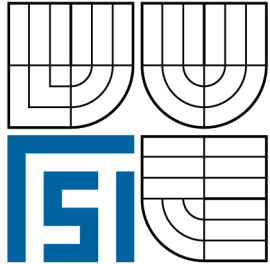




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SLINUTÉ KARBIDY A JEJICH EFEKTIVNÍ VYUŽITÍ

CEMENTED CARBIDES AND THEIR EFFECTIVE USE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAROSLAV SALAJKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc.

BRNO 2009

Zadání

Licenční smlouva

ABSTRAKT

Cílem této práce je komplexní zpracování získaných technických poznatků v oblasti řezných materiálů, zejména vyhodnocení a porovnání pracovních možností, které přední světoví výrobci doporučují pro efektivní využití a aplikaci povlakovaných respektive nepovlakovaných slinutých karbidů. Dále charakteristika slinutých karbidů z hlediska výroby, způsobu označování, fyzikálně mechanických vlastností a jejich užití. Porovnání slinutých karbidů v sortimentu výroby nejvýznamnějších světových producentů nástrojů a nástrojových materiálů. Hodnocení řezivosti nástroje. Doporučené oblasti a pracovní podmínky pro efektivní využití slinutých karbidů a jejich technicko - ekonomické hodnocení.

Klíčová slova

slinuté karbidy, řezné materiály a nástroje, metody povlakování, prášková metalurgie

ABSTRACT

The aim of this thesis is a complex processing of obtained technical findings in the area of cutting materials, especially the evaluation and comparison of work possibilities recommended by prime world manufacturers for effective usage and application of coated and uncoated cemented carbides. Characteristics of cemented carbides in terms of production, marking method, physical and mechanical properties and application. Comparison of cemented carbides in the range of production of the most significant world tool and cutting material producers. Cutting efficiency evaluation of the tool. Recommended areas and operating conditions for effective usage of cemented carbides and their technical economic evaluation.

Key words

cemented carbides, cutting materials and tools, coating methods, powder metalurgy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SALAJKA, J. *Slinuté karbidy a jejich efektivní využití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 110s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.

Prohlášení

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

Květen 2009

.....
Bc. Jaroslav Salajka

Poděkování

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

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1 Řezné materiály.....	10
1.1 Rozdělení řezných materiálů.....	11
1.2 Požadavky kladené na řezné materiály.....	11
2 Slinuté karbidy.....	13
2.1 Historický vývoj slinutých karbidů.....	14
3 Prášková metalurgie.....	15
4 Výroba slinutých karbidů.....	17
4.1 Suroviny pro výrobu slinutých karbidů.....	17
4.1.1 Wolfram.....	19
4.1.2 Karbid wolframu.....	20
4.1.3 Titan.....	20
4.1.4 Tantal a niob.....	21
4.1.5 Chrom a vanad.....	21
4.1.6 Kobalt.....	22
4.2 Obecný postup výroby slinutých karbidů.....	23
4.2.1 Mletí prášku WC-Co.....	24
4.2.2 Lisování směsi WC-Co.....	25
4.2.2.1 Izostatické lisování za studena (CIP-Cold Isostatic Pressing).....	25
4.2.2.2 Izostatické lisování za tepla (HIP-Hot Isostatic Pressing).....	26
4.2.2.3 Lisování ve formovacích lisech.....	27
4.2.3 Slinování výlisku WC-Co.....	27
4.2.4 Posloupnost jednotlivých kroků při výrobě slinutých karbidů.....	30
5 Rozdělení a značení slinutých karbidů.....	31
6 Povlakované slinuté karbidy.....	34
6.1 Vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů.....	34
6.2 Fyzikální a chemické vlastnosti povlaků.....	35
6.2.1 Vlastnosti povlaků.....	35
6.2.2 Typy povlaků.....	37
6.2.3 Nové moderní povlaky.....	39
6.2.4 Nové typy vrstev.....	40
6.3 Metody povlakování.....	41
6.3.1 CVD technologie (Chemical Vapour Deposition).....	42
6.3.2 PVD technologie (Physical Vapour Deposition).....	43
6.3.3 Modifikace základních povlakovacích metod.....	45
6.3.4 Předdepoziční a podepoziční úpravy povlakovaných SK.....	46
7 Struktura a vlastnosti slinutých karbidů.....	46
7.1 Systém WC-10Co.....	46
7.2 Systém WC-tiC(Tac)-10Co.....	46
7.3 Model tvrdosti slinutých karbidů.....	49
7.4 Mikrostruktura a lomová houževnatost slinutých karbidů.....	50
7.5 Mikrostruktura a vlastnosti povlaků.....	52

8	Hodnocení řezivosti nástroje	55
8.1	Opotřebení řezného nástroje	55
8.2	Řezivost nástroje	58
8.3	Trvanlivost řezného nástroje	60
9	SK v sortimentu nejvýznamnějších světových producentů nástrojů	61
9.1	Pramet Tools	62
9.2	Seco Tools AB.....	69
9.3	AB Sandvik Coromant	75
9.4	Iscar Metals	82
10	Porovnání nástrojových materiálů čtyř výrobců dle řezných podmínek	86
11	Technicko-ekonomické hodnocení	91
11.1	Technicko-ekonomická optimalizace řezných podmínek	93
11.2	Tool management.....	95
11.3	Oblasti vývoje řezných materiálů a nástrojů.....	97
11.3.1	Miniaturizace a mikroobrábění.....	98
11.3.2	Mazání MQL	99
11.3.3	HSC – High Speed cutting (vysokorychlostní obrábění)	99
	Závěr.....	100
	Seznam použitých zdrojů.....	102
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	108
	Seznam příloh.....	109

ÚVOD

Současný vývojový trend pro řezné nástroje nemá tendenci vést k objevování zcela nových materiálů, ale spíše k optimálnímu využití již existujících materiálů a přesné specifikaci jejich aplikací, které jsou omezeny fyzikálními, chemickými, mechanickými a tepelnými vlastnostmi materiálů.

Řezné materiály významně přispívají ke splnění hlavního požadavku obrábění, tj. zajištění vysoké produktivity výroby a dosažení požadované jakosti obrobeného povrchu. Vývoj technologií řezných materiálů zajišťuje nejen zvyšování výkonů při úběru materiálu, ale i vyšší rozměrovou a tvarovou přesnost, jakost obrobených povrchů a zkrácení časů obrábění. Soudobým problémem je zcela určitě neschopnost nalézt nebo vyrobit univerzální řezný materiál pro většinu obráběných materiálů. Důsledkem je stále větší důraz na vhodný výběr řezného materiálu ve vztahu k obráběnému materiálu v souladu s pracovními podmínkami, aby bylo možné optimalizovat řezný výkon z hlediska produktivity práce, časových požadavků a výrobních nákladů. Specifickým parametrem je objem výroby, při sériové je požadavek na speciální materiál s úzkou oblastí použití, naopak u kusové se prosazuje zvyšování univerzálnosti efektivního použití v co nejširším spektru obrábění.

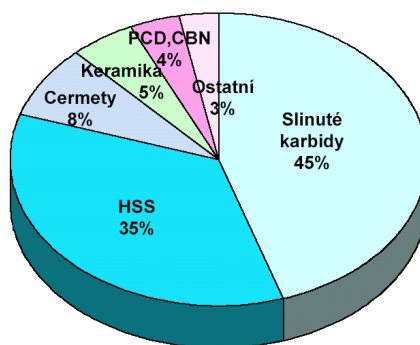
Existuje mnoho cest jak zvolit správný řezný materiál pro obráběcí proces jako část výroby. Bohužel mnohé z těchto cest jsou ty nejmenšího odporu, nebo malého úsilí toho, kdo o výběru rozhoduje. Volba nástrojového materiálu je hnána mnoha silami, včetně poutavé reklamy a usměvavého dealera. Mnoho společností prodávajících řezné nástroje nabízí výhradně nízké cenové nabídky bez ohledu na výkon a vhodnost daného materiálu. Nízká produktivita, dlouhé prostoje při výměně nástrojů a zčásti nepřijatelná kvalita výroby je často výsledkem použití nevhodných materiálů a nástrojů, které byly nakoupeny za nízké ceny jako primární určující faktor.

Sledování pokroku je mimořádně náročné, poněvadž zahrnuje inovaci stávajících i přípravu nových řezných systémů, v kombinaci se stále vyvíjenými otěruvzdornými povlaky a dokonalejší strukturou základního substrátu. V nabídce jsou zdůrazňovány technické přednosti, což dává uživateli větší možnosti výběru. Široký sortiment novinek na trhu umožňuje na konkrétních řešeních upozornit na řezné materiály, kterými se rozšiřují možnosti efektivního provedení obráběcích operací. Vesměs jde o rozšíření sortimentu stávajícího typu nástrojů z hlediska rozměrového, geometrie řezné části, odlišného upínání a chlazení, utvařeče třísek, použití nových povlaků, které zvyšují výkon řezání a dílčí úpravy nástroje, popřípadě zvýšení kvality provedení, čímž rozumíme zvýšení přesnosti nástroje a především přesnosti obrobeného povrchu, zvýšení tuhosti a opakovatelné přesnosti polohy i upnutí VBD. Komplexní dynamický růst vývoje, výroby a služeb poskytující uživateli všechny potřebné technické informace, které umožní optimální využití řezného materiálu respektive nástroje (doporučené řezné podmínky), je jedinou cestou zabezpečující výrobcům nástrojových materiálů technickou a ekonomickou úspěšnost. Měřítkem úspěšnosti výrobce je i jeho schopnost technicky a přiměřeně časově reagovat na potřeby uživatelů. Týká se to kvality řezných materiálů, rozměrového a tvarového sortimentu nástrojů, rychlosti jejich dodání zákazníkovi, ale i materiálového zabezpečení progresivních strojírenských oborů.

1 ŘEZNÉ MATERIÁLY

Materiál břítu je nejdůležitější částí rezného nástroje. Závisí na něm průběh vlastního procesu obrábění, produktivita a hospodárnost obrábění. Je proto nutné věnovat volbě materiálu břítu nástroje náležitou pozornost. Vývoj rezných materiálů prošel ve 20. století prudkým vývojem, který přinesl do dnešních dnů poměrně širokou škálu různých rezných materiálů. Tento vývoj způsobily tři určující faktory: různé podmínky při rezném procesu, logická potřeba maximální produktivity práce a technologie vysokorychlostního obrábění.

Různé podmínky při rezném procesu vyvolaly potřebu širokého sortimentu rezných materiálů s různými chemicko-fyzikálními, technologickými a mechanickými vlastnostmi.¹⁴

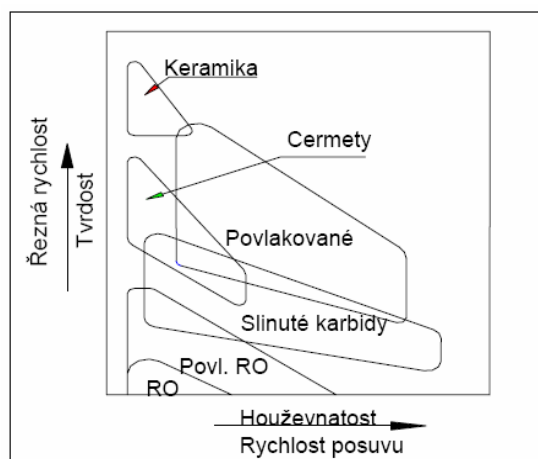


Obr. 1.1 Celosvětová produkce rezných materiálů⁹

Řezný materiál ovlivňuje rozhodujícím způsobem produktivitu, výrobní náklady a kvalitu výroby. Jejich význam je charakterizován náročnými požadavky, ve kterých nástroj pracuje. Při obrábění bývají vystaveny intenzivnímu mechanickému a tepelnému namáhání. To vede k opotřebovávání nebo destrukci nástroje. Řezný materiál musí mít proto větší tvrdost než materiál obráběný, aby mohl rezný klín vniknout do materiálu obrobku a odřezat třísku.¹⁷



Obr. 1.2 Vývoj rezných materiálů



Obr. 1.3 Oblasti aplikace nejpoužívanějších materiálů pro rezné nástroje⁸

1.1 Rozdělení řezných materiálů

Rychlořezné oceli jsou vysokolegovány legurami, v porovnání s ostatními nástrojovými oceli mají několikanásobně vyšší řezivost a pevnost v ohybu. V budoucnu se stále více budou dostávat do popředí povlakované RO spolu s oceli vyráběnými práškovou metalurgií. Tato metoda dokáže vytvořit homogenní strukturu a nestandardní chemické varianty.⁸

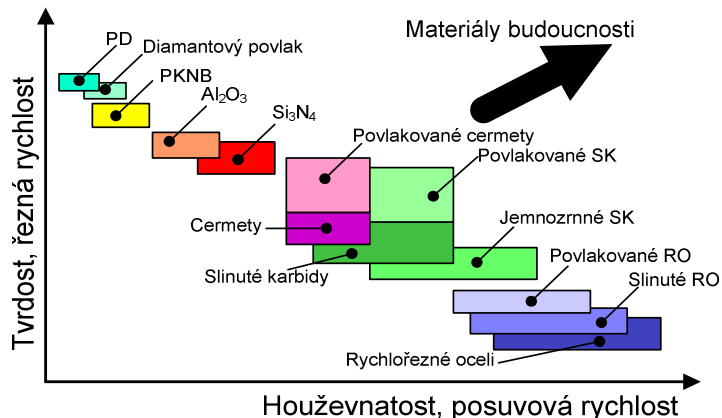
Řezná keramika je určena pro obrábění vysokou řeznou rychlostí pro svou vysokou tvrdost a termochemickou stabilitu a zároveň je omezena nízkou posuvovou rychlostí pro svou nízkou houževnatost. Rozeznáváme dva základní druhy a to na bázi oxidu hliníku (Al_2O_3) a nitridu křemíku (Si_3N_4).⁴

Cermety jsou výhodnou kombinací kovů (houževnatost) a keramiky (tvrdost), jsou odolné proti vydrolování. Využívají se při vyšších řezných a nižších posuvových rychlostech u středních řezů (nízká houževnatost).⁶

Kubický nitrid bóru se stává druhým nejtvrdším materiálem po diamantu až po transformaci své hexagonální mřížky (přírodní nitrid bóru) na mřížku kubickou za vysokých teplot a tlaků. Pro své vlastnosti, vysokou životnost a schopnost dosahovat vysoké jakosti povrchu je vhodný jako nástroj nahrazující broušení třískovým obráběním. Využívá se při obrábění litiny s tvrdostí nad 50 HRC, legované litiny a tvrdých návarů.⁷

Diamant je díky vysoké vazebné energii kubické mřížky nejtvrdší známý materiál. Vyskytuje se jako přírodní a syntetický, oba druhy jsou jak ve tvaru monokrystalickém tak polykrystalickém. Nástroje osazené diamantem se používají na obrábění neželezných kovů a jejich slitin. Jedná se vesměs o materiály, které nemají afinitu k uhlíku. Stále více je tento materiál nasazován při obrábění plastických hmot s abrazivními plnidly a k obrábění kompozitů.⁷

Slinuté karbidy mají velkou oblast uplatnění. Patří do skupiny tvrdých materiálů odolných proti opotřebení. Jsou tvořeny karbidy těžkých kovů spojených měkkým a houževnatým kovovým pojivem. Původně byly vyvinuty ve 20. letech jako materiály na průvlaky pro tvářeni. První SK tvořily WC spojené Co. Během doby byl základní materiál WC-Co upravován a vyráběly se další SK, které se uplatnily při obrábění a tvářeni u součástí, u nichž docházelo k velkému opotřebení. Dnes je asi 50% všech SK využíváno pro výrobu řezných nástrojů.²² Tato diplomová práce je celá věnována SK a proto bude jejich problematika podrobně rozebrána v dalších kapitolách.



