



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 A JEJICH EFEKTIVNÍ VYUŽITÍ

COATED CEMENTED CARBIDES AND THEIR EFFECTIVE USE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Tomáš PAVLOVSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Anton HUMÁR, CSc.

BRNO 2012

ZADÁNÍ PRVNÍ STRANA

ZADÁNÍ ZADNÍ STRANA

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá povlakovanými slinutými karbidy, které se používají pro výrobu řezných nástrojů. V úvodní části je uveden přehled nepoužívanějších nástrojových materiálů. Hlavní část práce je zaměřena na výrobu povlakovaných SK, metody povlakování, druhy a vlastnosti povlaků. Závěrečná část se zabývá povlakovanými slinutými karbidy v sortimentu výroby nejvýznamnějších světových producentů nástrojů a nástrojových materiálů, řezivosti nástroje a doporučenými pracovní podmínky pro jejich efektivní využití.

Klíčová slova

Slinuté karbidy, vlastnosti, metody povlakování, výrobci, řezné podmínky

ABSTRACT

This thesis deals with coated cemented carbides, which are used for the manufacture of cutting tools. The introductory section provides an overview of the most common tool materials. The main part focuses on the production of coated SK, coating methods, types and properties of coatings. The final section deals with coated cemented carbide product range in the world's leading producer of tools and tool materials, tools and recommended working conditions for their effective use.

Key words

Cemented carbides, properties, methods of coating, manufacturers, cutting conditions

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAVLOVSKÝ, Tomáš. *Povlakované slinuté karbidy a jejich efektivní využití*. Brno 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 53 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Anton Humár, CSc..

PROHLÁŠENÍ

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

.....
Datum

Bc. Tomáš Pavlovský

PODĚKOVÁNÍ

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

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 Základní dělení materiálů pro řezné nástroje.....	10
1.1 Nástrojové oceli.....	10
1.2 Slinuté karbidy	10
1.3 Cermety	10
1.4 Řezná keramika	10
1.5 Supertvrde řezné materiály	11
2 Druhy a značení SK.....	12
3 Struktura a vlastnosti SK.....	13
3.1 Vlastnosti SK typu WC-Co.....	13
3.1.1 Fyzikální vlastnosti ³	13
3.1.2 Mechanické vlastnosti ³	14
3.2 Vlastnosti SK typu WC-TiC-Co	16
3.3 Vlastnosti SK typu WC-TiC-TaC.NbC-Co	16
4 Výroba SK.....	17
4.1 Výroba a příprava prášků	17
4.2 Formování směsi	19
4.3 Slinování.....	19
5 Povlakování SK.....	21
5.1 Metoda PVD.....	22
5.1.1 Napařování	23
5.1.2 Naprašování.....	24
5.1.3 Iontová implantace	25
5.2 Metoda CVD	26
5.3 Vlastnosti povlaků.....	27
5.3.1 Tloušťka	27
5.3.2 Drsnost.....	28
5.3.3 Adheze.....	28
5.3.4 Tvrdost.....	29
5.3.5 Odolnost vůči oxidaci	29

5.3.6 Chemická stabilita	30
5.3.7 Tepelná stabilita	30
5.3.8 Kluzné vlastnosti	30
5.4 Vývoj v oblasti povlaků	30
5.4.1 Povlak Darwin.....	30
5.4.2 Povlaky TripleCoatings.....	31
6 Hodnocení řezivosti nástroje.....	34
6.1 Opatření nástroje	34
6.2 Řezivost nástroje	35
7 Slinuté karbidy v sortimentu výroby nejvýznamnějších domácích a světových producentů nástrojů a nástrojových materiálů	38
7.1 Pramet Tools	38
7.2 Sandvik Coromant	41
7.3 Ceratizit.....	44
ZÁVĚR.....	48
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	49
Seznam použitých symbolů a zkratek	52

ÚVOD

Strojírenská technologie je velice významným a neustále se rozvíjejícím odvětvím průmyslu. Proces obrábění je již desítky let předmětem vědeckého výzkumu a intenzivního vývoje.

Celá řada strojních součástí vyráběných z různých materiálů vzniká obráběním. Obrábění je odebrání materiálu ve formě třísky a vytváření nového povrchu požadovaného tvaru, rozměrů a jakosti řezným nástrojem. Průběh řezného procesu významně závisí na vlastnostech řezné části nástroje, která je zhotovena z nástrojového materiálu požadovaných vlastností. U nástrojových materiálů požadujeme dostatečnou tvrdost, odolnost proti opotřebení, pevnost v ohybu a tlaku, houževnatost, řezivost apod. Všechny vlastnosti by si měl nástrojový materiál udržovat bez výrazných změn i při vysokých pracovních teplotách po dostatečně dlouhou dobu.

Řezné nástroje používané jsou vyráběny z různých materiálů, které se neustále vyvíjejí a zdokonalují. Vývoj nástrojových materiálů souvisí s vývojem materiálů, které je třeba obrábět, s vývojem a rostoucím výkonem moderních obráběcích strojů a také s rostoucími nároky na kvalitu obrobených ploch.

Slinuté karbidy jsou řezné materiály, které obsahují tvrdé částice karbidů vázané kovovým pojivem. Při obrábění kovů mají vedoucí postavení. Mohou být použity pro obrábění vysokými posuvovými rychlostmi a pro těžké přerušované řezy.

Na trhu s řeznými nástroji působí celá řada výrobců. Největším světovým výrobcem nástrojových materiálů a nástrojů je firma Sandvik Coromant. Jediným českým výrobcem nástrojů ze slinutých karbidů je firma Pramet Tools se sídlem v Šumperku.

Předložená diplomová práce se zabývá hodnocením výrobního sortimentu a použitím povlakovaných slinutých karbidů společností Pramet Tools, Sandvik Coromant a Ceratizit.

1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ MATERIÁLŮ PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE

Řezné nástroje, které se používají pro obrábění, se vyrábějí z různých materiálů, jež se neustále vyvíjejí a zdokonalují. Zdokonalování řezných materiálů souvisí s vývojem materiálů, které je třeba obrábět, s vývojem moderních obráběcích strojů a také se stále rostoucími nároky na kvalitu obrobených ploch. Mezi nástrojové materiály patří nástrojové oceli, slinuté karbidy, cermety, řezná keramika a supertvrdé řezné materiály (syntetický diamant, kubický nitrid bóru).

1.1 Nástrojové oceli

Nástrojové oceli (NO) patří mezi nejstarší materiály používané pro výrobu řezných nástrojů, přesto stále nacházejí své uplatnění. Mezi jejich přednosti patří dobrá houževnatost a pořizovací cena. Nelegované nástrojové oceli obsahují nejčastěji 0,4 až 1,1 % C a nízký obsah Mn. Tyto oceli jsou vhodné pro výrobu ručních nástrojů a nástrojů pro strojní obrábění řeznou rychlostí do 15 m.min⁻¹, pracujících za teploty do 220°C.⁶

Do legovaných ocelí se úmyslně přidávají legující (přísadové) prvky pro zlepšení jejich vlastností. Rozlišujeme legující prvky karbidotvorné (Cr, V, W, Mo), které vytváří tvrdé, do vysokých teplot stálé karbidy. Druhou skupinou legujících prvků jsou prvky nekarbidotvorné (Ni, Si, Co). Břit nástroje z legované oceli odolává teplotám 250°C až 350°C.⁶

Rychlořezné oceli jsou zvláštní skupinou legovaných nástrojových ocelí. Obsahují karbidotvorné prvky W, Cr, V, Mo a nekarbidotvorný prvek Co. Obsah uhlíku se zpravidla pohybuje do 1%. Podle obsahu legujících prvků jsou vhodné pro výrobu řezných nástrojů určených k obrábění ocelí, ocelí na odlitky o vysoké pevnosti a tvrdosti a těžkoobrobitelných materiálů. Břit řezného nástroje odolává teplotám až 700°C při řezných rychlostech 25 až 50 m.min⁻¹.⁶

1.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou nástrojové materiály, které mají vedoucí uplatnění při výrobě řezných nástrojů. Základem všech druhů slinutých karbidů je karbid wolframu (WC). Jako další složky jsou používány karbidy titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC) a chrómu (Cr₃C₂). Pojícím materiálem je nejčastěji kobalt (Co). Ze slinutých karbidů se nejčastěji vyrábějí břitové destičky, které se pájí nebo mechanicky upevňují na řeznou část nástroje. Pro zlepšení jejich vlastností se nástroje ze SK opatřují povlaky.^{1,5,6}

1.3 Cermety

Cermety jsou řezné materiály, které obsahující tvrdé částice (TiC, TiN, TiCN, TaN) spojené kovovým pojivem (Ni, Mo, Co). Tvrdost cermetů je přibližně stejná jako u slinutých karbidů, mají však nižší houževnatost, proto jsou většinou používány pro lehké a střední řezy. Při jejich použití je dosahováno velmi nízkých drsností povrchu, jsou proto velmi rozšířenými řeznými materiály pro dokončovací obrábění.^{5,4,6}

1.4 Řezná keramika

Keramické řezné materiály mají vysokou tvrdost a křehkost, nízkou tepelnou vodivost a chemicky nereagují s materiálem obrobku. Břitové destičky z řezné keramiky se používají pro obrábění řeznými rychlostmi až 1600 m.min⁻¹, mají vysokou trvanlivost břitu a snášejí vysokou teplotu. Podle normy ČSN ISO 513 se keramické řezné materiály rozdělují a označují:⁵

- CA - oxidická keramika na bázi Al_2O_3 ;
- CM - směsná keramika na bázi Al_2O_3 s neoxidickými komponentami;
- CN - neoxidická keramika na bázi Si_3N_4 ;
- CC - povlakovaná keramika.

Řezná keramika na bázi Al_2O_3 má vysokou tvrdost za tepla, vysokou termochemickou stabilitu ale nízkou houževnatost. Keramika na bázi Si_3N_4 má vysokou odolnost proti mechanickému porušení, odolává teplotním rázům a zachovává si vysoký stupeň tvrdosti i za vysokých teplot. Řezná keramika není příliš vhodná pro obrábění ocelí a tvárných litin, kde vykazuje rychlé opotřebení.^{5,6}

1.5 Supertvrde řezné materiály

Mezi supertvrde řezné materiály patří polykrystalický kubický nitrid bóru a polykrystalický diamant. Polykrystalický kubický nitrid bóru je velice tvrdý řezný materiál, který si svou tvrdost zachovává i při vysokých teplotách (až $2000^{\circ}C$), má velkou odolnost proti abrazivnímu opotřebení a dobrou chemickou stabilitu. Používá se pro obrábění tvrdých a žáruvzdorných materiálů, kalených ocelí a tvrdých litin. Lze jím obrábět i SK s vyšším obsahem kobaltu.^{3,6}

Polykrystalický diamant je materiál, jehož tvrdost přibližně odpovídá tvrdosti přírodního monokrystalického diamantu. Používá se pro obrábění všech neželezných slitin (zejména na bázi hliníku, mědi, titanu), tvrdého kaučuku, grafitu, skla, keramiky. Segmenty z PD jsou připevněny na vyměnitelné břitové destičce ze slinutého karbidu. Trvanlivost břitu je mnohonásobně větší než u slinutých karbidů.⁵

Tab. 2.1 Rozdělení SK dle ČSN ISO 513 v závislosti na použití¹⁰

P	uhlíkové (nelegované) oceli třídy 10, 11, 12 nízko a středně legované oceli třídy 13-17 nástrojové oceli třídy 19 uhlíkové ocelolitiny skupiny ČSN 42 26xx nízko a středně legované ocelolitiny skupiny ČSN 42 27xx
M	austenitické a feriticko-austenitické oceli korozivzdorné, žáruvzdorné a žárovevné oceli nemagnetické a otěruvzdorné
K	šedá litina nelegovaná i legovaná (ČSN 42 24xx) tvárná litina (ČSN 42 23xx) temperovaná litina (ČSN 42 25xx)
N	neželezné kovy, slitiny Al a Cu
S	speciální žárovevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti
H	zušlechtěné oceli s pevností nad 1500 MPa kalené oceli HRC 48 – 60 tvrzené kokilové litiny HSh 55 - 85

2 DRUHY A ZNAČENÍ SK

Aby bylo možné jednoduše určit, o jaký druh slinutého karbidu se jedná, byl vyvinut klasifikační systém ISO. Slinuté karbidy používané pro výrobu řezných nástrojů jsou podle normy ČSN ISO 513 rozdělovány v závislosti na použití do šesti skupin – P, M, K, N, S, H, které jsou barevně označovány. Jednotlivé skupiny SK se dále dělí na podskupiny (např. P05, P45, M20, K35). Rostoucí číslo podskupiny znamená rostoucí obsah pojícího kovu (kobaltu), rostoucí houževnatost a pevnost v ohybu, klesající tvrdost a otěruvzdornost daného substrátu. Podskupiny s vyšším číselným označením jsou používány pro těžké obrábění, hrubování a přerušované řezy za použití nízké řezné rychlosti a vyššího posuvu. Lze je také užít pro frézování a vrtání. Podskupiny s nižším číselným označením se používají pro lehké a dokončovací obrábění nepřerušovaným řezem, vysokou řeznou rychlostí, nízkou posuvovou rychlostí a malou hloubkou řezu.^{1,2,3}

Do skupiny **P** jsou zařazeny dvoj-karbidové SK typu WC-TiC-Co. Tato skupina je označována modrou barvou a je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku (např. uhlíkové oceli, slitinové oceli, feritické korozivzdorné oceli apod.). Obsah TiC zaručuje vysokou odolnost proti difúzi za vysokých teplot, která je jednou z hlavních příčin vytváření výmolu na čele nástroje.^{3,2,10}

Skupinu **M** tvoří více-karbidové SK typu WC-TiC-TaC.NbC-Co. Tato skupina je označována žlutou barvou a je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou a střední třísku (např. lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli, tvárné litiny apod.).³

Do skupiny **K** jsou zařazeny jedno-karbidové SK typu WC-Co. Tato skupina je označována červenou barvou a je určena pro obrábění materiálů, které tvoří krátkou, drobivou třísku (např. šedé litiny, neželezné slitiny, nekovové materiály apod.). Nástroje vyrobené z těchto typů SK nejsou vhodné pro obrábění materiálů tvořících dlouhou třísku, která více tepelně zatěžuje čelo nástroje.^{2,3}

Skupina **N** je označována zelenou barvou. Tyto SK jsou určeny pro obrábění neželezných slitin na bázi hliníku, hořčíku, mědi a obrábění plastů a kompozitů.^{3,10}

Skupina **S** je označována hnědou barvou. SK této skupiny se užívají pro obrábění žáropevných slitin na bázi niklu, kobaltu, železa a titanu.¹⁰

Skupina **H** je označována šedou barvou a je určena pro obrábění zušlechtěných a kalených ocelí a tvrzených litin.¹⁰

Rozdělení SK dle ČSN ISO 513 v závislosti na použití je uvedeno v tabulce 2.1.

3 STRUKTURA A VLASTNOSTI SK

Slinuté karbidy jsou materiály s dobrými funkčními vlastnostmi, kterých je dosaženo obsahem tvrdých karbidických částic v jejich struktuře. Složení a struktura jednotlivých slinutých karbidů se výrazně liší, aby bylo možné splnit různorodé podmínky pro obrábění. Jednotlivé druhy slinutých karbidů, které se používají pro výrobu řezných nástrojů, se liší: ¹

- typem a velikostí tvrdých částic;
- druhem kovového pojiva a jeho podílem;
- kvalitou vstupních surovin a výroby;
- výrobní technologií.

