VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY

COATED CEMENTED CARBIDES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Miroslav BERKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
doc. Ing. Anton HUMÁR, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Miroslav Berka

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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 bakalářské práce:

Povlakované slinuté karbidy

v anglickém jazyce:

Coated cemented carbides

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce je zaměřena na povlakované slinuté karbidy z hlediska metod povlakování, materiálů povlaků, fyzikálně mechanických vlastností a metod jejich kvantifikace, užití a současných trendů vývoje a výroby u renomovaných špičkových producentů nástrojů a nástrojových materiálů.

Cíle bakalářské práce:

1. Základní dělení materiálů pro řezné nástroje
2. Charakteristika povlakovaných SK (metody povlakování, materiály povlaků, fyzikálně mechanické vlastnosti a metody jejich měření, aplikační oblasti)
3. Povlakované SK v sortimentu výroby nejvýznamnějších domácích a světových producentů nástrojů a nástrojových 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. HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. MM publishing s. r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-.
3. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. MM Průmyslové spektrum - Speciální vydání. Září 2004. ISSN 1212-2572., s. 84-96.
4. Odborné časopisy: CIRP Annals - Manufacturing Technology (http://www.sciencedirect.com/science/journal/00078506), International Journal of Machine Tools and Manufacture (http://www.sciencedirect.com/science/journal/08906955), 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), Surface and Coatings Technology (http://www.sciencedirect.com/science/journal/02578972), Thin Solid Films (http://www.sciencedirect.com/science/journal/00406090), Wear (http://www.sciencedirect.com/science/journal/00431648).
5. Technické materiály a prospekty firem Ceratizit, Hauzer, Ionbond, Iscar, Kennametal, Korloy, Mitsubishi, Oerlikon Balzers, Platit, Pramet Tools, Sandvik Coromant, Seco, SHM, Walter, Widia, WNT.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 30.10.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá povlakovanými slinutými karbidy, které se využívají pro výrobu řezných nástrojů. V první části jsou uvedeny a popsány základní řezné materiály. Druhá, nejobsáhlejší, část je zaměřena už pouze na povlakované slinuté karbidy – na výrobu, metody povlakování, druhy a vlastnosti povlaků. Závěrečná část se zabývá povlakovanými slinutými karbidy v sortimentu výroby nejvýznamnějších světových a domácích producentů nástrojů a nástrojových materiálů.

Klíčová slova

Řezné nástroje, povlakované slinuté karbidy, vlastnosti, metody povlakování, předdepoziční úpravy

ABSTRACT

This thesis deals with coated cemented carbides, which are used for the manufacture of cutting tools. In the first part are listed and described basic cutting materials. The main part is aimed on the coated cemented carbides - coating methods, manufacturing and properties of coatings. The third part deals with coated cemented carbide product range in the world's leading producer of tools and tool materials.

Key words

cutting tools, coated cemented carbides, properties, coating methods, pre-deposition adjustments

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BERKA, M. *Povlakované slinuté karbidy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 39s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humár, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Povlakované slinuté karbidy** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Miroslav Berka

PODĚKOVÁNÍ.

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

OBSAH

ÚVOD 6
1. ZÁKLADNÍ DĚLENÍ MATERIÁLŮ PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE 7
2. CHARAKTERISTIKA POVLAKOVANÝCH SLINUTÝCH KARBIDŮ 10
2.1. Podkladové slinuté karbidy 10
2.2. Metody povlakování 11
2.2.1. Metoda CVD 12
2.2.2. Metoda PVD 14
2.2.2.1. Naprašování 15
2.2.2.2. Napařování 16
2.2.2.3. Iontová implantace 16
2.3. Úpravy nástrojů před povlakováním 17
2.3.1. Broušení 17
2.3.2. Odmašťování 18
2.3.3. Mokré čištění 18
2.3.4. Pískování 18
2.3.5. Omílání v granulátech 18
2.3.6. Iontové čištění 18
2.3.7. Žíhání ve vakuu 19
2.3.8. Stripping 19
2.4. Vlastnosti povlaků a jejich vyhodnocování 19
2.4.1 Fyzikální vlastnosti 22
2.4.1.1. Tvrdost 22
2.4.1.2. Drsnost 22
2.4.1.3. Tloušťka 23
2.4.1.4. Adheze 23
2.4.1.5. Kluzné vlastnosti 23
2.4.2. Chemické vlastnosti 23
2.4.2.1. Odolnost vůči oxidaci 23
2.4.2.2. Chemická stabilita 24
2.4.2.3. Tepelná stabilita 24
3. POVLAKOVANÉ SK V SORTIMENTU VÝROBY VYBRANÝCH PRODEJCŮ 25
3.1. Povlakované slinuté karbidy pro soustružení materiálu skupiny P 25
3.1.1. Pramet 25
3.1.2. Sandvik Coromant 26

3.1.3.Ceratizit....26
3.2. Povlakované slinuté karbidy pro soustružení materiálu skupiny M....28
3.2.1. Pramet....28
3.2.2. Sandvik Coromant....29
3.2.3. Ceratizit....30
3.3. Povlakované slinuté karbidy pro soustružení materiálu skupiny K....31
3.3.1. Pramet....31
3.3.2. Sandvik Coromant....32
3.3.3. Ceratizit....32
ZÁVĚR....35
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ....36
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK....39

ÚVOD

Obrábění je jedna z nejvýznamnějších částí strojírenské technologie. Jedná se o technologický proces, kdy řezný nástroj působí na polotovar a odebíráním materiálu vytváří požadovaný tvar, rozměry a jakost obrobku.

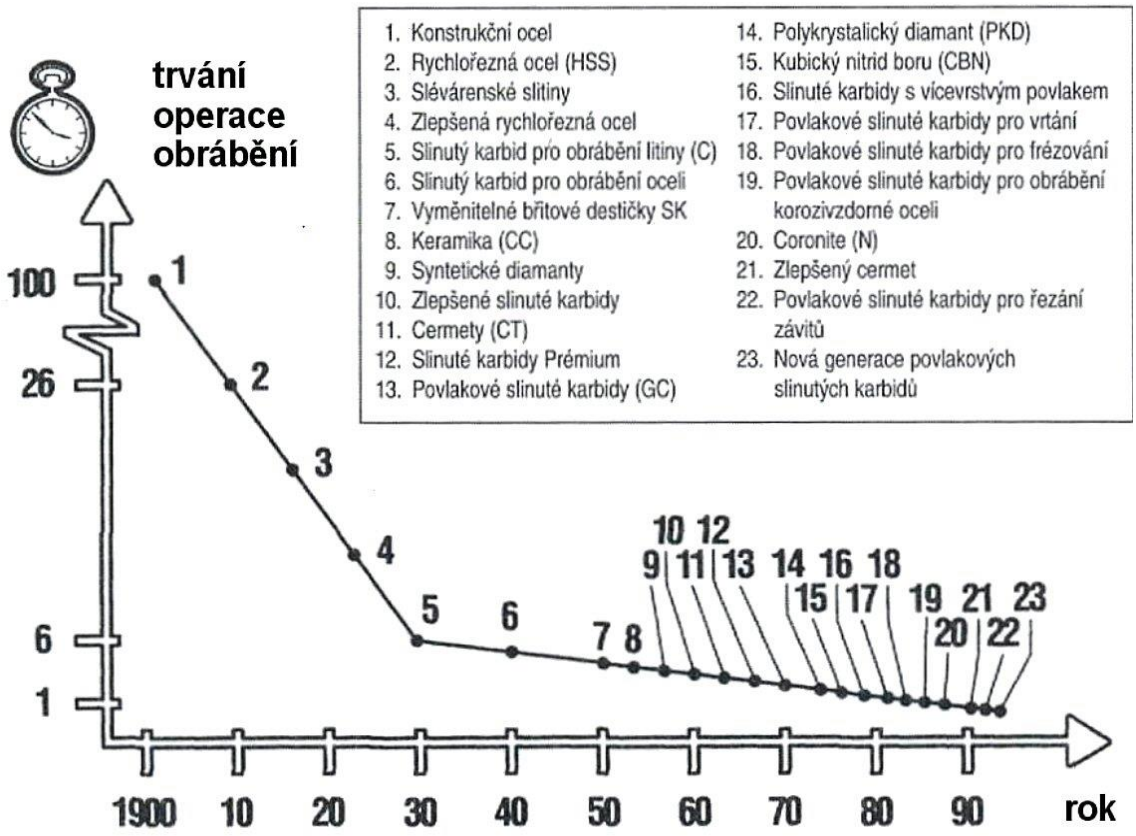
Řezné nástroje jsou z různých materiálů, mezi které patří nástrojové oceli, cermety, řezná keramika, tzv. supertvrdé materiály a především slinutý karbid, který zaujímá vedoucí postavení při obrábění. Řezné nástroje z povlakovaných slinutých karbidů jsou hojně využívané zejména díky jejich vynikající odolnosti proti opotřebení i při vysokých řezných rychlostech.

Slinutý karbid je produktem práškové metalurgie, vytvářený slinováním různých karbidů. Základním karbidem pro výrobu všech druhů SK je karbid wolframu (WC), jako další složky se využívají karbidy titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC) a chromu (Cr_3C_2). Tyto karbidy jsou navzájem pojeny vhodným kovovým prvkem. Ve většině případů se jako pojivo využívá kobalt (Co). Pro zlepšení vlastností na slinutý karbid nanášejí vrstvy povlaku.

Téměř padesátiletý výzkum povlakovaných slinutých karbidů reaguje na bleskový vývoj různých těžce obrobitelných materiálů. V současnosti tedy existuje veliká škála druhů povlakovaných slinutých karbidů lišící se typem substrátu, druhem a tloušťkou povlaku a také kombinací vrstev. Skoro na každý obráběný materiál tedy najdeme vhodný nástroj ze slinutého karbidu, který daný polotovar obrobí nejlépe. Moderní slinuté karbidy jsou často gradientně slinovány a pokryty různými vícevrstvými povlaky. Takhle upravené slinuté karbidy vykazují mnohem lepší vlastnosti, vyšší trvanlivost a jsou tedy i ekonomicky úspornější.

1. ZÁKLADNÍ DĚLENÍ MATERIÁLŮ PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE

Začátek vývoje řezných materiálů spadá do počátku 20. století. Tehdy byla jediným materiálem pro výrobu nástrojů ocel. Ve 30. letech nastal největší průlom v technologii – byl vynalezen slinutý karbid, který začal nástrojovou ocel vytlačovat z důvodu lepších mechanických vlastností (hlavně vysoké odolnosti proti opotřebení a tepelné stabilitě). Následoval velice rychlý vývoj dalších a dalších nových materiálů. V současnosti máme velkou škálu materiálů pro řezné nástroje. Prakticky pro každou operaci obrábění najdeme alespoň jeden řezný materiál, který určitý obrobek za určitých podmínek dokáže obrobit nejlépe. Obráběcí operace v roce 1900 vyžadovala 100 minut. Díky optimalizaci řezných nástrojů se čas potřebný k obrobení podařilo zkrátit stonásobně (viz obr. 1). V nejbližší době nelze očekávat vyvinutí zcela nového řezného materiálu, proto se výzkumníci zaměřují spíše na specifikaci optimálního využití již známých materiálů s velmi přesným vymezením aplikačních oblastí.



Obr. 1- Vývoj řezných materiálů [1]

Výběr materiálu je hlavním faktorem, který je třeba uvážit při návrhu úspěšné obráběcí operace, aby se minimalizovala poruchovost a zvýšila produktivita celého procesu. Proto je potřeba znát všechny mechanické vlastnosti a podmínky užití řezných materiálů (viz obr. 2).

Nástrojové oceli (NO) – Jejich hlavní předností je dobrá houževnatost a nižší pořizovací cena. NO se dělí na oceli uhlíkové a nízkolegované a vysokolegované (tzv. rychlořezné). Jediné využitelné oceli pro výrobu nástrojů na obrábění jsou vysokolegované rychlořezné oceli (HSS), které například se používají k výrobě pil, pilových pásů, pilových listů, sou-

stružnických nebo hoblovacích nožů, fréz, vrtáků. HSS vydrží v místě řezu maximálně 550 °C. Další nevýhodou je rychlé opotřebení a tudíž nízká trvanlivost. [28]

Slinuté karbidy (SK) – Slinutý karbid je produktem práškové metalurgie, který se vyrábí slinováním různých karbidů. Základním karbidem pro výrobu všech druhů SK je karbid wolframu (WC), jako další složky se využívají karbidy titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC) a chromu (Cr_3C_2). Tyto karbidy jsou navzájem pojeny vhodným kovovým prvkem. Ve většině případů se jako pojivo využívá kobalt (Co). Pro zlepšení vlastností se slinuté karbidy opatřují tenkým povlakem oxidů, nitridů, karbidů, popřípadě jejich kombinací. V dnešní době jsou povlakované SK nejčastěji používanými řeznými materiály pro obrábění kovů a to hlavně díky vynikající odolnosti proti opotřebení i při vysokých řezných rychlostech. Existuje velká škála různých slinutých karbidu s různými typy povlaků vhodných na obrábění prakticky všech materiálů. Slinuté karbidy dělí norma ISO podle oblasti využití na:

- P (modrá barva) – označuje SK pro obrábění materiálů tvořících dlouhou třísku (např. ocel, ocelolitinu, korozivzdornou ocel a temperovanou litinu). Jedná se o dvojkarbidové SK (WC + TiC + Co).
- M (žlutá barva) – označuje SK pro obrábění austenitických korozivzdorných ocelí, žáruvzdorných materiálů, manganových ocelí, legovaných druhů litin atd. Jedná se o vícekarbidové SK (WC + TiC + TaC.NbC + Co).
- K (červená barva) – označuje SK pro obrábění materiálů, tvořících krátkou, drobivou třísku jako například šedá litina, kalená ocel, neželezné materiály (hliník, bronzy, plasty atd.). Jedná se o jednokarbidové SK (WC + Co).
- N (zelená barva) – označuje SK pro obrábění neželezných slitin na bázi hliníku a k obrábění plastů.
- S (hnědá barva) – označuje SK pro obrábění neželezných slitin na bázi niklu, kobaltu, železa a titanu.
- H (šedá barva) – označuje SK pro obrábění zušlechtěných a kalených ocelí a tvrzených litin.