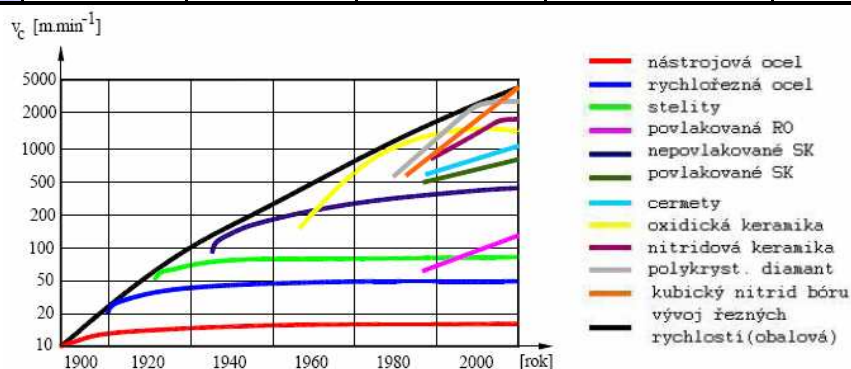
Obr. 1.4 Vliv mechanických vlastností řezného materiálu na pracovní podmínky¹⁹

1.2 Požadavky kladené na řezné materiály

- ❖ pevnost a tvrdost v tlaku, odolnost proti otěru
- ❖ houževnatost a pevnost v ohybu
- ❖ pevnost za tepla a odolnost proti teplotním rázům
- ❖ chemická stálost a neutrálnost chování vůči obráběným materiálům
- ❖ odolnost proti vzniku trhlin a pevnost vazby vnitřních fází
- ❖ vysoká řezivost – schopnost oddělovat třísku

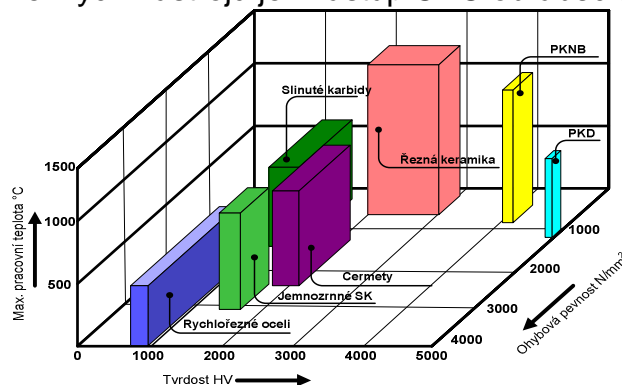
Tab. 1.1 Porovnání vybraných vlastností řezných materiálů⁸

Řezný materiál	Tvrdost [HV]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Rázová houžev. [J.cm ⁻²]
RO	800 - 100	3600 - 4200	2500 - 4500	220 - 240	8 - 30
SK	1200 - 1900	3000 - 5000	1100 - 2200	410 - 690	0,7 - 4
ŘK	2200 - 2500	3500 - 4500	500 - 900	380 - 420	0,3 - 0,5
KNB	4500 - 6000	3000 - 500	660 - 1000	720	-
PKD	6000 - 8000	6000 - 8000	500 - 1000	1160	-



Obr. 1.5 Vývoj řezných rychlostí a nových řezných materiálů ve 20. století¹⁶

Zvyšování produktivity obrábění je možné dosáhnout cestou zvyšování úběru materiálu za časovou jednotku, kterého je možné dosáhnout jen cestou zvyšování řezných parametrů (v_c , f , a_p). Obráběcí operace, které začátkem 20. století vyžadovaly např. 100 minut, trvají dnes při používání nejnovějších řezných materiálů několik málo minut, což představuje mohutný posun z hlediska zkracování výrobních časů. Nezanedbatelným argumentem při zvyšování řezných parametrů u řezných nástrojů je i nástup CNC obráběcích center.¹⁵



Obr. 1.6 Vlastnosti nástrojových materiálů¹⁹

2 SLINUTÉ KARBIDY

Slinuté karbidy jsou nástrojové materiály vyráběné práškovou metalurgií, jejichž struktura je tvořena karbidy vysokotavitelných těžkých kovů, především karbidu wolframu (WC) a karbidu titanu (TiC) a pojícím kovem, nejčastěji nízkotavitelným kobaltem (Co). Jako přísady se používají karbidy tantalu (TaC) a niobu (NbC).¹² SK, nesprávně tvrdokovy, jsou materiály vytvořené stmelěním velmi tvrdých zrn W-monokarbidu v pojivové hmotě pevného Co kovu - jeho kapalnou fází v procesu slinování. Čili nejsou slitinou, ale směsí dvou i více fází.¹⁸ Kombinace wolframového karbidu a kovového kobaltu jako pojiva je vyrovnaný, dobře nastavený a uzpůsobený systém nejen s ohledem na jeho vlastnosti, ale také na chování při spékání.¹⁸

Dodatečné TZ není možné. Protože jsou SK velmi tvrdé, dají se tvarově a rozměrově upravovat jen omezeně pouze broušením, elektroerozivním obráběním a lapováním. Množstvím jednotlivých složek při výrobě SK lze ovlivňovat jejich tvrdost, houževnatost a otěruvzdornost. Při znalosti vlastností jednotlivých přísad se může využít možností jednotlivých typů SK.¹³

Slinuté karbidy nacházejí uplatnění zejména jako řezné nástroje v podobě VBD nebo monolitních celokarbidových nástrojů respektive tvarových nástrojů. Jsou nejpevnější materiály mezi tvrdými nástrojovými materiály. Vlastnosti SK značně kolísají, jedná-li se o tvrdost a houževnatost (ovlivněno teplotou). V praxi to znamená, že struktura a složení SK mohou být velmi rozdílné, což zaručuje velký rozsah užití i při různorodých podmínkách. Různé druhy SK se specifickými vlastnostmi (ovlivněné povlakem, strukturou a složením) skýtají velký počet nejrozličnějších možností jak a co efektivně obrábět. Dnes však převzaly vedoucí roli povlakované SK a v převážné míře tak samostatně aplikované nepovlakované SK vytlačily.

Nepovlakované SK jsou v současné době vhodné pro obrábění Al a pro zvláštní účely.²¹ Dále se SK používají jako činné plochy pro tvářecí nástroje nebo tam, kde je třeba jejich tvrdosti a otěruvzdornosti (drtiče, lisovací desky).

Rok	Nový materiál, technologie
1923÷25	WC-Co
1929÷31	WC-TiC-Co
1930÷31	WC-TaC(WC,NbC)-Co
1933	WC-TiC-TaC(NbC)-Co
1938	WC-Cr ₃ C ₂ -Co
1947÷70	Submikrometrové WC-Cr ₃ C ₂ -Co
1956	WC-TiC-Ta(Nb)C- Cr ₃ C ₂
1959	WC-TiC-HfC-Co
1965÷75	Vysokoteplotní izostatické lisování (HIP), SK pod obchodním označením Keziz, firma Kennametal
1965÷78	TiC, TiN, Ti(C,N), HfC, HfN, Al ₂ O ₃ , CVD povlaky na slinutých karbidech WC-Co
1968÷69	WC-TiC-TaC(NbC)-HfC-Co, WC-TiC-NbC(TaC)-HfC-Co
1969	CVD povlak TiC na vyměnitelné břitové destičce, firma Sandvik - Coromant
1969÷71	Termochemické povrchové kalení
1969÷79	Komplexní karbidy s přísadou Ru
1971	CVD povlak Al ₂ O ₃ , Lux a spolupracovníci
1972	Submikrometrový slinutý karbid WC+Co, firma Wimet, Velká Británie
1973	Vícevrstvý CVD povlak TiC+Ti(C,N)+TiN, Schintlmeister
1973÷78	Vícevrstvé povlaky (karbidy, karbonitridy/nitridy, vícenásobné karbidy/karbonitridy/nitridy/oxidy)
1974÷77	Vrstvy polykrystalického diamantu na slinutých karbidech na bázi WC-Co
1978	PVD povlaky TiC a TiN (iontová implantace), firma Sumitomo
1981	Vícenásobné tenké povlaky typu Al(O,N)
1992÷96	CVD diamantové povlaky
1995	Funkčně gradientní slinuté karbidy (gradientní struktura), Japonsko
1995÷96	CVD povlaky kubického nitridu boru - laboratorní vývoj

Obr. 2.1 Historický vývoj slinutých karbidů ⁴

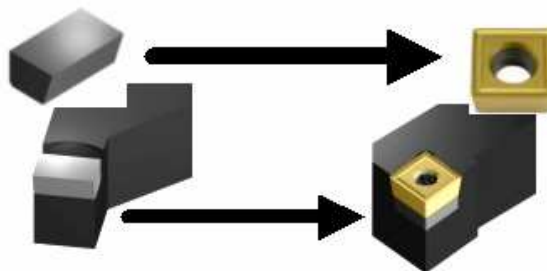
2.1 Historický vývoj slinutých karbidů

Hlavní využití wolframu (ve formě WC) je ve výrobě SK. Po Scheeleho objevu wolframu v roce 1781 trvalo dalších 150 let, než se jeho následovníkům podařilo najít pro wolframový karbid uplatnění v průmyslu.¹⁸ Neúspěšné pokusy vyrobit umělý diamant pomocí elektrické obloukové pece (1896) paradoxně přispívají k největšímu pokroku ve vývoji SK, neboť byly získány tvrdé látky s vysokými teplotami tavení (W_2C a WC). Tyto karbidy byly tvrdé, ale nedaly se využít v průmyslu pro svou křehkost.⁴

Dalším krokem bylo úspěšné vyrobení žhavicího vlákna z wolframového prášku (1910). Prášek se vyráběl redukcí kyseliny wolframové (H_2WO_4) pomocí H při teplotách 950°C. Redukce byla prováděna v rotačních trubkových pecích a zrnitost byla sledována díky mikroskopické analýze mědi infiltrovaného vzorku. Vzniklý karbid obsahoval zrna o velikosti 2-4 μm .¹² V roce 1923 Karl Schröter smíchal C s wolframovým práškem a získal tak karbid mikrometrické zrnitosti. Následně smíchal tento WC s pojivem (práškem houževnatého kovu – Co) a vznikl tak tvrdý materiál s nízkou pórovitostí, ale zároveň vysokou pevností. To vedlo k tomu, že se SK typu WC-Co začal aplikovat jako řezný nástroj. V roce 1926 byl představen karbid na bázi WC-Co s názvem WIDIA (Wle DIAmant = tvrdý jako diamant) od firmy Krupp, který obsahoval 94% WC a 6%Co, vykazoval 3x vyšší v_c než RO, avšak nevýhodou byla tvorba výmolů na čele břitu vlivem difúze a tím nízká trvanlivost nástroje.⁴

Následný vývoj SK byl ovlivněn použitím TaC a VC jako inhibitorů růstu zrna tj. zabránění růstu zrna při slinování a použití TiC jako základu pro SK typu WC-TiC-Co. Zkouškami bylo prokázáno, že trvanlivost nástroje se zvyšuje se snižováním zrnitosti SK. Tehdejší velikost zrna (0,5÷3 μm) závisela na teplotě a době slinování. Jako přísada pro zvýšení tvrdosti byl použit Cr (0,2%), takto obohacené karbidy vykazovaly tvrdost 91HRA. Cr byl posléze v kombinaci spolu s V přidáván do SK jako činitel pro řízený růst zrna v průběhu slinování.⁴ Jemnozrnné SK s velikostí zrna do 1 μm a obsahem Co 3 až 15% (tvrdší a pevnější než SK do té doby) byly dalším přínosem ve vývoji SK. Hodnoty pórovitosti a pevnosti byly zlepšeny vysokoteplotním izostatickým lisováním či reaktivním rozstříkáváním (třídění prášků - pórovitosti). Následoval posun v podobě řízení obsahu C s přesností 0,03% v WC.¹²

Dalším mezníkem ve vývoji SK jako nástroje resp. VBD byl přechod z pájeného upevnění nepovlakovaných VBD k držáku na mechanické upínání povlakovaných VBD šroubem. To přispělo k rozvoji technologie obrábění, utvařeče třísek a celkové úpravě geometrie nástroje i rozvoje povlaků a povlakovacích technologií.



Obr. 2.2 Přechod s pájených nepovlakovaných VBD na mechanicky upínané povlakované VBD ²

3 PRÁŠKOVÁ METALURGIE

SK patří k nejdůležitějším výrobkům PM. Jejich využití je u materiálů pro nástroje a součásti odolné proti opotřebení.²⁴ V porovnání s ostatními technologiemi zpracování kovových materiálů je prášková metalurgie (PM) relativně mladým ale progresivním odvětvím. Jak název napovídá, základním meziproduktem v této technologii je kovový prášek. Prášková metalurgie je technologie, při které jsou zhotovovány polotovary nebo hotové výrobky spojováním kovů nebo kovů s nekovy ve formě prášků působením tlaku a tepla při teplotách nižších než je teplota tavení alespoň jedné ze spojovaných složek.²³ Technologie PM dnes dokáže zpracovat téměř všechny kovy a jejich slitiny a to i ty, které jsou běžnými hutními procesy jen obtížně zpracovatelné. Dle požadavků na konečné vlastnosti výrobků se používají 3 postupy výroby:

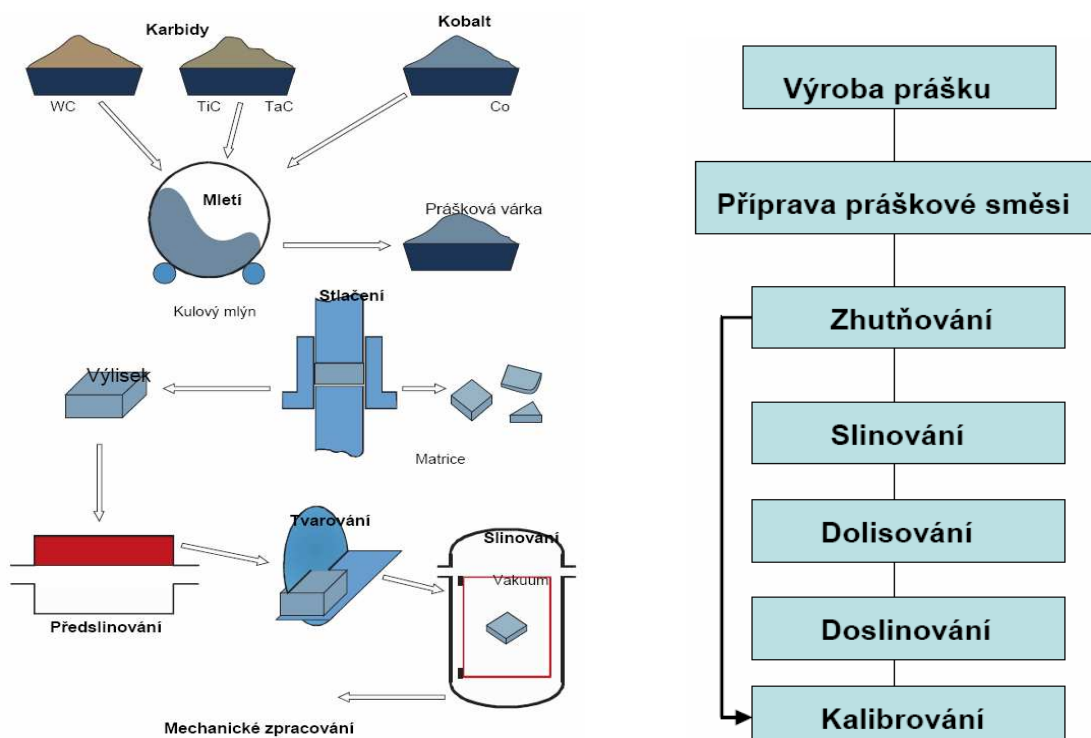
1) PRÁŠEK → ZHUTŇOVÁNÍ → SLINOVÁNÍ

2) PRÁŠEK → ZHUTŇOVÁNÍ → SLINOVÁNÍ → KALIBROVÁNÍ

3) PRÁŠEK → ZHUTŇOVÁNÍ → SLINOVÁNÍ → KALIBROVÁNÍ → SLINOVÁNÍ

Rozměrová a tvarová přesnost vyráběných součástek je ovlivněna především druhem prášku a jeho charakteristickými vlastnostmi („zabíhavost“ prášku, jeho vlhkost, mazání, tvarová složitost součástí). Maximální rozměry jsou určeny druhem prášku, požadovanou hustotou a kapacitou lisu.²³

Pro zpracování touto technologií přicházejí v úvahu oxidy a silikáty, nekovy a nekovové tvrdé materiály, kovy a tvrdé látky kovového charakteru. Pro dosažení požadovaných vlastností výrobků je důležitý výchozí stav při přípravě kovových prášků, podmínky lisování, slinování a konečná úprava.²² Mezi nevýhody práškové metalurgie patří menší hutnost a tím i pevnost a houževnatost vyrobených materiálů a vysoké náklady na nástroje.



Obr. 3.1 Schéma výroba SK pomocí PM²⁴

PM se používá v případech, kdy není možno dané materiály zpracovat jinou technologií např. při spojování komponent, které se spolu neslévají, při zpracování materiálů s vysokým bodem tavení nebo při sériové výrobě drobných součástí. Dále pokud je PM hospodárnější a dává lepší výsledky než ostatní technologie a při požadavku vysoké čistoty materiálů, dosažení přesného chemického složení nebo potřeby dosažení dané poréznosti struktury.

