

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Bakalářská práce

Perspektivní nástrojové materiály pro třískové obrábění

Perspective tool materials for machining

Tomáš Grznárik

Praha 2022

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Grznárik** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **491493**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Perspektivní nástrojové materiály pro třískové obrábění

Název bakalářské práce anglicky:

Perspective tool materials for machining

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky
2. Nástroje a technologické možnosti
3. Řezné podmínky a dosahované parametry

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vítězslav Rázek, CSc. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **16.03.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny zdroje v seznamu použité literatury.

V Praze dne:

.....

Tomáš Grznárik

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o nástrojových materiálech pro třískové obrábění (soustružení), jejich vlastnostech a rozsahu použití. Dále se zabývá především obráběním těžkoobrobitelných materiálů, řeznými podmínkami, způsoby opotřebení a porovnáním některých důležitých parametrů, jakými jsou například produktivita a životnost nástroje.

Klíčová slova

Nástrojové materiály, slinutý karbid, řezná keramika, cermet, kubický nitrid boru, polykrystalický diamant, PVD, CVD, nástrojové povlaky, životnost nástroje, řezné podmínky

Abstract

This bachelor thesis is about tool materials for machining (turning), their properties and scope of application. It also deals especially with machining of hard-to-machine materials, cutting conditions, wear mechanisms and comparison of some major parameters such as productivity and tool life.

Keywords

Tool materials, cemented carbide, cutting ceramics, cermet, cubic boron nitride, polycrystalline diamond, PVD, CVD, tool coatings, tool life, cutting conditions

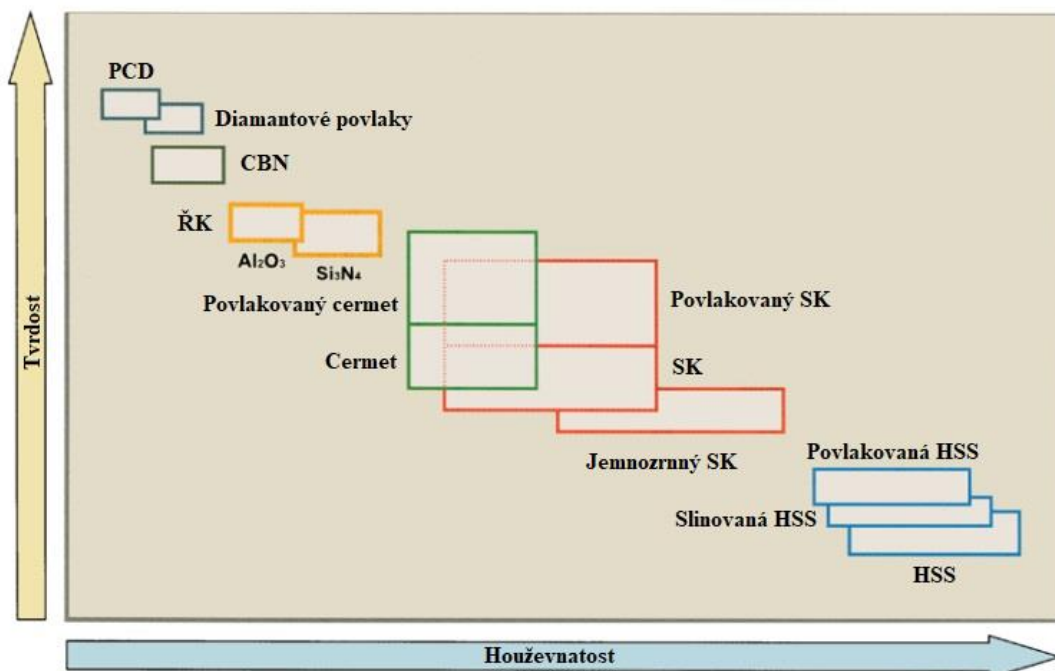
Obsah

Úvod.....	7
1. Slinuté karbidy (SK)	8
1.1. Výroba	8
1.2. Slinutý karbid WC-Co (typ K).....	12
1.2.1. Vlastnosti.....	12
1.2.2. Rozsah použití	14
1.2.3. Řezné podmínky.....	14
1.3. Slinutý karbid WC-TiC-Co (typ P).....	15
1.3.1. Vlastnosti.....	15
1.3.2. Rozsah použití	16
1.4. Slinutý karbid WC-TiC-TaC/NbC-Co (typ M).....	16
1.4.1. Vlastnosti.....	16
1.4.2. Rozsah použití	16
2. Řezná keramika (ŘK)	17
2.1. Výroba	17
2.2. Oxid hlinitý (Al_2O_3)	17
2.2.1. Vlastnosti.....	17
2.3. Oxid zirkoničitý (ZrO_2)	18
2.3.1. Vlastnosti.....	18
2.4. Karbid křemíku (SiC).....	19
2.4.1. Vlastnosti.....	19
2.5. Nitrid křemičitý (Si_3N_4)	19
2.5.1. Vlastnosti.....	19
2.6. Základní druhy řezných keramických materiálů	21
2.6.1. Oxidová keramika	21
2.6.2. Nitridová (neoxidová) keramika.....	21
2.6.3. Sialonová keramika	21
2.6.4. Vyztužené keramiky	21
2.7. Rozsah použití	22
2.8. Řezné podmínky.....	22
3. Cermety.....	26
3.1. Výroba	26
3.2. Vlastnosti	26
3.3. Rozsah použití	26

3.4. Řezné podmínky.....	27
4. Povlaky	29
4.1. Způsoby povlakování.....	29
4.1.1. Metoda PVD (Physical Vapour Deposition).....	29
4.1.2. Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition).....	30
4.2. Vlastnosti vybraných povlaků	30
4.2.1. TiC.....	30
4.2.2. TiCN	31
4.2.3. Al ₂ O ₃	31
4.2.4. TiN	31
4.2.5. TiAlN	31
4.2.6. TiAlSiN	32
4.2.7. AlCrN	32
4.2.8. ZrN.....	33
4.2.9. DLC (Diamond-Like Carbon).....	33
4.2.10. Diamantové povlaky	34
4.2.11. CBN povlaky	34
4.2.12. Vícevrstvé povlaky	34
4.2.13. Lubrikační povlaky.....	35
4.3. Řezné podmínky.....	35
5. Polykrystalický kubický nitrid boru (CBN)	37
5.1. Výroba.....	37
5.2. Vlastnosti	37
5.3. Rozsah použití	38
5.4. Řezné podmínky.....	38
6. Polykrystalický diamant (PCD)	41
6.1. Výroba.....	41
6.2. Vlastnosti	41
6.3. Rozsah použití	42
6.4. Řezné podmínky.....	42
Závěr	45
Seznam použité literatury.....	46

Úvod

Vývoj všech moderních nástrojových materiálů proběhl ve 20. století. Hlavním hnacím ústrojím vývoje byl především velký pokrok v technice, vývoj lepších konstrukčních materiálů a také postupně se zvětšující požadavky na přesnost a kvalitu obráběných součástí. S tímto pokrokem se samozřejmě musely vyvíjet i nástrojové materiály, jelikož samotná rychlořezná ocel (HSS) přestala být dostačující. Nástupcem se tedy stal na delší dobu slinutý karbid (SK), poté řezná keramika (ŘK), cermety, polykrystalický diamant (PCD) a kubický nitrid boru (CBN). Nejrozšířenějšími řeznými materiály jsou díky svým univerzálním vlastnostem SK, které jsou díky moderním povlakům použitelné pro obrábění prakticky všech kovových materiálů. ŘK nachází uplatnění především na obrábění velmi špatně obrobitelných žárovzdorných slitin nebo litin. Cermety nacházejí dobré uplatnění pro dokončovací operace při obrábění všech druhů ocelí (nekalených). PCD vyniká díky své vysoké tvrdosti a velmi nízkému koeficientu tření při obrábění neželezných materiálů a jejich slitin. V neposlední řadě je nutno zmínit CBN, který se dá použít na obrábění materiálů s tvrdostí nad 45 HRC. Porovnání těchto materiálů z hlediska houževnatosti a tvrdosti viz obrázek 1. [1, 2, 3]



Obrázek 1 – Porovnání vlastností všech řezných materiálů [3]

1. Slinuté karbidy (SK)

První výroba karbidů, používaných ve strojírenství, započala vynalezením elektrické pece. V roce 1891 přišel americký vědec E. G. Acheson s karbidem křemíku vyrobeným pomocí el. oblouku mezi uhlíkovými elektrodami. Ten se po spojení s porcelánem používal k broušení, avšak pro obráběcí řezné nástroje nebyl použitelný. Ve 20. letech 20. století byla posunuta použitelnost tohoto karbidu německým vynálezcem K. Schröterem, který zahřátím prášku wolframu a uhlíku vytvořil WC v podobě prášku o velikosti zrn v řádu pár mikrometrů a tento prášek smíchal s malým množstvím železa, niklu a kobaltu. Vyvíjení slinutých karbidů a jejich použití při obrábění přineslo velký posun ve strojírenské výrobě, týkající se především zvýšení řezných rychlostí oproti rychlořezné oceli (dále už jen HSS) a tím rapidní zkrácení výrobních časů. S postupem času až do dnešní doby slinuté karbidy víceméně vytlačily HSS a staly se tak nejvíce používaným materiálem pro obrábění. [1]

1.1. Výroba

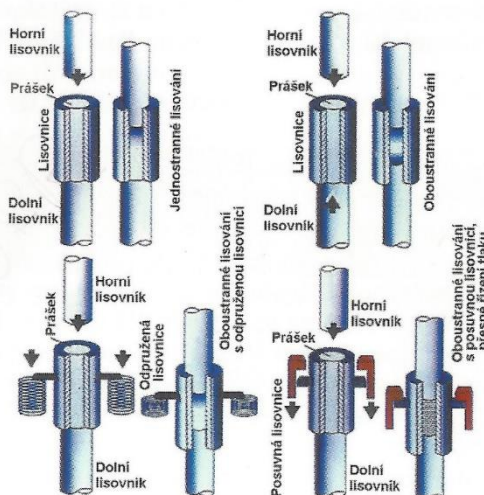
Slinuté karbidy se vyrábějí pomocí práškové metalurgie. Tato technologie zahrnuje mletí vstupních materiálů na prášek o požadované velikosti zrna, následné sušení, formování a slinování. Příprava směsi prášků je velmi významnou částí výroby, jelikož částečně určuje výsledné vlastnosti po slinování.

Mletí prášků

Mletí směsí, jak už bylo řečeno výše, je jedna z nejdůležitějších fází výroby, jelikož velikost zrn získaných mletím určuje následnou strukturu, pórovitost a tím i pevnost karbidu. Probíhá za sucha nebo v inertních organických kapalinách (např.: etylalkohol, aceton, hexan...) popřípadě ve vodě. Nevýhodou při použití kapalin je nutnost následného sušení směsi. Velikost namletých zrn se v dnešní době pohybuje mezi 0,2 – 10 mikrometry. [2, 3]

Formování směsi

Formování směsi probíhá zejména pomocí lisování. Může být uskutečněno pomocí formovacích lisů, izostatickým lisováním za studena, hydrostatickým lisováním, vytlačováním přes trysku daného tvaru, popřípadě litím nebo vstřikováním do forem. Aby směs držela pohromadě, musí se do ní přidávat tzv. plastifikátor, který se před slinováním vysuší. Pro výrobu monolitních nástrojů ze slinutých karbidů se používá metoda vytlačování umožňující vyrábění těchto nástrojů i s chladicími kanálky.

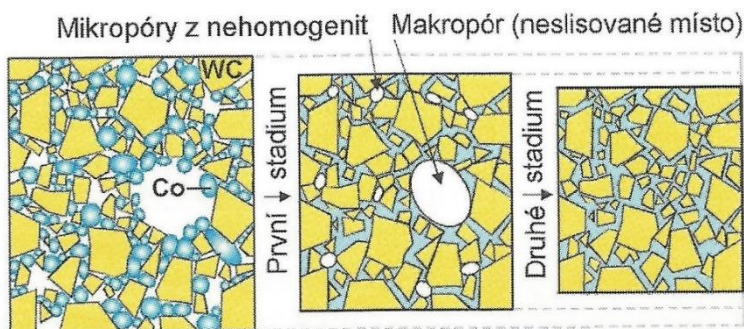


Obrázek 2 – Způsoby lisování prášků [2]

Slinování

Systém WC-Co

Jelikož slinutých karbidů, používaných pro obrábění, je více druhů, odpovídají tomu tedy i různé způsoby výroby. Rozdělují se na 3 základní metody výroby. První metoda, používaná pro výrobu slinutého karbidu WC-Co (karbid typu K), se zakládá na vzniku tekuté fáze kobaltu. Takto roztavený kobalt poté smáčí zrna WC a pojí je dohromady.



Obrázek 3 – Fáze slinování [2]

System WC-TiC-Co

Pro výrobu slinutých karbidů WC-TiC-Co (karbid typu P) se využívá mechanismu vzniku směsi tuhého roztoku WC v karbidu titanu (dále už jen TiC) pojené pomocí tekuté fáze kobaltu. Aby vznikl tuhý roztok WC a TiC, je nutno použít vyšších teplot než u předešlé metody.