Zatížení slinutých karbidů tahem nebo ohybem má za následek jejich porušení téměř bez plastické deformace. Při zatížení pouze normálovým tlakovým napětím však mohou SK vydržet i značné plastické deformace. U SK pro řezné aplikace je obsah karbidických částic minimálně 80% a jejich zrnitost je přibližně 0,5 až 5,0 μm . S rostoucím podílem tvrdých částic s vyšší tvrdostí a pevností v tlaku roste i odolnost SK proti opotřebení. Velká zrna zajišťují houževnatost, malá zrna pak udělují SK poměrně vysokou tvrdost. Tvrdost a pevnost v tlaku s narůstající teplotou klesají, přesto si SK zachovávají vynikající odolnost proti opotřebení i při vysokých řezných rychlostech. ^{3,2,1}

Tvrdost a pevnost v tlaku jsou u slinutých karbidů vyšší než u ocelí, SK jsou však citlivější na namáhání tahem. Modul pružnosti je u slinutých karbidů dva až třikrát vyšší než u ocelí a jejich hustota je přibližně dvojnásobná. Součinitel tepelné roztažnosti je oproti ocelím poloviční, což ztěžuje jejich pájení na tělesa nástrojů vyrobená z ocelí. ¹

Na mechanické vlastnosti slinutých karbidů mají vliv také defekty (např. póry, velké tvrdé částice apod.), na kterých dochází většinou k iniciaci trhliny. Snížení počtu a velikosti defektů má za následek růst pevnosti bez poklesu tvrdosti. ³

3.1 Vlastnosti SK typu WC-Co

3.1.1 Fyzikální vlastnosti ³

Měrná hmotnost SK typu WC-Co je poměrně vysoká (až 15,2 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) a je dána vysokou měrnou hmotností karbidu wolframu. S rostoucím obsahem kobaltu její hodnota klesá. Skutečná měrná hmotnost je v důsledku zbytkové pórovitosti slinutého výrobku nižší než teoretická.

Tepelná vodivost u SK s obsahem Co do 30% je jen málo závislá na jeho obsahu a pohybuje se v rozmezí 50-105 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Pokud pojivová fáze mimo kobaltu obsahuje i nikl, hodnoty tepelné vodivosti klesají. Hodnota tepelné vodivosti s rostoucí teplotou klesá, vyšší hodnoty mají materiály s hrubším zrnem. Porovnání tepelné vodivosti karbidů WC-Co s ostatními materiály je na obrázku 3.6.

Součinitel délkové roztažnosti závisí na obsahu kobaltu a s jeho rostoucím obsahem se hodnota součinitele zvětšuje, je však nižší než u ocelí. Hodnoty součinitele se pohybují v rozmezí 3,4-7,1 [10^{-6}K^{-1}]. Porovnání součinitele délkové roztažnosti karbidů WC-Co s ostatními materiály je na obrázku 3.7.

3.1.2 Mechanické vlastnosti³

Tvrdość SK typu WC-Co je ve srovnání s tvrdostí rychlořezných ocelí mnohem vyšší (780-1850 HV) a závisí na obsahu kobaltu a velikosti zrn karbidické fáze. S klesajícím obsahem kobaltu tvrdost roste, ovšem s narůstající teplotou poměrně rychle klesá. Závislost tvrdosti na obsahu Co a velikosti zrn WC je na obrázku 3.1, závislost tvrdosti na teplotě a obsahu Co je na obrázku 3.5.

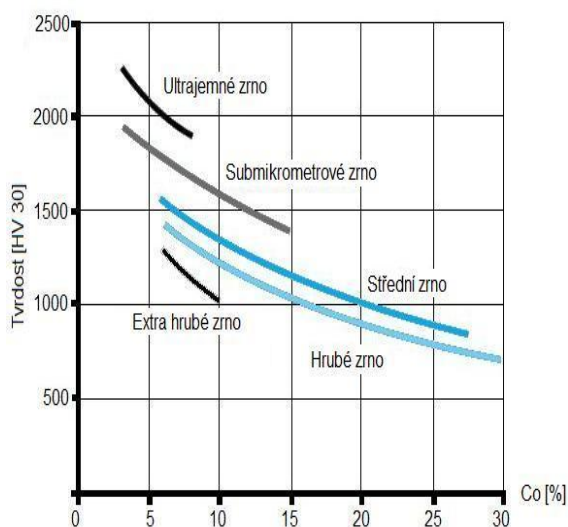
Pevnost v ohybu u SK typu WC-Co s rostoucím obsahem kobaltu roste a po dosažení maximální hodnoty, závislé na velikosti zrn WC, s dalším růstem obsahu Co klesá. Pevnost v ohybu také výrazně klesá s rostoucí teplotou. Závislost pevnosti v ohybu na obsahu Co a velikosti zrn WC je na obrázku 3.4.

Pevnost v tlaku je u slinutých karbidů typu WC-Co vysoká, závisí na velikosti zrn karbidické fáze a na obsahu pojiva. S rostoucím obsahem kobaltu pevnost v tlaku klesá, k poklesu dochází také s rostoucí teplotou. Závislost pevnosti v tlaku na obsahu Co a velikosti zrn WC je na obrázku 3.2.

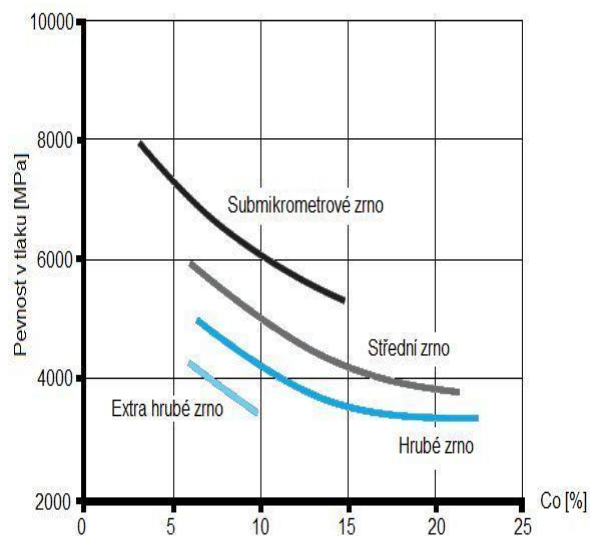
Slinuté karbidy typu WC-Co mají vysoký modul pružnosti v tahu. Jeho hodnota klesá s rostoucím obsahem kobaltu, k mírnému poklesu dochází také s rostoucí teplotou. Vyšší hodnoty modulu jsou u materiálů s jemnozrnnou strukturou. Modul pružnosti v tahu se u tohoto typu SK pohybuje v rozmezí přibližně 440-670 GPa. Modul pružnosti ve smyku dosahuje hodnot přibližně 170-270 GPa.

Lomová houževnatost SK typu WC-Co roste s rostoucím obsahem kobaltu a nabývá vyšších hodnot u materiálů s hrubším zrnem karbidické fáze. Do teploty 500-700 °C zůstává konstantní a při vyšších teplotách prudce narůstá. Lomová houževnatost je mírou odolnosti tělesa s definovanou trhlinou proti křehkému porušení. Závislost lomové houževnatosti na obsahu Co a velikosti zrn WC je na obrázku 3.3.

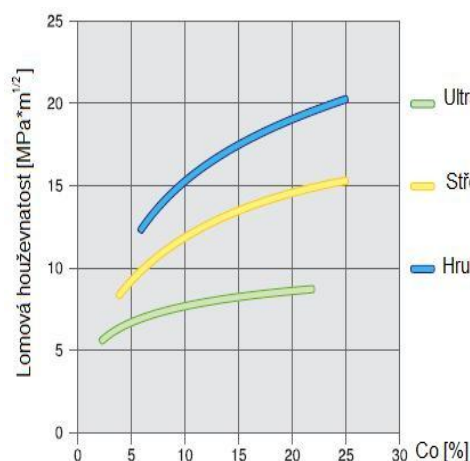
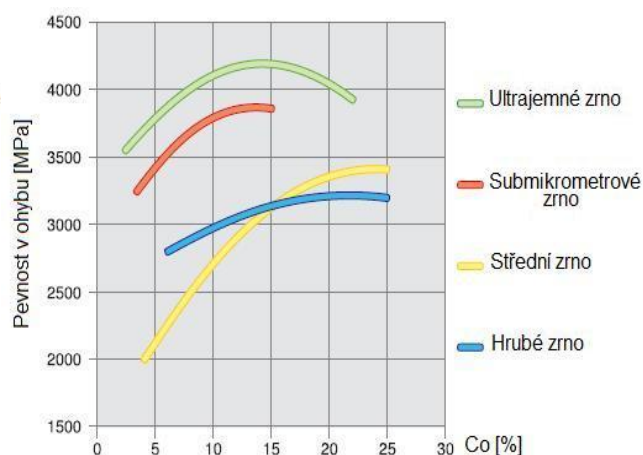
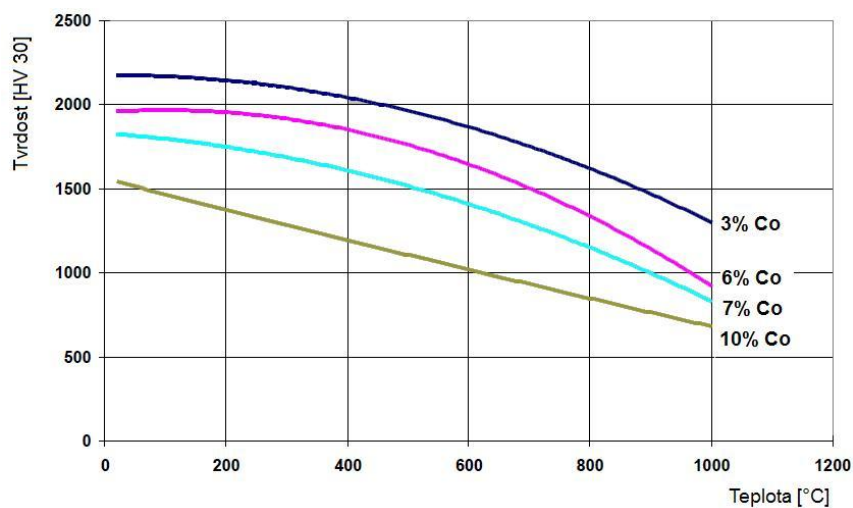
Vybrané vlastnosti slinutých karbidů WC-Co jsou uvedeny v tabulce 3.1.



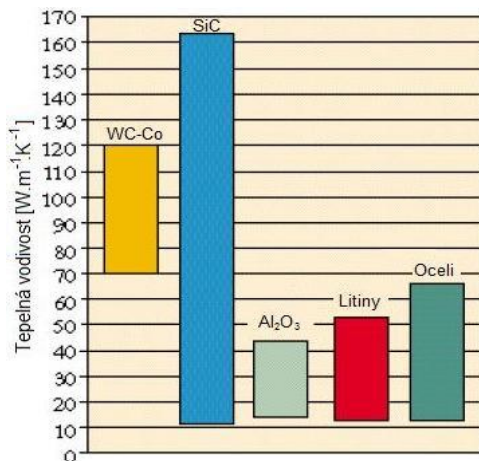
Obr. 3.1 Závislost tvrdosti na obsahu Co a velikosti zrn WC²⁶



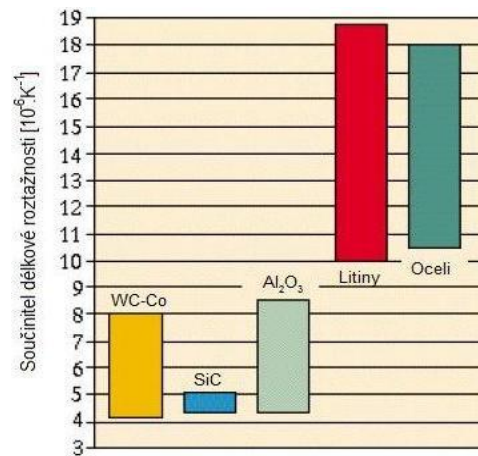
Obr. 3.2 Závislost pevnosti v tlaku na obsahu Co a velikosti zrn WC²⁶

Obr. 3.3 Závislost lomové houževnatosti na obsahu Co a velikosti zrn WC²⁷Obr. 3.4 Závislost pevnosti v ohybu na obsahu Co a velikosti zrn WC²⁷Obr. 3.5 Závislost tvrdosti na teplotě a obsahu Co⁸Tab. 3.1 Vlastnosti slinutých karbidů WC-Co⁴

Složení SK WC-Co		Měrná hmotnost [g.cm ⁻³]	Tvrdost [HV]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [MPa]
WC [%]	Co [%]					
97	3	15,1 - 15,2	1600 - 1700	5900	1000 - 1200	670000
95,5	4,5	15,0 - 15,1	1550 - 1650	5800	1200 - 1400	640000
91	9	14,5 - 14,7	1400 - 1500	4800	1500 - 1900	590000
89	11	14,0 - 14,3	1300 - 1400	4600	1600 - 2000	580000
85	15	13,8 - 14,0	1150 - 1250	3900	1800 - 2200	540000
80	20	13,1 - 13,3	1050 - 1150	3400	2000 - 2600	500000
75	25	12,8 - 13,0	900 - 1000	3200	2000 - 2800	470000
70	30	12,3 - 12,5	850 - 950	3000	1800 - 3000	440000



Obr. 3.6 Porovnání tepelné vodivosti karbidů WC-Co s ostatními materiály²⁶



Obr. 3.7 Porovnání součinitele délkové roztažnosti karbidů WC-Co s ostatními materiály²⁶

3.2 Vlastnosti SK typu WC-TiC-Co

Vlastnosti slinutých karbidů ovlivňuje nejen obsah kobaltu, ale také obsah karbidu titanu. U slinutých karbidů typu WC-TiC-Co s rostoucím obsahem TiC v matici:³

- měrná hmotnost klesá, její velikost se v závislosti na složení SK přibližně pohybuje v rozmezí 5,2 až 14,7 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$;
- tepelná vodivost klesá, její velikost je přibližně v rozmezí 13-80 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, při vysokém obsahu TiC (30-60%) mají SK nižší tepelnou vodivost než rychlořezné oceli;
- součinitel délkové roztažnosti mírně roste; jeho hodnota je přibližně 5,5-7,9 [10^{-6}K^{-1}]
- hodnota měrného odporu klesá;
- tvrdost (při stejném hmotnostním obsahu Co) roste, její hodnota se v závislosti na složení pohybuje v rozsahu přibližně 1300-1900 HV;
- pevnost v ohybu klesá při konstantním obsahu Co, její hodnota je přibližně 600-2000 MPa;
- pevnost v tlaku klesá, její hodnota je přibližně 3600-5600 MPa;
- modul pružnosti v tahu klesá.

S rostoucím obsahem Co v matici slinutých karbidů typu WC-TiC-Co:³

- měrná hmotnost klesá;
- tvrdost klesá;
- pevnost v ohybu roste při konstantním obsahu TiC;
- pevnost v tlaku klesá;
- modul pružnosti v tahu klesá.

3.3 Vlastnosti SK typu WC-TiC-TaC.NbC-Co

U slinutých karbidů typu WC-TiC-TaC.NbC-Co s rostoucím obsahem TaC.NbC dochází k poklesu pevnosti v ohybu, na tvrdost nemá obsah TaC.NbC významný vliv. Rostoucí obsah TiC má za následek zvyšování tvrdosti a s rostoucím obsahem kobaltu klesá tvrdost, pevnost v tlaku, modul pružnosti v tahu a roste pevnost v ohybu těchto materiálů. 4

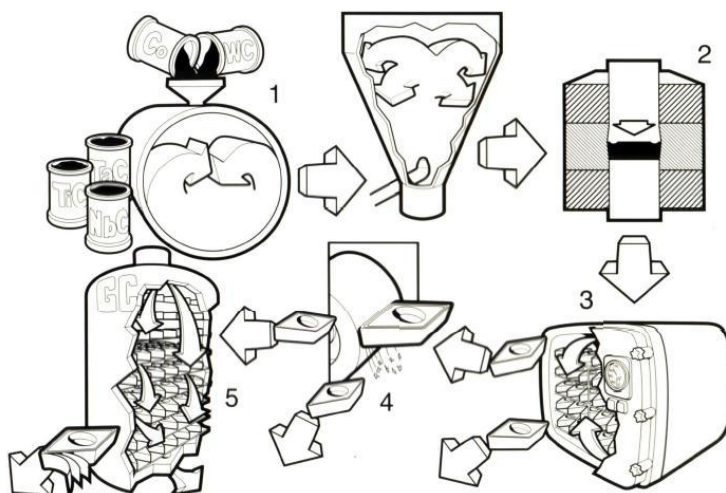
4 VÝROBA SK

Výroba slinutých karbidů je prováděna technologií práškové metalurgie. Prášková metalurgie se využívá především k výrobě předmětů s takovými fyzikálními a technologickými vlastnostmi, kterých nelze dosáhnout klasickými výrobními způsoby, nebo tehdy, je-li využití této metody ekonomicky výhodnější. Celý výrobní proces sestává z řady operací, které musí být pro dosažení požadovaných vlastností pečlivě prováděny a kontrolovány. Prášková metalurgie spočívá ve výrobě slinutých karbidů ze směsí prášků odpovídajících karbidů a pojících kovů, které se tvarují a lisují do požadovaného tvaru a následně slinují za teploty blízké se teplotě tavení pojiva. Výrobní procesy práškové metalurgie dovolují řídit a kontrolovat složení i zrnitost slinutých karbidů s velkou přesností. Složení a struktura směsí prášků mají pro kvalitu finálního výrobku velký význam, obsahy jednotlivých složek jsou velmi úzce tolerovány a musí být v průběhu výroby přesně kontrolovány. Hlavním cílem výroby je získat nástroje o vysokém výkonu a s homogenní strukturou.^{1, 11}

Výroba slinutých karbidů práškovou metalurgií se skládá z několika etap:

- výroba a příprava prášků;
- formování směsi;
- slinování;
- dokončovací úpravy (např. broušení, povlakování).