Tato klasifikace je vhodná, jedná-li se o volbu řezného materiálu pro určitý případ použití. Neudává podrobnější informace o požadovaných vlastnostech. Vlastnosti se dají zjistit až v katalozích jednotlivých výrobců. Každá skupina (P, M, K) je ještě upřesňována číslem v rozsahu od 01 do 40 (např. P30, K01). Skupiny s nižšími čísly jsou vhodné na dokončovací operace velkými řeznými rychlostmi, malým posuvem a malou hloubkou řezu. Naopak skupiny s velkým číslem jsou vhodné pro těžké obrábění, hrubování a přerušované řezy při nízkých řezných rychlostech a vyššího posuvu. Souhrnně se dá říci, že se zvyšujícím se roste objemové procento kobaltu, které vede k zvýšení houževnatosti nástroje. S menším číslem roste odolnost proti opotřebení. [1,14,33]

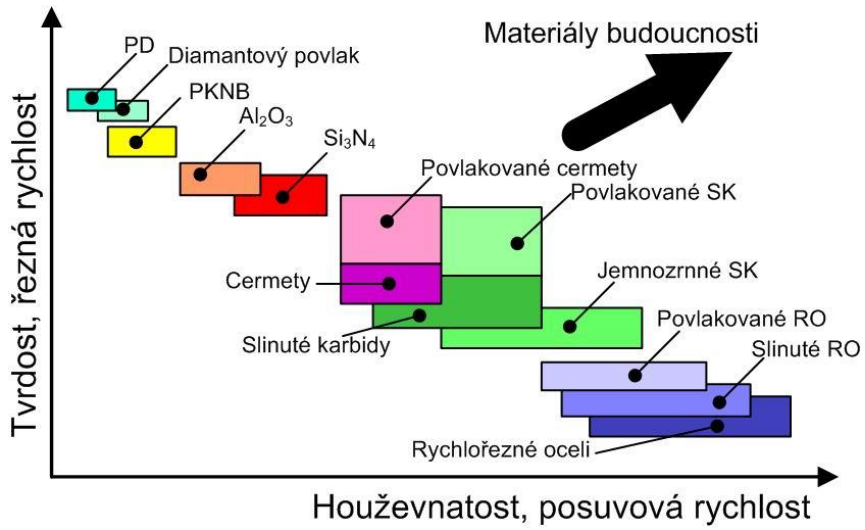
Cermety (CT) – Název cermet je kombinací slov keramika (CERamic) a kov (METal). Cermety lze považovat za slinuté materiály, zhotovené na bázi karbidu a nitridu titanu, místo na bázi karbidu wolframu. Ve srovnání se slinutými karbidy mají cermety vyšší odolnost vůči otěru a menší tendenci k ulpívání materiálu na břitu. Na druhou stranu mají cermety nižší odolnost vůči vzniku tepelných trhlin. Cermety se podobně jako slinuté karbidy povlakují k zlepšení řezných vlastností. Mezi přednosti cermetů patří vysoká odolnost proti opotřebení hřbetu a opotřebení ve tvaru žlábku na čele, vysoká chemická stabilita a tvrdost za tepla, malý sklon k vytváření nárůstků a rovněž malý sklon k oxidačnímu opo-

třebení. Využívají se často např. při dokončování korozivzdorných ocelí. Můžou se rovněž použít při obrábění všech materiálů na bázi železa. [1,14,15]

Řezná keramika (CC) – Původně se pod názvem „řezná keramika“ rozuměl oxid hlinitý Al_2O_3. Moderní definicí je keramika obecně charakterizována jako převážně krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Existují dva základní typy keramiky – na bázi oxidu hlinitého Al_2O_3 a na bázi nitridu křemíku Si_3N_4. Je to nástrojový materiál vykazující vysokou tvrdost za tepla, vysokou termochemickou stabilitu a nízkou tepelnou vodivost. Naopak hlavními nedostatky jsou její nízká odolnost proti tepelným trhlinám a nízká lomová houževnatost. Keramika je vhodná na obrábění šedé litiny, žáruvzdorné slitiny, kalené oceli, tvárné litiny a v některých případech také oceli. [1,14,15,33]

Polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB) – Jedná se o velmi tvrdý řezný materiál, jehož tvrdost překonává pouze diamant. Vykazuje mimořádnou tvrdost, vysokou tvrdost za tepla (i při extrémních teplotách kolem 1500 °C), velkou odolnost proti abrazivnímu opotřebení a při obrábění má vždy dobrou chemickou stabilitu. Z důvodu vysoké pořizovací ceny PKNB je vždy před volbou nutné zvážit, zdali není výhodnější použít řeznou keramiku, protože oblasti použití PKNB a keramiky se do jisté míry překrývají. PKNB je houževnatější a tvrdší než keramika ale nemá tak dobrou tepelnou a chemickou odolnost. I přes svoji vysokou cenu našel uplatnění zejména při obrábění ocelových výkovků, kalených ocelí a litin, slinovaných materiálů na bázi kobaltu a železa a žáruvzdorných slitin. [1,33]

Polykrystalický diamant (PKD) – Je to nejtvrdší známý materiál (v Mohsově stupnici označen číslem 10), proto je schopen odolávat vysokému abrazivnímu opotřebení. Jedná se o krystaly diamantu vzájemně spojeny slinováním za vysokých teplot a tlaků. Poloha krystalů je nahodilá a v žádném směru nevytváří místa, která by mohla být zdrojem lomu. S ohledem na vysokou křehkost vyžaduje PKD při použití stabilní podmínky, tuhé nástroje a stroje a vysoké řezné rychlosti. Nejčastější použití PKD je při soustružení a frézování abrazivních slitin hliníku a křemíku vysokými řeznými rychlostmi při dodržení vysoké jakosti povrchu a přesnosti rozměrů. [1,33]



Obr. 2- Mechanické vlastnosti a podmínky užití materiálů pro řezné nástroje [14]

2. CHARAKTERISTIKA POVLAKOVANÝCH SLINUTÝCH KARBIDŮ

Vývoj povlakování břitových destiček ze slinutého karbidu spadá do konce 60. let 20. století (první povlakovaný materiál byl GC125 firmy Sandvik Coromant s povlakem TiC, tloušťka vrstvy 4-5μm). Brzy nato byly vytvořeny další povlaky typu TiN, TiCN nebo Al_2O_3. V současnosti je většina (80 až 90%) vyměnitelných břitových destiček pro obráběcí nástroje vyráběna z povlakovaných slinutých karbidů. Jejich široké využití vyplývá z unikátní kombinace odolnosti proti opotřebení a houževnatosti. Kvůli vzrůstajícím požadavkům bylo vyvíjeno mnoho druhů povlakovaných karbidů pro různé obráběcí aplikace. Jednotlivé materiály si liší druhem povlaku, tloušťkou povlaku, kombinací vrstev, metodou povlakování, podkladovým slinutým karbidem atd. [14,15]

2.1. Podkladové slinuté karbidy

Slinuté karbidy se vyrábějí metodou práškové metalurgie. Proces výroby začíná získáním prášku z wolframové rudy. Prášek se nejčastěji získává technologií rozprašování tekutého kovu vlivem proudu plynu nebo tekutiny. Rozprášené kapky poté následkem nízké teploty tuhnou a vytváří jemný prášek. Následně se wolframový prášek slučuje s uhlíkem za vzniku karbidu wolframu. Poté se karbid wolframu smísí s Co a umístí do tzv. mlýnu, kde se rozemele. Objemové procento kobaltu a karbidu wolframu má rozhodující vliv na výsledné vlastnosti vytvořeného slinutého karbidu (viz tab. 1).

Tab. 1 - Vliv obsahu WC a Co na výsledné vlastnosti karbidu [14]

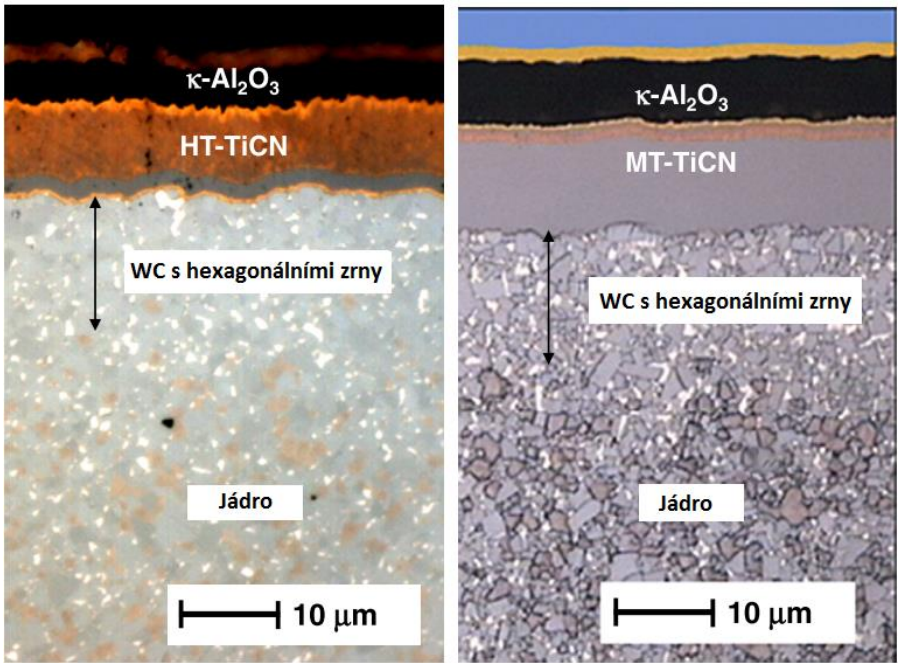
Složení [hm. %]		Měrná hmotnost [g cm^{-3}]	Tvrdost		Pevnost v ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa] [4)]	Modul pružnosti v tahu [GPa] [1)]	Měrná tepelná vodivost [W m^{-1}K^{-1}]	Součinitel délkové roztažnosti [10^{-6} K^{-1}]	Měrný odpor [μΩ cm]
WC	Co		[HRA]	[HV]						
100	-	15,7	92÷94	1800÷2000	300÷500	3000	722	122	5,7 ÷ 7,2	53
97	3	15,1÷15,2	90÷93	1600÷1700	1000÷1200	5900	670	88		
95,5	4,5	15,0÷15,1	90÷92	1550÷1650	1200÷1400	5800	640	84	3,4(0÷300°C) 4,1(300÷600°C)	
94÷94,5 [1)]	5,5÷6	14,8÷15,0	90÷91	1500÷1600	1600÷1800	5000	620	80	3,6(0÷300°C) 4,6(300÷500°C)	20
94÷94,5 [2)]	5,5÷6	14,8÷15,0	91÷92	1600÷1700	1400÷1600	5500	630 [2)]	80	5	21
91	9	14,5÷14,7	89÷91	1400÷1500	1500÷1900	4800	590	75		
90	10	14,3÷14,5	88,5÷90,5	1350÷1450	1550÷1950	4700	585	71		
89	11	14,0÷14,3	88÷90	1300÷1400	1600÷2000	4600	580	67	3,8(0÷300°C) 4,8(300÷600°C)	18
87	13	14,0÷14,2	87÷89	1250÷1350	1700÷2100	4500	560	59		
85	15	13,8÷14,0	86÷88	1150÷1250	1800÷2200	3900	540		6	
80	20	13,1÷13,3	83÷86	1050÷1150	2000÷2600 [3)]	3400	500		4,7(0÷300°C) 6,2(300÷600°C)	
75	25	12,8÷13,0	82÷84	900÷1000	2000÷2800 [3)]	3200	470		5,0(0÷300°C), 6,7(300÷600°C)	
70	30	12,3÷12,5	80÷82	850÷950	1800÷3000 [3)]	3000	440			
-	100	8,7		125÷250	700÷1200		180	71	5,1	14

Pozn.: 1) hrubozrnná fáze WC, 2÷4 μm; 2) jemnozrnná fáze WC, 0,5-2,0 μm;
3) výrazně závisí na velikosti zrna a změnách v obsahu uhlíku; 4) střední hodnoty

Dalším krokem je lisování. Proces probíhá v oboustranných lisech, aby byl výlisek zhutněn rovnoměrně v celém objemu. Při lisování se do formovaných směsí přidává tzv. plastifikátor, který zvyšuje stupeň zhutnění směsi. Lisováním se získá požadovaný

tvar, ale ne rozměry (slinováním se polotovar smrští přibližně o 17 až 20 %). Slinování probíhá ve slinovací peci, kde je vylisované těleso ohříváno na teplotu až 1600 °C (podle typu materiálu), kdy se roztaví kovové pojivo a spojí se s přítomnými karbidy. Následně je vzniklý slinutý karbid řízeně ochlazován v atmosféře H_2 nebo ve vakuu. [1,2,14,15]

Dříve se povlaky nanášely na slinuté karbidy (P, M, K) vyrobené klasickým slinováním. V dnešní době se už často povlaky nanášejí na speciální substráty připravené tzv. gradientním slinováním. Cílem použití tohoto typu slinování je snížení nebezpečí tvorby trhlin, které vznikají při povlakování CVD metodou v důsledku vysoké teploty. Gradientním slinováním lze dosáhnout toho, aby struktura jádra slinutého karbidu obsahovala kubická zrna (Ti,WC) s vysokou tvrdostí a tenká povrchová vrstva (v řádech desítek μm) pouze zrna hexagonálního karbidu WC a vyšší podíl pojivového kovu (Co) - viz obr. 3. Tím se u povrchové vrstvy zvýší houževnatost a nanesený povlak má lepší vlastnosti. Tyto funkčně gradientní slinuté karbidy by byly bez povlaku zcela nepoužitelné. [10,14,15]



Obr. 3 - Gradientně slinované karbidy [10]

2.2. Metody povlakování

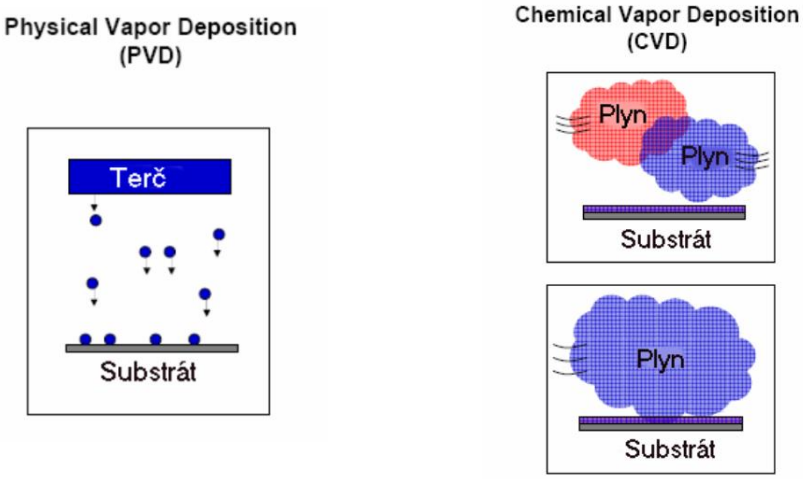
Kvůli zlepšení vlastností a zvýšení trvanlivosti se nanáší na slinutý karbid tenká vrstva z vhodného materiálu s vysokou tvrdostí, přilnavostí k povrchu a odolností proti opotřebení. Toto nanášení se provádí dvěma základními metodami:

Původní povlakovací metoda je **CVD** (Chemical Vapour Deposition – chemické napařování plynné fáze), která je prováděna formou chemické reakce různých plynů (chloridu titaničitého a metanu). Reakce probíhá za vysokých teplot mezi 700 – 1500 °C. Tato technologie je vhodná pro tvoření vícevrstvých povlaků, protože v jejím průběhu je možné snadno regulovat množství různých přiváděných plynů. Jedná se o hlavní metodu povlakování slinutých karbidů. Může být realizována ve více variantách: tepelně indukovaná, plazmaticky aktivovaná, elektronově indukovaná a fotonově indukovaná. [14,15,16,33]

Později, na začátku 80. let, tuto technologii povlakování doplnila metoda **PVD** (Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování), která byla původně využívána pro povla-

kování nástrojů z rychlořezných ocelí. Tato metoda je založena na fyzikálních principech napařování, naprašování a iontové implantace. Tato technologie je charakteristická nízkými pracovními teplotami (okolo 500 °C). Osvědčila se například u nanášení povlaků na složité profily a na ostré nástroje. [14,15,16,33]

Největší rozdíl mezi metodami CVD a PVD, mimo teploty, spočívá i ve způsobu získání kovového prvku povlaku (Ti, Al, Si): CVD - z plynné fáze, PVD z pevného materiálu terče (elektrody) - viz obr. 4 a kap. 2.2.1. a 2.2.2.