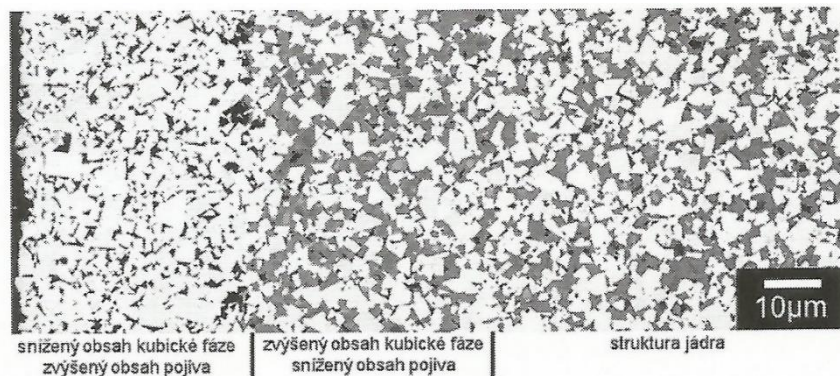
Tabulka 1 – Porovnání slinovacích teplot karbidů [2]

Složení materiálu [hm. %]					Slinovací teplota [°C]
WC	TiC	Ta(Nb)C	Cr ₃ C ₂	Co	
94	–	–	–	6	1 540
91	–	–	–	9	1 480
89	–	–	–	11	1 460
87	–	–	–	13	1 450
80	–	–	–	20	1 400
75	–	–	–	25	1 380
70	–	–	–	30	1 350
96,5	–	–	0,5	3	1 640
95	–	–	0,5	4,5	1 620
93,5	–	–	0,5	6	1 560
90,5	–	–	0,5	9	1 500
85,5	7	3,5	–	4	1 640
81,5	7	3,5	–	8	1 560
80	14	–	–	6	1 620
84	10	–	–	6	1 600
87	7	–	–	6	1 590
87	5	–	–	8	1 550
66	25	–	–	9	1 620

Způsoby slinování uvedené výše lze realizovat v ochranné atmosféře vodíku nebo ve vakuu, avšak pro výrobu nástrojů je vhodnější použití vakua, jelikož ve vodíkové atmosféře dochází ke vzniku nežádoucích povlaků. Nejdříve se používá předběžný ohřev (teplota 700-1000 °C), při kterém dochází k odstranění plastifikátoru. Následuje ohřev a výdrž na pracovní teplotě a následné postupné ochlazení.

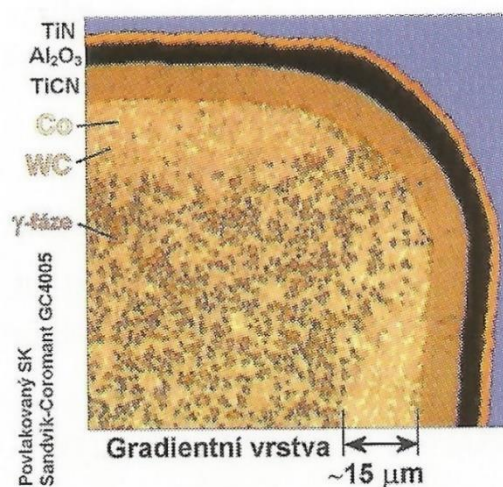
Gradientní slinování

Dalším způsobem výroby je gradientní slinování. Jeho výhoda spočívá v použitelnosti takto vyrobených karbidů na povlakování metodou CVD, při kterém se v průběhu ochlazování tvoří mikrotrhliny v povlaku. Mikrotrhliny se následně mohou šířit dále do substrátu a tím se snižuje životnost nástroje. Gradientní struktura karbidů tedy vypadá tak, že povrchová vrstva o tloušťce pár desítek mikrometrů má oproti jádru vyšší houževnatost a vyšší odolnost proti šíření trhlin. Gradientní strukturu lze vytvořit u karbidů s obsahem Ti (C, N). V první fázi slinování dochází ke vnější difuzi dusíku z materiálu do atmosféry. Poté začne kvůli vysoké afinitě titanu k částicím N_2 vnitřní difuze titanu na povrch karbidu a vzniká povrchová vrstva bez kubických karbidů (viz obrázek 4). Právě tato vrstva je houževnatější než samotné jádro.



Obrázek 4 – Zobrazení jednotlivých vrstev gradientní struktury [2]

Jestliže slinutý karbid neobsahuje TiN nebo kombinaci Ti(C, N), jako je tomu například u karbidu WC-TiC-TaC-Co (karbid typu M), tak musí být ve slinovací atmosféře přítomen N_2 , který se v druhé fázi slinování odstraní a nahradí argonem. [2, 4]

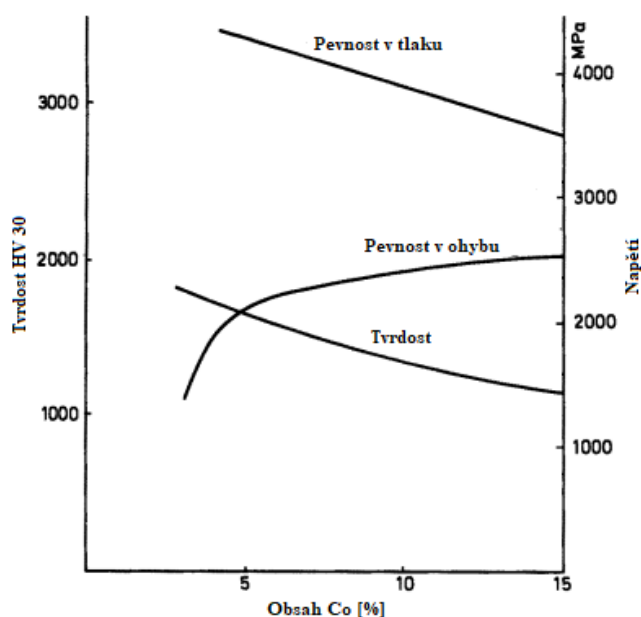


Obrázek 5 – Zobrazení špičky povlakovaného nástroje s gradientní vrstvou [2]

1.2. Slinutý karbid WC-Co (typ K)

1.2.1. Vlastnosti

Vlastnosti závisejí především na typu slinutého karbidu (P, K, M), které si zvlášť popíšeme. Dále pak závisí na obsahu jednotlivých karbidů a pojiva (kobaltu). Obecně se dá říct, že pokud podíl kobaltu roste, tak klesá tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, pevnost v tlaku, a naopak roste pevnost v ohybu a tahu, vrubová houževnatost, délková (tepelná) roztažnost.



Obrázek 6 – Závislosti vybraných vlastností na obsahu Co ve slinutém karbidu WC-Co [1]

Neméně závisí také na způsobu jeho výroby, velikosti zrn prášku, od které se odvíjí například výsledná pórovitost. Pórovitost ovlivňují další faktory jako je špatné promíchání směsi před slinováním, nedokonalá atmosféra v peci a různé nečistoty. [1, 2]

Fyzikální vlastnosti

Tepelná vodivost

U karbidů typu K je tepelná vodivost velmi málo závislá na obsahu kobaltu a její rozmezí je 50–105 W m⁻¹ K⁻¹. V porovnání s rychlořeznými ocelmi je tato hodnota přibližně 2 až 3krát větší. Tepelná vodivost klesá se zmenšující se velikostí zrna. Nižší tepelná vodivost snižuje tepelné zatížení nástroje a vzniklé teplo je z velké míry odváděno obrobkem.

Délková roztažnost

Tento součinitel z velké míry závisí na obsahu kobaltu. V závislosti na složení se pohybuje okolo $4-6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Například při zvětšení obsahu kobaltu ze 3 % na 20 % se jeho hodnota zvětší přibližně o polovinu, ale i tato hodnota se pohybuje okolo poloviny délkové roztažnosti HSS, což má dobrý vliv na přesnost obrábění oproti HSS.

Mechanické vlastnosti

Tvrdość

Tvrdość slinutého karbidu se odvíjí od obsahu kobaltu a velikosti karbidických zrn. Čím větší obsah kobaltu, tím nižší tvrdość. Hodnota tvrdości se zvyšuje se zmenšujícím se zrnem WC a maximální hodnota tvrdości se pohybuje okolo hranice 1800 HV (pro srovnání maximální tvrdość HSS je cca. 950 HV).

Pevność v ohybu a tlaku

Na rozdíl od tvrdości se pevnost v ohybu s rostoucím obsahem kobaltu zlepšuje. Maximální hodnota pevnosti v ohybu je pro každou velikost zrn jiná. S rostoucí teplotou pevnost v ohybu, podobně jako u tvrdości, výrazně klesá. Obvyklá hodnota pevnosti v ohybu se pohybuje v rozmezí 1 000 až 3 000 MPa.

Pevność v tlaku je oproti pevnosti v ohybu a tahu daleko vyšší. V závislosti na obsahu kobaltu se hodnota pohybuje okolo 3000 až 6000 MPa, ve výjimečných případech i 8000 MPa. S rostoucí teplotou pevnost v tlaku opět velmi výrazně klesá. [2]

Tabulka 2 - Srovnání vybraných vlastností karbidu WC-Co [2]

Složení [hm. %]		Měrná hmotność [g cm ⁻³]	Tvrdość		Pevność v ohybu [MPa]	Pevność v tlaku [MPa] ²⁾	Modul pružności v tahu [GPa] ³⁾	Měrná tepelná vodivost [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Součinitel délkové roztažności [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	Měrný odpor [μΩ cm]
WC	Co		[HRA]	[HV]						
100	–	15,7	92+94	1 800+2 000	300+500	3 000	722	122	5,7 ÷ 7,2	53
97	3	15,1+15,2	90+93	1 600+1 700	1 000+1 200	5 900	670	88		
95,5	4,5	15,0+15,1	90+92	1 550+1650	1 200+1 400	5 800	640	84	3,4(0+300 °C) 4,1(300±600 °C)	–
94+94,5	5,5+6	14,8+15,0	90+91	1 500+1 600	1 600+1 800	5 000	620	80	3,6(0+300 °C) 4,6(300±500 °C)	20
94+94,5	5,5+6	14,8+15,0	91+92	1 600+1 700	1 400+1 600	5 500	630 ²⁾	80	5	21
91	9	14,5+14,7	89+91	1 400+1 500	1 500+1 900	4 800	590	75	–	–
90	10	14,3+14,5	88,5+90,5	1 350+1 450	1 550+1 950	4 700	585	71	–	–
89	11	14,0+14,3	88+90	1 300+1 400	1 600+2 000	4 600	580	67	3,8(0+300 °C) 4,8(300±600 °C)	18
87	13	14,0+14,2	87+89	1 250+1 350	1 700+2 100	4 500	560	59	–	–
85	15	13,8+14,0	86+88	1 150+1 250	1 800+2 200	3 900	540	–	6	–
80	20	13,1+13,3	83+86	1 050+1 150	2 000+2 600 ³⁾	3 400	500	–	4,7(0+300 °C) 6,2(300±600 °C)	–
75	25	12,8+13,0	82+84	900+1000	2 000+2 800 ³⁾	3 200	470	–	5,0(0+300 °C), 6,7(300±600 °C)	–
70	30	12,3+12,5	80+82	850+950	1 800+3 000 ³⁾	3 000	440	–	–	–
–	100	8,7	–	125+250	700+1200	–	180	71	5,1	14

Pozn.: 1) hrubozrná fáze WC, 2+4 μm; 2) jemnozrná fáze WC, 0,5–2,0 μm; 3) výrazně závisí na velikosti zrna a změnách v obsahu uhlíku; 4) střední hodnoty

1.2.2. Rozsah použití

Karbid typu K je přednostně používán na obrábění materiálů, které tvoří elementární třísku. Jedná se tedy především o křehké materiály, litinu a bronz, ale i materiály jako jsou slitiny hliníku, mědi, titanu nebo žárovzdorné materiály na bázi niklu, železa a kobaltu. Vyplývá to z hlavní přednosti karbidu typu K oproti ostatním karbidům, kterou je houževnatost. Méně houževnaté karbidy mohou praskat vlivem mikrovibrací, které způsobuje právě tvorba elementární třísky. Samotný SK se ovšem používá velmi zřídka, jelikož využití moderních povlaků výrazně zvyšuje řezné podmínky a odolnost SK (o nich více v kapitole povlaků). [4, 5, 6, 7]

1.2.3. Řezné podmínky

Jemnozrný nepovlakovaný SK typu K (Sandvik Coromant označení H10) - použití na obrábění tvářených a odlévaných slitin hliníku s tvrdostí do 100HB:

řezná rychlost: 2 000 m/min (až 2 500 m/min)

posuv na otáčku: 0,15-0,8 mm

přísuv: dle použitého tvaru destičky

chlazení: vysoce doporučené

V tomto ohledu se vyrovnává řezným rychlostem PCD, ale objem odebrané třísky je větší. Životnost destičky je ovšem obecně nižší. Dosahovaná kvalita povrchu je také výrazně menší, jelikož PCD má několikanásobně nižší koeficient tření mezi nástrojem a obrobkem.

Dále může být použit na obrábění vysokopevnostních slitin titanu o pevnosti v tahu do 1 050 MPa:

řezná rychlost: 25-20-15 m/min

posuv na otáčku: 0,1-0,3-0,5 mm/ot

přísuv: dle použitého tvaru destičky

chlazení: vysoce doporučené

Toto použití je ovšem oproti jiným použitelným materiálům, jakými jsou například povlakované SK, velmi málo produktivní. V pohledu řezné rychlosti se pohybujeme na polovině až třetině hodnoty řezné rychlosti povlakovaného SK. [5]

1.3. Slinutý karbid WC-TiC-Co (typ P)

1.3.1. Vlastnosti

Fyzikální vlastnosti

Tepelná vodivost

Při malém obsahu karbidu titanu jsou její hodnoty podobné předchozímu SK typu K, ale snižují se při zvětšujícím se obsahu karbidu titanu a dostává se až na 2krát menší hodnoty než je tepelná vodivost HSS.

Délková roztažnost

Z důvodu vyšší délkové roztažnosti karbidu titanu oproti karbidu wolframu je tento koeficient mírně vyšší než u karbidu typu K.

Mechanické vlastnosti

Tvrdość

Vyšší tvrdost karbidu titanu než karbidu wolframu způsobuje celkovou vyšší tvrdost SK. Dosahuje tak maximální tvrdosti o cca 100 HV vyšší než SK typu K, ale její hodnota s rostoucí teplotou a obsahem kobaltu také klesá.

