

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SLINUTÉ KARBIDY CEMENTED CARBIDES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MOJMÍR VANĚK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Mojmír Vaněk

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:

Slinuté karbidy

v anglickém jazyce:

Cemented carbides

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce je zaměřena na slinuté karbidy z hlediska výroby, rozdělení, označování, fyzikálně mechanických vlastností, metod povlakování, aplikačních oblastí 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 nepovlakovaných a povlakovaných slinutých karbidů (druhy, výroba, značení, fyzikálně mechanické vlastnosti, metody povlakování)
3. Slinuté karbidy 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 978-80-254-2250-2.
3. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2006. [online]. Dostupné na [www: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v_2.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v_2.pdf).
4. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. MM Průmyslové spektrum - Speciální vydání. Zář 2004. ISSN 1212-2572., s. 84-96.
5. HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. MM publishing s. r.o., Praha. 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
6. Technické materiály a prospekty firem Ceratizit, Iscar, Kennametal, Korloy, Kyocera, Mitsubishi, Pramet Tools, Sandvik Coromant, Seco, Sumitomo, Walter, Widia.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je charakteristika nepovlakovaných a povlakovaných slinutých karbidů z hlediska značení, struktury, fyzikálních a mechanických vlastností. V práci je uveden přehled metod výroby nepovlakovaných, povlakovaných a funkčně gradientních slinutých karbidů. Na závěr je uveden přehled sortimentu výroby nejvýznamnějších producentů nástrojových materiálů včetně popisu a aplikačních oblastí těchto materiálů.

Klíčová slova

Slinuté karbidy, nástrojové materiály, funkčně gradientní slinuté karbidy, povlakování.

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is a characteristic of uncoated and coated cemented carbides in terms of marking, structure, physical and mechanical properties. There is an overview of production methods of uncoated, coated cemented carbides and functionally graded hardmetals in the thesis. At the end there is an overview of the range of production of the most significant tool material producers including descriptions and areas of use of this materials.

Key words

Cemented carbides, tool materials, functionally graded hardmetals, coating.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VANĚK, Mojmír. *Slinuté karbidy: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 57 s. Vedoucí práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.

Prohlášení

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

Datum:

.....
Mojmír Vaněk

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Antonu Humárovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské 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
1.1.1 Nelegované nástrojové oceli	10
1.1.2 Legované nástrojové oceli	11
1.1.3 Rychlořezné oceli	11
1.2 Slinuté karbidy	11
1.3 Cermety	11
1.4 Řezná keramika	12
1.5 Stellity	12
1.6 Supertvrdé řezné materiály	12
1.6.1 Polykrystalický diamant.....	12
1.6.2 Polykrystalický kubický nitrid bóru	13
1.7 Coronite	13
2 NEPOVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY.....	14
2.1 Druhy slinutých karbidů a jejich značení	14
2.2 Výroba.....	15
2.2.1 Výroba prášku.....	16
2.2.1.1 Výroba karbidů.....	16
2.2.1.2 Mísení karbidů a pojiva	16
2.2.2 Lisování polotovarů.....	18
2.2.3 Slinování	19
2.2.4 Tvarování polotovarů.....	19
2.3 Struktura slinutých karbidů	20
2.3.1 Fáze WC.....	20
2.3.2 Pojivo.....	22
2.3.3 Kubická fáze.....	22
2.3.4 Fáze eta.....	24
2.3.5 Grafit.....	24
2.4 Vlastnosti slinutých karbidů	25
2.4.1 Tvrdost	25
2.4.2 Pevnost.....	25
2.4.3 Lomová houževnatost	26
2.4.4 Délková roztažnost.....	28
2.4.5 Tepelná vodivost	28
3 FUNKČNĚ GRADIENTNÍ SLINUTÉ KARBIDY	29
3.1 SK se zvýšeným obsahem pojiva v povrchové vrstvě	29
3.1.1 Slinování za denitračních podmínek	29
3.1.2 Vakuové slinování	30
3.1.3 Metoda pórovitých dílců	30
3.1.4 Gradientní SK s difuzní vrstvou Ti(C,N)	31
3.1.5 Metoda řízeného oduhličování	31

3.2 SK se sníženým obsahem pojiva v povrchové vrstvě.....	32
3.2.1 Dvoufázové slinuté karbidy.....	33
3.2.2 Metoda řízeného nauhličování.....	34
4 POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY	36
4.1 Metody povlakování.....	36
4.1.1 Metoda CVD.....	36
4.1.2 Metoda PVD.....	37
4.2 Běžně používané povlaky a jejich vlastnosti	38
4.3 Povlaky KNB	38
5 SK V SORTIMENTU NEJVÝZNAMNĚJŠÍCH VÝROBCŮ	41
5.1 Sandvik Coromant	41
5.1.1 Nepovlakované SK	41
5.1.2 Povlakované SK	42
5.2 Pramet Tools	46
5.2.1 Nepovlakované SK	46
5.2.2 Povlakované SK	47
5.2.3 Povlakované SK s funkčně gradientním substrátem.....	48
5.3 Kennametal.....	50
5.3.1 Nepovlakované SK	50
5.3.2 Povlakované SK	51
Závěr	53
Seznam použitých zdrojů.....	54
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	57

ÚVOD

Technologie obrábění má ve strojírenské výrobě nezastupitelné místo – procesem obrábění prochází nejen podstatná část výrobků z litiny, slitin železa a neželezných kovů, ale i mnoho výrobků z nekovových materiálů, jako jsou dřevo, keramika, kámen nebo kompozitní materiály.

Je zřejmé, že takto velký rozsah obráběných materiálů klade značné nároky na volbu materiálu, ze kterého bude řezný nástroj vyroben. Nástrojové materiály musí mít především vysokou tvrdost, která společně s chemickou stabilitou zajišťuje odolnost proti opotřebení. Další významnou vlastností je houževnatost, která s pevností v ohybu charakterizuje odolnost proti lomu. Při procesu obrábění dochází v místě styku nástroje a obrobku ke značnému zvýšení teploty – proto musí mít řezné materiály dostatečně vysokou tepelnou vodivost, aby bylo minimalizováno tepelné namáhání nástroje.

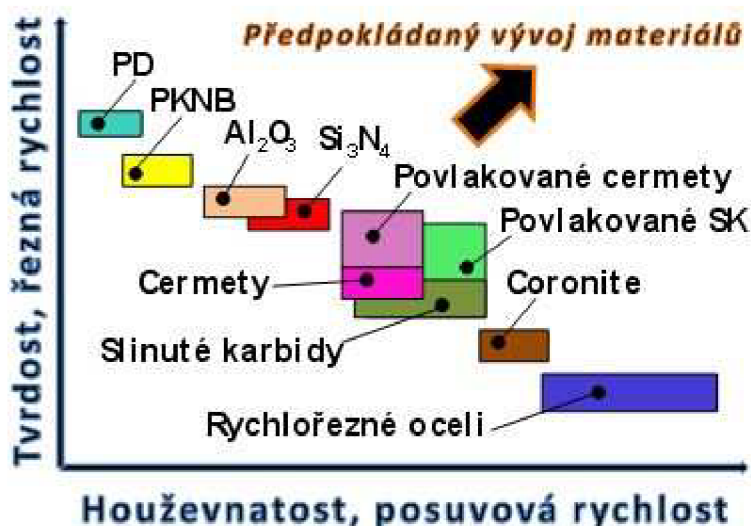
Tyto a další vlastnosti charakterizují řezné materiály a určují oblasti, ve kterých mohou být materiály použity. Pro dokončovací obrábění probíhající při vysokých řezných rychlostech, kdy nástroj odebírá třísku s malým průřezem, je vyžadován materiál s vysokou tvrdostí, tepelnou vodivostí a chemickou stabilitou. Naopak při hrubovacím obrábění a těžkých přerušovaných řezech je vyžadován materiál s vysokou houževnatostí a pevností v ohybu. Uvedené vlastnosti jsou převážně protichůdné, a proto řezné materiály nemohou splňovat všechny uvedené požadavky zároveň.

Slinuté karbidy se mezi řeznými materiály vyznačují nejvyšším modulem pružnosti, ohybovou pevností a vysokou houževnatostí. Pokud na tento pevný a houževnatý podklad nanese tenký povlak z tvrdého, tepelně a chemicky stabilního materiálu, vlastnosti podkladu zůstanou dostatečně zachovány a vznikne materiál pro nejširší oblast použití – pro kontinuální i přerušované řezy při velkých řezných i posuvových rychlostech s velkým úběrem materiálu.

Přes širokou oblast použití povlakovaných slinutých karbidů nemůžeme žádný materiál považovat za univerzální; správná volba nástrojového materiálu je důležitým krokem pro tvorbu technologického postupu a pro firmu je důležitá i z ekonomického hlediska.

1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ MATERIÁLŮ PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE

Produktivita obrábění významně závisí na vlastnostech nástroje, který je vyroben z daného nástrojového materiálu. Na materiál nástroje jsou kladeny vysoké, ale často protichůdné požadavky (obr. 1.1). Základní vlastnosti jsou: vysoká tvrdost, houževnatost, odolnost proti opotřebení, pevnost v ohybu a tepelná vodivost. Tyto vlastnosti musí mít materiál po dostatečně dlouhou dobu.^{13,21}



Obr. 1.1 Závislost mechanických vlastností a pracovních podmínek^{13,17,18,31}

V důsledku mnohaletého výzkumu je dnes k dispozici velký výběr materiálů pro řezné nástroje. Patří k nim nástrojové oceli, slinuté karbidy, cermety, řezná keramika, stelly, supertvrdé řezné materiály a materiál Coronite.^{13,21}

1.1 Nástrojové oceli

Přestože jsou nástrojové oceli jedněmi z nejstarších nástrojových materiálů, nacházejí uplatnění i v dnešní době. Jejich hlavními přednostmi jsou vysoká houževnatost a nízká cena.

Podle chemického složení můžeme nástrojové oceli rozdělit na nelegované (uhlíkové), legované (nizkolegované a střednělegované) a vysokolegované (rychlořezné) oceli.

1.1.1 Nelegované nástrojové oceli

Na vlastnosti nelegovaných ocelí má významný vliv obsah uhlíku – tvrdost ocelí s jeho stoupajícím obsahem vzrůstá. Obsahují obvykle 0,3–1,4% C a maximálně 1% legur (Mn, Cr, Si). Nástroje jsou vždy kaleny a popouštěny.

Nelegované oceli se používají především k výrobě ručních nástrojů: čepelí, sekáčů, pilníků a pilových plátek. Při obrábění se musí pracovat velmi malými řeznými rychlostmi (do 15 m.min⁻¹) a snášet teplotu maximálně 220°C.

Jejich použití při obrábění je tedy neefektivní a jsou často nahrazovány legovanými nástrojovými oceli.^{13,21}

1.1.2 Legované nástrojové oceli

Legované oceli jsou takové, do kterých byly přidány legující prvky za účelem zlepšení vlastností oceli. Obsahují obvykle 0,8–1,2% C a 10–15% legujících prvků (karbidotvorných: Cr, V, W, Mo a nekarbidotvorných: Ni, Si). Díky přidání legur mají tyto oceli vyšší prokalitelnost než oceli uhlíkové.

Z legovaných nástrojových ocelí se vyrábí široký sortiment nástrojů pro nízké řezné rychlosti (do 25 m.min⁻¹) jako jsou vrtáky, frézy nebo protahovací trny. Tyto nástroje snášejí teplotu břitu do 350 °C.^{13,21}

1.1.3 Rychlořezné oceli

Pro své specifické vlastnosti jsou rychlořezné oceli uváděny jako samostatná skupina legovaných ocelí. Rychlořezné oceli mají vyšší houževnatost než jakékoli jiné nástrojové materiály. Obsahují obvykle 0,7–1,3% C a více než 30% legujících prvků (karbidotvorných: V, W, Mo, Cr a nekarbidotvorný Co).

Rychlořezné oceli se vyznačují střední odolností proti opotřebení a vysokou houževnatostí. Vyrábějí se z nich tvarové nástroje, vrtáky, výhrubníky, výstružníky, závitníky nebo frézy. Časté je použití pro nástroje vystavované rázům při přerušovaném řezu. Nástroje z rychlořezné oceli snášejí teplotu břitu do 700 °C a lze je použít pro řeznou rychlost do 50 m.min⁻¹.^{13,21}

1.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou produktem práškové metalurgie. Vyrábějí se slinováním práškových směsí tvořených tvrdými částicemi karbidů (mezi kterými převažuje karbid wolframu WC) a kovovým pojivem, kterým je obvykle kobalt Co.

Díky své vysoké tvrdosti i houževnatosti mají slinuté karbidy široké uplatnění při obrábění. Některé nástroje malých rozměrů se vyrábějí jako monolitické, ale mnohem častěji se vyrábějí destičky normalizovaných tvarů, které se obvykle mechanicky upevňují na řeznou část nástroje. Méně častějším způsobem upevnění je pájení. Mechanicky upínané destičky mají několik ostří, která se využívají postupně.²¹

1.3 Cermety

Cermety jsou produktem práškové metalurgie. Název vznikl složením první hlásky slov „**CER**amic“ a „**MET**al“. Měl popisovat materiál, který v sobě spojuje výhodné vlastnosti keramiky (tvrdost) a kovu (houževnatost). Skutečnost se však od tohoto předpokladu liší. Tvrdými částicemi jsou TiC, TiN, TiCN, TaN a kovovým pojivem Ni, Mo nebo Co. V porovnání se slinutými karbidy mají cermety přibližně stejnou tvrdost, větší odolnost proti opotřebení na hřbetě a menší sklon k vytváření nárůstku. Mají ovšem menší houževnatost a pevnost. Vzhledem k vysoké kvalitě obrobeného povrchu se používají především pro dokončovací operace při řezné rychlosti do 360 m.min⁻¹. Z cermetů

se vyrábějí vyměnitelné břitové destičky pro soustružení, řezání závitů a frézování ocelí, litin, snadno obrobitelných slitin a neželezných kovů.^{21,17,31}

1.4 Řezná keramika

Název keramika zahrnuje velký počet různých rezných materiálů, které se obecně charakterizují jako převážně krystalické materiály, jejichž hlavními složkami jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru.¹⁷ Základní typy rezné keramiky jsou dva – na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3) a na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4). Keramické nástroje mají vysokou tvrdost a chemicky nereagují s materiálem obrobku. Zaručují vysokou trvanlivost břitu, dají se použít při vysokých rezných rychlostech (do $1600 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$) a snášejí teplotu břitu až $1200 \text{ }^\circ\text{C}$. Významnou nevýhodou je vysoká křehkost a nízká tepelná vodivost. Řezná keramika se vyrábí ve tvaru destiček, které se mechanicky upevňují na reznou část nástroje a po opotřebení se vyměňují.^{17,31}

Řezná keramika na bázi čistého Al_2O_3 má nízkou pevnost a houževnatost. Mechanické vlastnosti se proto někdy zvyšují přidáním kovové fáze (nejčastěji ZrO_2 nebo TiC). Používá se pro obrábění konstrukčních ocelí a litin. Pro významnější zvýšení vlastností může být keramika vyztužena whiskerem – monokrystalickými vlákny SiC , které podstatně zvýší houževnatost, pevnost v tahu a odolnost proti tepelnému šoku. Vyztužená keramika se využívá pro obrábění kalených ocelí a žáruvzdorných slitin plynulým i přerušovaným řezem.^{21,31}

Neoxidická keramika na bázi Si_3N_4 se vlastnostmi velmi liší od keramiky na bázi oxidu hlinitého. Má vyšší houževnatost, pevnost a odolnost proti tepelnému šoku. Používá se především pro obrábění šedých litin s velkým objemem odebíraného materiálu při rychlostech do $400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.³¹

1.5 Stellity

Stellity jsou lité materiály, které neobsahují železo, ale různý podíl jiných kovů (Co, Cr, W). Výhodou je vysoká tvrdost za tepla a otěruvzdornost. Nevýhodou je vysoká křehkost. Dnes se používají pouze výjimečně.¹³

1.6 Supertvrde rezné materiály

Mezi supertvrde rezné materiály se řadí dva perspektivní syntetické materiály – polykrystalický diamant (PD) a polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB). PD a PKNB jsou nejtvrďšími materiály. Proto se obvykle označují jako supertvrde. Jejich hlavní nevýhodou je vysoká pořizovací cena.²¹

1.6.1 Polykrystalický diamant

PD téměř dosahuje tvrdosti nejtvrďšího známého materiálu – monokrystalického přírodního diamantu. Jemné krystaly diamantu jsou spojovány sliniváním za vysokých teplot a tlaků. Protože je poloha krystalů nahodilá, mají nástroje z PD ve všech směrech stejné vlastnosti.³¹

Malé břity z PD jsou upevněny na destičce ze slinutého karbidu, která jim zaručuje pevnost a odolnost proti rázovým šokům. Trvanlivost diamantových břitů je až stokrát vyšší než u slinutých karbidů.³¹ PD ovšem nesmí být používán pro obrábění slitin železa, aby nedocházelo k difuzi mezi nástrojem a obrobkem. Nevýhodou je také nízká teplotní stálost, při řezání se nesmí překročit teplota 600 °C. Přes tato omezení má PD široké uplatnění při obrábění slitin hliníku při rychlostech nad 500 m.min⁻¹, nekovových materiálů, umělých hmot, keramiky a materiálů vyztužených vlákny.^{13,17,31}

1.6.2 Polykrystalický kubický nitrid bóru

Větší tvrdost než PKNB má pouze diamant. Jeho výhodou je vysoká stabilita při obrábění slitin železa a jeho vysoká teplotní odolnost (až 2000 °C). PKNB se obvykle vyrábí ve formě malých destiček nalisovaných na substrátech ze slinutého karbidu, méně častěji jako monolitické vyměnitelné břitové destičky. Nástroje PKNB se používají při obrábění ocelových výkovků, kalené oceli a litiny, slinovaných materiálů a žáruvzdorných slitin.^{13,21,31}

1.7 Coronite

Materiál Coronite je produktem práškové metalurgie, který vyvinula firma Sandvik Coromant. Skládá se z 50% zrn nitridu titanu (TiN), která jsou rovnoměrně rozptýlena v základní fázi oceli.