Výroba prášků - základní surovinou PM jsou prášky kovů a jejich sloučeniny. Prášky lze vyrábět drcením v kulových mlýnech nebo rozprašováním tekutého kovu či fyzikálně-chemicky a to redukcí oxidů, štěpením karbonylů, elektrolytickým vylučováním a chemickým slučováním s nekovy (WC, TiC). Jakost hotových výrobků závisí na vlastnostech prášků a to na chemickém složení, čistotě, velikosti částic, tvaru částic a povrchových vlastnostech.²²

Lisování - tímto procesem se kovové prášky upravují do tvaru výrobků. Zároveň se mění jejich vlastnosti. Zmenšuje se pórovitost, dochází k plastické deformaci částic a zvětšuje se styková plocha mezi zrny. Proces lisování je ovlivněn velikostí a tvarem výlisku, lisovacím tlakem (200 až 690 MPa, úměrně s ním stoupá pevnost výlisku), způsobem lisování (lisování za studena, za tepla, izostatické a vibrační lisování) a přísadami pro usnadnění lisování. Lisováním se vytvoří lepší kontakt mezi částicemi prášku, což umožňuje při zvýšené teplotě dokonalou difúzi v celém průřezu polotovaru.²²

Slinováním - se dosahuje požadovaných vlastností (pevnost, tažnost, tvrdost a el. vodivost). Teplota slinování je nižší než teplota tavení daného kovu. Slinuje-li se směs prášků různých kovů, množství roztavené fáze bývá zpravidla malé, takže tvar výrobku zůstává zachován, ale jeho rozměr se zmenšuje. Smrštění délkových rozměrů činí 17÷25 % za předpokladu, že pórovitost je nulová. Ta ale i při nejmodernějších metodách zpracování činí 1 až 2 %. Podmínky slinování ovlivňuje teplota, čas, prostředí (ochranný plyn, vakuum) a druh slinování (přímé, nepřímé). Teplota slinování bývá většinou 0,8 násobek teploty tavení. Doba slinování bývá 2 až 3 hodiny.²²

Konečná úprava výrobku - slinované výrobky se mohou dále upravovat pro zlepšení mechanických nebo fyzikálních vlastností nebo pro dosažení přesných rozměrů a tvarů. Dodatečnou úpravu slinovaných součástí lze provést pro zvýšení přesnosti rozměrů, zvýšení pevnostních vlastností, zvýšení odolnosti proti opotřebení a zvýšení odolnosti proti korozi.²²

PM je progresivní technologie umožňující získat materiály vysokých užitečných vlastností a mnoha aplikací. V technologii PM lze očekávat značný rozvoj jak v oblasti materiálů, tak i v oblasti jejich zpracování. Hlavní hledisko při uplatňování této technologie je úspora kovů a energií. Slinované kovové součásti se mohou využít i jako náhrada plastů. Hlavní uplatnění se očekává v oblasti nástrojových materiálů a ve výrobě součástí na bázi hliníku (disperzně zpevněných) resp. superslitin pro letecký průmysl.²² U strojních součástí se bude pevnost zvyšovat na 1100 MPa. Vývoj bude zaměřen na zvyšování houževnatosti materiálů s cílem jejich uplatnění za náročných podmínek dynamického namáhání.²²

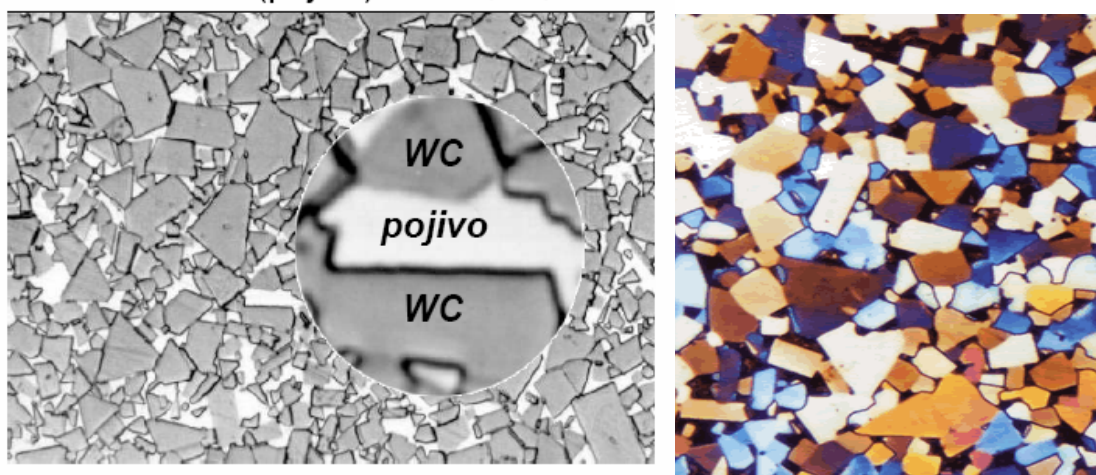
4 VÝROBA SLINUTÝCH KARBIDŮ

Výroba SK se realizuje technologií PM. Celý proces sestává z řady operací, které musí být pro dosažení požadovaných vlastností a mikrostruktury pečlivě prováděny a kontrolovány. Podstatou tohoto procesu je lisování směsi prášku tvrdých karbidických částic s práškem pojícího kovu, nejčastěji Co, a následné slinování při teplotě blízké bodu tavení pojiva. Tím vzniká kompaktní materiál, jehož tvrdost se blíží tvrdosti výchozích karbidů a který vyniká vysokou pevností a tvrdostí.²⁵ SK mohou být použity okamžitě po slinování, popř. mohou být broušeny, leštěny nebo povlakovány. Funkční vlastnosti SK závisí na jejich složení a struktuře, velikosti zrna a na množství použitého pojiva.

Skupina SK typu WC-Co se vyznačuje velmi dobrou odolností proti otěru a širokým využitím při obrábění. Běžné druhy těchto SK obsahují 3 až 25 % objemu Co. Rozměr zrna WC je od 0,5 do 5 μm . Ideální mikrostruktura systému WC-Co musí vykazovat pouze dvě fáze, ostrohranná zrna WC a Co. V posledních letech byly vyvinuty SK typu WC-Co se zrny menšími než 1 μm . Tím se zvýšila jejich houževnatost a pevnost řezné hrany. Zjemnění zrna se dosahuje přidáním 0,25 až 3 % objemu Ta, Nb, V (největší vliv) nebo Cr. Tyto prvky se přidávají před nauhličováním W nebo při přípravě směsi prášku. Obsah C ve SK musí být v úzkém rozmezí, neboť vysoký obsah C má negativní vliv na řezné vlastnosti SK. Nedostatek C zase způsobuje tvoření podvojných karbidů obecně označovaných jako fáze Etha, která způsobuje značné zkřehnutí.²²

Tvrdá fáze => karbid wolframu

Tvárná fáze (pojivo) => Co, Ni, Fe



Obr. 4.1 Struktura slinutého karbidu a SK typu WC-Co^{24,18}

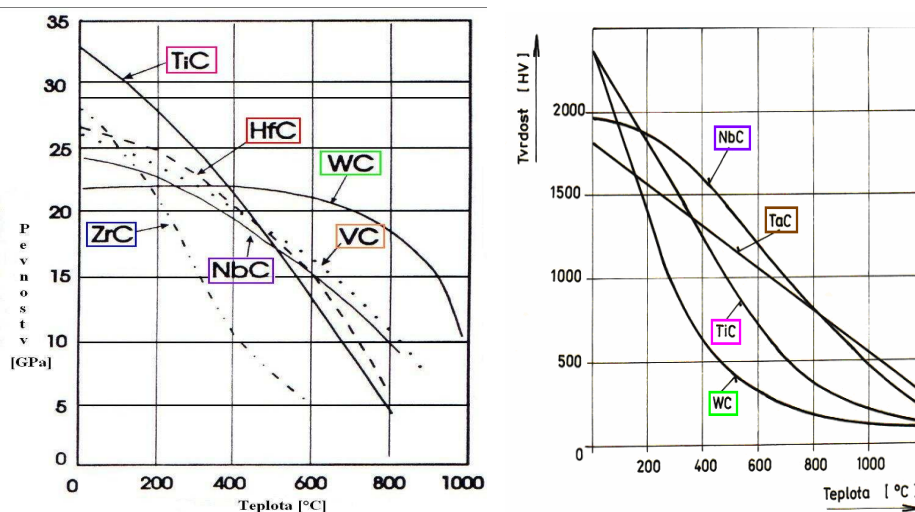
4.1 Suroviný pro výrobu slinutých karbidů

Základem soudobých SK jsou sloučeniny tvrdých částic (karbidů, nitridů a silicidů) spolu s těžkotavitelnými kovy (Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo a W). Tyto sloučeniny se dále zpracovávají do podoby použitelné pro výrobu slinutých karbidů pomocí práškové metalurgie. Karbidy jsou binární sloučeniny C s kovy (reakce při teplotě 2000°C).

Tab. 4.1 Skupiny a typy karbidů dle struktury

Typ karbidu	Příklad	Využití k výrobě SK
Iontové karbidy	CaC_2	NE
Karbidy prvků skupiny Fe	Cr_3C_2	NE
Intersticiální karbidy	TiC, WC	ANO
Kovalentní karbidy	SiC	NE

SK mají mnoho společného s kovy - vypadají tak, chovají se tak, mají dokonce stejný mechanismus deformace (důsledek pohybu dislokací), ale na rozdíl od kovů si za všech podmínek zachovávají vysokou tvrdost a to kvůli obsahu až 92% tvrdých částic na rozdíl od RO, které obsahují pouze 15% karbidů. Nevýhodou je pokles tvrdosti a pevnosti v důsledku zvýšení teploty.⁴

Obr. 4.2 Závislost tvrdosti a pevnosti karbidů na teplotě¹²Tab. 4.2 Vybrané vlastnosti karbidů⁴

VLASTNOSTI / DRUH KARBIDU	WC	TiC	TaC	NbC	VC	ZrC
Měrná hmotnost [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	15,7 ÷ 15,8	4,91 ÷ 4,93	14,4 ÷ 14,5	7,78 ÷ 7,85	5,36 ÷ 5,77	6,59 ÷ 6,66
Tvrdost [GPa]	20,8 ÷ 22,0	28 ÷ 35	16,7 ÷ 25	19,65 ÷ 24	27,2 ÷ 29	25,5 ÷ 29,5
Modul pružnosti v tahu [GPa]	620 ÷ 727	269 ÷ 510	285 ÷ 560	338 ÷ 580	422 ÷ 430	348 ÷ 440
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	262	186	214	-	157	172
Modul objemové pružnosti [GPa]	-	240 ÷ 390	414	-	390	207
Pevnost v tahu [MPa]	350	-	-	-	-	-
Pevnost v ohybu [MPa]	550 ÷ 560	240 ÷ 400	350 ÷ 400	300 ÷ 400	-	-
Poissonovo číslo [-]	0,18	0,191	0,24	-	0,22	0,191
Koeficient tření proti oceli [-]	-	0,23 ÷ 0,25	-	-	-	-
Teplota tavení [°C]	2627 ÷ 2870	3160 ± 100	3540 ÷ 3 983	3490 ÷ 3600	2648 ÷ 3327	3260 ÷ 3540
Bod varu [°C]	-	4300	5500	-	-	5100
Souč. délkové roztažnosti [10^{-6}K^{-1}]	4,42 ÷ 5,2	6,52 ÷ 8,6	6,29 ÷ 6,6	6,52 ÷ 6,9	7,2 ÷ 7,3	6,1 ÷ 7,3
Měrná tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	63 ÷ 121,8	21	22 ÷ 22,2	14,2 ÷ 30	38,9	20 ÷ 20,5
Měrný odpor [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]	17 ÷ 53	50 ÷ 68	25	35	60	45 ÷ 55

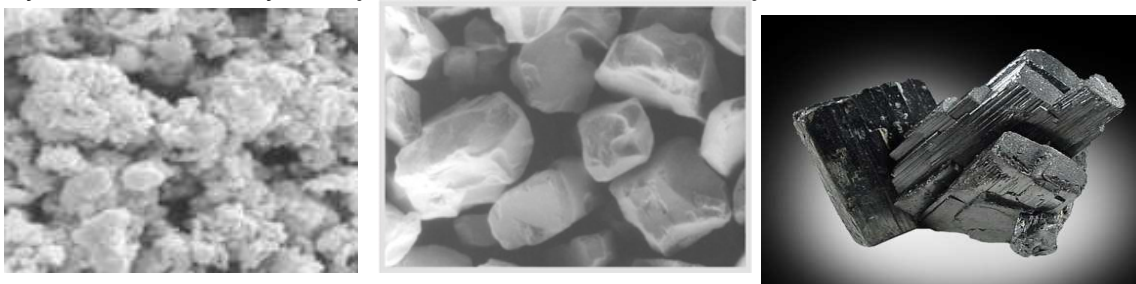
Tab. 4.3 Základní fyzikální vlastnosti prvků užívaných k výrobě SK ²⁶

Název	Značka	Teplota tání [°C]	Teplota varu [°C]	Hustota [g/cm ³]	Tvrdość [HB]
Wolfram	W	3422	5555	19,3	380
Kobalt	Co	1495	2870	8,9	700
Titan	Ti	1668	3287	4,506	716
Tantal	Ta	3017	5458	16,69	800
Niob	Nb	2477	4744	8,57	736
Chrom	Cr	1907	3350	7,47	1120
Vanad	V	1910	3407	5,5	628

4.1.1 Wolfram

Wolfram (Tungsten) je šedý až stříbrně bílý kov. Byl separován z wolframové rudy WO_3 . Chemicky je kovový wolfram velmi stálý. S kyslíkem a halogeny reaguje až za značně vysokých teplot.²⁶ Suroviny pro výrobu wolframové rudy se nacházejí v Asii (Čína – 75% celkové produkce). Jsou to minerály – Scheelit ($CaWO_4$) a Wolframit ($(Fe,Mn)WO_4$).⁴

Praktické použití W se odvozuje od jeho vysoké hustoty a obtížné tavitelnosti. Běžně se s ním setkáme jako s materiálem pro výrobu žárovkových vláken. Ve slitinách se přídavek wolframu projeví především zvýšením tvrdosti a tepelné odolnosti. Pseudoslitiny W (s Ni, Fe a Co, obsah W 91–96 hm.%) vyrobené PM se využívají pro výrobu rezných nástrojů ze SK.²⁶

Obr. 4.3 Snímek práškového WO_3 (5000x), detail WC a Wolframit ^{28, 29}

Výroba WO_3 z wolframitu je proces zpracování bíle krystalické látky APT $(NH_4)_{12}H_2W_{12}O_{42} \cdot 4H_2O$, z které se za teplot 400–800°C ohřevem v rotačních pecích získá modrý oxid (sloučenina WO_3 , NH_4 a H) a z něj oxid wolframu. Redukce oxidu wolframu vodíkem je řešena v průběžných pecích, kde dochází ke styku s proudem H. Pórovitost prášku W je dána podmínkami redukce (hlavně teplotou). Lze dosáhnout zrnitosti od 0,2 μ m do 60 μ m.²⁷

Při výrobě wolframového prášku redukcí uhlíkovými sazí dochází v průběžných pecích k žhání směsi těchto sazí s WO_3 za teplot 1400–1800 °C. Směs WO_3 a sazí je slisována do briket a prostupuje pecí. Cílený prášek wolframu je získán z těchto briket pomletím v kulových mlýnech (attritorech). Redukci uhlíkem lze provádět i z plynné fáze, pomocí oxidu uhelnatého.²⁷

4.1.2 Karbid wolframu

WC je nejpoužívanější karbid pro výrobu SK. Výroba probíhá v elektrické odporové peci s grafitickou trubicou (ohřívací těleso) v nauhličené atmosféře. Proces karbidizace (1 až 2 hodiny) může probíhat i v atmosféře metanu nebo vodíku kdy se tvoří přechodová fáze se stechiometrií W_2C . WC je stabilní při pokojové teplotě a jeho rozpustnost začíná na 2380°C. Proces jeho získávání je chemická reakce práškově čistého wolframu s uhlíkem (6,13 hm%) v podobě grafitu. Tato směs je nejprve rozemleta v kulových mlýnech a poté slinována do briket za teplot 1300 – 2400°C.⁴ Pro omezení růstu zrna (pravoúhlý či trojúhelníkový tvar) se přidávají inhibitory V,Cr a Ta.

Dlouhodobý trend ve výrobě WC ukazuje, že ve světě rostou požadavky zejména na submikronové druhy, jimž se říká nanometrické. Proto se stala důležitou optimalizace ekonomie a ekologie jejich přípravy. Jednou z možností, která 20 let poutá odborníky, je využití plazmochemických reakcí, kde procesy vypařování, kondenzace, růstu částic i adsorpce plynů probíhají ve zlomcích sekund. V budoucnu budou metody používající plynné karbidační směsi postupně vytlačovat tradiční technologii karbidace v pevné fázi.²⁸

Z moderních metod průmyslové přípravy karbidu wolframu zmiňují tři, které se jeví nadějně oproti tradičnímu procesu HTC (karbidace za vysokých teplot 1800-2200°C), kdy se získává zrno 1-10 μm .