Jednotlivé etapy výroby slinutých karbidů jsou zobrazeny na obrázku 4.1.



Obr. 4.1 Výroba SK (1 - výroba směsí prášků, 2 - lisování polotovarů, 3 - slinování, 4 - broušení destiček, 5 - povlakování destiček)¹

4.1 Výroba a příprava prášků

Výchozími surovinami pro výrobu slinutých karbidů práškovou metalurgií jsou prášky kovů, jejich sloučenin a případně i nekovů (např. grafitu). Práškový granulát (obr. 4.2) lze získat dvěma základními způsoby:¹¹

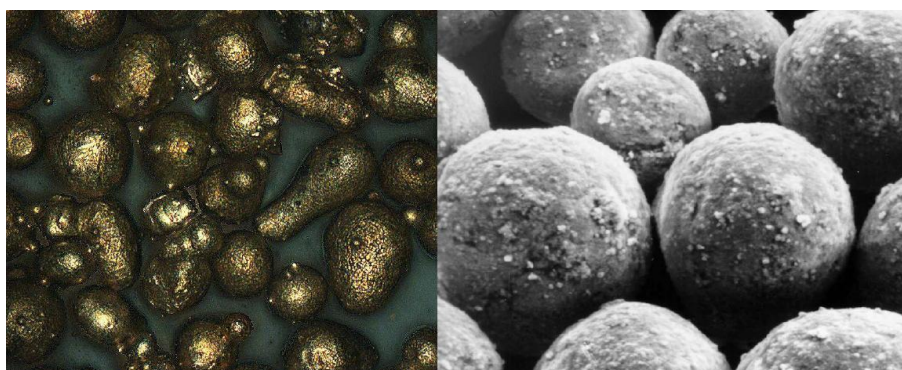
- mechanicky - drcením prášků v mlýnech nebo rozprašováním tekutého kovu;
- fyzikálně-chemicky - redukcí oxidů, štěpením karbonylů, elektrolytickým vylučováním a chemickým slučováním s nekovy (např. WC, TiC, TaC apod.).

Základní surovinou, využívanou pro výrobu slinutých karbidů, je wolfram. Z wolframových rud (scheelit, wolframit) se získává oxid wolframový, ze kterého se redukcí s vodíkem vyrábí wolframový prášek. Obměnami podmínek redukce lze získat prášek s různou velikostí zrna. Při redukci s vysokým přebytkem vodíku za nízké teploty, s malým přívodem oxidu wolframového, se získává jemnozrnný wolframový prášek. Při opačných podmínkách vzniká prášek s hrubším zrnem. Wolframový prášek se dále zpracovává tak, že se jeho určité množství smíchá se sazemí a poté se směs umístí do vysokofrekvenční pece s vodíkovou atmosférou. Při tomto procesu se slučuje wolfram s uhlíkem na karbid wolframu. Teplota při karburaci činí přibližně 1700°C.¹

Při přípravě prášků mletím se nejčastěji využívá kulových, vířivých, kladívkových nebo vibračních mlýnů. V mlecích agregátech dochází ke zpevňování jednotlivých částic materiálu až do vyčerpání jejich plastických vlastností. Koncentrace poruch a zvýšená vnitřní energie dosáhnou kritických hodnot, jež dávají vzniknout křehkým mikro a makrotrhlinám a v průběhu mletí se postupně zvyšuje disperznost mletého materiálu. Mletí je možno provádět za sucha nebo za mokra. Použití povrchově aktivní tekutiny snižuje povrchovou energii částic a tím zabraňuje vytváření hrubých částic a urychluje proces disperzity. Po mletí za mokra je nutno směs dokonale vysušit, například metodou sušení rozprašováním. Dokonale vysušená RTP (Ready To Press) směs je připravena k lisování.⁸

Rozprašování tekutého kovu je nejproduktivnější, nejlevnější a nejrozšířenější metodou výroby prášků. Tato metoda spočívá v působení tlakového plynu či proudu tekutiny, případně i odstředivých sil na tekutý kov. Vytvořené kapky tuhnou následkem rychlého ochlazení. Vhodnou volbou podmínek (teploty lázně, viskozity, povrchového napětí a podmínek ochlazování) je možno do jisté míry ovlivnit základní vlastnosti prášků jako jsou disperzita, tvar a struktura. Čím vyšší je teplota ohřevu lázně a větší působení mechanické energie, tím větší je podíl jemných částic.⁸

K práškům se často přidávají pomocné látky (plastifikátory a maziva), které zlepšují lisovatelnost směsi a zmenšují tření mezi částicemi prášků a lisovacím nástrojem. Tyto látky také pomáhají polotovaru zachovat si tvar po slisování a musí se odstranit před slinováním.⁸



Obr. 4.2 Práškový granulát⁸

4.2 Formování směsi

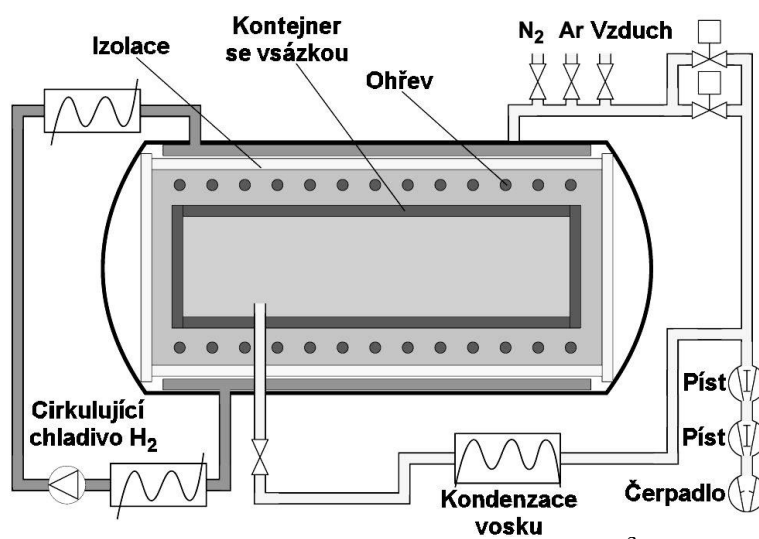
Formování je proces, jehož cílem je dosáhnout přibližně požadovaného tvaru, rozměrů a vlastností výrobků z prášků. Snahou při formování směsí je dosáhnout rovnoměrného zhutnění v celém objemu a minimální pórovitosti materiálu. Menší pórovitosti se dosahuje při různé velikosti částic prášků, kdy menší částice vyplňují prostor mezi většími. Směsi práškových karbidů a pojícího kovu lze formovat lisováním ve formovacích lisech, izostatickým lisováním za studena, hydrostatickým lisováním, protlačovacím lisováním, válcováním, lisováním explozí, vstřikováním apod.^{8,7}

Směsi pro výrobu břitových destiček se nejčastěji formují na jednočinných nebo dvojčinných formovacích lisech. Lisovací nástroj je vyroben z nástrojové oceli a pracovní plochy jsou vyloženy slinutými karbidy s vysokou kvalitou povrchu. Lisovací tlaky se pohybují přibližně v rozsahu 20 až 100 MPa. Účelem lisování je dát prášku přibližný tvar výrobku a relativní tuhost. Rozměry výlisku však musí být větší než rozměry slinutého tělesa, protože pórovitost výlisku činí přibližně 50 objemových procent i více. Při slinování se tato pórovitost odstraní a rozměry výlisku se smrští o přibližně 17 až 20 i více procent.^{1,7,8}

4.3 Slinování

Pevnost výlisků zhotovených ze směsí prášků nebývá vyhovující, proto po jejich formování následuje slinování. Slinování je tepelný proces, při kterém se zvětšuje soudržnost výlisku zvětšením styčných ploch mezi částicemi a odstraněním deformačního zpevnění z výroby prášků i zhutňování. Slinování se realizuje difuzní cestou, kdy difuze je uvedena do chodu dodáním aktivační energie ve formě tepla. Prášek má ve srovnání s kompaktním tělesem podstatně větší povrch (vysokou povrchovou energii, která je hnací silou slinování). Čím je prášek menší, tím je specifický povrch větší a tím slinování probíhá rychleji. V počátečním stádiu slinování dochází mezi částicemi práškového kovu ke vzniku a narůstání mezičásticových spojení, dále dochází ke zmenšování středního rozměru pórů a v konečném stádiu slinování se ztrácí spojení pórů s jednotlivými částicemi prášku.⁸

Proces slinování musí být přesně řízen a vyžaduje dodržování přesné teploty, doby průběhu a odpovídající atmosféry pracovního prostředí. Výlisky uložené na grafitových podložkách nebo v grafitových kontejnerech se vkládají do slinovacích pecí (obr. 4.3), ve kterých pobíhá slinovací proces. Slinování probíhá v ochranné atmosféře (vodík) nebo ve vakuu. Při vlastním slinování dochází nejprve k předběžnému ohřevu (předslinování), při kterém dojde k odstranění plastifikátorů a maziv. Poté následuje ohřev na pracovní teplotu a výdrž na této teplotě. Při pracovní teplotě 1350 až 1650°C (teplota závislá na složení zpracovávaného materiálu) se kovové pojivo roztaví a rozpustí se v něm i značné množství karbidů. Proces slinování je ukončen následným ochlazením výrobků. I v této etapě stále probíhá difuze v materiálu, proto může rychlost ochlazování ovlivnit výsledné vlastnosti slinutého tělesa.^{1,3}

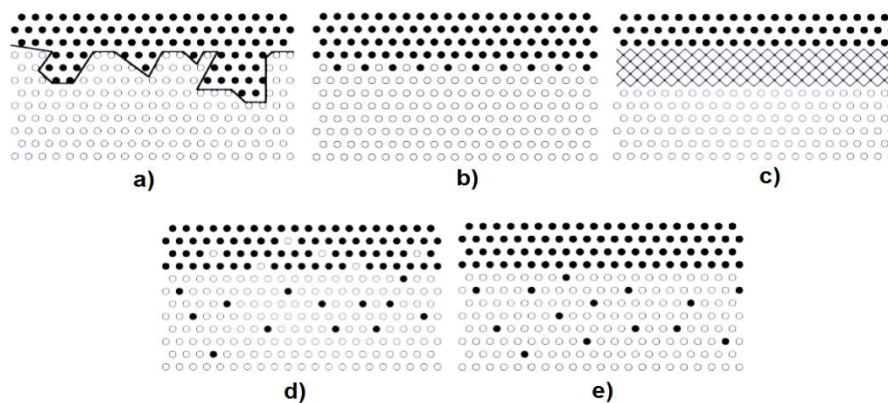
Obr. 4.3 Schéma slinovacího zařízení³

5 POVLAKOVÁNÍ SK

Velice významným krokem ve vývoji řezných materiálů bylo zavedení povlakovaných slinutých karbidů koncem 60. let 20. století. Povlak o tloušťce jen několik μm výrazně změnil výkonnost nástrojů ze SK. Díky tepelné odolnosti došlo k podstatnému zvýšení řezné rychlosti, trvanlivosti břitu a bylo možné dosáhnout i větších posuvů. Trvanlivost povlakovaných SK byla v porovnání s materiály bez povlaku mnohonásobná. Moderní povlakované SK získaly značně na výkonnosti a spolehlivosti a obvykle se uvádějí čtyři stupně jejich vývoje. **Povlaky 3. generace** jsou vícevrstvé povlaky (2 až 3, případně i více vrstev) s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Řazení vrstev, v pořadí od podkladu k povrchu, bývá většinou: TiC – Al_2O_3 , TiC – TiN, TiC – TiCN – TiN, TiC – Al_2O_3 – TiN, TiCN – Al_2O_3 – TiN. **Povlaky 4. generace** jsou vícevrstvé povlaky (často více než deset vrstev a mezivrstev) s méně či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami. ^{1,13}

Jednou z důležitých vlastností povlaků je jejich soudržnost s podkladovým SK. Soudržnost povlaků s podkladovým substrátem závisí na struktuře, fyzikálních, chemických a mechanických vlastnostech podkladového materiálu, typu a tloušťce povlaku a podmínkách povlakování. Na rozhraní podklad – povlak lze rozlišovat různé charakteristické přechodové oblasti nebo mezivrstvy: ³

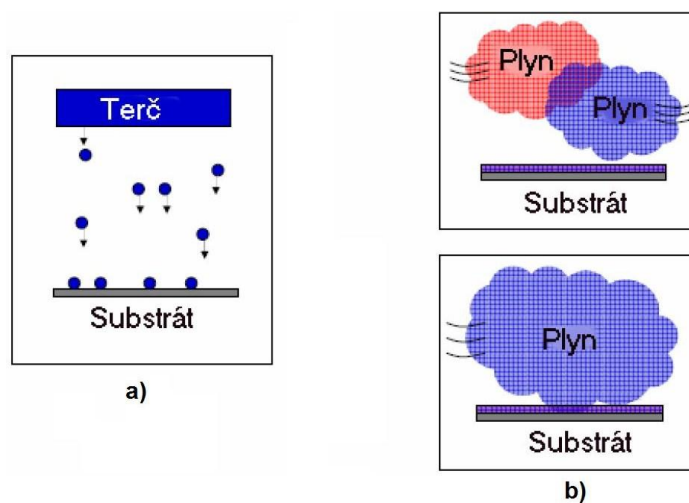
- **mechanická přechodová oblast** – nanášený povlak je ukotven v otevřených povrchových pórech, tím vzniká čistá mechanická vazba (obr. 5.1 a);
- **přechod monovrstva/monovrstva** - přechod povlaku do podkladu přes jednu nebo několik atomových rovin, přechod se tvoří, když mezi povlakem a podkladem nedojde k vzájemné difuzi (obr. 5.1 b);
- **spojený přechod** – mezi podkladem a povlakem se tvoří jasně ohraničená mezivrstva s definovaným chemickým složením (obr. 5.1 c);
- **difuzní přechod** – mezivrstva se strukturně gradientním přechodem z materiálu podkladu do materiálu povlaku (obr. 5.1 d);
- **pseudodifuzní přechod** – částice s vysokou energií proniknou v krystalové mřížce podkladu do určité hloubky a zůstanou tam uvězněny, aniž by začal působit difuzní mechanismus (obr. 5.1 e).