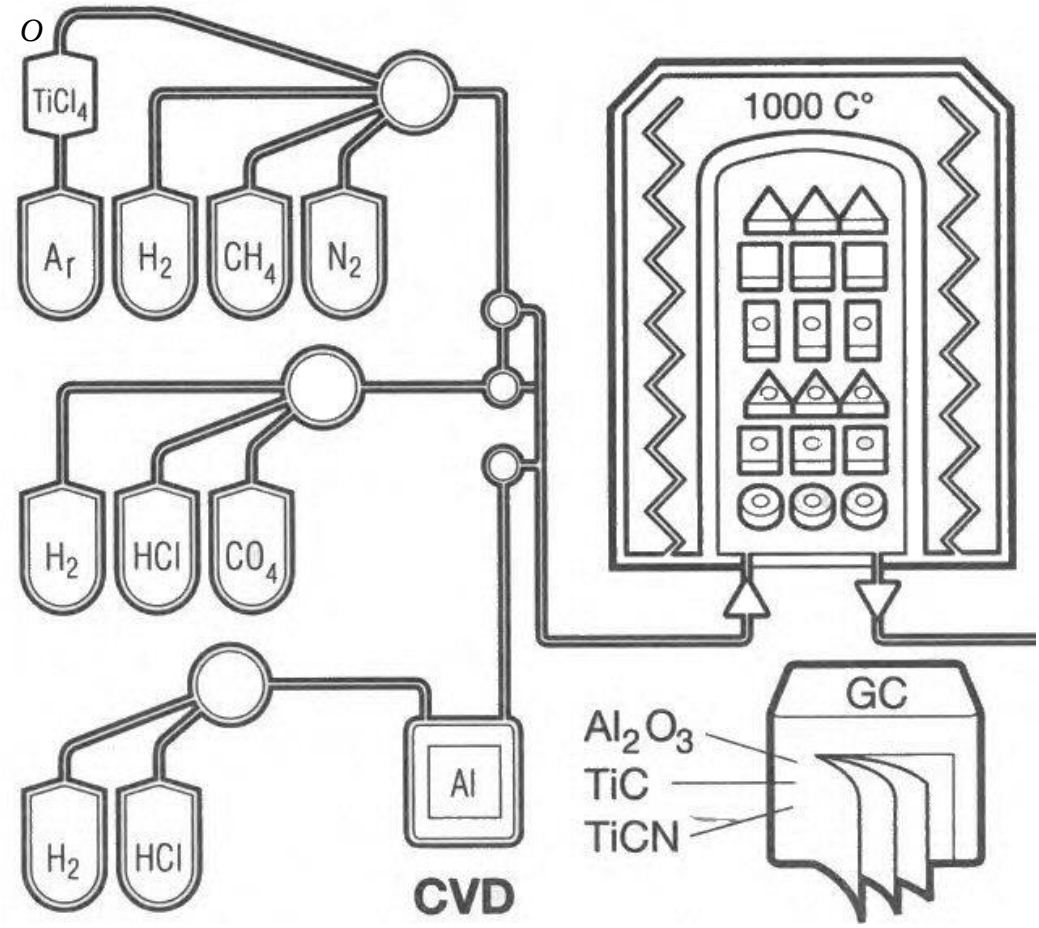
Obr. 4 - Rozdíl způsobu přípravy vrstvy mezi CVD a PVD [22]

2.2.1. Metoda CVD

Metodou CVD se povlak tvoří na základě chemických reakcí probíhajících v plazmě v blízkosti povrchu substrátu (podkladového slinutého karbidu). Na tomto povrchu se ukládají produkty této heterogenní reakce. Jelikož tento proces probíhá za vysokých teplot (700 – 1500°C), tuto metodu nelze použít na všechny materiály z důvodu teplotní degradace. Proto se povlakování metodou CVD používá především pro slinuté karbidy, které vykazují vysokou teplotní odolnost. Výchozí plyny musí obsahovat stabilní, ale přitom prchavou sloučeninu, která se v důsledku přivedení energie (ohřevem, plazmovým obloukem, laserem) chemicky rozkládá (např. $TiCl_4$, kovový halogenid). Plyn musí také obsahovat i nekovový reaktivní plyn (např. N_2, NH_4, CH_4). Dále je potřeba tzv. nosného plynu (nejčastěji Ar nebo H_2), který dopravuje danou směs plynů k povlakovanému předmětu a tím výrazně zvýší rychlost růstu vrstvy povlaku. Tento plyn také ovlivňuje redukci oxidů na povrchu substrátu a brání nežádoucím sekundárním reakcím. Technologie CVD umožňuje relativně jednoduše regulovat množství těchto přiváděných plynů, proto je také velice vhodná pro vytváření vícevrstvých povlaků různého typu (viz obr. 5).

Celý proces CVD povlakování probíhá v tzv. reaktorech. Reaktory se rozlišují na ty s horkou stěnou a studenou stěnou. U prvního typu je zapotřebí ohřívat nádobu, aby teplota na substrátu a na stěně reaktoru byla stejná. Nevýhodou tohoto typu je možnost usazování povlaku po stěnách a možná kontaminace povlaku substrátu z chemických reakcí mezi stěnou a parami. Tento reaktor je vhodný pouze pro reakce exotermické (vysoká teplota stěny zamezí nežádoucí usazování povlaku). U druhého typu je ohříván pouze držák substrátu. Tento reaktor je vhodný pouze pro endotermické reakce, protože substrát má větší teplotu než stěna reaktoru a proto reakce probíhají přednostně na něm. Tím nedochází ke

kontaminaci povlaku v důsledku reakcí mezi stěnou reaktoru a parami. Stěna tohoto reaktoru bývá často chlazena (např. vodou). [14,15]



Obr. 5 - Schéma metody povlakování CVD [1]

Primárně kvůli snížení procesní teploty se v současnosti konvenční CVD metoda nahrazuje jejími modifikacemi:

HFCVD (Hot Filament CVD – metoda CVD se žhavícím vláknem) - Tato metoda je založena na nažhaveném wolframovém vláknu umístěné v těsné blízkosti substrátu (asi 80 mm). Vlákno je ohříváno odporově a jeho teplota sahá až k 2400°C. Hlavní předností je rychlost depozice, která je až o jeden řád vyšší než u klasické CVD metody. [14,15]

LICVD (Laser Induced CVD – laserem indukovaná CVD metoda) - Tato metoda využívá laserového paprsku k lokálnímu zahřívání substrátu, na jehož povrchu se rozkládá procesní plyn na pevné částice, které jsou absorbovány do povlaku substrátu. Laserem indukovaná metoda existuje ve dvou variantách - pyrolytická a fotolytická. [26]

PECVD (Plasma Enhanced CVD – plazmaticky aktivovaná CVD metoda) - Metoda je založena na zvýšení energie plynné atmosféry v komoře pomocí její ionizace a aktivace

v plazmatickém výboji. Takovéto chemicky aktivované plazma umožňuje snížit teplotu procesu až na 400 - 600°C. [14,15,4]

MTCVD (Middle Temperature CVD – metoda CVD za středních teplot) - Metoda vynalezená za účelem snížení vysokých pracovních teplot. Technologie MTCVD pracuje s teplotami okolo 700 - 850°C. Dalším rozdílem jsou i vstupní sloučeniny. MTCVD metoda využívá jako vstupní sloučeninu acetonitril (CH_3CN) nebo též vysoce toxický a hořlavý metylkyanid, na rozdíl od metody CVD, kde je používán jako zdroj uhlíku plynný metan CH_4 a čistý dusík. Zdroj titanu je však stejný ($TiCl_4$). Rychlost růstu vrstvy TiCN je u metody MTCVD přibližně třikrát vyšší než u CVD metody. Hlavní výhodou je, že v důsledku nižší reakční teploty nedochází k poklesu houževnatosti podkladového slinutého karbidu a břitové destičky jsou odolnější proti mechanickým rázům a mohou být použity při vyšších hodnotách posuvových rychlostí. [14,15,16]

Další typy povlakování metodou CVD jsou např. **MWPCVD** (Micro Wave Plasma CVD – mikrovlnní plazmatická CVD metoda), **CACVD** (Cascade Arc Plasma – assisted CVD) aj.

Výhody povlakování metodou CVD: [14]

- vysoká hustota povlaku,
- vysoká teplotní stabilita povlaku,
- vysoká homogenita povlaku,
- vynikající adheze k podkladovému materiálu,
- možnost vytvářet poměrně složité vrstvy (uhlíkové kluzné, diamantové),
- ekonomická výhodnost tvorby silných vrstev povlaku,
- povlakování předmětu ze všech stran,
- relativně nízké pořizovací i provozní ceny.

Nevýhody povlakování metodou CVD: [14]

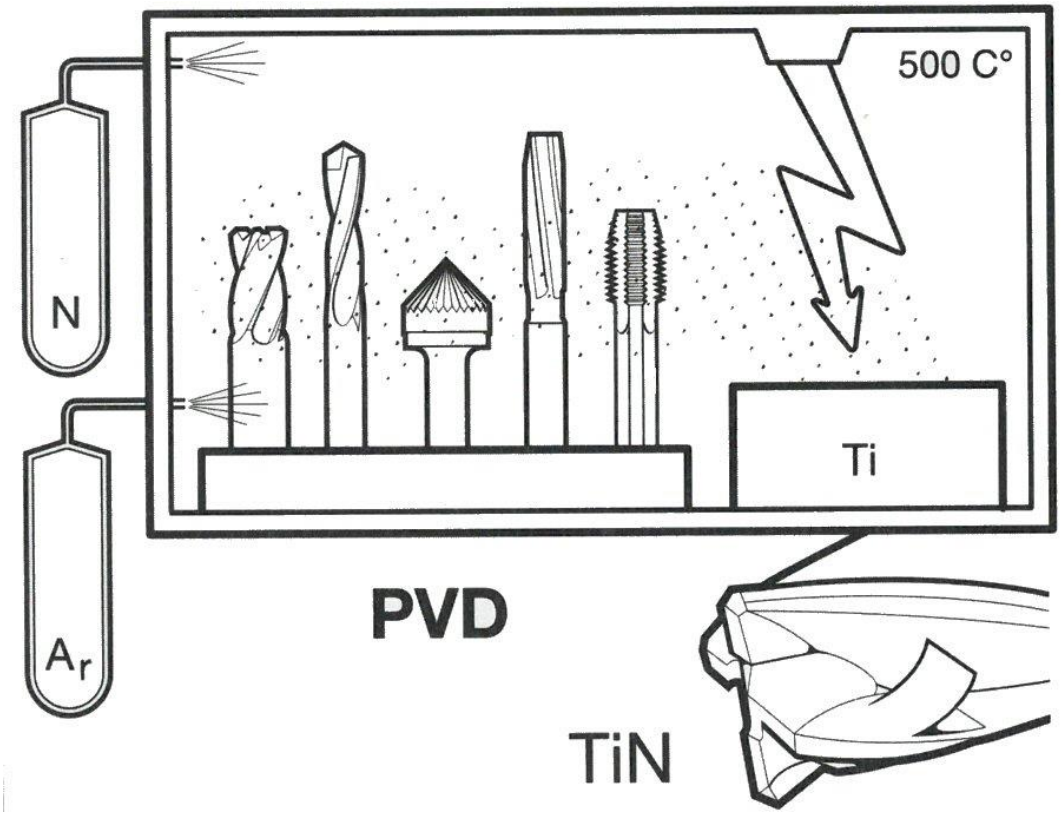
- vysoké pracovní teploty,
- nelze vytvářet některé typy povlaků (např. kombinací různých typů kovů – TiAlN),
- nelze povlakovat ostré hrany,
- dlouhý pracovní cyklus (až 10 hodin),
- neekologické pracovní plynné směsi,
- tahová napětí ve vrstvě.

2.2.2. Metoda PVD

U metody PVD jsou povlaky vytvářeny kondenzací částic, které jsou uvolňovány z tzv. terčů (zdrojů částic) dvěma základními fyzikálními metodami (odprašováním a odpařováním – viz kap. 2.2.2.1 a 2.2.2.2). Proces probíhá v povlakovací peci při nízkých teplotách 150-500°C a za sníženého tlaku (0,1 - 1,0 Pa). Uvolněné částice jsou ionizovány, reagují s atmosférou komory, kterou tvoří inertní a reaktivní plyn (např. Ar a N_2) a působením záporného napětí (okolo 50 – 400 V) se vylučují na povrchu substrátu, kde začínají tvořit tenkou vrstvu homogenního povlaku (3 - 5 μm) – viz obr. 6. PVD proces je založen na těchto základních fyzikálních principech: napařování, naprašování nebo iontové implantace (viz obr. 6).