Proces RCR (Rapid Carbothermal Reduction), kdy směs WO_3+C propadáva vertikálně umístěnou trubicou zahřátou na 2200°C. Reakční čas nepřesáhne 10s. Velikost částic je na úrovni jednotek mikrometrů, avšak praktické zvládnutí pochodu je mimořádně náročné.

Proces CRC (Calcination, Reduction, Carburation), kdy vzniklý produkt má zrnitost pod 500 nm kvůli inhibitorům růstu zrna (Cr_3C_2 nebo VC).

Proces CVR (Chemical Vapor Reaction), kdy výchozí WCl_6 poskytuje reakci se směsí CH_4/H_2 prášek s částicemi 3-500nm. Nákladná technologie!

Zjištění z 80. let, že vytváření plynné fáze $WO_2(OH)_2$ při redukci oxidů wolframu vodíkem způsobuje růst zrna mezistupňů (nižších oxidů) a tím i práškového wolframu transportním mechanismem, změnilo přístup k termodynamickému i kinetickému řízení technologických postupů.²⁸ Vedle nezastupitelné role WC v materiálech na bázi WC-Co s nejvyšší houževnatostí, aplikovaných ve stále více žádaných obráběcích nástrojích, nalézá WC nové aplikace jako náhrada platinových kovů při katalýze.²⁸

4.1.3 Titan

Lehký šedý kov, vyrábí se z TiO_2 reakcí s hybridem vápenatým. Největší zásoby těchto oxidů jsou v minerálech Rutilu a Ilmenitu. Titan je korozi-vzdorný a relativně tvrdý prvek.²⁷ Výrobu je vhodné provádět ve vakuové indukční peci, protože výsledný TiC má vyšší obsah C a neobsahuje N. Proces redukce oxidu titaničitého uhlíkem (prostřednictvím přechodových fází = vznik nižších oxidů) probíhá za teploty 1300°. Karbid titanu je ze všech karbidů nejtvrdší, ale sám se nepoužívá pro svou křehkost.²⁷

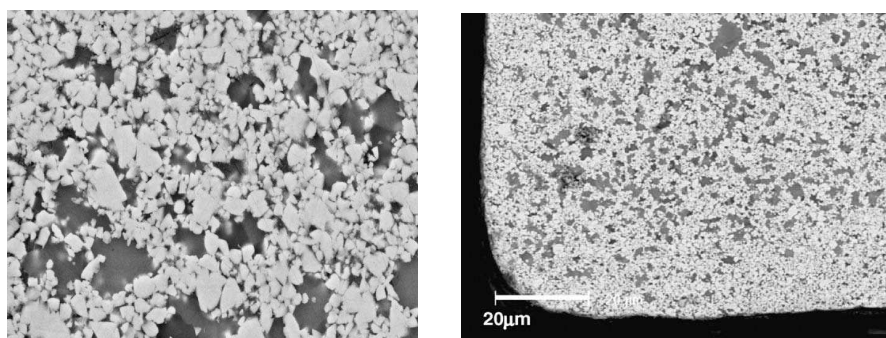
4.1.4 Tantal a niob

Tantal je chemicky netečný měkký prvek, který je obsažen v minerálu s názvem tantalit. Získává se tavnou elektrolýzou z fluor tantaličnanu draselného ($K_2[TaF_7]$) či chemickou reakcí chloridu tantaličného ($TaCl_5$) s hořčíkem. Niob byl dlouho pro své vlastnosti zaměňován s Ta. Jeho odlišnosti respektive existence byla prokázána až za 40 let po objevení tantalu v roce 1844. Získává se aluminotermicky z ($K_2[TaF_7]$) či chemickou reakcí oxidu niobičitého s uhlíkem. Výroba karbidů Ta a Nb (výsledný karbid TaC.NbC) probíhá ve vodíkové atmosféře. Směs Ta_2O_5 , Nb_2O_5 a sazí C (její obsah se mění v závislosti na požadavku vytvořit NbC či TaC) je slinována za teplot 1400°C. Výsledkem je poměrná struktura NbC > TaC díky vyšší relativní atomové hmotnosti Nb.⁴

4.1.5 Chrom a vanad

Chromit ($FeCrO_4$) je železná ruda, ze které se vyrábí chrom pomocí uhlíkové redukce ve vysoké peci. Elementární Cr se vyrábí redukcí oxidu chromitého hliníkem.⁴ Pro aplikaci do SK se využívá tmavě hnědý dikarbid trichromu (Cr_3C_2). Ten se vyrábí ze směsi práškového grafitu a oxidu chromitého. Proces probíhá ve vodíkové atmosféře v trubkové odporové peci za teploty 1600°C.⁴ Vanad je tvrdý, šedo-bílý, kujný kov s vysokými teplotami tání a varu. Většinou je získáván jako vedlejší produkt při zpracování rudy, v níž je obsažen jako sloučenina s kyslíkem. Příkladem je vanadit podvojný chloridvanadičnan olovnatý $PbCl_2 \cdot 3Pb_3(VO_4)_2$ nebo carnotit $[K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O]$ či polysulfid patronit VS_4 . Vanad se vyrábí spékáním rozdrčené rudy s chloridem sodným (NaCl) za teplot 850 °C. Tímto procesem vzniká vanadičnan sodný $NaVO_3$, který se louží vodou. Okyselením získaného výluhu dojde k vysrážení polyvanadičnanu, z něhož můžeme tavením při 700 °C získat černý technický oxid vanadičný V_2O_5 . Tento oxid se zredukuje pomocí kovového hliníku. Příprava čistého kovového vanadu se provádí redukcí VCl_5 vodíkem nebo hořčíkem.²⁶

VC se vyrábí spékáním práškového grafitu s oxidem vanadečným ve vakuové odporové peci v nauhličené atmosféře za teploty 1700°C. Je využíván jako přísada pro zmenšení růstu zrna při výrobě SK (má mnohem lepší efekt než NbC či TaC a to kvůli jeho termodynamické stabilitě). Negativem je vytvoření několika stupňového fazetového rozhraní v systému WC-Co-VC.



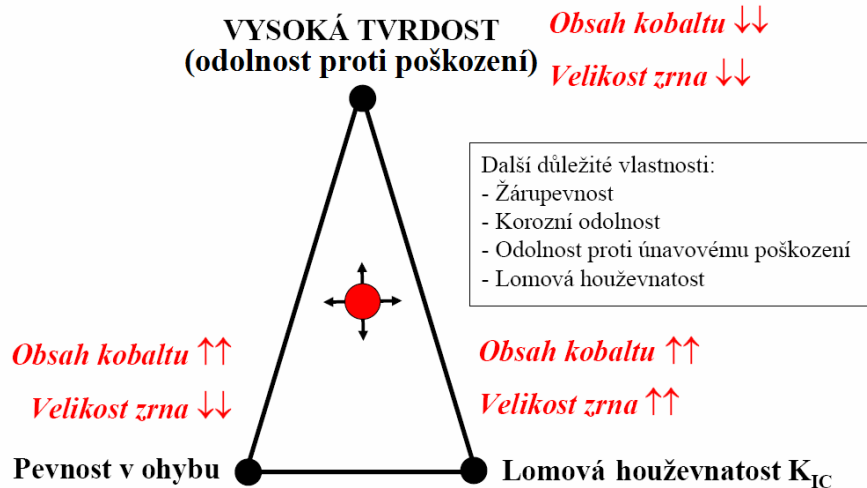
Obr. 4.4 Struktura WC-Co-VC a gradientní zóna z WC-Co-VC³⁰

4.1.6 Kobalt

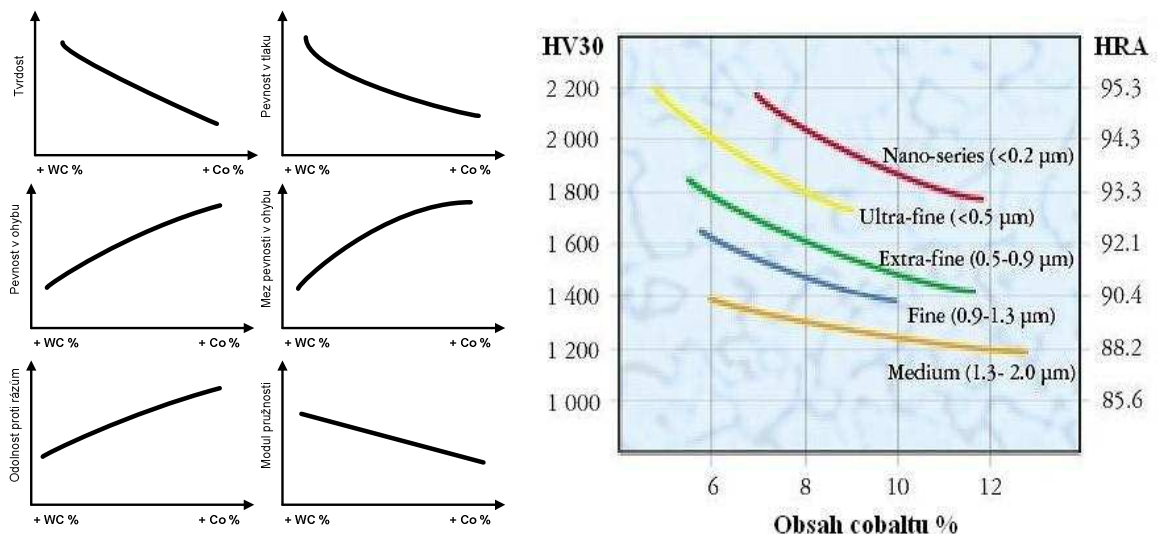
Kovový feromagnetický prvek, stříbrolesklý s modrým nádechem. Je velmi pevný, svou tvrdostí a pevností předčí ocel. Kobalt se vyskytuje v přírodě ve dvou alotropických modifikacích označovaných α -Co a β -Co. Přeměna mezi modifikacemi je malá, což má vliv na fyzikální vlastnosti kovu.²⁶ Nejdůležitější nerosty kobaltu jsou smaltin CoAs_3 , linnaeit Co_3S_4 , kobaltit CoAsS a karolit CuCo_2S_4 .²⁶ V aplikaci pro SK je Co používán jako pojivo, které dodává SK houževnatost. Příprava čistého Co je velmi náročná kvůli problematickému odstraňování niklu, který tvoří podstatnou část kobaltových rud.

Tab. 4.4 Hodnocení mechanických vlastností substrátu SK²¹

Poměr obsahu WC / Co ve struktuře SK	
Tvrdé částice	Pojivo
↑ tvrdost	↑ houževnatost
↑ pevnost v tlaku	↑ pevnost v ohybu
↑ odolnost proti opotřebení	↑ odpor proti lomu



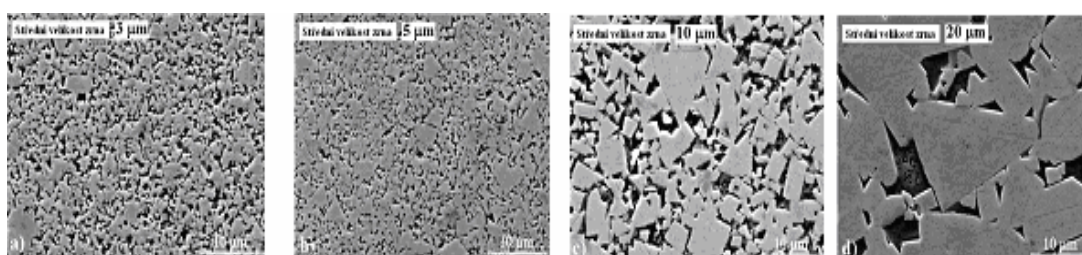
Obr. 4.5 Mechanické vlastnosti SK v závislosti na obsahu kobaltu a velikosti zrna²⁴



Obr. 4.6 Vlastnosti WC-Co v závislosti na obsahu tvrdých částic, pojiva a velikosti zrna^{31, 19}

Tab. 4.5 Klasifikace zrnitosti SK typu WC-Co dle Sandvik Coromant ⁴

Zrnitost struktury SK		Střední velikost zrn WC [μm]
Označení Sandvik	Český popis	
Nano Series	nanometrická	0,1 až 0,3
Ultra Fine	ultrajemná	0,3 až 0,5
Extra Fine	zvlášť jemná	0,5 až 0,9
Fine	jemná	1,0 až 1,3
Medium	střední	1,4 až 2,0
Medium Coarse	středně hrubá	2,1 až 3,4
Coarse	hrubá	3,5 až 4,9
Extra Coarse	zvlášť hrubá	5,0 až 7,9
S-Grades	superhrubá	8,0 až 14

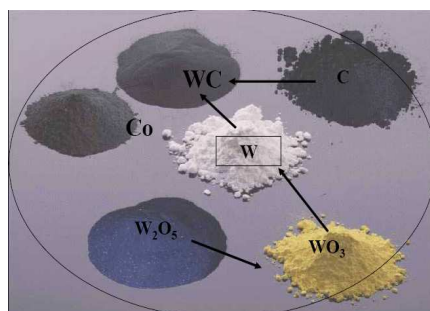
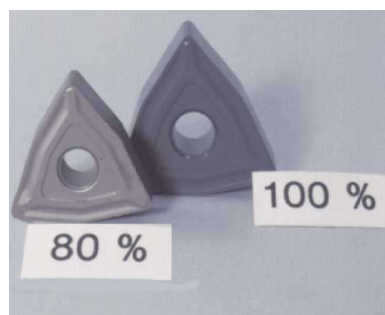
Obr. 4.7 Struktura SK typu WC-Co s různou velikostí zrna ⁴

4.2 Obecný postup výroby slinutých karbidů

Jak už bylo zmíněno výše, SK se vyrábí procesem PM, která umožňuje získat výrobky se speciálními vlastnostmi např. s otěruvzdorností nebo houževnatostí. Výrobky s vysokou porézitou a výrobky tvořící přechod ke kompozitům, které jinými technologiemi nelze vyrobit.¹⁰

PM zahrnuje výrobu prášků, jeho zhutnění (obvykle lisováním a slinováním) do součástí nebo řezných nástrojů. Jde o cílené míšení karbidových prášků a přísad s pojivem v příslušných poměrech a následný proces zhutnění a dosažení požadovaného tvaru výrobku např. VBD.

Hlavní složkou materiálů pro výrobu SK je WC (hexagonální mřížka), TiC, eventuelně TaC (mřížka kubická) o tvrdosti 2000 až 3200 HV a Co jako pojivo. Přísady respektive inhibitory růstu zrna tvoří nejčastěji VC a CrC. Největší vliv na výsledné vlastnosti SK má velikost zrna a poměrný obsah tvrdých částic versus pojivo v substrátu SK. Též výsledné smrštění, se kterým se musí počítat, závisí na obsahu Co a použitém tlaku při slinování¹⁰

Obr. 4.8 Suroviny pro výroby SK ²⁴Obr. 4.9 Smrštění VBD pro slinování ⁴

Nejdůležitějšími faktory při výrobě prášků působícími na jejich technologické vlastnosti jsou vztah povrchu částic k jejich objemu a také zvýšení hustoty vnitřních poruch. Zmenšením velikosti částic prášku se zvyšuje jeho měrný povrch a snižuje povrchová drsnost. Toto vede ke zvýšení kapilárních sil v objemu prášku a označuje se jako "**geometrická aktivita**".

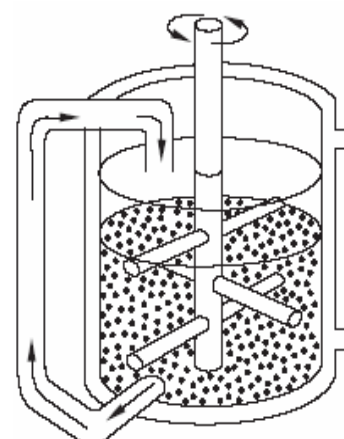
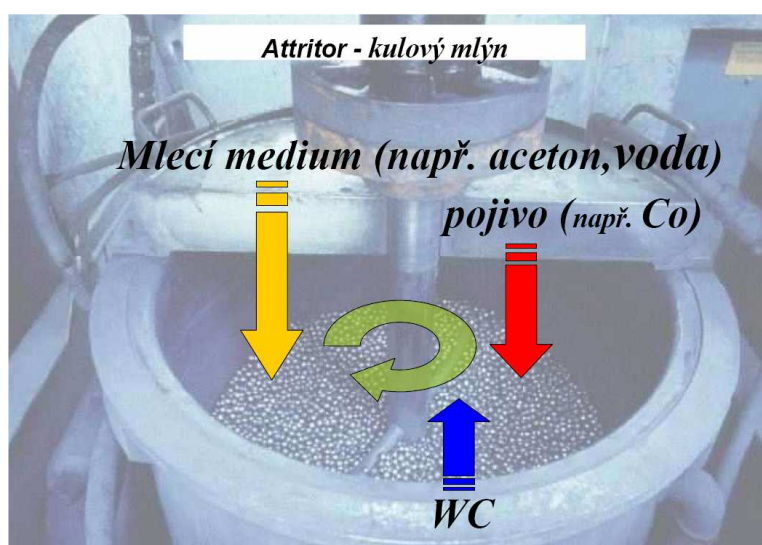
U částic prášků je povrchová oblast silně narušena a obsahuje mnoho prvků, které nejsou tak silně svázány s krystalickou mřížkou základu. Vysoká zbytková energie povrchu vzhledem ke kompaktnímu tělesu způsobuje i zvýšenou reakční schopnost označovanou jako "**strukturní aktivitu**" prášku.