Pevnost v ohybu a tlaku

Ohybová pevnost při stejném obsahu pojiva je menší než u SK typu K. S rostoucím obsahem karbidu titanu se velmi výrazně zmenšuje. Oproti tomu pevnost v tlaku je u obou druhů SK srovnatelná. [2]

Tabulka 4 - Srovnání vybraných vlastností karbidu WC-TiC-Co [2]

Složení [hm. %]			Měrná hmotnosť [g.cm ⁻³]	Tvrdość		Pevnost v ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa] ¹⁾	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Měrná tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Součinitel délkové roztažnosti [10 ⁻⁶ .K ⁻¹]	Měrný odpor [μΩ.cm]
WC	TiC	Co		[HRA]	[HV]						
94	1	5	14,5÷14,7	90÷91	1 500÷1 600	1 400÷1 600	5 600	630	80	5	20
87,5	2,5	10	14,0÷14,2	89÷90	1 400÷1 500	1 600÷1 800	4 600	570	67	-	-
84,5	2,5	13	13,7÷13,8	87÷89	1 300÷1 400	1 800÷2 000	4 500	550	63	5,5	23
86	5	9	13,2÷13,4	89÷91	1 450÷1 550	1 500÷1 600	4 600	590	63	5,5	25
82	5	13	12,8÷13,0	88÷90	1 350÷1 450	1 600÷1 800	-	-	-	-	-
82	10	8	11,8÷12,0	90÷91	1 500÷1 600	1 500-1 700	-	-	33	-	-
78	14	8	11,1÷11,3	90÷91	1 550÷1 650	1 300÷1 400	4 200	540	34	6,2	44
78	16	6	11,0÷11,2	90÷91,5	1 600÷1 700	1 100÷1 250	4 300	520	38	6	43
76	16	8	10,9÷11,1	90÷91	1 550÷1 650	1 200÷1 300	-	-	29	6	-
69	25	6	9,6÷9,8	91÷92	1 650÷1 750	900÷1 100	-	-	21	7	65
61	32	7	8,7÷9,0	92÷93	1 650÷1 750	800÷1 000	4 100	420	17	-	-
34	60	6	6,5÷6,8	92÷93	1 750÷1 850	700÷800	3 800	380	13	7,5	77
10	84	6	5,2÷5,4	92÷93	1 850÷1 900	600÷700	3 600	360	-	7,9	85

Pozn.: 1) střední hodnoty

1.3.2. Rozsah použití

Karbid typu P nachází uplatnění pro obrábění materiálů netvořících elementární třísku kvůli jeho vyšší křehkosti. Je určen tedy na obrábění ocelí, slitin hliníku, tvárných litin. Jakožto samotný SK se ovšem prakticky nepoužívá. Je hojně využíván jako klasicky slinovaný či funkčně gradientní substrát určený k povlakování. [4, 5, 6, 7]

1.4. Slinutý karbid WC-TiC-TaC/NbC-Co (typ M)

1.4.1. Vlastnosti

Popsání vlastností tohoto typu karbidu je velmi obtížné. První problém nastává v tom, že výrobci neuvádějí jednotlivý obsah TaC a NbC, pouze jejich zastoupení v součtu. I kdyby jej ale uváděli, tak existuje velmi velké množství kombinací složení jednotlivých složek, což značně komplikuje charakteristiku tohoto typu SK. Dá se ovšem říct, že fyzikální vlastnosti jsou velmi blízké vlastnostem SK typu P a mechanické vlastnosti jsou určitou kombinací mezi SK typu K a typu P.

Tabulka 5 - Srovnání vybraných vlastností karbidu WC-TiC-TaC/NbC-Co [2]

Složení [hm. %]					Měrná hmotnost [g cm ⁻³]	Tvrdość		Pevnosť v ohybu [MPa]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Měrná tepelná vodivost [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Součinitel délkové rotačnosti [10 ⁻⁶ K ⁻¹]
WC	TiC	1)	Co	2)		[HRA]	[HV]					
85	4	1	10	20	13,2÷13,4	89÷90	1 350÷1 450	1 700÷1 900	–	550	56	–
83,5	4	6	6,5	60	–	90,5÷91,5	1 550÷1 650	1 500÷1 700	–	–	–	–
81	5	5	9	50	–	89÷90	1 350÷1 400	1 750÷1 900	–	–	–	–
80,5	5	5,5	9	52	13,1÷13,3	90÷91	1 400÷1 500	1 700÷2 000	–	560	–	–
77	6,5	9	7,5	58	15,5÷12,7	91÷92	1 550÷1 650	1 400÷1 600	–	–	53	5,5
76	7,5	6,5	10	46	12,0÷12,2	89÷90	1 350÷1 450	1 700÷2 000	4 500	520	47	6,0
74,5	13	4	8,5	24	–	90–91	1 450÷1 550	1 550÷1 650	–	–	–	–
73,5	10	8	8,5	44	11,8÷12,0	90,5÷91,5	1 450÷1 550	1 400÷1 600	–	–	–	–
72,5	10	8	9,5	44	11,7÷11,9	90÷91	1 400÷1 500	1 500÷1 750	–	–	–	–
71,5	10	8	10,5	44	11,7÷11,8	89÷90	1 350÷1 450	1 600÷1 900	–	–	–	–
70,5	13,5	7,5	8,5	36	11,1÷11,3	91÷92	1 500÷1 600	1 300÷1 500	4 700	500	28	5,0
69,5	12,5	8	10	39	11,2÷11,4	90,5÷91,5	1 450÷1 550	1 400÷1 700	–	–	–	–
69,5	18	5	7,5	22	–	90,5–91,5	1 550÷1 650	1 300÷1 400	–	–	–	–
62	20	8	10	29	10,5÷10,7	91÷92	1 500÷1 650	1 100÷1 300	4 000	–	–	–
62	12	18	8	60	11,7÷11,9	91÷92	1 600÷1 700	1 200÷1 400	5 100	630	–	–
59	7	22	12	76	12,3÷12,5	89÷90	1 300÷1 400	1 600÷1 800	–	–	–	–
59	12	18	11	60	11,4÷11,6	90÷91	1 400÷1 500	1 300÷1 500	4 000	560	–	–
50,5	38	5	6,5	12	–	91–92	1 600÷1 700	950÷1 050	–	–	–	–
50	30	10,5	9,5	26	8,7÷9,0	91÷92	1 600÷1 700	1 000÷1 200	3800	400	17	–

1.4.2. Rozsah použití

Používá se především na vyměnitelné břitové destičky jako podklad k povlakování, přičemž jeho vlastnosti jsou určitým vylepšením SK typu P. [2, 4]

2. Řezná keramika (ŘK)

Použití keramických nástrojů spadá daleko do historie člověka. Zpočátku to bylo převážně používání na ostření břitů nožů, zbraní atd. První pokusy o výrobu keramických řezných nástrojů na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3) byly zaznamenány v Německu v roce 1905. Za pár let je následovaly patenty na keramické řezné nástroje a komerčně používanými se tyto nástroje staly až přibližně v 50. až 60. letech 20. století. V dnešní době je používáno více dalších typů sloučenin jako je oxid zirkoničitý (ZrO_2), karbid křemíku (SiC) nebo nitrid křemičitý (Si_3N_4).

2.1. Výroba

Tento proces je z velké části podobný jako je výroba SK. První fází je příprava prášku o vysoké čistotě, následuje lisování, sušení a následné slinování. Hlavním rozdílem je to, že ŘK neobsahuje příměs pojiva, které by drželo keramická zrna pohromadě. Z toho důvodu je výroba ŘK, co se slinování týče, značně složitější a náročnější. Pro lepší slinovatelnost se do směsi přidávají látky, které při slinování tvoří kapalnou fázi a zabraňují růstu keramických zrn, což by vedlo ke snižování pevnosti a tvrdosti ŘK. [2]

2.2. Oxid hlinitý (Al_2O_3)

2.2.1. Vlastnosti

Fyzikální vlastnosti

Tepelná vodivost a délková roztažnost

Oxid hlinitý disponuje podle výrobce keramiky CeramTec relativně velmi malou tepelnou vodivostí v rozsahu 20 - 30 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$, ovšem hodnota délkové roztažnosti se pohybuje mírně nad hodnotami SK a to kolem $8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. [1, 2, 8]

Mechanické vlastnosti

Tvrдость

Jelikož se jedná o křehký materiál, tak se ve většině případů udává tvrdost podle Knoop (jedná se o mikrotvrđost, kde je vryp, na rozdíl od zkoušky podle Vickerse, mnohem měččí). Materiál od firmy CeramTec má tvrdost mezi 15 a 19 GPa.

Pevnost v ohybu a tlaku

Pevnost v tlaku je dobrá, v rozmezí 2 000 až 4 000 MPa. To ovšem neplatí u pevnosti v ohybu, jelikož se jedná o porézni a zároveň křehký materiál, takže dosahuje pouze hodnot 100 až 500 MPa v závislosti na teplotě. [2, 8]

2.3. Oxid zirkoničitý (ZrO₂)

2.3.1. Vlastnosti

Fyzikální vlastnosti

Tepelná vodivost a délková roztažnost

ZrO₂ je považován za velmi dobrý tepelný izolant, rozmezí hodnot 2-3 W m⁻¹ K⁻¹ mnohonásobně předčí veškeré ostatní nástrojové materiály. V ohledu délkové roztažnosti je ZrO₂ pro změnu nejhorsí, délková roztažnost je přibližně 2krát větší než u SK nebo CBN. Vyjádřena číslem je tedy 10 až 11 · 10⁻⁶ K⁻¹. [8]

Mechanické vlastnosti

Tvrđost

Bohužel ani zde si ZrO₂ nevrací reputaci, protože jeho tvrdost je v závislosti na způsobu zpracování pouze okolo úrovně tvrdosti SK typu K. V převodu na Knoopovu stupnici je tvrdost SK typu K (94% WC + 6% Co) 13 GPa a tvrdost ZrO₂ je v rozmezí 11 až 15 GPa.

Pevnost v ohybu

Polykrystalický tetragonální ZrO₂ může mít pevnost v ohybu i vyšší než 2 000 MPa. V porovnání s ostatními keramickými materiály je na tom tedy velmi dobře. [2]

2.4. Karbid křemíku (SiC)

2.4.1. Vlastnosti

Fyzikální vlastnosti

Tepelná vodivost a délková roztažnost

Tepelná vodivost je relativně vysoká. Výrobce Ceramtec uvádí 120 až 200 W m⁻¹ K⁻¹. V rozmezí teplot 20 až 400 °C uvádí malou délkovou roztažnost 3,6 až 4,1 · 10⁻⁶ K⁻¹.

Mechanické vlastnosti

Tvrдость

Tvrдость je zmíněna jako velmi dobrá, jelikož překračuje 22 GPa.

Pevnost v ohybu a tlaku

Žádnou z vlastností výrobce neuvádí, obecně ale bývá pevnost v ohybu SiC okolo 600 MPa a pevnost v tlaku v rozmezí 2 000 až 4 000 MPa. Velké rozptyly opět ovlivňuje způsob slinování. [2, 8]

2.5. Nitrid křemičitý (Si₃N₄)

2.5.1. Vlastnosti

Fyzikální vlastnosti

Tepelná vodivost a délková roztažnost

Obě vlastnosti závisí na způsobu slinování materiálu. Reaktivně slinutý Si₃N₄ má v závislosti na teplotě tepelnou vodivost přibližně 15-25 W m⁻¹ K⁻¹, zatímco tlakově slinutý se posouvá k hranici SK, což odpovídá hodnotám 20-110 W m⁻¹ K⁻¹ (dolní mez pro 20 °C, horní mez pro 1 000 °C). Z keramických materiálů je na tom s délkovou roztažností nejlépe. Hodnota se pohybuje okolo 3 · 10⁻⁶ K⁻¹.

Mechanické vlastnosti

Tvrдост

Tvrдост je mezi keramickými materiály průměrná, mezi 15 až 18 GPa.

Pevnost v ohybu a tlaku

Způsob slinování ovlivňuje tyto dvě mechanické vlastnosti ještě více než vlastnosti fyzikální. Reaktivně slinitý Si_3N_4 má pevnost v tlaku pouze 1000 MPa a pevnost v ohybu zhruba 5 krát menší, zatímco tlakově slinitý Si_3N_4 těmito vlastnostmi vyniká. Pevnost v tlaku se může pohybovat v rozmezí 3 000 až 6 800 MPa a pevnost v ohybu může být až 850 MPa. [2, 8]

Tabulka 5 – Porovnání vlastností řezných keramik s ostatními materiály [2]

Vlastnost	Materiál											
	Slinutý karbid 94%WC+ 6%Co	Al_2O_3	ZrO_2		SiC			Si_3N_4		PKD	PKNB	
			1)	2)	3)	4)	5)	4)	5)			
Měrná hmotnost [g.cm ⁻³]	14,8÷15,0	3,9÷4,0	5,7÷5,8	6,0÷6,1	2,6	3,1÷3,2	3,2	2,6	3,1÷3,3	4,1	4,0	
Pevnost v tahu [MPa]	1 100	200	120	250÷500		500			100÷900			
Pevnost v tlaku [MPa]	4 500÷6 200	4 000			500÷800	2 000÷3 000	3 000÷4 000	1 000	3 000÷6 800	8 000	3 800	
Pevnost v ohybu [MPa]	20 °C	1 400÷2 200	350÷500	650÷700	>2 000	100÷300		500÷700	200÷250	600÷850		
	800 °C		220÷250	350÷370			300÷550					
	1 000 °C				300÷800							
	1 200 °C		100÷150			100÷300	400	500÷600	200÷250	300÷400		
Tvrдост podle Knoop [GPa]	13	18÷23	11	13÷15		21÷27			15÷18	70	35	
Modul pružnosti v tahu [GPa]	620÷630	360÷410	200	200	240	400	380÷440	140÷220	210÷338	925	800	
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	260	150							120	430	280	
Lomová houževnatost [MPa m ^{1/2}]	11	5,0	8÷15	15		2,5÷3,5	2,5÷4,0	1,0÷3,0	4,5÷6,2	11	6,7	
Poissonovo číslo	0,22	0,24			0,24	0,24	0,24	0,27	0,26÷0,28	0,20	0,22	
Součinitel délkové roztlačnosti [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	20 °C	3,6÷4,9	6,5÷7,0	9÷11	10		3,5÷4,0					
	1 100 °C			15		4,5	5,4	3,2÷4,5	2,7÷3,2	3,2÷3,5	4,6	4,9
Měrná tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	20 °C	80÷100	12	1,8÷2,2	3	20÷25 ⁶⁾	33-85		17÷110	150	100	
	1 000 °C						175	50÷100 ⁶⁾	15÷25 ⁶⁾	60÷110	550	600
Měrný odpor [Ω.m]	20 °C	2.10 ⁹	>10 ¹²	>10 ⁷	>10 ⁷		0,1		10 ¹¹			
	1 000 °C		10 ⁵	0,6	0,6							
Maximální teplota užití [°C]		1 800	1 100	1 100	1 700	1 700	1 800	1 400	1 600			

Pozn.: PKNB = polykrystalický kubický nitrid boru; PKD = polykrystalický diamant; 1) částečně stabilizovaný ZrO_2 ; 2) polykrystalický tetragonální ZrO_2 ; 3) rekrystalizovaný; 4) reaktivně slinitý; 5) tlakově slinitý; 6) při 500 °C.