Mezi hlavní výhody metody PVD patří to, že kvůli nízké procesní teplotě nemá nepříznivý vliv na vlastnosti podkladu a je schopna povlakovat i ostré hrany (s poloměrem zaoblení pod 20μm). Na druhou stranu vyžaduje důkladnější přípravu vzorku před povla-

kováním, je zapotřebí pohybovat povlakovanými předměty (kvůli tzv. stínovému efektu, který způsobuje, že na plochách které jsou odvráceny od místa odpařování povlakového kovu, se vytváří nedokonalá vrstva povlaku). K dalším nevýhodám patří tenčí vrstva povlaku (cca 5μm), menší možnost výběru typu povlaku nebo relativně složitý vakuový systém. [14,15,31,36]



Obr. 6 - Schéma povlakovací metody PVD [1]

2.2.2.1. Naprašování

Princip naprašování spočívá v nanášení částic, oddělených z povrchu terče fyzikálním odprašovacím procesem. Tento proces probíhá ve vakuu nebo za sníženého tlaku (do 0,7 Pa). Jelikož se vše děje za nízkých tlaků, odprášené částice se na povrch substrátu dostanou bez kolize s molekulami plynu. Do vakuové komory (která plní funkci anody) je přiváděn inertní plyn (zpravidla argon). V ní je umístěna katoda (terč). Po přivedení záporného napětí vzniká doutnavý výboj. Nad záporně nabitým terčem se výbojem udržuje argonová plazma, jejíž kladné ionty jsou elektrickým polem urychleny na terč, kde odprašují jednotlivé částice. Odprášené atomy poté dopadají na vnitřní povrchy vakuové komory a především na povrch povlakovaných předmětů. [14,15]

Naprašování doutnavým výbojem rovinné diody

Jedná se o nejjednodušší a nejčastěji využívaný systém naprašování. Hlavní výhodou je jednoduchost a snadná výroby terče z různých materiálů. Mezi nevýhody patří nízká rychlost depozice, ohřev substrátu (z důsledku bombardování atomy s vysokou energií) a relativně malá povlakovaná plocha. [14,15,25]

Naprašování magnetronové

Jedná se o modifikované naprašování s využitím magnetického pole. V tzv. magnetronu se před terčem se vytvoří magnetické pole definovaného tvaru elektromagnetem nebo permanentními magnety. Přítomnost magnetického pole zefektivňuje ionizaci argonu v plazmatu a ve svém důsledku zlepšuje rozprašování. Hlavními výhodami této metody je jednoduchá depozice všech materiálů včetně slitin a nevodičů (u nevodičů se místo stejnosměrného použije pulzní nebo vysokofrekvenční magnetronový výboj) a možnost homogenní depozice vrstev i na větších plochách. [14,15,25,4]

Naprašování radiofrekvenční

Tato metoda využívá vysokofrekvenčního signálu (obvykle 13,56 MHz). Dochází ke srážkám elektronů s neutrálními molekulami plynu, tím se plyn ionizuje. Protože elektrony kmitají s vysokou frekvencí, mají dostatek energie pro ionizující srážky, může tato metoda probíhat při nižších tlacích (0,7 - 2,0 Pa). Hlavní využití radiofrekvenčního naprašování je u nevodivých terčů, ze kterých nelze získávat materiál přiložením stejnosměrného proudu, v důsledku akumulace elektrického náboje na jejich povrchu. Nevýhoda této metody je složitost napájecího radiofrekvenčního zdroje. [14,15]

Naprašování iontovým paprskem

V iontovém zdroji (Kaufmanův zdroj nebo duoplazmatron) je vytvořen paprsek o vysoké energii (až tisíce eV). Paprsek je namířen na terč, kde odprašuje požadovaný materiál. Zdrojem tohoto iontového paprsku je inertní nebo reaktivní plyn. Hlavní výhodou odprašování iontovým paprskem je možnost řízení teploty substrátu, tlaku plynu, úhlu depozice volbu typu bombardujících částic a nezávislé řízení proudu a energie iontového paprsku. Nevýhodou je relativně nízká rychlost depozice (ve srovnání s konvekčním způsobem naprašování). [14,15]

2.2.2.2. Napařování

Napařování je metoda povlakování, založená na odpařování materiálu z terčů a následné kondenzaci jejich par na povlakovaném substrátu. Tento proces probíhá ve vakuu při velmi nízkém tlaku (10^{-3} až 10^{-8} Pa) z důvodu snížení bodu varu odpařovaného materiálu (s klesajícím tlakem se snižuje bod varu). Tento proces se dělí podle ohřívacího zdroje, který provádí přeměnu materiálu z tuhé nebo kapalné fáze do plynné na: odpařování elektronovým paprskem, obloukové odpařování, laserem indukované odpařování. Odpařování elektronovým paprskem (metoda EB-PVD: Electron Beam Physical Vapor Deposition) využívá k napařování materiálu elektronová děla, která vytvářejí elektronové paprsky vysokého výkonu. Obloukové odpařování napařuje materiál pomocí nízkonapěťového oblouku, při specifických podmínkách hoření oblouku za nízkého tlaku. Při laserem indukovaném odpařování je materiál z povrchu terče odpařován pomocí laserového paprsku. [14,15]

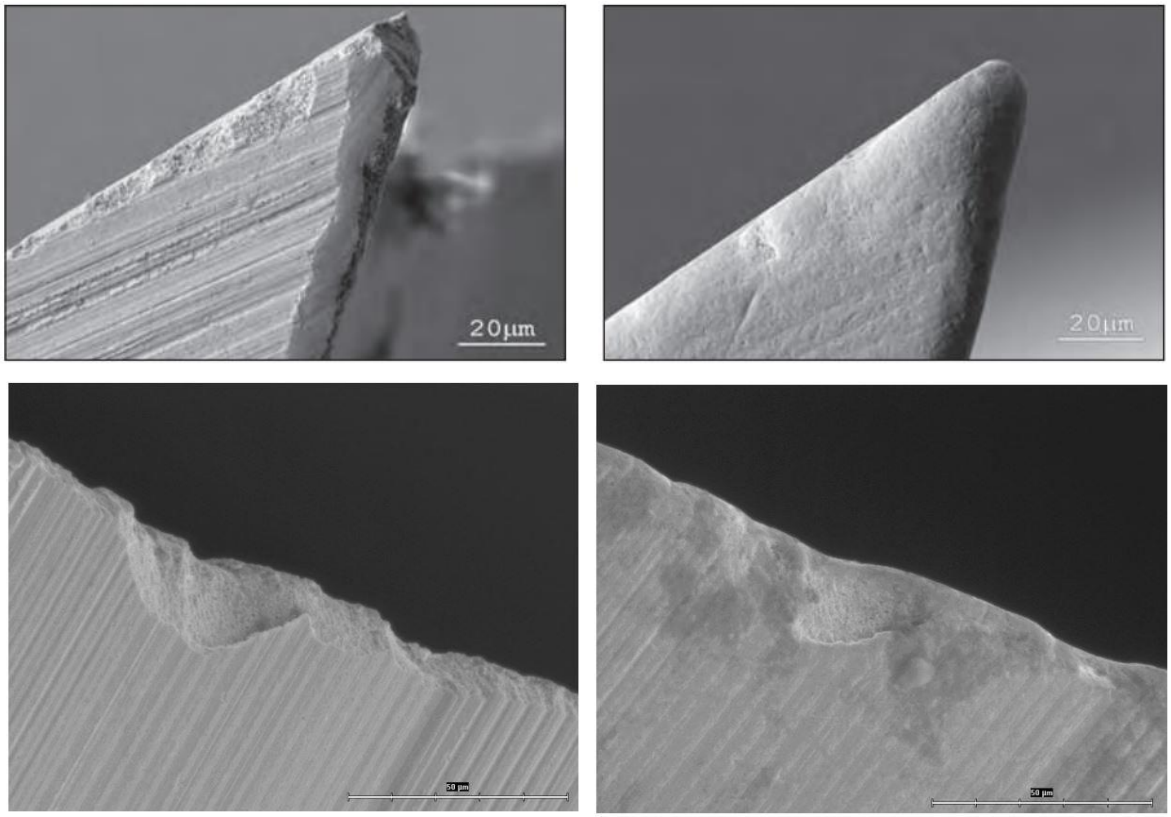
2.2.2.3. Iontová implantace

Princip iontové implantace spočívá v bombardování materiálu ionty s vysokou energií. Tato energie je určena elektrickým napětím přiváděným na povlakovaný předmět. Zařízení se skládá z vakuové komory naplněné inertním plynem (nejčastěji argonem). Do

komory se přivádějí i reaktivní plyny (N_2, O_2, CH_4), které jsou schopny chemicky reagovat s materiálem terče a tak tvořit vhodné povlakovací sloučeniny (např. TiN, TiO_2, TiC). Mezi katodou (substrátem) a anodou (terčem) je napětím kolem 1000 V vytvořeno silné elektrické pole, dochází k elektrickému výboji, který ionizuje částice plynu i odpařené částice terče. Toto silné elektrické pole dodává iontům dostatečnou energii na to, aby otryskaly povrch substrátu a tím očistily před depozicí povlaku. Poté se sníží napětí až na 50 - 100 V, čímž lze z povlaku odstranit hůře vázané atomy. Zdrojem látek k vytváření povlaku může být odpařování nebo odprašování. Dopad iontů během nanášení výrazně ovlivňuje vlastnosti vzniklého povlaku (např. tvrdost, vnitřní napětí, adhezi k substrátu) a umožňuje vznik sloučenin při teplotách podstatně nižších, než jsou teploty nutné pro rovnovážné chemické reakce. [14,15]

2.3. Úpravy nástrojů před povlakováním

Předdepoziční úpravy mají veliký vliv na výslednou kvalitu povlakovaného slinutého karbidu. Na povrchu SK se vyskytují různé nerovnosti a mastnoty vytvořené během procesu výroby, které snižují adhezi mezi povlakem a podkladem a dochází tak častěji k odlupování naneseného povlaku. Volbou vhodné předdepoziční úpravy se tyto nedostatky minimalizují (viz obr. 7).



Obr. 7 - Úprava břitů a hran (vlevo - před úpravou, vpravo - po úpravě) [2,35]

2.3.1. Broušení

U povrchů či břitů s ostrými nerovnostmi dochází snadno k odlupování naneseného povlaku. Aby se tento defekt odstranil, musí se daný povrch brousit, čímž se výrazně zvýší

adheze vrstvy. Je nutné správně zvolit vhodné brusivo (při použití některých brusiv se adheze povlaku snižuje) a jeho nosič. [14,15,12]

2.3.2. Odmašťování

Slouží k odstranění zejména organických nečistot tj. mastných látek z povrchů nástrojů. Dříve se k odmašťování používal benzín a petrolej. Dnes se využívají pouze průmyslová odmašťovadla na bázi ropných derivátů, které odpovídají přísným ekologickým normám. Tyto prostředky obsahují dearomatizované uhlovodíky a tenzidy, které brání nadměrnému odpařování a zajišťují dobrou smáčivost. [14,15]

2.3.3. Mokré čištění

Provádí se v mycích linkách s několika samostatnými mycími a oplachovými vanami (případně jednovanové systémy s automatickou výměnou jednotlivých technologických lázní). Jedná se o kombinování metod využívající oplachy, tlakové oplachy, ultrazvuku, elektrochemické metody. Používají se většinou kapalné čisticí prostředky, které se dávkovacím čerpadlem dodávají přímo do mycí lázně. Čištění probíhá v alkalickém prostředí (v roztocích obsahujících KOH nebo NaOH). Při procesu mokrého čištění se používají také tenzidy (smáčedla), aby se zvýšila účinnost odmašťovacího účinku. V některých případech čisticí linky kombinují v oddělených nádobách zásadité a kyselé prostředí, čímž se může dosahovat zvýšeného čisticího účinku. Veškeré čisticí lázně se provádějí v roztocích s demineralizovanou vodou. Po čištění následují oplachy a rychlé sušení. Sušení využívají metody založené na odstředění zbytkové kapaliny nebo odpaření na vzduchu či ve vakuu. [12,14,15]

2.3.4. Pískování

Pískováním se odstraňují pevně ulpívající nečistoty na povrchu, případně i nečistoty uchycené v mírně pórovitém povrchu nebroušených slinutých karbidů nebo opotřebených a neobnovených ploch přebrušovaných nástrojů. Princip je založen na proudu vzduchu, který metá vhodná abraziva (SiC nebo Al_2O_3) rychlostí okolo 700 km/h na povrch nástroje. Velikost abrazivních zrn se pohybuje v nízkých hodnotách 20 až 100 μm. [12,14,15,22,24]

2.3.5. Omílání v granulátech

Tento proces následuje po operaci broušení, upravuje nerovnosti a odstraňuje ostřiny na břitech a ostrých hranách. Jedná se o mechanickou úpravu, kdy se nástroj nuceně pohybuje v nádobě s granulátem a abrazivem. U nástrojů ze slinutých karbidů lze touhle metodou výrazně zvýšit adhezi povlaku na funkčních plochách nástroje. [14,15]

2.3.6. Iontové čištění

Principem je přivedení záporného předpětí na substrát v komoře s ionizovaným plynem (nejčastěji s argonem). Tím se urychlí kladně nabité ionty kovů odpařené z materiálu terče (Ti, Cr, atd.), které dopadají s velmi vysokou kinetickou energií (cca 10 eV) a vyrážejí nečistoty (nejčastěji sloučeniny uhlíku, kyslíku a kovů) ulpěné na povrchu. Energie dopadajících iontů je dána záporným předpětím přivedeným na substrát, tlakem plynu v komoře, typem ionizovaných částic, jejich proudovou hustotou a úhlem dopadu. [14,15,24]

2.3.7. Žíhání ve vakuu

Nástroje se po určitou dobu žíhají při teplotách blížící se povlakovacím. Jde o samostatný proces v technologickém cyklu povlakování, čímž se zabrání případnému znečištění vakuové komory během samostatného procesu povlakování. [14,15]

2.3.8. Stripping

Jedná se o odstraňování starých povlaků u přebrušovaných nástrojů. Je prováděno chemickou a elektrochemickou metodou s využitím silných oxidačních činidel, popř. účinku elektrického proudu. K odstranění povlaku u slinutých karbidů se používá nejčastěji peroxid vodíku, který je ale v malých koncentracích, protože naleptává kobalt, který je velmi citlivý na kyselé či zásadité prostředí. Odleptání kobaltu do hloubky 5 μm může způsobit vážné problémy při následném povlakování. Hned po odstranění starého povlaku je nutné povrch nástroje opláchnout a pasivovat pomocí vhodného činidla. [12,14,15,24]

2.4. Vlastnosti povlaků a jejich vyhodnocování

Ve srovnání s nepovlakovanými řeznými nástroji mají povlakované vyšší tvrdost, snižují řezné síly, teploty a koeficient tření a brání difuznímu mechanismu opotřebení. Lepší vlastnosti si povlakovaný nástroj udržuje i určitou dobu po porušení vrstvy povlaku (na hřbetu i na čele). Hlavní faktory, ovlivňující fyzikální a mechanické vlastnosti povlakovaných slinutých karbidů, jsou typ a tloušťka povlaku, metoda povlakování a podkladový SK. Základními fyzikálními vlastnostmi povlaku jsou tvrdost, drsnost, adheze, tloušťka a kluzné vlastnosti. Nejdůležitějšími chemickými vlastnostmi jsou pak odolnost vůči oxidaci, chemická a tepelná stabilita. [11,14,15]

Volba metody nanášení povlaků (CVD/PVD) má velký vliv na konečné vlastnosti povlakovaného tělesa. Metodou CVD se povlakuje při vysokých teplotách dosahujících až 1000 °C, proto se v důsledku různého koeficientu tepelné roztažnosti ve vrstvě povlaku často tvoří trhliny. U PVD k tvorbě trhlin nedochází, protože provozní teploty jsou mnohem nižší (do 500 °C). Rozdíl je i ve zbytkových napětích, kterých v povlacích zůstávají. V případě CVD jsou tahová, kdežto u PVD povlaků jsou tahová. PVD povlaky tudíž mají větší pevnost v ohybu i vyšší odolnost proti vydrolování. CVD povlaky mají ale mimořádnou adhezi a odolnost proti opotřebení.