Aktivita prášku a s ní spojené chování při lisování a slinování i konečné vlastnosti hotového výrobku závisí tedy na způsobu zhotovení prášku. Zlepšení slinovatelnosti se dosahuje dalším zpracováním (mletí, mechanická aktivace), které zvyšuje měrný povrch. Tyto prášky však vykazují vyšší odpor proti plastické deformaci při lisování.⁴

4.2.1 Mletí prášku WC a Co

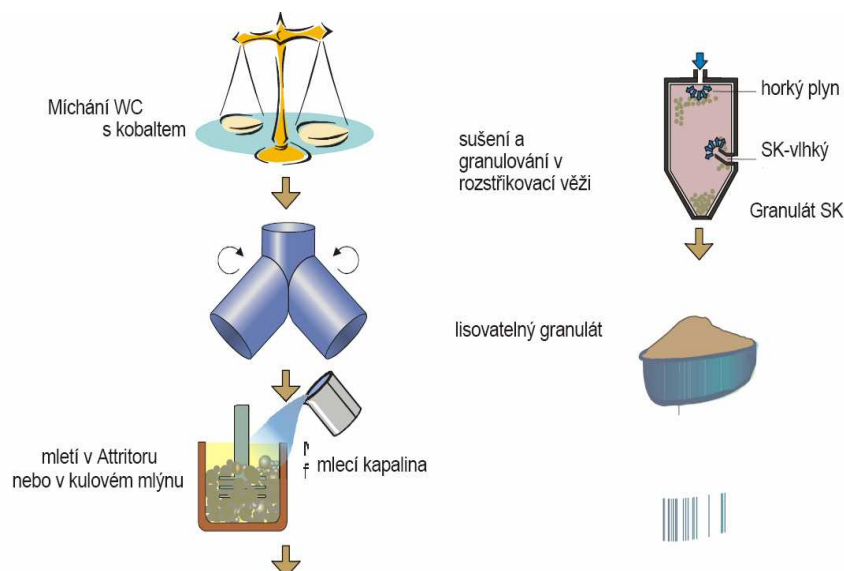
Výroba prášku mletím (drcením) se používá jako samostatná nebo doplňující pro prášky vyrobené jinými postupy. V mlecím agregátu dochází ke zpevňování jednotlivých částic polotovaru až do vyčerpání jejich plastických vlastností. Koncentrace poruch a zvýšená vnitřní energie dosáhne kritických hodnot, jež dávají vznik křehkým mikro a makro trhlinám. Při mletí se postupně zvyšuje disperznost mletého polotovaru.²⁴

K mletí se používá kulových, vířivých, kladívkových a vibračních mlýnů. Mletí je možno provádět za sucha nebo za mokra. Použití povrchově aktivní tekutiny snižuje povrchovou energii částic a tím nejen zabraňuje vytváření hrubých částic, ale také urychluje proces disperzity. Zvláště intenzivní mokré mletí je umožněno v tzv. attritorech, kde mletí je způsobeno hlavně třením mezi mokrou vsázkou a drobnými kuličkami. Tímto způsobem je možno získat částice velikosti pod 0,002 mm. Hlavním cílem je dosažení jemnozrné, homogenní práškové směsi karbidů a pojícího kovu.



Obr. 4.9 Schéma mletí směsi WC a Co v kulovém mlýnu a attritor s přečerpáváním²⁴

Pro zabezpečení optimální hmotnosti zásyvu a lisovatelnosti prášků je nutná určitá velikost jejich částic. Je nutné nejprve výchozí prášky roztřídit na třídy (frakce) a potom smícháním sestavit potřebné granulometrické složení. K práškům se často přidávají pomocné látky zlepšující lisovatelnost (plastifikátory, maziva), zmenšující tření mezi částicemi prášku i mezi stěnou formy, což snižuje její opotřebení i možnost zadření.¹⁰



Obr. 4.10 Výroba granulátu slinutého karbidu²⁴

4.2.2 Lisování směsi WC a Co

Požadovaného tvaru, rozměrů a vlastností výrobků z prášků se dosáhne zhutňováním - formováním. Při vývoji nových technologií je snaha dosáhnout homogenity zhutnění v celém objemu, minimální pórovitosti slinutého materiálu a zvětšení hmotnosti zhotovovaných výrobků s vyšší rozmanitostí tvarů. Metody zhutňování se dělí na dvě skupiny: zhutňování s použitím tlaku (CIP, HIP) a zhutňování bez použití tlaku (volné slinování prášku ve formě).

Účelem lisování je dát směsi přibližný tvar výrobku a relativní hustotu (poměr hustoty výrobku k hustotě odpovídajícího kovu). Objem, který zaujímá sypné těleso, je vyplněný póry, kterých bývá více jak 50%. Největší porozity se dosahuje tehdy, jestliže jsou částice stejné velikosti. Při různé velikosti částic vyplní menší částice prostor mezi většími, čímž se sníží pórovitost.²⁴

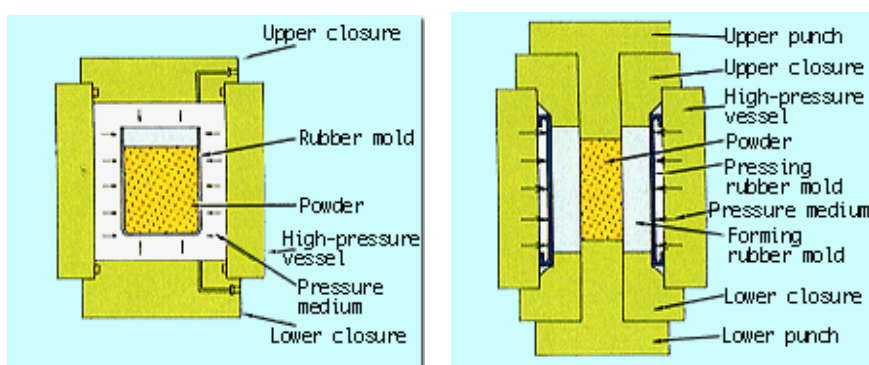
4.2.2.1 Izostatické lisování za studena (CIP – Cold Isostatic Pressing)

Je užíváno při výrobě těles, které mají velký poměr výšky k průměru – tyče. Tento proces se dělí na mokrou a suchou metodu.

V mokré metodě tzv. **wet-bag** je dosaženo stejnoměrné hutnosti vylisku díky pouzdru z elastického materiálu, který se za vysokého tlaku (emulze, 300MPa) chová jako kapalina a za normálního tlaku jako pevná látka. Největším problémem je odstranění sil, které vznikají třením o stěny lisovací formy. Výhody této metody jsou v možnosti vyrobit velký objemné součásti, nevýhodou potom fakt, že metodu nelze automatizovat.

Při suché metodě tzv. **dry-bag** se plastická forma plní přímo v lisovací komoře, která se po uzavření zaplaví. Tlak je vyvíjen pístem (120MPa), ten tlačí na pružnou formu a tím zvyšuje tlak v pracovní kapalině, která obklopuje formu. V závěru píst vytlačí výlisek ven z komory. Proces je vhodný pro velmi hrubé či velmi jemné prášky a malé výlisky.¹⁰

CIP je vhodné pro tvarově složité výrobky. Vibračně zhutněný prášek je uzavřen v elastickém obalu a vystaven postupnému tlaku kapaliny až 600 MPa. Výhodou je vysoká hustota a izotropní vlastnosti. U obou procesů má lisování 3 fáze. Rychlý nárůst tlaku, posléze výdrž na konstantní hodnotě maximálního tlaku a nakonec postupné snižování tlaku (nejdůležitější část pro dosažení konečných vlastností výlisku a zabránění vzniku trhlin).⁴



Obr. 4.11 Metoda Wet-bag a Dry-bag

Čtyři složky práce na zhutnění výlisku jsou: práce potřebná na překonání tření mezi částicemi prášku, práce potřebná na deformování části prášku, práce potřebná na překonání tření mezi částicemi prášku a stěnami formy a práce potřebná na překonání pružných deformací v průběhu lisování.⁴

4.2.2.2 Izostatické lisování za tepla (HIP – Hot Isostatic Pressing)

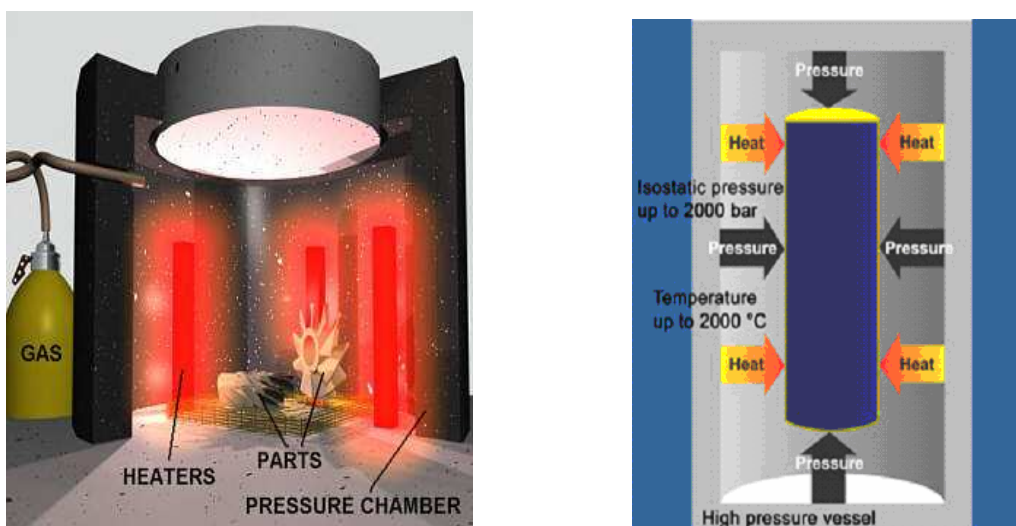
Je to speciální způsob konsolidace. HIP spojuje lisování se spékáním, čímž lze dosáhnout plné hustoty výlisků. Prášek je lisován poměrně nízkým tlakem (200 MPa) při teplotách až 2500 °C ve vakuu. Proces trvá 2 až 6 hodin.

HIP je vhodné pro dosažení bezporézního stavu tj. dosažení 100% hutnosti = 0% pórovitost. Prášek v kovovém obalu je vystaven současnému působení tlaku a teploty. Na těleso působí rovnoměrně ze všech stran tlak inertního plynu (Ar, He). Tělesem je kontejner zaplněný práškem, který se hermeticky uzavře a evakuuje. Kontejner má stejný tvar jako konečný výrobek.³²

Tato metoda více využívaná než CIP, protože umožňuje po slinování odstranit vady (pórovitost a odstranění trhlin vzniklých creepovým namáháním) a zhutnit polotovary rovnoměrně po celém objemu. Významné pro lisování titanových dílů (vysoká únavová pevnost, vysoká afinita ke kyslíku). Polotovary vyráběné HIP jsou bez vnitřního prnutí a lze je snadno obrábět.⁴

Výhodné je provádět lisování za tepla ve slinovací HIP peci, kde dochází k tzv. sinterhipu tj. procesu slinování a následnému okamžitému asi půlhodinovému izostatickému lisování pomocí plynu za tlaku 5 až 10 MPa.

Pokud pomineme komfort (není třeba přemístit směs do jiného zařízení), zkrácení času výroby a částečné ušetření energie, tak je tato metoda velice nákladná. Ekonomicky se tento spojený proces vyplatí pouze při dostatečné sériovosti výroby, nebo při dostatečném počtu materiálově obdobných dílů. Jejich nedostatek však prozatím brzdí rychlejší rozvoj této technologie. Firmy zabývající se technologií HIP nabízejí proto využití zákaznickým způsobem i dalším zájemcům tak, aby naplnily své kapacity.²¹



Obr. 4.12 Slinovací pec a schéma HIP²⁷

Heaters - Ohřev, Parts - součásti, Pressure chamber - Tlaková komora, High Pressure Vessel - Vysokotlaková nádoba, Pressure - Tlak, Heat - Teplota, Casing - Obal.

Tab. 4.6 Vliv efektu HIP na mechanické vlastnosti SK³³

Mechanické vlastnosti	před HIP	po HIP
Relativní hustota [%]	99	100
Tvrдость [HRA]	91	91
Pevnost v ohybu [MPa]	2450	2940
Lomová houževnatost [Mpa.m ^{1/2}]	10	10,5

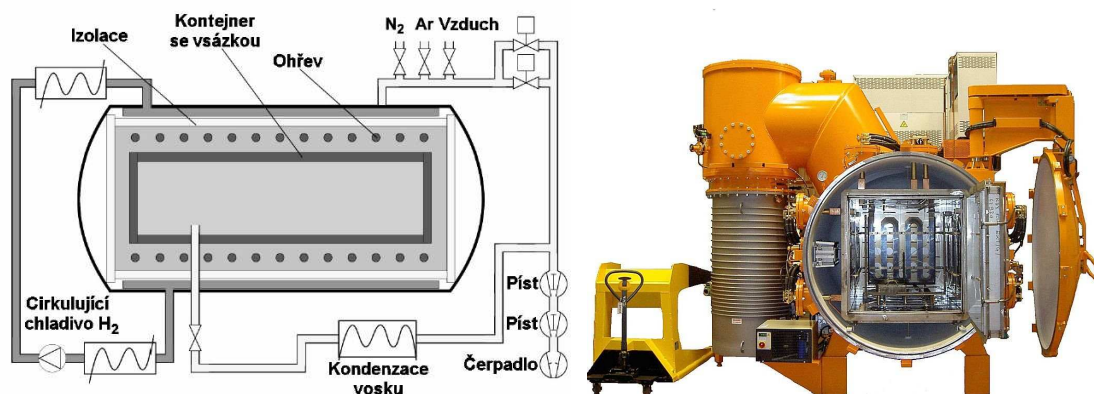
4.2.2.3 Lisování ve formovacích lisech

Plynulý proces lisování vykonává současně horní i dolní lisovník. Jejich vzájemnou polohu detekuje optický nastavitelný snímač. Lis vyvíjí na granulát sílu o velikosti 100 – 550 kN. Celý proces je plně automatizován od šnekového podavače až k vlastní kontrole hotového výlisku. Tato metoda je vysoce produktivní, frekvence výroby je až 30ks za minutu. Ve speciálních případech je možné použít k výrobě výlisků pro VBD hydroimpulzivní lisování, lisování v magnetickém poli, explozivní lisování a lití se zamrazením.³²

4.2.3 Slinování výlisku WC-Co

Slinování je způsob TZ (difúzní cesta) zhutněných částic, při kterém se z pórovitého výlisku stává souvislé těleso za působení teploty a případně tla-

ku. Zvětšuje se celková plocha styku částic, snižuje se pórovitost, zlepšují se fyzikální a mechanické vlastnosti, dochází k objemovému smrštění. Teplota slinování se volí v rozmezí 0,6 až 0,9 teploty tavení. Slinování může probíhat za normálního tlaku nebo pod tlakem vnějších sil. Slinování se provádí v elektrických pecích s ochrannou atmosférou redukčních či inertních plynů nebo ve vakuu. Nejdůležitějšími parametry slinování jsou teplota, doba spékání a ochranné prostředí.³² Slinování má 3 etapy: tvorba a růst mezičásticových spojení, zmenšování objemu spojitých pórů a zmenšování izolovaných pórů.