2.6. Základní druhy řezných keramických materiálů

2.6.1. Oxidová keramika

Základním stavebním prvkem je Al_2O_3 . Používá se buď jako čistý bez příměsí, nebo s příměsí TiN , ZrO_2 , oxidu yttritého (Y_2O_3) a dalších prvků.

2.6.2. Nitridová (neoxidová) keramika

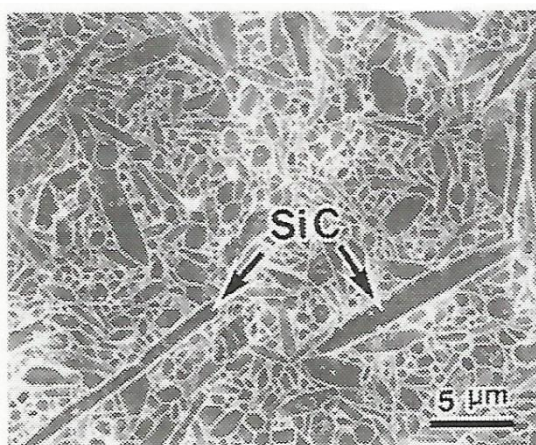
Skládá se ze základního prvku Si_3N_4 , který může být použit také jako čistý nebo s příměsí, podobnou jako u oxidové keramiky, zahrnující i samotný Al_2O_3 . Výrobní proces je u této keramiky značně složitější, jelikož samodifuze Si_3N_4 při slinování je omezena jeho kovalentní vazbou.

2.6.3. Sialonová keramika

Název se skládá ze stavebních prvků materiálu Si-Al-O-N. Vzniká z Si_3N_4 nahrazením dusíku N^{3-} za kyslík O^{2-} a zároveň nahrazením křemíku Si^{4+} za hliník Al^{3+} . Vzniklý materiál má v zásadě stejné vlastnosti jako Si_3N_4 , ale díky této náhradě má vyšší stabilitu za vysokých teplot a odolnost proti opotřebení.

2.6.4. Vyztužené keramiky

Jsou velmi perspektivním materiálem. Složením by se sice daly zařadit mezi výše zmíněné materiály, ale mají jednu zvláštní přísadu. Právě do základních keramických materiálů se přidávají tzv. whiskery, což jsou vlákna SiC nebo Si_3N_4 , které mají svou délku daleko větší než průměr. Vlákna se blíží teoretickým mezím pevnosti a díky nim je tedy základní materiál výrazně zpevněn. [2]



Obrázek 7 – Mikrosnímek výbrusu vyztužené keramiky $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{SiC}$ (whisker) [2]

2.7. Rozsah použití

Řezná keramika se v zásadě používá především na žárovzdorné slitiny, dále na obrábění šedé a temperované litiny a také na kalené oceli pouze nepřerušovaným řezem. Vývoj keramiky vedl k největšímu posunu řezných rychlostí a kvality obráběných dílů právě u žárovzdorných slitin, které se dříve daly obrábět pouze nepovlakovanými slinutými karbidy. Mezi výhody keramických nástrojů patří zejména chemická odolnost vůči obráběným materiálům a vysoká tvrdost za tepla. Na opačné straně je nevýhodou křehkost, což se řeší použitím nulového nebo záporného úhlu čela nástroje. [5, 6, 7, 9]

2.8. Řezné podmínky

Nepovlakovaná řezná keramika o složení převážně Al_2O_3 (označení dle Sandwik Coromant CC6050) - použití na kalenou ocel tvrdosti 60HRC:

řezná rychlost: 170-140-105 m/min

posuv na otáčku: 0,05-0,15-0,25 mm/ot

přísuv: dle použitého tvaru destičky

chlazení: nepoužívat

Pro srovnání s CBN od stejného výrobce je produktivita ŘK v závislosti na druhu použitého CBN stejná nebo maximálně o třetinu nižší. Další možností je např. použití SK s povlakem TiAlN od výrobce Iscar s označením IC907 a s doporučenou řeznou rychlostí 30-60 m/min. V tomto případě je zmíněná ŘK přibližně 3 krát produktivnější.

Nepovlakovaná řezná keramika na bázi SiAlON (označení dle Sandwik Coromant CC6160) - použití na žárovzdornou slitinu na bázi niklu o tvrdosti 350HB (38 HRC):

řezná rychlost: 300-235-190 m/min

posuv na otáčku: 0,1-0,2-0,3 mm/ot

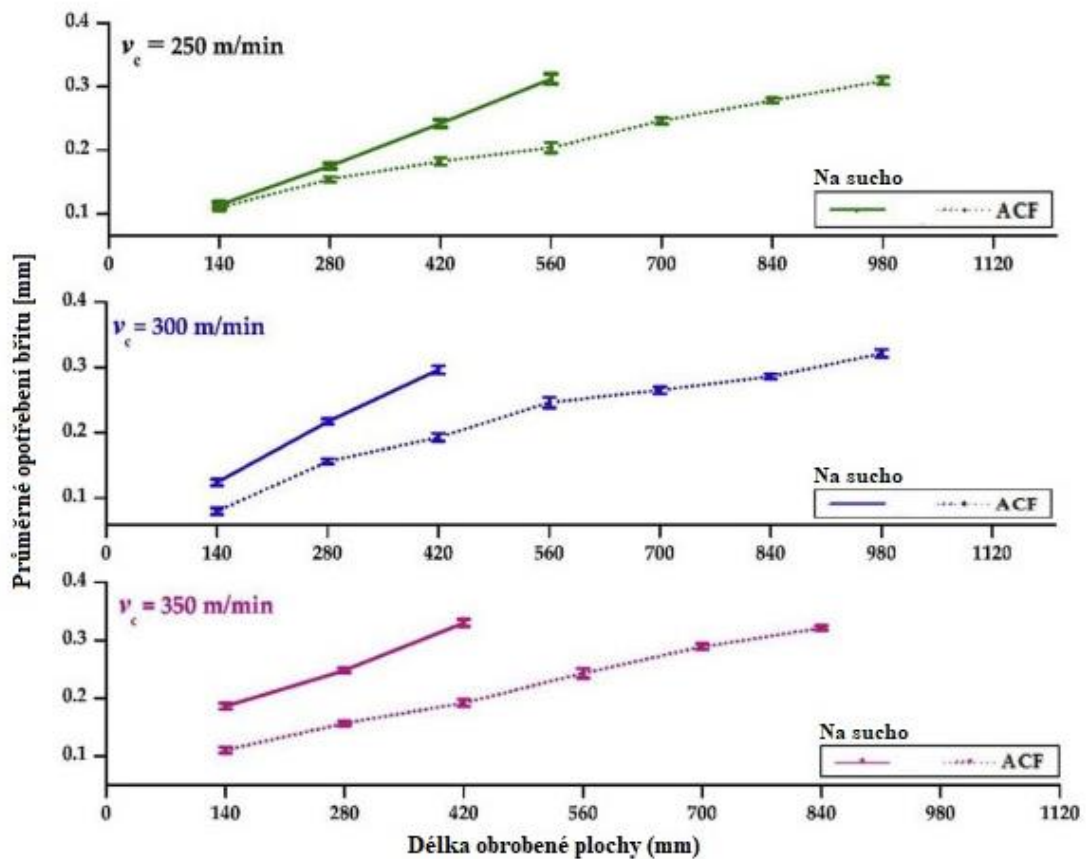
přísuv: dle použitého tvaru destičky

chlazení: volitelné

Možnou alternativou je např. použití SK s CVD povlakem od stejného výrobce s označením S05F. Doporučená řezná rychlost při stejném posuvu na otáčku je v rozmezí 90-75-60 m/min. ŘK je v tomto případě 3 krát produktivnější. Lépe je na tom i při porovnání s CBN od výrobce Iscar s řeznými rychlostmi 100-250 m/min. ŘK je v tomto odvětví nejlepší volbou. [5, 7]

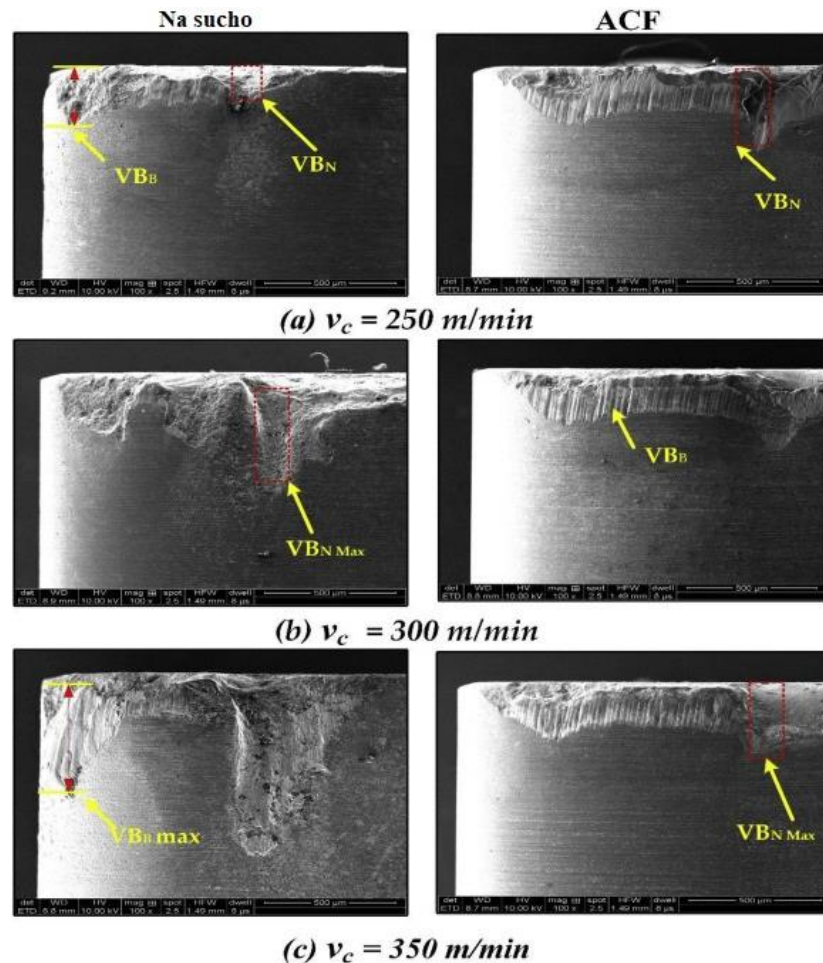
Použití vyztužené keramiky $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ (whisker) na obrábění superslitiny na bázi niklu s označením INCONEL 718:

Studie byla zaměřena na opotřebení a výdrž břitu při různých řezných rychlostech, konstantním posuvu na otáčku a přísuvu. Obráběným polotovarem byla tyč o průměru 80mm. Obrábění probíhalo na sucho a za použití řezné směsi ACF (Atomization-based cutting fluid), což je grafitový prášek a sulfid molybdeničitý smíchaný s rostlinným olejem. V porovnání jsou tři řezné rychlosti – 250, 300 a 350 m/min. Posuv na otáčku byl ve všech případech 0,1 mm a přísuv 0,3 mm. Úhel čela nástroje je záporných 6° a poloměr špičky nástroje 1,2 mm. Stanovené průměrné opotřebení břitu na hřbetu bylo 0,3 mm (VB_B), maximální možné opotřebení, při kterém je destička na konci své životnosti, je 0,6 mm ($\text{VB}_{B\text{max}}$) a vrub na hřbetu, způsobený adhezním otěrem, je také 0,6 mm ($\text{VB}_{N\text{max}}$).



Obrázek 8 – Porovnání životnosti nástroje při různých řezných rychlostech a za daných řezných podmínek [10]

Z grafů je patrné vidět, že použití řezné kapaliny ACF má velmi pozitivní vliv na životnost nástroje. Je to zapříčiněno především tím, že typicky při obrábění žárovzdorných slitin vznikají v místě řezu vysoké teploty (i okolo 1 200°C), takže při použití řezné kapaliny snižujeme tření mezi obrobkem a nástrojem a zároveň odvádíme teplo, což vede ke snížení této teploty. Na následujících snímcích je zachycen způsob opotřebení nástroje po opotřebení břitu. Ve většině případů byl hlavním důvodem zničení břitu vznik vrubu na hřbetu nástroje (VB_N).



Obrázek 9 – Porovnání opotřebení břitu při různých řezných rychlostech a za daných řezných podmínek [10]

Při obrábění na sucho je patrné velmi destruktivní a neřízené opotřebení břitu, při kterém docházelo k vylamování břitu (viz obrázek 9). Nejvhodnější řeznou rychlostí z hlediska opotřebení břitu i z hlediska produktivity je 250 m/min. Opotřebení nástroje při použití ACF je výrazně lepší. Již od pohledu je zřejmé, že abrazivní opotřebení na hřbetu nástroje (VB) je řízené a daleko lépe předvídatelné, což je z hlediska výroby důležité. Nejlepší volbou řezné rychlosti je 300 m/min. Produktivita je sice stejná jako při rychlosti 250 m/min, ale opotřebení ve tvaru vrubu je menší. Strojní čas při vyšší řezné rychlosti bude také kratší, takže není důvod upřednostňovat nižší řeznou rychlost.

Řezná kapalina také velmi pomáhá kvalitě obrobeného povrchu, která je v případě obrábění na sucho velmi špatná (viz obrázek 10). Při přepočtu délky obrobené plochy na životnost nástroje v minutách je tento čas při ideálních řezných rychlostech při obrábění na sucho ($v_c = 250$ m/min) 5,6 minut a při obrábění s ACF ($v_c = 300$ m/min) 8,2 minut. Produktivita obrábění s ACF je v tomto případě o 75% vyšší. [10]



Na sucho



ACF

Obrázek 10 – Porovnání kvality povrchu [10]

3. Cermety

Název se odvíjí od jejich složení. První část názvu je složena ze slova CERamics a druhá část slova je odvozena od slova METal. Jedná se tedy o kovokeramický materiál, který má zpravidla vyšší tvrdost než SK a zároveň větší houževnatost než řezná keramika. Od SK se odlišuje tím, že základním prvkem cermetu je TiN, TiC, Mo₂C nebo jejich kombinace, zatímco u SK je základním prvkem WC. První patentovaný cermet byl vyvinut na začátku 40. let 20. století, prakticky použitelné cermety se objevily přibližně o desetiletí později, ale kvůli menší houževnatosti oproti SK se jim nedostávalo mnoho pozornosti. Teprve po dlouhých letech vývoje a zdokonalování cermetů (zejména v Japonsku) se jejich vlastnosti osvědčily v 80. letech 20. století i v Evropě a USA.