Svémi vlastnostmi se dá Coronite zařadit do mezery mezi slinutými karbidy a rychlořeznou ocelí. Řezné nástroje se obvykle nevyrábějí z plného materiálu Coronite, ale 85% jejich průměru tvoří ocelové jádro. Povrch nástroje bývá povlakován. Coronite se používá pro obrábění oceli, šedé litiny, slitin titanu a různých neželezných kovů.³¹

2 NEPOVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY

2.1 Druhy slinutých karbidů a jejich značení

Při zkoumání historie výroby slinutých karbidů (SK) se setkáváme s nedostatkem norem zbývajících se složením a vlastnostmi těchto materiálů. Tento nedostatek se promítá i do současnosti, neboť současná norma ČSN ISO 513 rozděluje SK do skupin především podle jejich použití. Není tedy možné kontrolovat soulad složení a vlastností materiálů s touto normou a přiřazení materiálů do skupin záleží pouze na rozhodnutí výrobce.¹⁷

Norma ČSN ISO 513 označuje slinuté karbidy podle existence povlaku a zrnitosti symboly HW, HF a HC (viz. Tab. 2.1).

Tab. 2.1 Označování SK podle ČSN ISO 513 - povlak a zrnitost¹⁷

Materiál	Zrnitost	Označení
Nepovlakované SK s obsahem primárního WC	$\geq 1 \mu\text{m}$	HW
	$> 1 \mu\text{m}$	HF
Povlakované SK	-	HC

Podle použití jsou SK rozděleny do skupin K, P, M, N, S, H, které jsou barevně rozlišeny (viz. Tab. 2.1).

Tab. 2.2 Rozdělení SK podle ČSN ISO 513 – použití^{7,13,17,21,31}

Skupina	Použití
	Příklady materiálů
P	Obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku
	Uhlíkové, legované i nástrojové oceli, slitinové a feritické korozivzdorné oceli, uhlíkové, nízko a střednělegované ocelolitiny, temperovaná litina.
M	Obrábění materiálů tvořících dlouhou a střední třísku
	Austenitické korozivzdorné a manganové oceli, žázuvzdorné a žárupevné slitiny, oceli na odlitky, šedá, legovaná, tvárná i temperovaná litina, neželezné kovy.
K	Obrábění materiálů tvořících krátkou třísku
	Ocel nízké pevnosti a kalené oceli, šedá, tvárná a temperovaná litina, neželezné kovy a slitiny, např. hliník a bronzy, nekovové materiály – plasty, keramika, kámen...
N	Obrábění neželezných slitin a nekovových materiálů
	Slitiny na bázi hořčíku, hliníku nebo mědi, plasty, kompozitní materiály a dřevo.
S	Obrábění speciálních slitin
	Slitiny titanu, žárupevné slitiny na bázi železa, kobaltu a niklu.
H	Obrábění tvrdých materiálů
	Zušlechtnuté a kalené oceli, tvrzené (kokilové) litiny.

Při použití SK skupiny P k obrábění materiálů tvořících dlouhou třísku je zřejmé, že je nástroj namáhán velkými silami a dochází ke značnému opotřebení na čele (tvorbě výmolu). Dochází také k velkému teplotnímu zatížení nástroje. Slinuté karbidy skupiny P tedy obsahují velké množství přísad TiC (případně TaC), které zlepšují odolnost proti difuzi za vysokých teplot a tím snižují vymílání na čele nástroje.

Naproti tomu při obrábění materiálů tvořících krátkou drobivou třísku SK typu K jsou řezné síly relativně nízké a dochází především k adheznímu a abraznímu opotřebení. SK typu K proto obsahují velké množství WC, jehož tvrdost je za nízkých teplot dostatečná.

SK skupiny M mají univerzální použití. Obrábí se jimi materiály tvořící dlouhou a střední třísku, řezné síly dosahují středních až vysokých hodnot a dochází k vydrolování ostří.^{17,18}

Tab. 2.3 Přehled složení základních skupin karbidů^{17,33}

Skupina	Co [%]	WC [%]	TiC [%]	TaC.NbC [%]
P	5-17	30-82	8-64	*
M	6-15	79-84	5-10	4-7
K	4-12	87-92	-	*

* U karbidů skupin P a K může být přidáno malé množství TaC.NbC jako inhibitor růstu zrna.

Každá skupina je dále rozdělena na podskupiny označené dvojcíslím. Skupina P má podskupiny P01, P05, P10, P15, P20, P25, P35, P40, P45, P50. Skupiny M a K mají podskupiny od 01 do 40 a skupiny N, S, H od 01 do 30. Obecně platí, že s rostoucím číslem roste obsah pojícího kovu a tím i houževnatost a pevnost v ohybu. Tvrdost a otěruvzdornost klesá. Klesá také doporučená řezná rychlost a roste posuvová rychlost a průřez třísky.^{17,18}

Tab. 2.4 Příklady použití a změn vlastností podskupin SK^{7,31}

Podskupina	Oblast použití	Změny vlastností	
		Tvrdost, řezná rychlost a odolnost proti opotřebení	Posuvová rychlost, houževnatost
01	Dokončovací operace velkými řeznými rychlostmi, malým posuvem a malou hloubkou řezu	↑	↓
25	Střední obrábění a dokončování ve středním rozsahu řezných podmínek		
50	Hrubování při nízkých řezných rychlostech a velkém průřezu třísky		

2.2 Výroba

Výrobou slinutých karbidů se zabývá obor zvaný prášková metalurgie, který zahrnuje tyto výrobní operace: přípravu kovového prášku, jeho třídění a úpravu, jeho tváření lisováním, slinováním a dokončovacími operacemi.⁹

Obecně probíhá výroba slinutého karbidu takto: Nejprve se musí z wolframové rudy vyrobit práškový wolfram, který se využije k výrobě práškového WC. Tento se smíchá s dalšími práškovými karbidy a s pojicím kovem, kterým bývá obvykle kobalt. Tato směs se lisováním zformuje do požadovaného tvaru. Poté následuje slinování při teplotách 1350-1650 °C. Po slinování bývá tvar nástrojů upravován např. broušením a některé SK mohou být povlakovány.^{17,31}

2.2.1 Výroba prášku

2.2.1.1 Výroba karbidů

Základní surovinou pro výrobu SK je wolframová ruda, kterou je buď scheelit (CaWO_4), nebo wolframit ($(\text{Fe},\text{Mn})\text{WO}_4$). Z ní se získává roztok wolframanu amonného, který se následně vyžihá na oxid wolframový WO_3 . Redukcí s vodíkem se z oxidu wolframového vytváří wolframový prášek. Změnami podmínek redukce lze získat wolframový prášek různé zrnitosti.³¹

Wolframový prášek se poté musí nauhličit, aby mohl vzniknout karbid wolframu. Proto se mísí se sazemí nebo grafitem a směs se mele v kulovém mlýnu.¹⁷

Pomletá směs se ohřívá ve vysokofrekvenčních pecích na 1700 °C. V peci dochází ke karburaci – slučování wolframu s uhlíkem na karbid wolframu WC. Je zřejmé, že takto vyrobený WC obsahuje vždy určitý podíl čistého uhlíku, který ovlivňuje vlastnosti SK.³¹

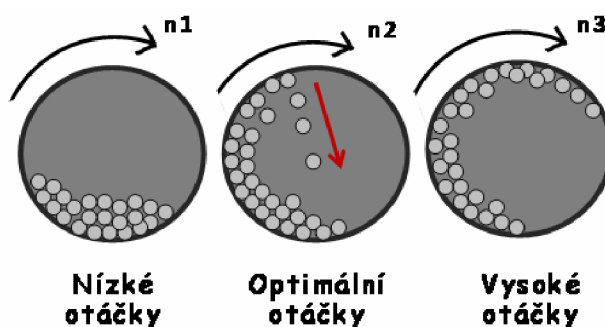
K výrobě některých SK jsou kromě WC nutné další karbidy, především TiC a TaC.NbC, které se vyrábějí podobně jako WC. Přidání čistého TiC do směsi pro výrobu SK není možné, protože by při slinování docházelo k vytváření tuhého roztoku s karbidem wolframu doprovázeného uvolňováním oxidu uhelnatého (CO). Výsledný produkt by měl z tohoto důvodu vysokou pórovitost. Směsný karbid (W,Ti)C (tuhý roztok karbidu wolframu k karbidu titanu) se tedy musí vyrobit předem. Při teplotě nad 2000 °C rozpustí TiC karbid wolframu a vytvoří se směsný karbid (W,Ti)C. Z podobného důvodu se vyrábí také směsný karbid $[\text{W},\text{Ti},\text{Ta}(\text{Nb})]\text{C}$.^{17,31}

2.2.1.2 Mísení karbidů a pojiva

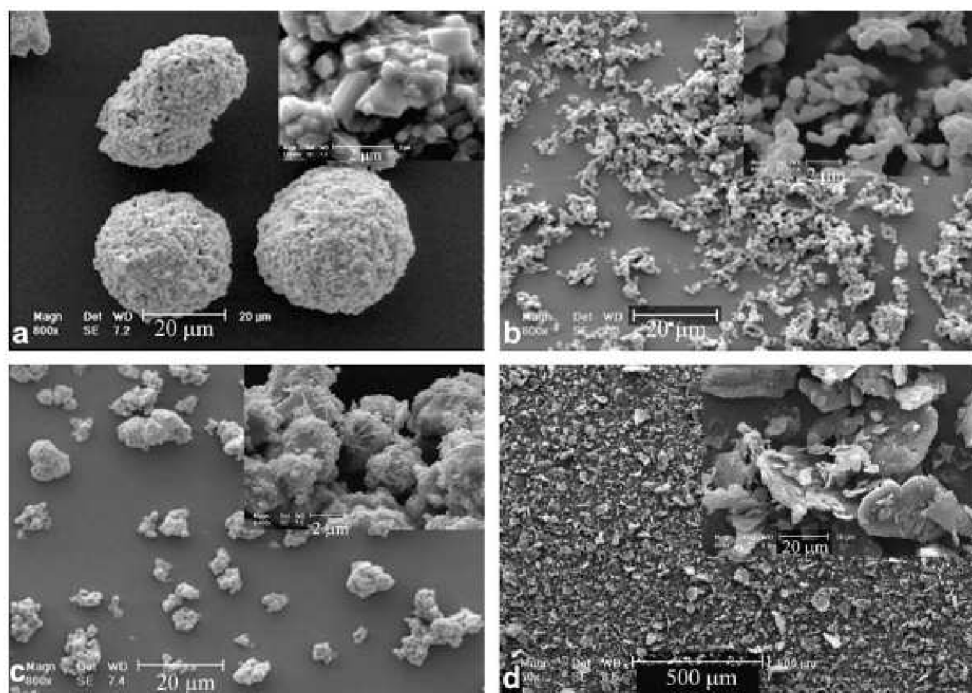
Směs karbidů potřebnou k výrobě SK je nutné dokonale promíchat s pojicím kovem, aby vznikla jemnozrnná a homogenní směs. Mletí probíhá nejčastěji za mokra, kdy se na 1 kg směsi přidává 0,25-0,35 l etylalkoholu, nebo jiné kapaliny. Mokrý mletí je výhodné proto, že působením kapilárních sil dochází k rozrušování jednotlivých zrn a tím k urychlení mlecího procesu. Nevýhodou tohoto postupu je nutnost úplného vysušení směsi po skončení mletí.¹⁷

Směs se nejčastěji mele v kulových mlýnech – nádobách válcového tvaru naplněných mlecími kuličkami a otáčejících se kolem horizontální osy. Kuličky uvnitř mlýnu rozměňují směs tím, že na ni působí rázovým a třecím účinkem. Aby nedošlo ke znečištění směsi nežádoucími částicemi vzniklými opotřebením kuliček, musí být kuličky i obložení mlecího válce vyrobeny ze stejného druhu SK pro který je směs připravována. Faktory, které ovlivňují

mletí jsou: objem náplně mlýnu (0,4-0,5 objemu válce), velikost kuliček (5-15 mm), poměr hmotnosti kuliček a směsi (3:1 až 10:1), otáčky mlýnu (musí způsobit kaskádový efekt – obr. 2.3) a doba mletí (až 120 hodin).¹⁷

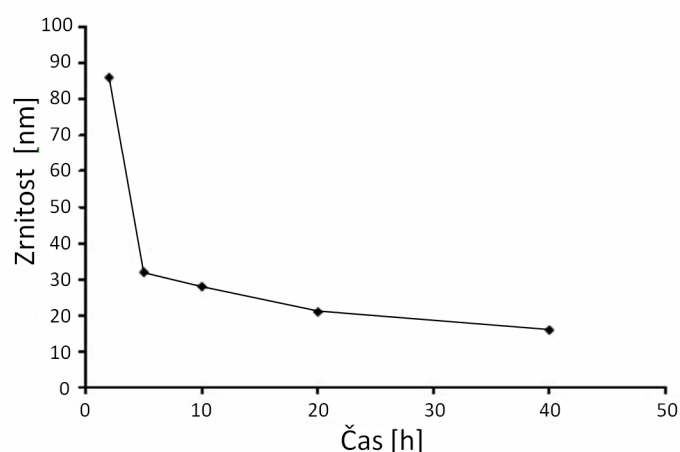


Obr. 2.3 Mletí v kulovém mlýnu: $n_1 < n_2 < n_3$, při optimálních otáčkách n_2 dochází ke kaskádovému efektu¹⁷

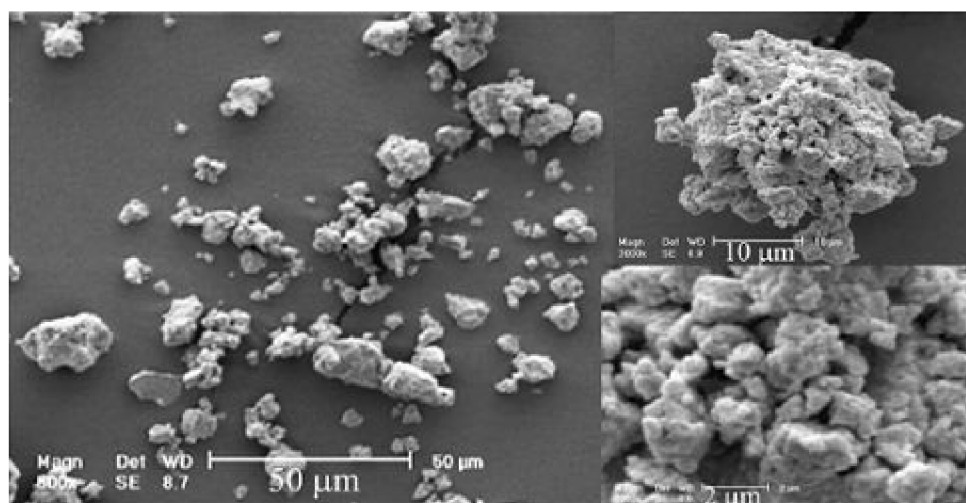


Obr. 2.4 Suroviny pro výrobu slinutého karbidu: (a) kulovité částice prášku obsahující 83% WC a 17% Co, (b) kobaltový prášek, (c) wolframový prášek (d) grafit.¹⁰

Vliv doby mletí na zrnitost prášku zkoumali Enayati a kol.¹⁰ Mleli částice prášku o 83 % C a 17 % Co (obr. 2.4 a) za těchto podmínek: průměr kuliček 12 mm, poměr hmotnosti kuliček a hmotnosti prášku 5:1, otáčky 750 min^{-1} . Zjištěná závislost je uvedena na obr. 2.5. Je zřejmé, že s postupujícím časem se zrnitost blíží ke konstantní hodnotě a při době mletí vyšší než 20 hodin se už téměř nezmenšuje.



Obr. 2.5 Zmenšování zrnitosti prášku v závislosti na době mletí¹⁰



Obr. 2.6 Kulovité částice prášku z obr. 2.3 po 20 hodinách mletí¹⁰

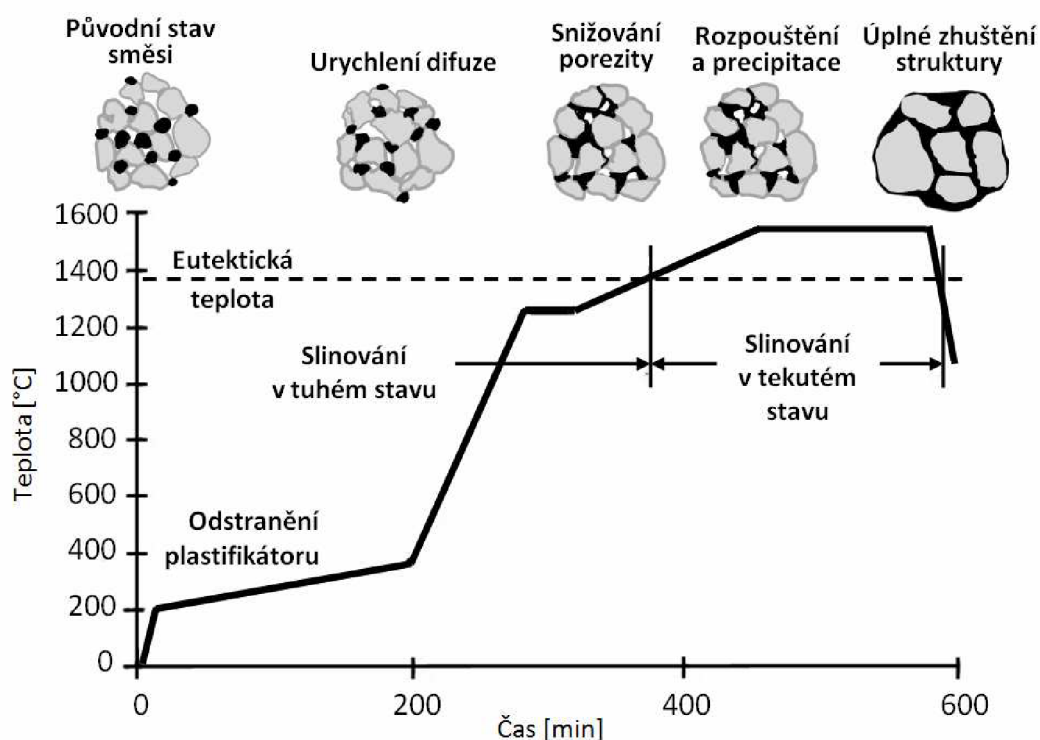
2.2.2 Lisování polotovarů

Směs prášků se po mletí lisuje do požadovaného tvaru různými metodami, např. hydrostatickým lisováním či metodou CIP (Cold Isostatic Pressing – izostatické lisování za studena). Při výrobě vyměnitelných břitových destiček (VBD) se nejčastěji používá lisování na formovacích lisech za použití forem. Při použití jednosměrného lisu má výlisek v místě pod pohyblivým lisovníkem vyšší hustotu. Proto se častěji používá obousměrného lisu, kdy se oba lisovníky pohybují proti sobě. Výlisek má sice uprostřed nižší hustotu, ale je stlačen symetricky. Lisovací tlaky se pohybují od 50 do 150 MPa.^{9,17,31}