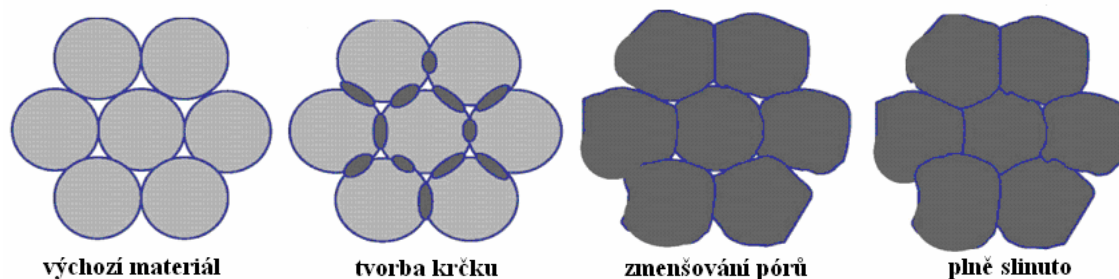
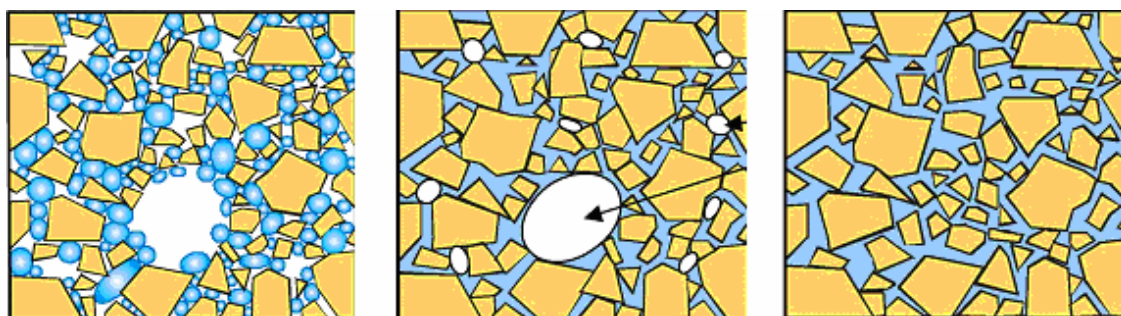
Obr. 4.13 Schéma a reálná slinovací pec⁴

Prášek má oproti masivnímu tělesu podstatně větší povrch tzn. vysokou povrchovou energii. Povrchová energie je hnací silou slinování, neboť se výlesek snaží povrchovou energii snížit. Čím jsou prášky menší, tím je specifický povrch větší a o to rychleji slinování probíhá. Difuze se uvede do chodu dodáním aktivační energie ve formě tepla. Nejdříve probíhá difuze povrchová a na hranicích zrn. Následně při vyšší teplotě probíhá objemová difuze. Dodáním plastické deformace (zvýšení povrchové energie) se urychlí proces slinování.²⁴

Slinování SK patří mezi systémy s přítomností tekuté fáze během slinování tj. teplota slinování je vyšší než teplota tavení jedné ze slinovaných fází, např. u systému WC-Co je to teplota pojiva - Co. Tyto systémy se vyznačují lepší slinovatelností a rychlejším slinutím v porovnání s jinými systémy (aktivační energie na rozhraní kov – tekutá fáze je nižší než na rozhraní kov – atmosféra).²¹

Proces je charakterizován těmito znaky: vytváření skeletu tuhé fáze, částečné zhutnění materiálu v počátečním období vzniku skelné fáze, úplné smáčení tuhé fáze tekutou fází (mezní úhel smáčení karbidu wolframu kobaltem je roven nule) a částečné rozpouštění tuhých komponent (karbidických zrn) v tavenině s následnou krystalizací nových karbidů z tvořících se roztoků.

Proces slinování může probíhat v ochranné vodíkové atmosféře nebo vakuu, což je způsob užívaný pro výrobu VBD. Má obvykle tři etapy: předběžný ohřev na teplotu 700 až 1000 °C, ohřev na pracovní teplotu 1500 až 1600°C a výdrž na této teplotě a ochlazení. Výsledkem je vznik kompaktního materiálu o vysoké tvrdosti a pevnosti, jelikož je jeho struktura tvořena pevnou kostrou pojícího kovu obklopenou zrny křehkých karbidů.⁴

Obr. 4.14 Schéma postupu slinování zrn⁴Obr. 4.15 Schéma průběhu slinování v tuhé fázi, mikropór a následně makropór⁴

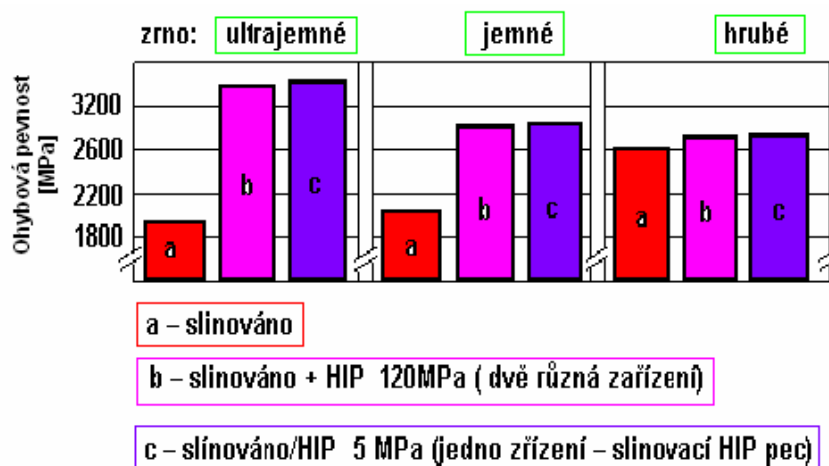
Obsah C je nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím výsledek slinování. Odvíjí se od něj teplota hranice, kdy Co přechází z tuhé do tekuté fáze. Při obsahu C vyšším než doporučené množství čili 6,12 hm% je nežádoucí složkou krystalizace grafit. Pokud je obsah C menší než je požadované množství čili 6,06 hm% a v procesu figuruje rychlé ochlazení, je nežádoucím elementem η -fáze. Je velice křehká a váže Co, čímž zhoršuje vlastnosti výsledné struktury.⁴

Podstatný vliv na vlastnosti SK, zejména pak na jejich tvrdost, má kromě technologických faktorů také typ a velikost tvrdých částic obsažených v substrátu SK. Zároveň i druh pojiva a jeho podíl v matrici.

Tab. 4.7 Vliv obsahu C na proces slinování a krystalizace

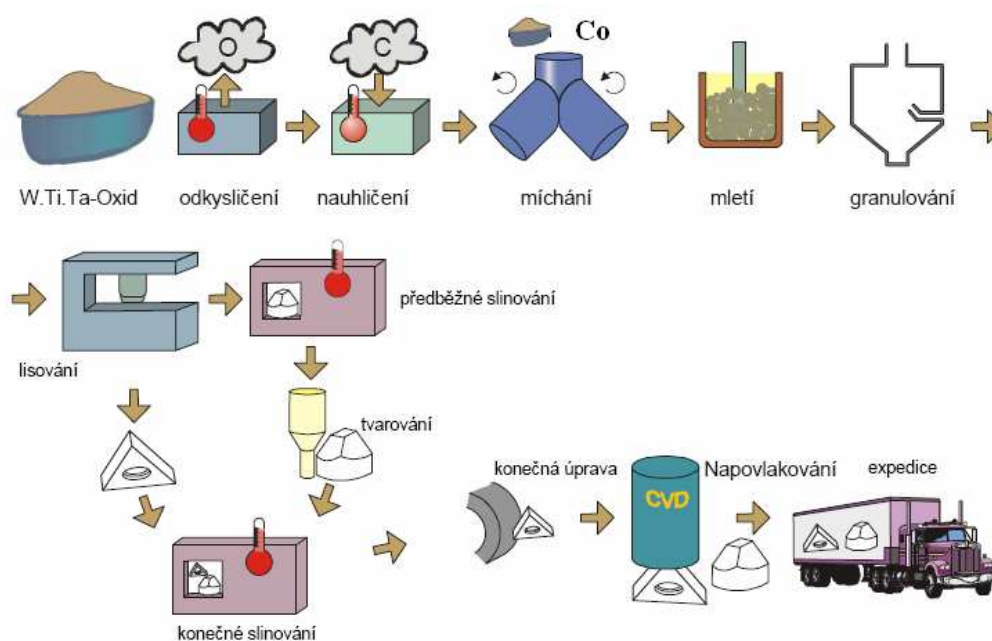
Obsah uhlíku v WC-Co	Stav po krystalizaci	Vlastnosti struktury
C = 6,06–6,12 hm%	WC + γ	↑
C > 6,06–6,12 hm%	WC + γ + grafit	↓
C < 6,06–6,12 hm%	WC + γ + η-fáze	↓↓

Dalším faktorem ovlivňujícím výsledek slinování, např. mechanické vlastnosti SK, je růst zrn, který se děje prostřednictvím tří procesů: při slinovacích teplotách (ovlivňujícími faktory jsou slinovací teplota, délka prodlevy, obsah uhlíku a množství inhibitoru růstu zrna VC či TaC), prostřednictvím rekrytalizace WC přes tekutou fázi a vylučováním sekundárních zrn na primárních zrnech WC.

Obr. 4.16 Závislost ohybové pevnosti na technologii slinování a velikosti zrna ²⁷

4.2.4 Posloupnost jednotlivých kroků při výrobě slinutých karbidů

- ❖ výroba práškového wolframu
- ❖ výroba práškových karbidů (WC, TiC, TaC·NbC, VC, Cr₃C₂) a Co
- ❖ příprava směsi prášků: většinou mokré mletí, následné sušení a granulace
- ❖ formování směsi: lisování a vytlačování
- ❖ předslinování zformované směsi (700–850 °C)
- ❖ úprava tvaru předslinovaného tělesa
- ❖ slinování (1350–1650 °C), nebo slinování spolu s HIP = sinterhip
- ❖ dokončovací operace v podobě broušení
- ❖ povlakování (VBD)

Obr. 4.17 Obecný postup výroby SK ²⁵

5 ROZDĚLENÍ A ZNAČENÍ SLINUTÝCH KARBIDŮ

Nepřeberné množství řezných materiálů. Velký počet nejrůznějších možností obrábění SK se specifickými vlastnostmi. Snaha o možnost popsat v hrubých rysech určitý druh SK. To vše vedlo k vytvoření normy se všeobecnou platností ISO 513. Systém ISO člení SK dle užití do 6 skupin – P, M, K, N, S a H. Jde o rozčlenění obráběných materiálů, které vyvolávají stejné opotřebení řezné části nástroje. V každé skupině jsou uvedena čísla, která udávají různé požadavky na obrábění. Podskupina 01 - dokončovací operace, hlavní oblast použití - podskupina 25 tj. střední obrábění a dokončování ve středním rozsahu řezných podmínek, až po podskupinu 50 - hrubování. S rostoucím číslem se zvyšuje obsah Co a roste nebo se snižuje hodnota mechanických vlastností a v_c . Dále se SK dělí dle řezných aplikací, kdy je zohledněn faktor velikosti zrna HW, HF a HC.

Tab. 5.1 Dělení SK dle řezných aplikací ³⁴

Značení SK	Skupina materiálů
HW	Nepovlakované SK s obsahem primárního WC, zrnitost $\geq 1\mu\text{m}$
HF	Nepovlakované SK s obsahem primárního WC, zrnitost $< 1\mu\text{m}$
HC	Povlakované SK s obsahem primárního WC, zrnitost [-] μm

Tab. 5.2 Závislost vlastností SK na podskupině dle ISO 513 ³⁴

Číslo podskupiny	Obsah Co	Houževnatost Pevnost	Tvrdost Otěruvzdor.	Řezná rychlost	Posuvová rychlost
Rostoucí	↑	↑	↓	↓	↑
Klesající	↓	↓	↑	↑	↓

Tab. 5.3 Rozdělení SK do 6 základních barevně rozlišených skupin

Hlavní skupina	Obráběný materiál
P	uhlíkové, nástrojové, feritické a legované oceli
M	korozivzdorné, austenitické a žáruvzdorné oceli
K	šedé, tvárné a temperované (legované) litiny
N	neželezné kovy a jejich slitiny
S	superslitiny a titan
H	tvrdé materiály



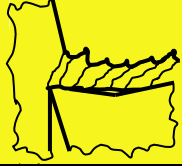
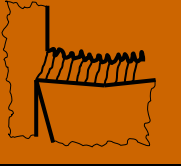

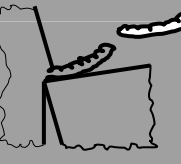
Klasifikační členění ISO do skupin a podskupin P, K, N, S a H nijak nespecifikuje vlastnosti ani rozsah použití vybraného SK (podrobnosti o vlastním řezném materiálu definuje výrobce daného SK). Přesto lze relativně charakterizovat strukturu základních skupin K, P a M :

Tab. 5.4 Charakteristika struktury jednotlivých typů SK

Hlavní skupina	Typ SK	Struktura SK
K	jednokarbidové	WC + Co + (TaC.NbC)
P	dvoukarbidové	WC + Co + TiC + (TaC.NbC)
M	vícekarbidové	WC + Co + TiC + TaC .NbC

* karbidy uvedené v závorce se přidávají jako inhibitory růstu zrna, dále VC, HfC a Cr_3C_2

Tab. 5.5 Schématické znázornění třísek skupin P, M, K, N, S a H ²⁵

Sk.	Ukázka třísky	Charakteristika	Sk.	Ukázka třísky	Charakteristika
P		materiál tvořící dlouhou třísku, například uhlíková ocel	N		měkké materiály, například hliník či jeho slitiny
M		materiál tvořící střední třísku, například žárupevná ocel	S		titan a superslitiny, například inconel či bibus
K		materiál tvořící krátkou třísku, například šedá litina	H		tvrdé materiály, například tvrzená litina či kalená ocel

Skupina P je určena k obrábění materiálů, které vytvářejí dlouhou třísku (uhlíkové oceli, slinované oceli a feritické oceli). Velké řezné síly při obrábění těchto materiálů jsou doprovázeny opotřebením ve formě vymílání na čele. Vysokou odolnost proti difuzi za vysokých teplot a tím zabránění právě výmolům zaručuje přísada v podobě TiC. Výhodou TiC oproti WC je zachování si vysoké tvrdosti při vyšších teplotách, ale naopak nevýhodou je jeho vyšší křehkost a tím nižší odolnost proti abrazi. ¹²

Tab. 5.5 Mechanické vlastnosti SK skupiny P ²⁵

P	Vlastnosti / Podskupina dle ISO 513	P10	P15	P25	P30
	Obsah Co [hm%]	9	10	10	11,5
	Měrná hmotnost [g cm ⁻³]	10,6	11,7	12,6	13,0
	Tvrдость [HV30]	1560	1500	1490	1380
	Pevnost v tahu [MPa]	4500	5200	4600	4450
	Pevnost v ohybu [MPa]	1700	2000	2200	2250
	Modul pružnosti v tahu [GPa]	520	500	550	560
	Lomová houževnatost [MPa m ^{1/2}]	8,1	9,5	10,0	10,9
	Poissonovo číslo [-]	0,22	0,23	0,22	0,23
	Tepelná vodivost [W m ⁻¹ K ⁻¹]	25	20	45	60

Skupina M je určena k obrábění materiálů, které vytvářejí dlouhou až střední třísku (lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny). Tato skupina materiálů má univerzální použití a používá se pro střední a těžké hrubování při přerušovaných řezech. Řezné síly dosahují středních až vysokých hodnot a dochází k vydrolování ostří. ¹²

Tab. 5.6 Mechanické vlastnosti SK skupiny M²⁵

M	Vlastnosti / Podskupina dle ISO 513	M10	M15
	Obsah Co [hm%]	6,0	6,5
	Měrná hmotnost [g cm ⁻³]	13,1	13,3
	Tvrdość [HV30]	1700	1550
	Pevnost v tahu [MPa]	5950	5500
	Pevnost v ohybu [MPa]	1750	1900
	Modul pružnosti v tahu [GPa]	580	570
	Lomová houževnatost [MPa m ^{1/2}]	9,0	10,5
	Poissonovo číslo [-]	0,22	0,22
	Tepelná vodivost [W m ⁻¹ K ⁻¹]	83	90

Skupina K je určena k obrábění materiálů, které vytvářejí krátkou drobnou třísku (litiny, nezelezná slitiny a nekovové materiály). Jsou zde nízké řezné síly, převládá opotřebení abrazivní a adhezní. Pro obrábění této skupiny materiálů se používají SK bez obsahu TiC, čili tento řezný materiál obsahuje pouze tvrdé částice karbidu WC. Ten za vyšších teplot ztrácí svou tvrdost (na rozdíl od TiC), což způsobuje prudké zhoršení vlastností celého břitů, proto je nevhodné použít tyto SK na obrábění skupiny materiálů typu P, které tvoří dlouhou třísku (větší plocha styku a delší doba kontaktu mezi nástrojem a obrobkem) a tím tepelně zatěžují mnohem více čelo nástroje než materiály tvořící krátkou drobnou třísku.¹²

Tab. 5.7 Mechanické vlastnosti SK skupiny K²⁵

K	Obsah Co [hm. %]	4	6		9	12	15			
	Zrnitost ¹⁾	S	J	S	H	S	H	S	H	
	Měrná hmotnost [g cm ⁻³]	15,1	14,9		14,6		14,2	14,0		
	Tvrdość [HV30]	1730	1780	1580	1400	1420	1130	1290	1150	1050
	Pevnost v tahu [MPa]	5700	6000	5400	5000	5000	3600	4500	4100	3400
	Pevnost v ohybu [MPa]	1600	3000	2000	2500	2350	2800	2450	2700	3000
	Modul pružnosti v tahu [GPa]	650	640	630	620	590	600	580	540	510
	Lomová houževnatost [MPa.m ^{1/2}]	6,9	10,8	9,6	12,8	12,3	13,2	12,7	13,8	14,1
	Poissonovo číslo [-]	0,21	0,21	0,22		0,22		0,22	0,23	0,27
	Tepelná vodivost [W m ⁻¹ K ⁻¹]	80	46	80		70		65	65	

* zrnitost : J - jemná, S – střední, H – hrubá

6 POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY

Jako jeden z nejprogresivnějších směrů zvyšování užitečných vlastností řezných nástrojů se v současnosti dynamicky rozvíjí povlakování. Pomocí základních technologií PVD a CVD nebo jejich modifikací se zlepšují mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti povrchů řezných nástrojů. Cílem těchto povrchových úprav je získání tvrdého otěruvzdorného povlaku, depozice vrstvy-multivrstvy, čímž dosáhneme snížení intenzity opotřebení nástroje a tím zvýšení jeho trvanlivosti. Ta vede k významné úspoře nákladů, přičemž komplexní působení povlaku v místě kontaktu nástroje s obrobkem dovoluje výrazně zvýšit technologické parametry výrobního procesu. Výhodou tvrdých otěruvzdorných povlaků je fakt, že jejich aplikace není univerzální. Jejich vlastnosti a tím efektivnost použití je ovlivněna nejen fyzikálně mechanickými vlastnostmi použitého substrátu a typu povlaku, ale i řadou technologických a provozních parametrů.