Typ povlaku velmi výrazně ovlivňuje opotřebení. Opotřebení je buď abrazivní, které je ovlivněno tvrdostí, nebo tepelné (ovlivněno termochemickou stabilitou). Při obrábění vysokými řeznými rychlostmi vzniká velké teplo a převládá tedy tepelné opotřebení. Proto se k tomuto obrábění jako povlakovací materiál běžně využívá oxid hlinitý (Al_2O_3). Při obrábění nižší rychlostí klesá teplota a začíná převládat abrazivní opotřebení. Pro toto obrábění je tedy vhodný TiC s vysokou tvrdostí. Materiál TiN je vykazuje sice menší tvrdost, ale zato má nižší koeficient tření a tím lepší odolnost proti opotřebení na čele (viz tab. 2).

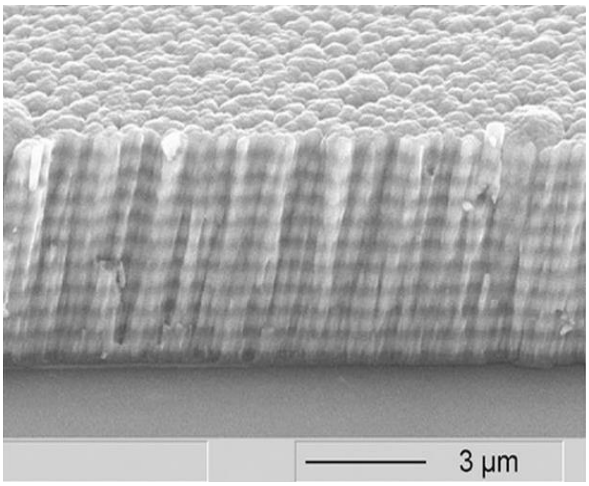
S rostoucími požadavky na obrábění různých těžko obrobitelných materiálů k těmto povlakovacím materiálů přibývají postupně i další, jako například Al_2O_3+ZrO_2, AlTiN, B_4C, CrC, CrN, HfC, HfN, MgO, SiO_2, TaC, TaN, TaCN, TiC+TiB_2, (Ti-Cr)CN, TiAlN, TiAlSiN, TiO_2, Ti_2N, TiN/NbN, TiN/TaN, TiZrN, Y_2O_3, ZrC, ZrN atd. Zvýšit výkon řezných nástrojů se dá použitím tzv. lubrikačních povlakových vrstev (např. MoS2), které výrazně snižují tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou (nižší tepelné zatížení nástroje se pak projeví ve zvýšení jeho trvanlivosti). V současnosti se však pozornost ubírá k vývoji povlaků 4. generace, mezi které patří povlaky multivrstvé, diamantové, supermřížkové, gradientní nebo nanokrystalické kompozity. [14,15]

Tab. 2 - Obecné porovnání vlastností základních povlakových materiálů [14]

	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla
Nejlepší	Al_2O_3	Al_2O_3	TiC	Al_2O_3
	TiAlN	TiAlN	TiCN	TiAlN
↑	TiN	TiN	Al_2O_3	TiN
	TiCN	TiCN	TiAlN	TiCN
Špatná	TiC	TiC	TiN	TiC

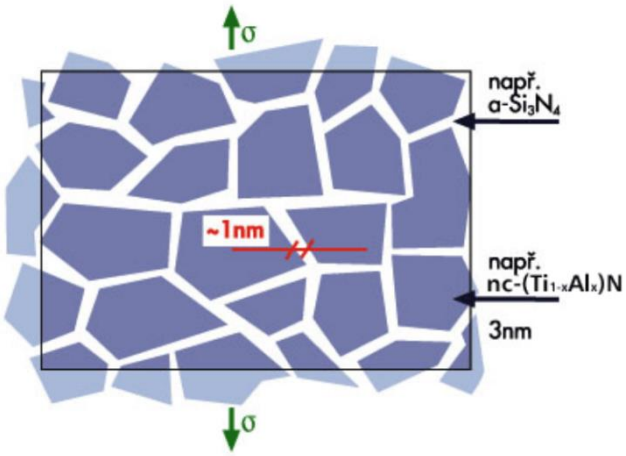
Multivrstvé povlaky jsou založeny na periodickém střídání dvou typů vrstev s rozdílnými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi (např. TiN-TiCN, TiN-ZrN, TiN-TiAlN) – viz obr. 8, 9. Tyto vrstvy jsou přitom velmi tenké (kolem 10 nm). Výsledná multivrstva má výrazně lepší vlastnosti, než homogenní monovrstva stejného průměrného složení. U multivrstev je každé rozhraní vrstev bariérou, které odklání a zpomaluje šíření trhlin od povrchu povlaku k substrátu. Tyto povlaky se nanášejí na substrát metodu MLCVD (Multi-Layer Chemical Vapor Deposition), kterou lze na podklad nanést až 200 extrémně tenkých vrstev povlaku. [14,15,16,21]

Obr. 8 - Multivrstvý systém skládající se z 62 střídajících se vrstev TiN/TiC [21]



Obr. 9 - Multivrstvý povlak TiN/ZrN (tmavá vrstva – TiN, světlá – ZrN) [18]

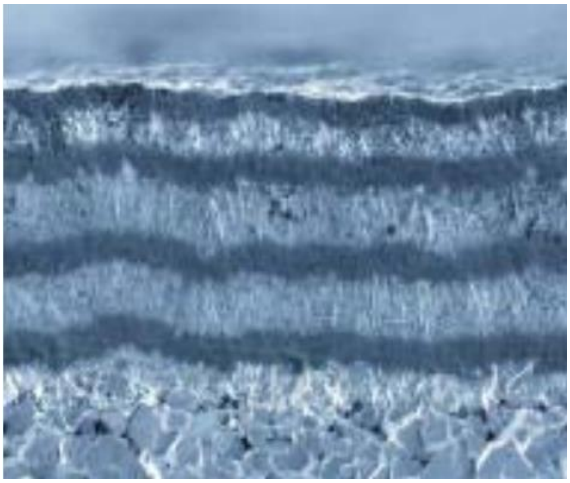
Nanokrystalické kompozity jsou materiály, u kterých jsou mikrostrukturní a prostorové rozměry sníženy do nanometrických dimenzí (velikost zrna < 10 nm) a které jsou složeny z více druhů materiálů, jejichž vzájemná rozpustnost je minimální (např. TiN-Si_3N_4, $Ti_{1-x}Al_xN$-Si_3N_4) – viz obr. 10. Chování těchto materiálů je určeno zejména procesy probíhajícími v hraničních oblastech, protože počet atomů v zrnech je srovnatelný nebo menší než počet atomů v těchto oblastech. Při těchto rozměrech neexistují dislokace (hranice zrn brání jejich tvorbě). Dislokační aktivitu nahrazuje mechanizmus zvaný kluz po hranicích zrn. Nanokrystalické kompozity se nejčastěji nanáší ve formě povlaku magnetronovým naprašováním. [14,15,16,21]



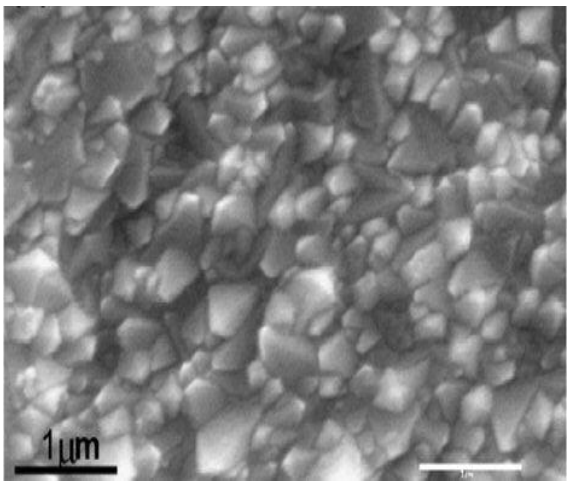
Obr. 10 - Schéma nanokrystalického systému Ti1-xAlxN-Si3N4 [21]

Supermřížkové povlaky jsou velmi tenké multivrstvy (celková tloušťka vrstvy dvou materiálů se pohybuje v rozsahu 5 - 10 nm), které se střídají se supermřížkovou periodou. Podle složení dvojvstvy se dále dělí na supermřížky kovové, nitridové, karbidové, oxidové nebo supermřížky kombinované. [14,15]

Diamantové povlaky nanášené na slinuté karbidy vyčnívají nad ostatními řeznými materiály velmi vysokou tvrdostí (až 90 GPa). Mezi další výhody zajisté patří nízký koeficient tření, který je dokonce nižší než u teflonu. Vzhledem však vysoké chemické aktivitě k železu při teplotách nad 700°C povlaky z polykrystalického diamantu (PKD) nelze používat pro obrábění oceli a litin. Hlavní oblast využití pro povlaku z PKD je tedy obrábění neželezných slitin hliníku a křemíku (v některých případech lze použít řezné rychlosti, které přesahují hodnotu 5000 m min^{-1}). Další nevýhodou je velmi špatná adheze k substrátu, která se dá zlepšit snížením obsahu kobaltu na povrchu podkladového slinutého karbidu chemickým leptáním. Další možnost jak zvýšit přilnavost je nanesení vrstvy z vhodného materiálu mezi diamantový povlak a podklad (viz obr. 11 a12), aby se zamezilo mezifázové grafitizaci vyvolané kobaltem. Diamantové povlaky se nanášejí metodou CVD a jejími modifikacemi (PECVD nebo MWPCVD). Rychlost růstu vrstvy PKD se pohybuje kolem hodnoty 1 $\mu m.h^{-1}$. [9,14,15,16,20,38]

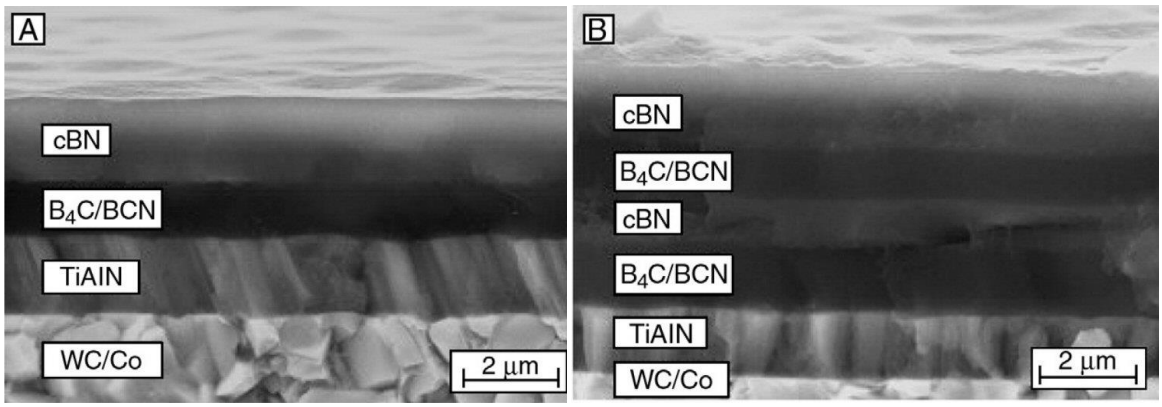


Obr. 11 - Diamantový multivrstvý povlak [21]



Obr. 12 - Povrch diamantového povlaku s mezivrstvou Dia/W/Al/WC-Co[38]

Povlaky z kubického nitridu boru (CBN) patří kvůli své vysoké tvrdosti (50GPa) mezi tzv. supertvrdé povlaky. Povlaky z CBN vykazují velmi podobné vlastnosti jako povlaky diamantové. Na rozdíl od diamantu má povlak z CBN mnohem lepší chemickou stabilitu i při vyšších teplotách, což z něj dělá nejlepší materiál na obrábění železných slitin. Stejně jako u diamantového povlaku má CBN povlak velmi špatnou adhezi. S cílem vyšší přilnavosti se CBN povlak využívá v kombinaci se základním povlakem TiAlN a vrstvou B_4C/BCN. Pro vytvoření silnějšího multivrstvého povlaku lze na TiAlN opakovaně nanášet střídající se vrstvy B_4C/BCN a CBN (viz obr 13.). Kubický nitrid boru lze nanášet hybridním povlakovacím procesem i jako kompozitní povlak CBN-TiN. Tento povlakovací proces spojuje metodu elektrostatického nástřiku (Electrostatic Spray Coating) a metodu CVI (Chemical Vapor Infiltration). Povlaky z kubického nitridu boru jsou pouze ve fázi laboratorního výzkumu, stále tedy nejsou průmyslově vyráběny a prodávány. [14,15,19,27,37]



Obr. 13 - Multivrstvé povlaky z kubického nitridu boru [19]

2.4.1 Fyzikální vlastnosti

2.4.1.1. Tvrdost

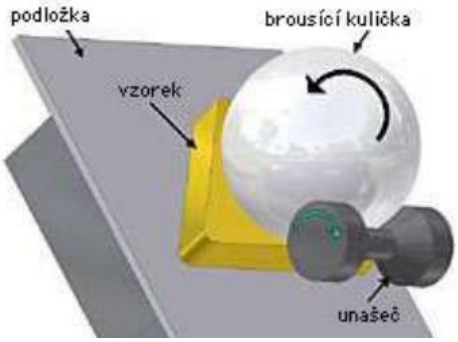
Tvrdost je vlastnost definována jako „odolnost proti pronikání cizích předmětů“. Nástroj bývá často opotřebováván abrazivním otěrem, proto je tvrdost jednou ze zásadních vlastností. Největší tvrdost vykazují povlaky z diamantu nebo polykrystalického nitridu boru. Zkouška se provádí nejčastěji dle Vickerse (tj. vtlačováním diamantového jehlanu s vrcholovým úhlem 136° předepsanou silou a měří se velikost úhlopříčky). Při zkoušce je třeba zajistit maximální hloubku vtisku hrotu 0,5 µm, aby hodnoty měření nebyly ovlivněny tvrdostí podkladového slinutého karbidu. Vzniklé stopy jsou velmi malé, a proto je velmi obtížné je vyhodnocovat mikroskopem. K vyhodnocování výsledků se tedy používají tzv. mikrotvrdoměry, které souběžně se zatěžováním hrotu měří hloubku jeho pronikání do vrstvy s přesností na jednotky nm. Tvrdosti vrstev se udávají v GPa. [11,13]