Po lisování má polotovar vysokou porozitu, která se odstraňuje při slinování, což má za následek jeho smrštění. Rozměry výlisku proto musí být o 17–28 % větší než rozměry hotového výrobku.^{17,31}

2.2.3 Slinování

Vylisované těleso bývá umístěno do slinovací pece. Typický proces slinování je znázorněn na obr. 2.7. V první fázi je těleso pomalu ohříváno a je odstraňován plastifikátor (přidaný před lisováním pro usnadnění skluзу částic) a probíhá odplynění. Ohříváním tělesa až na teplotu blízkou eutektické dochází k významnému urychlení difuze, spojování zrněk prášku a tím ke snižování porem. Po určité prodlevě dochází k dalšímu ohřívání a po překročení eutektické teploty začíná proces zvaný slinování v tekutém stavu. Kovové pojivo se roztaví a rozpustí se v něm velké množství karbidů. Velká zrna karbidů, která nebyla rozpuštěna, začínají rychle růst na úkor zrn menších. Současně dochází ke změně jejich tvaru. Setrvání na nejvyšší teplotě musí být dostatečně velké, aby došlo k úplnému zhuštění struktury, ale zároveň musí být co nejkratší, aby nedošlo k příliš velkému zhrubnutí zrn karbidů, které by způsobilo zhoršení mechanických vlastností.^{4,17,31}



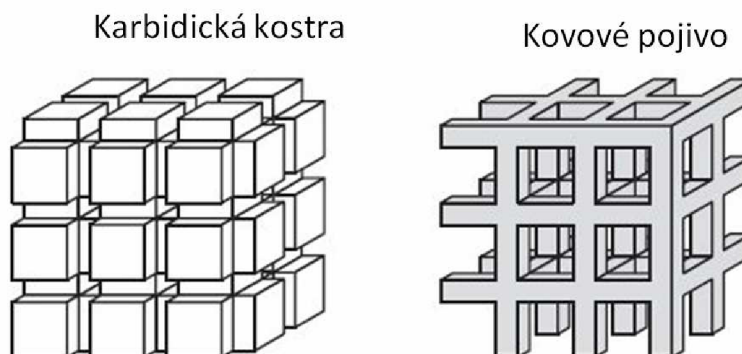
Obr. 2.7 Průběh slinování⁴

2.2.4 Tvarování polotovarů

Břítové destičky mohou získat konečnou podobu různými metodami úprav, které se volí podle oblasti použití destiček. Nejčastějšími metodami jsou broušení a kartáčování. Kartáčováním se docílí zaoblení a stabilizace ostří břítových destiček. Broušením se obvykle upravují destičky pro frézování, protože mají vysoké požadavky na rovinnost dosedacích ploch a vyžadují nabroušenou fazetku na břitu. Naproti tomu tvar fazetky a utvařečů třísky u destiček pro soustružení byl vytvořen již během lisování. Proto se tyto destičky neupravují.³¹

2.3 Struktura slinutých karbidů

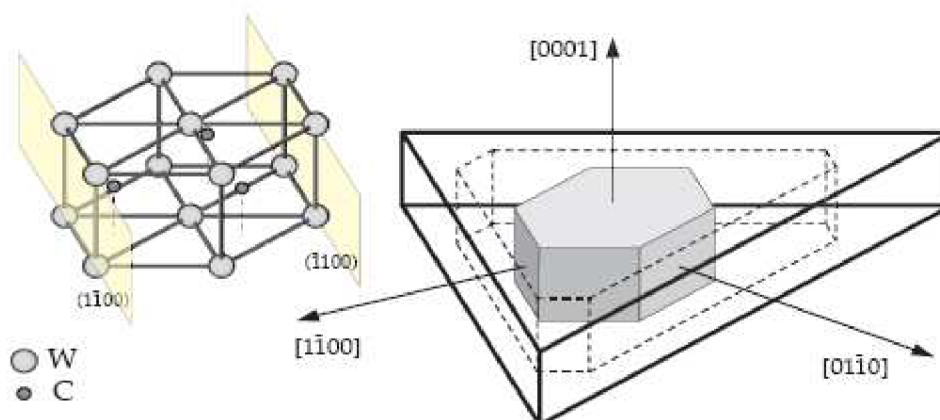
Slinuté karbidy užívané pro výrobu řezných nástrojů se skládají převážně z karbidických částic a menšího množství kovového pojiva. Jestliže je poměr mezi množstvím karbidů a pojivem dostatečně velký, mohou karbidy tvořit celistvou strukturu nazývanou karbidická kostra (nejméně při 80% objemu). Při menším objemu karbidické fáze se struktura skládá ze samostatných zrn zcela obklopených kovovým pojivem. Pojivo pak tvoří celistvou síťovou strukturu. Spojení karbidické fáze a pojiva je schematicky znázorněno na obr. 2.8.⁴



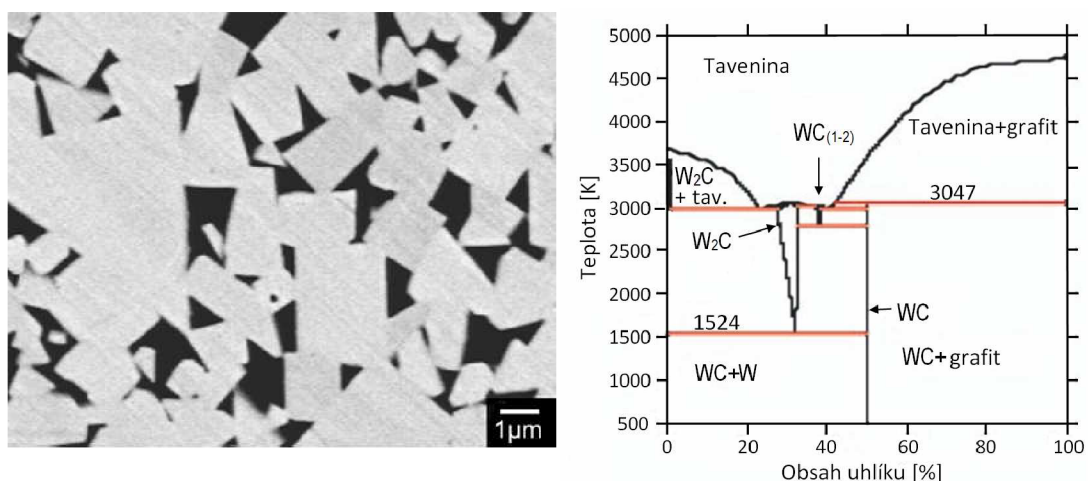
Obr. 2.8 Spojení karbidické kostry SK kovovým pojivem⁴

2.3.1 Fáze WC

WC byl prvním karbidem, který byl použit jako tvrdá fáze pro výrobu slinutých karbidů. Krystalová mřížka WC je hexagonální (obr. 2.9), ale při dostatečně dlouhém růstu zrna v podmínkách zahrnujících vysoký obsah pojiva a dostatečnou aktivitu uhlíku bychom získali rovnovážný tvar krystalu, kterým je trojboký hranol. Buss⁴ tuto skutečnost vysvětluje přednostním růstem zrna ve třech směrech (obr. 2.9), což je způsobeno různou velikostí intersticiálních dutin. Růst zrna v rovinách, které procházejí většími dutinami, je potlačován. Růst zrna tímto způsobem je ovšem silně ovlivněn obsahem uhlíku. Dalším důvodem, proč obvykle nebývá rovnovážného stavu dosaženo, je působení ostatních zrn, které tento proces znemožní.^{4,14}

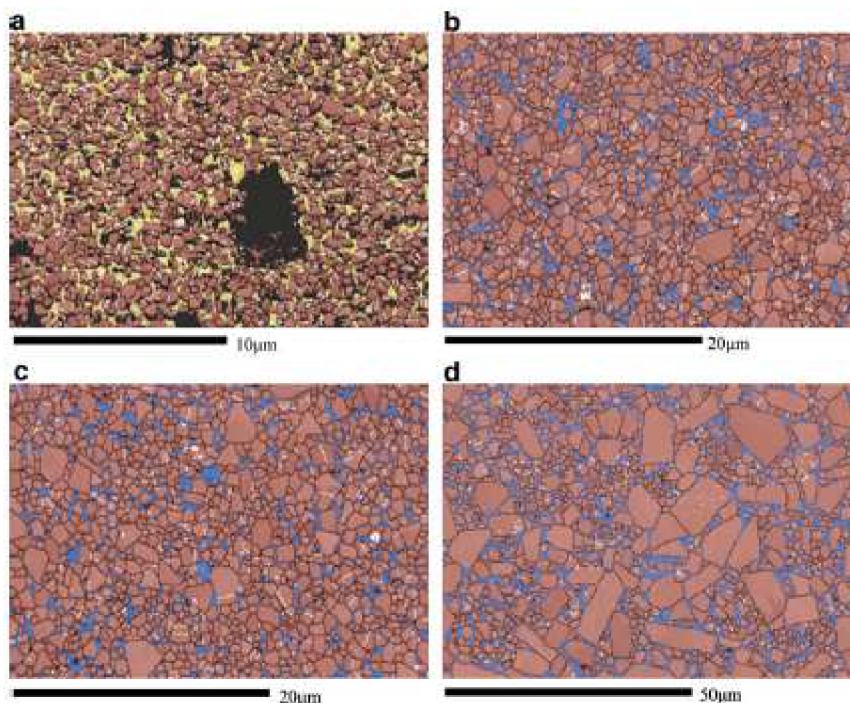


Obr. 2.9 Hexagonální mřížka WC a růst zrna WC za ideálních podmínek⁴



Obr. 2.10 Vlevo mikrostruktura WC-Co¹⁴, vpravo binární fázový diagram W-C⁴

Fáze WC existuje pouze ve velmi úzké oblasti binárního fázového diagramu W-C (obr. 2.10) a vývoj struktury WC-Co je silně ovlivněn aktivitou uhlíku. Nedostatek uhlíku vede ke vzniku fáze eta a jeho přebytek způsobí přítomnost grafitu. Obě tyto fáze zhoršují mechanické vlastnosti výsledného SK. Během slinování se zrna WC rozpouštějí a probíhá precipitace, což vede ke zmenšování počtu zrn a k jejich růstu (obr. 2.11), což je další příčinou zhoršení mechanických vlastností. Část WC je také rozpuštěna v pojivu. Růst velikosti zrna může být omezen přidáním inhibitorů, např. W, Cr, Ta nebo NbC.^{4,14,16}



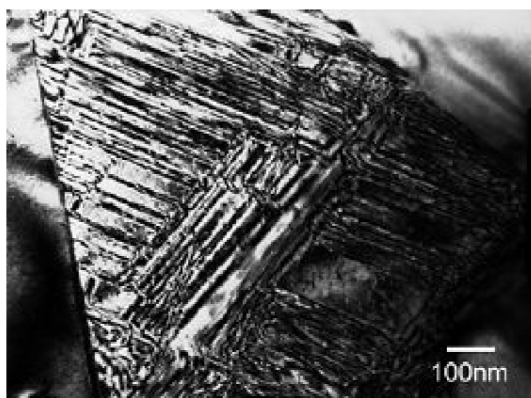
Obr. 2.11 Mikrostruktura WC-10%Co zobrazená metodou EBSD (zrna WC červeně, pojivo modře), (a) prášek po mletí, Co zobrazen žlutě, (b) slinováno 15 min, (c) 1 hodinu, (d) 8 hodin²⁷

2.3.2 Pojivo

Pojivo dodává SK houževnatost a spojuje tvrdé karbidické částice. Skládá se převážně z kobaltu a malého množství wolframu, který byl rozpuštěn v kobaltu během slinování. Bylo učiněno mnoho pokusů ve snaze najít alternativní kovové pojivo. Jedním z mála úspěchů bylo objevení pojiva na bázi niklu, které může být použito při výrobě kubických karbidů. Alternativní kovová pojiva se v praxi téměř nevyskytují a proto se jimi nebudeme dále zabývat.^{4,14}

Stabilní konfigurací kobaltu je při teplotách nad 418 °C hexagonální mřížka (hcp) a při teplotách nižších mřížka kubická plošně středěná (fcc). V důsledku rozpuštění částic W při slinování se však mřížka fcc stabilizuje a zůstává zachována i po ochlazení. I přes stabilizaci wolframem se kobalt snaží dosáhnout hexagonální struktury, což dokazuje přítomnost četných vrstevných poruch v kobaltové struktuře (obr. 2.12).^{4,14,17}

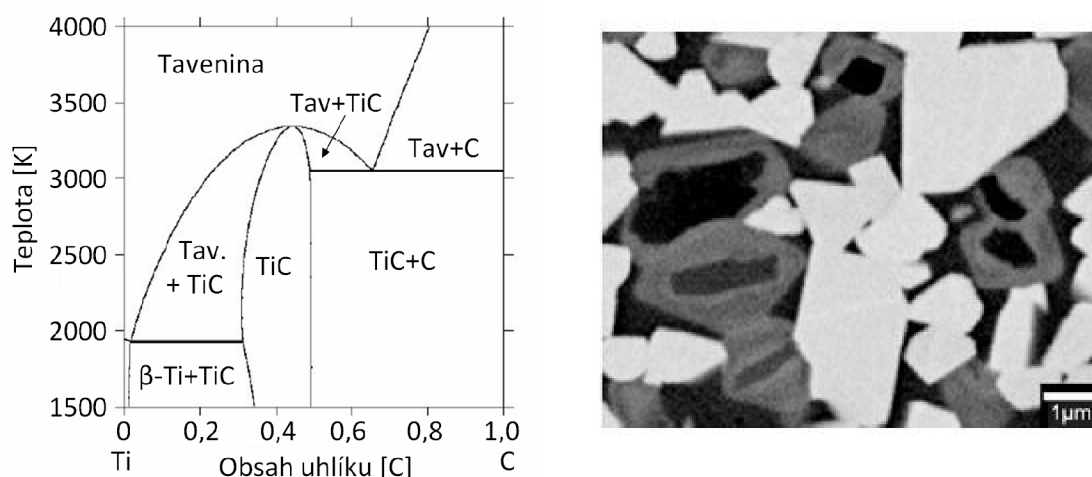
Jak už bylo řečeno, při slinování se v pojivu rozpouštějí částice tuhých fází. Množství rozpuštěných částic může být ovlivněno aktivitou uhlíku nebo dusíku. Při ochlazování ale dochází ke snížení rozpustnosti a tyto částice jsou vylučovány na hranicích zrn tuhých fází. Po skončení slinování proto můžeme pozorovat wolframovou vrstvu o tloušťce asi 50 nm na rozhraní zrn WC a pojiva.¹⁴



Obr. 2.12 Vrstevné chyby v kobaltovém pojivu^{14,17}

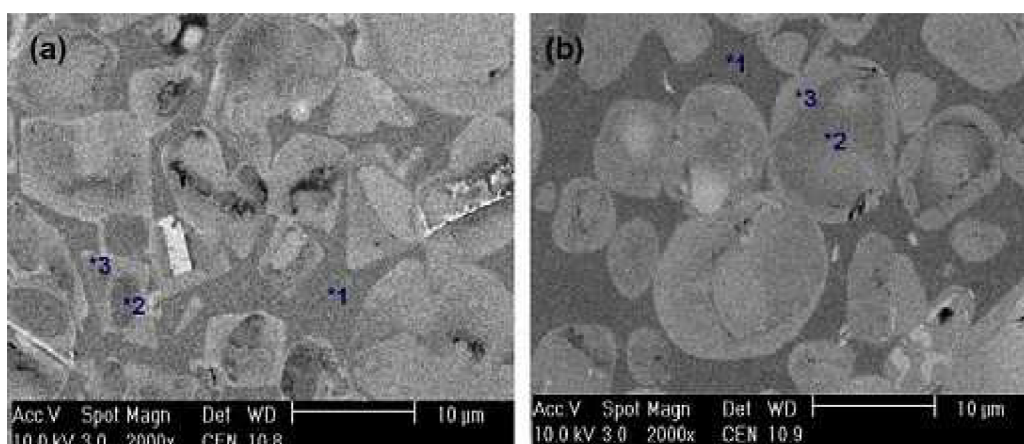
2.3.3 Kubická fáze

Kubická fáze je další tvrdou fází ve slinutých karbidech. Jedná se o směs různých karbidů nebo karbonitridů majících kubickou mřížku (typ NaCl). Obsah kovů v této struktuře bývá různý, ale obvykle obsahují Ti, Nb, Ta nebo W. Tyto kubické fáze se nevyskytují v tak úzké oblasti fázového diagramu jako WC, ale jejich oblast výskytu bývá větší. Jako příklad si můžeme uvést binární rovnovážný diagram Ti-C (obr. 2.13).¹⁴



Obr. 2.13 Vlevo fázový diagram Ti-C^{14,17}, vpravo kubická fáze SK: tmavá zrna nerozpuštěného Ti(C,N) obalená (Ti,W)(C,N)¹⁴

Kubická fáze je tvrdší, ale mnohem křehčí než WC z důvodu slabších vazeb s pojivem. Zrna této fáze se skládají ze dvou částí – jádra a pláště. Jádro je tvořeno zbytkem původního prášku, který nebyl rozpuštěn během slinování, zatímco plášť byl vytvořen kolem jádra při slinování během precipitace (obr. 2.13; 2.14; tab. 2.5).¹⁴



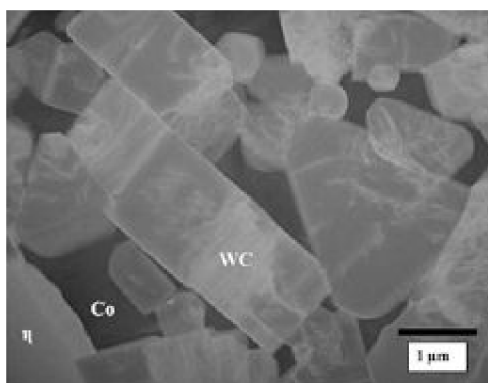
Obr. 2.14 SK se stejnou kubickou fází, ale jiným pojivem:
(a) (W,Ti)C-25% Co, (b) (W,Ti)C-25% Ni⁶