3.1. Výroba

Nijak zásadně se neliší od výroby SK. Odlišnosti jsou samozřejmě ve slinovacích teplotách a také např. v používaném pojivu, kde se kromě kobaltu používá i nikl.

3.2. Vlastnosti

Cermety se obecně skládají z mnoha prvků a jejich vlastnosti je složité definovat. Skládají se ale z velké části z TiC a TiN, od kterých se odvíjí výsledná tvrdost, která bývá mírně vyšší než u SK. [2]

3.3. Rozsah použití

Cermety jsou určeny především na dokončovací operace, jelikož nabízejí použití vyšších řezných rychlostí oproti SK. TiC je totiž stabilnější za vyšších teplot než WC, který obsahují SK. Dále mají také vyšší odolnost proti adhezi než SK, a tudíž je kvalita obrobené plochy lepší. Nepovlakovaný cermet se hodí na dokončovací operace všech ocelí materiálové třídy P a nezušlechtných korozivzdorných ocelí. [2, 5, 6, 7, 9]

3.4. Řezné podmínky

Nepovlakovaný cermet (označení dle Sandvik Coromant CT5015) - použití na dokončování obrábění zušlechťených nástrojových ocelí s tvrdostí 325 HB (35HRC):

řezná rychlost: 195-165-130 m/min

posuv na otáčku: 0,05-0,1-0,2 mm/ot

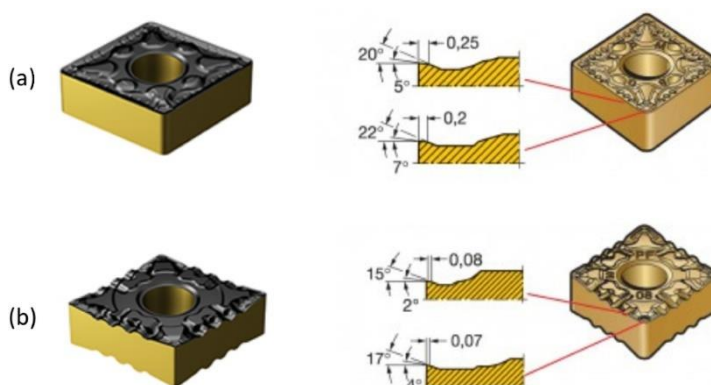
přísuv: dle použitého tvaru destičky

chlazení: doporučeno

V tomto případě není srovnávání s jinými řeznými materiály příliš vypovídající. Povlakované SK od stejného výrobce jsou ve většině případů stejně nebo více produktivní. Cermety se ovšem nepoužívají kvůli vysoké produktivitě, nýbrž pro dosahování vysoké kvality obroběných ploch. [5]

Porovnání životnosti a dosahovaných parametrů nepovlakovaného a PVD povlakovaného cermetu na obrábění oceli AISI 4340 (40CrNiMo7)

Obráběný polotovár je z oceli o pevnosti v tahu 1 550 MPa a tvrdosti 50 HRC. Tvar břitových destiček je zobrazen v obrázku 11 a řezné podmínky s výsledky jsou uvedeny v tabulce 6. Nepovlakovaný cermet obsahuje základní matrici TiCN, další prvky (Ti, Nb, W) (C, N) a kobaltové pojivo. PVD povlakovaný cermet má jako základní povlak TiCN a druhý povlak TiN.



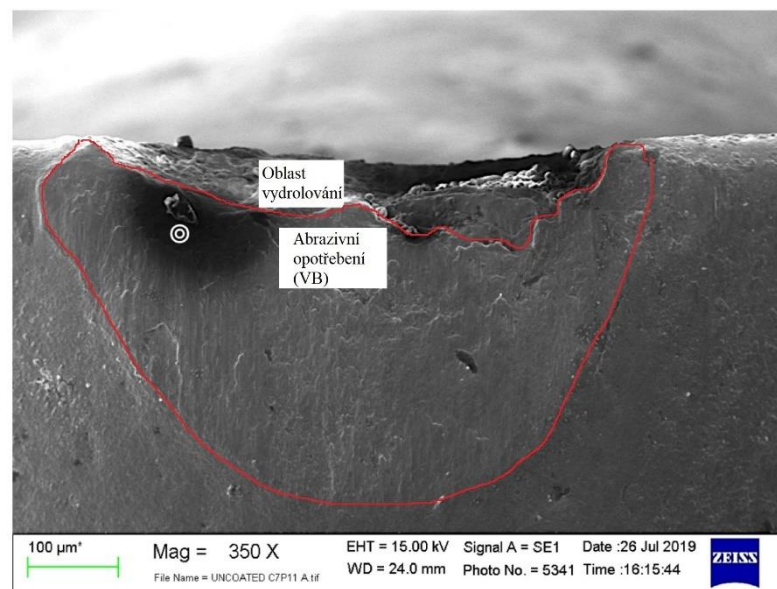
Obrázek 11 – Břitové destičky a) nepovlakovaný cermet, b) PVD povlakovaný cermet [11]

Výsledek experimentu jasně vyzdvihuje hlavní přednosti obou řezných materiálů. Nepovlakovaný cermet vykazuje velmi dlouhou životnost ostří (T), která je prakticky dvojnásobná oproti povlakovanému. Naopak povlakovaný cermet dosahuje dvakrát lepší drsnosti povrchu. Co se tedy produktivity týče, lepší variantou je určitě nepovlakovaný cermet. Při vyšších požadavcích na kvalitu obrobeného povrchu bude správnou volbou PVD povlakovaný cermet.

Nástroj	v	f	a	T	VB	Ra
	m/min	mm/ot	mm	min	um	um
Nepovlakovaný	120	0.1	0.2	34	125	1.773
PVD povlakovaný	120	0.1	0.2	18	100	0.891

Tabulka 6 – Řezné podmínky a výsledky obrábění [11]

Způsob opotřebení břitu je především abrazivním otěrem (VB) a vydrolováním na čele viz obrázek 12. [11]



Obrázek 12 – Snímek opotřebení břitu nepovlakovaného cermetu [11]

4. Povlaky

Zdokonalování povlaků je nejlepší cesta k efektivnějšímu obrábění. Po jejich uvedení na trh pro komerční užití se obrábění velmi výrazně posunulo jak v pohledu produktivity a trvanlivosti nástrojů, tak i v kvalitě obrábění. Povlaky totiž nepřinášejí pouze vyšší tvrdost povrchu řezného nástroje, ale také zlepšují kvalitu obrobených ploch, jelikož díky dokonale hladkému povrchu snižují tření mezi nástrojem a obrobkem. Použití povlaků navíc poskytuje možnost sloučit dvě do té doby prakticky neslučitelné vlastnosti, jimiž jsou vysoká tvrdost a zároveň houževnatost. [2, 9]

4.1. Způsoby povlakování

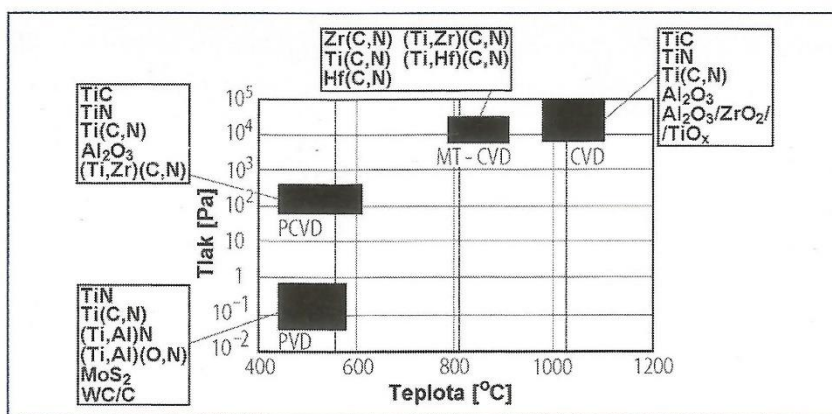
4.1.1. Metoda PVD (Physical Vapour Deposition)

Mezi výše zmíněnými řeznými materiály je tato metoda o něco méně používaná, z důvodu nižší dosahované tvrdosti povlaku, ale hojně se používá jako jediná možná metoda na povlakování HSS (nedochází při ní k popouštění -> ztrátě tvrdosti HSS). Pracovní teploty se pohybují většinou do 500 °C. Proces probíhá ve vakuu a princip nanášení spočívá v odpaření materiálů, ze kterých chceme povlak vytvářet a jejich následné usměrnění na povrch řezného nástroje. Metoda se dělí na 3 základní způsoby podle toho, jakým způsobem jsou odpařené částice usměrňovány na povrch, který chceme povlakovat. Jedná se o napařování, naprašování nebo iontovou implantaci.

Výhodou oproti metodě CVD je hladší povrch povlaku. Zbytková napětí v povlaku jsou tlaková, a tudíž nedochází k tvorbě mikrotrhlin. PVD metoda se nejčastěji používá na povlakování nástrojů pro frézování a to především nástrojů s ostrými hranami, jakými jsou monolitní frézy či vrtáky. Povlaky nanášené metodou PVD jsou většinou TiN, TiCN, TiAlN, AlTiN, MoS₂ (viz obrázek 13) a typická tloušťka vrstvy bývá v rozsahu 1 až 5 μm.

4.1.2. Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition)

Aplikační teploty nanášení se pohybují okolo 1 000 °C. Při použití jiných vstupních sloučenin se můžeme dostat na teploty 700 až 900 °C, kdy se jedná o tzv. MT-CVD (middle temperature CVD = CVD za středních teplot), nebo v případě PCVD (Plazmaticky aktivovaná CVD) lze snížit teplotu povlakování na 400 až 600 °C. Princip metody spočívá v chemické reakci mezi plynným médiem a povrchem řezného nástroje. Díky chemické reakci je výhodou vyšší přilnavost povlaku oproti PVD metodě. Dále je také dosahováno vyšších tvrdostí u stejných povlaků než u předchozí metody. Metoda se podle způsobu aktivace chemické reakce dělí na tepelně indukovanou, plazmaticky aktivovanou a elektronově nebo fotonově indukovanou. Běžně nanášené CVD povlaky viz obrázek 13. Tloušťka vrstvy povlaku je větší než u metody PVD, většinou nabývá 5 až 15 μm . [2, 3, 12]



Obrázek 13 – Metody nanášení povlaků [2]

4.2. Vlastnosti vybraných povlaků

4.2.1. TiC

Povlak s velmi dobrou tvrdostí okolo 3 000 HV, dobrou přilnavostí k základnímu substrátu a odolností proti abrazivnímu otěru. Maximální pracovní teploty jsou ovšem velmi nízké, a tak se pro moderní vysokorychlostní obrábění jako hlavní povlak příliš nehodí. Používá se ovšem jako spodní vrstva u vícevrstvých povlaků.

4.2.2. TiCN

Povlak s velmi vysokou tvrdostí 3 000 HV, výbornou přilnavostí a odolností proti opotřebení. Hlavním nedostatkem je jeho velmi nízká pracovní teplota, která nesmí překročit 300 až 400 °C. Je tedy předurčen pouze jako podklad pro vícevrstvé povlaky.

4.2.3. Al₂O₃

Povlak tvoří díky svým vlastnostem velmi dobrou tepelnou a chemickou bariéru mezi nástrojem a obrobkem. Tvrdost se běžně pohybuje okolo 2 300 HV (firma Ionbond např. udává u svého povlaku mikrotvrdost 3 000 HV_{0,05}). Al₂O₃ disponuje nejlepší odolností proti otěru za vysokých teplot a umožňuje tak použití vysokých řezných rychlostí. Pracovní teplota může přesahovat i 1 000°C. Nevýhodou povlaku je horší přilnavost k základnímu substrátu, a proto se nanáší většinou na vrstvu TiC nebo TiCN.

4.2.4. TiN

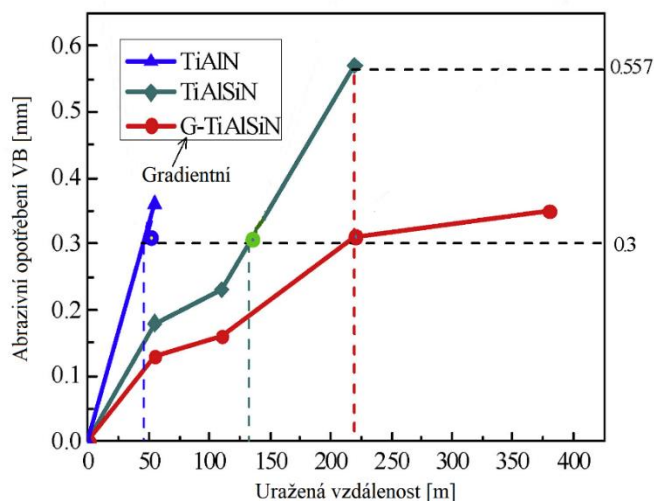
Nejčastěji používaný povlak nanášený PVD metodou. Kombinace vlastností, kterými jsou dobrá tepelná a chemická ochrana substrátu, přilnavost k základnímu substrátu, relativně vysoká tvrdost většinou 2 200 HV (firma Ionbond např. udává u svého povlaku mikrotvrdost 2 800 HV_{0,05}) a dobrý součinitel tření, poskytuje velmi univerzální užití na široké spektrum obráběných materiálů. Nevýhodou oproti Al₂O₃ je nižší pracovní teplota, která nesmí překročit 600 °C.