Obr. 5.1 Rozhraní podklad – povlak ³

Depozice tenkých vrstev se provádí jako finální operace na hotovém již tepelně zpracovaném substrátu. Výroba povlakovaných SK spočívá v nanášení tenké vrstvy materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení na podkladový materiál. Povlak ve formě tenké vrstvy má vyšší tvrdost i pevnost než stejný homogenní materiál v jakékoli jiné formě. Těchto výhodných vlastností je dosaženo zejména tím, že povlakový materiál neobsahuje žádné pojivo, má o jeden i více řádů jemnější zrnitost, méně strukturních defektů (póry, dutiny) a tvoří bariéru proti difuznímu opotřebení nástroje.^{9,13}

Moderními technologiemi povlakování se deponují nejen původní materiály pro jednotlivé vrstvy (TiC, TiN, TiCN, Al₂O₃), ale i další moderní materiály, například tzv. lubrikační povlaky, které výrazně snižují tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou a tím zvyšují výkon řezných nástrojů. Povlaky se na podkladový substrát nanášejí depozičními metodami. Metody depozice tenkých vrstev lze rozdělit do dvou základních skupin - PVD a CVD. Metoda PVD (Physical Vapour Deposition, obr. 5.2 a) je fyzikální metoda depozice, která je založena na fyzikálních principech odpaření nebo odprášení materiálů obsažených ve vrstvě (např. Ti, Al, Si, Cr) a jejich následné nanesení na substrát. Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition, obr. 5.2 b) je chemická metoda depozice vrstev, která využívá pro depozici směs chemicky reaktivních plynů (např. CH₄, C₂H₂) zahřátou na poměrně vysokou teplotu 900 – 1100 °C. Reakční složky jsou přiváděny v plynné fázi a vrstva vzniká na povrchu substrátu heterogenní reakcí.^{3,9}



Obr. 5.2 Tvorba povlaku metodou a) PVD, b) CVD⁹

5.1 Metoda PVD

Povlakovací metoda PVD (Physical Vapour Deposition) byla původně vyvinuta pro povlakování řezných nástrojů z rychlořezných ocelí, v současné době však dochází k velmi významnému rozvoji těchto metod a jejich využívání také u slinutých karbidů a jiných materiálů. U PVD metody jsou povlaky vytvářeny při teplotách 150 až 500 °C za sníženého tlaku (0,1 - 1 Pa) kondenzací částic, které jsou uvolňovány ze zdroje fyzikálními metodami. Současně jsou do pracovní komory vpuštěny inertní a reaktivní plyny (např. Ar a N₂), se kterými reagují uvolněné částice kovů. Tím se vytváří chemické sloučeniny, které se následně deponují na podkladový substrát v podobě tenké, vysoce přilnavé vrstvy.^{9,3,1}

Mezi výhody PVD depozice patří možnost povlakování ostrých hran (s poloměrem zaoblení pod 20 μm), vysoká odolnost vrstev, nízký koeficient tření, možnost vytvářet

velké množství různých kombinací vrstev, malé a snadno reprodukovatelné tloušťky vrstev a možnost tvorby přesných tloušťek vrstev. Hlavní nevýhodou metody je tzv. stínový efekt. Ten způsobuje, že na plochách, které neleží ve směru pohybu odpařovaných částic, se vytváří nedokonalá vrstva povlaku. Povlakovanými předměty je nutno pohybovat, aby bylo zajištěno rovnoměrné ukládání povlaku po celém povrchu.^{9,3}

Celý depoziční proces se dá obecně rozdělit do tří, po sobě jdoucích, kroků: 9

- převedení deponovaného materiálu do plynné fáze;
- transport par ze zdroje k substrátu;
- vytváření vrstvy na povrchu substrátu.

PVD technologie je založena na těchto základních fyzikálních principech: 9

- napařování;
- naprašování;
- iontová implantace.

5.1.1 Napařování

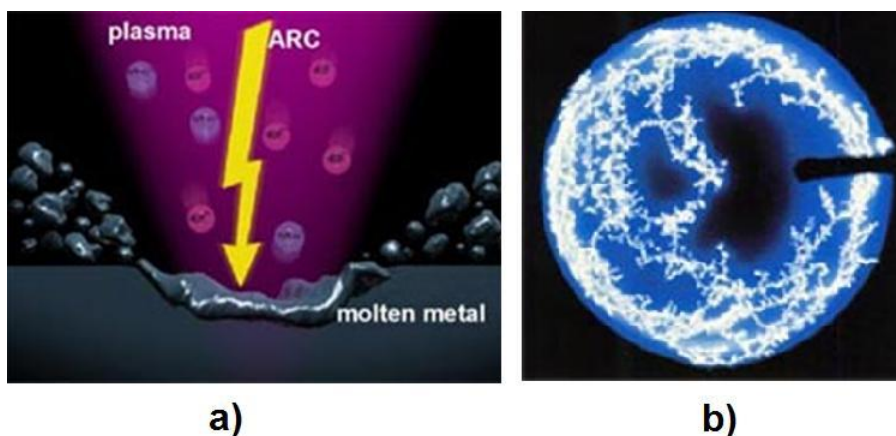
Napařovací procesy jsou založeny na odpařování materiálu z terčů, které jsou ohřívány různými způsoby, a na kondenzaci jejich par na povlakovaný substrát. Napařování probíhá ve vakuu (tlak 10^{-3} až 10^{-8} Pa). Odpařovaný terč se nachází v roztaveném stavu, proto musí být umístěn ve spodní části zařízení. Odpařovací zdroje jsou klasifikovány podle způsobu ohřevu do plynné fáze (odporově, indukčně, oblouk, paprsek elektronů, laser, apod.).^{9,4}

Laserem indukované napařování

U tohoto způsobu odpařování je materiál z povrchu terče opařován pomocí laserového paprsku. Mezi hlavní výhody laserového odpařování patří vynikající přenos stechiometrie mezi terčem a povlakem a produkce složek s vysokou energií, které zlepšují kvalitu povlaku. Nevýhodami této metody jsou velmi nízká energetická účinnost (obvykle 1 - 2%) a malá velikost povlakované plochy, vyplývající z malého bodu, na který dopadá laserový paprsek.⁵

Obloukové napařování

Obloukové odpařování může být definováno jako výboj elektrické energie mezi dvěma elektrodami. Nízkonapěťový oblouk hoří v místě katodové skvrny (obr. 5.3) o průměru řádově 10 μm , kde dosahuje teploty přibližně 15 000 °C. Materiál je obloukem z elektrod vysokou rychlostí odpařován a zároveň ionizován. Katodová skvrna po krátkém čase sama zhasne a znovu se zapálí v novém místě, blízko předchozího kráteru. Ionizovaný materiál je urychlován k nástrojům záporným předpětím, které je na ně přiloženo (cestou ionizuje ještě atomy plynné atmosféry). Ionizované atomy vytváří povrchovými reakcemi vlastní deponovanou vrstvu.^{22,25}



Obr. 5.3 a) Katodová skvrna, b) Pohyb katodové skvrny¹⁷

Napařování elektronovým svazkem

U tohoto způsobu odpařování je pro tavení a odpařování materiálu z kovových ingotů využíváno elektronových paprsků vysokého výkonu. Elektronové paprsky zároveň zajišťují předehřev substrátu ve vakuové komoře. Paprsky jsou generovány elektronovými děly.⁵

5.1.2 Napařování

Klasické napařování spočívá v nanášení částic oddělených z povrchu zdroje (terče) fyzikálním odprašovacím procesem. Při klasickém napařování je terč z vodivého materiálu umístěn ve vakuové komoře a je na něj přivedeno záporné napětí. Do pracovní komory je přiváděn pracovní plyn (obvykle argon), jehož tlak se udržuje na hodnotě řádově jednotek pascalu. Před terčem dojde k zapálení doutnavého výboje, kterým je ionizován pracovní plyn. Ionty pracovního plynu dopadají na povrch napařovaného materiálu (terče). Jejich účinkem jsou z povrchu vytrhávány atomy, které se často průchodem ionizovaným pracovním plynem samy ionizují a dopadají na povrch povlakovaných předmětů.^{9,29}

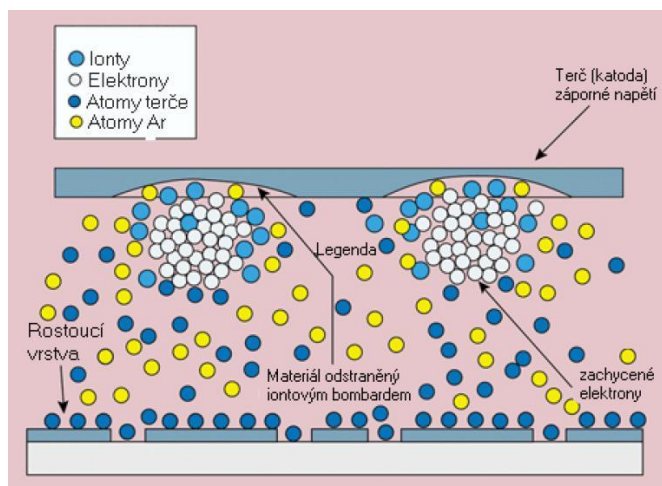
Napařování doutnavým výbojem

Napařování doutnavým výbojem rovinné diody je nejjednodušším způsobem napařování. Terč (katoda) a povlakovaný substrát, který tvoří anodu, jsou umístěny proti sobě ve vzdálenosti 50 až 100 mm. Terč je obvykle chlazen vodou a má dvě funkce - je zdrojem povlakovacího materiálu a zároveň je zdrojem sekundárních elektronů, které udržují doutnavý výboj. Mezi hlavní nevýhody této metody patří nízká rychlost povlakování, ohřev substrátu v důsledku bombardování částicemi s vysokou energií a relativně malá povlakovaná plocha.⁵

Magnetronové napařování

Magnetronové napařování (obr. 5.4) je zdokonalenou technologií klasického napařování. Před terčem je vytvářeno magnetické pole definovaného tvaru pomocí magnetronu. Elektrony plazmatu se pohybují po šroubovici podél siločar. Tím se výrazně prodlužuje jejich dráha v blízkosti terče, doba jejich setrvání v oblasti výboje a zvyšuje se pravděpodobnost ionizace dalších atomů pracovního plynu. To umožňuje udržet výboj při nižším tlaku (desetiny pascalu) i při nižším napětí (stovky voltů). Zejména nižší tlak se pozitivně projevuje ve větší čistotě vytvářených vrstev. Ionty pracovního plynu dopadají na povrch terče a uvolňují jeho částice, které procházejí plazmatem směrem k substrátu.

Jestliže je spolu s pracovním plynem přiváděn do pracovní komory i reaktivní plyn (např. kyslík a dusík), je možné vytvářet oxidy a nitridy rozprašovaného materiálu. Drsnost vrstev připravovaných magnetronovým naprašováním je na obr. 5.5.²⁹



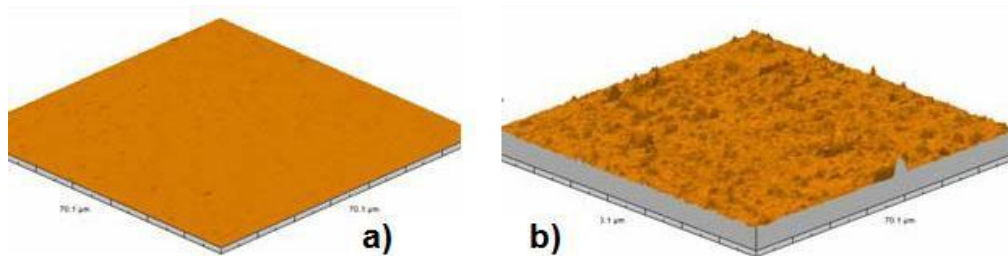
Obr. 5.4 Magnetronové naprašování⁹

Radiofrekvenční naprašování

Radiofrekvenční naprašování je PVD metodou, která umožňuje depozici povlaků z nevodivých materiálů (terčů). Touto metodou lze zhotovit různé druhy vodivých, polovodivých i nevodivých povlaků.³

Naprašování iontovým paprskem

Naprašování iontovým paprskem je metoda naprašování, která umožňuje vytvářet povlaky s vynikající adhezí a vysokou čistotou při velmi nízkém ohřevu substrátu. Ionťový paprsek o vysoké energii je namířen na terč z požadovaného materiálu. Zdrojem ionťového paprsku je inertní nebo reaktivní plyn.³



Obr. 5.5 Drsnost vrstev připravovaných a) magnetronovým naprašováním b) obloukovým naprašováním¹²

5.1.3 Ionťová implantace

Ionťová implantace je hybridní PVD proces povlakování, pomocí kterého můžeme nanášet povlaky rozmanitého složení s vynikajícími mechanickými vlastnostmi. Nanášet povlaky lze i na tepelně zušlechťené materiály, nebo dokonce plasty. V důsledku silného elektrického pole (až 1000 V) mezi substrátem (katodou) a terčem dochází k elektrickému výboji v plynné atmosféře. Ten ionťuje částice plynu i odpařené částice terče. Reakcí ionťů vzniká povlak, který se usazuje na povrchu substrátu.⁵

5.2 Metoda CVD

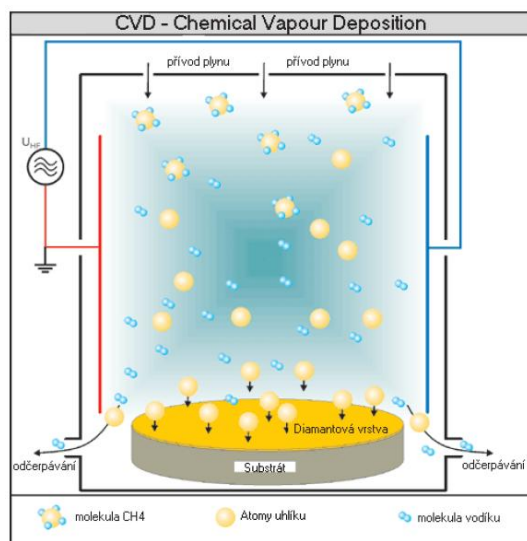
Povlakovací metoda CVD - Chemical Vapour Deposition (obr. 5.6) umožňuje depozici rozmanitých vrstev kovů a různých chemických sloučenin v krystalickém či amorfním stavu, jež jsou vysoce čisté a mají požadované vlastnosti. Chemický proces povlakování je založen na reakci chemických sloučenin v plazmě a následném uložení produktů heterogenní reakce na povrchu povlakovaného substrátu. Reakční složky jsou přiváděny v plynné fázi. Aby proběhlo vytvoření vrstvy povlaku, musí být v plynech obsažen i nekovový reaktivní plyn (např. N_2 , CH_4). V přiváděných plynech je také zastoupen nosný plyn (Ar , H_2), který dopravuje danou směs plynů k povlakovanému předmětu a výrazně ovlivňuje rychlost růstu povlaku. Použití této metody je značně omezeno vysokou teplotou (950–1050°C), při které probíhá depoziční proces. V řadě případů nelze tuto metodu použít, protože vysoká teplota by mohla zapříčinit degradaci základního materiálu (substrátu). Proto se metoda CVD používá především k depozici povlaků na nástroj ze SK^{3,9}

Výhodou metody jsou relativně nízké pořizovací i provozní náklady. CVD proces je ekonomicky výhodný pro tvorbu silných vrstev a je také vhodný k povlakování nepřístupných dutin a drážek. Lze vytvářet povlaky s vysokou hustotou, teplotní stabilitou, vynikající adhezí k substrátu a rovnoměrnou tloušťkou u tvarově složitých nástrojů. Je možno také vytvářet poměrně složité vrstvy (Al_2O_3 , uhlíkové kluzné vrstvy, diamantové vrstvy). Nevýhodami metody jsou vysoká teplota při deponování, z čehož plyne vysoká energetická náročnost, dlouhý pracovní cyklus (8 až 10 hodin) a tahová pnutí ve vrstvě (rozdílný koeficient tepelné roztažnosti). Dalším problémem je zaoblování řezných hran při povlakování. Z hlediska ekologie je to použití toxických chloridů při deponovacím procesu.^{3,9}

Vedle konvenční metody CVD se používají i různě modifikované CVD metody, mezi které patří:^{5,9}

- PACVD, PECVD (Plasma Assisted CVD, Plasma Enhanced CVD) jsou plazmaticky aktivované CVD metody, která se od klasické CVD metody liší nízkými pracovními teplotami, přičemž se nemění jejich princip vytváření povlaku z plynné fáze. Molekuly reaktivního plynu jsou ionizovány plazmovým výbojem, který doutná v komoře reaktoru při tlaku 100 až 300 MPa. Tím lze dosáhnout snížení teploty povlakování na hodnoty 400 až 600 °C.
- MTCVD (Middle Temperature CVD) je technologie, která na rozdíl od konvenční CVD technologie umožňuje nanášet povlaky z plynné fáze za teplot podstatně nižších (700÷850 °C). MTCVD metoda využívá jako vstupní sloučeninu acetonitril (CH_3CN , zdroj dusíku), nebo též vysoce toxický a hořlavý metylkyanid.
- MWPCVD (MicroWave Plasma CVD) je mikrovlnná plazmatická CVD metoda, která se vyznačuje pracovními teplotami běžně okolo 600 °C.
- LPCVD (Low – Pressure CVD) je nízkotlaká CVD metoda.
- HFCVD (Hot Filament CVD) je metoda CVD, která využívá žhavící wolframové vlákno, umístěné v blízkosti povlakované součásti, zahřáté až na 2400 °C.
- LICVD (Laser Induced CVD) je laserem indukovaná CVD metoda.