Tab. 2.5 Složení oblastí ve SK s kubickou fází (na obr. 2.14)⁶

Materiál	(a) (W,Ti)C-Co				(b) (W,Ti)C-Ni			
	W [%]	Ti [%]	C [%]	Co [%]	W [%]	Ti [%]	C [%]	Ni [%]
Pojivo (bod 1)	4,30	1,42	-	94,28	-	8,41	-	91,56
Jádro (bod 2)	33,17	55,03	11,80	-	34,61	49,04	16,35	-
Plášť (bod 3)	28,00	50,40	3,96	17,64	25,67	40,60	1,73	31,00

2.3.4 Fáze eta

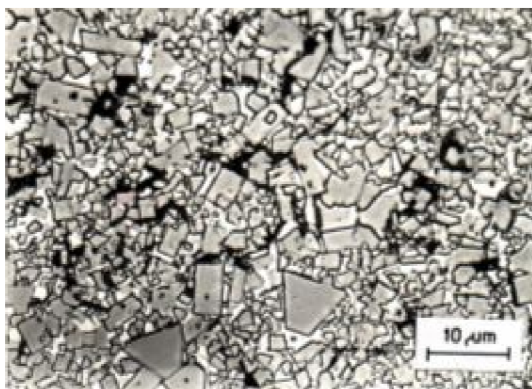
Fáze η (eta) je komplexní karbidickou fází s chemickým vzorcem $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$. Vzniká ve slinutém karbidu typu během slinování jako důsledek velkého nedostatku uhlíku (obr. 2.15). Přestože je pro svou vysokou křehkost v běžném SK nežádoucí, její využití je jednou z mála možností, jak vyrobit FGSK s opačným gradientem (kap. 3.2.1). Tato fáze se dá odstranit zvýšením obsahu uhlíku v práškové směsi.^{3,11,17,23}



Obr. 2.15 Fáze eta ve struktuře SK s 5,79% C po 1 hodině slinování na 1380 °C²²

2.3.5 Grafit

Grafit vzniká ve SK jako důsledek nadbytku uhlíku (obr. 2.16). Zhoršuje mechanické vlastnosti a může způsobovat pórovitost. Jeho přítomnost se dá odstranit regulováním obsahu uhlíku v práškové směsi.¹⁷

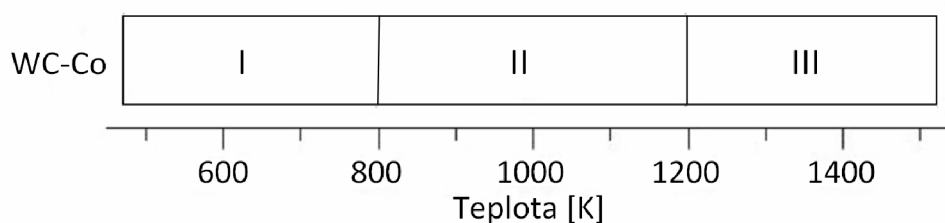


Obr. 2.16 Struktura SK typu WC-Co s hrubým zrnem a volným uhlíkem¹⁷

2.4 Vlastnosti slinutých karbidů

SK se skládají z několika složek, které mají rozdílné mechanické i fyzikální vlastnosti. Změnou jejich poměru ve výsledné struktuře se tedy mění vlastnosti celého slinutého materiálu. Dalšími jevy, které jeho vlastnosti ovlivňují, jsou zrnitost tvrdé fáze, proces slinování a především teplota.

Pro lepší popis vlastností bylo deformační chování materiálů na bázi WC-Co rozděleno do tří teplotních oblastí (obr. 2.17). V první oblasti (do 800 K) se materiály deformují elasticky a vyznačují se křehkým lomem. Druhá oblast (mezi 800 a 1200 K) se vyznačuje plastickou deformací pojiva. Přestože v této oblasti můžeme pozorovat také vznik dislokací v některých zrnech WC, tvrdá fáze se prakticky nedeformuje. Ve třetí oblasti (nad 1200 K) potom dochází k intenzivnímu creepu.⁴



Obr. 2.17 Tři teplotní oblasti charakterizující deformační chování SK na bázi WC-Co⁴

2.4.1 Tvrdost

Jednou z nejdůležitějších mechanických vlastností SK je jejich tvrdost. Jejím hlavním nositelem je WC, proto je u těchto materiálů úzká souvislost mezi obsahem Co a tvrdostí. Se stoupajícím obsahem kobaltu se tvrdost SK zmenšuje. Kromě složení na ni má vliv také velikost zrna karbidické fáze – se vzrůstající zrnitostí se tvrdost snižuje.

Tvrdost SK je mnohem větší než u rychlořezných ocelí. U běžných SK dosahuje hodnot 780–1850 HV (80–93,6 HRA), ale u moderních nanostrukturálních SK může být mnohem vyšší než 2000HV. S narůstající teplotou tvrdost SK rychle klesá, ale přesto zůstává v oblasti pracovních teplot mnohem vyšší, než je tvrdost rychlořezných ocelí.^{7,17}

2.4.2 Pevnost

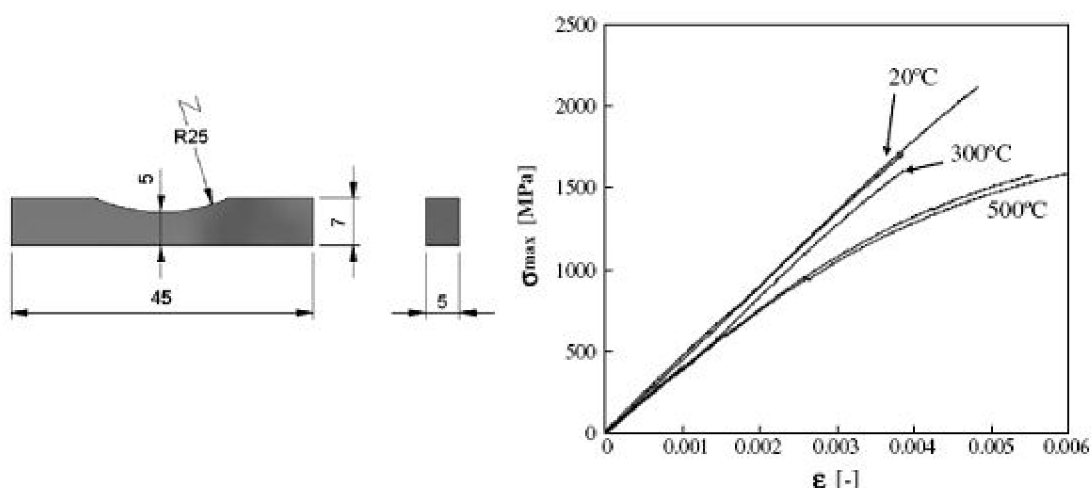
Pevnost patří mezi nejčastěji uváděné hodnoty mechanických vlastností SK. Obvykle se však jedná o pevnost v ohybu, protože zjišťování pevnosti v tahu a tlaku je mnohem obtížnější. Obecně však můžeme říci, že pevnost v tlaku dosahuje pouze asi 40 až 60% pevnosti v ohybu (která se u dnešních materiálů pohybuje v rozsahu 2000–4700 MPa). Hodnota pevnosti v tlaku je naopak vyšší a dosahuje hodnot 3000–6200 MPa. S rostoucím obsahem pojiva hodnota pevnosti v ohybu a v tahu roste, ale pevnost v tlaku klesá.^{7,17}

Ferreira a kol.¹² provedli zkoušky mechanických vlastností dvou SK uvedených v tab. 2.6. Materiály byly zkoušeny za pokojové i zvýšené teploty a lomové plochy byly zkoumány elektronovým mikroskopem pro zjištění mechanismů poruch. K určení hodnot pevnosti v ohybu byl použit zkušební vzorek s definovanou geometrií běžně užívaný pro zkoušení SK (obr. 2.18).

Tab. 2.6 Složení a vlastnosti materiálů testovaných Ferreirou¹²

Materiál	Co [%]	HV ₃₀	Zrnitost [μm]	Teplota [°C]	σ _{max} [MPa]	σ _{průměrné} [MPa]
1	5	1889	0,5	20	1654, 1443, 1563, 1650, 1306	1523
				500	1517, 1422, 1458	1466
2	15	874	1,0	20	2114, 1710	1912
				300	2022, 1604	1813
				500	1584, 1577	1581

Získané hodnoty byly zakresleny do napětového diagramu (obr. 2.18). Křivky se nacházely poblíž sebe a vykazovaly lineární průběh charakterizující křehký lom. Při teplotě 500 °C však byl pozorován přechod k plastickému chování potvrzující blízkost rozhraní oblastí I a II na obr. 2.17. Získané hodnoty shrnuté v tab. 2.6 ukazují velký rozptyl hodnot pevnosti při teplotě 20 °C, což dokazuje velkou citlivost vzorku způsobenou odchylkami od ideální mikrostruktury vzniklými během slinování. Se zvyšující se teplotou můžeme pozorovat zvyšující se pevnost a menší rozptyl hodnot. Tuto skutečnost můžeme vysvětlit zvyšující se houževnatostí pojiva.¹²

Obr. 2.18 Geometrie zkušebního tělesa a napětový diagram vzorku z materiálu 2¹²

2.4.3 Lomová houževnatost

Lomová houževnatost K_{IC} je definována jako kritická hodnota součinitele intenzity napětí v okamžiku nestabilního šíření trhliny a je mírou odolnosti tělesa s definovanou trhlinou proti porušení. Její hodnota roste s rostoucím obsahem kobaltu a s rostoucí velikostí zrn WC (tab. 2.7).¹⁷

Tab. 2.7 K_{IC} pro různý obsah Co a různou hodnotu zrnitosti SK typu WC-Co¹⁵

Střední velikost zrna [μm]	Co [%]					
	6	8	10	12	15	20
2,0	11,33	12,89	14,31	15,63	17,51	20,45
2,5	12,43	14,17	15,76	17,24	19,33	22,63
3,0	13,43	15,33	17,07	18,69	20,99	24,60
3,5	14,34	16,40	18,27	20,03	22,51	26,40

Protože je opotřebení nástrojů ze SK způsobeno hlavně lomy v povrchových vrstvách, musí být kontrolována především houževnatost povrchu. Pro zjištění houževnatosti se proto používá jednoduchá vtisková zkouška využívající hodnot získaných při Vickersově zkoušce tvrdosti. Hodnota K_{IC} se získá dosazením těchto hodnot do vztahu¹⁷

$$K_{IC} = \frac{0,203 \cdot HV \cdot \left(\frac{u}{2}\right)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{c}{u}\right)^{\frac{3}{2}}} [MPa \cdot m^{1/2}] \quad (2.1)$$

kde HV [MPa] je tvrdost, u [m] délka úhlopříčky vtisku, c [m] celková délka trhlin vycházejících ze čtvercového vtisku.^{12,17}

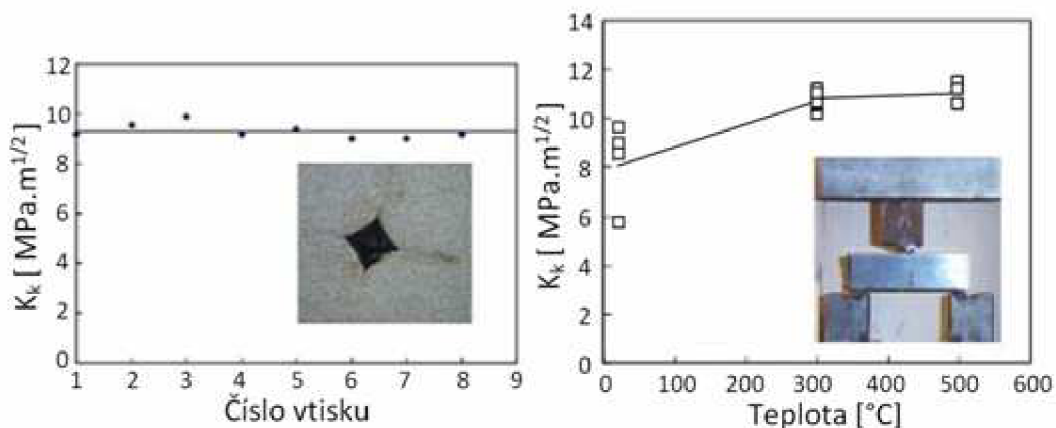
Lomová houževnatost materiálu 1 (tab. 2.6) byla zjišťována touto technikou. Povrch vzorku byl vyleštěn a zatížen silou 30 kp, ale Ferreira použil ke zjištění hodnoty K_{IC} vzorec¹²

$$K_{IC} = 0,0889 \cdot \sqrt{\frac{HV \cdot F}{c}} [MPa \cdot m^{1/2}] \quad (2.2)$$

kde HV [MPa] je tvrdost, F [N] zatěžující síla, c [m] celková délka trhlin.¹²

Obr. 2.19 vlevo ukazuje výsledky této zkoušky a obsahuje též fotografii typického vtisku. Průměrná hodnota K_{IC} je 9,3 MPa m^{1/2} a variační koeficient 3,2%.

Vtisková zkouška byla provedena i na materiálu 2, ale vzhledem k vysokému obsahu kobaltu nebyly pozorovány žádné trhliny v rozích vtisku. Proto musela být hodnota K_{IC} určena pomocí třibodového ohybu. Na obr. 2.19 můžeme vidět výsledky této zkoušky. Z grafu je zřejmé, že se zvyšující se teplotou se zvyšuje i hodnota houževnatosti.¹²



Obr. 2.19 Vlevo K_{IC} materiálu 1 pro různé vtisky, vpravo závislost K_{IC} materiálu 2 na teplotě¹²

2.4.4 Délková roztažnost

Délková roztažnost má vliv na odolnost SK proti teplotním rázům, kdy vzniká opotřebení projevující se vznikem trhlinek v místě styku třísky a nástroje. Tento druh opotřebení vzniká při obrábění přerušovaným řezem.

Součinitel délkové roztažnosti závisí na obsahu kobaltu – při jeho zvýšení ze 3 na 30% se téměř zdvojnásobí. Konkrétní hodnoty se pohybují v rozmezí $3,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ až $7,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a jsou tedy zhruba poloviční než u ocelí, kde dosahují hodnoty $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.^{7,17}

2.4.5 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost má podobně jako délková roztažnost podstatný vliv na odolnost břitu proti opotřebení. SK s menší tepelnou vodivostí jsou mnohem citlivější k rychlému a nerovnoměrnému ohřevu a ochlazování. Tato vlastnost se projevuje vznikem trhlinek a opotřebením čela nástroje při přerušovaném řezu při soustružení, frézování apod.⁷

U běžně používaných SK je tep. vodivost závislá na obsahu Co jen velmi málo a pohybuje se v rozmezí $50\text{--}105 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Její hodnota klesá s narůstající teplotou a vyšší hodnoty mají materiály s hrubším zrnem.¹⁷

3 FUNKČNĚ GRADIENTNÍ SLINUTÉ KARBIDY

Nástroje ze slinutých karbidů pro řezné operace by měly vynikat vysokou tvrdostí i vysokou houževnatostí. Jak už bylo řečeno, tyto vlastnosti jsou protichůdné – tvrdost je možné zvýšit na úkor snížení houževnatosti a naopak. Tento problém se dá vyřešit tak, že se vyrobí nástroj s tenkou povrchovou vrstvou, která má vysokou tvrdost a tím také vysokou odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Pod touto povrchovou vrstvou se pak nachází vrstva se zvýšenou houževnatostí. Pokud je přechod mezi těmito oblastmi postupný, jedná se o funkčně gradientní slinutý karbid (FGSK).^{3,17}

Tohoto cíle se dá dosáhnout přizpůsobením mikrostruktury slinutého karbidu tak, že se změní velikost zrna nebo obsah pojiva. Dnes se v průmyslové praxi přizpůsobuje mikrostruktura především pomocí změny obsahu pojiva a vliv velikosti zrna je považován za sekundární.^{3,17}

Funkčně gradientní slinuté karbidy můžeme rozdělit do dvou skupin. První z nich se vyznačuje povrchovou vrstvou o tloušťce až 25 μm , ve které je zvýšen obsah pojiva a má tedy vyšší houževnatost než zbývající objem materiálu. Tato skupina SK je vhodná pro povlakování. U druhé skupiny je v povrchové vrstvě obsah pojiva snížen, čímž je zvýšena tvrdost a odolnost proti opotřebení. Povrchová vrstva u této skupiny má tloušťku až 2 mm. SK s tímto druhem povrchové vrstvy obvykle povlakovány nebývají.^{3,14,17,23}

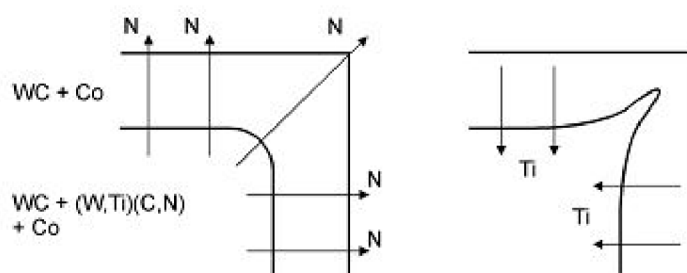
3.1 SK se zvýšeným obsahem pojiva v povrchové vrstvě

Aby se zvýšila trvanlivost a řezný výkon nástrojů ze SK, bývá na tyto nástroje nanášena tvrdá povrchová vrstva různých sloučenin, nejčastěji TiN, TiC nebo Al_2O_3 . Aplikace povlaků je nejčastěji prováděna vysokoteplotní CVD (Chemical Vapour Deposition – chemické napařování) metodou. Během ochlazování po skončení tohoto procesu se v povrchové vrstvě vytvářejí mikrotrhliny, které se při obrábění rozšiřují a zvyšují riziko destrukce nástroje.