Mikrostruktura a tedy i mechanické vlastnosti systému tenká vrstva - substrát jsou silně ovlivněny depozičními parametry, úpravou substrátu před povlakováním, vlastnostmi vstupujících prvků a též tloušťkou deponované vrstvy. Povlak tedy není jediný a určující faktor konečného použití, stejně důležitý je výběr základního materiálu, jeho adhezně - kohezivní, mechanicko - fyzikální vlastnosti a tepelná historie či určení metody deponování a konečné použití řezného nástroje v rámci řetězce stroj - nástroj - obrobek.³⁵

Od VBD ze SK se vyžaduje, aby vykazovaly co největší otěruvzdornost a současně i velkou houževnatost. Požadavku odpovídají vyměnitelné břitové destičky s tvrdými povlaky karbidu titanu, nitridu titanu nebo oxidu hlinitého. Povlaky mohou být jednovrstvé nebo vícevrstvé (2 až 3 vrstvy, např.:TiC-Al₂O₃-TiN) s jedním nebo více komponenty. Jejich vývoj je členěn do 4 generací.³⁶

6.1 Vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů

V 60. letech minulého století byly poprvé představeny povlakované VBD z SK firmou Sandvik Coromant (materiál s označením GC125). Tyto povlaky vytvářené CVD metodou na bázi karbidu a nitridu titanu dosahovaly přibližně tloušťky 5μm. Další pokrok nastal v 70. letech respektive 80. letech vytvořením povlaku Al₂O₃ respektive využitím technologie PVD.⁴

1. generace: jednovrstvý povlak na bázi TiC s tloušťkou 7μm, nedokonalá soudržnost podkladu a povlaku vedla k opotřebení nástroje. Nesoudržnost je připisována výrobnímu procesu a technologii.

2. generace: jednovrstvý povlak (TiC, TiCN, TiN) o tloušťce až 13μm. Zlepšenou technologií bylo zabráněno vzniku křehkého eta-karbidu na hranici mezi podkladem a povlakem, čímž bylo dosaženo zlepšené soudržnosti v systému základní substrát – nanesený povlak.

3. generace: vícevrstvý povlak (dvě až tři, případně i více vrstev) s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Nejčastěji bývají jednotlivé vrstvy řazeny v pořadí (od podkladu k povrchu) od nejpřílnavější a nejméně odolné k nejvíce opotřebované a oxidaci vzdorné vrstvě: TiC-Al₂O₃, TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC-Al₂O₃-TiN, TiCN-Al₂O₃-TiN. Do této generace též spa-

dají povlaky $\text{TiCN-Al}_2\text{O}_3$ nanášené metodou MTCVD na podklad, který je tvořen gradientem. Další typy povlaků jsou TiN-Zr či TiN-TiCN -kompozit.

4. generace: speciální vícevrstvý povlak (10 i více vrstev a mezivrstev), přechody mezi vrstvami jsou méně výrazné. K výrobě se využívají materiály povlaků jako u 3. generace. K jejich výhodám patří schopnost zpomalovat šíření trhlin směrem od povrchu povlaku k substrátu. Výroba takového povlaku je umožněna cíleným řízením atmosféry v povlakovacích zařízeních (metoda CVD) nebo odpařováním různých targetů (metoda PVD), podle potřeb technologického postupu povlakování. Do této generace též spadají moderní diamantové, nanokompozitní (dvě vzájemně nerozpustné fáze), gradientní (plynulá změna složení od substrátu k povrchu), superměřkové a inteligentní (schopny sledovat opotřebení) povlaky, které tvoří současné trendy v povlakování slinutých karbidů. Do budoucna se počítá i s povlaky na bázi KNB a TiB_2 .⁴

6.2 Fyzikální a chemické vlastnosti povlaků

V dnešní době je rozvoj povlaků v kombinaci s vhodným základním substrátem největším pokrokem ve vývoji rezných materiálů. Toto zdokonalování závisí na použité technologii povlakování, kombinaci vrstev povlaku a jeho tloušťce. Úzce je s tím také spojen vhodný výběr aplikací obrábění a geometrií nástrojů pro jejich efektivní využití. Od povlaku se vyžaduje, aby splňoval kritéria chemické stability, otěruvzdornosti, tvrdosti a schopnost odolnosti proti oxidaci (1000°C).



Obr. 6.1 Systém tenká vrstva - substrát a schematický řez povlakované VBD¹⁰

Tenké vrstvy je třeba chápat jako systém, neboť vrstva pro svoji tloušťku dosahuje společně se substrátem specifických vlastností a chování. Samotné tenké vrstvy mají na rozdíl od objemových materiálů rozdílné vlastnosti a to nejen z důvodů svojí tloušťky, ale i následkem depozičních procesů, které jsou nerovnovážné a iniciují vznik metastabilních fází.¹⁰

6.2.1 Vlastnosti povlaků

Ve správné volbě výběru povlakovaného SK je obsažena vhodná obráběcí aplikace a předpoklad způsobu opotřebení nástroje respektive systému substrát – povlak vzhledem k jeho vlastnostem. Díky známým vlastnostem základních materiálů lze nastavit rezné podmínky obráběcího procesu v závislosti na optimálních vlastnostech povlaku.

Tab. 6.1 Základní vlastnosti povlaků ⁴

Vlastnosti povlaků		
fyzikální	chemické	
tvrdost	odolnost vůči oxidaci	tepelná stabilita
tloušťka		a
drsnost		chemická stabilita
adheze		
kluzné vlastnosti		

Tvrdost - pro tenké vrstvy i ostatní materiály je tvrdost definována jako "odolnost proti pronikání cizích předmětů". Běžný způsob opotřebení nástrojů je dán abrazivním otěrem. Právě proto je vysoká tvrdost základním parametrem otěruvzdorných vrstev. Mezi vrstvy, které jsou charakteristické vysokou tvrdostí, se řadí diamantové vrstvy, vrstvy s obsahem bóru a nanokrytalické nanokompozity.³⁸

Tab. 6.2 Tvrdost nejběžnějších tenkých vrstev ³⁸

Tenká vrstva	TiN	TiCN	CrN	TiAlN	DLC	TiAlSiN
Tvrdost [GPa]	23	30	17	33	25	45

Tloušťka - z hlediska praktické aplikace je volba tloušťky povlaku na VBD jednou z nejdůležitějších charakteristik. Ta může v konečném důsledku ovlivňovat jak trvanlivost nástroje, tak i řezné síly během obrábění. Toušťka povlaku musí být opravdu "ušita na míru" předpokládanému použití obráběcího nástroje. Tloušťka vrstvy na břitu nástroje se výrazně liší od tloušťky vrstvy na rovných nebo válcových plochách. Současně je ovlivňována průměrem nástroje a způsobem naložení povlakovací komory.³⁸

Drsnost - je ovlivněna jak kvalitou opracování nástroje, tak povlakem. Zdrojem zvýšené drsnosti vrstev jsou makročástice, které vznikají během technologického procesu povlakování. Drsnost povlaku zvyšuje řezné síly, a tak dochází k tepelnému a mechanickému namáhání břitů nástrojů. Tento negativní jev se většina výrobců vrstev snaží minimalizovat úpravou technologie povlakování, popř. dodatečnou úpravou nástrojů po povlakování.³⁸

Adheze - k maximálnímu využití potenciálu otěruvzdorné vrstvy dojde pouze v případě, kdy je perfektně zajištěna její adheze k nástroji. Bez dokonalé přípravy nástroje před povlakováním nelze připravit kvalitní povlak.

Hodnota adheze větší než 60N zajišťuje, že při běžných aplikacích nedojde ke stržení či odloupení vrstvy. Adheze povlaku závisí mimo jiné i na jeho celkové tloušťce a podkladovém materiálu.³⁸

Kluzné vlastnosti – při obrábění dochází se stoupající teplotou ke zhoršování vlastností podkladového materiálu. Snížením frikčních sil vlivem povlaku se výrazně omezuje tepelné zatížení nástroje.³⁸

Tab. 6.3 Frikční koeficient vybraných tenkých vrstev ³⁸

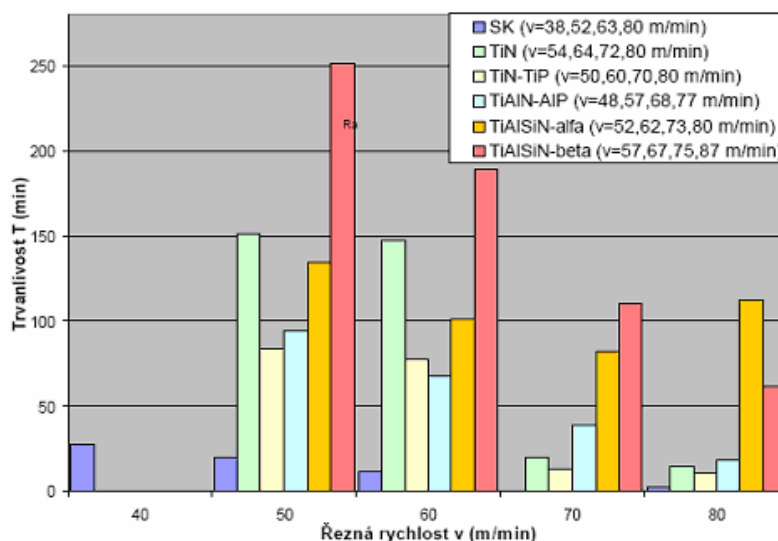
Tenká vrstva	TiN	TiCN	CrN	TiAlN	DCL
Frikční koeficient	0,4	0,4	0,5	0,4	0,1

Odolnost vůči oxidaci – Při povrchové oxidaci dochází k pasivaci povrchu, čímž se vytváří bariéra proti další oxidaci. Při hloubkové oxidaci dochází k destrukci vrstvy, což způsobuje pokles tvrdosti vrstvy, neboť se vytváří jiné typy mřížkových vazeb. Každá vrstva je charakterizována maximální teplotou použití, jejíž mez je dána právě odolností proti oxidaci.³⁸

Chemická stabilita - popisuje odolnost vrstvy vůči chemické reakci s obráběným materiálem, zejména za vyšších teplot vznikajících během obrábění. Chemická stabilita vrstvy se může měnit s typem obráběného materiálu a s řeznými podmínkami. Klasickým případem je diamantová vrstva, jejíž chemická stabilita je naprosto nevyhovující při opracování ocelí (obsažen C) a vynikající při obrábění neželezných materiálů (Al).³⁸

Tepelná stabilita - povlak se vytváří za intenzivního iontového bombardování a je termodynamicky nestabilní. Při zvýšení teploty vlivem obrábění může docházet ke změně vnitřní struktury, např. přechodem k jinému krystalickému uspořádání nebo změnou vnitřního napětí. Tyto charakteristiky, které se navenek projevují změnou mechanických vlastností, se vyhodnocují spolehlivě pomocí TEM. Nejvyšší tepelnou stabilitu mají v současnosti vrstvy na bázi CrAlN a nanokrystalické nanokompozity.³⁸


Výše popsané vlastnosti povlaků jsou z hlediska praktického používání povlakovaných SK nejdůležitější. S jejich pomocí lze určit optimální řezné podmínky a pro danou řeznou aplikaci nastavit optimální vlastnosti povlaků.



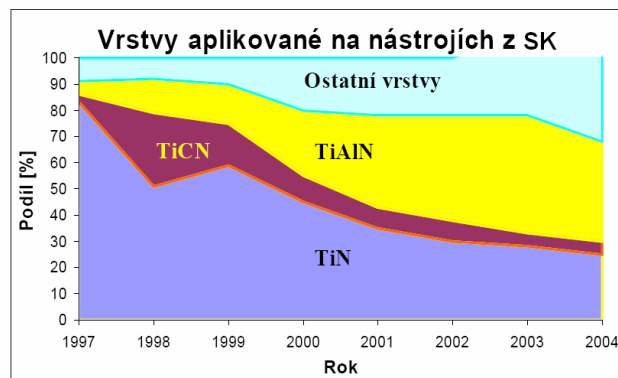
Obr. 6.2 Hodnoty trvanlivosti povlaků při limitním opotřebení $VB = 0,3$ ¹⁰

6.2.2 Typy povlaků

Tab. 6.4 Základní vlastnosti tenkých vrstev⁴

Vlastnosti	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla
Vysoká  Nízká	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiC	Al ₂ O ₃
	TiAlN	TiAlN	TiCN	TiAlN
	TiN	TiN	Al ₂ O ₃	TiN
	TiCN	TiCN	TiAlN	TiCN
	TiC	TiC	TiN	TiC

CVD: TiN, TiCN, Al₂O₃, DLC
 PVD: TiAlN, AlTiN, TiAlSiN, TiB₂



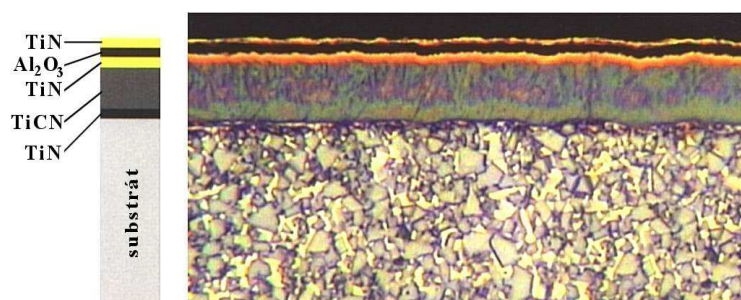
Obr. 6.3 Vývoj a podíl uplatnění tenkých vrstev ¹⁰

Tab. 6.5 Vlastnosti povlaků firmy Liss Platit a.s. ¹⁰

Povlak		Mikrotvrdost	Součinitel tření	Maximální prac. teplota
Materiál	Struktura			
TiN	monovrstva	2300	0,4	600
AlCrN	monovrstva	3200	0,35	1100
CrN	monovrstva	1750	0,5	700
DLC	monovrstva	2500	0,1 - 0,2	350
TiAlN	nanostrukturovaný	3300	0,3	900
PKD	monovrstva	8000-10000	0,15 - 0,2	600
TiCN	vícevrstvý gradientní	3000	0,4	400
multi TiAlSiN	multivrstva	40(GPa)	0,55	900
AlTiN	monovrstva	3800	0,7	800
TiCN	multivrstva	3300	0,4	400



Obr. 6.4 Povlakovaný slinutý karbid Toshiba Tungaloy T9005 ⁴

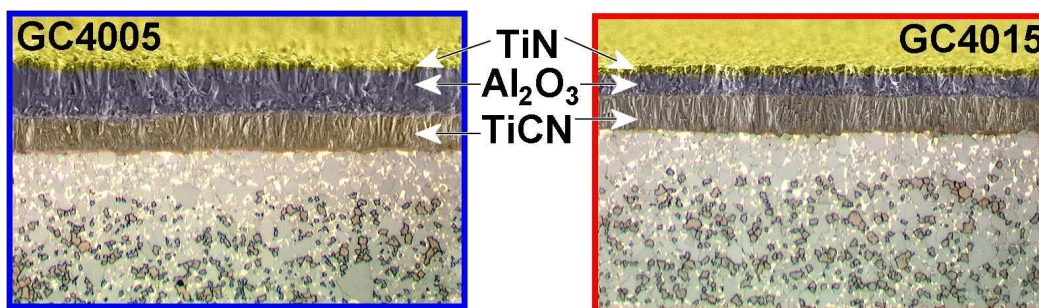


Obr. 6.5 Povlakovaný slinutý karbid Pramet Tools 5026 ⁴

6.2.3 Nové moderní povlaky

V současnosti se nejčastěji používají povlaky 3. a 4. generace. K původním materiálům pro jednotlivé vrstvy (TiC, TiN, TiCN) přibývají nové (CrN, ZrN, TiAlN, MgO) a pomocné lubrigační vrstvy (MoS_2) vytvořené metodou PVD. Snižují tření mezi nástrojem a odcházející třískou. Nižší tepelné ovlivnění nástroje se příznivě projevuje na jeho životnosti.