- CACVD (Cascade Arc Plasma – assisted CVD) je CVD metoda s lavinovým plazmatickým výbojem.

Obr. 5.6 Metoda CVD⁹

5.3 Vlastnosti povlaků

Současné moderní a výkonné metody obrábění vyžadují úspěšné nasazení výkonných nástrojů. V dnešní době je nabízena řada povlaků s rozdílnými vlastnostmi, které výrazně zvyšují užité vlastnosti nástrojů. Mezi hlavní faktory, které ovlivňují mechanické a fyzikální vlastnosti a tím i výkon povlakovaných slitutých karbidů, patří druh povlaku, jeho tloušťka a metoda povlakování. Mezi základní fyzikální vlastnosti povlaků patří tvrdost, tloušťka, drsnost, adheze a kluzné vlastnosti. Nejdůležitějšími chemickými vlastnostmi jsou pak odolnost vůči oxidaci, chemická a tepelná stabilita. Obecné porovnání vlastností základních povlakových materiálů je v tabulce 5.1.

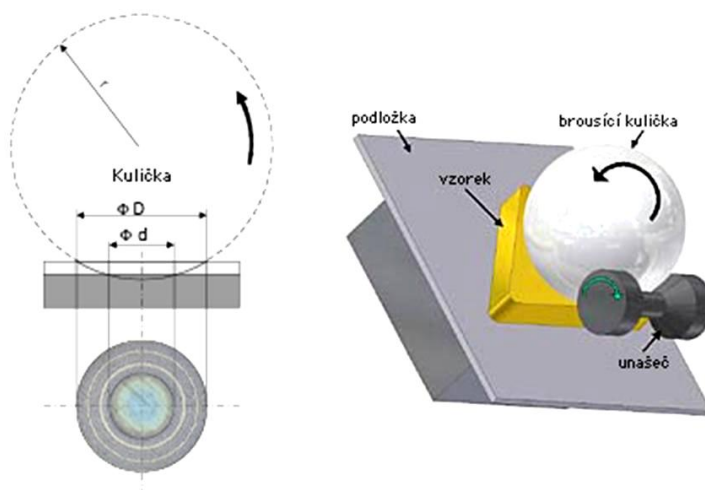
Tab. 5.1 Obecné porovnání vlastností základních povlakových materiálů³

Hodnocení	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla
Nejlepší	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiC	Al ₂ O ₃
↑	TiAlN	TiAlN	TiAlN	TiAlN
	TiN	TiN	TiCN	TiN
	TiCN	TiCN	Al ₂ O ₃	TiCN
Nejhorší	TiC	TiC	TiN	TiC

5.3.1 Tloušťka

Tloušťka povlaku na břitech řezného nástroje je jednou z nejdůležitějších charakteristik, která může ovlivňovat jak trvanlivost nástroje, tak i velikost řezných sil během obrábění. Tloušťka povlaku na břitu nástroje se výrazně liší od tloušťky na rovných nebo válcových plochách. Pro měření tloušťky povlaku na rovinných částech nástrojů se využívá tzv. kalotest, pro stanovení tloušťky povlaku na břitech se používá klasická metalografie založená na leštění vybrané části substrátu.²¹

Princip kalotestu (obr. 5.7) je následující. Pomocí otáčející se leštěné kuličky obvykle o průměru 25 mm, na kterou se nanese diamantová pasta, dochází k proleštění jak nanesené, tak i tenké podpovrchové vrstvy. Z průměru kuličky a z mikroskopem změřených průměrů kulových vrchlíků je možné výpočtem stanovit tloušťku nanesené vrstvy. Toto měření je z důvodů vyšší přesnosti vhodné provádět na vyleštěných etalonech.^{16,9}



Obr. 5.7 Princip a schéma kalotestu ¹⁶

5.3.2 Drsnost

Drsnost povlaku je souhrn nerovností s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejími vlivy. V případě nanášení PVD vrstev je výsledná drsnost ovlivněna kvalitou opracování nástroje i povlakem. Při měření drsnosti se neuvažují vady povrchu, které vznikají v důsledku vad materiálu či poškození. Se zvyšující se drsností povlaku se zvyšují řezné síly a tím dochází k tepelnému a mechanickému namáhání břitů nástrojů. Aby se eliminoval vliv předchozího opracování nástroje, provádí se měření drsnosti dílenskými drsnoměry na leštěných etalonech, jejichž výchozí hodnota Ra je 0,01 - 0,02 μm .^{21,16}

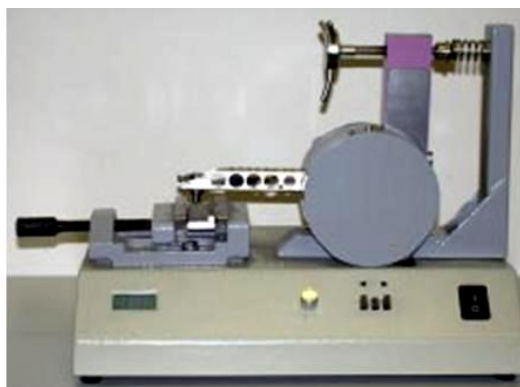
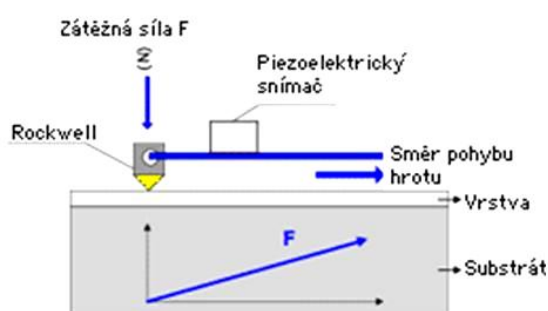
5.3.3 Adheze

K maximálnímu využití povlaku dojde pouze v případě, kdy je perfektně zajištěna jeho přilnavost k nástroji. Dobrá adheze k substrátu je jedním z důležitých parametrů charakterizujících vlastnosti celého systému. Mezi metody pro vyhodnocování přilnavosti povlaků patří tzv. scratch test nebo vnikací test.

Vnikací metoda (Mercedes test) je nenáročnou metodou, při které je pnutí na rozhraní systému tenká vrstva-substrát způsobeno vtiskem hrotu při statickém vtláčování. Iniciované napětí vyvolá na rozhraní vrstva-substrát vznik trhlinek, které se šíří k povrchu. Vyhodnocení se provádí přiřazením vtisku do jednotlivých kategorií (tříd) s adhezním číslem, které charakterizuje stupeň popraskání či odloupení vrstvy.⁹

Při vyhodnocování Scratch testu (obr. 5.8) se využívá principu postupně se zvyšující zátěžné síly (20-120 N) na diamantový Rockwellův hrot při současném posouvání špičky hrotu po měřené vrstvě. Při měření vrstvy je detekována akustická emise, která se mění při odtržení vrstvy, což koresponduje s určitou hodnotou síly. Tato kritická

hodnota, při které dochází k odtržení vrstvy, se označuje jako adheze vrstvy. Hodnota adheze větší než 60 N zajišťuje, že při běžných aplikacích nedojde ke stržení či odloupení vrstvy.¹⁶



Obr. 5.8 Princip scratch testu¹⁶

5.3.4 Tvrdost

Vysoká tvrdost je základním parametrem povlaků, pro tenké vrstvy je definována jako odpor materiálu proti pronikání cizího tělesa. Mezi nejtvrděší povlakové vrstvy se řadí povlaky z diamantu nebo PKNB. Pro vyhodnocování tvrdosti povlaků se využívají speciální přístroje – mikrotvrdoměry (obr. 5.9), které souběžně se zatěžováním hrotu měří hloubku jeho pronikání do vrstvy s přesností na jednotky nm. Při měření je potřeba zajistit, aby měřicí hrot (obvykle Vickers) pronikl maximálně do 1/10 tloušťky vrstvy. Velikost zátěže se volí v řádu desítek mN. Důvodem tak nízkých sil je nutnost měřit tvrdost samotné vrstvy bez vlivu materiálu, na kterém je vrstva nanášena. Výsledkem měření je nejen číslo odpovídající tvrdosti materiálu, ale i tvar zatěžovací a odtěžovací křivky.^{16,21}



Obr. 5.9 Mikrotvrdoměr¹⁶

5.3.5 Odolnost vůči oxidaci

Každá vrstva je charakterizována maximální teplotou použití, jejíž mez je dána právě odolností proti oxidaci. Oxidace, která se dělí na oxidaci hloubkovou nebo povrchovou, má podíl na opotřebení vrstvy. Při povrchové oxidaci dochází k pasivaci

povrchu, čímž se může vytvářet bariéra proti další oxidaci. Při hloubkové oxidaci dochází obvykle k destrukci vrstvy.²¹

5.3.6 Chemická stabilita

Popisuje odolnost vrstvy vůči chemické reakci s obráběným materiálem, zejména při vyšších teplotách v průběhu obrábění. Může se měnit s typem obráběného materiálu a s řeznými podmínkami.²¹

5.3.7 Tepelná stabilita

Jde o důležitou vlastnost, kterou musíme zohledňovat při stanovování řezných podmínek. Při zvýšení teploty v průběhu obrábění může docházet ke změně vnitřní struktury např. nárůstem krystalitů, změnou vnitřního napětí apod. Mezi materiály s nejvyšší tepelnou stabilitou můžeme zařadit například vrstvy na bázi CrAlN a nanokrystalické nanokompozity.²¹

5.3.8 Kluzné vlastnosti

Stoupající teplota v průběhu obrábění má za následek zhoršení vlastností podkladového materiálu. Snižováním frikčních sil vlivem povlaku se výrazně omezuje tepelné zatížení nástroje. Frikční koeficienty některých povlaků jsou v tabulce 5.2.²¹

Tab. 5.2 Frikční koeficienty některých povlaků²¹

Povlak	TiN	TiCN	CrN	TiAlN	DLC
Koeficient frikce	0,4	0,4	0,5	0,4	0,1

5.4 Vývoj v oblasti povlaků

5.4.1 Povlak Darwin

Nový povlak Darwin (obr. 5.10), vyvinutý ryze českou společností SHM, patří mezi světové novinky v oblasti povlakování. Jde o velmi hladký povlak AlTiN s vysokým obsahem hliníku, připravovaný unikátními patentovanými technologiemi založenými na odpařování materiálu pomocí nízkonapěťového oblouku z rotujících válcových elektrod.^{17,20, 18}

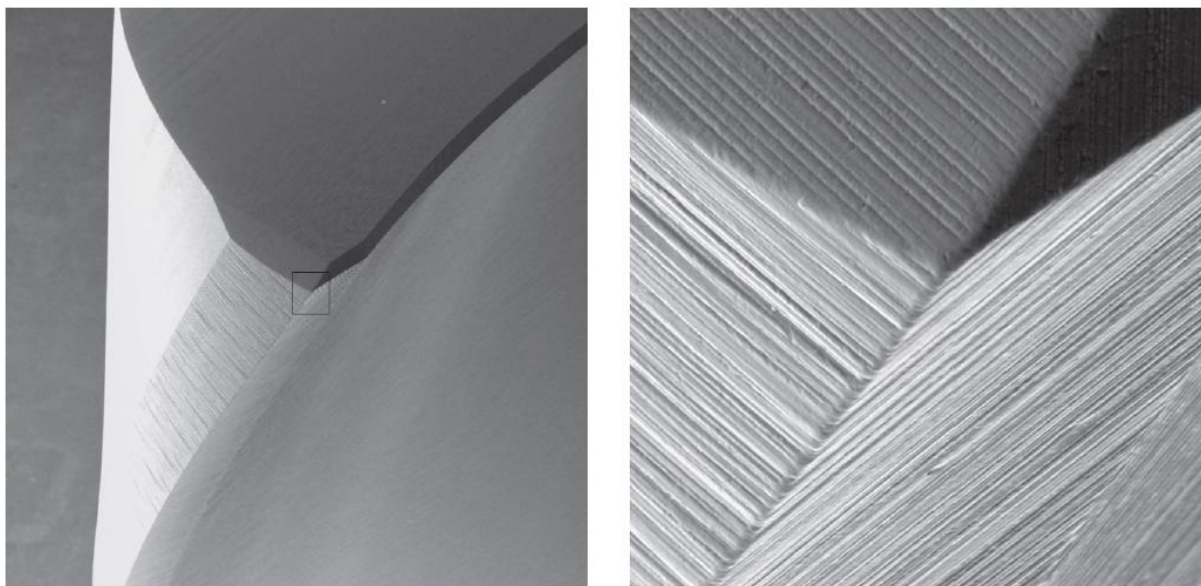
Povlak má vynikající přilnavost k povrchu povlakovaného substrátu, což je základním předpokladem pro udržení povlaku na nástroji během celé jeho životnosti. Vysokou tvrdostí-přesahující 40 GPa, která zaručuje vynikající odolnost vůči abrazivnímu otěru, a výbornou tepelnou odolností kolem 800 °C dosahuje úrovně těch nejlepších povlaků AlTiN. Pro PVD povlaky je charakteristické vyšší zbytkové napětí. Darwin má velmi nízké zbytkové napětí, proto pro něj není problémem tloušťka kolem 10 i více μm a navíc velmi dobře kopíruje i ostré hrany či břity. Povlak je velmi hladký a na leštěném vzorku s původní drsností Ra 0,02 μm dosahuje maximálních hodnot Ra 0,05 μm při běžných tloušťkách kolem 4 μm.²⁰

Povlak Darwin je vhodný pro nástroje pro:^{17,20}

- náročné aplikace vyžadující velmi nízkou drsnost povrchu nástroje,
- závitování,
- frézování,
- vrtání a hluboké vrtání kde je potřeba zachovat velmi nízkou drsnost drážky pro dobrý odvod třísky.

Tab. 5.3 Základní vlastnosti povlaku ¹⁷

Mikrotvrдость [GPa]	Tloušťka [μm]	Ra [μm]	Tepelná stabilita [°C]	Barva
43	1 - 6	0,05 – 0,1	> 900	fialovo-černá

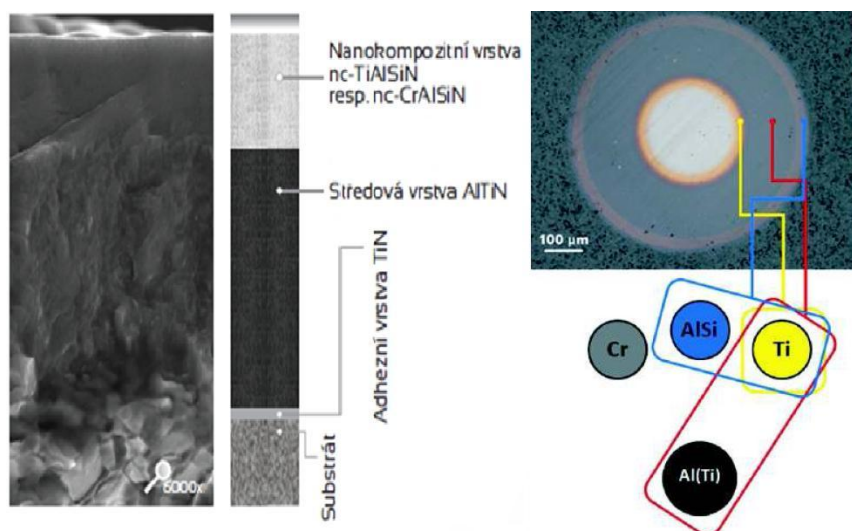
Obr. 5.10 Povrch nástroje s povlakem Darwin ²⁰

5.4.2 Povlaky TripleCoatings

Povlaky TripleCoatings patří mezi nejmodernější povlaky na trhu, které kombinují vynikající houževnatost a tvrdost vrstev AlTiN a extrémně vysokou tvrdost nanokompozitních vrstev.