2.4.1.2. Drsnost

Drsnost povrchu povlaku je ovlivněna technologií a technologickými podmínkami při výrobě. Zdrojem zvýšené drsnosti vrstev jsou makročástice, které vznikají během procesu povlakování. Jedná se o nežádoucí jev, který zvyšuje řezné síly, a tak dochází k tepelnému a mechanickému namáhání břitů nástrojů. Měření se na vyleštěných podkladech provádí drsnoměrem. [11]

2.4.1.3. Tloušťka

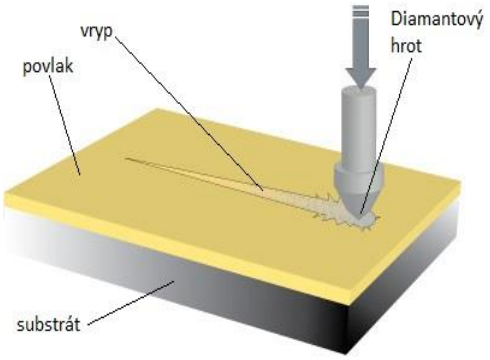
Tloušťka povlaku závisí na volbě zvolené metody povlakování. V praktickém využití se pohybuje v rozsahu 5 - 10 μm. Pokud je vrstva povlaku příliš tenká jsou vlastnosti silně ovlivněny vlastnostmi podkladu (povlaky na tvrdém podkladě vykazují vyšší trvanlivost). Naopak má-li vrstva velkou tloušťku, dochází snadněji k odlupování. Pro měření tloušťky na rovných plochách se využívá tzv. kalotester (viz obr. 14). Princip kalotestu je založen na vybrušování kulového důlku nejčastěji ocelovou kuličkou potřenou diamantovou pastou. Poté se pomocí mikroskopu proměřují rozměry důlku, z kterých lze následně vypočítat tloušťka pozorované vrstvy. Pro měření tloušťky vrstvy na břitech se využívá klasická metalografie založená na leštění vybrané části substrátu. [3,11,14,15]



Obr. 14 - Princip kalotestu [3]

2.4.1.4. Adheze

Dobrá adheze neboli přilnavost povlaku je velmi důležitá, aby nedocházelo k odlupování povlaku od substrátu. K vytvoření povlaku s dobrou přilnavostí je potřeba nástroj před povlakováním důkladně očistit a upravit (viz kap. 2.3). Závisí také na tloušťce vrstvy. Pro měření se využívá vrypová zkouška, tzv. scratch test – viz obr. 15. Při scratch testu se zkoušený vzorek pohybuje horizontálně a plynule jej zatěžuje Rockwellův diamantový hrot konstantní nebo plynule zvyšující se silou. Dochází k tvorbě vrypu, tím se na rozhraní substrát – vrstva vytváří pnutí, které při dosažení kritické hodnoty způsobí odtržení vrstvy. Kritická hodnota, při níž dojde k poškození vrstvy je pak používána jako míra adheze dané vrstvy. [3,11]



Obr. 15 - Princip scratch testu [7]

2.4.1.5. Kluzné vlastnosti

Během obrábění velmi rychle roste teplota z důvodu frikčních sil, a tím se zhoršují fyzikální i chemické vlastnosti. Vhodným povlakem je možné tyto třecí síly výrazně snížit a omezit tak tepelné zatížení podkladového materiálu. Kluzné vlastnosti se měří metodou pin-on-disc na tribometru. Testovaná vrstva povlaku se nanese na zkušební vzorek, který se umístí na otočný stolek. Na tento rotující vzorek působí tělísko (hrot nebo kulička), umístěné na elastickém rameni, definovanou silou (0,25 – 60N). Měří se otěr kuličky, koeficient tření, otěr vrstvy a profil otěru. [11,23]

2.4.2. Chemické vlastnosti

2.4.2.1. Odolnost vůči oxidaci

Oxidace se také může velkou měrou podílet na opotřebení vrstvy. Dělí se na oxidaci hloubkovou a povrchovou. Při povrchové oxidaci dochází k pasivaci povrchu, čímž se může vytvářet bariéra proti další oxidaci. Při hloubkové oxidaci dochází poklesu tvrdosti a

tím degradaci nanesené vrstvy. Tento pokles tvrdosti je způsoben tvorbou jiných typů mřížových vazeb. Odolnost vůči oxidaci se měří tzv. gravimetrickou metodou, při které se hodnotí změna hmotnosti vrstvy v závislosti na teplotě účinkem vzdušného kyslíku. [11]

2.4.2.2. Chemická stabilita

Jedná se o odolnost vrstvy vůči chemické reakci s obráběným materiálem, ke které dochází zejména při vyšších teplotách, vznikajících při obrábění. [11]

2.4.2.3. Tepelná stabilita

Při zvýšení teploty vlivem obrábění může docházet ke změně vnitřní struktury, např. nárůstem krystalitů, přechodem k jinému krystalickému uspořádání, změnou vnitřního napětí apod. Tyto charakteristiky, které se projevují změnou mechanických vlastností, se vyhodnocují spolehlivě pomocí TEM (transmisní elektronová mikroskopie) či XRD (rentgenová difrakce). Nejvyšší tepelnou stabilitou mají v současnosti vrstvy na bázi CrAlN a nanokrystalické nanokompozity. [11]

3. POVLAKOVANÉ SK V SORTIMENTU VÝROBY VYBRANÝCH PRODEJCŮ

Obr. 16 - Logo firmy Pramet [30]

Pramet Tools (obr. 16) je jediná česká společnost zabývající se vývojem, výrobou a prodejem obráběcích nástrojů ze slinutého karbidu. Firma byla založena v roce 1951 v Šumperku, kde sídlí dodnes. V současnosti se tato firma zaměřila na zahraniční trh (export tvoří 60% celkového obratu). Pramet má pobočky 9 devíti zemích světa, mimo jiné i v Číně, Rusku, Německu a Indii. V roce 2011 vyrobila firma rekordních 22,5 miliónů destiček. [30]

Obr. 17 - Logo Sandvik Coromant [34]

Sandvik Coromant (obr. 17) je největší světový výrobce nástrojů pro obrábění kovů ze švédského města Sandviken. Firmu založil v roce 1862 Göran Fredrik Göransson. Firma v první fázi vyráběla ocel. Až roku 1942 začala vyrábět nástroje ze slinutého karbidu. Více než sedmdesátiletá tradice výroby a vývoje nástrojů ze slinutých karbidů dělá ze Sandvik Coromant špičku ve svém oboru. Společnost Sandvik Coromant zaměstnává přibližně 8000 zaměstnanců a své zastoupení má ve 130 zemích světa. [34]

Obr. 18 – Logo Ceratizit [5]

Ceratizit (obr.18) patří ke špičce mezi výrobci řezných nástrojů. Tato společnost vznikla v roce 2002 sloučením lucemburské firmy CERAMETAL (vznik v roce 1931) a rakouské Plansee (vznik v roce 1921). Tato firma má tedy více než devadesátiletou tradici. Sídlo společnosti Ceatizit je v lucemburském Mameru. Ceratizit má pobočky v 42 zemích světa a zaměstnává přes 5 500 pracovníků. [5]

3.1. Povlakované slinuté karbidy pro soustružení materiálu skupiny P

3.1.1. Pramet [29]

9210 (P10-25) – viz obr. 19

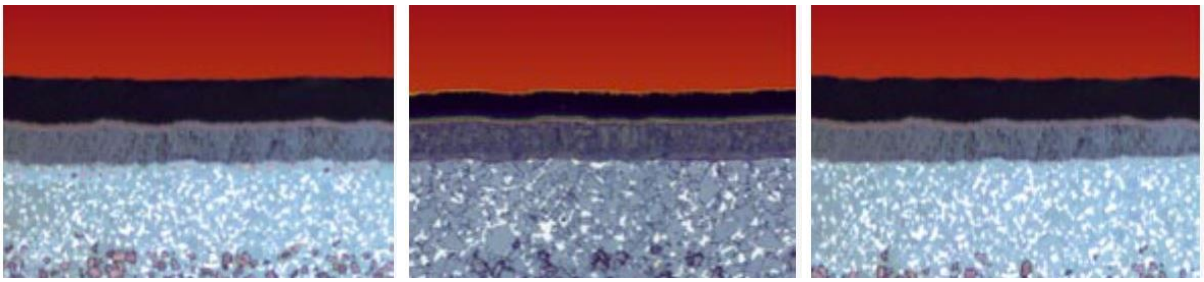
- nejotěruvzdornější materiál řady 92XX,
- funkčně gradientní substrát,
- povlak nanesen metodou MTCVD,
- vhodný pro dokončovací až hrubovací soustružení, vyšší řezné rychlosti, kontinuální a podmíněně i mírně přerušovaný řez.

9230 (P10-35) – viz obr. 19

- nejuniverzálnější materiál řady 9000,
- funkčně gradientní substrát,
- povlak nanesen metodou MTCVD,

- vhodný pro dokončovací až hrubovací soustružení, střední a vyšší řezné rychlosti, kontinuální i přerušovaný řez.

6635 (P20-40) – viz obr. 19
- funkčně gradientní substrát s relativně vysokým obsahem kobaltu,
- povlak nanesen metodou MTCVD,
- vhodný pro nižší až střední řezné rychlosti, nepříznivé záběrové podmínky a přerušovaný řez.



Obr. 19 – Struktura povlaku (zleva: 9210, 9230, 6635)[29]

3.1.2. Sandvik Coromant [32]

GC4205 (P01-15)
- CVD povlak,
- mimořádná odolnost proti opotřebení ve tvaru žlábku a plastické deformaci,
- schopnost odolávat vysokým teplotám v místě řezu,
- vhodný pro polodokončovací až hrubovací aplikace za vyšší rychlosti úběru kovu.

GC4215 (P01-30)
- CVD povlak,
- gradientní substrát,
- schopnost odolávat vysokým teplotám v místě řezu,
- vhodný k dokončování až hrubování ocelí a ocelí na odlitky.

GC4235 (P20-45)
- CVD povlak,
- gradientní substrát,
- vhodný pro hrubovací operace v ocelích a ocelových odlitcích za nepříznivých podmínek a přerušované řezy s vysokou řeznou rychlostí.

3.1.3.Ceratizit [6]

CM45 (P35-50) – viz obr. 20
- Vhodný pro hrubování až dokončování ocelí,
- složení: Co 10 %; WC 90 %,
- zrnitost: 0,7 μm,
- tvrdost: HV 1600,

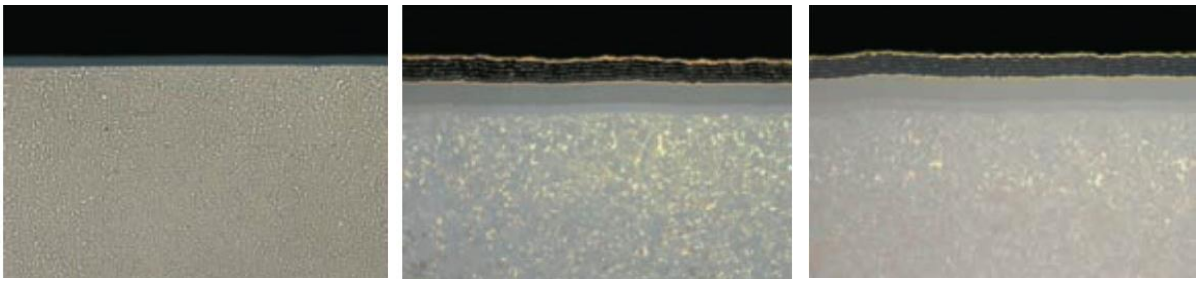
- PVD povlak TiAlN,
- tloušťka 2 - 4 µm.

CTC1110 (P5-25) – viz obr. 20

- Vhodný pro střední obrábění a dokončování ocelí a litin,
- složení: Co 6%; směsný karbid 6,4%; WC 87,6%,
- zrnitost: 1 - 2 µm,
- tvrdost: HV 1550,
- CVD povlak: Ti (C, N) + Ti (C, N) + Ti (N, B) + AI_2O_3,
- tloušťka 18 µm.

CTC1125 (P15-35) – viz obr. 20

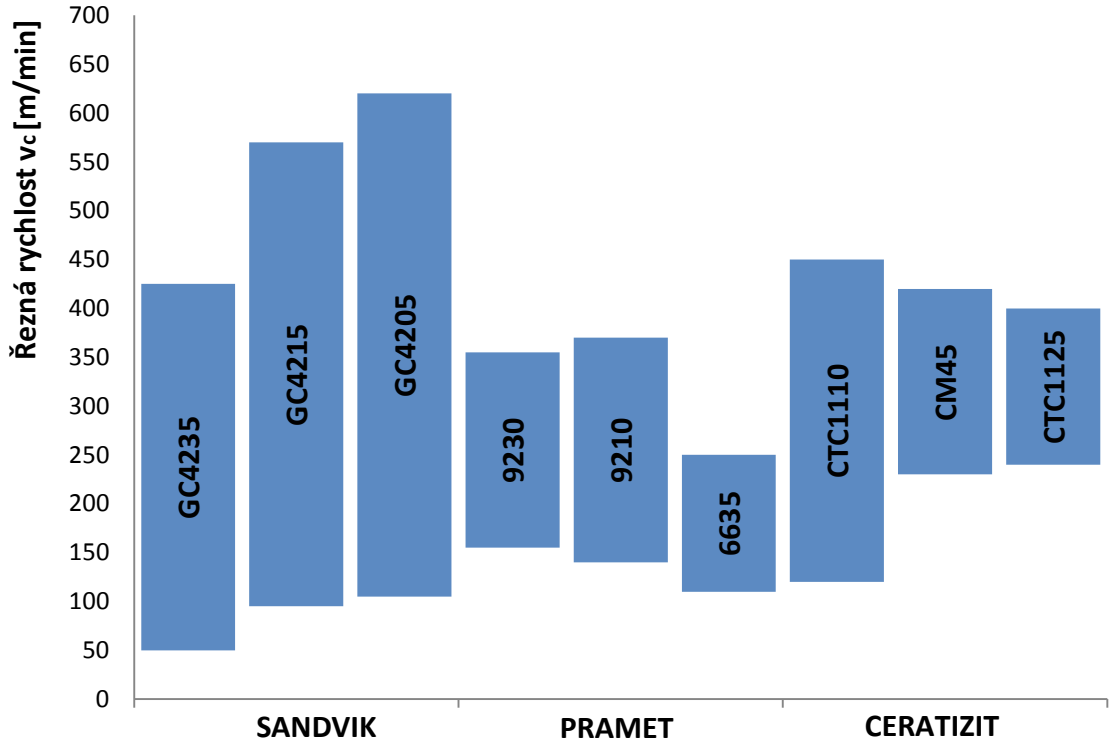
- Vhodný pro hrubování, střední obrábění i dokončování ocelí,
- Složení: Co 7 %; směsný karbid 8 %; WC 85 %,
- zrnitost: 1 - 2 µm,
- tvrdost: HV 1450,
- CVD povlak: Ti (C, N) + Ti (C, N) + Ti (N, B) + AI_2O_3,
- tloušťka 18 µm.