4.2.5. TiAlN

Tvrdost se odvíjí od obsahu hliníku Al v povlaku (pokud obsahuje velké množství Al, tak většina zdrojů mluví o AlTiN povlaku) a pohybuje se nad hranicí 3 000 HV až 3 800 HV ((firma Ionbond např. udává u svého povlaku mikrotvrdost 4 500 HV_{0,05}). Oproti TiN má také lepší tepelnou i chemickou odolnost a je tak používán na náročnější obrábění litin, žárovzdorných a titanových slitin nebo také kalených ocelí. Pracovní teploty podle složení a způsobu nanášení povlaku nesmí překročit 800 až 900 °C. [2, 7, 9, 12, 13, 14]

4.2.6. TiAlSiN

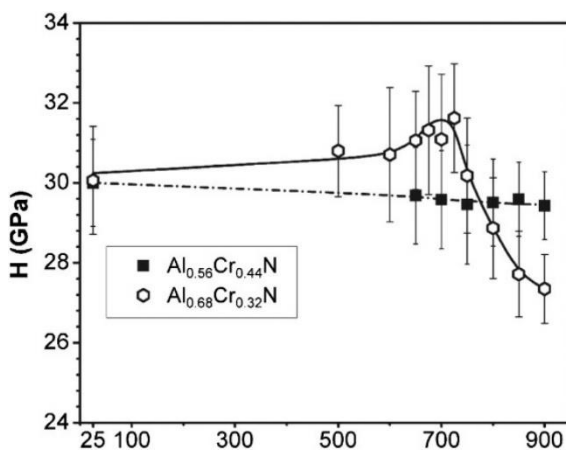
Moderní povlak se zvýšenou tvrdostí oproti běžněji používanému TiAlN. Tvrdosti povlaku přesahují 4 000 HV a zlepšena je také odolnost proti oxidaci na přibližně 1 000 °C. Byl vyvinut především kvůli problematice obrábění korozivzdorných ocelí, titanových a žárovzdorných slitin. Na obrázku 14 je znázorněno výrazné zlepšení trvanlivosti nástroje při jeho použití na obrábění slitiny Ti6Al4V. [14, 15]



Obrázek 14 – Porovnání trvanlivosti SK s různými povlaky při obrábění slitiny Ti6Al4V, $v_c = 100 \text{ m/min}$, $a_p = 0,5 \text{ mm}$, $f = 0,2 \text{ mm/ot}$ [15]

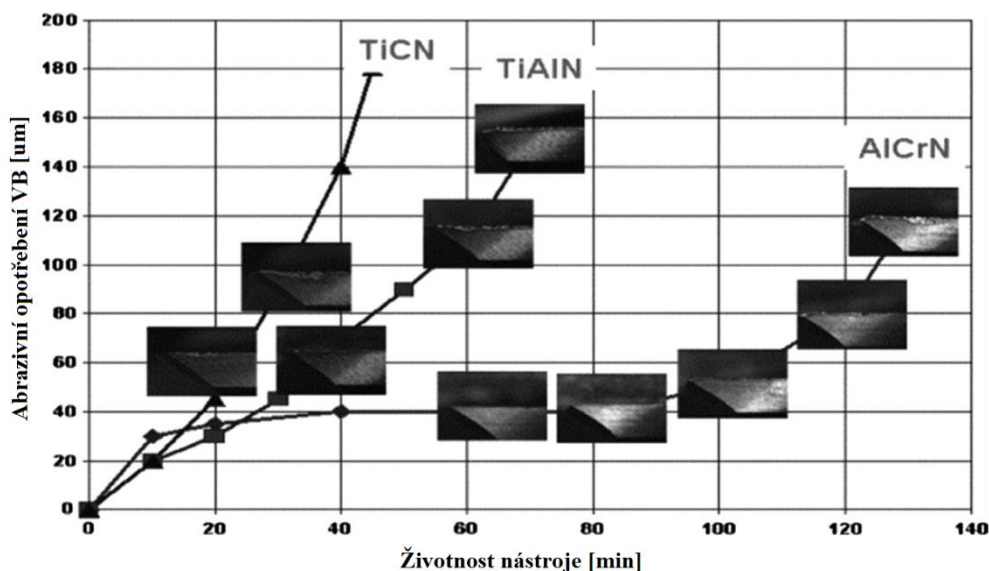
4.2.7. AlCrN

Povlak s vysokou odolností proti oxidaci a tvrdostí okolo 3 000 HV (30 GPa). Při složení o poměru 68:32 (Al:Cr) zvyšuje povlak při dosáhnutí teploty 600-700 °C svou tvrdost a poté rapidně klesá (viz obrázek 15), v ostatních případech se jeho tvrdost při změnách teploty nijak zásadně nemění.



Obrázek 15 – Závislost tvrdosti na teplotě povlaku AlCrN [14]

Uplatnění nachází pro obrábění středními řeznými rychlostmi, při kterých je zapotřebí zvýšená tvrdost a odolnost proti oxidaci. Používá se například pro obrábění uhlíkových ocelí, při kterém díky své vysoké odolnosti proti abrazivnímu opotřebení dosahuje daleko lepších výsledků než jiné povlaky viz obrázek 16. [14]



Obrázek 16 – Porovnání životnosti SK s různými povlaky při obrábění uhlíkové oceli [14]

4.2.8. ZrN

Vyniká vysokou odolností vůči adhezi neželezných kovů a jeho tvrdost se pohybuje okolo 2 800 HV. Z těchto vlastností již vyplývá, že byl vyvinut pro obrábění hliníkových slitin, způsobujících především adhezní opotřebení nástrojů. Maximální provozní teplota dosahuje 500 až 600 °C, což je pro obrábění těchto slitin dostačující. [13, 16]

4.2.9. DLC (Diamond-Like Carbon)

Pro obráběcí aplikace se jedná se o velmi tvrdé povlaky na bázi uhlíku ta-C (tetrahedrální amorfní uhlík) s podobnými vlastnostmi jako má diamant. Hlavní výhodou je několikanásobně menší součinitel tření než u ostatních povlaků. Tvrdost se pohybuje okolo 5 000 HV i více, ale hlavní nevýhodou, jako je tomu i u polykrystalického diamantu, je nemožnost aplikace na materiály s obsahem železa a malá tepelná odolnost maximálně do 500 °C (někteří výrobci udávají i méně). Výhodou je velmi nízká teplota nanášení a možnost použití i na HSS. Používá se pro obrábění slitin z neželezných kovů nebo kompozitů. [2, 13, 14]

4.2.10. Diamantové povlaky

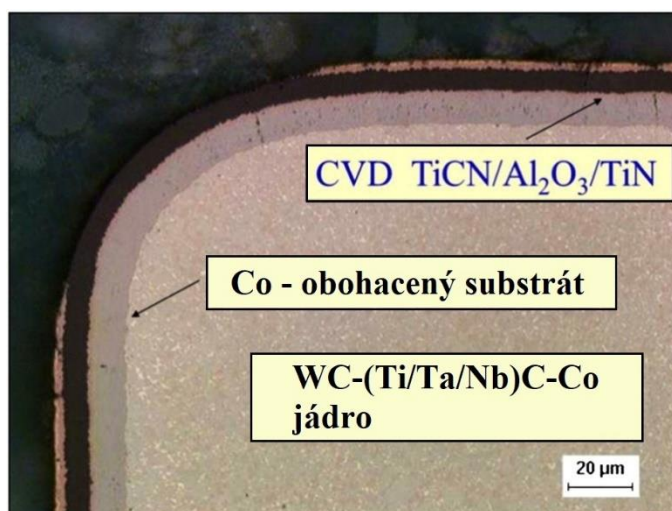
Dosahuje extrémních tvrdostí i přes 10 000 HV. Oproti DLC povlaku má vyšší koeficient tření, ale zároveň má o něco vyšší tepelnou odolnost až do 600 °C. Hlavní nevýhodou je možnost nanášení pouze vysokoteplotní CVD metodou. Dosahuje vyšší produktivity obrábění než DLC povlaky, ale rozsah použití je stejný.

4.2.11. CBN povlaky

Tyto povlaky jsou stále ve vývoji. Jelikož je CBN používán na obrábění materiálů s velmi vysokou tvrdostí, nedosahují tyto povlaky tak dobrých výsledků ať už z důvodu nedostatečné pevnosti základního substrátu, velmi špatné přilnavosti či velmi malé tloušťky povlaku. Tato skutečnost drží povlaky CBN stále daleko od komerčního používání k obrábění. [2]

4.2.12. Vícevrstvé povlaky

V praxi se ve většině případů na nástroje z SK a cermetů nanáší povlaky o více vrstvách. Každá z vrstev má určitou funkci a kombinací těchto vrstev jsme schopni dosáhnout co nejlepších vlastností rezného nástroje pro určité použití. Např. povlak TiCN-Al₂O₃-TiN kombinuje tyto vlastnosti: spodní vrstva tvořená TiCN tvoří podklad pro dobrou přilnavost povlaku Al₂O₃, který přináší vysokou chemickou a tepelnou odolnost nástroje, dále zabraňuje opotřebení ve tvaru žlábků (KT) a horní vrstva TiN odolává abrazivnímu opotřebení a snižuje tření.



Obrázek 17 – Povlakovaný SK [14]

Další typické vícevrstvé povlaky jsou například $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$, AlTiN-TiAlN , TiCN-TiN , TiAlN-TiN , TiAlSiN-TiN a další. Co se týče povlakovaných keramických a CBN řezných nástrojů, tak se jedná většinou pouze o povlak TiN , který má za úkol snižovat tření mezi obrobkem a nástrojem. [2, 7, 9, 12, 14]

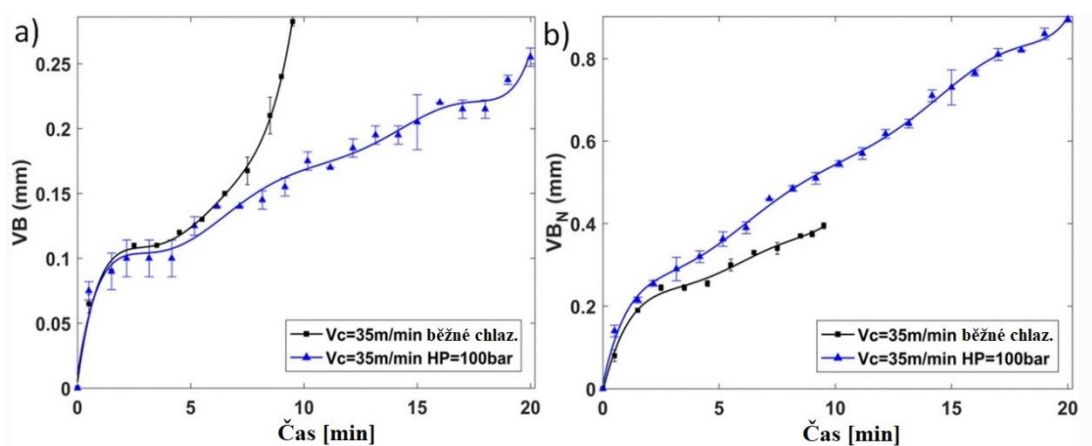
4.2.13. Lubrikační povlaky

Jsou občasné používány pro snížení tření mezi nástrojem a obrobkem při obrábění na sucho. Jedná se většinou o MoS_2 nebo WC/C . Tření snižují až o polovinu, což vede k menšímu tepelnému zatížení nástroje, menšímu opotřebení, lepšímu odvodu třísky a v neposlední řadě také ke zlepšení kvality obrobené plochy. [2, 12, 14]

4.3. Řezné podmínky

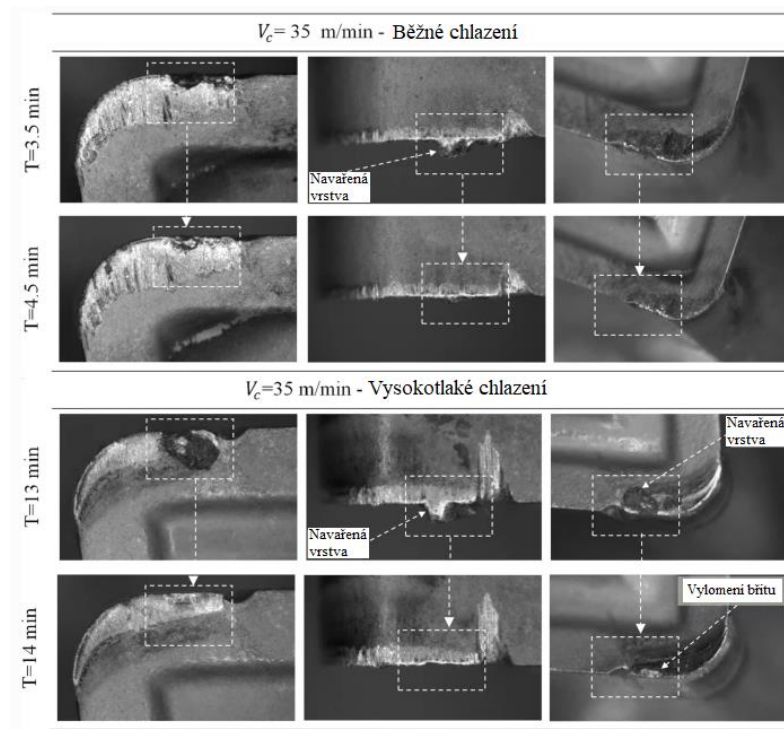
Použití SK s povlakem TiAlN/TiN na obrábění žárovzdorné slitiny INCONEL 718:

Použit byl polotovár o průměrné tvrdosti 49,3 HRC. Při experimentu byl porovnáván vliv běžného a vysokotlakého chlazení (HP = 100 bar) na opotřebení a životnost nástroje při konstantním přísmvu 1,5 mm, posuvu 0,1 mm/ot a řezné rychlosti 35 m/min.



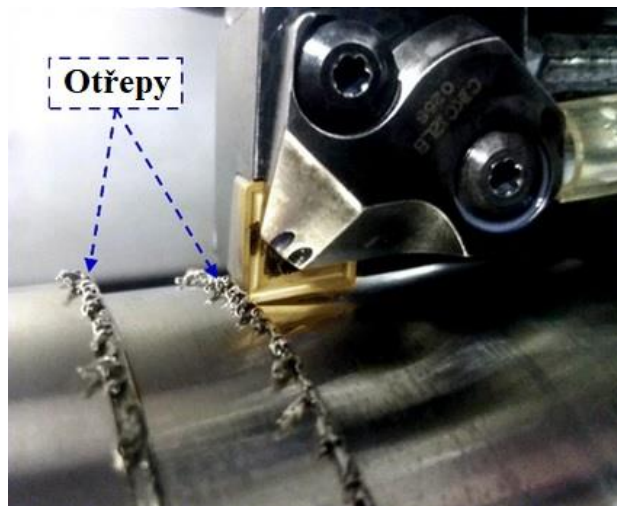
Obrázek 18 – Opotřebení břitu v průběhu obrábění [17]

Na obrázku 18 je zřejmé, že při použití běžného chlazení dojde v určitý moment k extrémnímu opotřebení na čele nástroje. To je způsobeno postupným narůstáním adhezivní vrstvy na nástroji v průběhu obrábění a následnému odtržení této vrstvy a rázovému poškození nástroje. Tento jev je při použití HP eliminován tím, že se jednotlivé adhezivní vrstvy oddělují od nástroje a nevzniká tak velká nestabilní vrstva, což vede ke konstantnímu opotřebování.