Povlaky TripleCoatings (obr. 5.11) jsou tvořeny adhezí vrstvou TiN, středovou vrstvou AlTiN a vrchní nanokompozitní vrstvou TiAlSiN (Triple Coating Ti) nebo CrAlSiN (TripleCoating Cr). Struktura varianty povlaku na bázi TiAlSiN je následující: ¹⁹

- adhezí vrstva – TiN s tloušťkou 0,3 μm;
- středová vrstva – multivrstva TiN/AlTiN s celkovou tloušťkou kolem 3 μm, průměrné složení vrstvy: Al/Ti = 50/50% s tím, že jedna vrstva je čistý TiN a druhá vrstva je AlTiN s Al = 60%, Ti = 40%, multivrstvu tvoří celkem 25 vrstviček;
- povrchová vrstva – nanokompozitní monovrstva TiAlSiN s průměrným složením Al = Ti = 45%, Si = 10%.

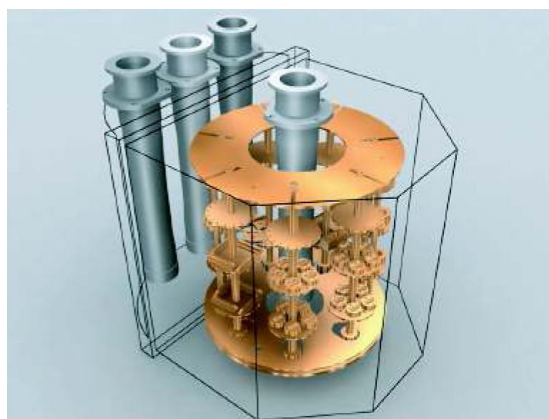
Obr. 5.11 Povlaky TripleCoatings ¹⁸

Díky svým výjimečným vlastnostem umožňují povlaky TripleCoatings použití řezných nástrojů i daleko za hranicemi řezných podmínek limitujících ostatní PVD povlaky. Nízký koeficient tření, vysoká otěruvzdornost, tepelná odolnost a chemická stálost jsou hlavními přednostmi povlaků. Použití povlaků TripleCoatings přináší řadu výhod, jako je: ¹⁸

- zvýšení životnosti nástrojů;
- zlepšení kvality obráběného povrchu;
- zvýšení produktivity obrábění (zvýšení řezných rychlostí a posuvů);
- možnost snížení nebo vyloučení chlazení;
- snížení řezných odporů (snížení energetické náročnosti obrábění);
- zklidnění chodu obráběcího stroje.

Tyto povlaky se používají pro obrábění kalených materiálů, korozivzdorných ocelí a pro velmi náročné aplikace. Právě nanokompozitní vrchní vrstva takové použití umožňuje. ¹⁷

Povlaky TripleCoatings jsou připravovány patentovanými technologiemi založenými na odpařování materiálu pomocí nízkonapěťového oblouku z rotujících válcových elektrod. Základní konfigurace povlakovacího zařízení pracuje s 3+1 katodami (obr. 5.12). Tři LARC katody (Lateral Rotating Cathode) jsou ve dveřích a jedna CERC katoda (Central Rotating Cathode) je uprostřed povlakovací komory. Tenká adhezní vrstva je deponována z čistého Ti nebo Cr targetu (katody); houževnatá základní vrstva (TiAlN-AlTiN) je deponována pomocí centrálního (Al(Ti)) targetu a z Ti targetu (katody), umístěného ve dveřích. Povrchová velmi tvrdá a otěruvzdorná vrstva může být tvořena CrAlN/SiN nebo TiAlN/SiN nanokompozitním povlakem. Povrch je tak extrémně tvrdý a tepelně odolný. ¹⁹



Obr. 5.12 Rozmístění katod v povlakovacím zařízení ¹⁹

Optimalizace moderních nástrojů s pomocí povlaků TripleCoatings je stále otevřeným procesem. Možnosti kombinací složení těchto povlaků jsou veliké.

6 HODNOCENÍ ŘEZIVOSTI NÁSTROJE

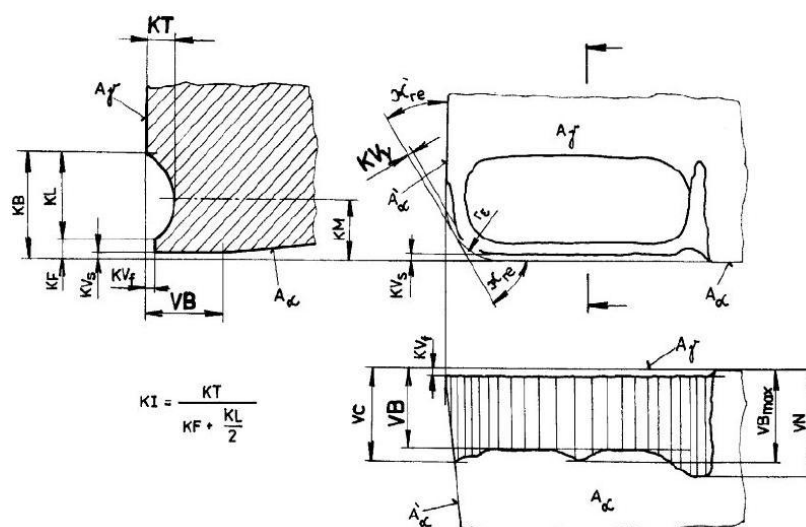
6.1 Opotřebení nástroje

Opotřebení řezného nástroje je běžným důsledkem řezného procesu. Proces opotřebení je velmi složitým dějem, který závisí na mnoha faktorech, jako jsou fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného i nástrojového materiálu, druh obráběcí operace, geometrie břitu nástroje, pracovní podmínky a řezné prostředí. Při obrábění dochází ke kontaktu nástroje s obrobkem a odcházející třískou (relativnímu pohybu nástroj-obrobek a nástroj-tříška). Základní mechanismy opotřebení jsou uvedeny v tabulce 6.1.¹⁵

Tab. 6.1 Základní mechanismy opotřebení¹⁵

Abraze	Brusný otěr vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročástic uvolněných z nástroje.
Adheze	Vznik a okamžité porušování svarových spojů na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky. Vzniká v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých povrchů.
Difúze	Migrace atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak (vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje).
Oxidace	Vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí.
Plastická deformace	Důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase.
Křehký lom	Důsledek vysokého mechanického zatížení (např. přerušovaný řez).

Opotřebení řezného nástroje je kvantifikováno tzv. kritérii opotřebení (obr. 6.1). Nejdůležitějšími a nejčastěji užívanými kritérii jsou šířka fazetky opotřebení na hřbetě VB, radiální opotřebení špičky KV_y a hloubka výmolu na čele KT.¹⁵

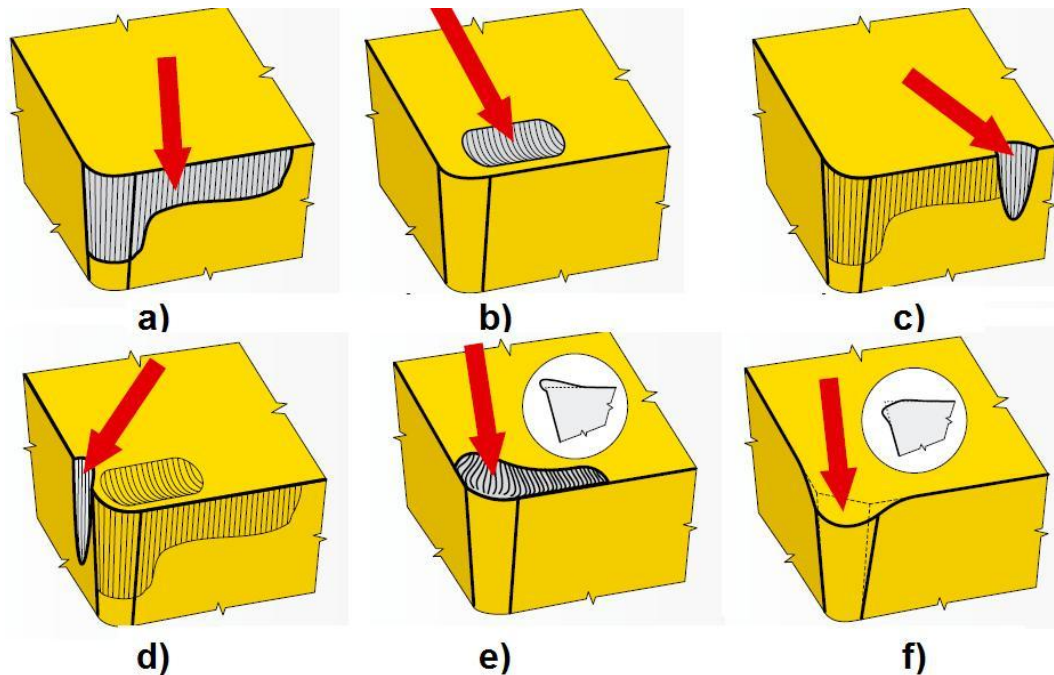


$$KI = \frac{KT}{KF + \frac{KL}{2}}$$

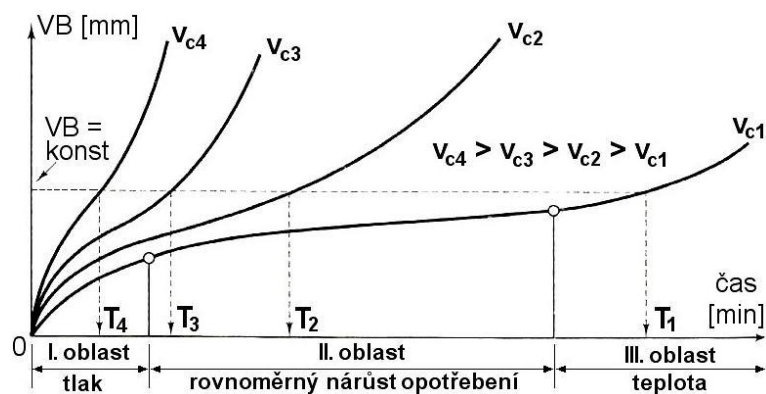
Obr. 6.1 Kritéria opotřebení nástroje¹⁵

Časový průběh kritéria VB (obr. 6.3) lze rozdělit do tří oblastí. V oblasti I nastává poměrně rychlý nárůst hodnoty VB, který je způsoben velkým měrným tlakem, vznikajícím důsledkem velmi malé stykové plochy. V oblasti II hodnota VB rovnoměrně narůstá. V oblasti III nastává výrazné zvýšení intenzity opotřebení způsobené nakumulováním tepelného zatížení nástroje.⁶

Typické formy opotřebení vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu jsou zobrazeny na obrázku 6.2.



Obr. 6.2 Formy opotřebení VBD a) opotřebení hřbetu, b) výmol na čele, c) vrubové opotřebení na hlavním břitu, d) oxidační rýha na vedlejším břitu, e) tvorba nárůstku, f) plastická deformace špičky¹¹



Obr. 6.3 Časová závislost opotřebení pro různé řezné rychlosti⁶

6.2 Řezivost nástroje

Řezivost nástroje je vlastnost, která umožňuje nástroji odebrat třísku z obráběného materiálu efektivním způsobem. Tuto vlastnost ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti nástroje, geometrie břitu, metoda obrábění, řezné podmínky i řezné prostředí.

Řezivost není vlastností absolutní a závisí i na obráběném materiálu, především na jeho mechanických vlastnostech (za stejných podmínek vykáže nástroj ze SK skupiny P velmi dobrou řezivost při soustružení běžné oceli, bude mít však velmi nízkou nebo dokonce nulovou řezivost při soustružení kalené oceli). Kritériem hodnocení řezivosti nástroje je $T-v_c$ závislost (obr. 6.4).⁶

$T-v_c$ závislost se užívá ve tvaru:⁶

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \text{ [min]}, \quad \text{častěji ve tvaru} \quad v_c = \frac{C_v}{T^{1/m}} \text{ [m}\cdot\text{min}^{-1}], \quad (1), (2)$$

kde: T [min] - trvanlivost, C_T [-] – konstanta, C_v [-] – konstanta; v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$] - řezná rychlost, m [-] – exponent.

Rozšířené vztahy pro $T-v_c$ závislost jsou ve tvaru:⁶

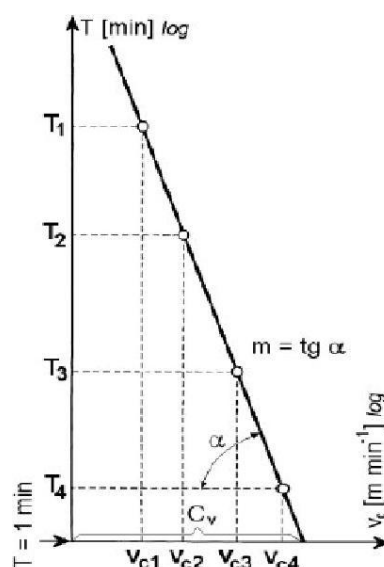
$$v_{cT} = \frac{C_{vT}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \text{ [m}\cdot\text{min}^{-1}], \quad \text{nebo ve tvaru} \quad v_c = \frac{C_{v1}}{T^{1/m} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \text{ [m}\cdot\text{min}^{-1}], \quad (3), (4)$$

kde: v_{cT} [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$] - řezná rychlost při konstantní trvanlivosti T , C_{vT} [-] – konstanta, a_p [mm] - šířka záběru ostří, f [mm] - posuv na otáčku, x_v [-] - exponent, vyjadřující vliv šířky záběru ostří, y_v [-] - exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku, C_{v1} [-] - konstanta.

Lepší řezivost má ten nástrojový materiál, který vykazuje v $T-v_c$ závislosti vyšší hodnotu konstanty C_v a nižší hodnotu exponentu m (tab. 6.2).

Tab. 6.2 Hodnoty exponentu m pro různé nástrojové materiály⁶

Materiál	Nástrojové oceli	Rychlořezné oceli	SK	Řezná keramika
m [-]	10 až 8 (až 6)	8 až 5 (až 3)	5 až 2,5 (až 2)	2,5 až 1,5 (až 1,2)



Obr. 6.4 $T-v_c$ závislost⁶

Při stanovování základní $T-v_c$ závislosti pro konkrétní řezný nástroj a obráběný materiál se postupuje tak, že při ostatních konstantních řezných podmínkách je daný materiál obráběn daným nástrojem minimálně při čtyřech různých řezných rychlostech, přičemž se sleduje časový nárůst opotřebení nástroje. Pro předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria opotřebení (nejčastěji VB) jsou z časových křivek VB odečteny hodnoty trvanlivostí T_i , které odpovídají zvoleným řezným rychlostem v_{ci} . Body o souřadnicích $v_{ci}-T_i$ jsou pak vyneseny do diagramu s logaritmickými souřadnicemi T a v_c , kde vytvoří přímkou, která odpovídá zvolené hodnotě VB. ⁶

7 SLINUTÉ KARBIDY V SORTIMENTU VÝROBY NEJVÝZNAMNĚJŠÍCH DOMÁCÍCH A SVĚTOVÝCH PRODUCENTŮ NÁSTROJŮ A NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLŮ

Povlakované slinuté karbidy mají při obrábění velice významnou a nenahraditelnou úlohu a patří k nejvíce rozšířeným nástrojovým materiálům. Jejich výrobou se zabývají všichni významní producenti nástrojů a nástrojových materiálů. V této práci jsou prezentovány povlakované slinuté karbidy od tří výrobců: **Pramet Tools, Sandvik Coromant a Ceratizit**. U jednotlivých materiálů byly popsány jejich vlastnosti a doporučené řezné podmínky pro soustružnické aplikace.