Obr. 20 - Struktura povlaku (zleva: CM45,CTC1110, CTC1125)[6]

Tab. 3 – Řezné podmínky pro soustružení materiálů P

FIRMA	MATERIÁL	POSUV NA OTÁČKU f [mm]	Řezná rychlost v_c[m/min]										
			P01	P05	P10	P15	P20	P25	P30	P35	P40	P45	P50
SANDVIK	GC4235	0,1-0,8					425-50						
	GC4215	0,1-0,8	570-95										
	GC4205	0,1-0,8	620-105										
PRAMET	9230	0,15-0,8			355-155								
	9210	0,15-0,8			370-140								
	6635	0,15-0,8					250-110						
CERATIZIT	CTC1110	0,05-1,5		450-120									
	CM45	0,05-1,5								230-40			
	CTC1125	0,05-1,5				240-80							



Obr. 21 - Porovnání řezných rychlostí

Slinutý karbid od firmy Sandvik Coromant GC4215 je z vybraných vzorků pro obrábění materiálů typu P nejuniverzálnější - má tedy největší oblast využití (P01 – P30). Při nejvyšší řezné rychlosti lze obrábět materiálem GC4205 od stejné firmy (při posuvu 0,1 mm na otáčku lze obrábět s řeznou rychlostí až 620 m/min). Řezné rychlosti u všech slinutých karbidů od firmy Ceratizit jsou v katalogu uváděny pro široké rozmezí posuvu na otáčku (0,05 – 1,5 mm), a i z tohoto důvodu je srovnání s ostatními výrobci obtížné - viz tab. 3 a obr. 21 (podobně v tab. 4 a obr. 23 – pro skupinu M a v tab. 5 a obr. 26 a pro skupinu K).

3.2. Povlakované slinuté karbidy pro soustružení materiálu skupiny M

3.2.1. Pramet [29]

8040 (M20-40) – viz obr. 22

- nejhouževnatější z řady 8000,
- submikrometrový substrát bez kubických karbidů,
- nanostrukturní povlak nanesen metodou PVD,
- vhodný pro operace charakterizované vysokou mechanickou zátěží břitu při nízkých až středních řezných rychlostech a nestabilních záběrových podmínkách.

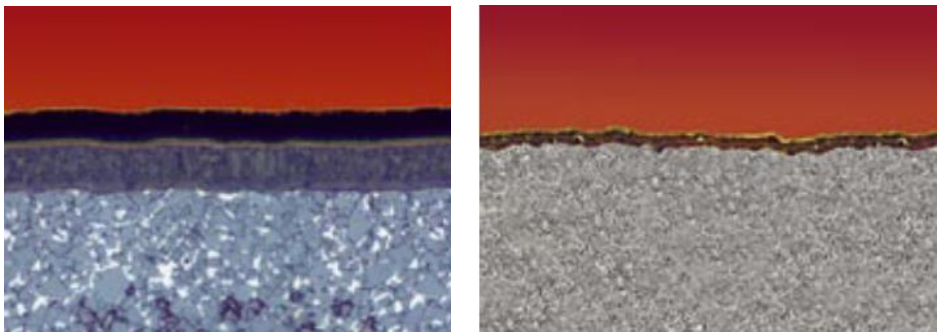
9230 (M10-30) – viz obr. 19

- nejuniverzálnější materiál řady 9000,
- funkčně gradientní substrát,
- povlak nanesen metodou MTCVD,

- vhodný pro dokončovací až hrubovací soustružení, střední a vyšší řezné rychlosti, kontinuální i přerušovaný řez.

9235 (M15-35) – viz obr. 22

- funkčně gradientní substrát s relativně vysokým obsahem kobaltu,
- povlak nanesený metodou MTCVD,
- vhodný pro hrubovací až dokončovací soustružení, pro přerušovaný i kontinuální řez při středních řezných rychlostech a nepříznivých záběrových podmínek.



Obr. 22 - *Struktura povlaku (zleva: 9235, 8040)[29]*

3.2.2. Sandvik Coromant [32]

GC2015 (M05-25)

- povlak nanesen metodou CVD,
- substrát umožňující práci za vysokých teplot v kombinaci s povlakem s vysokou odolností proti opotřebení,
- vhodný pro dokončování až lehké hrubování korozivzdorných ocelí, pro spojité řezy při středních až vysokých řezných rychlostech.

GC2025 (M15-35)

- povlak nanesen metodou CVD,
- dobrá odolnost vůči tepelným a mechanickým rázům – vhodné při provádění přerušovaných řezů,
- dále vhodný pro hrubování až polodokončování austenitických a duplexních korozivzdorných ocelí při středních řezných rychlostech.

GC2035 (M25-40)

- povlak nanesen metodou PVD,
- dobrá odolnost vůči tepelným rázům – vhodné pro aplikace s rychle přerušovaným řezem,
- dále vhodný pro hrubování až polodokončování austenitických a duplexních korozivzdorných ocelí při nízkých až středních řezných rychlostech.

3.2.3. Ceratizit [6]

CTC1110 (M05-20) – viz obr. 20

- Vhodný pro střední obrábění a dokončování ocelí a litin,
- složení: Co 6%; směsný karbid 6,4%; WC 87,6%,
- zrnitost: 1 - 2 µm,
- tvrdost: HV 1550,
- CVD povlak: Ti (C, N) + Ti (C, N) + Ti (N, B) + AI_2O_3,
- tloušťka 18 µm.

CM45 (M35-50) – viz obr. 20

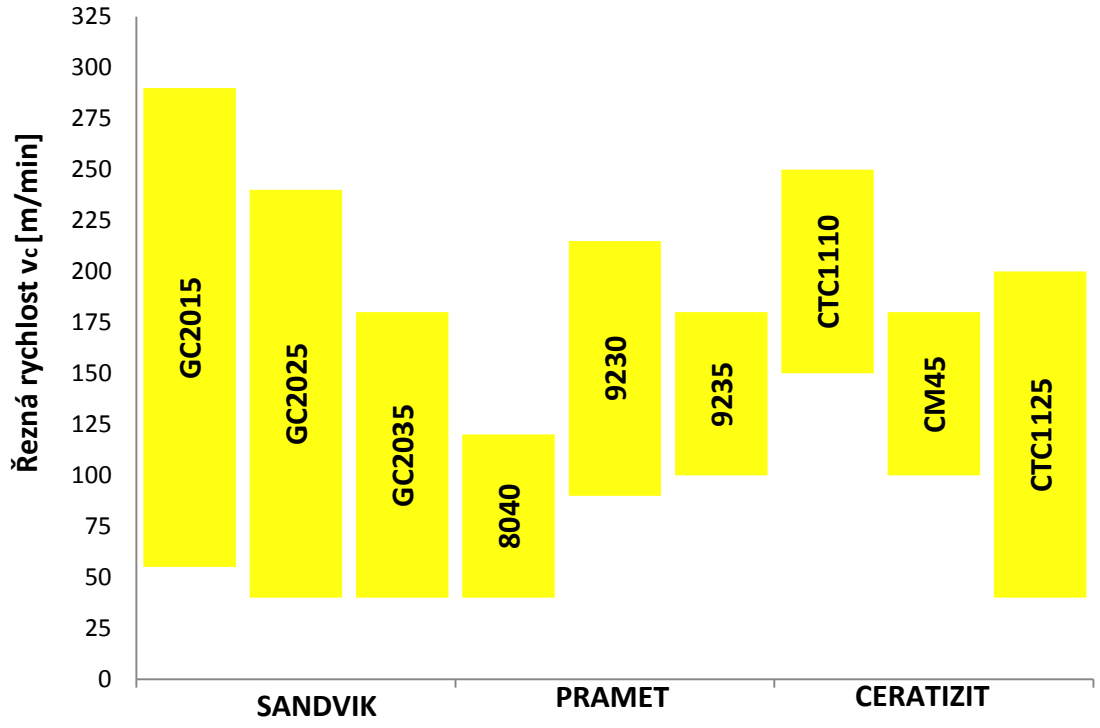
- Vhodný pro hrubování až dokončování ocelí,
- složení: Co 10 %; WC 90 %,
- zrnitost: 0,7 µm,
- tvrdost: HV 1600,
- PVD povlak TiAlN,
- tloušťka 2 - 4 µm.

CTC1125 (M20-30) – viz obr. 20

- Vhodný pro hrubování, střední obrábění i dokončování ocelí,
- Složení: Co 7 %; směsný karbid 8 %; WC 85 %,
- zrnitost: 1 - 2 µm,
- tvrdost: HV 1450,
- CVD povlak: Ti (C, N) + Ti (C, N) + Ti (N, B) + AI_2O_3,
- tloušťka 18 µm.

Tab. 4 - Řezné podmínky pro soustružení materiálů M

FIRMA	MATERIÁL	POSUV NA OTÁČKU f [mm]	Řezná rychlost v_c[m/min]										
			M01	M05	M10	M15	M20	M25	M30	M35	M40	M45	M50
SANDVIK	GC2015	0,1-0,8		290-55									
	GC2025	0,1-0,8				240-40							
	GC2035	0,1-0,8						180-40					
PRAMET	8040	0,1-0,8					120-40						
	9230	0,15-0,8			215-90								
	9235	0,15-0,8				180-100							
CERATIZIT	CTC1110	0,05-1,5		250-150									
	CM45	0,05-1,5								180-100			
	CTC1125	0,05-1,5					200-40						



Obr. 23 - Porovnání řezných rychlostí

Z vybraných slinutých karbidů pro obrábění materiálů typu M lze materiál GC2015 od firmy Sandvik Coromant využít při nejvyšší řezné rychlosti (při posuvu 0,1 mm na otáčku lze tímto materiálem obrábět s řeznou rychlostí až 290 m/min).

3.3. Povlakované slinuté karbidy pro soustružení materiálu skupiny K

3.3.1. Pramet [29]

6635 (K15-35) – viz obr. 19

- Funkčně gradientní substrát s relativně vysokým obsahem kobaltu,
- tenký povlak nanesen metodou MTCVD,
- vyšší průřezy třísek,
- vhodný pro nižší až střední rychlosti, pro nepříznivé záběrové podmínky a přerušovaný řez.

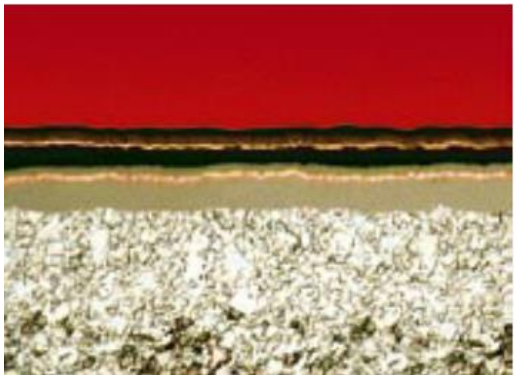
6615 (K5-20) – viz obr. 24

- Funkčně gradientní substrát s relativně nízkým obsahem kobaltu,
- duální povlak nanesený kombinací metod MTCVD a PVD s nosnou vrstvou TiCN,
- vhodný pro dokončovací až hrubovací operace, pro kontinuální a podmíněně i mírně přerušovaný řez při vyšších řezných rychlostech.

9230 (K20-30) – viz obr. 19

- Nejuniverzálnější materiál řady 9000,
- funkčně gradientní substrát,
- povlak nanesen metodou MTCVD,

- vhodný pro dokončovací až hrubovací soustružení, střední a vyšší řezné rychlosti, kontinuální i přerušovaný řez.



Obr. 24 - Struktura povlaku 6615 [29]

3.3.2. Sandvik Coromant [32]

GC3205 (K01-15)

- Povlak nanesen metodou CVD,
- silný, hladký a opotřebení odolný povlak a velmi tvrdý substrát,
- vhodný pro vysokorychlostní obrábění šedé litiny.

GC3210 (K01-20)

- Povlak nanesen metodou CVD,
- silný, hladký a opotřebení odolný povlak a velmi tvrdý substrát,
- vhodný pro vysokorychlostní obrábění nodulární litiny.

GC3215 (K01-25)

- Povlak nanesen metodou CVD,
- silný, hladký a opotřebení odolný povlak a velmi tvrdý substrát, který je schopen odolat i zatížení při přerušovaném řezu
- vhodný pro hrubování všech typů litiny při malých až středních řezných rychlostech.

3.3.3. Ceratizit [6]

CTC1110 (K05-25) – viz obr. 20

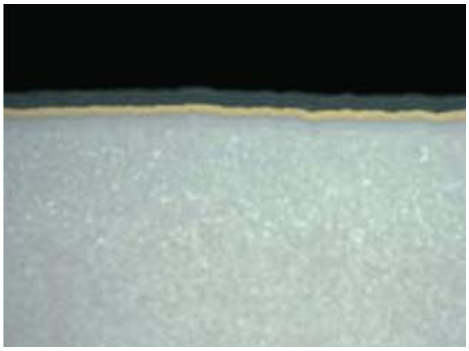
- Vhodný pro střední obrábění a dokončování ocelí a litin,
- složení: Co 6%; směsný karbid 6,4%; WC 87,6%,
- zrnitost: 1 - 2 μm,
- tvrdost: HV 1550,
- CVD povlak: Ti (C, N) + Ti (C, N) + Ti (N, B) + AI_2O_3,
- tloušťka 18 μm.

CM45 (K15-25) – viz obr. 20

- Vhodný pro hrubování až dokončování ocelí,
- složení: Co 10 %; WC 90 %,
- zrnitost: 0,7 µm,
- tvrdost: HV 1600,
- PVD povlak TiAlN,
- tloušťka 2 - 4 µm.