Obrázek 19 – Porovnání opotřebení nástroje [17]

Dominantním způsobem opotřebení nástroje je vznik vrubu. Vrub se tvoří ve vzdálenosti hloubky řezu v místě kontaktu nástroje s horní plochou třísky v důsledku plastického zpevnění povrchu polotovaru a tlakovému navařování třísek. V místě tohoto poškození poté dochází ke špatnému oddělování třísek a tvorbě otřepů (viz obrázek 20). [17]



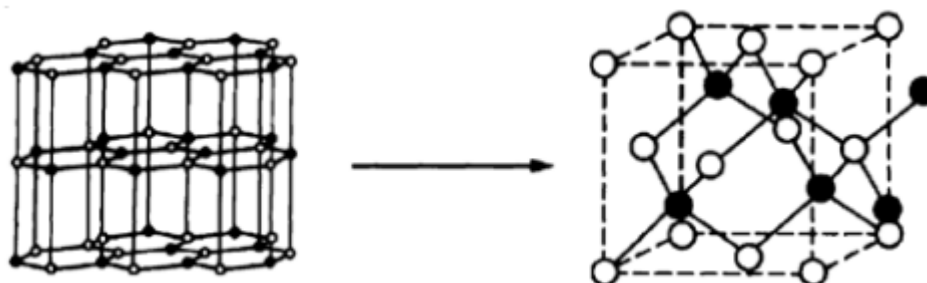
Obrázek 20 – Tvorba otřepů kvůli vrubu na nástroji [17]

5. Polykrystalický kubický nitrid boru (CBN)

První objev CBN přišel v 60. letech 20. století po zjištění, že se hexagonální mřížka nitridu boru dá za určitých podmínek změnit na kubickou mřížku. CBN je hned po diamantu druhým nejtvrdším materiálem používaným pro obrábění.

5.1. Výroba

Výroba CBN se provádí z nitridu boru s hexagonální mřížkou, který se spolu s tavidly (alkalické kovy) zahřeje na teplotu okolo 1 500 °C a stlačí na tlak 5,5 až 8 GPa. Tlak může být statický nebo ve formě rázových vln. Za těchto podmínek mohou vznikat krystaly CBN různých velikostí, přičemž za použitelné se považují krystaly o velikosti větší než 0,1 mm. Takto vyrobené krystaly se spojí s kovovým nebo keramickým pojivem a vzniklá destička o velikosti jednotek milimetrů se připájí na karbidový nosič ve tvaru klasických vyměnitelných břitových destiček pro kompatibilitu s nástrojovými držáky. [1, 2, 18]



Obrázek 21 – Přeměna hexagonální krystalické mřížky na kubickou krystalickou mřížku [3]

5.2. Vlastnosti

Fyzikální vlastnosti

Tepelná vodivost

Touto charakteristikou se nijak výrazně neliší od SK typu K. Pohybuje se tedy mezi 50 až 100 $W m^{-1} K^{-1}$.

Délková roztažnost

Délková roztažnost je jen mírně menší než u běžně používaných SK typu K. Její rozmezí je 4,6 až $4,9 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

Mechanické vlastnosti

Tvrдост

Tato vlastnost je hlavní předností CBN. Nabývá hodnot 4 000 až 5 500HV, což je přibližně 3krát více než tvrdosti SK všech typů. [1, 2, 3]

5.3. Rozsah použití

CBN má velmi dobrou stabilitu při vysokých teplotách. K žádným chemickým změnám ve struktuře nedochází až do teploty 1 400 °C. Tato skutečnost spolu s vysokou tvrdostí a odolností proti otěru umožňuje použití na ty nejextrémnější obráběcí aplikace jako je produktivní obrábění šedé litiny, tvrzené litiny, rychlořezné oceli nebo nachází uplatnění jako jediná náhrada za klasické broušení kalených ocelí s tvrdostí nad 55 HRC. Díky dobré lomové houževnatosti a správné geometrii břitu se oproti řezné keramice dá použít i na přerušované řezy kalených ocelí. Ovšem co se týká netvrzených materiálů, tak je jeho použití nedoporučené, jelikož houževnatější materiály, jakými jsou například oceli s tvrdostí menší než 45 HRC, způsobují zvýšené opotřebení břitu.

Pro použití CBN se výhradně nedoporučuje chlazení při obrábění, jelikož se princip obrábění CBN částečně zakládá právě na jeho vysoké odolnosti a zachování vlastností i při vyšších teplotách oproti obráběným materiálům. [1, 2, 5, 6, 12, 18]

5.4. Řezné podmínky

Jemnozrný CBN (označení dle Iscar IB10H) - použití na obrábění kalených ocelí s tvrdostí 60-65 HRC:

řezná rychlost: 100-220 m/min

posuv na otáčku: 0,05-0,2 mm/ot

přísuv: dle použitého tvaru destičky

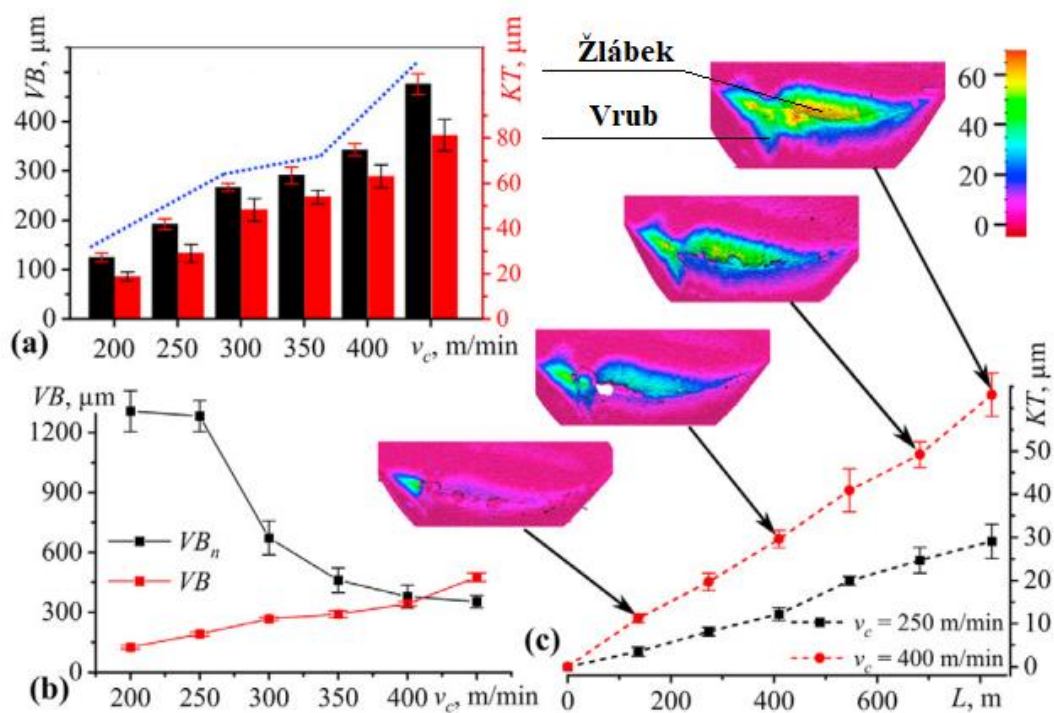
chlazení: nepoužívat

V kategorii obrábění tvrzených materiálů není příliš mnoho možností volby. Jedinou alternativou CBN, v případě takto vysokých tvrdostí, je ŘK. V případě povlakované (TiN) řezné keramiky ($Al_2O_3 + TiCN$) od stejného výrobce s označením IN420 se doporučená řezná rychlost pohybuje v rozmezí 60-140 m/min. Produktivita CBN je tedy o 50% vyšší. [7]

Použití CBN na obrábění superslitiny na bázi niklu s označením INCONEL 718:

Jedná se o slitinu niklu, železa, chromu, niobu, molybdenu a titanu. Její tvrdost dosahuje až 45 HRC. Jako řezný materiál byl použit CBN s 35 % obsahem keramického pojiva. Posuv na otáčku byl zvolen na 0,15 mm/ot, hloubka řezu 0,25 mm, řezné rychlosti 200 m/min až 450 m/min a bylo použito chlazení.

Na obrázku 22 je vidět, že při zvyšující se řezné rychlosti se zmenšuje opotřebení ve tvaru vrubu a začne převládat opotřebení na hřbetě (VB). Opotřebení ve tvaru vrubu (VB_n) je způsobováno tlakovým navařováním třísek, což je charakteristické při obrábění žárovzodorných slitin. Při řezné rychlosti 400 m/min se už po 2 minutách obrábění na čele nástroje vytváří značný žlábek (KT = hloubka žlábků), který zeslabuje břit a může vést k vylomení špičky nástroje.

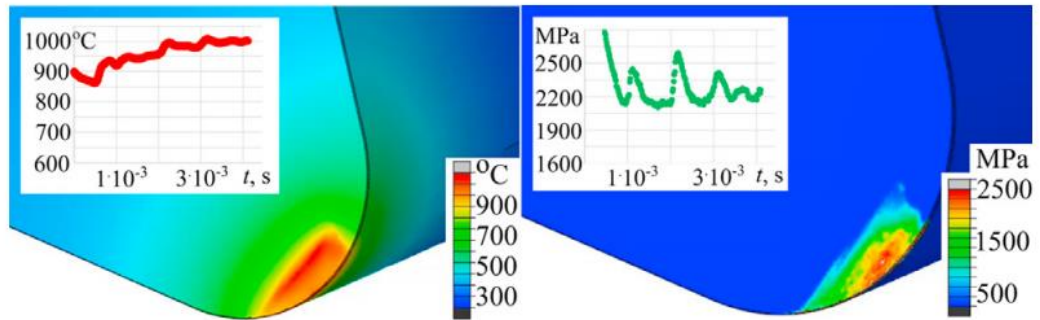


Obrázek 22 - Znárodnění velikosti opotřebení VB a KT v závislosti na řezné rychlosti při uražené vzdálenosti 820m [19]

Pro největší produktivitu nástroje je vhodné volit vyšší řezné rychlosti, při kterých se sice zvětšuje abrazivní opotřebení a vzniká větší žlábek na čele, ale eliminuje se vznik extrémního vrubu (VB_n). Nejideálnější řezná rychlost z pohledu produktivity se pohybuje okolo 400 m/min. Životnost nástroje při zvoleném $VB_{\text{max}} = 0,6 \text{ mm}$ je přibližně 3,5 minuty.

Při porovnání CBN s předchozí studií (v kapitole 2. Řezná keramika – řezné podmínky) obrábění této slitiny pomocí ŘK dojdeme k závěru, že použitá ŘK je přibližně o 50% produktivnější než CBN. Použití CBN tedy není ekonomicky příliš vhodné, jelikož i jeho cena je v porovnání s ŘK vyšší.

Dále bylo také zkoumáno tepelné zatížení a tlak na čele nástroje. Teplota v místě tvorby žlábků dosahuje 1 000 °C a tlak ve špičkách překračuje 2 500 MPa. [19, 20]



Obrázek 23 – Tepelné zatížení a napětí na čele nástroje při řezné rychlosti 250 m/min [19]

6. Polykrystalický diamant (PCD)

Stejně jako CBN má PCD kubickou krystalovou mřížku, která vzniká přetvořením z hexagonální krystalické mřížky uhlíku. Uměle vyrobený diamant má nepatrně odlišné vlastnosti od diamantu přírodního, jelikož nejsme schopni vyvinout nejvhodnější podmínky pro jeho vznik, jakými jsou extrémní teploty a tlaky.

6.1. Výroba

Principem je stejná jako výroba CBN. Použita je pouze vyšší teplota v mezích 1500-2000 °C za podobného tlaku 6,5 až 8 GPa. Krystaly diamantu jsou poté spojeny pomocí kovového pojiva a tato malá destička je připájena na karbidový nosič stejně jako CBN. [1, 2, 18]

6.2. Vlastnosti

Fyzikální vlastnosti

Tepelná vodivost

Ve prospěch tato charakteristika PCD bohužel nejde, jelikož je až řádově vyšší než u CBN nebo SK. Nabývá tedy hodnot okolo 400 až 900 W m⁻¹ K⁻¹ a tudíž je tepelné zatížení nástroje poměrně vysoké. [1, 21]

Délková roztažnost

Ze všech zmíněných řezných materiálů má PCD nejmenší délkovou roztažnost. Koeficient se pohybuje přibližně okolo $3,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Mechanické vlastnosti

Tvrдость

Diamant je nejtvrdší známý materiál na zemi. Jeho tvrdost je v závislosti na parametrech výroby 6 000 až 10 000 HV. To je například 2krát více než u CBN a až 5krát více než u SK. Výsledná tvrdost slinované destičky je o něco menší, přibližně 5 000 až 8 000 HV. [1, 2, 3]

6.3. Rozsah použití

Celkové vlastnosti pro obrábění diamantem se hodí pouze na lehčí obrábění či dokončování. Vysoká tvrdost jde na úkor křehkosti, z čehož plyne, že se PCD nehodí ani na přerušované řezy. Pro obrábění železných slitin je jeho použití nemožné kvůli vysoké afinitě uhlíku k železu za zvýšených teplot. Další omezení je z pohledu teploty řezání, ta totiž nesmí překročit 600°C. Je tedy vhodný pouze na obrábění neželezných kovů, jimiž jsou hliník, měď a jejich slitiny nebo na dokončovací operace pro obrábění některých titanových slitin. Na titanové slitiny je ovšem potřeba použít vhodnou řeznou kapalinu. Pro tyto aplikace má PCD při správném užívání velmi dlouhou životnost ostří a jeho použití se i navzdory vyšší ceně ekonomicky vyplatí. Dále se také používá na obrábění nástrojů ze SK s vyšším podílem pojiva. [1, 9, 18]

6.4. Řezné podmínky

PCD (označení dle Sandwik Coromant CD10) - použití na odlévané a tvářené slitiny hliníku s tvrdostí do 100 HB:

řezná rychlost: 2 000 (až 2 500) m/min

posuv na otáčku: 0,05-0,4 mm/ot

přísuv: dle použitého tvaru destičky

chlazení: volitelné

Porovnání viz kapitola Slinuté karbidy typu K.