7.1 Pramet Tools

Společnost Pramet Tools se sídlem v Šumperku je českým výrobcem zabývajícím se výrobou řezných nástrojů ze slinutých karbidů, které nacházejí své uplatnění zejména při soustružení, frézování a vrtání. V současné době firma nabízí své produkty i do zahraničí, pobočky má například v Polsku a Itálii. Mezi povlakované SK firmy Pramet Tools, které se používají pro všeobecné soustružení, patří: ^{10,12}

9210 (P10-25, K5-20) - Nejotěruvzdornější materiál z řady 92xx s vysokou odolností vůči plastické deformaci břitu. Vysoce otěruvzdorný jemnozrný substrát s gradientní povrchovou vrstvou, silný povlak s nosnou vrstvou Al_2O_3 vytvořený technologií MT-CVD.

9230 (P10-35, M10-30, K20-35) - Nejuniverzálnější materiál nové generace z řady 9000 vhodný pro vyšší řezné rychlosti při kontinuálních i přerušovaných řezech. Funkčně gradientní substrát, středně silný speciální povlak vytvořený metodou MT-CVD.

9235 (P15-40, M15-35, K20-35) - Nejhouževnatější materiál z řady 9000 s vysokou otěruvzdorností a tepelnou stálostí břitu při zachování odolnosti vůči mechanickým a tepelným rázům. Vysoce houževnatý substrát s gradientní povrchovou vrstvou. Nový MT-CVD povlak, alfa-modifikace Al_2O_3 vrstvy povlaku zaručuje vyšší otěruvzdornost.

9310 (P10-20) - Nejotěruvzdornější materiál řady 93xx, funkčně gradientní substrát s nízkým obsahem pojící kobaltové fáze, silný MT-CVD povlak s unikátní krycí vrstvou Al_2O_3 zaručující vynikající tepelnou, mechanickou a chemickou ochranu podkladového materiálu.

9315 (P10-25) - SK s vysokou otěruvzdorností a dobrou houževnatostí, funkčně gradientní substrát s relativně nízkým obsahem Co. Silný MT-CVD povlak s krycí vrstvou Al_2O_3 zaručující vynikající tepelnou, mechanickou a chemickou ochranu podkladového materiálu.

9325 (P15-35) - Nejhouževnatější materiál řady 93xx, funkčně gradientní substrát s relativně vysokým obsahem Co, silný MT-CVD povlak s unikátní krycí vrstvou Al_2O_3 .

6605 (P10-20, K5-15, H5-15) - Nejotěruvzdornější materiál řady 6000, unikátní duální povlak nanesený kombinací metod MT-CVD a PVD s nosnou vrstvou Al_2O_3 . Jde o materiál pro soustružení vysokými řeznými rychlostmi (suché obrábění) při kontinuálních řezech.

6615 (P10-25, K5-20) - Funkčně gradientní substrát s relativně nízkým obsahem kobaltu, unikátní duální povlak nanesený kombinací metod MT-CVD a PVD s nosnou vrstvou TiCN.

6630 (P15-35, M10-30, K20-30) - Nejuniverzálnější materiál řady 6000, funkčně gradientní substrát, povlak s nosnou vrstvou TiCN nanosený metodou MT-CVD.

6635 (P20-40, M15-35) - Funkčně gradientní substrát s relativně vysokým obsahem kobaltu, tenký povlak MT-CVD. Jde o materiál pro obrábění při nepříznivých záběrových podmínkách a přerušovaných řezech.

6640 (P20-40, M20-35, K25-40) - Substrát bez kubických karbidů, tenký povlak s nosnou vrstvou TiCN nanosený metodou MT-CVD. Materiál pro hrubovací soustružení nižšími až středními reznými rychlostmi při přerušovaných řezech a nepříznivých záběrových podmínkách. Tento materiál je také určen pro vrtání (P20-40).

8016 (P5-20, M5-20, K5-25, N5-25, H5-15) - Nejtěruvzdornější materiál řady 8000, submikronový substrát bez kubických karbidů s nízkým obsahem kobaltu, nanostrukturní povlak nanosený metodou PVD. Materiál pro operace s vysokou tepelnou zátěží. Tento materiál je také určen pro frézování (P5-20, M5-20, K5-25, N5-25, H5-15).

8030 (P25-40, M20-35, K20-40, N15-30, S15-25) - Submikronový substrát, nanostrukturní povlak nanosený metodou PVD, který kombinuje dobrou otěruvzdornost spolu s dobrou provozní spolehlivostí. Tento materiál je také určen pro vrtání (P25-45, M20-35, K25-40, S20-30).

8040 (P30-50, M20-40, K20-40, S20-30) - Nejhouževnatější materiál řady 8000, submikronový substrát bez kubických karbidů s vysokým obsahem kobaltu, nanostrukturní povlak nanosený metodou PVD. Materiál vhodný pro nestabilní záběrové podmínky. Tento materiál je také určen pro vrtání (P25-50, M20-40, K20-40, S20-30).

3025 (P25-40, M20-35, K20-40, N15-30, S15-25, H15-25) - Submikronový substrát s vysokou houževnatostí a pevností rezného břítu, otěruvzdorný a dostatečně silný multivrstvý PVD povlak s gradientními přechody a vynikající adhezí. Tento materiál je také určen pro frézování (P25-40, M20-35, K20-40, N15-30, S15-25, H15-25).

Doporučené rezné podmínky pro soustružení materiálů skupiny P, M, K jsou uvedeny v tabulce 7.1.

Tab. 7.1 Řezné podmínky pro soustružení materiálů skupin P, M, K ¹¹

P										
Materiál	Posuv na otáčku f[mm]	Šíře záběru ostří a _p [mm]	P5	P10	P15	P20	P25	P30	P35	P40
			Řezná rychlost v ₁₅ [m.min ⁻¹]							
6605	0,1-0,8	1,5-5		480-170						
6615	0,15-0,8	1,5-5		370-185						
9210	0,15-0,8	1,5-5		370-140						
9230	0,15-0,8	1,5-5		355-155						
9235	0,15-0,8	1,5-5		300-165						
6630	0,15-0,8	1,5-5		330-135						
6635	0,15-0,8	1,5-5				250-110				
6640	0,1-0,8	1,5-5				275-110				

Tab 7.1 Pokračování ¹¹

P											
Materiál	Posuv na otáčku	Šíře záběru ostří	P5	P10	P15	P20	P25	P30	P35	P40	
	f[mm]	a _p [mm]	Řezná rychlost v ₁₅ [m.min ⁻¹]								
3025	0,05-0,8	0,5-5						340-110			
8030	0,05-0,8	0,5-5						275-115			
M											
Materiál	Posuv na otáčku	Šíře záběru ostří	M5	M10	M15	M20	M25	M30	M35	M40	
	f[mm]	a _p [mm]	Řezná rychlost v ₁₅ [m.min ⁻¹]								
9230	0,15-0,8	1,5-5		215-90							
9235	0,15-0,8	1,5-5		180-100							
6630	0,15-0,8	1,5-5		200-80							
6635	0,15-0,8	1,5-5		175-65							
6640	0,05-0,8	0,5-5				280-40					
3025	0,05-0,8	0,5-5				205-65					
8016	0,05-0,2	0,5-1,5	150-110								
8030	0,05-0,8	0,5-5				140-45					
8040	0,1-0,8	1,5-5				120-40					
K											
Materiál	Posuv na otáčku	Šíře záběru ostří	K5	K10	K15	K20	K25	K30	K35	K40	
	f[mm]	a _p [mm]	Řezná rychlost v ₁₅ [m.min ⁻¹]								
6605	0,1-0,8	1,5-5	455-160								
6615	0,15-0,8	1,5-5	350-175								
8016	0,05-0,1	0,5	285-200								
8030	0,05-0,1	0,5				160-120					

Doporučené řezné podmínky pro soustružení materiálů skupiny S a H jsou uvedeny v tabulce 7.2.

Tab. 7.2 Řezné podmínky pro soustružení materiálů skupin S,H ¹¹

S								
Materiál	Posuv na otáčku	Šíře záběru ostří	S5	S10	S15	S20	S25	S30
	f[mm]	a _p [mm]	Řezná rychlost v ₁₅ [m.min ⁻¹]					
8030	0,1-0,8	1,5-5			60-23			
8040	0,1-0,8	1,5-5			55-18			
3025	0,05-0,8	0,5-5			100-30			
H								
Materiál	Posuv na otáčku	Šíře záběru ostří	H5	H10	H15	H20	H25	H30
	f[mm]	a _p [mm]	Řezná rychlost v ₁₅ [m.min ⁻¹]					
6605	0,1-0,3	1,5-2,5	95-50					
8016	0,1-0,3	1,5-2,5	70-38					
3025	0,1-0,3	1,5-2,5			50-25			

7.2 Sandvik Coromant

Společnost Sandvik Coromant, se sídlem ve městě Sandviken (Švédsko), je předním světovým výrobcem nástrojů a nástrojových materiálů, které se uplatňují zejména přisoustružení, frézování a vrtání. Společnost je zastoupena ve 130 zemích světa, kde zaměstnává přes 8000 zaměstnanců. Produkty této společnosti nacházejí své uplatnění v celé oblasti zpracování kovů, včetně automobilového, leteckého průmyslu, výroby nástrojů a forem a všeobecného strojírenství. Mezi povlakované SK v sortimentu této společnosti, které se používají pro všeobecné soustružení, patří:²³

GC1005 (N05-15, S10-25) - SK s PVD povlakem, kombinace tvrdého jemnozrnného substrátu s dobrou odolností proti plastické deformaci a povlaku vysoce odolného proti opotřebení.

GC1105 (M05-20, S05-20) - Substrát s 94% jemnozrnného WC a 6% Co, zvýšená tvrdost za vysokých teplot a dobrá odolnost vůči plastické deformaci. Nový tenký PVD povlak z TiAlN s vynikající přilnavostí i k ostrým břitům zaručuje houževnatost, rovnoměrné opotřebení hřbetu a vysokou výkonnost.

GC1115 (M05-25, N10-20, S15-25) – Jemnozrnný substrát s vysokou tvrdostí za vysokých teplot a dobrou odolností vůči plastické deformaci, tenký PVD povlak s vysokou odolností proti opotřebení a vynikající přilnavostí k ostrým hranám.

GC1125 (P10-30, M10-30, N15-30, S20-30) - Mikrojemnozrnný SK s PVD povlakem pro střední až nízké řezné rychlosti, mimořádná houževnatost břitu, značná odolnost vůči teplotním rázům.

GC1515 (P10-30, M10-25) - Ultrajemnozrnný SK s CVD povlakem, vhodný pro střední až nízké řezné rychlosti, velká odolnost vůči teplotním rázům.

GC2015 (P20-30, M05-25) - SK se substrátem umožňujícím práci za vysokých teplot, chemicky nanesený povlak s velkou odolností proti opotřebení

GC2025 (P25-40, M15-35) - SK pro střední řezné rychlosti s CVD povlakem, dobrá odolnost vůči tepelným a mechanickým rázům, odolnost proti opotřebení i při přerušovaných řezech.

GC2035 (M25-40) - SK s PVD povlakem, vysoká odolnost vůči tepelným rázům, vhodnost pro aplikace s rychle přerušovaným řezem.

GC3005 (P01-25, K1-20) - SK s CVD povlakem, který se vyznačuje velkou odolností vůči opotřebení a velmi dobrou adhezí k tvrdému substrátu, velmi dobré předpoklady pro práci za vysokých teplot v místě řezu.

GC3205 (K01-15), **GC3210** (K01-20) - SK se silným, hladkým a opotřebení odolným CVD povlakem, velmi tvrdý substrát.

GC3215 (K01-25) - SK s CVD povlakem má silný, hladký a opotřebení odolný povlak a velmi tvrdý substrát, který je schopen vydržet i zatížení při přerušovaném řezu.

GC4205 (P01-15) - SK s CVD povlakem, výborná odolnost proti opotřebení ve tvaru žlábků a plastické deformaci, odolnost vůči vysokým teplotám.

GC4215 (P01-30, K10-25) - Gradientní substrát s optimální tvrdostí a houževnatostí, povlak nanesený metodou CVD se skvělou odolností proti opotřebení, schopnost odolávat vysokým teplotám.

GC4225 (P10-35) - Gradientní substrát s optimalizovanou tvrdostí a houževnatostí pro soustružení oceli, silný povlak nanesený metodou CVD odolný proti opotřebení.

GC4235 (P20-45) - Gradientní substrát pro nepříznivé podmínky. Tvrdost a houževnatost optimalizované pro soustružení ocelí, silný povlak odolný proti opotřebení nanesený metodou CVD.

GC15 (P15-25, M05-25, K05-15, N10-20, S15-25) - Mikrojemnozrný substrát s vysokou pevností pro střední až dokončovací obrábění, tenký PVD povlak s dobrou odolností proti opotřebení.

GC30 (P25-40, M15-25, K25-40, S35-45) - Substrát s vysokou houževnatostí pro střední až dokončovací obrábění, CVD povlak s dobrou tepelnou odolností a odolností proti opotřebení.

GC235 (M25-40) - SK s chemicky naneseným povlakem, houževnatý substrát s extrémní spolehlivostí bříty, vhodný pro těžké přerušované řezy při nízkých až středních řezných rychlostech.

CD1810 (N01-15) - SK s diamantovým povlakem, který zajišťuje skvělou odolnost proti opotřebení a snížení tvorby nárůstku na břitech.

S05F (S05-15) - SK s chemicky naneseným povlakem, vhodný pro dlouhotrvající spojité řezy při nižších řezných rychlostech.

Doporučené řezné podmínky pro soustružení materiálů skupiny P, M, K jsou uvedeny v tabulce 7.3.

Tab. 7.3 Řezné podmínky pro soustružení materiálů skupin P, M, K ²³

P										
Materiál	Posuv na otáčku f[mm]	P5	P10	P15	P20	P25	P30	P35	P40	P45
		Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]								
GC15	0,1-0,3			300-100						
GC1515	0,1-0,3		310-40							
GC1125	0,1-0,3		310-210							
GC3005	0,1-0,5	520-105								
GC4205	0,1-0,8	620-105								
GC4215	0,1-0,8	570-95								
GC4225	0,1-0,8		510-75							
GC2015	0,1-0,8				440-65					
GC4235	0,1-0,8				425-50					
GC30	0,15-0,4					305-95				
GC2025	0,1-0,8					295-38				
M										
Materiál	Posuv na otáčku f[mm]	M5	M10	M15	M20	M25	M30	M35	M40	M45
		Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]								
GC1105	0,1-0,3	380-160								
GC1115	0,1-0,3	335-120								
GC15	0,1-0,3	250-90								

Tab. 7.3 Pokračování²³

M										
Materiál	Posuv na otáčku f[mm]	M5	M10	M15	M20	M25	M30	M35	M40	M45
		Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]								
GC1515	0,1-0,3		305-110							
GC1125	0,1-0,3		280-100							
GC2015	0,2-0,6	260-80								
GC30	0,15-0,4			220-60						
GC2025	0,2-0,6			230-50						
GC2035	0,2-0,6					180-45				
GC235	0,2-0,6					130-45				
K										
Materiál	Posuv na otáčku f[mm]	K5	K10	K15	K20	K25	K30	K35	K40	K45
		Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]								
GC3205	0,2-0,6	530-190								
GC3210	0,2-0,6	445-170								
GC3215	0,2-0,6	260-115								
GC3005	0,2-0,6	275-110								
GC4215	0,2-0,6		370-125							
GC30	0,2-0,6					230-37				

Doporučené řezné podmínky pro soustružení materiálů skupiny S, N jsou uvedeny v tabulce 7.4.