CTC1130 (K10-30) – viz obr. 25

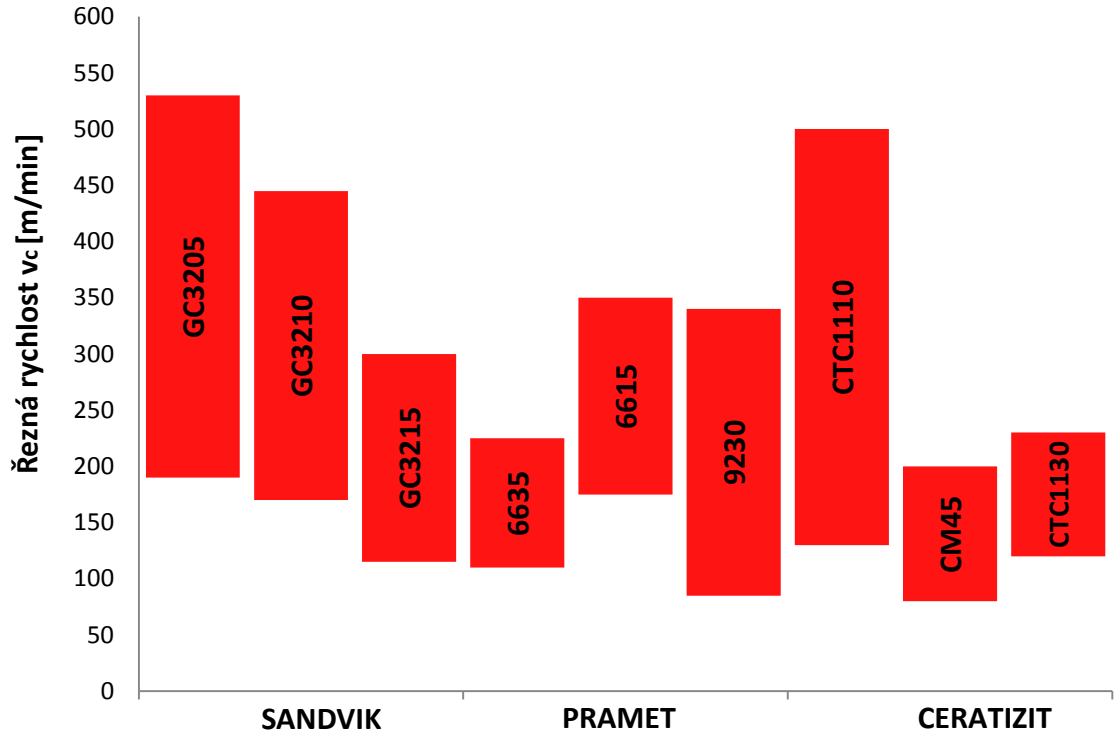
- Vhodný pro hrubování, střední obrábění i dokončování ocelí a hrubování litin.
- složení: Co 7 %; směsný karbid 8 %; WC 85 %
- zrnitost: 1 - 2 µm
- tvrdost: HV 1450
- CVD povlak: Ti (C, N)+Ti (C, N)+TiN+AI_2O_3,
- tloušťka 12 µm.



Obr. 25 - Struktura povlaku CTC1130 [6]

FIRMA	MATERIÁL	POSUV NA OTÁČKU f [mm]	Řezná rychlost v_c[m/min]										
			K01	K05	K10	K15	K20	K25	K30	K35	K40	K45	K50
SANDVIK	GC3205	0,1-0,8	530-190										
	GC3210	0,1-0,8	445-170										
	GC3215	0,1-0,8	300-115										
PRAMET	6635	0,15-0,8				225-110							
	6615	0,15-0,8		350-175									
	9230	0,15-1,3					340-85						
CERATIZIT	CTC1110	0,05-1,5		500-130									
	CM45	0,05-1,5				200-80							
	CTC1130	0,05-1,5			230-120								

Tab.5 - Řezné podmínky pro soustružení materiálů K



Obr. 26 - Porovnání řezných rychlostí

Z vybraných vzorků slinutých karbidů pro obrábění materiálů typu K lze materiál GC3205 od firmy Sandvik Coromant využít při nejvyšší řezné rychlosti (při posuvu 0,1 mm na otáčku lze s tímto materiálem obrábět s řeznou rychlostí až 530 m/min).

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla věnována povlakovaným slinutým karbidům. V současnosti je povlakovaný slinutý karbid nejpoužívanější materiál pro řezné nástroje (tvoří většinu, asi 80 – 90 % všech vyrobených řezných nástrojů). První povlaky byly pouze jednovrstvé typu TiN, TiCN nebo Al_2O_3 a nanášely se na slinuté karbidy (P,M,K) vyrobené klasickým slinováním. V dnešní době už převažují slinuté karbidy s povlaky tzv. 4. generace, mezi které patří povlaky z kubického nitridu boru, diamantové, multivrstvé, nanokompozitní, gradientní, supermřížkové, inteligentní. Tyto povlaky jsou často nanášeny na substráty, které jsou gradientně slinované. Takto upravené podklady obsahují tenkou povrchovou vrstvu, ve které se nachází pouze hexagonální karbid WC a kobalt. Tato vrstva má vyšší houževnatost a spolu s tvrdým jádrem, tvořeným kubickými zrny (WC, Ti), a vhodným povlakem tvoří systém, který má výrazně lepší vlastnosti a vyšší trvanlivost než jednovrstvé povlakované slinuté karbidy.

Vyrobené slinuté karbidy obsahují různé nerovnosti a mastnoty, proto musí před samotným povlakováním projít tzv. předdepozičními úpravami, aby byla zajištěná dobrá přilnavost povlaku k podkladu. Mezi tyto úpravy patří například broušení, odmašťování, omílání v granulátech, iontové čištění.

Existují dva hlavní typy povlakovaní – nízkoteplotní metoda PVD a vysokoteplotní metoda CVD. Největší rozdíl mezi metodami CVD a PVD, mimo teploty, spočívá i ve způsobu získání kovového prvku povlaku. CVD získává kovový prvek prvku povlaku z plynné fáze, PVD z pevného materiálu terče (elektrody). Hlavní snahou u metody CVD je snížit vysokou procesní teplotu (až 1500°C). Původní CVD metoda je tedy v současnosti nahrazována jejími modifikacemi např. PECVD, MTCVD nebo MWPCVD.

Budoucnost povlakovaných slinutých karbidů patří povlakům z kubického nitridu boru. Ty jsou zatím pouze ve fázi laboratorního výzkumu a ještě se sériově nevyrábí.

V poslední části bakalářské práce se zabývám srovnáním vybraných slinutých karbidů od různých světových i domácích výrobců. Vybíral jsem povlakované slinuté karbidy pro soustružení od švédské společnosti Sandvik Coromant, která je největší světový výrobce řezných nástrojů. Déle jsem vybíral materiály z katalogu šumperské firmy Pramet tools, která je jedinou českou firmou na poli výrobců řezných nástrojů. Jako třetího výrobce jsem volil rakouskou společnost Ceratizit. Od každého výrobce jsem vybral vždy tři materiály a porovnal. Předmětem porovnání se stala řezná rychlost a oblast využití. Z vybraných vzorků lze obrábět s nejvyšší řeznou rychlostí nástrojemi z materiálů od společnosti Sandvik Coromant (GC4205 - pro skupinu P, GC2015- pro skupinu M, GC3205- pro skupinu K). Porovnávání řezných rychlostí slinutých karbidů od firmy Ceratizit s ostatními výrobci je však velmi obtížné, protože jsou v katalogu uváděny pro široké rozmezí posuvu na otáčku (0,05 - 1,5 mm)

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. [překl.] M. Kudela. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. str. 857. ISBN 91-97 22 99-4-6.
2. ATEAM - MATERIÁLOVÝ VÝZKUM. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní - Katedra materiálu a strojírenské metalurgie. *Prášková metalurgie*. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/praskova_metalurgie.pdf.
3. ATEAM - MATERIÁLOVÝ VÝZKUM. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní - Katedra materiálu a strojírenské metalurgie. *Tenké vrstvy*. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf.
4. ATEAM - MATERIÁLOVÝ VÝZKUM. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní - Katedra materiálu a strojírenské metalurgie. *Tenké vrstvy*. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_fel_1.pdf.
5. CERATIZIT. *About us* [online] [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.ceratizit.com/about-us_ENG_HTML.htm?lc=2.
6. CERATIZIT. *Tools and inserts for turning*. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.ceratizit.com/2623_ENG_HTML.htm.
7. CSM INSTRUMENTS. *Scratch test*. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.csm-instruments.com/scratch.
8. EKRT, O. *Technologie a vlastnosti tenkých vrstev, tenkovrstvé senzory*. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/senzory/05_TechnologieCVD_%20PVD_PECVD_MOVPE_MBE.pdf.
9. ENGDAHL, Ch. CVD *Diamond-coated rotating tools for composite machining*. Crystallume. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.crystallume.com/html/composite_machining.html.
10. GARCIA, J., PITONAK, R. *The role of cemented carbide functionally graded outer-layers on the wear performance of coated cutting tools.* International journal of refractorymetals and hard materials. [online] 2011. [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436811002125.
11. HOLUBÁŘ, P., ŠÍMA, M., ZINDULKA, O. *Měření vlastností povlaků na nástrojích*. MM Průmyslové spektrum. [Online] 2004. [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-vlastnosti-povlaku-na-nastrojich.html.
12. HOLUBÁŘ, P., ŠÍMA, M., ZINDULKA, O. *Technologie úprav nástrojů před a po povlakování.* MM Průmyslové spektrum. [online] 2005. [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-uprav-nastroju-pred-a-po-povlakovani.html.
13. HOUDEK, J., KOUŘIL, K. *Opotřebení břitů nástrojů ze slinutých karbidů*. MM Průmyslové spektrum. [online] 2005. [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/opotrebeni-britu-nastroju-ze-slinutych-karbidu-2.html.
14. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing s.r.o., 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
15. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Sylabus [online]. 2006, [vid. 2014-03-20]. Dostupné na World Wide Web: http://ust.fme.vutbr./obrabeni/opory-save/mat_rez_nastroje/ materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf

16. HUMÁR, A., DANG, V.H. *Trendy v povlakování slinutých karbidů.* MM Průmyslové spektrum. [online] 2001. [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html.
17. CHEMPOINT. *Magnetronové naprašování*. [online] 2012. [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.chempoint.cz/magnetronove-naprasovani.
18. IAM. *Group High Performance Thin Film Composites: Research Areas*. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.iam.kit.edu/awp/english/270.php.
19. KEUNECKE, M., UHLMANN, E., FUENTES, J.A. *Machining of high performance workpiece materials with CBN coated cutting tools.* Thin Solid Films. [online] 2009. [vid. 2014-03-20]. Dostupný z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609009015570#.
20. KLAGES, C.-P. *Diamond coatings and cBN coatings for tools.* International journal of refractory metals and hard meterials. [online] 1998. [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436898801005.
21. KŘÍŽ, A. *Nové trendy vývoje tenkých vrstev vytvořených PVD a CVD technologií v aplikaci na řezné nástroje.* Západočeská univerzita v Plzni. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Nove_trendy.pdf.
22. KŘÍŽ, A. *Tenké vrstvy.* [online] 2006. [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf.
23. KŘÍŽ, A., HÁJEK, J. *Tribologická analýza "PIN-on-DISC"*. Metal. [online] 2005. [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.metal2014.com/files/proceedings/metal_05/papers/70.pdf.
24. KŘÍŽ, A., PODANÝ, P. *Předdepoziční procesy při výrobě tenkých vrstev.* Metal. [online] 2006. [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/podany_metal06.pdf.
25. LIBRA, M. *Naprašování tenkých vrstev*. Elektro. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25484.
26. LMNF. *Laser CVD*. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://laser.gist.ac.kr/board/bbs/board.php?bo_table=rese_02.
27. MALSHE, A. P., JIANG, W., GOFORTH, R. C. *Cubic Boron Nitride (cBN) based nanocomposite coatings on cutting inserts with chip breakers for hard turning applications.* Surface and Coatings Technology. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897205008157.
28. POPOV, A. *Řezné nástroje*. Technická univerzita v Liberci. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.technomat.cz/data/katedry/kom/KOM_RN_PR_04_CZE_Popop_Nastrojove_materialy,_nastrojove_oceli.pdf.
29. PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk, ČR. *Soustružení 2012* [online]. 2012 [vid. 2014-03-20]. Dostupný z: http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/Turning%202012%20CZ%20prog.pdf.
30. PRAMET. *O společnosti*. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.pramet.com/cz/o-spolecnosti.html.
31. PVD COATINGS. *PVD povlakování* [online] [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.pvd-coatings.co.uk/.
32. SANDVIK AB, Sandviken, Sweden. *Small Part Machining* [online]. [2012] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z:

http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/en-gb/TURN_A.pdf

33. SANDVIK COROMANT. *Nástrojové materiály*. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/introduction/Pages/default.aspx.
34. SANDVIK COROMANT. *Sandvik Coromant ve zkratce*. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/aboutus/sandvik_coromant_in_brief/Pages/default.aspx.
35. ŠÍMA, M., JANKŮ, R. *Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky*. MM Průmyslové spektrum. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupný z: http://www.shm-cz.cz/wp-content/uploads/2013/03/2007_04.pdf.
36. TAEGUTEC. *Výroba VBD a druhy povlaků*. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrabeni_331.pdf.
37. UHLMANN, E., BRAEUNER, G., WIEMANN, E., KEUNECKE, M. *CBN coatings on cutting Tools*. Technical university Berlin. [online] [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: https://www.iwf.tu-berlin.de/fileadmin/fg199/Hartspan-Projekt/NEWS/CBN_Coating.pdf.
38. YANG, Q. *Deposition and characterization of diamond coatings on WC-Co cutting tools with W/Al interlayer*. Diamond and related materials. [online] 2009. [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925963510000087.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CACVD	[-]	Cascade Arc Plasma – assisted Chemical Vapour Deposition
CC	[-]	Řezná keramika
CT	[-]	Cermety
CVD	[-]	Chemical Vapour Deposition
CVI	[-]	Chemical Vapour Infiltration
HFCVD	[-]	Hot Filament CVD Chemical Vapour Deposition
HSS	[-]	Rychlořezná ocel
HV	[-]	Tvrdost dle Vickerse
LICVD	[-]	Laser Induced Chemical Vapour Deposition
MTCVD	[-]	Middle Temperature Chemical Vapour Deposition
MWPCVD	[-]	Micro Wave Plasma Chemical Vapour Deposition
NO	[-]	Nástrojová ocel
PECVD	[-]	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition
PKD	[-]	Polykrystalický diamant
PKNB	[-]	Polykrystalický kubický nitrid boru
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition
SK	[-]	Slinutý karbid
TEM	[-]	transmisní elektronová mikroskopie
XRD	[-]	Rentgenová difrakce

Symbol	Jednotka	Popis
$\mathbf{v_c}$	[$m.min^{-1}$]	řezná rychlost
f	[mm]	posuv na otáčku