Jednou z možností, jak snížit riziko tvorby trhlin, je zvýšení houževnatosti substrátu. Běžný podklad SK obsahuje zrna WC, zrna komplexních kubických karbidů a kovové pojivo, kterým bývá kobalt. Houževnatost povrchové vrstvy se zvýší tak, že se v ní zvýší obsah pojiva a sníží obsah zrn karbidů. Proces, kterým dochází ke tvorbě takovéto vrstvy, se nazývá gradientní slinování a může mít několik variant.^{14,17}

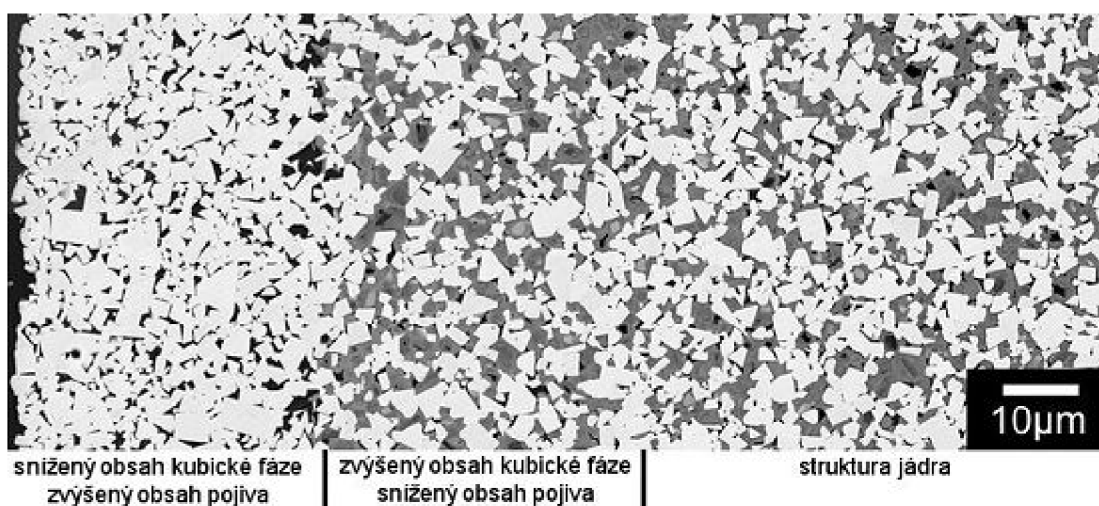
3.1.1 Slinování za denitračních podmínek

Tento proces je možné aplikovat na SK, které obsahují TiN nebo Ti(C,N). Slinování probíhá v atmosféře s mnohem nižším obsahem dusíku než ve slinovaném materiálu. Proto má atmosféra nižší aktivitu N_2 než tento materiál a v roztaveném pojivu je vytvořen gradient aktivity dusíku. V pojivu tedy začne probíhat vnější difuze dusíku (ven z materiálu) a v povrchové vrstvě substrátu začne být jeho nedostatek. V důsledku silné termodynamické vazby mezi dusíkem a titanem začne titan difundovat dovnitř materiálu. Výsledkem je vznik povrchové vrstvy se strukturou tvořenou WC-Co bez kubických karbidů. Proces je znázorněn na obr. 3.1.^{14,17}



Obr. 3.1 Difuze Ti a N při slinování: vnější difuze N způsobí vnitřní difuzi Ti^{14,17}

Struktura gradientních SK vyrobených pomocí vnější difuze dusíku může být rozdělena na tři části (Obr. 3.2). První vrstva má snížený obsah kubických karbidů a zvýšený obsah pojiva. Druhá vrstva je naopak obohacena o kubické karbidy a je v ní snížen obsah pojiva. Třetí oblast zahrnuje zbytek materiálu, který nebyl zasažen difuzí dusíku a titanu. Je v ní přesně definován podíl všech tří fází.^{14,17}



Obr. 3.2 Struktura povrchové vrstvy gradientně slinovaného SK^{14,17}

3.1.2 Vakuové slinování

Podobnou strukturu jako na obr. 3.2, tedy gradientní strukturu s povrchovou vrstvou bez kubických karbidů, lze vytvořit také vakuovým slinováním bez přítomnosti dusíku. Podmínkou je dlouhá výdrž na maximální slinovací teplotě. Příčinou vzniku gradientní struktury je v tomto případě vnitřní difuze titanu, která závisí na jeho rozpustnosti v roztaveném pojivu. Tento proces je vhodnější pro materiály s přísadou TiC. V materiálech s přísadou (W,Ti)C probíhá vznik povrchové vrstvy pomaleji.¹⁷

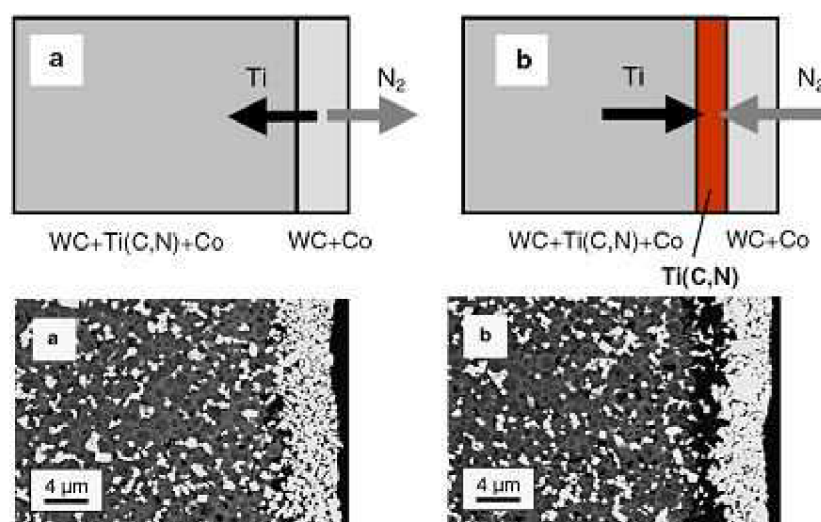
3.1.3 Metoda pórovitých dílců

Jedná se o metodu užívanou při výrobě gradientních SK na bázi WC-TiC-TaC-Co, které mají povrchovou vrstvou bez kubických karbidů. Metoda je založena na tvorbě pórovitých dílců – povrchové vrstvy s vysokým podílem dusíku,

čehož se dosahuje během slinování několikahodinovou výdrží na teplotě blízké teplotě likvidu v prostředí o vysokém tlaku dusíku. Následně je dusík odčerpán, teplota se zvýší a v důsledku vnější difuze dusíku začne probíhat vnější difuze titanu jako u předchozích metod.¹⁷

3.1.4 Gradientní SK s difuzní vrstvou Ti(C,N)

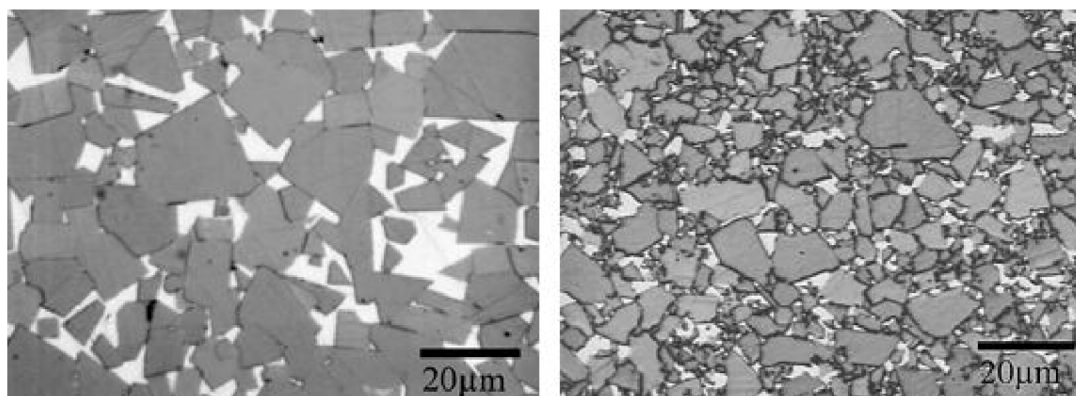
Tyto SK se vyrábějí dvoustupňově. Nejdříve je výchozí materiál slinován tak, aby se vytvořila vnější vrstva se sníženým obsahem dusíku – dojde k vnější difuzi dusíku a vnitřní difuzi titanu. Následuje druhý stupeň, kdy je snížena teplota a zvýšen tlak dusíku v okolní atmosféře. Důsledkem je opačný proces difuze než v prvním stupni – dusík difunduje do materiálu a titan ven z materiálu, ale vrstva WC-Co mu znemožní difundovat až k povrchu. Mezi vrstvou WC-Co a vrstvou jádra se tedy vytvoří mezivrstva Ti(C,N). Proces je znázorněn na obr. 3.3.^{17,25}



Obr. 3.3 Proces difuze při slinování a mikrostruktura gradientních SK s difuzní vrstvou Ti(C,N)^{17,25}

3.1.5 Metoda řízeného oduhličování

Vliv uhlíku na zrnitost fáze WC byl pozorován už při výrobě SK bez gradientní struktury. Na obr. 3.4 můžeme vidět mikrostruktury dvou SK, které dobře ilustrují potlačení zrnitosti fáze WC ve SK s nižším obsahem uhlíku (vpravo) ve srovnání se vzorkem s vyšším obsahem uhlíku (vlevo).²³



Obr. 3.4 Mikrostruktura SK obsahujících 6,5 % Co připravovaných a slinovaných za stejných podmínek (1420 °C po 75 min). SK vlevo obsahuje 6,11 % C, SK vpravo 5,99 % C²³

Konyashin a kol.²³ vyvinuli novou metodu výroby FGSK, když využili mechanismů používaných při slinování SK s opačným gradientem, (SK se sníženým obsahem pojiva v povrchové vrstvě):

- Kobalt proudí z místa s vyšším obsahem uhlíku do místa s nižším obsahem uhlíku.
- V důsledku rozdílných kapilárních sil proudí kobalt z míst s hrubším zrnem do míst s jemnějším zrnem.

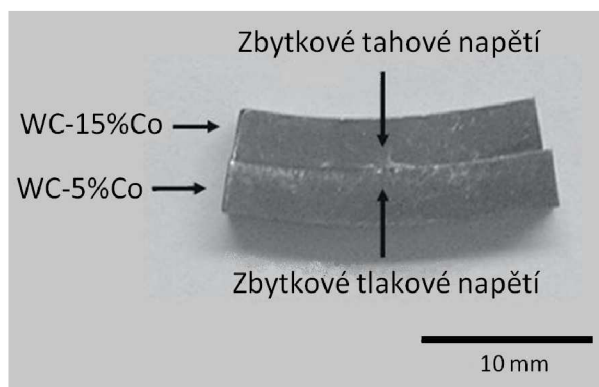
Připravili směs s vysokým obsahem uhlíku (6,11%). Po slisování proběhlo předslinování v tuhém stavu v inertní atmosféře nebo ve vakuu. Povrchová vrstva musela být po předslinování dostatečně porézní, aby byla propustná pro okolní atmosféru jen do hloubky, která je nutná pro vytvoření gradientu. Poté proběhla další fáze předslinování v dekarburizační atmosféře (vodíkové), kdy byla povrchová vrstva oduhličena. Nakonec proběhlo vlastní slinování za vysokého tlaku, aby byla odstraněna porezita. V důsledku slinování nad teplotu likvidu proudil kobalt z jádra s vysokým obsahem uhlíku do povrchové vrstvy s nízkým obsahem uhlíku. V jádře došlo k většímu zhrubnutí zrna a rozdílná hodnota kapilárních sil podpořila přesun kobaltu z jádra.

Po dosažení rovnovážného stavu vznikl FGSK s povrchovou vrstvou s vysokým obsahem kobaltu, malou zrnitostí a vysokou houževnatostí.

3.2 SK se sníženým obsahem pojiva v povrchové vrstvě

Jestliže jsou vyrobeny SK s povrchovou vrstvou, kde je obsah kobaltu nižší než je jeho průměrná hodnota, bude mít tato vrstva vyšší tvrdost vedoucí k vyšší odolnosti proti opotřebení. Dalo by se očekávat, že zvýšení tvrdosti bude mít za následek snížení houževnatosti, ale skutečnost je poněkud jiná – houževnatost této vrstvy bude dostatečně vysoká. Tento jev můžeme zdůvodnit pomocí obr. 3.5, na kterém je vidět vzorek vzniklý slisováním dvou směsí prášků s různým obsahem kobaltu a následným slinováním. Vzorek se po slinování ohnul, což je způsobeno rozdílným smrštěním SK po slinování – část s vyšším obsahem kobaltu se smršťuje mnohem víc než část, kde je obsah kobaltu nižší. Rozdílné smrštění způsobí v části s nižším obsahem kobaltu vy-

soké tlakové pnutí, které má za následek podstatné zvýšení houževnatosti v této části.²³

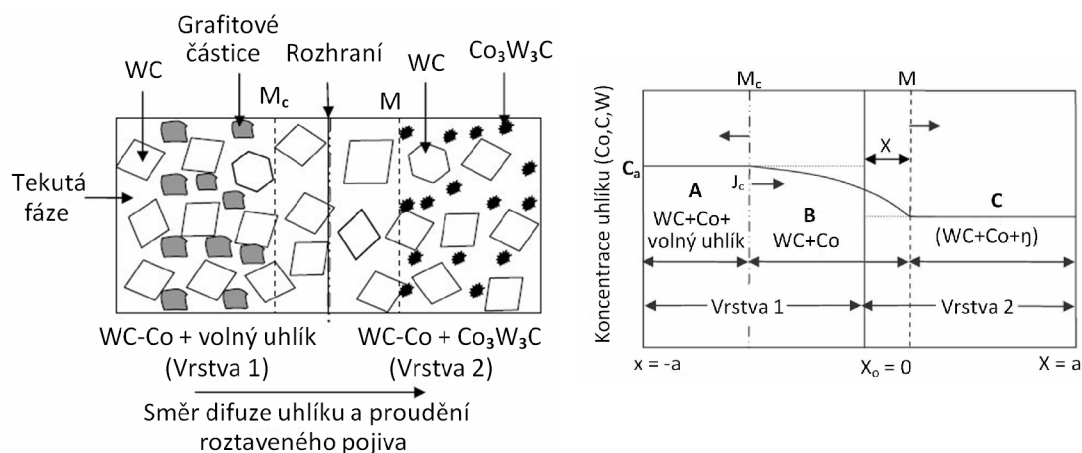


Obr. 3.5 Zbytkové napětí ve vzorku vzniklém slisováním dvou směsí prášků s různým obsahem kobaltu po slinování na 1420 °C trvající 75 minut²³

Protože se tyto gradientní SK vyznačují vysokou odolností proti opotřebení a zároveň vysokou houževnatostí, mohou z nich být vyrobeny moderní nástroje pro vrtání a řezání kamene nebo frézování betonu a asfaltu.²⁶

3.2.1 Dvoufázové slinuté karbidy

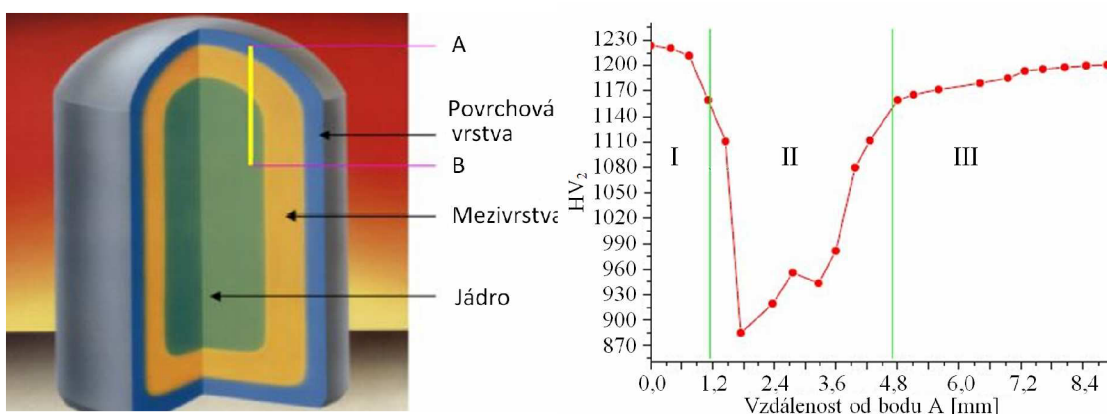
Vznik kobaltového gradientu u dvoufázových SK je znázorněn na obr. 3.6. Vzorek tvoří dvojvrstva vzniklá nalisováním vrstvy WC-Co s přebytkem uhlíku na jinou vrstvu WC-Co, která má uhlíku nedostatek a obsahuje fázi eta. Během slinování v tekutém stavu se grafitové částičky rozpouštějí na pohyblivé hranici M_c ve vrstvě 1, rozpuštěný uhlík difunduje tekutou fází a reaguje s částicemi fáze eta na pohyblivé hranici M (M_η) za vzniku kobaltu, čímž se mění složení tekuté fáze, která proudí ve stejném směru jako je difunduje uhlík (od povrchu k jádru). Tento proces vyvolá ve vzorku gradientní strukturu, která je však nerovnovážná – pokud by proces mohl probíhat dostatečně dlouho, aby byla dosažena rovnováha, gradientní struktura by zanikla a vznikl by homogenní materiál.^{11,23}



Obr. 3.6 Schematické znázornění vzniku gradientu ve WC-Co dvojvrstvě^{3,11}

Mikrostruktura dvoufázového SK se skládá ze tří oblastí: Vrchní vrstva s nízkým obsahem Co, která neobsahuje volný uhlík ani fázi eta. Následuje mezivrstva s vysokým obsahem Co, ale bez přítomnosti fáze eta. Třetí oblast je jádro, které obsahuje velké množství eta fáze. Vrchní vrstva se vyznačuje vysokou tvrdostí a houževnatostí. Nevýhodami takto vyrobených FGSK je příliš měkká mezivrstva a velmi křehké jádro obsahující velké množství eta fáze, kterou není možné odstranit.²³

Li a kol.²⁶ zkoumali mechanické vlastnosti takto připravených FGSK. Vyrobili zkušební válečky o průměru 25 mm a výšce 34 mm (obr. 3.7) ze směsi WC a 6% Co. Po slinování obdrželi strukturu se zrnitostí horní a střední vrstvy 6,5 μm a se zrnitostí jádra 5 μm . Podél přímky AB na obr. 3.7 vlevo byla měřena tvrdost podle Vickerse se zatížením 19,6 N (HV2). Obdržené hodnoty byly zaneseny do grafu v pravé části obr. 3.7.