Tab. 7.4 Řezné podmínky pro soustružení materiálů skupin S,N²³

S							
Materiál	Posuv na otáčku f[mm]	S5	S10	S15	S20	S25	S30
		Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]					
GC1105	0,1-0,5	205-24					
GC1115	0,1-0,5			185-19			
GC15	0,1-0,5			185-19			
GC1005			150-24				
GC1125					75-12		
N							
Materiál	Posuv na otáčku f[mm]	N5	N10	N15	N20	N25	N30
		Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]					
CD1810	0,15-0,8	2500-38					
GC1115	0,15-0,8		1000-11				
GC15	0,15-0,8		1000-11				
GC1125	0,15-0,8			960-11			

7.3 Ceratizit

Společnost Ceratizit je výrobcem řezných nástrojů, který má celosvětovou síť obchodních partnerů a své výrobní závody má soustředěné na třech kontinentech. Mezi povlakované SK v sortimentu této společnosti, které se používají pro všeobecné soustružení, patří:²⁴

CM45 (P37-50, M35-47) – SK doporučený pro hrubování až dokončování ocelí.

- složení: Co 10 %; WC 90 %
- zrnitost: 0,7 μm (jemnozrná sorta)
- tvrdost: HV 1600
- systém povlaku: PVD; TiAlN; 2 - 4 μm

CTC1110 (P5-25, K5-25) – SK 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
- systém povlaku: CVD; Ti (C, N)+Ti (C, N)+Ti (N, B)+Al₂O₃+krycí povlak; 18 μm

CTC1115 (P7-25) – SK doporučený pro střední obrábění a dokončování ocelí.

- složení: Co 5,8%; směsný karbid 6,4%; WC 87,8%
- zrnitost: 1 - 2 μm
- tvrdost: HV 1480
- systém povlaku: CVD; Ti (C, N)+Ti (C, N)+Ti (N, B)+Al₂O₃+krycí povlak; 18 μm

CTC1125 (P15-35) - SK doporučený pro hrubování, střední obrábění i dokončování ocelí.

- složení: Co 7 %; směsný karbid 8 %; WC 85 %
- zrnitost: 1 - 2 μm
- tvrdost: HV 1450
- systém povlaku: CVD; Ti (C, N)+Ti (C, N)+Ti (N, B)+Al₂O₃+krycí povlak; 18 μm

CTC1130 (P17-35, K10-27) - SK doporučený 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
- systém povlaku: CVD; Ti (C, N)+Ti (C, N)+TiN+Al₂O₃ ; 12 μm

CTC1135 (P20-42) - SK doporučený pro hrubování a střední obrábění ocelí.

- složení: Co 9,6 %; směsný karbid 7,4 %; WC 83 %
- zrnitost: 1 - 2 μm
- tvrdost: HV 1400
- systém povlaku: CVD; Ti (C, N)+Ti (C, N)+TiN+Ti (N, B)+Ti (C, N)+TiN; 12 μm

CTC1425 (P17-37, K7-22) - SK pro střední obrábění a dokončování ocelí a litin.

- složení: Co 7 %; směsný karbid 8 %; WC 85 %
- zrnitost: 1 - 2 μm
- tvrdost: HV 1450
- systém povlaku: CVD; TiN+Ti (C, N)+Ti (N, B)+Al₂O₃+Ti (C, N, B); 6 μm

CTC1435 (P22-42) - SK doporučovaný pro hrubování, střední obrábění i dokončování ocelí.

- složení: Co 9,6 %; směsný karbid 7,4 %; WC 83 %
- zrnitost: 1 - 2 μm
- tvrdost: HV 1400
- systém povlaku: CVD; TiN+Ti (C, N)+Ti (N, B)+Al₂O₃+Ti (C, N, B); 6 μm

CTC2135 (M30-47) - SK pro hrubování a střední obrábění korozivzdorných ocelí.

- složení: Co 9,6 %; směsný karbid 7,4 %; WC 83 %
- zrnitost: 1 - 2 μm
- tvrdost: HV 1400
- systém povlaku: CVD; Ti (C, N)+Ti (C, N)+TiN+Ti (N, B)+Ti (C, N)+TiN; 6 μm

CTC3110 (K5-20) - SK doporučovaný pro hrubování až dokončování litin.

- složení: Co 6 %; TaC 2 %; WC 92 %
- zrnitost: 1 μm
- tvrdost: HV 1650
- systém povlaku: CVD; Ti (C, N)+Ti (C, N)+Ti (C, N, B)+Al₂O₃; 16 μm

CTCK120 (P5-15, K10-25) - SK doporučovaný pro střední obrábění ocelí a pro hrubování až dokončování litin.

- složení: Co 6 %; TaC 2 %; WC 92 %
- zrnitost: 1 μm
- tvrdost: HV 1630
- systém povlaku: CVD; Ti (C, N)+Al₂O₃; 15,5 μm

CTCP115 (P5-25, K20-30) - SK doporučovaný pro hrubování až dokončování ocelí a pro střední obrábění litin.

- složení: Co 5,8 %; směsný karbid 6,4 %; WC 87,8 %
- zrnitost: 1 - 2 μm
- tvrdost: HV 1550
- systém povlaku: CVD; Ti (C, N)+Al₂O₃; 18,5 μm

CTCP125 (P15-35, K25-35) - SK doporučovaný pro hrubování až dokončování ocelí a pro hrubování litin.

- složení: Co 7 %; směsný karbid 8 %; WC 85 %
- zrnitost: 1 - 2 μm
- tvrdost: HV 1450

- systém povlaku: CVD; Ti (C, N)+Al₂O₃; 15 μm

CTP2120 (M12-22) - SK pro střední obrábění a dokončování korozivzdorných ocelí.

- složení: Co 10 %; směsný karbid 2 %; WC 88 %
- zrnitost: 1 μm
- tvrdost: HV 1560
- systém povlaku: PVD; TiAlN; 2 - 5 μm

CTP2440 (P32-47, M27-42) - SK doporučovaný pro hrubování až dokončování ocelí.

- složení: Co 9,6 %; směsný karbid 7,4 %; WC 83 %
- zrnitost: 1 - 2 μm
- tvrdost: HV 1400
- systém povlaku: PVD; TiAlN; 3 - 5 μm

CTP4115 (N7-20) - SK pro střední obrábění a dokončování neželezných kovů a nekovů.

- složení: Co 6 %; WC 94 %
- zrnitost: 0,8 μm
- tvrdost: HV 1820
- systém povlaku: PVD; (Ti, Al) N; 5 μm

CTP5110 (S5-20) - SK doporučovaný pro střední obrábění žáruvzdorných slitin a titanu.

- složení: Co 6 %; WC 94 %
- zrnitost: 0,8 μm
- tvrdost: HV 1820
- systém povlaku: PVD; (Ti, Al) N; 4 μm

CTP5115 (S7-20) - SK doporučovaný pro střední obrábění žáruvzdorných slitin a titanu.

- složení: Co 6 %; WC 94 %
- zrnitost: 0,8 μm
- tvrdost: HV 1820
- systém povlaku: PVD; TiN + (Ti, Al) N + TiN; 4 μm

CTPM125 (P30-40, M15-35) - SK doporučovaný pro hrubování a střední obrábění ocelí a hrubování až dokončování korozivzdorných ocelí.

- složení: Co 9,6 %; směsný karbid 7,8 %; ostatní 0,4 %; WC 82,2 %
- zrnitost: 1 - 2 μm
- tvrdost: HV 1460
- systém povlaku: PVD; TiN / TiAlN; 6 μm

Doporučené řezné podmínky pro soustružení materiálů skupiny P, M, K, S jsou uvedeny v tabulce 7.5.

Tab. 7.5 Řezné podmínky pro soustružení materiálů skupin P, M, K, S ²⁴

P										
	P5	P10	P15	P20	P25	P30	P35	P40	P45	P50
Materiál	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]									
CTC1110	180-450									
CTCK120	160-450									
CTC1115	180-300									
CTCP115	180-500									
CTC1125			130-240							
CTCP125			130-290							
CTC1130			130-240							
CTPM125						100-280				
CTC1135			130-230							
CTC1425			100-300							
CTC1435			80-280							
CTP2440						60-250				
CM45							50-230			
M										
	M5	M10	M15	M20	M25	M30	M35	M40	M45	M50
Materiál	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]									
CTP2120		60-200								
CTPM125			200-330							
CTC2135						55-200				
CTP2440						50-200				
CM45							40-200			
K										
	K5	K10	K15	K20	K25	K30	K35	K40	K45	K50
Materiál	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]									
CTC3110	180-450									
CTC1110	130-500									
CTCK120	150-550									
CTCP115			140-520							
CTCP125				120-250						
CTC1130		120-230								
CTC1425	110-280									
S										
	S5	S10	S15	S20	S25	S30	S35	S40	S45	S50
Materiál	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]									
CTP5110	30-120									
CTP5115	30-120									

ZÁVĚR

Povlakované slinuté karbidy se vyznačují vysokou tvrdostí, odolností proti opotřebení i houževnatostí. Vývoj technologie výroby a povlakování u slinutých karbidů je podporován postupně vzrůstajícími požadavky na řezné podmínky při obrábění, ve kterých slinuté karbidy musí pracovat (např. přerušovaný řez, vysoké řezné rychlosti apod.). Současné slinuté karbidy drží krok s požadavky trhu prostřednictvím funkčně gradientních struktur (plynulý přechod z houževnatého povrchu do tvrdého jádra) a na nich deponovaných moderních povlaků prostřednictvím stále se vyvíjejících povlakovacích metod (PVD, MTCVD a PCVD). Dalším krokem ve vývoji slinutých karbidů je úspěšné zmenšování velikosti zrn karbidů, jehož výsledkem jsou jemnozrné a ultra-jemné struktury.

Tato diplomové práce byla věnována povlakovaným slinutým karbidům a jejich efektivnímu využití. Byla zhodnocena výroba slinutých karbidů, metody jejich povlakování a vlastnosti povlaků. Prostřednictvím nových depozičních vrstev a technologií deponování byly popsány nové povlakované slinuté karbidy, které dodávají řezným nástrojům nové možnosti využití a specifické vlastnosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
2. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
3. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha : MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
4. HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd. Brno: CCB, s.r.o., 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
5. HUMÁR, A., *Materiály pro řezné nástroje*. Studijní opory. VUT–FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2006. [online]. [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/>
6. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
7. PTÁČEK, Luděk, a kol. *Nauka o materiálu II.* 2. opravené a rozšířené vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
8. KŘÍŽ, Antonín. *Prášková metalurgie* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam - materiálový výzkum. 2005 [cit. 2012-03-30]. Dostupný z: http://www.ateam.ic.cz/praskova_metalurgie.pdf.
9. KŘÍŽ, Antonín. *Tenké vrstvy* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam - materiálový výzkum. 2006 [cit. 2012-03-30]. Dostupný z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf.
10. PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk, ČR. *Frézování 2012* [online]. 2012 [cit. 2012-03-30]. Dostupný z: <http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/Milling%202012%20CZ%20prog.pdf>.
11. PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk, ČR. *Soustružení 2012* [online]. 2012 [cit. 2012-04-17]. Dostupný z: http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/Turning_2012_CZ-SK_screen.pdf.
12. ZAPLETAL, Zdeněk. *Prášková metalurgie a její využití. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002 [cit. 2009-04-25]. Dostupný z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/praskova-metalurgie-a-jeji-vyuziti>.
13. RŮŽIČKA, M., M. JÍLEK a O. ZINDULKA. *Drsnost vrstev připravovaných obloukovým napařováním*. [online]. [cit. 2012-04-05]. Dostupné z: www.shm-cz.cz/files/literatura/39.pdf

14. TaeguTec. *Výroba VBD a druhy povlaků*. [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrabeni_331.pdf.
15. HUMÁR, A. Strojírenská technologie I: Technologie obrábění – 1. část. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění [online]. 2006 [cit. 2011-01-26], s. 1-138. Dostupný z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/TI_TO-1cast.pdf.
16. SHM, *Měření jednotlivých vlastností vrstev*. [online]. [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/cs/technicke-informace/mereni>
17. SHM, *TripleCoatings*. [online]. [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/cs/pvd-povlaky/nabidka/triplecoatings>
18. SHM, *Charakteristika povlaků*. [online]. [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/cs/technicke-informace/charakteristika-povlaku>
19. P. Holubář, M. Jílek, M. Šíma, V. Maixner, *Aplikace TripleCoating na VBD*, konference NEWTECH 2011, Brno [online]. [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/files/literatura/52.pdf>
20. SHM, *Darwin*. [online]. [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/cs/produkty/pvd-povlaky/darwin>
21. *Měření vlastností povlaků na nástrojích*. [online]. [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-vlastnosti-povlaku-na-nastrojich.html>
22. SHM, *PVD technologie SHM*. [online]. [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/cs/technicke-informace/pvd-technologie-shm>
23. SANDVIK COROMANT. *Turning tools*. [online]. 2012 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/en-gb/TURN_A.pdf
24. CERATIZIT, *Tools and inserts for turning*. [online]. 2012. [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: http://www.ceratizit.com/4170_DEA_HTML.php
25. DRAŠNAR, Petr. *Otěruvzdorné PVD a CVD povlaky*. [online]. [cit. 2012-03-23]. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/200802_povrchari.pdf
26. AB SANDVIK. *Understanding Cemented Carbide* [online]. 2001 [cit. 2009-05-16]. Dostupný z: [http://www.sandvik.com/sandvik/0130/HI/SE03411.nsf/a0de78d35676d88d412567d900294747/4c7827530abfa4e1c1256b0a0034cc36/\\$FILE/ATTYN87R/9100%20eng.pdf](http://www.sandvik.com/sandvik/0130/HI/SE03411.nsf/a0de78d35676d88d412567d900294747/4c7827530abfa4e1c1256b0a0034cc36/$FILE/ATTYN87R/9100%20eng.pdf).
27. CERATIZIT S.A.. *Hard metals for precision tools* [online]. 2009 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z: http://www.ceratizit.com/4170_ENG_HTML.php
28. SANDVIK AB, Sandviken, Sweden, *All about Cemented Carbide* [online] [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <http://www.allaboutcementedcarbide.com>.

29. LIBRA, Martin. *Naprašování tenkých vrstev* [online] [cit. 2012-04-12].

Dostupné z:

http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25484

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
a_p	[mm]	Šířka záběru ostří
C_T	[-]	Konstanta v T-vc závislosti
C_v	[-]	Konstanta v T-vc závislosti
C_{v1}	[-]	Konstanta
CVD	[-]	Chemical Vapour Deposition
C_{vT}	[-]	Konstanta
DLC	[-]	Uhlík podobný diamantu
f	[mm]	Posuv na otáčku při soustružení
HB	[MPa]	Tvrlost podle Brinella
HFCVD	[-]	Chemické nanášení povlaků se žhavicím vláknem
HRC	[MPa]	Tvrlost podle Rockwella
HSh	[-]	Tvrlost podle Shoreho
HV	[MPa]	Tvrlost dle Vickerse
KT	[mm]	Hloubka výmolu na čele VBD
KVy	[mm]	Změna rozměru plochy
LICVD	[-]	Laserem indukované chemické nanášení povlaků
LPCVD	[-]	Nízkotlaké chemické nanášení povlaků
MT-CVD	[-]	CVD metoda za středních teplot
PACVD	[-]	Plazmaticky aktivované chemické nanášení povlaků
PECVD	[-]	Plazmaticky aktivované chemické nanášení povlaků
PKNB	[-]	Polykrystalický kubický nitrid bóru
PVD	[-]	Fyzikální metoda deponování
Ra	[μm]	Drsnost
Rm	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
RTP	[-]	Prášek připravený ke slisování
SK	[-]	Slinutý karbid
T	[min]	Trvanlivost nástroje
VB	[mm]	Šířka fazety opotřebení hřbetu VBD
VBD	[-]	Vyměnitelná břitová destička
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
x_v	[-]	Exponent, vyjadřující vliv šířky záběru ostří
y_v	[-]	Exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku

