlosti. Tyto podmínky nejlépe splňují obrábění načisto, jemné soustružení a vrtání. Pro čelní frézování lze PKD využít také, je ovšem nutné vyloučit přerušovaný řez a řídit se pokyny výrobce (zejména dodržet řezné podmínky). Pro snížení kmitů a vibrací je vyžadováno co nejmenší radiální a axiální házení. U soustružení je požadováno co nejmenší vyložení nástroje a maximální možný průřez držáku nástroje.

Přes omezenou možnost použití je PDK vynikajícím řezným materiálem zejména pro obrábění abrazivních a nekovových materiálů, kde se vyžaduje vysoká přesnost rozměrů obrobku a jakost povrchu. Preferovanými oblastmi je soustružení a frézování hliníkových a křemíkových slitin, kde je také jednou ze dvou variant (společně s jemnozrnným nepovlakovaným slinutým karbidem).

PDK je rovněž využíván pro obrábění ostatních abrazivních nekovových materiálů, jako jsou umělé pryskyřice, plasty, pryž, kompozitní materiály, slinutý karbid a keramika, lamináty, dřevo, kámen. Dále to pak jsou slitiny magnesia, zinku, bronzů, mosazí, ložiskové materiály, měď a olovo.

Velmi efektivní je zejména obrábění hliníkových slitin pomocí PKD. Dle pokynů výrobce lze tyto slitiny obrábět řeznou rychlostmi až $3000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Jejich nasazení se využívá hlavně ve velkosériové výrobě. Při obrábění PKD lze použít procesní kapalinu bez omezení.^{1,28,5}

1.2 Kubický nitrid boru

Kubický nitrid boru (KNB) je synteticky vyrobený materiál, jelikož se v přírodě nenachází. Vyrábí se z přírodního nitridu boru (BN), který krystalizuje v hexagonální soustavě. V hexagonálním nitridu boru jsou plochy lehkého skluzu se slabou vazbou ve směru hrany základní hexagonální soustavy a stejně jako v grafitu po sobě tyto plochy kloužou. Lupínky nitridu boru (obr. 1.18) jsou velmi podobné jak strukturou, tak fyzikálními vlastnostmi grafitu a díky své barvě je proto často nazýván bílý grafit.²⁹



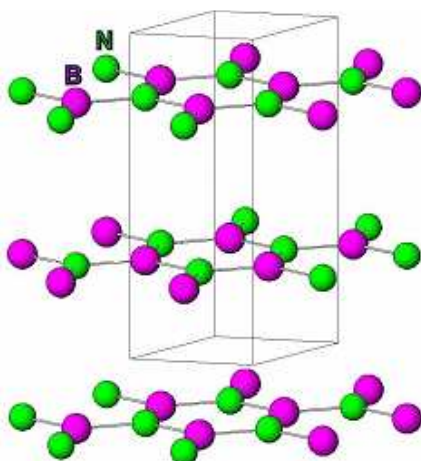
Obr. 1.18 Lupínky hexagonálního nitridu boru²⁵

Nitrid boru je chemická sloučenina, která se skládá ze 43,6% boru a 56,4% dusíku. Sousední atomy v nitridu jsou vzdálené 0,145 nm, čili jsou větší než-li v grafitu. Délka hrany elementární buňky boru nitridu je 0,333 nm, tedy menší než v grafitu. V každém šestiúhelníku je atom vázán třemi atomy boru a naopak. V hexagonální soustavě nitridu boru jsou atomy sestavené tak, že se atomy boru a dusíku střídají na vertikální ose, viz obr. 1.19²⁷

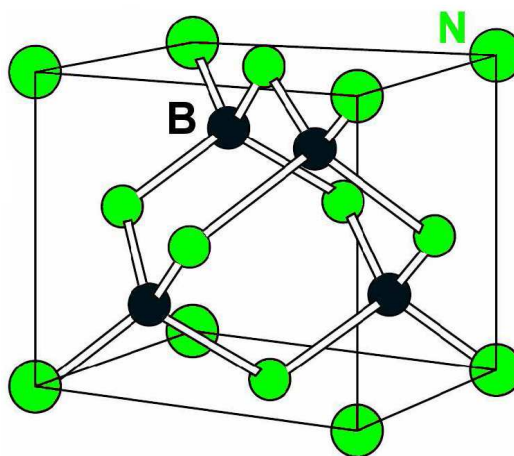
1.2.1 Struktura kubického nitridu boru

Z podobnosti hexagonálních krystalických mřížek nitridu boru a grafitu lze usuzovat, že nitrid boru bude existovat i kubické modifikaci. Struktura kubického nitridu boru je tvořena dvěma plošně středěnými mřížkami, které jsou vzájemně posunuty o čtvrtinu tělesové úhlopříčky. Každá podmřížka je obsazena atomy jednoho prvku. Základní jednotkou struktury je tetraedr, ve kterém je atom jednoho prvku obklopen čtyřmi atomy jiného prvku.²⁹

Krystalová mřížka kubického nitridu boru je složena z 18 atomů. Každý atom boru je vázán ke čtyřem atomům dusíku, které jsou na vrcholech čtyřstěnu, viz obr. 1.20. Délka strany elementární mřížky buňky je $0,3615 \pm 0,0001$ nm při 25°C. Nejkratší vzdálenost mezi sousedními atomy boru a dusíku v krystalové mřížce je 0,157 nm.⁹



Obr. 1.19. Krystalická mřížka hexagonálního nitridu boru⁶



Obr. 1.20 Krystalická mřížka kubického nitridu boru⁶

1.2.2 Základní vlastnosti KNB

Oproti diamantu má kubický nitrid boru téměř dvojnásobnou tepelnou odolnost. Běžně vydrží teploty 1200 – 1400°C.⁵ Při vyšších teplotách se za přítomnosti vzdušného kyslíku rozkládá na oxid dusíku a bor. KNB se nerozpouští v roztavených kovech ani v běžných rozpouštědlech za vyšších teplot. Tyto vlastnosti rozšiřují oblast jeho použití. Díky chemické inertnosti vůči železu je KNB vhodnější pro obrábění ocelí než diamant. Vlastnosti KNB viz. tab. 1.6.

Tab. 1.6. Porovnání vlastností monokrystalického diamantu a KNB⁵

Vlastnost	Diamant	KNB
Měrná hmotnost [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	3,515 – 3,520	3,43 – 3,50
Délka strany kubické mřížky [nm]	0,3567	0,3615
Součinitel délkové roztažnosti [$10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$]	0,8 – 4,8	3,5 – 5,8
Měrná tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	500 - 2200	13 - 200
Teplotní stálost [°C]	600 - 700	1200 - 1400

1.2.3 Mechanické vlastnosti KNB

Mez pevnosti σ_p závisí na krystalické rovině, ve které probíhá její měření a vyjadřuje hodnotu normálního napětí, při jehož překročení dojde k porušení materiálu. Hodnoty mezí pevností monokrystalu jsou uvedeny v tab. 1.7.

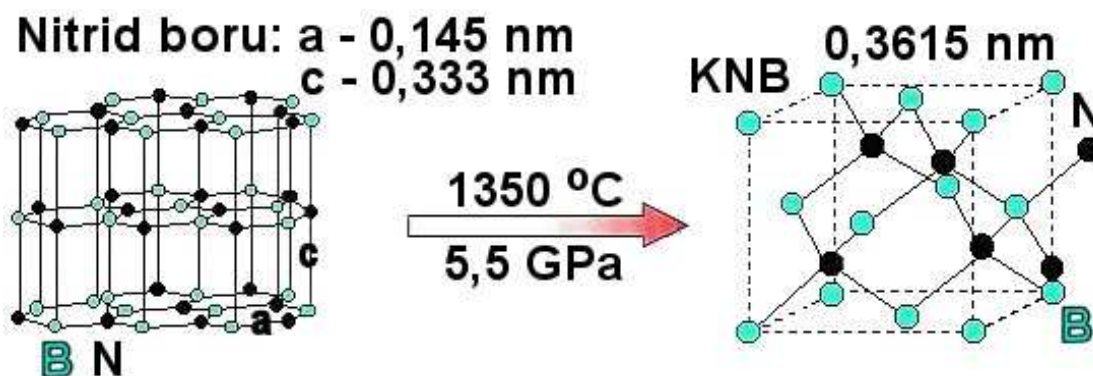
Tvrдость KNB je dána vazbami, kterými jsou atomy B a N vázány ve strukturní mřížce. Kovalentní vazba, která se zde tvoří, má asi v $\frac{1}{4}$ vazeb iontový charakter, proto KNB nedosahuje takové tvrdosti jako diamant. KNB je nejtvrdším nitridem kovu a po diamantu druhou nejtvrdší známou látkou. Tvrдость KNB je uvedena v tab. 1.7.⁵

Tab. 1.7. Porovnání mechanických vlastností monokrystalů a polykrystalického KNB⁵

Vlastnost	Monokrystalický KNB	Polykrystalický KNB
Pevnost v tlaku [GPa]	6,9	2,7 – 3,5
Pevnost v ohybu [GPa]	0,7	0,5 – 0,8
Tvrдость [HV]	4000 - 7500	2700 - 3500

1.2.4 Syntetický KNB a jeho výroba

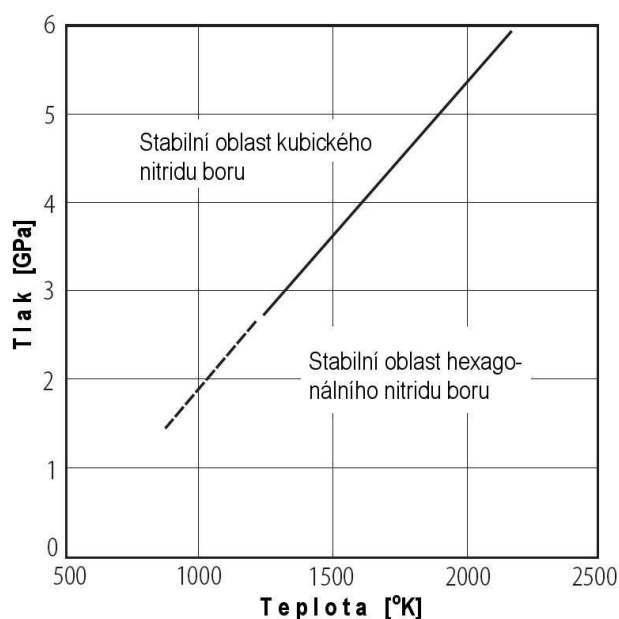
Krystaly kubického nitridu boru jsou vyráběny transformací hexagonálního nitridu boru na jeho kubickou formu, obr. 1.21. Velikost krystalu je ovlivněna zejména tlakem, teplotou, rozpouštědlem (katalyzátorem) a časem transformace. Uplatňuje se podobná technologie jako při výrobě diamantu.



Obr. 1.21. Transformace hexagonálního nitridu boru na kubický²⁸

Při přeměně NB na KNB se s výhodou, stejně jako při výrobě diamantu, používají katalyzátory (tavidla). Nejčastěji se používají alkalické kovy nebo jejich nitridy (boridy), např. Li_3BN_2 , AlN , AlB_2 , směs Al-Mg, alkalické zeminy. Např. směs 40% Al + 60% Mg snižuje teplotu a tlak z původních $>1600\text{ °C}$ a 5,5 – 8,0 GPa na hodnoty 1460 °C a 4,5 GPa (při čemž jsou vytvářeny dobře vyvinuté krystaly KNB).⁵

Na obr. 1.22 je rovnovážný diagram s rovnovážnou přímkou mezi NB a KNB, který je obecně přijímán pro posouzení stabilní oblasti vzniku KNB.⁵

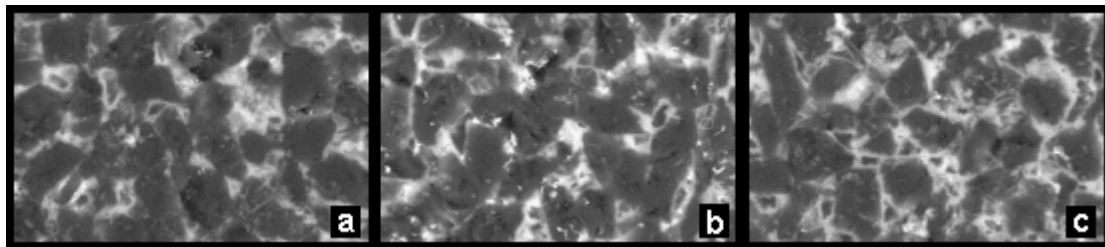


Obr. 1.22. Rovnovážný diagram hexagonálního NB a kubického NB ⁵

Při výrobě KNB se uplatňují dva HPHT postupy. První využívá statického tlaku, při kterém probíhá přímá přeměna z hexagonálního nitridu boru na kubický při velmi vysokých teplotách a tlacích za přítomnosti různých tavidel a je vhodný pro průmyslovou syntézu. Druhý způsob využívá dynamický tlak pomocí rázové vlny.

Tavidla u prvního postupu obvykle napomáhají tvorbě eutektické fáze, která obsahuje intermediální chemické fáze nebo nitrid boru. Rozdíly v rozpustnosti mezi hexagonálním NB a kubickým NB řídí nukleace a růst krystalů. Snaha je dosáhnout co možná největší rychlosti růstu při zachování kvality krystalů a velikosti větší než 100 μm . ⁵

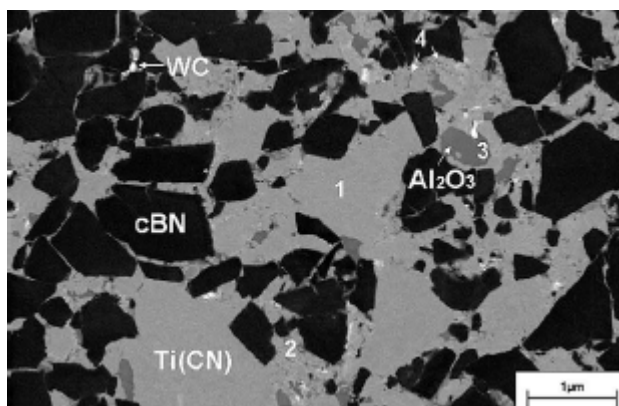
Struktura PKNB se liší v závislosti na použití slinovací teploty (obr. 1.23.). Snímky jsou pořízeny pomocí elektronového mikroskopu s využitím spektrální analýzy. Tmavé oblasti jsou tvořeny KNB a šedé jsou AlN fáze a bílé AlB₂. KNB zrna jsou obklopeny vrstvou AlN a AlB₂, které tvoří trojrozměrnou síť. Na obrázcích 1.23a, b, c je vidět postupně rostoucí oblast AlN a AlB₂ v důsledku zvyšování teploty. ⁴⁰



Obr. 1.23. Struktura PKNB s 15% Al slinovaná za teploty **a** – 1300 °C, **b** – 1400 °C, **c** – 1500 °C, tlaku 5,0 GPa po dobu 20 min ⁴⁰

Na obr. 1.24. je mikrostruktura PKNB tvořena asi z 50 % KNB, která je znázorněna tmavou oblastí. Zrna různých velikostí (od 0,5 μm do 1 μm) jsou zde rozmístěna náhodně. Jejich hranice s fází jsou převážně rovné, tudíž spolu nereagují. Světle šedé oblasti jsou tvořeny TiCN (od mikrometru – označené 1 do nanometrů – označené 2). Právě tyto malé částice podle Tomlinsona a Wel-
dakeho přispívají k pozoruhodné houževnatosti materiálů PKNB.

Tmavě šedé plochy tvořené Al_2O_3 mají často zaoblené hrany, což naznačuje, že Al byl během výroby v roztavené podobě a reagoval s kyslíkem. Al_2O_3 se vyskytuje buď ve větších oblastech označené číslem 3 nebo jako síť okolních zrn KNB v matici označené číslem 4. Někdy se zdá, že jsou zrna KNB rozdělena do dvou nebo více kusů a částice Al_2O_3 a TiCN mezi ně pronikají. Světlé oblasti jsou WC, které jsou zbytkovým produktem výroby prášku KNB před HPHT slinováním. Obsahují je frézovací nástroje (slinuté karbidy WC-Co) užívané při výrobě prášku.⁴⁰



Obr. 1.24. Struktura PKNB se zrna KNB obklopenými TiCN, Al_2O_3 a WC⁴⁰

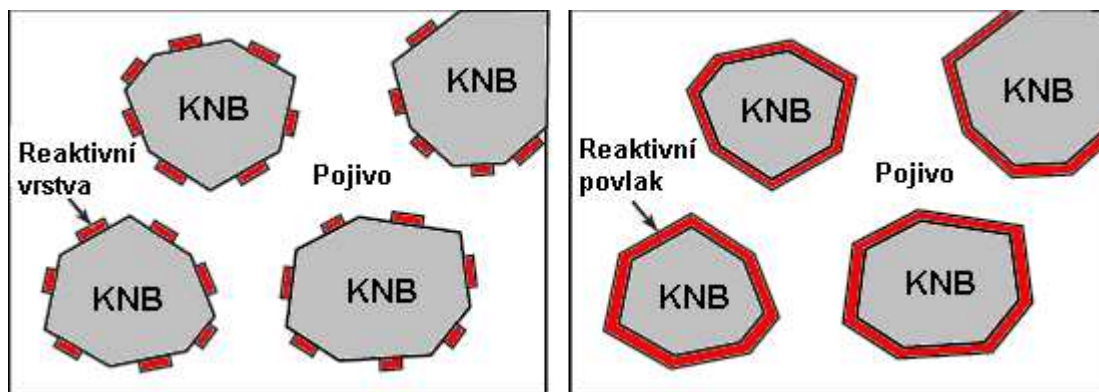
1.2.5 Výroba výměnitelných břitových destiček z PKNB

Proces výroby výměnitelných břitových destiček z polykrystalického kubického nitridu boru je analogický s procesem výroby polykrystalického diamantu, viz kapitola 1.1.5 – **schéma přípravy PCD**.

Nejprve se připraví buňka pro syntézu monokrystalů, poté proběhne syntéza monokrystalů, dále probíhá slinování tělesa (krystaly KNB + pojivo, může být na podložce z karbidu), těleso je poté rozřezáno na segmenty požadovaného tvaru. Vyříznutý roubík se pájí na výměnitelnou břitovou destičku, jejíž funkční plochy se brousí nebo honují. Postup je znázorněn na obr. 1.16.

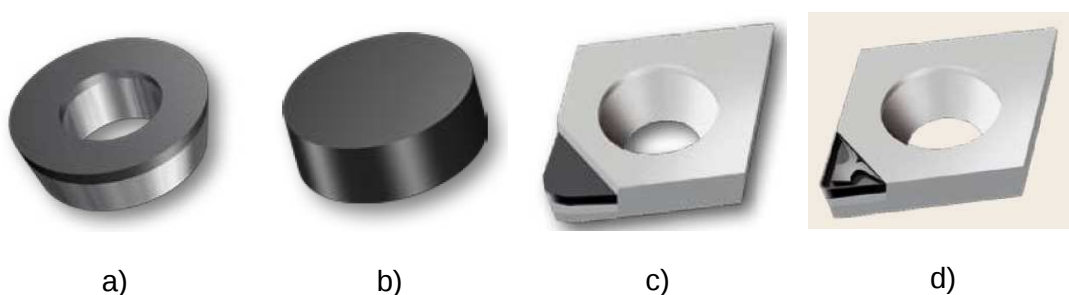
Pro zvýšení pevnosti vazby a potlačení degradace jsou zrna KNB před samotným slinováním upravována. Japonská firma Mitsubishi Carbide provádí slinování povrchově aktivovaných zrn kubického nitridu boru (Particle activated sintering). Díky této metodě jsou eliminovány všechny nečistoty a příměsi a na povrchu zrn KNB se vytvoří reaktivní vrstva.

Ta obklopí každé zrno ve formě povlaku (obr. 1.25). Tímto postupem je zajištěna lepší adheze mezi tvrdými částicemi a pojivem, odolnost a houževnatost konečného produktu.⁵



Obr. 1.25 Aktivovaná zrna KBN firmy Mitsubishi²⁶

Vyměnitelné břitové destičky ze supertvrdých řezných materiálů jsou vyráběny i tak, že jsou složeny ze dvou vrstev. Na podložku ze slinutého karbidu je nanесena nebo připájena silná vrstva polykrystalického kubického nitridu boru (obr. 1.26a) nebo polykrystalického diamantu. Pouze z PKNB jsou vyráběny i vyměnitelné břitové destičky ve formě kompaktního tělesa (obr. 1.26b). VBD mohou mít hladicí geometrii Wiper (obr. 1.26c) či s utvařečem třísky (obr. 1.26d).⁵



Obr. 1.26. VBD firmy Diamond tooling systém (a – destička s připájenou silnou vrstvou PKNB, b – destička z kompaktního tělesa PKNB, c – destička s roubíkem s hladicí geometrií Wiper, d – destička s utvařečem třísky)³⁵

Většina současných břitových destiček s PKNB nebo PKD roubíkem je vytvořena tak, že na jedné nebo obou stranách destičky ze slinutého karbidu je vytvořeno vybrání v místě špičky, do kterého je připájen roubík malé tloušťky (obr. 1.27). Výhodou této konstrukce je menší namáhání pájeného spoje, protože se roubík opírá ve svislém směru o materiál destičky.



Obr. 1.27. Konstrukce destičky ze slinutého karbidu s vybráním v místě špičky a připájením roubíku malá tloušťky z PKD nebo PKNB ³⁵

Firmy Sandvik Coromant a Kennametal – Hertel jsou prvními výrobci destiček, kde jsou na místo špiček destičky připájeny roubíky z KNB, jejichž největší rozměr (délka) odpovídá tloušťce destičky (obráz. 1.28a). To znamená, že např. u čtvercových destiček je k dispozici celkem osm využitelných břitů. Nevýhodou těchto destiček je poměrně malá délka ostří (0,9 až 1,2 mm), což je limituje pro použití poměrně malé hodnoty záběru ostří (obvykle $a_p < 1\text{ mm}$). Kvůli malé šířce může dojít k tepelnému ovlivnění a tím zeslabení pájeného spoje roubíku a destičky. Tento nedostatek s úspěchem odstranila firma Sandvik Coromant svojí „zámkovou“ konstrukcí břitových destiček CB7015, kterou lze využít pro různé tvary destiček (obráz. 1.28b). ⁵



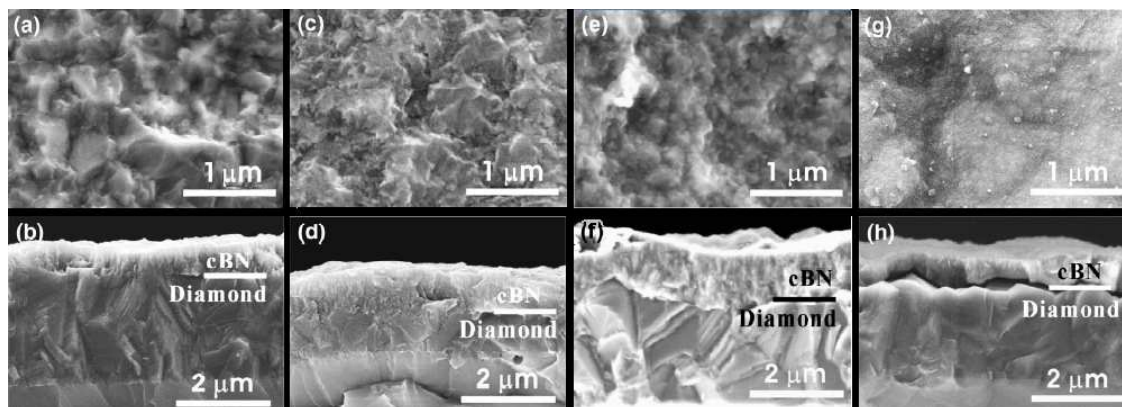
Obr. 1.28. Vyměnitelné břitové destičky s roubíky z PKNB firmy Sandvik Coromant (a – připájený roubík po celé délce špičky, b – zámková konstrukce uložení roubíku) ^{32, 33}

1.2.6 Povlaky z KNB

Obrábění tvrdých materiálů vyžaduje výrazně tvrdé řezné materiály. Povlakované slinuté karbidy, které tomuto odvětví vévodí, nejsou vždy dostatečné dosahovaným výkonům a rychle se opotřebovávají. Supertvrdé materiály jsou z tohoto hlediska vhodné, ale diamant není na rozdíl od KNB použitelný i pro obrábění oceli. VBD z KNB jsou ovšem poměrně drahé a dostupné jen v jednoduchých geometrických tvarech. Proto se začaly vyvíjet povlakové vrstvy, které kombinují vlastnosti povlaků a KNB.

Při počátcích výzkumu a výroby KNB povlaků se vědci potýkali se špatnou přilnavostí povlaků, velkým vnitřním tlakovým napětím v povlaku (až 20 GPa). Tyto skutečnosti limitovaly tloušťku povlaku v řádech několika set nanometrů. Silnější vrstvy ($>1\ \mu\text{m}$) se podařilo vyrobiť pouze na křemíkové podložce za teplot okolo 1000 °C nebo za pomoci snížení napětí v povlaku žíháním. Vytvoření silné vrstvy KNB na jiných, než křemíkových substrátech zůstává pro vědce stále výzvou. ⁴²

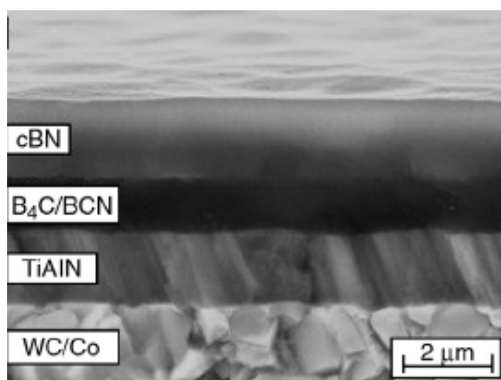
Y. M. Chong a spol. z university v Hongkongu v Číně se zabýval růstem povlaku KNB na diamantovém podkladu za různých teplot. Diamantový povlak byl připraven CVD metodou pomocí mikrovlnného plazmatu při teplotě substrátu 850 °C. Vrstva KNB byla nanesena také metodou MP-CVD a rozmezí teplot substrátu se pohybovalo od 400 do 1000 °C, ostatní parametry byly konstantní. Struktura povlaku a řez vrstvami při různých teplotách viz obr. 1.29.



Obr. 1.29. Povrch a řez vrstvami povlaků připravených za teploty (a, b) 1000 °C, (c, d) 900 °C, (e, f) 700 °C, (g, h) 400 °C s použitím MP-CVD. ⁴³

Ačkoliv KNB může růst ve velkém rozmezí teplot, je prokázáno, že vysoká teplota substrátu zlepšuje čistotu KNB, ovlivňuje velikost a rychlost růstu krystalů. Se zvyšující se teplotou roste velikost krystalů a jejich růst je rychlejší. Z obrázků 1.29 je patrná výška KNB povlaku, která s teplotou souvisí. Rovněž je možné posoudit soudržnost vrstev, které se v případě použití nízkých teplot odlupují (dochází k delaminaci, obr. 1.29f, 1.29h). ⁴³

E. Ullmann a spol. z ústavu obráběcích nástrojů a průmyslového managementu z technické university v Berlíně v Německu, zkoumali KNB povlaky a porovnávali s konvenčními TiAlN povlaky. Cílem byl rozvoj nástrojů potažených KNB povlakem a jejich použití v praxi. Dříve byl používán systém Ti – B₄C – BC – KNB, kde byla pouze tenká mezivrstva Ti. Tu byla nyní nahradily Ullmann a spol. 2,5 μm tlustou TiAlN vrstvou, čímž získali lepší kombinaci tuhosti a pevnosti. Střední vrstva karbidu boru je 0,4 μm silná a výška poslední povrchové vrstvy KNB je 2 μm (viz obr. 1.30). ⁴⁴



Obr. 1.30. Multivrstvý povlak na slinutém karbidu s povrchovou vrstvou KNB (cBN) ⁴⁴

Měření tvrdosti povlaků prováděli na přístroji Fischerscope H100 spol. Fischer. Naměřená tvrdost byla cca 5500 HV u systému KNB povlaku ve srovnání s cca 2300 HV systém vrstev nitridu titanu, se kterým byly porovnávány (CVD TiN-TiCN-Al₂O₃-ZrCN). V průběhu porovnávání výzkumníci prováděli testování přilnavosti povrchu, měření opotřebení povlaků, oxidační opotřebení. Měření opotřebení uskutečnili na obvodovém soustružení obrobku z materiálu Inconel 718 (chrom – niklová ocel) s tvrdostí 43 HRC. Řezné podmínky $v_c=50$ m.min⁻¹, $f=0,1$ mm, $a_p=0,5$ mm, $VB_{max}=0,3$ mm, bez použití procesní kapaliny.

Výsledky porovnání ukazují dvakrát větší tvrdost KNB povlaku než referenčního povlaku i větší chemickou stabilitu. KNB vrstvy vykazují velkou odolnost proti opotřebení, která byla experimentálně dokázána. Díky své tvrdosti a teplotní stabilitě dosáhl nástroj s KNB povlakem zvýšení trvanlivosti o 15 minut oproti 7 minutám referenčního nástroje. Rovněž řezné síly byly nižší a povrch kvalitnější u povlaku KNB.⁴⁴

1.2.7 Efektivní využití PKNB

Díky své vysoké tvrdosti, ořezuvzdornost, tepelné odolnosti, odolnosti řezné hrany proti lomu a vydrolování se nástroje z PKNB s výhodou používají při obrábění tvrdých materiálů v tvrdosti vyšší než 48 HRC. Na rozdíl od PKD je lze využít i pro oceli a litiny. Hlavní oblast použití je jemné obrábění tvrdých a houževnatých materiálů s tvrdostí v rozsahu 50 až 70 HRC. Tímto lze některé brousící operace nahradit soustružením, což přináší úsporu nákladů. Opotřebení břitu je tím menší, čím je tvrdší obráběný materiál. S použitím řezných destiček s PKNB lze dosáhnout vynikající kvality obráběného povrchu.^{47,59,66}



Obr. 1.31. Soustružení kalené oceli bez procesní kapaliny pomocí VBD z PKNB, kde většinu tepla odvádí tříška⁶⁰



Obr. 1.32. Součást hnacího ústrojí je typický obrobek pro nasazení VBD z PKNB⁶⁰

Typickými aplikacemi pro použití PKNB jsou ozubená kola převodovek, kuličkové šrouby, kuželová ozubená kola, ventily, atd. (obr. 1.32). Při obrábění se z důvodu tepelných šoků nedoporučuje užívat procesní kapalinu. Obrábění se provádí na sucho a přesto je obráběná součást poměrně studená, jelikož většina tepla je odváděna třískou (obr. 1.31). V případě nutnosti chlazení se kapalina přivádí přímo na břit nástroje v dostatečném množství.^{47,59,66}

2 HODNOCENÍ ŘEZIVOSTI NÁSTROJE

Řezivost nástroje lze charakterizovat např. jako vlastnost, která umožňuje nástroji efektivně odebírat třísku z obráběného materiálu. Tato vlastnost úzce souvisí s mechanickými a fyzikálními vlastnostmi nástroje, zároveň je ovlivněna dalšími faktory, jako je geometrie nástroje, řezné podmínky, metoda obrábění, řezné prostředí atd. Není to vlastnost absolutní, závisí také na mechanických vlastnostech obráběného materiálu (především na mechanických vlastnostech).⁴⁵

Řezivost nástroje je posuzována podobně jako obrobitelnost materiálu. Porovnává se zkoušený nástroj s nástrojem etalonovým za stejných podmínek obrábění při obrábění stejného materiálu. Vyšší řezivost má ten nástroj, který při obrábění stejného materiálu má nižší náklady na měrnou jednotku.^{45,4}

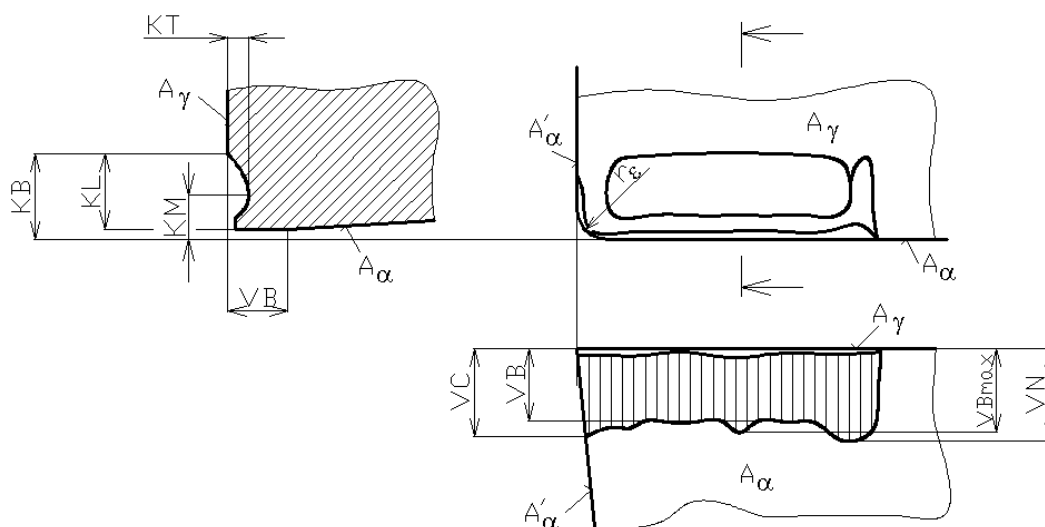
2.1 Formy opotřebení řezných nástrojů

Opotřebení nástroje se obvykle projevuje ztrátou materiálu nástroje na čele nebo hřbetě. Toto **opotřebení** lze hodnotit **přímo** pomocí:

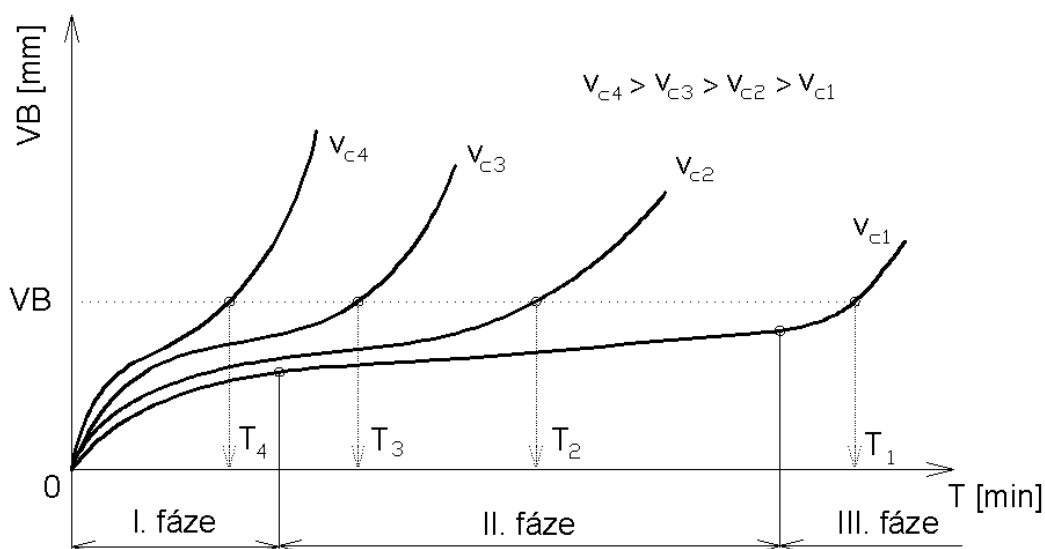
- změn opotřeбенých rozměrů břitu v závislosti na čase (na mikroskopu) – obr 2.1,
- měřením hmotnostního úbytku nástroje (konvenčně nebo radioizotopovou metodou).

Dále je možné **opotřebení** hodnotit **nepřímo** pomocí:

- velikosti změny sil, působících při obrábění,
- nárůstu výkonu, potřebného k obrábění,
- změny teploty obrobku, nástroje nebo třísek,
- změny barvy a tvaru třísek,
- výskytu ostřin na hranách obrobku,
- výskytu lesklých proužků na obrobeném povrchu, zhoršení drsnosti povrchu,
- změny rozměrů na obráběné součásti,
- nadměrné hlučnosti při obrábění,
- analýzy vibrací systému stroj-nástroj-obrobek, rozbořem chvění a kmitání.¹⁴

Obr 2.1. Formy opotřebení nástroje a jejich kvantifikace¹⁴

Nejjednodušší metodou je analýza pomocí rozboru křivek opotřebení (obr 2.2). Pomocí této analýzy lze zpravidla najít u hřbetního opotřebení *pásmo záběru* (pásmo I), *pásmo normálního opotřebení* (lineární pásmo II) a *pásmo zrychleného opotřebení* (pásmo III). Tyto křivky opotřebení se pak využívají pro stanovení dílčích účinků kvality, řezného prostředí, řezných podmínek, atd. na trvanlivost břitu.

Obr 2.2. Časový rozvoj velikosti hřbetního opotřebení v závislosti na řezné rychlosti¹⁴

Trvanlivost řezného nástroje T (min) lze definovat jako součet všech čistých časů řezání, od počátku obrábění až po opotřebení břitu na předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria. Kritérium opotřebení a jeho hodnota musí být stanovena tak, aby měl obrobek požadovanou kvalitu povrchu, rozměry a tvar a to po celou dobu trvanlivosti nástroje. Trvanlivost nástroje (stejně tak opotřebení nástroje) závisí na metodě obrábění, vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu a řezných podmínkách (řezná a posunová rychlost, řezné prostředí, šířka záběru ostří).^{14,4}

V roce 1905 zjistil při studii zvyšování produktivity práce F. W. Taylor, že z řezných podmínek má na trvanlivost nástroje největší vliv řezná rychlost a odvodil základní vztah pro vzájemnou závislost těchto dvou veličin. Dnes jsou na něm založené normy ČSN ISO 3685, i ČSN ISO 8688-1 a ČSN ISO 8688-2. Postup analýzy je takový, že pro předem stanovenou hodnotu kritéria (běžnou hodnotou zvoleného opotřebení bývá **VB = 0,3 – 0,4 mm**, nebo **KT = 0,13 – 0,14 mm** – u slinutých karbidů) jsou z časových křivek **VB** odečteny hodnoty trvanlivosti T_1 , T_2 , T_3 a T_4 , které odpovídají zvoleným řezným rychlostem **v_{c1}**, **v_{c2}**, **v_{c3}** a **v_{c4}** (obr. 2.3). Body o souřadnicích **v_{c1}-T₁**, **v_{c2}-T₂**, **v_{c3}-T₃** a **v_{c4}-T₄** jsou pak vyneseny do diagramu s logaritmickými souřadnicemi **T** a **v_c**, kde tvoří zpravidla určitou regresní závislost (obvykle lineární), která odpovídá zvolené hodnotě VB (obr. 2.3 – 2.4).^{14,4}

Matematicky je získaná **T-v_c** závislost známá pod názvem "**T-v_c** závislost" ("Taylorův vztah") a je popsána základními vztahy:

$$v_c \cdot T^m = C_v \quad v_c = \frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}}} \quad T = \frac{C_T}{v^m} \quad (2.3)$$

Při přepočtu trvanlivostí se často využívá ve tvaru:

$$T_1 \cdot v_1^m = T_2 \cdot v_2^m = C_T \quad (2.4)$$

Hodnotu konstanty **C_T** pro daný materiál obrábění a řezné podmínky **f** a **a_p** lze odečíst na ose **T** pro řeznou rychlost **v_c=1 m.min⁻¹**, hodnotu konstanty **C_v** na ose **v_c** pro trvanlivost **T=1 min**. Exponent **m** vyjadřuje směrnici vytvořené přímky, **m=tg α**. Podmínkou platnosti uvedených základních vztahů **T-v_c** závislosti je omezení následujícími podmínkami:

- šířka záběru ostří **a_p=konst**,
- posuv na otáčku **f=konst**,
- opotřebení **VB=konst**,
- chlazení, mazání, stav polotovaru, stroje, atd.=konst. ^{14,4}

Konstanty i exponent **m** je ovlivněn mnoha činiteli, a proto se také mění. Významný je exponent **m**, jehož velikost udává, jaká je citlivost nástrojového materiálu na změnu řezné rychlosti. Mění se s vlastnostmi materiálu bříty nástroje.

Základní Taylorův vztah může být upraven tak, že bere v úvahu ještě posuv **f** a šířku záběru ostří **a_p**, pro určitou stanovenou trvanlivost **T** (12-15 minut u slinutých karbidů, 30-60 minut u HSS). Takto rozšířený vztah má tvar:

$$v_{cT} = \frac{C_{vT}}{a_p^{X_v} \cdot f^{Y_v}} \quad (2.5)$$

3 PKD A PKNB V SORTIMENTU VÝROBY NEJVÝZNAMNĚJŠÍCH SVĚTOVÝCH PRODUCENTŮ NÁSTROJŮ A DOPORUČENÉ PRACOVNÍ PODMÍNKY

3.1 General Electric

Americká firma a její divize Diamond Inovations je přední světový výrobce a dodavatel PKNB a PKD s obchodním zastoupením ve více než 25 zemích. Pro evropský trh má zastoupení v Německu, kde je také vývojové centrum.⁴⁸

3.1.1 *Diamond Compax*

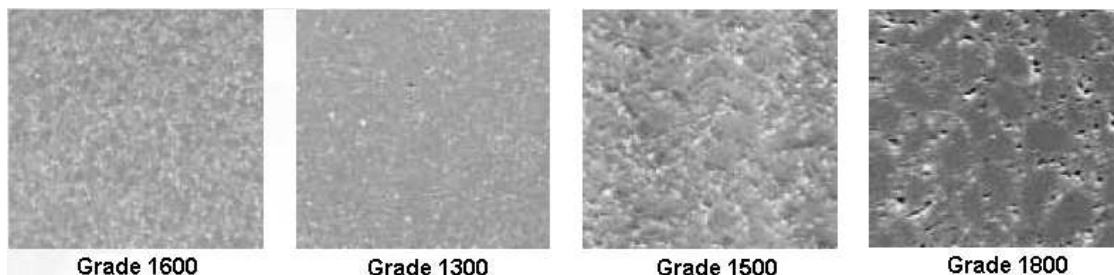
Nástrojová řada Diamond Compax označuje materiály z polykrystalického diamantu společnosti General Electric. Tyto supertvrdé řezné materiály jsou určeny pro obrábění neželezných a nekovových materiálů. Společnost vyrábí řezné části různých tvarů a velikostí (tab. 3.1.) šitých na míru pro dosažení vysoké produktivity v různých oblastech. PKD je slinovaný za vysokých teplot a tlaků na substrátu z karbidu wolframu. Mikrostruktury materiálové řady jsou na obr. 3.1.⁴⁶

Grade 1600 – Materiál obsahuje 90 obj.% diamantových částic o velikosti 4 μm . Je vhodný pro dokončovací obrábění mědi, hliníku drahých kovů, plastů a dřevěných kompozitů. Má vysokou odolnost proti otěru a vysokou kvalitu řezné hrany.

Grade 1300 – 5 μm velké diamantové částice tvoří 92 obj.% tohoto materiálu. Je vysoce odolný zejména při obrábění hliníkových, duralových a měděných slitin, grafitových kompozitů, surové keramiky a dřevěných kompozitů.

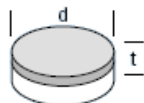
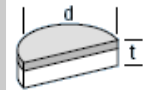
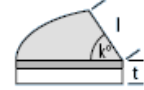
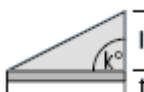
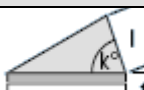
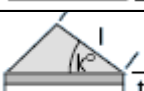
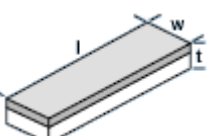
Grade 1500 – Obsahuje 94 obj.% diamantových částic velikosti 25 μm . Materiál vyniká vysokou rázovou houževnatostí a vysokou odolností proti abrazivnímu opotřebení. Je proto určen pro přerušované a hrubovací obrábění materiálů, jako jsou Si-Al slitiny, keramiky, karbidů a kompozitů s kovovou maticí.

Grade 1800 – Struktura obsahuje diamantové částice dvou velikostí 4 μm a 25 μm . Ty tvoří 95 obj.%. Je vhodný pro obrábění slitin křemíku a hliníku, sklolaminátu a dřevěných laminátů.⁴⁶



Obr. 3.1. Mikrostruktura materiálů Compax firmy General Electric⁴⁶

Tab. 3.1. Velikosti a tvary řezných částí řady Compax firmy General Electric ⁴⁶

Tvar a úhel (κ°)		Průměr (d)	Tloušťka (t)
	Kruhový tvar 360°	8,1	3,2
		58,0	1,6 – 2,0/3,2
	Půlkruhový tvar 180°	8,1	1,6
		9,5	1,6
		13,2	1,6
	Čtvrtkruhový tvar 90°	3,9	1,6
		6,5	1,6
Trojúhelníkový tvar a úhel (κ°)		Délka odvěsny (l)	Tloušťka (t)
	90°	4	1,6
		5	1,6
		6,5	1,6
		7,5	1,6
	80°	5,0	1,6
	60°	4,0	1,6
		5,0	1,6
		7,0	1,6
	55°	5,0	1,6
	35°	7,0	1,6
Obdélníkový tvar	Délka (l)	Šířka (w)	Tloušťka (t)
	6,0	3,0	1,6
	6,0	4,3	1,6
	6,5	5,5	1,6
	8,0	5,0	1,6
	9,0	9,0	1,6
	10,0	3,0	1,6
	11,5	2,5	3,2
	13,0	3,0	1,6

Všechny rozměry jsou uvedeny v mm. Rozměrové tolerance segmentů: $\pm 0,15$ mm pro délku (l) a šířku (w), $\pm 0,1$ mm pro průměr (d) a $\pm 0,05$ mm pro celkovou tloušťku (t). Nominální tloušťka diamantové vrstvy je 0,5 mm. Další tvary a speciální požadavky lze vyrobit po dohodě s výrobcem.

3.1.2 Doporučené pracovní podmínky materiálů Compax

Pracovní podmínky materiálů Compax, které doporučuje výrobce General Electric jsou shrnuty v tab. 3.2.

Tab. 3.2. Doporučené řezné podmínky pro materiály Compax ⁴⁶

Obráběný materiál	Grade Compax	V _c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a _p [mm]
Slitiny hliníku				
4-8 % Si	1300/1500/ 1800	900-3500	0,1-0,4	0,1-4,0
9-14 % Si		600-2400	0,1-0,4	0,1-4,0
> 13 % Si		300-700	0,1-0,4	0,1-4,0
Slitiny mědi				
Cu, Zn, Bronzy	1300/1600	400-1260	0,03-0,3	0,05-2,0
	1800	400-1200	0,05-0,3	0,05-2,0
Karbíd wolframu < 16 % Co				
Surový	1300/1500	30-100	0,1-0,4	0,2-1,0
	1800	100-200	0,1-0,4	0,1-1,0
Slinovaný	1300/1500	20-40	0,1-0,25	0,1-0,5
	1800	20-40	0,1-0,25	0,1-1,0
Keramika				
Surová	1300/1500	70-100	0,1-0,4	0,2-1,0
	1800	70-200	0,1-0,4	0,1-1,0
Slinovaná	1300/1500	50-80	0,1-0,25	0,1-0,5
Plasty a kompozity				
Grafit	1300/1600	300-2000	0,05-0,3	0,1-3,0
Sklolaminát	1300/1600	200-1000	0,05-0,3	0,1-3,0
Uhlíkový kompozit	1800	300-1000	0,1-0,4	0,1-3,0

3.1.3 BZN Compacts

Řada řezných nástrojů z PKNB pro obrábění železných materiálů. Řada polotovarů BZN pro nástroje je k dispozici v široké řadě velikostí, tvarů a tříd pro konečnou výrobu vysoce kvalitních nástrojů (tab. 3.3). Kompakty BZN jsou vyrobeny z vysoce kvalitních jemných částic Borazon CBN slinuté na substrátu wolframu karbidu (struktury na obr 3.2.). Vhodné jsou především pro obrábění perlitické litiny, Cr a Ni legované oceli, superslitin a kalených ocelí. ⁴⁷

Při použití produktů řady BZN je nutné používat dostatečně tuhé stroje, co nejmenší vyložení nástroje, nezastavovat stroj, pokud je nástroj v záběru, nepoužívat procesní kapalinu při obrábění přerušovaným řezem, atd.

BZN 6000 – Tento materiál se vyznačuje vysokou odolností proti otěru, rázovou houževnatostí. Obsahuje 90 obj.% částic KBN s průměrnou velikostí 2 μ m. Je určený pro hrubování a přerušované obrábění litin a Ni a Co superslitin.

BZN 7000S – Jedná se celistvé destičky z PKNB. Jsou tvořeny hrubším zrnem velikosti 15 μ m s obsahem 82 obj.% a keramickým pojivem. Vynikají vysokou lomovou houževnatostí, odolností proti opotřebení a chemickou stabilitou. Celistvá konstrukce umožňuje použití břitu po obou stranách. Materiál je vhodný pro obrábění legovaných litin, šedé litiny, kalených a chromových ocelí.

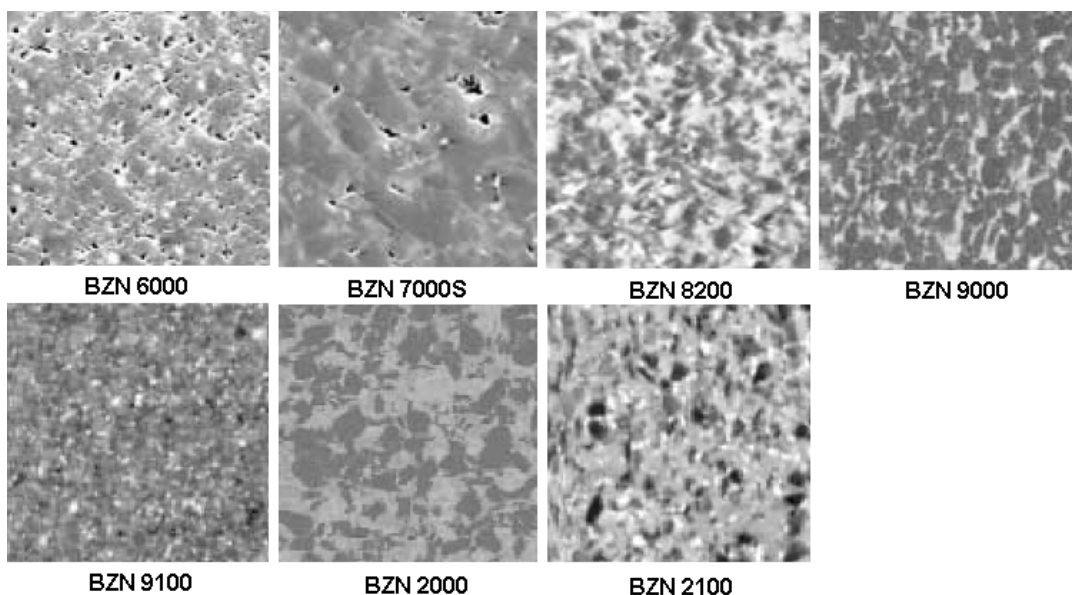
BZN 8200 – Materiál se složen z 65 obj.% krystalů Borazon CBN s průměrnou velikostí 2 μm a keramického pojiva TiN. Díky tomuto složení vykazuje výbornou nárazovou houževnatost a chemickou stabilitu. Materiál byl speciálně vytvořen pro dokončovací obrábění kalených ocelí a soustružením s tímto materiálem lze nahradit konvenční broušení kotouči z Al_2O_3 . Lze užít i pro přerušované řezy.

BZN 9000 Compacts – Speciálně navržený materiál pro obrábění litin vyrobených práškovou metalurgií. Při obrábění těchto materiálů je dochází k velkému abrazivnímu opotřebení. Materiál má vysokou odolnost proti otěru a vysokou chemickou stabilitu. Obsahuje 75 obj.% KBN průměrné velikosti 4 μm v keramickém pojivu.

BZN 9100 Compacts – Materiál vyznačující se vynikající odolností proti nárazu (vysokou lomovou houževnatostí) a zlepšenou chemickou stabilitou. Tyto vlastnosti ho předurčují k použití u plynulých i vysoce přerušovaných řezů. Vynikající vlastnosti lze uplatnit při obrábění litiny, nástrojových a kalených ocelí. Obsahuje vysoké procento KBN (90 obj.%) s průměrnou velikostí zrn 2 μm .

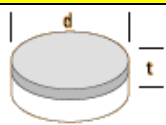
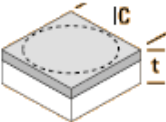
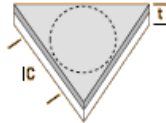
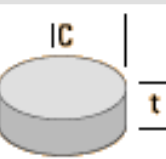
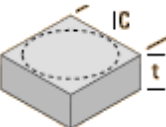
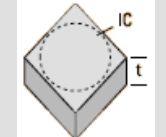
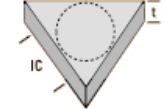
BZN HTC 2000 Compacts – Materiál je určený pro dokončovací operace kalených ocelí (ložiskové oceli, oceli pro zápustky) plynulým řezem. Vyniká mimořádně dlouhou trvanlivostí, nízkou chemickou reaktivitou, optimalizovanou tepelnou vodivostí a vynikající strukturou obrobeného povrchu. Složení je dáno keramickou maticí na bázi Ti a obj. obsah KBN je 50 % s velikostí zrn 2 μm .

BZN HTM 2100 Compacts – Víceúčelový materiál s vysokou odolností proti nárazu určený pro obrábění tvrdých materiálů s plynulým nebo lehce přerušovaným řezem. Mezi přednosti patří dlouhá trvanlivost nástroje, dobrá kvalita povrchu a možnost většího úběru materiálu.⁴⁷



Obr. 3.2. Mikrostruktura materiálů BZN Compacts firmy General Electric⁴⁷

Tab. 3.3. Vybrané velikosti a tvary řezných částí řady BZN Compacts firmy General Electric ⁴⁷

PKNB na substrátu z wolframu karbidu			
Tvar		Průměr (d) (IC)	Tloušťka (t)
	Kruhový 360°	10,0	3,2
		13,2	3,2
		13,2	4,8
	Čtvercový	9,8	3,2
		12,9	3,2
		12,9	4,8
	Trojúhelníkový	6,7	3,2
		9,9	3,2
		13,2	4,8
Celistvé destičky z PKNB Grade 7000S			
Tvar		Průměr vepsané kružnice (IC)	Tloušťka (t)
	Kruhový 360°	10,0	3,2
		10,0	4,8
		13,2	3,2
		13,2	4,8
		19,4	4,8
		26,0	3,2
		26,0	4,8
	Čtvercový	10,0	3,2
		10,0	4,8
		13,2	3,2
		13,2	4,8
	Kosočtvercový	10,1	3,2
		10,1	4,8
		13,2	3,2
		13,2	4,8
	Trojúhelníkový	7,0	3,2
		10,0	4,8
		10,0	4,8

Všechny rozměry jsou uvedeny v mm. Rozměrové tolerance segmentů: $\pm 0,15$ mm pro délku (l) a šířku (w), $\pm 0,1$ mm pro průměr (d) a $\pm 0,05$ mm pro celkovou tloušťku (t). Nominální tloušťka diamantové vrstvy je 0,8-1,2 mm dle typu. Další tvary a speciální požadavky lze vyrobit po dohodě s výrobcem.

3.1.4 Doporučené pracovní podmínky materiálů BZN Compacts

Pracovní podmínky materiálů BZN Compacts, které doporučuje výrobce General Electric jsou shrnuty v tab. 3.4.

Tab. 3.4. Doporučené řezné podmínky pro materiály BZN Compacts ⁴⁷

Obráběný materiál	Grade BZN Compacts	V_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
Litiny				
Perlitická šedá litina	6000	600-1500	0,15-0,60	0,10-2,5
	7000S	600-1200	0,15-0,60	0,10-2,5
Litina (>45 HRC)	7000S	40-100	0,10-0,60	0,10-2,5
Litiny	9100	600-1200	0,15-0,50	0,10-2,5
Kalené oceli				
Ocel (>45 HRC)	7000S	65-120	0,10-0,50	0,50-2,5
	8200	100-150	0,10-0,20	0,10-0,50
	HTC 2000	140-250	0,05-0,20	0,10-0,25
	HTM 2100	120-200	0,10-0,20	0,1-0,50
Litiny vyrobené práškovou metalurgií				
Litiny vyrobené práškovou metalurgií	9100	90-180	0,10-0,20	0,10-1,0
	9000	60-200	0,10-0,25	0,10-1,30
	6000	60-180	0,10-0,25	0,10-1,30
	7000S	90-180	0,10-0,25	0,10-1,30
Nástrojové oceli				
Nástrojové oceli a oceli pro zápustky	6000	60-90	0,10-0,20	0,10-0,50
	8200	90-110	0,10-0,20	0,10-0,50
	9100	90-120	0,10-0,20	0,10-1,0
	HTC 2000	80-140	0,05-0,20	0,10-0,25
	HTM 2100	80-120	0,10-0,20	0,10-0,50
Superslitiny				
Dokončovací obrábění Ni a Co superslitin	6000	150-250	0,10-0,30	0,1-0,40

3.2 De Beers

Tato holdingová společnost, působící od roku 1888, je gigantem v oblasti těžby, zpracování a uvedení diamantů na trh. Společně se svými partnery působí ve více než 20 zemích na 6 kontinentech a zaměstnává více jak 16 000 lidí. Je největším světovým producentem v oblasti Botswany, Jihoafrické republiky, Namibii a Kanady. ⁴⁹

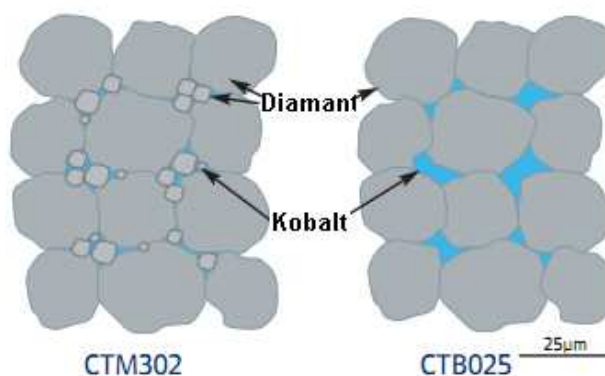
Element 6 je dceřinou společností De Beers a předním světovým výrobcem průmyslových diamantů. Svůj název dostala podle umístění uhlíku v periodické soustavě prvků (je na šestém místě). Své sídlo má v Lucembursku a primární výrobní závody v Jihoafrické republice, Číně, Velké Británii, Irsku, Švédsku a Německu. Více než 50 let se zabývá syntézou diamantu a kubického nitridu boru. ⁵⁰

3.2.1 Syndite

Produktová řada PCD se vyrábí metodou HPHT a je určená pro obrábění neželezných materiálů, kde je požadovaná vysoká odolnost proti otěru. Typické aplikace jsou obrábění slitin hliníku, mědi, hořčíku, bronzů, keramiky, uhlíkových vláken a plastů. Pro optimální výkon a s ohledem na trvanlivost nástroje by měl být tuhý stroj, neutrální nebo pozitivní úhel čela a co nejmenší vyložení nástroje. Lze obrábět na sucho i s použitím procesní kapaliny.^{51, 54}

CTB002 – Je určen pro výrobu přesných nástrojů k zajištění kvalitního povrchu obrobku. Zrnitost krystalů je 2 μm a tento materiál je k dispozici v rozměru disku 74 mm.

CTM302 – Materiál je určen pro celou řadu aplikací, jako je obrábění kopmozitů s kovovou matricí, slitin hliníku a křemíku a šedé litiny. Obsahuje pečlivě vybranou směs diamantů od 2 do 30 μm viz obr. 3.3. Výsledný materiál je extrémně odolný proti otěru, je houževnatý a má vysokou kvalitu ostří. Vyrábí se jako disk s průměrem 74 mm.



Obr. 3.3. Uložení různých velikostí diamantů v kobaltovém pojivu⁵³

CMX850 – Obsahuje homogenní strukturu složenou z 1 μm velkých krystalů syntetického diamantu. Je určen zejména pro frézování, hrubování hliníkových slitin, obrábění titanu, slitin mědi, keramiky a plastů. Lze jej použít i pro jemné dokončovací operace. K dispozici je jako 60 mm kotouč, nebo v rozřezaných segmentech.^{51, 54}

Další typy (**CTC002**, **CTB010**, **CTB025**, **CTM 302**) jsou určeny pro specifické obrábění dřeva, dřevotřískových a laminátových desek pro podlahy atd.^{52, 54}

Všechny typy jsou dostupné ve třech tloušťkách kruhových destiček (3,2; 2,0 a 1,6 mm) s tloušťkou PKD 0,5 mm. Destičky jsou dělené na menší segmenty drátovým řezáním.

3.2.2 Doporučené pracovní podmínky materiálů Syndite

Pracovní podmínky materiálů Syndite, které doporučuje výrobce De Beers jsou shrnuty v tab. 3.5.

Tab. 3.5. Doporučené řezné podmínky pro materiály Syndite ⁵⁴

Obráběný materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
Hodnoty platí pro soustružení a vrtání			
Hliník a jeho slitiny	300-1000	0,05-0,50	až 10,0
Měď a její slitiny	300-1000	0,05-0,50	až 10,0
Bronzy	300-1000	0,05-0,50	až 10,0
Slinuté karbidy wolframu	10-30	0,10-0,20	až 2,00
Sklo, plasty, uhlíková vlákna	100-600	0,05-0,50	až 10,0
Surová keramika	100-600	až 0,2	až 2,00
Vyztužené plasty	50-150	0,10-0,50	až 3,00

3.2.3 Amborite

Materiálová řada PKNB nachází uplatnění hlavně v obrábění kalených ocelí, ložiskových ocelí, rychlořezných ocelí a litin. Kombinuje vysokou tvrdost, chemickou stálost a odolnost proti otěru. PKNB je vyrobený za vysoké teploty a tlaků slinováním krystalů KNB a keramického pojiva. Obměnou poměru pojiva a krystalů a různé velikosti krystalů dosáhl výrobce materiálů vhodné pro konkrétní aplikace. Mezi nejčastěji obráběné součásti patří brzdové kotouče, vložky motorů, vložky válců, brzdové bubny, setrvačníky, ozubená kola atd. ⁵⁵

DCN450 – Materiál je určen pro středně těžké, přerušované soustružení a frézování tvrdých povrchů. Vyniká velkou odolností proti opotřebení a lze obrábět za sucha i s procesní kapalinou. Obsahuje přibližně 45 % KNB v TiCN pojivu.

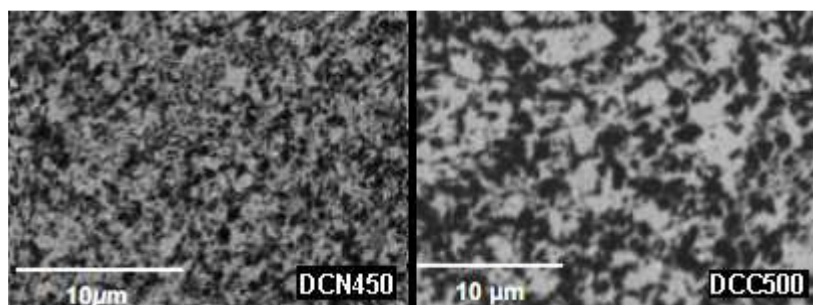
DCC500 – Speciální výrobní metody vedou k extrémně jednotné struktuře tohoto materiálu. Vyniká odolností proti odštípnutí břitů a je používán při požadavku vysoké řezné rychlosti nebo dlouhé trvanlivosti nástroje.

DCX650 – Je vyvinut pro středně těžké a těžké hrubování kalených ocelí s přerušovaným řezem. Je tvořen cca 65 % KNB s několika velikostmi krystalů v TiCN pojivu.

DBW85 – Patří mezi nejvšestrannější materiál, má vynikající pevnost a odolnost proti otěru a je vhodný i pro těžce přerušované obrábění. V AlWCoB pojivu jsou usazeny 1 až 2 μ m velké krystaly KNB, které tvoří 85 % objemu materiálu.

AMB90 – Tento materiál je vhodný především pro soustružení a frézování šedé a kalených ocelí. Materiál obsahuje 90 % KNB velikosti 10 μ m a pojivo z hliníku a nitridu boru.

DBS900 – 90 % KNB zrnitosti 2 – 4 μ m ve zcela novém druhu pojiva zabezpečuje vynikající odolnost proti otěru. Výborná trvanlivost nástroje se uplatňuje při obrábění šedé litiny, kalených ocelí a vysoce legovaných ocelí. ⁵⁵



Obr. 3.4. Struktura PKNB řady Amborite DCN450 a DCC500 výrobce De Beers^{56, 57}

3.2.4 Doporučené pracovní podmínky materiálů Amborite

Pracovní podmínky materiálů Amborite, které doporučuje výrobce De Beers jsou shrnuty v tab. 3.6.

Tab. 3.6. Doporučené řezné podmínky pro materiály Syndite⁵⁴

Obráběný materiál	V_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
Kalené oceli			
Hrubování	60-200	0,1-0,3	až 3,0
Dokončování	90-200	až 0,2	až 0,5
Šedá litina			
Hrubování	400-2500	0,1-0,8	až 3,0
Dokončování	400-2000	0,1-0,6	až 1,0
Tvrdé navařené slitiny			
Hrubování	50-200	0,2-0,4	až 3,0
Dokončování	50-200	až 0,2	až 0,5

3.2.5 Mono

Produktová řada Mono je charakterizována jednotlivými diamantovými krystaly, které jsou syntetizovány pod důslednou kontrolou růstu. Je prováděna jejich kontrola tvaru i fyzikálních vlastností. Výsledný krystal má konzistentní a lehce předvídatelné vlastnosti oproti přírodnímu diamantu.⁵⁸

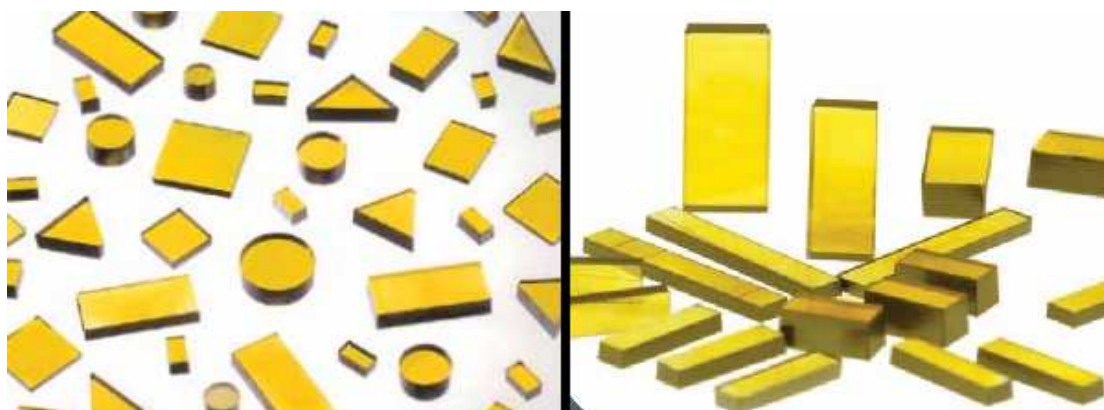
Monodie – Používá se na průvlaky pro tažení drátů. Má vynikající tepelnou vodivost a je stabilní do teploty až 1100 °C. Krystal (obr. 3.5) se vyrábí v tloušťkách 0,5 až 1,0 mm.

Monodite – Monokrystaly (obr. 3.6) jsou vyráběné v mnoha velikostech a tvarech (obdélníky, trojúhelníky, atd.). Jsou pájené přímo na řezné nástroje, chirurgické nože, lešticí nástroje.

Monodress – Vyrábí se v podobě obdélníků (obr. 3.6) s rozměry: délka od 2,5 do 5,0 mm, šířka 0,8-1,2 mm a tloušťka od 0,8 do 1,2 mm. Používají se pro speciální nástroje jako jsou orovnávače brousících kotoučů, měřicí doteky, testování vnikací tvrdosti atd.⁵⁸



Obr. 3.5. Krystal Monodie MD 111⁵⁸



Monodite MT

Monodress MDL

Obr. 3.6. Segmenty Monodite a Monodress řady Mono výrobce De Beers⁵⁸

3.3 Seco Tools AB

Švédská společnost Seco Tools AB je předním světovým výrobcem v oblasti vývoje a výroby řezných nástrojů pro obrábění kovů. Poskytuje komplexní řešení pro frézování, soustružení a vrtání a sortiment zahrnuje více než 21 000 produktů. Seco Tools má zastoupení ve všech průmyslově vyspělých zemích světa (více než 50 zemí) a je vlastníkem certifikátu jakosti ISO 9001. Pro Českou republiku má od roku 1994 obchodní zastoupení v Brně.⁶¹

3.3.1 Secomax PCD

Materiálová řada polykrystalického diamantu s různou velikostí diamantových zrn pro obrábění hliníkových a křemíkových slitin, plastů, mědi, keramiky, bronzů atd. Materiály označené * nejsou standardně vyráběné (jejich výroba je na objednávku).

PCD05* - Třída s homogenní strukturou obsahující diamantová zrna velká 1 μm určená pro hrubování, frézování a obrábění hliníkových slitin v vysokém obsahu křemíku. Lze použít i při dokončovacím obrábění slitin titanu.

PCD10* - Materiál s velikostí zrna 2 μm určený pro obrábění s požadavkem kvalitního povrchu (vystružování), obrábění kompozitu s uhlíkovými vlákny a vyztužených plastů.

PCD20 – Univerzální materiál s 10 μm velkými diamantovými zrny

PCD30 – Vhodný pro obrábění abrazivních materiálů a pro přerušované řezy. Velikost zrna 25 μm .

PCD30M* - Materiál určený pro obrábění slitin hliníku a šedé litiny s vynikající tepelnou stabilitou. Obsahuje dvě velikosti zrn, 2 a 30 μm .^{62,63}

3.3.2 Doporučené pracovní podmínky materiálů Secomax PCD

Pracovní podmínky materiálů Secomax PCD, které doporučuje výrobce Seco Tools AB pro soustružení jsou shrnuty v tab. 3.7.

Tab. 3.7. Doporučené řezné podmínky pro materiály Secomax PCD ⁶²

Obráběný materiál	Secomax PCD	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
Slitiny hliníku				
Si <8%	PCD20	600-3500	0,1-0,4	0,2-5,0
Si 8-15%	PCD20	450-2500	0,1-0,4	0,2-5,0
Si >15%	PCD30	200-1000	0,1-0,4	0,2-3,0
Plasty a kompozity				
Měkké plasty	PCD20	100-1500	0,1-0,4	0,2-3,0
Vyztužené plasty	PCD20	100-1000	0,1-0,3	0,2-2,0
Skelnými vlákny vyztužené plasty	PCD20	100-800	0,05-0,2	0,2-2,0
Kompozity s uhlíkovými vlákny	PCD20	400-800	0,1-0,2	0,2-3,0
Slitiny mědi				
Měď, mosaz	PCD20	600-1200	0,1-0,5	0,2-3,0
Bronzy	PCD30	150-500	0,05-0,3	0,2-3,0
Keramika				
Surová	PCD20	100-600	0,1-0,2	0,1-2
Vyztužená	PCD30	30-100	0,1-0,2	0,1-2
Ostatní materiály				
Titanové slitiny	PCD20	50-300	0,1-0,2	0,2-0,5

3.3.3 Secomax CBN

Produkty řady Secomax jsou vysoce výkonné řezné nástroje z PKNB. Jsou speciálně vyvinuté pro obrábění kalené oceli, perlitické litiny, tvrdých ocelí a superslitin. Zařazení materiálů dle ISO je na obr. 3.7.

CBN060K – Speciálně navržené pro soustružení kalených ocelí v oblasti uplatnění H10 - H20.

CBN050C – Určený pro vysokorychlostní dokončování kalených ocelí s tvrdostí 45-65 HRC. Je vyvinutý pro rychlosti až 250 m.min⁻¹ a vyniká vysokou produktivitou a trvanlivostí. Vynikající vlastnosti zabezpečují nové patentované povlaky TiN a SiN.

CBN100 - Tento materiál je dodáván pouze v monolitních VBD a je určený pro dokončovací obrábění kalených ocelí s plynulým nebo lehce přerušovaným řezem. Vyrábí se i s geometrií wiper.

CBN160C – Jedná se o nové, jemnozrné, povlakované VBD s nižším obsahem KNB a vysokou houževnatostí pro obrábění kalených ocelí přerušovaným řezem.

CBN170 - Je speciálně navržený pro obrábění superslitin na bázi niklu. Kombinace KNB s keramickým pojivem zabezpečuje vysokou trvanlivost nástroje. Pro dokončování plynulým řezem lze volit řeznou rychlost 300 – 400

m.min-1 a šířku záběru ostří až 0,5 mm. Při obrábění je nutné nástroj chladit. Využití nachází zejména v leteckém průmyslu.^{59,60,63}

CBN200 – Tato třída vyniká svojí tuhostí a odolností proti opotřebení. Jemnozrnná struktura a kovové pojivo zabezpečují jedinečnou kombinaci houževnatosti a kvalitní řezné hrany. Je vhodný pro hrubování i dokončování frézováním a soustružením kalených ocelí a šedé litiny.

CBN300 – Je určený pro obrábění šedé litiny a tyto VBD jsou jediné s pozitivní geometrií. Mají 8 řezných hran a vybroušený jednoduchý utvařecí třísky (obr. 3.8a). Výhodou jsou nižší řezné síly a snížení teploty v místě řezu a tím nižší opotřebení při některých aplikacích.

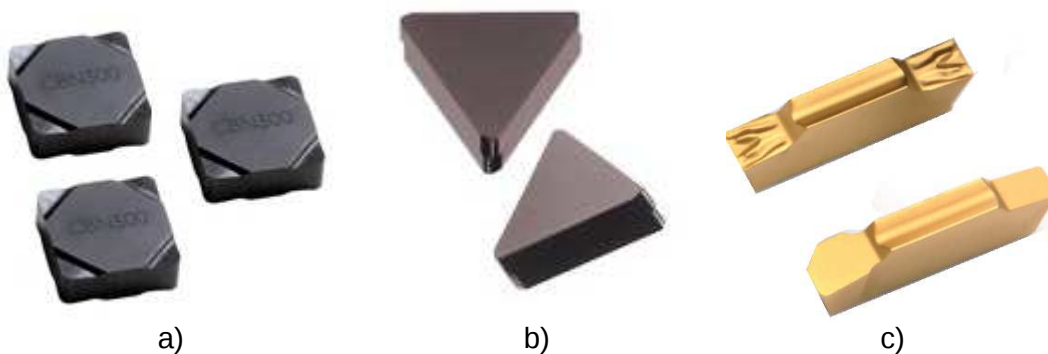
CBN350 – Hlavní oblasti použití této třídy jsou hrubovací operace kalených ocelí. Hrubování a dokončování manganových ocelí a tvrzené a bílé litiny.

CBN400C – Jedná se o doplnění řady CBN300 (vhodný pro hrubování) a je určený pro dokončovací obrábění šedé litiny. Obsah krystalů KNC je 90 obj. % a zrnitost je 3 – 6 µm. VBD se ještě povlakuje (Ti, Si)N pro zvýšení trvanlivosti.

		P					M					K					N					S					H				
	Třídy	P01	P10	P20	P30	P40	P50	M01	M10	M20	M30	M40	K01	K10	K20	K30	K40	N01	N10	N20	N30	S01	S10	S20	S30	H01	H10	H20	H30		
Nepovlakované	CBN100																														
	CBN150																														
	CBN170																														
	CBN200																														
	CBN300																														
	CBN350																														
PVD	CBN050C																														
	CBN060K																														
	CBN160C																														
	CBN300P																														
	CBN400C																														

Obr. 3.7. Oblast použití materiálů z PKNB dle ISO⁶³

Výrobce také nabízí hladicí geometrii wiper (obr. 3.8b), která je dostupná pro řady CBN010, CBN050C, CBN100, CBN160C, CBN300 a CBN400C. Pro zapichování, kopírování, vnitřní obrábění a drážkování nabízí soubor geometrií pod souhrnnou zkratkou MDT (Multi directional turning – obr. 3.8c). K dispozici je ve třídě CBN010 a CBN200.^{59,60,63}



Obr. 3.8. VBD firmy Seco Tools AB (**a** – s vybroušeným utvařecím, **b** – s hladicí geometrií wiper, **c** – MDT pro zápichy)^{59,60}

3.3.4 Doporučené pracovní podmínky materiálů Secomax CBN

Pracovní podmínky materiálů Secomax CBN, které doporučuje výrobce Seco Tools AB pro soustružení jsou shrnuty v tab. 3.8.

Tab. 3.8. Doporučené řezné podmínky pro materiály Secomax CBN ⁶³

Obráběný materiál	Secomax CBN	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
Povrchově kalená ocel (tvrdost 55-62 HRC)				
Dokončování	CBN100	100-200	0-0,20	až 0,5
	CBN050C	140-240	0-0,25	až 0,5
	CBN060K	100-230	0,04-0,25	až 0,5
	CBN150	70-180	0-0,25	až 0,5
	CBN160C	130-220	0-0,25	až 0,5
Kalené oceli (tvrdost 45-65 HRC)				
Dokončování	CBN100	100-180	0-0,15	až 0,5
	CBN050C	140-250	0-0,20	až 0,5
	CBN150	60-150	0-0,20	až 0,5
	CBN160C	130-180	0-0,20	až 0,5
Hrubování	CBN200	50-130	0,05-0,22	0,5-3,0
	CBN300	50-150	0,1-0,30	0,5-3,0
Manganové oceli (12 - 20% Mn)				
Dokončování	CBN300	120-230	0,1-0,6	až 0,5
	CBN350	70-200	0,1-0,6	až 0,5
Hrubování	CBN300	110-190	0,2-0,6	0,5-3,0
	CBN350	80-180	0,2-0,6	0,5-3,0
Perlitická litina				
Dokončování	CBN100	50-200	0,1-0,4	až 0,5
	CBN200	300-1000	0,1-0,5	až 0,5
	CBN300	500-2000	0,1-0,6	až 0,5
	CBN400C	500-2000	0,1-0,6	až 0,5
Hrubování	CBN200	400-1000	0,2-0,8	0,5-3,0
	CBN300	500-1500	0,2-0,8	0,5-3,0
Bílá (tvrzená) litina (tvrdost 570-900 HV)				
Dokončování	CBN200	50-85	0,05-0,4	až 0,5
	CBN300	50-125	0,05-0,4	až 0,5
	CBN350	35-125	0,05-0,4	až 0,5
Hrubování	CBN200	50-85	0,2-1,0	0,5-3,0
	CBN300	50-125	0,2-1,0	0,5-3,0
	CBN350	35-125	0,2-1,0	0,5-3,0
Slinuté karbidy (obsah Co>17%)				
Dokončování	CBN300	10-40	0,05-0,15	až 0,5
Hrubování	CBN300	20-40	0,05-0,25	0,5-3,0
	CBN350	20-40	0,05-0,25	0,5-3,0
Vysoce legované oceli na bázi niklu (např. Inconel 718)				
Dokončování	CBN100	290-400	0,10-0,25	až 0,5
	CBN170	300-420	0,12-0,27	až 0,5

3.4 Sandvik Coromant

Společnost Sandvik Coromant patří mezi největší výrobce nástrojů pro frézování, soustružení a vrtání na světě. Je zastoupena ve více jak 130 zemích světa a má přes 8000 zaměstnanců. Své hlavní sídlo má ve Švédsku. Své zákazníky nachází v celé oblasti zpracování kovů, včetně automobilového a leteckého průmyslu.⁶⁴

3.4.1 Materiály se syntetickým diamantem

CD10 (N01 - N10) – Třída s břitý osazenými polykrystalický diamantem, určená pro dokončování a polodokončování neželezných a nekovových materiálů. Nabízí dobrou kvalitu obrobeného povrchu, dlouhou trvanlivost břitu a čistý řez. Průměrná velikost zrna diamantu je 7 μm .

CD1810 (N01 - N15) – Třída s diamantovým povlakem (velikost zrn od 6 do 8 μm) pro dokončování až hrubování hliníku, hořčíku, mědi, mosazi a plastu. Diamantový povlak zajišťuje skvělou odolnost proti opotřebení, zamezuje tvorbě nárůstku na břitech, což se projevuje vysokou kvalitou obrobeného povrchu.⁶⁵

3.4.2 Doporučené pracovní podmínky materiálů se syntetickým diamantem

Pracovní podmínky materiálů s PCD, které doporučuje výrobce Sandvik Coromant pro soustružení jsou shrnuty v tab. 3.9.

Tab. 3.9. Doporučené řezné podmínky pro materiály se syntetickým diamantem⁶⁵

Obráběný materiál	Třída CD	V_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	f [mm]
Slitiny hliníku			
Tvářené, odlévané	CD10	250-2500	0,05-0,4
	CD1810	250-2500	0,15-0,8
Odlévané 13-15 %Si	CD10	195-1950	0,05-0,4
	CD1810	95-960	0,15-0,8
Odlévané 16-22 %Si	CD10	95-960	0,05-0,4
	CD1810	65-640	0,15-0,8
Měď a slitiny mědi			
>1 %Pb	CD10	65-630	0,05-0,4
	CD1810	65-630	0,15-0,8
Mosaz, olověné bronzy	CD10	65-630	0,05-0,4
	CD1810	65-630	0,15-0,8
Bronzy	CD10	38-375	0,05-0,4
	CD1810	38-375	0,15-0,8

Doporučené hodnoty šířky záběru ostří jsou individuální u každého typu VBD a záleží na velikosti destičky a roubíku.

3.4.3 Materiály s kubickým nitridem boru

CB7015 (H05 – H15) – Třída s nízkým obsahem kubického nitridu boru. První volba pro spojitě a lehce přerušované řezy při obrábění tvrzených ocelí vysokou řeznou rychlostí.

CB7020, CB20 (H10 – H20) – Třída materiálu z KNB a nitridu titanu je určena pro spojitě a lehce přerušované obrábění kalených ocelí.

CB7025 (H10 – H20) – Vysoce výkonná třída se středním obsahem KNB. Je určena pro obrábění tvrzených ocelí plynulým řezem, kde nedílnou součástí jsou náročné přerušení.

CB7035 (H15 – H25) – Třída materiálu se středním obsahem KNB použitelná pro těžce přerušované obrábění cementovaných ocelí.

CB50 (H20 – H30) – Extrémně tvrdý materiál s obsahem KNB. Vysoká houževnatost břitu a dobrá odolnost proti opotřebení předurčuje tento materiál pro přerušované obrábění tvrzených ocelí.

CB7525 (H20 – H30) – Extrémně tvrdá třída na bázi KNB. Je alternativou k třídě **CB50**. Užití pro přerušované řezy tvrzených ocelí.⁶⁵

3.4.4 Doporučené pracovní podmínky materiálů s KNB

Pracovní podmínky materiálů s kubickým nitridem boru, které doporučuje výrobce Sandvik Coromant pro soustružení jsou shrnuty v tab. 3.10.

Tab. 3.10. Doporučené řezné podmínky pro materiály s kubickým nitridem boru⁶⁵

Obráběný materiál	Třída CB	V_c [m.min ⁻¹]	f [mm]
Šedá litina			
HB 180	CB50	1200-1700	0,1-0,4
	CB7252	1200-1700	0,1-0,4
	CB7925	1050-1450	0,1-0,4
HB 220	CB50	1050-1450	0,1-0,4
	CB7252	1050-1450	0,1-0,4
	CB7925	890-1250	0,1-0,4
Kalená ocel			
50–55 HRC	CB7015	185-350	0,05-0,25
	CB7025	155-250	0,05-0,25
	CB20	170-260	0,05-0,25
	CB7035	130-215	0,1-0,4
	CB50/CB7252	110-205	0,1-0,4
60-65 HRC	CB7015	135-250	0,05-0,25
	CB7025	115-185	0,05-0,25
	CB20	125-185	0,05-0,25
	CB7035	95-135	0,1-0,4
	CB50/CB7252	80-145	0,1-0,4
Tvrzená litina			
Odlévaná i vystárnutá	CB50/CB7252	120-180	0,1-0,4
	CB7925	120-180	0,1-0,4

3.5 Kennametal Hertel AG

Americká firma Kennametal se sídlem v Patrone v Pennsylvanii byla založena roku 1938 a dodnes je jedním z předních producentů nástrojů nejen pro obrábění kovů. Působí ve více jak 60 zemích světa s více jak 14 000 zaměstnanci. Hlavní činnost skupiny Kennametal Hertel AG je výroba a prodej vysoce kvalitních řezných nástrojů na evropském trhu pro strojírenství, automobilový a letecký průmysl. Své dceřiné společnosti má v Německu, Francii, Belgii, Itálii, Nizozemsku, Španělsku, Turecku atd. Prodejní kontakt pro Českou republiku je v Říčanech u Prahy.⁶⁷

3.5.1 Materiály se syntetickým diamantem

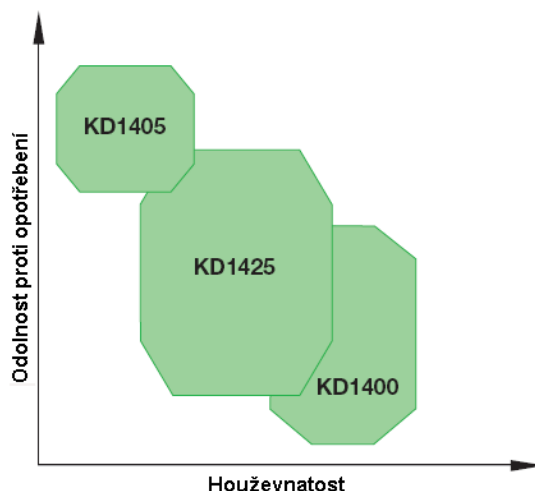
Tyto vysoce odolné materiály proti otěru jsou určeny pro obrábění všech slitin hliníku s malým i vysokým obsahem křemíku, slitin mědi, keramiky a plastů. Je vhodný i pro obrábění vysoce abrazivních materiálů jako je titan. Materiály jsou použitelné v obecném strojírenství, automobilový i letecký průmysl.⁶⁶

KD1400 – Materiál určený jak pro plynulé, tak pro silně přerušené dokončovací řezy, kde je kladen důraz na kvalitu povrchu. Je ideální pro vysokorychlostní dokončovací obrábění. Obsahuje velice homogenní strukturu 1 μm velkých diamantových zrn.

KD1405 – Diamantový povlak nanesený metodou CVD na karbidovém podkladu je určen pro plynulý až středně přerušovaný řez. Materiál vyniká vysokou odolností proti opotřebení.

KD1425 – Univerzální třída pro obecné obrábění. Lze obrábět i středně přerušovanými řezy a vyniká vysokou odolností proti opotřebení. Obsahuje diamantová zrna velikosti 2 až 30 μm .⁶⁶

Tyto řady materiálů nahrazují starší typy **KD100** a **KD108** a jejich odolnost proti opotřebení a houževnatost je vzájemně porovnaná na obr. 3.9.



Obr. 3.9. Vzájemné porovnání odolnosti proti opotřebení a houževnatosti materiálů se syntetickým diamantem⁶⁶

3.5.2 Doporučené pracovní podmínky materiálů se syntetickým diamantem

Pracovní podmínky materiálů se syntetickým diamantem, které doporučuje výrobce Kennametal Hertel AG pro soustružení jsou shrnuty v tab. 3.11.

Tab. 3.11. Doporučené řezné podmínky pro materiály se syntetickým diamantem ⁶⁶

Obráběný materiál	Stupeň PKD	V_c [m.min ⁻¹]
Slitiny hliníku a křemíku		
(<12,2 %Si)	KD1400	400-1250
(>12,2 %Si)	KD1405	400-1100
	KD1425	300-900
Měď, mosaz, zinek		
Měď, mosaz, zinek	KD1400	300-1000
	KD1405	300-1000
	KD1425	250-900
Nylon, plasty, pryskyřice, guma, sklo		
Nylon, plasty, pryskyřice, guma, sklo	KD1400	150-750
	KD1405	150-750
	KD1425	100-650

3.5.3 Materiály s kubickým nitridem boru

Jedná se o materiály pro obrábění součástí z tvrdých materiálů. Umožňují vyšší produktivitu práce (vyšší řezné rychlosti, posuvy a delší trvanlivost nástroje). Jejich použití je možné pro plynulé i silně přerušované řezy. VBD jsou dostupné i v provedení wiper.

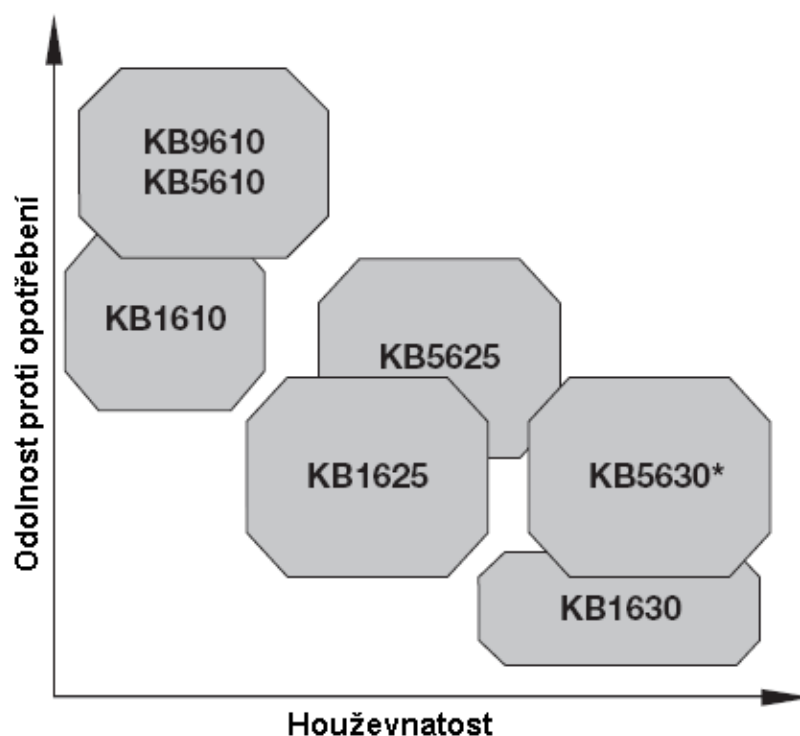
Materiály s označením KB1... nejsou povlakované, využívají se pro obrábění s požadavkem na vynikající kvalitu povrchu a mají ostřejší řeznou hranu. Materiály označené KB5... jsou povlakované metodou PVD pro zvýšení trvanlivosti nástroje a označení KB9... charakterizuje prvky povlakované metodou CVD určené pro vysokorychlostní obrábění. ⁶⁶

KB1610, KB5610, KB9610 – Stupně s nižším obsahem KNB určené pro plynulé soustružení. Extrémní odolnost a vynikající řezná hrana předurčuje tyto třídy pro vysokorychlostní dokončovací operace.

KB1625, KB5625 – Třídy materiálu se středním obsahem KNB vhodné pro široké spektrum aplikací.

KB1630, KB5630 – Materiály s vysokým obsahem KNB jsou určené pro těžké podmínky se silně přerušovanými řezy. Vyniká výbornou odolností proti otěru a stabilní trvanlivostí. ⁶⁶

KB9640 – Nová inovativní povlakovaná třída (CVD TiN), která nabízí vyšší trvanlivost zejména při obrábění tvrzených litin a ocelí a také šedé litiny. Je určena pro hrubovací operace. ⁶⁹



Obr. 3.10. Vzájemné porovnání odolnosti proti opotřebení a houževnatosti materiálů s kubickým nitridem boru⁶⁶

Tyto nové materiály nahrazují starší třídy **KB050** a **KB081** a jejich vzájemné porovnání odolnosti proti opotřebení a houževnatosti je na obr. 3.10. Třídy **KB5610** a **KB5625** byly inovovány a doplněny jednoduchým utvařečem pro lepší odvod třísek (obr. 3.11.) a tím snížení počtu zmetků v důsledku poškrábání obrobeného povrchu odcházejícími třískami.⁶⁸



Obr. 3.11. VBD s roubíky z PKNB a jednoduchým utvařečem třísky výrobce Kennametal Hertel AG⁶⁸

3.5.4 Doporučené pracovní podmínky materiálů s KNB

Pracovní podmínky materiálů s kubickým nitridem boru, které doporučuje výrobce Kennametal Hertel AG pro soustružení jsou shrnuty v tab. 3.12.

Tab. 3.12. Doporučené řezné podmínky pro materiály s kubickým nitridem boru ^{66,68,69}

Obráběný materiál	Stupeň PKNB	v_c [m.min ⁻¹]	Druh operace
Kalené oceli a tvrzené litiny			
48-65 HRC (450-750 HB)	KB1610	50-200	Jemné dokončování
	KB1625	50-170	Dokončování
	KB1630	45-150	Polohrubování
	KB5610	75-230	Jemné dokončování
	KB5625	55-200	Dokončování
	KB5630	50-190	Polohrubování
	KB9610	90-260	Jemné dokončování
	KB9640	30-210	Hrubování, polohrubování
Šedá a tvárná litina			
Šedá litina	KB9640	300-1000	Dle charakteru řezu
Tvárná litina	KB9640	220-900	Dle charakteru řezu

3.6 Vzájemné porovnání materiálů vybraných výrobců

Jelikož má každý výrobce jiné značení řezných materiálů, budou v této kapitole porovnány z hlediska jejich použití a řezných podmínek. Rozhodujícím faktorem pro porovnání je řezná rychlost, kterou doporučují jednotliví výrobci supertvrdých řezných materiálů. Porovnání materiálů s PKD je v tabulce 3.13 a PKNB je v tabulce 3.14.

Obr. 3.13 Porovnání doporučených řezných rychlostí různých výrobců PCD

Obráběný materiál	v_c [m.min ⁻¹]	Výrobce a označení materiálu
Slitiny Al (nízký obsah Si)	600-3500	General Electric – 1300, 1500, 1800
	300-1000	De Beers - Syndite
	450-3500	Seco – PCD20
	250-2500	Sandvik Coromant – CD10, CD1810
	400-1250	Kennametal – KD1400
Slitiny Al (vysoký obsah Si)	300-700	General Electric – 1300, 1500, 1800
	300-1000	De Beers - Syndite
	200-1000	Seco – PCD30
	65-960	Sandvik Coromant – CD10, CD1810
	300-1100	Kennametal – KD 1405, KD1425
Slitiny mědi, mosaz, bronz	400-1200	General Electric – 1300, 1600, 1800
	300-1000	De Beers - Syndite
	150-1200	Seco – PCD20, PCD30
	65-630	Sandvik Coromant – CD10, CD1810
	250-1000	Kennametal – KD1400, KD1405, KD1425
Karbíd wolframu (<16% Co)	20-200	General Electric – 1300, 1500, 1800
	10-30	De Beers - Syndite

Obr. 3.13 Porovnání doporučených řezných rychlostí různých výrobců PCD

Obráběný materiál	v_c [m.min ⁻¹]	Výrobce a označení materiálu
Keramika	50-200	General Electric – 1300, 1500, 1800
	100-600	De Beers - Syndite
	30-600	Seco – PCD20, PCD30
Sklolaminát	200-1000	General Electric – 1300, 1600
	100-600	De Beers - Syndite
	100-800	Seco – PCD20
	100-750	Kennametal – KD1400, KD1405, KD1425
Uhlíkový kompozit	300-1000	General Electric – 1800
	100-600	De Beers - Syndite
	400-800	Seco – PCD20
Vyztužené plasty	50-150	De Beers - Syndite
	100-1000	Seco – PCD20

Obr. 3.14 Porovnání doporučených řezných rychlostí různých výrobců PKNB

Obráběný materiál	v_c [m.min ⁻¹]	Výrobce a označení materiálu
Kalené oceli	65-250	General Electric – 7000S, 8200, HTC2000, HTM2100
	60-200	De Beers - Syndite
	50-250	Seco – CBN100, CBN050C, CBN150 CBN160C, CBN200, CBN300
	80-260	Sandvik Coromant – CB7025, CB20, CB7035, CB7252, CB50
	45-260	Kennametal – KB1610, KB1625, KB1630, KB5610, KB5625, KB5630, KB9610, KB9640
Šedé litiny	600-1500	General Electric – 6000, 7000S, 9100
	400-2500	De Beers - Syndite
	300-2000	Seco – CBN200, CBN300, CBN400C
	890-1700	Sandvik Coromant – CB50, CB7225, CB7925
	300-1000	Kennametal – KB9640
Tvrzené litiny	40-100	General Electric – 7000S,
	50-200	De Beers - Syndite
	35-125	Seco – CBN200, CBN300, CBN350
	120-180	Sandvik Coromant – CB7925, CB7252, CB50
Litiny vyrobené práškovou metalurgií	60-200	General Electric – 6000, 7000S, 9000, 9100
Nástrojové oceli a oceli pro zápustky	80-140	General Electric – 6000, 8200, 9100, HTC2000, HTM2100
	70-230	Seco – CBN300, CBN350
Superslitiny	150-250	General Electric – 6000
	290-420	Seco – CBN100, CBN170

Volba řezné rychlosti a dalších řezných podmínek (posuvu a šířky záběru ostří) závisí také na charakteru řezu. Zda je obrábění plynulé nebo přerušované, zda se jedná o hrubování nebo dokončování a zda je použita procesní kapalina či nikoliv.

Závěr

Diplomová práce se zabývá supertvrdými řeznými materiály, mezi které se řadí technické materiály na bázi polykrystalického diamantu a polykrystalického kubického nitridu boru. Tyto materiály popisuje z hlediska fyzikálních a mechanických vlastností, zabývá se výrobou i efektivním využitím a hodnotí výrobní sortiment předních světových výrobců a jejich doporučené řezné podmínky.

Tyto specifické materiály se v praxi využívají v mnoha odvětvích a modifikacích, tato práce popisuje jejich využití v oblasti řezných nástrojů pro obrábění. Hlavní využití PKBN je při obrábění tvrdých a abrazivních materiálů a PCD při obrábění neželezných slitin, plastů, pryže, dřeva, skla atd. Hlavní uplatnění nachází v leteckém a automobilovém průmyslu.

V praktické části této práce je zhodnocen sortiment supertvrdých řezných materiálů světových výrobců: General Electric, De Beers, Seco Tools, Sandvik Coromant a Kennametal Hertel. Zabývá složením a použitím konkrétních materiálů pro různé obráběné materiály a řezné podmínky. Udávané pracovní podmínky jednotlivých výrobců jsou v určitém rozmezí a při volbě těchto podmínek je důležité uvažovat, zda se jedná o dokončovací obrábění, hrubování, plynulý nebo přerušovaný řez, zda je použita procesní kapalina a je-li průřez třísky konstantní či proměnlivý. Toto je jeden z důvodů, proč se liší doporučené pracovní podmínky jednotlivých výrobců.

Při porovnání doporučených řezných rychlostí lze usoudit, že nejsou mezi výrobci velké rozdíly a z doporučených rozsahů pracovních podmínek je nutné zvolit ty optimální, pro dosažení efektivního využití. Pro objektivní posouzení řezných materiálů by bylo nutné praktických zkoušek konkrétních aplikací různými doporučenými materiály a výsledky porovnat. To ovšem není rozsahem této práce.

Ačkoliv supertvrde řezné materiály zaujímají na trhu s nástroji pouze malou část (cca 4 %), mají své pevné místo a neustále se tyto materiály zlepšují. Současné vývojové trendy se zabývají povlakováním supertvrdými materiály, geometrií bříty, výrobou a tvarem utvařečů třísek. Díky většímu tlaku na ochranu životního prostředí je vývoj směřován k suchému obrábění a tomuto trendu se přizpůsobují i supertvrde řezné materiály.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha. Scientia, s. r. o., 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook.
2. BROOKES, K.J.A. *Hardmetals and other Hard Materials*. Second Edition. Shrewsbury, England. European Powder Metallurgy Association, 1992. ISBN 0 9508995 3 4.
3. BROOKES, K.J.A. *World Directory and Handbook of Hardmetals and Hard materials*. Sixth Edition. United Kingdom. East Barnet Hertfordshire, International Carbide Data, 1996. ISBN 0 9508995 4 2.
4. ČSN-ISO 3685. *Zkoušky trvanlivosti při soustružení jednobřitým nástrojem*. Praha. Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993.
5. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha. MM publishing s. r.o., 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
6. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. [online]. Studijní opory. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2006. [vid. 5. ledna 2011]. Dostupné z: [www:http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v_2.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v_2.pdf).
7. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. *Materiály pro řezné nástroje*. MM Průmyslové spektrum – Speciální vydání. Zář 2004. s. 84-96. ISSN 1212-2572.
8. KOČMAN, K. *Speciální technologie obrábění*. Druhé přepracované a doplněné vydání. Brno. PC-DIR Real, s.r.o. 1998. ISBN 80-214-1187-2.
9. FLICKR. [online]. [vid. 5. ledna 2011]. Dostupné z: <http://www.flickr.com/photos/hphtdme/3098638244/>.
10. DIAMONDS INTERNATIONAL CORPORATION. *Vznik diamantů*. [online]. [vid. 5. ledna 2011]. Dostupné z: <http://dicholding.com/cz/diamant/obecne-informace>.
11. DIAMONDS INTERNATIONAL CORPORATION. *Naleziště diamantů*. [online]. [vid. 5. ledna 2011]. Dostupné z: <http://dicholding.com/cz/diamant/obecne-informace/naleziste-diamantu>.
12. BARÁNEK, I. *Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie*. 1. vyd. Trenčín. TnUAD, 2004. ISBN 80-8075-013-0.
13. WIKIPEDIA – otevřená encyklopedie. [online]. [vid. 5. ledna 2011]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Mohsova_stupnice_tvrlosti.
14. FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno. Akademické nakladatelství CERM, s. r. o. 2006. ISBN 80-214-2374-9.
15. MITROWSKY DIAMONDS. [online]. [vid. 18. ledna 2011]. Dostupné z: <http://www.diamonds.cz/Gemologie.html>.
16. THE WORLD OF FAMOUS DIAMONDS. [online]. [vid. 18. ledna 2011]. Dostupné z: <http://famousdiamonds.tripod.com/cullinandiamonds.html>.

17. THE JEWELRY BLOG. [online]. [vid. 27. ledna 2011]. Dostupné z: <http://www.jewelrybloguncovered.com/diamonds/the-cullinan-ii/>.
18. GOOGLE MAPS. [online]. [vid. 27. ledna 2011]. Dostupné z: <http://maps.google.cz/>.
19. INFO DIAMOND. *Diamond geology*. [online]. [vid. 30. ledna 2011]. Dostupné z: <http://www.info-diamond.com/rough/geology.html>.
20. IOP SCIENCE. [online]. [vid. 30. ledna 2011]. Dostupné z: http://iopscience.iop.org/0256-07X/26/4/048102/pdf/cpl9_04_048102.pdf.
21. YARNEL, Amanda. The many facets of man-made diamonds. *Chemical and engenering news*. 2004. [online]. [vid. 30. ledna 2011]. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8205/8205diamonds.html>.
22. ORDONIO, Mark Angelo. *Syntetic diamonds: Synthesis, properties, and aplications*. [online]. [vid. 4. února 2011]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/38744929/Synthetic-Diamonds-Synthesis-Properties-and-Applications>.
23. PILGRIM GRAY. *Synthetic Diamonds: How are synthetic diamonds made*. [online]. [vid. 10. února 2011]. Dostupné z: <http://www.buzzle.com/articles/synthetic-diamonds-how-are-synthetic-diamonds-made.html>.
24. IOP SCIENCE. [online]. [vid. 14. února 2011]. Dostupné z: http://iopscience.iop.org/0256-307X/26/4/048102/pdf/cpl9_04_048102.pdf.
25. DENKA – ELEKTRONIC MATERIALS DIVISION. [online]. [vid. 14. února 2011]. Dostupné z: <http://www.denka.co.jp/eng/denzai/product/17.html>.
26. MITSUBISHI CARBIDE, Japonsko. *CBN gradeMB8025*. [online]. [vid. 18. února 2011]. Dostupné z: http://www.mitsubishicarbide.com/mmus/catalog/pdf/lj/lj400a_200204.pdf.
27. LEICHTFRIED, G., SAUTHOFF, G., SPRIGGS, G. E. *Powder Metallurgy Data. Refractory, Hard and Intermetallic Materials*. [online]. [vid. 22. února 2011]. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/content/k4620423628m6284/>.
28. HUMÁR, Anton. *Technologie I- Technologie obrábění – 3. část*. [online]. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2003 [vid. 22. února 2011]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/TI_TO-1cast.pdf.
29. ŠVARAL, Š. *Obrábanie nástrojmi z diamantu a kubického nitridu bóru*. 1.vyd. Bratislava: Alfa, 1977. 240 s.
30. WIKIPEDIA – otevřená encyklopedie. [online]. [vid. 3. března 2011]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Kimberlite_picture.jpg.
31. MOLLÍKOVÁ, Eva. *Zkouška tvrdosti podle Vickerse*. [online]. Studijní opora pro bakalářský a magisterský studijní program. Brno: VUT-FSI, Ústav materiálových věd a inženýrství. [vid. 20. března 2011]. Dostupné

z:

<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/zkouska%20tvrlosti%20podle%20vickerse.doc>.

32. SANDVIK COROMANT AB, Sandviken, Sweden. *Advanced cutting materials – ceramic and CBN*. [online]. [vid. 23. března 2011]. Dostupné z: https://www.coromant.sandvik.com/sandvik/0110/Internet/I-Kit1/se02673.nsf/Alldocs/Inserts*2AAdvanced*cutting*materials.
33. SANDVIK COROMANT AB, Sandviken, Sweden. *Cubic boron nitride CB7015 grade*. [online]. [vid. 28. března 2011]. Dostupné z: http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/Supplement_20051/Page44_45.pdf.
34. HENRY, Stewen W.. *Instrumentation for tool wear evaluation*. Diplomová práce v oboru Stroní inženýrství. The Pennsylvania state university. 2002. 85 s. [online]. [vid. 1. dubna 2011]. Dostupné z: <http://mdrl.mne.psu.edu/theses/swhdoc.pdf>.
35. DTS GmbH, Kaiserslautern, Germany. *PKD CVD katalog*. [online]. [vid. 1. dubna 2011]. Dostupné z: http://diamond-toolingsystems.com/fileadmin/content/produkte/pdf/PKD_CVD_Katalog.pdf.
36. KENNEY INDUSTRIAL TOOL COMPANY, California, USA. [online]. [vid. 1. dubna 2011]. Dostupné z: <http://www.pcd-tools.com/>.
37. FERRO, Sergio. Synthesis of diamond. *Journal of chemistry Materials feature article*. 2002. **12**, s. 2843-2855.
38. CHOU, Kevin, JIE, Liu. CVD diamond tool performance in metal matrix composite machining. *Surface&coatings technology*. 2005. **200**, s. 1872-1878. ISSN 0257-8972.
39. SLIDEFINDER, Stockholm, Swened. *Thing film coating systém*. [online]. [vid. 2. dubna 2011]. Dostupné z: <http://www.slidefinder.net/c/coat/13755302>.
40. RAN, Lv, JIN, Liu, a spol.. High pressure sintering of CBN compacts with Al and AlN. *Diamond and related materials*. 2008. **17**, s. 2062-2066. ISSN 0925-9635.
41. ANGSERYD, J., ELFWING, M., a spol.. Detailed microstruture of a cbn based cutting material. *International Journal of Refractory Metals&Hard Materials*. 2009. **27**, s. 249-255. ISSN 0263-4368.
42. UHLMANN, Eckart, a spol.. *CBN coatings and cutting tools*. [online]. [vid. 14. dubna 2011]. Dostupné z: http://www.iwf.tu-berlin.de/fileadmin/fg199/Hartspan-Projekt/NEWS/CBN_Coating.pdf.
43. CHONG, Y.M., a spol.. Growing cubic boron nitrid films at different temperatures. *Diamond and related materials*. 2006. **15**, s. 1155-1160. ISSN 0925-9635.

44. UHLMANN, E., OAYENEDEL FUENTES, J.A., KEUNECKE, M. Machining of high performance workpiece materials with CBN coating cutting tools. *Thin Solid Films*. 2009. s. 1451-1454. ISSN 0040-6090.
45. ČEP, Robert. *Technologie II – 1. díl*. [online]. Interaktivní multimediální text. Ostrava: VSB-FS, Katedra obrábění a montáže. [vid. 2. května 2011]. Dostupné z: http://home1.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf.
46. DIAMOND INOVATIONS, Worthington, USA. *Compax diamond*. [online]. [vid. 9. května 2011]. Dostupné z: <http://www.abrasivesnet.com/en/product/mbs/compax/down/DI%20Compax.pdf>.
47. DIAMOND INOVATIONS, Worthington, USA. *BZN Copmax*. [online]. [vid. 9. května 2011]. Dostupné z: <http://www.abrasivesnet.com/en/product/mbs/bzn/down/DI%20BZN%20AII%20Products.pdf>.
48. DIAMOND INOVATIONS, Worthington, USA. [online]. [vid. 9. května 2011]. Dostupné z: <http://www.abrasivesnet.com/en/contact/aboutus/>.
49. DE BEERS, Johannesburg, Jihoafrická republika. [online]. [vid. 9. května 2011]. Dostupné z: <http://www.debeersgroup.com/en/Inside-De-Beers/What-is-De-Beers/>.
50. DE BEERS, Johannesburg, Jihoafrická republika. [online]. [vid. 9. května 2011]. Dostupné z: <http://www.debeersgroup.com/en/Inside-De-Beers/Family-of-Companies/Element-Six/>.
51. DE BEERS, Johannesburg, Jihoafrická republika. *PCD Metalworking*. [online]. [vid. 9. května 2011]. Dostupné z: <http://www.e6.com/en/businessareas/e6advancedmaterials/products/title,305,en.html>.
52. DE BEERS, Johannesburg, Jihoafrická republika. *PCD Woodworking*. [online]. [vid. 9. května 2011]. Dostupné z: <http://www.e6.com/en/businessareas/e6advancedmaterials/products/title,302,en.html>.
53. ELEMENT SIX Ltd., Shannon Airport, Co. Clare, Ireland. *Syndite*. [online]. [vid. 9. května 2011]. Dostupné z: http://www.e6.com/en/resources/advancedmaterials/literature/productsheets/pcdwoodworking/5.1.4_en.pdf.
54. ELEMENT SIX Ltd., Shannon Airport, Co. Clare, Ireland. *Cutting tool materials*. [online]. [vid. 9. května 2011]. Dostupné z: <http://www.e6.com/en/businessareas/e6advancedmaterials/literature/iNTRODUCTION%20TO%20CUTTING%20TOOL%20MATERIALS.pdf>.
55. DE BEERS, Johannesburg, Jihoafrická republika. *PCBN Metalworking*. [online]. [vid. 9. května 2011]. Dostupné z: <http://www.e6.com/en/businessareas/e6advancedmaterials/products/title,318,en.html>.

56. ELEMENT SIX Ltd., Shannon Airport, Co. Clare, Ireland. *Amborite*. [online]. [vid. 9. května 2011]. Dostupné z: <http://www.e6.com/en/resources/literatureannouncementsheets/pcbnmetalworking/dbw.pdf>.
57. ELEMENT SIX Ltd., Shannon Airport, Co. Clare, Ireland. *Amborite*. [online]. [vid. 9. května 2011]. Dostupné z: [http://www.e6.com/en/media/e6/content/pdf/DCC500%20-%20\(Polycrystalline%20Cubic%20Boron%20Nitride\).pdf](http://www.e6.com/en/media/e6/content/pdf/DCC500%20-%20(Polycrystalline%20Cubic%20Boron%20Nitride).pdf).
58. DE BEERS, Johannesburg, Jihoafrická republika. [online]. [vid. 9. května 2011]. Dostupné z: <http://www.e6.com/en/businessareas/e6advancedmaterials/products/title,329,en.html>.
59. SECO TOOLS AB, Fagersta, Sweden. [online]. [vid. 12. května 2011]. Dostupné z: <http://www.secotools.com/en/Global/Products/Advanced-cutting-materials/PCBN/>.
60. SECO TOOLS AB, Fagersta, Sweden. *Secomax PCBN*. [online]. [vid. 12. května 2011]. Dostupné z: http://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Advanced_cutting_materials/gb_cbn_chs_broschyr_lr.pdf.
61. SECO TOOLS AB, Fagersta, Sweden. [online]. [vid. 12. května 2011]. Dostupné z: <http://www.secotools.com/cs/CZ-Czech-Republic/Kontakt/>.
62. SECO TOOLS AB, Fagersta, Sweden. *Secomax PCD*. [online]. [vid. 12. května 2011]. Dostupné z: http://www.secotools.com/CorpWeb/singapore/pdf/GB_Secomax_PCD_LR.pdf.
63. SECO TOOLS AB, Fagersta, Sweden. *Update 2010* [online]. [vid. 12. května 2011]. Dostupné z: http://www.secotools.com/CorpWeb/Service_Support/machining_navigator/2010/update_2010/Update_2010_Complete_CZ.pdf.
64. SANDVIK COROMANT AB, Sandviken, Sweden. [online]. [vid. 16. května 2011]. Dostupné z: <http://www.coromant.sandvik.com/cz>.
65. SANDVIK COROMANT AB, Sandviken, Sweden. *Main katalog – turning*. [online]. [vid. 16. května 2011]. Dostupné z: http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/catalogue/CZE/TUR_A.pdf.
66. KENNAMETAL Inc., Latrobe, Pennsylvania, USA. *Kennametal's new advanced material portfolio – turning*. [online]. [vid. 20. května 2011]. Dostupné z: http://www.kennametal.com/images/repositories/PDFs/A-08-01324_Advanced_Materials_portfolio_sec.pdf.
67. KENNAMETAL Inc., Latrobe, Pennsylvania, USA. [online]. [vid. 20. května 2011]. Dostupné z: http://www.kennametal.com/en-US/home.jhtml?_requestid=44130.

68. KENNAMETAL Inc., Latrobe, Pennsylvania, USA. *Innovations cutting tools 2011*. [online]. [vid. 21. května 2011]. Dostupné z: http://www.kennametal.com/images/repositories/PDFs/A-10-02469_Innovations2012_metric_complete.pdf.
69. KENNAMETAL Inc., Latrobe, Pennsylvania, USA. *Grade KB9640*. [online]. [vid. 21. května 2011]. Dostupné z: http://www.kennametal.com/images/pdf/US/KMTL-grade_kb9640.pdf.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
HPHT	-	High Pressure High Temperature (metoda výroby za vysokého tlaku a vysoké teploty)
PVD	-	Physical Vapour Deposition (fyzikální metoda nanášení povlaku)
C_T	[-]	Konstanta v $T-v_c$ závislosti
C_v	[-]	Konstanta v $T-v_c$ závislosti
CVD	-	Chemical Vapour Deposition (chemická Metoda nanášení povlaku)
PA-CVD	-	Plasma Assisted (Plazmou aktivované)
MW-CVD	-	Microwave (mikrovlnami)
ECR-CVD	-	Elektron Cyclotron resonance (elektronová resonance)
RF-CVD	-	Radio Frequency (rádiové frekvence)
HF-CVD	-	Heated Filament (horkým vláknem)
F	[N]	Síla
HSS	-	High Speed Steel (rychlořezná ocel)
HRC	[MPa]	Tvrdost podle Rockvella
HV	[MPa]	Tvrdost podle Vickerse
KNB	-	Kubický nitrid boru
PKNB	-	Polykrystalický kubický nitrid boru
PKD	-	Polykrystalický diamant
SK	-	Slinutý karbid
v_c	[m.min ⁻¹]	Řezná rychlost
a_p	[mm]	Šířka záběru ostří
f	[mm]	Posuv na otáčku
T	[°C]	Teplota
T	[min]	Trvanlivost
p	[MPa]	Tlak
m	[-]	Exponent v $T-v_c$ závislosti
x_v	[-]	Exponent vyjadřující vliv hloubky řezu
y_v	[-]	Exponent vyjadřující vliv posuvu na otáčku
VB	[mm]	Opotřebení na hřbetě
KT	[mm]	Hloubka žlábků (opotřebení)
t	[min]	Čas
σ_p	[MPa]	Mez pevnosti
d	[mm]	Průměr kružnice
l	[mm]	Délka
WC	-	Karbid wolframu
TiC	-	Karbid titanu
α	[°]	Úhel
κ	[°]	Úhel