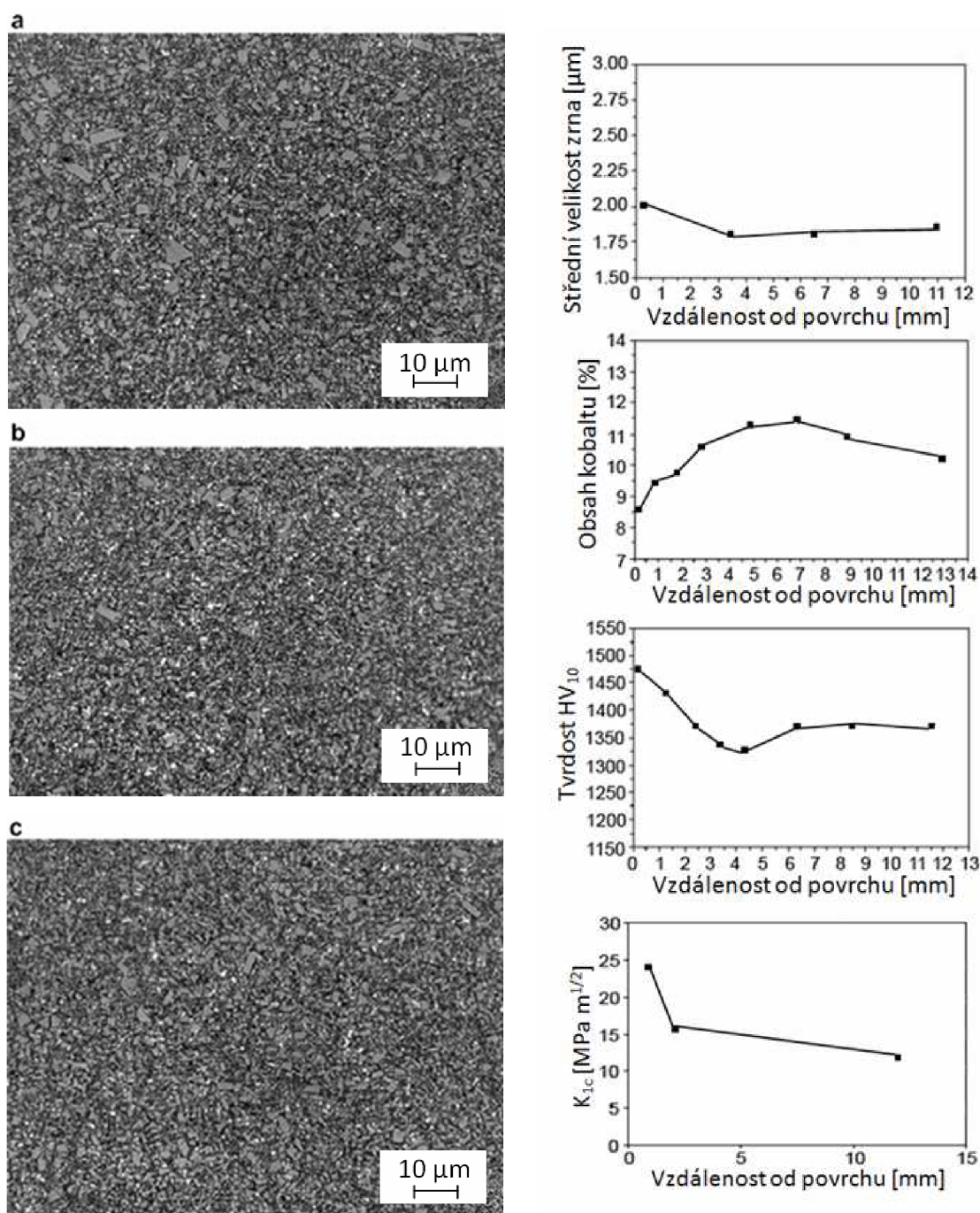
Obr. 3.7 Schéma pokusného vzorku dvoufázového SK a tvrdost podle Vickerse v závislosti na vzdálenosti od bodu A²⁶

3.2.2 Metoda řízeného nauhličování

Jedná se o převratnou metodu při výrobě FGSK se sníženým obsahem pojiva v povrchové vrstvě (obr. 3.8), protože k vytvoření gradientu nevyužívá inhibitory růstu zrna ani fázi eta. Jejimi autory jsou Konyashin a kol.²³

Metoda využívá stejných postupů jako metoda uvedená v kap. 3.1.5, ale podmínky musí být upraveny, aby se dosáhlo opačného výsledku: Je připravena směs s nízkým obsahem uhlíku, po slinování následuje předslinování pro získání požadované porezity a následně je povrchová vrstva nauhličena v karburizační atmosféře (vodíko-metanová). Při slinování je obsah pojiva v povrchové vrstvě snížen v důsledku rozdílného obsahu uhlíku a kapilárních sil.²³

Metoda řízeného nauhličování je velice perspektivní pro výrobu FGSK s vysokou tvrdostí i houževnatostí.



Obr. 3.8 Mikrostruktura směsi s nízkým obsahem uhlíku, slinovaná na 1380 °C: (a) povrchová vrstva, (b) mezivrstva, (c) jádro. Vpravo hodnoty střední velikosti zrna, obsahu kobaltu, tvrdosti a houževnatosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu²³

4 POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY

Jedním z nejdůležitějších stupňů ve vývoji řezných materiálů bylo zavedení VBD s tenkým povlakem z tvrdého materiálu. První povlakované destičky ze SK, které přišly na trh koncem 60. let 20. století, umožnily podstatné zvýšení řezné rychlosti a trvanlivosti břitu. Povlakované SK můžeme rozdělit do čtyř skupin podle stupňů vývoje:^{17,31}

Povlakované SK 1. generace mají jednovrstvý povlak TiC o tloušťce asi 6 μm . Přestože měl tento povlak špatnou soudržnost s podkladem, velmi výrazně zvýšil výkonnost nástrojů ze SK.

Zdokonalení technologie výroby umožnilo zavedení povlaků 2. generace, které se vyznačují jednou silnější vrstvou (7–10 μm) TiC, TiCN, nebo TiN. U těchto povlaků již nedocházelo k jejich odlupování během řezného procesu.

3. generace se vyznačuje vícevrstevným povlakem s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Nejdříve jsou nanášeny vrstvy s nižší odolností proti opotřebení, ale lepší přilnavostí k podkladu. Nakonec jsou nanášeny vrstvy s vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení za vysokých teplot. Jejich dobrá přilnavost k předchozím vrstvám je zaručena procesem povlakování. Vrstvy se obvykle řadí od podkladu k povrchu v tomto pořadí: TiC-Al₂O₃, TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC-Al₂O₃-TiN.

4. generace je charakteristická multivrstevným povlakem složeným z více než deseti vrstev a mezivrstev ze stejných materiálů jako povlaky 3. generace. Jejich hlavní předností je schopnost zpomalovat šíření trhlin.¹⁷

4.1 Metody povlakování

Povlakované SK se vyrábějí tak, že se na podklad z běžného nebo gradientního SK nanášejí tenké vrstvy materiálů s vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení. Tyto výhodné vlastnosti jsou způsobeny tím, že mají tyto materiály oproti substrátu několikanásobně menší zrnitost, mají méně strukturálních defektů a neobsahují pojivo. Tloušťka vrstev se pohybuje mezi 2 a 15 μm , ale vrstvy tlustší než 12 μm se používají jen výjimečně, protože příliš tlustá vrstva negativně ovlivňuje výkonnost břitové destičky. S větší tloušťkou vrstvy sice narůstá odolnost proti opotřebení, ale zvyšuje se i křehkost a sklon k odlupování vrstvy.^{17,31}

4.1.1 Metoda CVD

Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition – chemické napařování z plynné fáze) je nejčastěji používanou metodou povlakování SK. Povlakování touto metodou je založeno na chemické reakci různých plynů (např. pro povlak TiC se jedná o vodík, chlorid titanu a metan), která obvykle probíhá při teplotách 1000–2000 $^{\circ}\text{C}$. Produkty této reakce se poté uloží na povrchu povlakovaného předmětu.^{17,31}

Metoda chemického napařování může být různě modifikována. Tyto modifikace odstraňují některé nevýhody klasické CVD metody, např. nutnost dosažení vysoké teploty, ale nemění její podstatu, tedy vytváření povlaku

z plynné fáze. Příkladem mohou být metody PCVD (Plasma CVD), při kterých jsou molekuly plynů ionizovány plasmatickým výbojem při tlaku 100–300 MPa, což umožňuje snížení teploty na 300–600 °C. Další metodou, která umožňuje snížení pracovních teplot je metoda MTCVD (Middle Temperature CVD – CVD při středních teplotách), při které je metan nahrazen sloučeninou CH₃CN. Tato změna umožní snížení teploty povlakování na 700–850 °C.¹⁷

Technologie CVD povlakování je výhodná pro vytváření vícevrstevných povlaků, protože se v průběhu pracovního cyklu může snadno regulovat množství přiváděných plynů. Povlak vytvořený CVD metodou má vysokou hustotu, homogenitu a je teplotně stabilní. Povlak má skvělou adhezi k podkladu a vyznačuje se rovnoměrnou tloušťkou i u tvarově složitých nástrojů. Tloušťka takto vytvořené vrstvy může být až 13 μm, ale nevýhodou je nízká rychlost povlakování a vysoká energetická náročnost především kvůli nutnosti dosažení vysokých pracovních teplot. Touto metodou také není možné povlakovat ostré hrany.^{17,31}

4.1.2 Metoda PVD

Metoda PVD (Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování) je založena na vytváření povlaků za sníženého tlaku (0,1 – 2 Pa) při teplotách nižších než 500 °C. Částice, které jsou uvolňovány z terčů různými fyzikálními metodami, se urychlují k povrchu substrátu, kde se usadí a vytvoří tenkou vrstvu povlaku. Např. pro vytvoření povlaku TiN je nutné uvolnit atomy titanu, které se sloučí podle jednoduché rovnice



s dusíkem v atmosféře a výsledná sloučenina se vyloučí na nástroji.^{17,31}

Metody fyzikálního napařování se dělí nejčastěji podle způsobu uvolňování částic z terčů. Jednou z nich je metoda napařování, což je depozice částic uvolněných fyzikálním odprašovacím procesem – nad záporně nabitým terčem se udržuje argonové plazma, jehož kladné ionty se elektrickým polem urychlují a při dopadu na terč odprašují atomy materiálu terče. Účinnost procesu lze zvýšit např. využitím magnetického pole. Druhou metodou je napařování, kdy je materiál odpařován z terčů, které jsou různým způsobem ohřívány. Třetí nejčastější metodou je iontová implantace, kdy je substrát bombardován částicemi s vysokou energií, jejichž zdrojem může být odpařování, odprašování nebo plyny.¹⁷

Metoda PVD nemá negativní vliv na vlastnosti podkladu, vytváří v povlaku zbytková tlaková napětí a lze jí povlakovat i ostré hrany. Užívá se zejména u VBD určených pro přerušovaný řez. Nevýhodami je nutnost složitého vakuového systému a tzv. stínový efekt, který způsobuje, že se povlak netvoří na plochách, které neleží ve směru pohybu povlakovacích částic. Povlakovanými předměty se tedy musí pohybovat, aby byla zaručena rovnoměrná tloušťka povlaku. Obvyklá tloušťka PVD povlaků je 1–7 μm, ale nová technologie PVD katodového rozprašování ve vakuu společnosti CemeCon⁸ umožňuje vytváření tenkých hladkých povlaků pro dokončovací operace stejně jako vytváření povlaků vyšších tloušťek až do 12 μm pro hrubování.^{8,17}

4.2 Běžně používané povlaky a jejich vlastnosti

Dnes jsou aplikovány jednovrstvé nebo vícevrstvé povlaky, jejichž materiál je volen podle vlastností vyžadovaných od rezných nástrojů. Tyto vlastnosti jsou ovlivňovány především druhem povlaku, jeho tloušťkou, metodou povlakování a použitým substrátem.^{17,31}

Nejčastějšími materiály pro povlakování jsou TiC, TiN, TiCN, TiAlN a Al₂O₃. TiC a Al₂O₃ vytvářejí velmi tvrdé vrstvy, které zajišťují odolnost proti opotřebením tím, že mezi nástrojem a obrobkem vytvoří chemickou i fyzikální (tepelnou) bariéru. Al₂O₃ má vynikající trvanlivost při vysokých rezných rychlostech, kdy převládá tepelné opotřebením. Naopak s nárůstem abrazivního opotřebením při nižších rezných rychlostech je trvanlivější povlak TiC, který má vyšší tvrdost (Tab. 4.1). TiN má sice tvrdost nižší a proto je méně otěruvzdorný, ale má nižší součinitel tření a tím lepší odolnost proti opotřebením na čele.^{17,31}

Tab. 4.1 Porovnání vlastností základních materiálů pro povlakování SK¹⁷

Změna vlastností	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla	Materiál	Obvyklá barva
↑	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiC	Al ₂ O ₃	TiC	šedá
	TiAlN	TiAlN	TiAlN	TiAlN	TiAlN	fialově černá
	TiN	TiN	TiCN	TiN	TiCN	modrošedá
	TiCN	TiCN	Al ₂ O ₃	TiCN	Al₂O₃	černá
	TiC	TiC	TiN	TiC	TiN	zlatá

Čím je vrstva povlaku tenčí, tím více je rezný výkon povlakované VBD ovlivňován vlastnostmi substrátu. U lehkých řezů vykazují vyšší trvanlivost povlaky na tvrdém podkladu. Při těžkých přerušovaných řezech jsou naopak využívány substráty s vysokou houževnatostí, které snižují nebezpečí vydrolování ostří nástroje.¹⁷

4.3 Povlaky KNB

Kubický nitrid boru (KNB) je uměle vytvořený materiál, který se tvrdostí a skvělou tepelnou vodivostí přibližuje diamantu. Jeho chemická a teplotní stabilita jsou však mnohem lepší než u diamantu. Zatímco diamant za vyšších teplot reaguje s oceli a jeho krystalická struktura se mění na grafit, KNB zůstává stabilní i za teplot vyšších než 1200 °C. Tyto vlastnosti spolu s vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebením za teplot nad 1000 °C dělají KBN nejlepším materiálem pro obrábění ocelí a železných slitin.^{5,20,32}

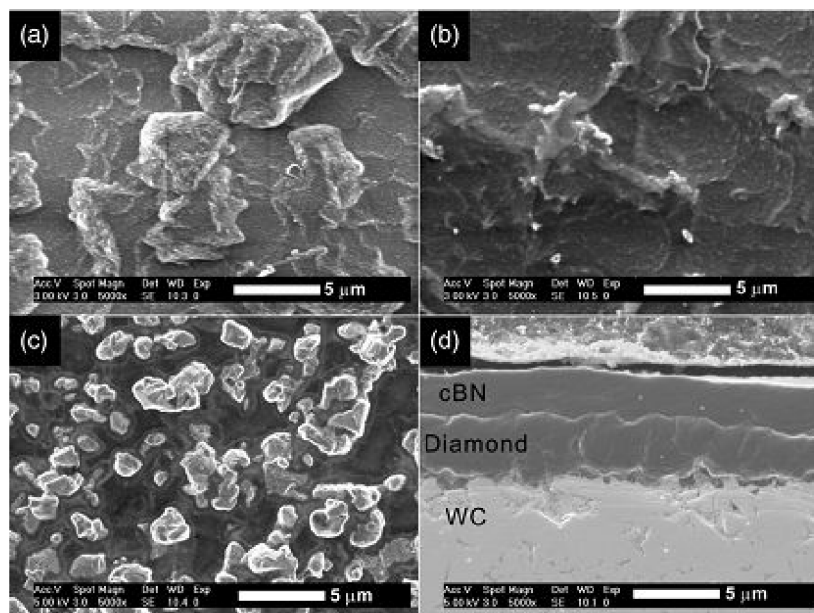
Pro vytváření povlaků KBN bylo zkoumáno mnoho metod povlakování CVD a PVD, ale protože (na rozdíl od diamantového povlaku) může KNB růst pouze za nerovnovážných podmínek, jsou pro jeho nanášení nejvhodnější metody PVD. Při nízkoteplotních PVD metodách se však atomy rychle ochlazují a tvoří mnoho nanokrystalických zrn. Pro odstranění tohoto problému se obvykle v průběhu nukleace i růstu využívá iontové bombardování povrchu,

jehož energetická výtěžnost je mnohem vyšší než energetická výtěžnost předpětí substrátu.^{5,17,32}

Největším problémem při výrobě povlaků KNB je nadměrné zbytkové tlakové napětí v povlaku, které při zvýšení tloušťky vrstvy na 1 – 2 μm způsobí jeho samovolné oddělení na rozhraní mezi povlakem a substrátem. Pro povlakování se tedy musí použít substrát s vlastnostmi blízkými KNB. Logickým řešením by bylo použití substrátu s vrstvou PKNB (polykrystalický KNB). Povlaky PKNB jsou sice komerčně dostupné, ale jejich použitím by se nedosáhlo požadované kombinace houževnatosti (přinesené substrátem) a vysoké tvrdosti. Výroba takového materiálu by pak nebyla ekonomicky výhodná.^{20,32}

Mnohem perspektivnější možností je využití substrátu s diamantovým povlakem. Spojením těchto povlaků je získán materiál, u kterého jsou vlastnosti vrchní vrstvy KNB podpořeny vlastnostmi diamantu. Navíc spojení dvou materiálů s vysokou tepelnou vodivostí umožňuje snížení teploty v oblasti kontaktu nástroje a obrobku.^{5,32} Chong a kol.⁵ se zabývali vytvořením takového materiálu metodou MPCVD (Microwave Plasma CVD – CVD s mikrovlnným doutnavým výbojem). Na substrát byl nejdříve nanesen diamantový povlak metodou HFCVD (Hot Filament CVD – CVD se žhavicím vláknem). Poté bylo na materiál přivedeno kladné předpětí 30 V, aby došlo k očištění diamantového povlaku. Po pěti minutách bylo předpětí změněno na záporné, čímž bylo umožněno nanášení povlaku KNB.

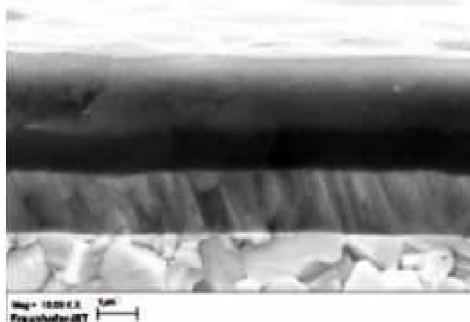
Obr. 4.1 ukazuje povrchy vrstev KNB po čtyřech hodinách povlakování s různým předpětím substrátu. Při předpětí – 35 V a – 45 V je diamantový podklad plně překryt, ale vrstva nanesená při – 55 V je nesouvislá kvůli začínajícímu sloupávání povlaku.



Obr. 4.1 Povrchy vrstev KNB po povlakování s předpětím (a) – 35 V, (b) – 45, (c) – 55 V. (d) 2,8 μm silný povlak KNB na diamantové vrstvě o tloušťce 3 μm .⁵

Jiný způsob zvýšení adheze vyvinuli Keunecke a kol.³² Na substrát nejdříve pomocí magnetronového naprašování (metoda PVD) nanесли 2 μm

silnou vrstvu TiAlN a na ni vrstvu B₄C o tloušťce 1 μm. Poté byl plynulou změnou složení atmosféry z argonové na argono-dusíkovou směs vytvořen gradientní přechod B-C-N o tloušťce 0,1 – 0,2 μm. Následně byla atmosféra změněna na čistou dusíkovou a byla nanese vrstva KNB o tloušťce 2 μm (obr. 4.2).

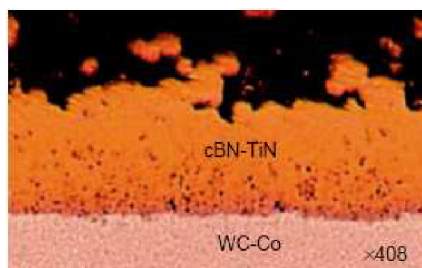


Obr. 4.2 Substrát SK povlakovaný TiAlN, B₄C, gradientní vrstvou B-C-N (vrstva není při tomto rozlišení patrná) a KNB.³²

Další možností je výroba kompozitních povlaků. Jiang a kol.²⁰ vyvinuli metodu, která umožní zvýšit tloušťku povlaků až na 20 μm. Nejdříve je metodou ESC (Electrostatic Spray Coating – elektrostatické rozprašování) nanese na pórovitá vrstva KNB (obr. 4.3) na podklad SK. a poté jsou póry zaplněny TiN metodou CVI (Chemical vapor infiltration – chemická infiltrace), což je další modifikace klasické CVD metody. TiN byl vybrán, protože je chemicky kompatibilní s KNB, ale má lepší chemickou stabilitu. Po zaplnění pórů vznikne homogenní vrstva bez ztelných poruch (obr. 4.4), která má skvělou odolnost proti opotřebení.²⁰



Obr. 4.3 (A) Vrstva KNB o tloušťce 13 μm, (B) povlak poblíž špičky nástroje, (C) póry v povlaku KNB²⁰



Obr. 4.4 Kompozitní povlak KNB-TiN na podkladu WC-Co²⁰

5 SK V SORTIMENTU NEJVÝZNAMNĚJŠÍCH VÝROBCŮ

Pro přehled nabídky slinutých karbidů na tuzemském trhu byl zvolen sortiment tří významných výrobců rezných materiálů: Sandvik Coromant, Pramet Tools a Kennametal. Vzhledem k rozsáhlému sortimentu těchto výrobců byly pro zpracování vybrány VBD ze SK v aplikacích pro soustružení.

5.1 Sandvik Coromant

Švédská firma Sandvik Coromant je nejvýznamnějším světovým výrobcem rezných materiálů a nástrojů pro obrábění. Tři centrální skladovací místa umožňují distribuci širokého sortimentu do 130 zemí světa do 24 hodin.

5.1.1 Nepovlakované SK

Tab. 5.1 Nepovlakované SK pro soustružení³⁶

Ozn.	Aplikační oblasti				Popis materiálu
	10	20	30	40	
H10	P				Materiál kombinuje vynikající odolnost proti otěru a ostrost bříty. Pro hrubovací až dokončovací soustružení slitin hliníku.
	M				
	K				
	N	■	■	■	
	S				
	H				
H10A	P				Materiál kombinuje dobrou odolnost proti otěru s houževnatostí. Pro střední až těžké soustružení tepelně odolných ocelí a slitin titanu.
	M				
	K				
	N				
	S	■	■	■	
	H				
H10F	P				Jemnozrný SK se skvělou odolností proti tepelným rázům. Pro dlouhotrvající spojité i přerušované řezy velmi nízkými reznými rychlostmi.
	M				
	K				
	N				
	S				
	H		■	■	
H13A	P				Materiál kombinuje dobrou odolnost proti opotřebení s houževnatostí. Pro obrábění při středních až nízkých rezných rychlostech a vysokých hodnotách posuvu.
	M				
	K		■	■	
	N	■	■	■	
	S		■	■	
	H		■	■	

5.1.2 Povlakované SK

Tab. 5.2 Povlakované SK řady GC1000 pro soustružení³⁶

Ozn.	Aplicační oblasti				Popis materiálu
	10	20	30	40	
GC1005	P				<p>Karbid s PVD povlakem. Kombinace tvrdého jemnozrnného substrátu s dobrou odolností proti plastické deformaci a povlaku s vysokou odolností proti opotřebení za vysokých teplot.</p> <p>Třída je nejvhodnější pro obrábění tepelně odolných superslitin na bázi Ni, Fe nebo Co.</p>
	M	■	■		
	K				
	N	■			
	S		■	■	
	H				
GC1025	P		■	■	<p>Ultrajemnozrnný karbid s PVD povlakem se skvělou odolností proti tepelným rázům.</p> <p>Doporučuje se pro obrábění tepelně odolných superslitin a slitin titanu při nízkých řezných rychlostech a pro dokončování korozivzdorných ocelí při vysokých nárocích na kvalitu povrchu. Třída vhodná pro dlouhotrvající spojité i přerušované řezy.</p>
	M		■	■	
	K				
	N				
	S		■	■	
	H				
GC1125	P		■	■	<p>Jemnozrnná třída s PVD povlakem se značnou odolností vůči teplotním rázům.</p> <p>Doporučena pro dokončování korozivzdorných ocelí při středních až nízkých řezných rychlostech v případě vysokých nároků na kvalitu obroběného povrchu. Tato třída je vhodná také pro lehké přerušované řezy.</p>
	M		■	■	
	K				
	N		■	■	
	S			■	
	H				
GC1515	P		■	■	<p>Ultrajemný SK s CVD povlakem a vysokou odolností proti teplotním rázům.</p> <p>Určen pro dokončování materiálů snadno ulpívajících na břitu při středních až nízkých řezných rychlostech. Vhodný i pro lehké přerušované řezy.</p>
	M		■	■	
	K				
	N				
	S				
	H				



Obr. 5.1 Struktura materiálu GC1125³³

Tab. 5.3 Povlakované SK řady GC2000 pro soustružení³⁶

Ozn.	Aplikační oblasti				Popis materiálu	
	10	20	30	40		
GC2015	P			■	<p>Karbid s CVD povlakem. Substrát umožňuje práci za vysokých teplot a povlak má velkou odolnost proti opotřebení.</p> <p>Pro dokončování až lehké hrubování korozivzdorných ocelí, pro nepřerušované řezy při středních až vysokých řezných rychlostech.</p>	
	M	■	■			
	K					
	N					
	S					
	H					
GC2025	P			■	<p>SK s CVD povlakem s odolností vůči tepelným a mechanickým rázům.</p> <p>SK optimalizovaný pro hrubování a polodokončování korozivzdorných ocelí při středních řezných rychlostech. Břity odolávají opotřebení i při přerušovaných řezech.</p>	
	M	■	■			
	K					
	N					
	S					
	H					
GC2035	P				<p>SK s PVD povlakem s vysokou odolností vůči tepelným rázům.</p> <p>Doporučeno pro polodokončování až hrubování korozivzdorných ocelí při malých až středních řezných rychlostech. Třída je vhodná pro aplikace s rychle přerušovaným řezem.</p>	
	M		■	■		
	K					
	N					
	S					
	H					

Obr. 5.2 Struktura materiálu GC2025¹⁹Tab. 5.4 Povlakované SK řady GC3000 pro soustružení³⁶

Ozn.	Aplikační oblasti				Popis materiálu	
	10	20	30	40		
GC3005	P	■	■	■	<p>Karbidová třída s CVD povlakem s velkou odolností vůči opotřebení a dobrou adhezí k tvrdému substrátu, který má předpoklady pro práci za vysokých teplot v místě řezu.</p> <p>Pro dokončování a polodokončování vysoce legovaných ocelí i litin při vysokých řezných rychlostech.</p>	
	M					
	K	■	■			
	N					
	S					
	H					

Tab. 5.4 Pokračování

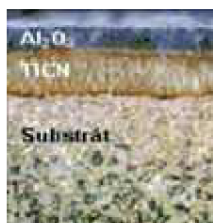
		10	20	30	40	
GC3205	P					<p>Slinutý karbid s CVD povlakem má silný, hladký a opotřebení odolný povlak a velmi tvrdý substrát.</p> <p>Doporučený pro vysokorychlostní obrábění šedé litiny.</p>
	M					
	K					
	N					
	S					
	H					
GC3210	P					<p>Slinutý karbid CVD povlakem má silný, hladký a opotřebení odolný povlak a velmi tvrdý substrát.</p> <p>Doporučená pro vysokorychlostní obrábění tvárné litiny.</p>
	M					
	K					
	N					
	S					
	H					
GC3215	P					<p>SK s CVD povlakem má silný, hladký a opotřebení odolný povlak a velmi tvrdý substrát, který je schopen vydržet i zatížení při přerušovaném řezu.</p> <p>Doporučený pro hrubování všech typů litiny při malých a středních řezných rychlostech.</p>
	M					
	K					
	N					
	S					
	H					

Obr. 5.3 Struktura materiálů GC3205, GC3210, GC3215¹⁹Tab. 5.5 Povlakované SK řady GC4000 pro soustružení³⁶

Ozn.	Aplikační oblasti				Popis materiálu
	10	20	30	40	
GC4205	P				<p>Třída s CVD povlakem se skvělou odolností proti opotřebení a plastické deformaci. Odolnost vůči vysokým teplotám při obrábění za mokra i za sucha.</p> <p>Doporučena pro stabilní podmínky nebo pro vyšší rychlost úběru. Vhodná pro polodokončování až hrubování ocelí.</p>
	M				
	K				
	N				
	S				
	H				

Tab. 5.5 Pokračování

GC4215		10	20	30	40	<p>Třída s CVD povlakem a gradientním substrátem. Odolnost vůči vysokým teplotám při obrábění za mokra i za sucha.</p> <p>Pro dokončovací a hrubovací aplikace se spojitým nebo lehce přerušovaným řezem v ocelích nebo ocelolitině.</p>
	P					
	M					
	K					
	N					
	S					
H						
GC4225		10	20	30	40	<p>Třída s CVD povlakem a gradientním substrátem. Pro dokončovací až hrubovací aplikace se spojitým i přerušovaným řezem s velkým úběrem materiálu.</p>
	P					
	M					
	K					
	N					
	S					
H						
GC4235		10	20	30	40	<p>Třída s CVD povlakem a gradientním substrátem a skvělou odolností proti tepelným i mechanickým rázům.</p> <p>Tato třída je vhodná pro hrubovací operace v oceli a ocelolitině za nepříznivých podmínek, pro přerušované řezy s velkým úběrem materiálu.</p>
	P					
	M					
	K					
	N					
	S					
H						

Obr. 5.4 Struktura materiál GC4225 ³³Tab. 5.6 Další povlakované SK firmy Sandvik Coromant pro soustružení³⁶

Ozn.	Aplikační oblasti				Popis materiálu
	10	20	30	40	
CD1810	P				<p>Třída s diamantovým povlakem, který zajišťuje skvělou odolnost proti opotřebení a snížení tvorby nárůstku na břitech, což přináší vysokou kvalitu obrobeného povrchu.</p> <p>Pro dokončování až hrubování hliníku, hořčíku, mědi, mosazi, plastů atd.</p>
	M				
	K				
	N				
	S				
	H				

Tab. 5.6 Pokračování

		10	20	30	40	
GC235	P					Karbid s CVD povlakem. Houževnatý substrát zajišťuje vysokou spolehlivost břitů. Určen pro hrubování korozivzdorných ocelí a odlitků z korozivzdorných ocelí s obtížně obrobitelnou kůrou. Tato třída je vhodná pro těžké přerušované řezy při nízkých až středních řezných rychlostech.
	M					
	K					
	N					
	S					
	H					
S05F	P					Karbid s CVD povlakem. Pro dokončování při vysokých řezných rychlostech, nebo pro dlouhotrvající spojité řezy při nižších řezných rychlostech.
	M					
	K					
	N					
	S					
	H					

5.2 Pramet Tools

Firma Pramet Tools je nejvýznamnějším tuzemským výrobcem materiálů pro řezné nástroje. Firma je díky vlastnímu výzkumnému a vývojovému programu schopna dodávat za příznivou cenu nástroje, které splňují požadavky nejmodernějších technologických postupů.

5.2.1 Nepovlakované SK

Tab. 5.7 Nepovlakované SK firmy Pramet Tools pro soustružení^{34,35}

Ozn.	Aplicační oblasti				Popis materiálu
	10	20	30	40	
HF7	P				Submikronový materiál bez kubických karbidů s nízkým obsahem Co. Univerzální materiál pro malé až střední průřezy třísek při stabilních záběrových podmínkách.
	M				
	K				
	N				
	S				
	H				
S30	P				Materiál s kubickými karbidy pro obrábění materiálů skupiny P. Vhodný pro střední a vyšší posuvy, nízké řezné rychlosti a nestabilní záběrové podmínky.
	M				
	K				
	N				
	S				
	H				

Obr. 5.5 Struktura materiálů HF7 a S30^{34,35}

5.2.2 Povlakované SK

Tab. 5.8 Povlakované SK řady 6000 pro soustružení^{34,35}

Ozn.	Aplikační oblasti				Popis materiálu
	10	20	30	40	
6605	P		■		Nejotěruvzdornější materiál řady 6000 s povlakem s nosnou vrstvou Al ₂ O ₃ naneseným kombinací metod MTCVD a PVD. Určen pro dokončovací až hrubovací soustružení kontinuálním řezem při vysokých řezných rychlostech za sucha.
	M				
	K	■			
	N				
	S				
	H	■			
6620	P		■		Substrát bez kubických karbidů se silným povlakem s nosnou vrstvou Al ₂ O ₃ nanesenou metodou MT-CVD. Pro dokončovací až hrubovací soustružení při středních a vyšších řezných rychlostech.
	M				
	K	■	■		
	N				
	S				
	H	■			
6640	P		■	■	Substrát bez kubických karbidů na kterém je povlak s nosnou vrstvou TiCN nanesený metodou MT-CVD. Pro polohrubovací a hrubovací soustružení nižšími až středními rychlostmi a pro přerušovaný řez.
	M		■	■	
	K		■	■	
	N				
	S		■		
	H				

Obr. 5.6 Struktura materiálů 6605, 6620 a 6640^{34,35}

Tab. 5.9 Povlakované SK řady 8000 pro soustružení^{34,35}

Ozn.	Aplicační oblasti				Popis materiálu
	10	20	30	40	
8016	P	■	■		Nejotěruvzdornější materiál řady 8000 se submikrometrovým substrátem bez kubických karbidů s nízkým obsahem kobaltu a povlakem naneseným metodou PVD. Univerzální materiál pro operace s vysokou tepelnou zátěží. Pro malé a střední průřezy třísek a vysoké řezné rychlosti.
	M	■	■		
	K	■	■		
	N	■	■		
	S	■			
	H	■			
8030	P			■	Submikronový substrát povlakovaný nanostrukturálním povlakem metodou PVD a vysokou otěruvzdorností. Univerzální materiál pro střední řezné rychlosti.
	M		■	■	
	K		■	■	
	N		■	■	
	S		■		
	H		■		
8040	P			■	Nejhouževnatější člen řady 8000 se submikrometrovým substrátem bez kubických karbidů a s vysokým obsahem kobaltu. Nanostrukturální povlak nanesený metodou PVD. Pro nízké až střední řezné rychlosti a vysokou mechanickou zátěž bříty.
	M		■	■	
	K		■	■	
	N		■		
	S		■		
	H		■		

Obr. 5.7 Struktura materiálů 8016, 8030 a 8040^{34,35}

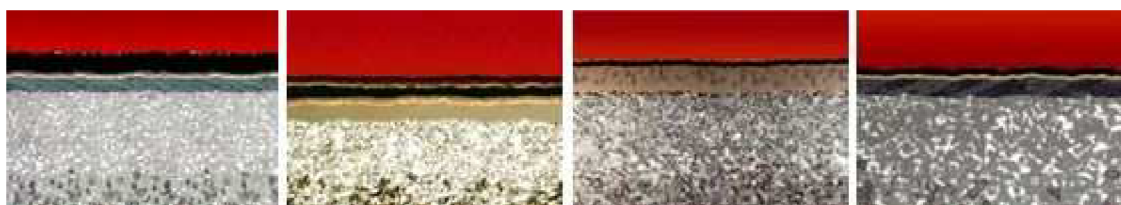
5.2.3 Povlakované SK s funkčně gradientním substrátem

Tab. 5.10 Povlakované SK s funkčně gradientním substrátem řady 6000 pro soustružení^{34,35}

Ozn.	Aplicační oblasti				Popis materiálu
	10	20	30	40	
6610	P	■	■		Silný povlak s nosnou vrstvou Al ₂ O ₃ je nanesen metodou MTCVD. Materiál pro dokončovací až hrubovací soustružení vyššími řeznými rychlostmi a pro kontinuální nebo mírně přerušovaný řez.
	M	■	■		
	K	■	■		
	N	■			
	S	■			
	H	■			

Tab. 5.10 Pokračování

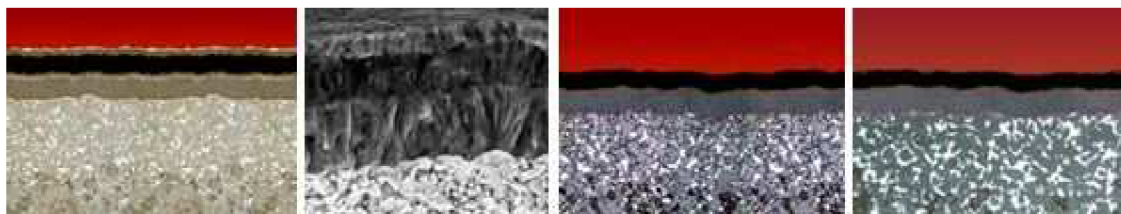
6615		10	20	30	40	<p>Povlak s nosnou vrstvou TiCN nanesený kombinací metod MTCVD a PVD.</p> <p>Pro dokončovací až hrubovací soustružení při vyšších řezných rychlostech a pro kontinuální nebo mírně přerušovaný řez.</p>
	P					
	M					
	K					
	N					
	S					
	H					
6630		10	20	30	40	<p>Střední povlak s nosnou vrstvou TiCN nanesený metodou MTCVD.</p> <p>Pro dokončovací až hrubovací soustružení při středních a vyšších řezných rychlostech a pro kontinuální i přerušovaný řez.</p>
	P					
	M					
	K					
	N					
	S					
	H					
6635		10	20	30	40	<p>Tenký povlak nanesený metodou MTCVD.</p> <p>Pro střední a vyšší průřezy třísek při nižších a středních řezných rychlostech a pro přerušovaný řez.</p>
	P					
	M					
	K					
	N					
	S					
	H					

Obr. 5.8 Struktura materiálů 6010, 6015, 6030 a 6035 ^{34,35}Tab. 5.11 Povlakované SK s funkčně gradientním substrátem řady 9000 pro soustružení ^{28,29,34,35}

Ozn.	Aplikační oblasti					Popis materiálu
	10	20	30	40		
9210		10	20	30	40	<p>Materiál s vysokou ořezuvzdorností a odolností proti plastické deformaci břítu. Silná vrstva povlaku nanesená metodou MTCVD, nosná vrstva Al_2O_3 s vysokou adhezí k podkladu, tepelnou stabilitou. Následují vrstvy Ti(C,N) a TiN.</p> <p>Pro dokončovací až hrubovací soustružení při vyšších řezných rychlostech a pro kontinuální i mírně přerušovaný řez.</p>
	P					
	M					
	K					
	N					
	S					
	H					

Tab. 5.11 Pokračování

		10	20	30	40		
9230	P						Středně silný povlak nanesený metodou MTCVD. Pro dokončovací až hrubovací soustružení při středních i vyšších řezných rychlostech a pro kontinuální i přerušovaný řez.
	M						
	K						
	N						
	S						
	H						
9235	P						Materiál s vysokou otěruvzdorností, tepelnou stálostí a odolností proti plastické deformaci břitu. Povlak nanesený metodou MTCVD s nosnou vrstvou Al ₂ O ₃ pokrytou otěruvzdornou vrstvou Ti(C,N). Pro hrubovací až dokončovací soustružení středními řeznými rychlostmi a pro přerušovaný i kontinuální řez.
	M						
	K						
	N						
	S						
	H						

Obr. 5.9 Struktura materiálu 9210 a detail jeho povlaku, struktura materiálů 9230 a 9235^{28,29,34,35}

5.3 Kennametal

Kennametal je dalším světově významným výrobcem řezných nástrojů. Firma sídlí v USA a v šedesáti zemích světa má celkem 12 000 zaměstnanců.

5.3.1 Nepovlakované SK

Tab. 5.12 Neovlakované SK firmy Kennametal²⁴

Ozn.	Aplikační oblasti				Popis materiálu
	10	20	30	40	
K68	P				Jemnozrný SK s nízkým obsahem pojiva s vysokou odolností proti opotřebení a vysokou pevností. Vhodný k obrábění litin, austenitických ocelí a neželezných kovů.
	M				
	K				
	N				
	S				
	H				

Tab. 5.12 Pokračování

		10	20	30	40	
K313	P					
	M		■	■		
	K	■	■			
	N		■			
	S		■			
	H					

Jemnozrný SK s nízkým obsahem pojiva a skvělou odolností proti abraznímu opotřebení.

Vhodný k obrábění litin, austenitických ocelí, titanu, neželezných kovů a nekovových materiálů.

5.3.2 Povlakované SK

Tab. 5.13 Povlakované SK firmy Kennametal pro soustružení²⁴

Ozn.	Aplikační oblasti					Popis materiálu
	10	20	30	40		
KC5010	P	■				
	M	■				
	K	■				
	N	■				
	S	■				
	H	■				

SK s povlakem TiAlN naneseným PVD metodou. Univerzální SK pro dokončování vyššími reznými rychlostmi.

		10	20	30	40	
KC5410	P					
	M					
	K					
	N	■	■			
	S					
	H					

SK s povlakem TiB₂ naneseným PVD metodou. Povlak je velmi hladký pro snížení tření SK pro obrábění slitin Al a Mg.

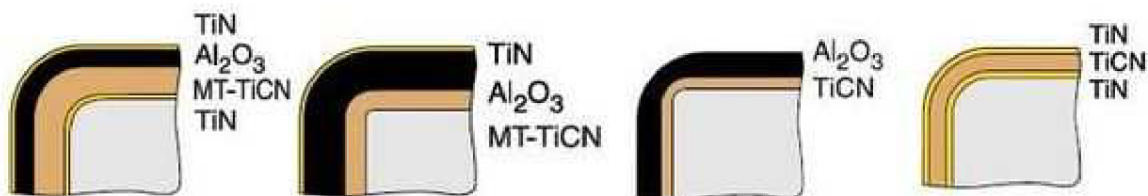
		10	20	30	40	
KC8050	P			■	■	
	M		■	■		
	K				■	
	N					
	S					
	H					

SK s povlakem naneseným PVD metodou. Povlak má vysokou otěruvzdornost a nevyžaduje chlazení ani při vyšších rychlostech. SK pro obrábění ocelí i litin.

Obr. 5.10 Řazení vrstev povlaku u materiálů KC5010, KC5410 a KC8050²⁴

Tab. 5.14 Povlakované SK firmy Kennametal pro soustružení²⁴

Ozn.	Aplicační oblasti				Popis materiálu
	10	20	30	40	
KC9240	P				SK s multivrstvým povlakem naneseným CVD metodou kombinující vysokou houževnatost a odolnost proti opotřebení. SK především pro obrábění nerezových ocelí.
	M				
	K				
	N				
	S				
	H				
KC9315	P				SK s multivrstvým povlakem naneseným CVD metodou s vysokou odolností proti opotřebení. SK především pro obrábění litin vysokými rychlostmi a kontinuální nebo mírně přerušovaný řez.
	M				
	K				
	N				
	S				
	H				
KC9325	P				SK s povlakem naneseným CVD metodou. Materiál specializovaný na obrábění různých druhů litin.
	M				
	K				
	N				
	S				
	H				
KU30T	P				SK s multivrstvým povlakem naneseným CVD metodou. Díky kombinaci multivrstvého povlaku a substrátu obohaceného o kobalt je tento SK vhodný pro hrubování až dokončování široké škály materiálů.
	M				
	K				
	N				
	S				
	H				

Obr. 5.11 Řazení vrstev povlaku u materiálů KC9240, KC9315, KC9325 a KU30T²⁴

ZÁVĚR

V uplynulých letech proběhl intenzivní vývoj všech druhů řezných materiálů kromě rychlořezných ocelí – slinutých karbidů, cermetů, keramiky i supertvrdých materiálů. Firmou Sandvik Coromant byl také vyvinut zcela odlišný materiál s názvem Coronite, ten se však v průmyslové praxi příliš neujal.

Podrobnému zkoumání byl podroben celý proces výroby slinutých karbidů. Od výroby prášků přes mechanismy probíhající během jejich mletí a mísení v kulových mlýnech až po lisování a slinování, kdy byly objeveny nové postupy. Pro ovlivňování vlastností slinutých karbidů se začala uplatňovat zrna karbidů se submikrometrovými a nano- rozměry, což přineslo podstatné zlepšení mechanických vlastností. Při hledání alternativního pojiva ke kobaltu byl objeven nikl, který se zdá být perspektivním pojivem pro výrobu kubických karbidů.

Významným rozvojem prošla výroba gradientních slinutých karbidů, kdy se primárním mechanismem jejich výroby stalo ovlivňování mikrostruktury pomocí obsahu pojiva a vliv velikosti zrna se stal sekundárním. Na tomto principu fungují např. různé metody řízeného oduhličování. U materiálů obsahujících kubické karbidy se vytváří gradient tak, že se povrchová vrstva kubických karbidů zbaví. Dochází k tomu při slinování za denitračních podmínek, vakuovém slinování nebo při slinování využívajícím metodu pórovitých dílců.

Jeden z nejvýznamnějších pokroků byl učiněn při vývoji slinutých karbidů s opačným gradientem – materiálů se sníženým obsahem pojiva v povrchové vrstvě, což přináší povrchu vysokou tvrdost. Přestože by se mohlo zdát, že toto zvýšení tvrdosti bude na úkor snížení houževnatosti, efekt je opačný – vyšší smrštění oblasti s nižším obsahem kobaltu během slinování má za následek vysoké zbytkové tlakové pnutí v povrchu a podstatné zvýšení houževnatosti. Dosud byly k výrobě opačného gradientu používány slinuté karbidy s jádrem obohaceným o křehkou eta fázi, což bránilo průmyslovému využití. Loni však byla objevena převratná metoda využívající řízené nauhličování, která tento problém odstranila.

V oblasti povlakování byl zaznamenán rozvoj různých modifikací klasických CVD a PVD metod, např. MTCVD, MPCVD, HFCVD nebo iontové implantace. Přes veškerou snahu se nepodařilo uvést do praxe povlak z kubického nitridu boru. Největší překážkou zůstává špatná adheze silnějších vrstev KNB k substrátu způsobená nadměrným zbytkovým tlakovým pnutím v povlaku. Tento problém se dá vyřešit nanášením povlaku na vrstvu diamantu, který má podobné vlastnosti jako KNB. Další možností je využití plynulého gradientního přechodu mezi vrstvami nebo využití kompozitních povlaků.

Z pohledu na řezné materiály v sortimentu předních světových výrobců nástrojových materiálů je patrný dlouhodobý trend ústupu nepovlakovaných slinutých karbidů a nástup povlakovaných slinutých karbidů s gradientním substrátem, které dnes tvoří podstatnou část jejich nabídky.

V příštích letech můžeme očekávat podobný vývoj jako v ostatních vědeckých a technických oblastech – útlum primárního výzkumu zabývajícího se hledáním nových materiálů pro výrobu řezných nástrojů a rozvoj inovativních a zdokonalovacích výzkumných programů zaměřených na zdokonalení již objevených postupů. Cílem bude mimo jiné uvést do praxe povlaky z KNB nebo perspektivní slinuté karbidy s opačným gradientem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BARAN, J. *Slinuté karbidy a jejich efektivní využití*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2007. 69s.
2. BOLOKANG, S., BANGANAYI, C., PHASHA, M. Effects of C and milling parameters on the synthesis of WC powders by mechanical alloying. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 28 (2010). pp. 211-216. ISSN 0263-4368.
3. BROOKES, K. How gradient hardmetals function. *Metal Powder Report*. April 2007. pp. 19-25.
4. BUSS, K. *High Temperature Deformation Mechanisms of Cemented Carbides and Cermets*. Pour l'obtention du grade de docteur es sciences. Lausanne: École polytechnique fédérale de Lausanne. 2004. 156s.
5. CHONG, Y. M., ZHANG, W. J., YANG, Y., YE, Q., BELLO, I., LEE, S. T. Deposition of cubic boron nitride films on diamond-coated WC:Co inserts. *Diamond & Related Materials*. 18 (2009). pp. 1387-1392. ISSN 0925-9635.
6. DAOUSH, W. M., LEE, K. H., PARK, H. S., HONG, S. H. Effects of liquid phase composition on the microstructure and properties of (W,Ti)C cemented carbide cutting tools. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 27 (2009). pp. 83-89. ISSN 0263-4368.
7. DLOUHÝ, M., HOUHEK, J., KOLOC, J. *Slinuté karbidy pro obrábění*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1964. 380s. 04-264-64.
8. DVOŘÁK, L. Nástup PVD technologií do oblastí CVD povlakování. *MM Průmyslové spektrum*. Duben 2009, č. 4, s. 31. ISSN 1212-2572.
9. DVOŘÁK, M. a kol. *Technologie II*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 240s. ISBN 80-214-2683-7.
10. ENAYATI, M. H., ARYANPOUR, G. R., EBNONASIR, A. Production of nanostructured WC-Co powder by ball milling. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 27 (2009). pp. 159-163. ISSN 0263-4368.
11. ESO, O. O., FAN, P., FANG, Z. Z. A kinetic model for cobalt gradient formation during liquid phase sintering of functionally graded WC-Co. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 26 (2008). pp. 91-97. ISSN 0263-4368.
12. FERREIRA, J. A. M., AMARAL, M. A. P., ANTUNES, F. V., COSTA, J. D. M. A study on the mechanical behaviour of WC/Co hardmetals. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 27 (2009). pp. 1-8. ISSN 0263-4368.
13. FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 270s. ISBN 80-214-2374-9.
14. FRYKHOLM, R. *Development of composition gradients in cemented carbides*. Thesis for the degree of doctor of philosophy. Department of Experimental Physics Chalmers University of Technology and Göteborg University, Göteborg, Sweden, 2001. 46s. ISBN 91-7291-097-6.

15. GOLOVCHAN, V. T. Some analytical consequences of experimental data on properties of WC-Co hardmetals. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 26 (2008). pp. 301-305. ISSN 0263-4368.
16. HUANG, S. G., LIU, R. L., LI, L., BIEST, O., VLEUGELS, J. NbC as grain growth inhibitor and carbide in WC-Co hardmetals. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 26 (2008). pp. 389-395. ISSN 0263-4368.
17. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing s. r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
18. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2006. [online]. [cit. 11.2. 2010]. Dostupné na World Wide Web: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf>.
19. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. *Materiály pro řezné nástroje*. *MM Průmyslové spektrum - Speciální vydání*. Zář 2004, s. 84-96. ISSN 1212-2572.
20. JIANG, W., MALSHE, A. P., GOFORTH, R. C. Cubic Boron Nitride (cBN) based nanocomposite coatings on cutting inserts with chip breakers for hard turning applications. *Surface & Coatings Technology*. 200 (2005). pp. 1849-1854. ISSN 0257-8972.
21. KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270s. ISBN 80-214-3068-0.
22. KONYASHIN, I., HLAWATSCHEK, S., RIES, B., LACHMANN, F., DORN, F., SOLOGUBENKO, A., WEIRICH, T. On the mechanism of WC coarsening in WC-Co hardmetals with various carbon contents. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 27 (2009). pp. 234-243. ISSN 0263-4368.
23. KONYASHIN, I., HLAWATSCHEK, S., RIES, B., LACHMANN, F., SOLOGUBENKO, A., WEIRICH, T. A new approach to fabrication of gradient WC-Co hardmetals. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 28 (2010). pp. 228-237. ISSN 0263-4368.
24. *Lathe tooling*. KENNAMETAL. Latrobe, USA. 2009. [online]. [cit. 1.5. 2010]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.kennametal.com/images/pdf/US/Sections/KMTL-Lathe_Tooling_Catalog_4010/KMTL-lathe_4010_complete.pdf>.
25. LENGAUER, W., DREYER, K. Tailoring hardness and toughness gradients in functional gradient hardmetals (FGHMs). *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 24 (2006). pp. 155-161. ISSN 0263-4368.
26. LI, Z., YUAN-JIE, W., XIAN-WANG, Y., SHU, C., XIANG-JUN, X. Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC-Co cemented carbide. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 26 (2008). pp. 295-300. ISSN 0263-4368.
27. MANNESON, K., ELFWING, M., KUSOFFSKY, A., NORGRÉN, S., AGREN, J. Analysis of WC grain growth during sintering using electron backscatter diffraction and image analysis. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 26 (2008). pp. 449-455. ISSN 0263-4368.
28. *Nový soustružnický materiál pro dokončovací operace 9210*. PRAMET TOOLS, s.r.o., Šumperk, Česká republika. 2010. [online]. [cit. 1.5. 2010]. Dostupné na World Wide Web:

- <<http://pramet.com/download/novinky/Materi%C3%A1l%209210%20CZ%20screen.pdf>>.
29. *Nový výkonný soustružnický materiál 9235*. PRAMET TOOLS, s.r.o., Šumperk, Česká republika. 2010. [online]. [cit. 1.5. 2010]. Dostupné na World Wide Web:
<<http://pramet.com/download/novinky/Materi%C3%A1l%209210%20CZ%20screen.pdf>>.
30. PAVLOVSKÝ, T. *Nepovlakované slinuté karbidy*. Bakalářská práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2009. 40s.
31. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cuttign - A Practical Handbook*. ISBN 91-97 22 99-4-6.
32. RICHTER, A. Coating´s Holy Grail. *Cutting Tool Engineering*. October 2008. Vol. 60, Issue 10. pp. 47-53. ISSN 0011-4189.
33. SALAJKA, J. *Slinuté karbidy a jejich efektivní využití*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2009. 110s.
34. *Soustružení*. PRAMET TOOLS, s.r.o., Šumperk, Česká republika. 2010. [online]. [cit. 1.5. 2010]. Dostupné na World Wide Web:
<<http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/Turning%202010%20CZ%20prog.pdf>>.
35. *Soustružení – těžké hrubování*. PRAMET TOOLS, s.r.o., Šumperk, Česká republika. 2010. [online]. [cit. 1.5. 2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://pramet.com/download/katalog/pdf/Roughing%20CZEN%20scr.pdf>>.
36. *Všeobecné soustružení*. AB SANDVIK COROMANT. Sandviken, Sweden. 2009. [online]. [cit. 1.5. 2010]. Dostupné na World Wide Web:
<http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/catalogue/CZE/MC_2009_Klick_CZE_A.pdf>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
bcc	[-]	Kubická prostorově středěná mřížka
c	[m]	Celková délka trhlin
CIP	[-]	Cold Isostatic Pressing – izostatické lisování za studena
CVD	[-]	Chemical Vapour Deposition – chemické napařování
CVI	[-]	Chemical vapor infiltration – chemická infiltrace
EBS	[-]	Electron BackScatter Diffraction – Elektronový rastrovací mikroskop v režimu zpětně odražených elektronů
ESC	[-]	Electrostatic Spray Coating – elektrostatické rozprašování
F	[N]	Síla
fcc	[-]	Kubická plošně středěná mřížka
FGSK	[-]	Funkčně gradientní slinuté karbidy
hcp	[-]	Šesterečná mřížka
HFCVD	[-]	Hot Filament CVD – CVD se žhavicím vláknem
HV	[MPa]	Tvrdość podle Vickerse
K _{IC}	[MPa.m ^{1/2}]	Lomová houževnatost
KNB	[-]	Kubický nitrid bóru
MPCVD	[-]	Microwave Plasma CVD – CVD s mikrovlnným doutnavým výbojem
PCVD	[-]	Plasma CVD
PD	[-]	Polykrystalický diamant
PKNB	[-]	Polykrystalický kubický nitrid bóru
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování
SK	[-]	Slinuté karbidy
u	[m]	Délka úhlopříčky vtisku
VBD	[-]	Vyměnitelné břitové destičky