Použití na slitiny hliníku s obsahem křemíku 16-22% a tvrdostí 130 HB:

řezná rychlost: 770 (až 960) m/min

posuv na otáčku: 0,05-0,4 mm/ot

přísuv: dle použitého tvaru destičky

chlazení: volitelné

V tomto případě má PCD, při porovnání s SK od stejného výrobce s označením H10, 2krát větší řeznou rychlost ale 2 krát menší posuv na otáčku. Stále ovšem platí, že životnost PCD je daleko větší než životnost SK. [5]

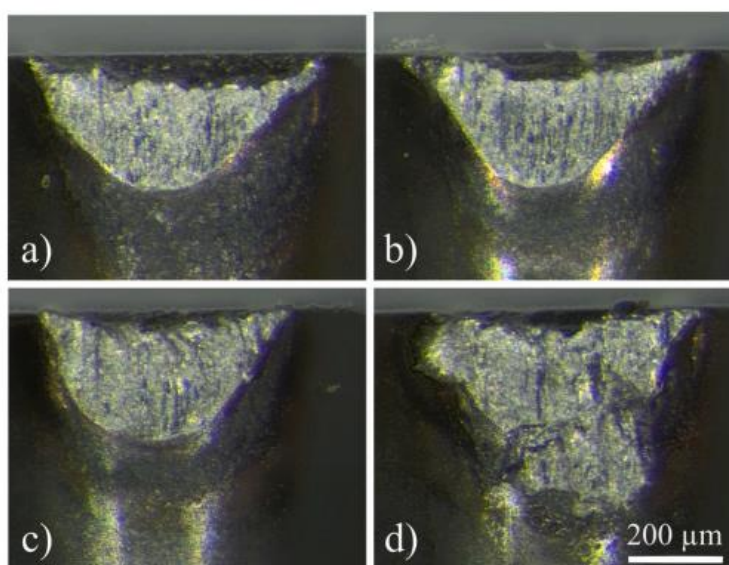
Použití PCD na titanové slitině Ti6Al4V a jeho porovnání s CBN:

Na experiment byla použita titanová slitina o pevnosti v tahu 955 MPa a tvrdosti 31 HRC. Použitý PCD se skládal ze zrn o velikosti 3-15 mikrometrů a 12% kobaltu. Materiál CBN byl tvořen zrnky CBN a 15% pojiva složeného převážně z hliníku, titanu, chromu a niklu. Řezné podmínky byly nastaveny následovně: posuv na otáčku 0,10 mm, přísuv 0,3mm a řezná rychlost nejprve 300 m/min a poté 350 m/min. Použito bylo vysokotlaké chlazení.

Výsledkem bylo měření životnosti nástroje při zvolených řezných podmínkách. Z tohoto pohledu se PCD ukázal jako jasná volba, což se zdálo být předvídatelné už z vlastností obráběného materiálu, jelikož obráběná slitina je pro použití CBN příliš měkká. Životnost PCD při řezné rychlosti 300 m/min dosahovala 30 minut, zatímco u CBN se břitová destička opotřebila na neúnosnou mez už po 5,7 minutách a pro tuto aplikaci se při přihlédnutí na životnost nástroje CBN tolik nehodí. Při zvýšení řezné rychlosti na 350 m/min se rapidně snížila životnost PCD. Zatímco snížení životnosti bylo u CBN 42%, tak u PCD bylo toto snížení o 72%. Podrobnější výsledky viz tabulka 7.

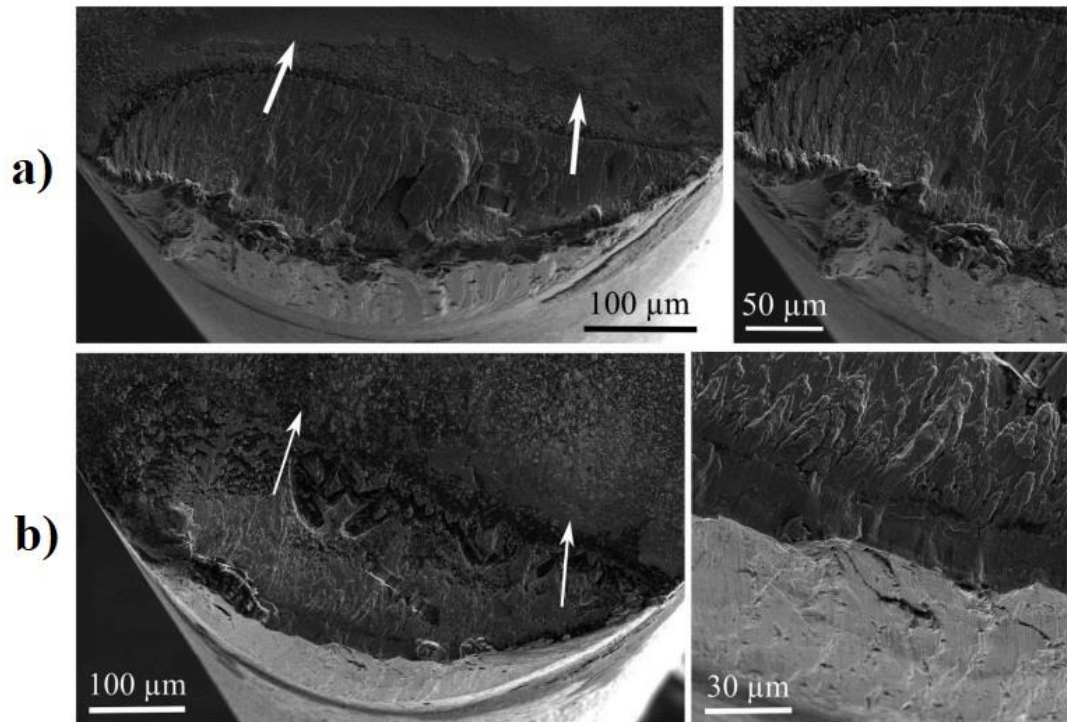
Tabulka 7 – Srovnání životnosti nástroje a drsností obrobené plochy [22]

Materiál nástroje	PCD		CBN	
	a)	b)	c)	d)
Vzorek	a)	b)	c)	d)
Řezná rychlost [m/min]	300	350	300	350
Životnost nástroje [min]	30	7,8	5,7	3,3
Uražená vzdálenost [m]	8990	2720	1720	1140
Drsnost Ra[um]	1,4	1,2	1,1	1,6



Obrázek 24 – Srovnání opotřebení břítu nástroje [22]

Na obrázku 24 je snímek opotřebení ostří na konci životnosti nástroje. V případech a), b), c) se jedná o řízený abrazivní otěr. V případě d) se jedná o nepředvídatelné opotřebení nástroje, které bylo způsobeno navařováním adhezivní vrstvy na břit a jejím následným odtrháváním. Takto opotřebovaný nástroj poté zhoršuje kvalitu obrobeného povrchu a nevykazuje dlouhou životnost (viz tabulka 7).



Obrázek 25 - Mikrosnímek břitu a) CBN, b) PCD po opotřebení [22]

Na obrázku 25 a) je vidět navařená adhezivní vrstva na nástroji z CBN. Nástroj z PCD (b), díky svému nízkému koeficientu tření a nízké náchylnosti k adhezi, navařování této nadměrné adhezivní vrstvy odolává. [22]

Závěr

Slovo perspektivní řezné materiály je značně zavádějící, jelikož vzbuzuje pohled do budoucnosti a neprobádaných odvětví. Tímto slovem se ale myslí materiály, které se běžně používají v dnešní době a které dávají ekonomický smysl. Bez jejich užití se v budoucnosti neobejdeme a jejich výzkum či vylepšování jejich vlastností bude přínosné.

Ze všech zmíněných materiálů neexistuje jediný, který by byl ideálním materiálem na všechny aplikace. Při volbě řezného materiálu je tedy nutno zvážit více kritérií kterými jsou: obráběný materiál, způsob obrábění (přerušovaný/nepřerušovaný řez, hrubování/dokončování), dostupnost a cena řezného materiálu, požadovaná přesnost a kvalita obrobené plochy, sériovost výroby a mnoho dalších. V případech velkosériové výroby nám do kritérií může vstupovat i faktor výměny opotřebovaných nástrojů. To nás může vést k použití třeba i méně vhodných řezných materiálů nebo úpravě řezných podmínek mimo doporučené meze jen z důvodu odladění a synchronizace životnosti všech nástrojů ve výrobě. Tím můžeme dosáhnout maximální efektivity výroby.

V případě zmíněných doporučených řezných podmínek vstupují do této problematiky různá omezení či faktory, kterými mohou být: parametry stroje (malý výkon, nízké otáčky, nedostatečná tuhost, možnost mazání/chlazení, technický stav stroje atd.), správné upnutí obrobku, různé odchylky ve vlastnostech polotovaru a tak podobně...

Jednotlivé závěry bakalářské práce plynou ze zmíněných porovnání produktivity a životnosti nástrojů v každé z kapitol a do stručného závěru se nedají obecně a hlavně stručně shrnout.

Seznam použité literatury

- [1] WRIGHT, Paul, K. a E. M. TRENT. *Metal cutting* [online]. Butterworth-Heinemann, 2000. ISBN 075067069X;9780750670692
- [2] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2
- [3] SMITH, Graham T. *Cutting Tool Technology: Industrial Handbook* [online]. 1. Aufl. London: Springer Verlag London Limited, 2008. ISBN 9781848002043;1848002041
- [4] MÁDL, Jan, Jindřich KAFKA, Martin VRABEC a Rudolf DVOŘÁK. *Technologie obrábění*. 2.př. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [5] *Soustružnické nástroje* [online]. SANDVIK Coromant, 2020 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/downloads/pages/default.aspx>
- [6] *Soustružení 2021–2022* [online]. Dormer Pramet, 2021 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://shop.dormerpramet.com/cz/cs/catalogs>
- [7] *Soustružnické nástroje* [online]. Iscar, 2022 [cit. 2022-03-17]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/newarticles.aspx/lang/cs/newarticleid/2393>
- [8] Keramické materiály: Technická keramika od expertů na keramiku. *CeramTec* [online]. CeramTec [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/>
- [9] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Sandvik Coromant, 1997. ISBN 91-972-2994-6.
- [10] SIVALINGAM, Vinothkumar, Zhuoliang ZAN, Jie SUN, Baskaran SELVAM, Munish Kumar GUPTA, Muhammad JAMIL a Mozammel MIA. Wear behaviour of whisker-reinforced ceramic tools in the turning of Inconel 718 assisted by an atomized spray of solid lubricants. *Tribology international*. Elsevier, 2020, 148(Journal Article), 106235. ISSN 0301-679X. Dostupné z: doi: 10.1016/j.triboint.2020.106235
- [11] SARJANA, S. S., I. BENCHEIKH, M. NOUARI a A. GINTING. Study on cutting performance of cermet tool in turning of hardened alloy steel. *International journal of refractory metals & hard materials*. Elsevier, 2020, 91(Journal Article), 105255. ISSN 0263-4368. Dostupné z: doi: 10.1016/j.ijrmhm.2020.105255
- [12] STEPHENSON, David A., John S. AGAPIOU a Taylor & Francis eBooks (online služba). *Metal cutting theory and practice* [online]. Third. New York; Boca Raton; London;: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. ISBN 1315373114;9781315373119
- [13] Coating Portfolio: Cutting Tools. *Ionbond* [online]. Ionbond, 2022 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.ionbond.com/coating-services/cutting-tools/coating-portfolio/>

- [14] INSPEKTOR, Aharon a Paul A. SALVADOR. Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review: A review. *Surface & coatings technology*. Elsevier B.V, 2014, 257(Journal Article), 138-153. ISSN 0257-8972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2014.08.068
- [15] LÜ, Wenzhang, Guojian LI, Yaoyao ZHOU, Shiyong LIU, Kai WANG a Qiang WANG. Effect of high hardness and adhesion of gradient TiAlSiN coating on cutting performance of titanium alloy. *Journal of alloys and compounds*. Elsevier B.V, 2020, 820(Journal Article), 153137. ISSN 0925-8388. Dostupné z: doi:10.1016/j.jallcom.2019.153137
- [16] Povlaky: ZrN. *ProTech Coating Service* [online]. Prešov: ProTech Coating Service [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.commercservice.sk/--29-94-zrn>
- [17] KHOCHTALI, Haithem, Yessine AYED, Farhat ZEMZEMI a Wacef BENSALÉM. Tool wear characteristics in rough turning of Inconel 718 with coated carbide tool under conventional and high-pressure coolant supplies. *International journal of advanced manufacturing technology*. London: Springer London, 2021, 114(Journal Article), 2371-2386. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-021-07002-9
- [18] Nástrojové materiály. *Sandvik Coromant* [online]. Sandvik Coromant [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
- [19] BUSHLYA, Volodymyr, Filip LENRICK, Axel BJERKE, Hisham ABOULFADL, Mattias THUVANDER, Jan-Eric STÅHL a Rachid M'SAOUBI. Tool wear mechanisms of PcbN in machining Inconel 718: Analysis across multiple length scale: Analysis across multiple length scale. *CIRP annals*. Elsevier, 2021, 70, 73-78. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi: 10.1016/j.cirp.2021.04.008
- [20] Opotřebení břitu. *Sandvik Coromant* [online]. Sandvik Coromant [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>
- [21] EKIMOV, E.A., N.V. SUETIN, A.F. POPOVICH a V.G. RALCHENKO. Thermal conductivity of diamond composites sintered under high pressures. *Diamond & Related Materials*. Elsevier B.V, 2008, 17, 838-843. Dostupné z: doi: 10.1016/j.diamond.2007.12.051
- [22] LINDVALL, Rebecka, Filip LENRICK, Henrik PERSSON, Rachid M'SAOUBI, Jan-Eric STÅHL a Volodymyr BUSHLYA. Performance and wear mechanisms of PCD and pcBN cutting tools during machining titanium alloy Ti6Al4V. *Wear*. Elsevier B.V, 2020, 454-455, 203329. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi: 10.1016/j.wear.2020.203329