Povlak GC 4005 – Sandvik Coromant. je vhodný pro obrábění zúšlechťených ocelí a tvárné litiny. Díky tepelné odolnosti silné vrstvy Al_2O_3 je využitelný při vysokých v_c , dlouhých řezech a obrábění za sucha. V kombinaci s novou řeznou geometrií WR (Wiper Raugher) umožní i zvýšení posuvu a zlepšení produktivity při hrubovacím frézování ocelí. Má schopnost zamezit nalepování obrobeneho materiálu na nástroj a potlačit vytváření nárůstků, čímž je zajištěno klidné obrábění a kvalita obrobeneho povrchu.³⁷



Obr. 6.6 Povlakovaný slinutý karbid Sandvik Coromant řada GC 4000⁴

Povlak PC 3530 – Korloy. Supertvrký nanokrystalický povlak z kompozitních vrstev na bázi TiAlN. Velká tvrdost zaručuje jeho vysokou otěruvzdornost, čímž je možné použít u VBD houževnatější substrát. Tím se zkombinují pozitivní vlastnosti materiálu pro dokončování (vysoká tvrdost povrchu) a pro hrubování (vysoká houževnatost jádra). Výhodou je nízké opotřebení řezné hrany VBD a to jak při dokončování tak i při přerušovaných řezech. Užití při obrábění nerezových ocelí (11%Cr).³⁷

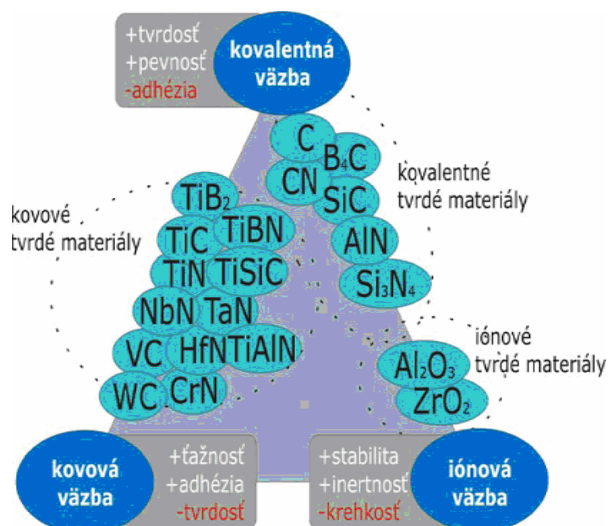
Povlak DLC – Sumito Electric Carbide - obrábění Al za sucha. Vyznačuje se vysokou tvrdostí a přilnavostí k základnímu materiálu, mimořádně nízkým koeficientem tření, korozní odolností, nízkou mírou opotřebení a vysokou jakostí povrchu. Povlak zamezuje nalepování Al slitin na nástroj a tím vytváření nárůstků → zlepšení kvality řezu.³⁷

Povlak Salinit Nano Gold – Balzers. Na bázi TiAlN opatřen vrstvou TiN. Užívá se k povlakování VBD z karbidových substrátů a monolitních celokarbidových HSC nástrojů v podmínkách suchého obrábění. Vynikající odolnost vůči oxidaci a použitelnost do teploty 900°C je určující pro soustružení litin a slitin na bázi Ni. Možnost obrábění do tvrdosti 62 HRC.³⁷

Povlak KD 1405 – Kennametal. Působí jako inovace řezného materiálu na bázi diamantu. Segmenty tvoří karbidový základ s CVD povlakem čistého PKD bez jakékoliv pojící fáze. Segmenty se nařezou a pájí na substrát. Vyznačuje se extrémní velikostí zrn diamantu, což činí povlak mimořádně odolným proti opotřebení. Je určen pro obrábění neželezných materiálů při dokončovacích i středních podmínkách obrábění.³⁷

6.2.4 Nové typy vrstev

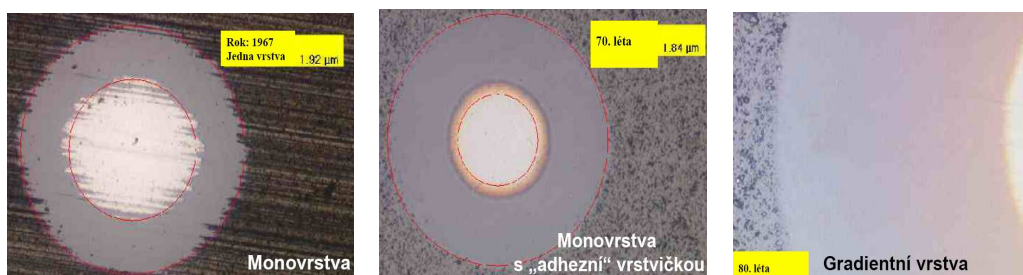
Tenké vrstvy neodpovídají nejen vlastnostmi, ale i svými vazbami objemovým materiálům. Následkem nerovnovážných depozičních procesů vznikají metastabilní fáze. Příkladem je TiN, která má malý stupeň kovové vazby, přičemž objemový materiál se vyznačuje vysokým stupněm iontové vazby.



Obr. 6.7 Fyzikálně-chemické vlastnosti povlakových materiálů – druhy vazeb ¹⁰

Tab. 6.5 Typy vrstev povlaků 4. generace

Typy vrstev
Monovrstva
Monovrstva s „adhezní“ vrstvičkou
Gradientní vrstva
Sendvičově řešená vrstva
Nanostrukturovaná vrstva
Nanokompozitní vrstva



Obr. 6.8 Monovrstva, monovrstva s adhezní vrstvičkou a gradientní vrstva ¹⁰



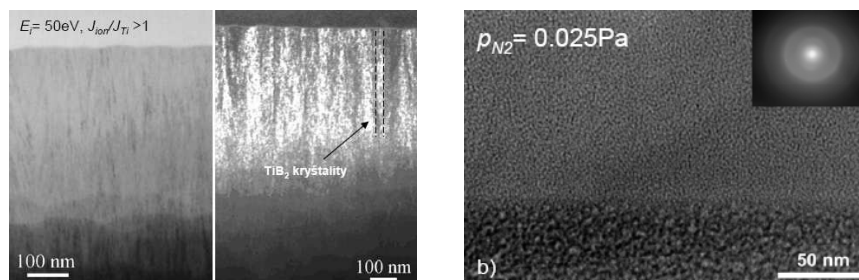
Obr. 6.9 Nanostrukturovaná, sendvičová a nanokompozitní vrstva ¹⁰

Nanostrukturovaná vrstva je soustava vrstviček s tloušťkou do 10nm. Tímto stylem se dosahuje zvýšené tvrdosti celkové vrstvy za předpokladu přesného dodržení krystalografické struktury vrstvy. Multivrstvý povlak je systém s pravidelným střídání 2 typů monovrstev (10nm) s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi. Výsledné vlastnosti multivrstvy jsou odlišné od monovrstev, čímž se dosahuje zvýšené trvanlivosti, pevnosti a s nimi spojených vysokých úběrů obráběného materiálu. Nanokrystalické kompozity vytvářejí poměrný systém vrstev z více složek, které jsou z různých druhů materiálů. Tím je dosaženo termodynamicky stabilní struktury s unikátními fyzikálními vlastnostmi (tvrdost nad 50 GPa). TiAlN je příkladem nanogradientní vrstvy, což je systém s průběžně proměnným složením vrstvy, tj. obsah Al se zvyšuje směrem k povrchu, aby zabezpečil odolnost proti oxidaci.³⁹

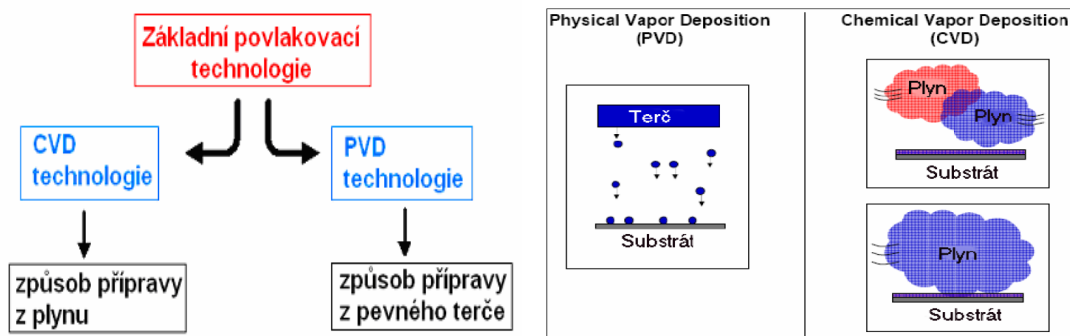
Tab. 6.6 Rozdělení povlaků dle tvrdosti

Tvrdost	Skupina povlaků	Typy povlaků
< 40 GPa	tvrdé povlaky	TiN, CrN, TiAlN
> 40 GPa	supertvrde povlaky	KNB, DLC

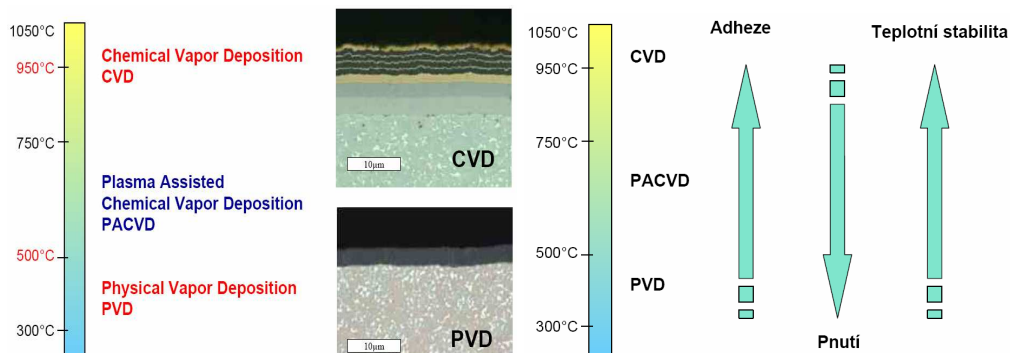
K VBD z SK s diamantovým povlakem patří větší rozsah výroby (50x vyšší trvanlivost), pružná změna a větší složitost tvaru, vyšší životnost (větší počet břitů). Diamantový povlak má velmi malý součinitel tření, čímž se zvyšuje řezný výkon. K jejich nevýhodám patří nízká houževnatost. Proto nejsou tyto VBD vhodné pro hrubovací obrábění a přerušované řezy. Řezné vlastnosti jsou zkreslovány důsledkem nerovnoměrného rozložení Co v substrátu.³⁹ Pomalu se začínají rozvíjet tvrdé povlaky na bázi KNB a TiB₂, které by v budoucnu měly zaujímat výsostné postavení. Vzhledem k jejich obtížnosti deponování na SK se jako testovací substrát používá Si.

Obr. 6.10 Příčné řezy vrstvy TiB₂ a Ti-B-N deponované na Si

6.3 Metody povlakování

Obr. 6.11 Základní dělení povlakovacích technologií a jejich rozdíl^{21,10}

Chemická metoda CVD využívá pro depozici směs chemicky reaktivních plynů zahřátou na vysokou teplotu až 1100°C. Reakční složky jsou přiváděny v plynné fázi a vrstva vzniká na povrchu substrátu heterogenní reakcí. Fyzikální metoda PVD je založena na odpaření nebo odprášení materiálů obsažených ve vrstvě a jejich následné nanesení na nástroje. Hlavní rozdíl je ve způsobu přípravy tj. z pevného terče u PVD a z plynu u CVD procesu.



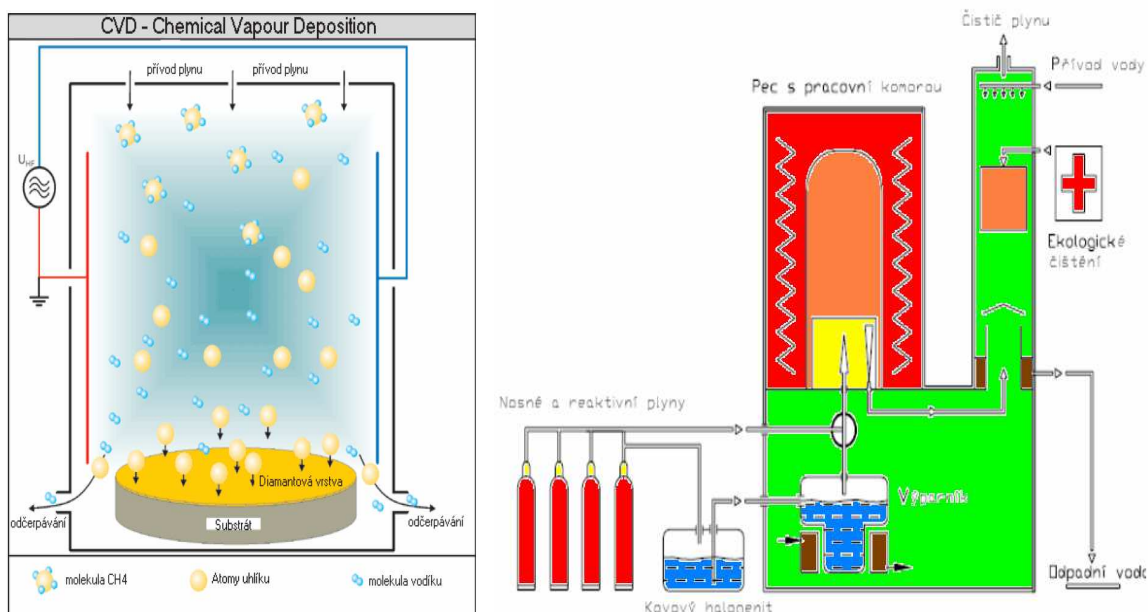
Obr. 6.12 Závislost vlastností povlaků na pracovní teplotě a metodě povlakování ⁴¹

6.3.1 CVD technologie (Chemical Vapour Deposition)

Touto technologií lze připravit rozmanité vrstvy kovů a různých chemických sloučenin buď v krystalickém či amorfním stavu, jež jsou vysoce čisté a mají požadované vlastnosti. Rovněž lze řídit stechiometrii v širokých mezích. Tenká vrstva se na povrchu substrátu vytváří v důsledku chemických procesů probíhajících v objemu plazmatu a přímo na rozhraní mezi plazmatem a povrchem substrátu. Reakční složky jsou přiváděny v plynné fázi, za vysokých teplot se rozkládají a vrstva vzniká na povrchu substrátu heterogenní reakcí. Použití je značně omezeno vysokou teplotou procesu (950–1050°C), z čehož plyne nemožnost použití u RO, protože depoziční teplota musí být nižší, aby při depozici nedošlo k tepelné degradaci základního materiálu. Proto se metoda CVD používá především k depozici nástrojů ze SK.

Výhodou jsou relativně nízké náklady na zařízení a řízení procesu. Z toho vyplývá vhodnost pro velkovýrobu. Další výhodou je vysoká odolnost vůči opotřebením, vysoká teplotní stabilita vytvořených vrstev a možnost vytvářet diamantové a uhlíkové kluzné vrstvy. CVD proces je ekonomicky výhodný pro tvorbu silných vrstev a k povlakování nepřístupných dutin a drážek – rovnoměrná tloušťka vrstvy. Nevýhodou je vysoká teplota při deponování, z čehož plyne vysoká energetická náročnost, nemožnost dělat některé typy vrstev kombinací různých typů kovů (TiAlN), dlouhý pracovní cyklus 8-10 hodin a tahová pnutí ve vrstvě (rozdílný koeficient tepelné roztažnosti). Dalším problémem je zaoblování řezných hran při povlakování. Z hlediska ekologie je to použití toxických chloridů při deponovacím procesu.

V důsledku uvedených rozdílů ve vlastnostech jsou CVD vrstvy využívány především pro soustružení, zatímco PVD vrstvy jsou užívány tam, kde by byla trvanlivost v důsledku vydrolování a vysokých řezných sil nízká - obrábění korozivzdorných ocelí. Vrstvy PVD jsou též užívány u nástrojů, které mají velmi pozitivní geometrii ostří (bez zaoblení), jako např. celokarbidové vrtáky a stopkové frézy. ⁴²

Obr. 6.13 Princip metody CVD⁴¹

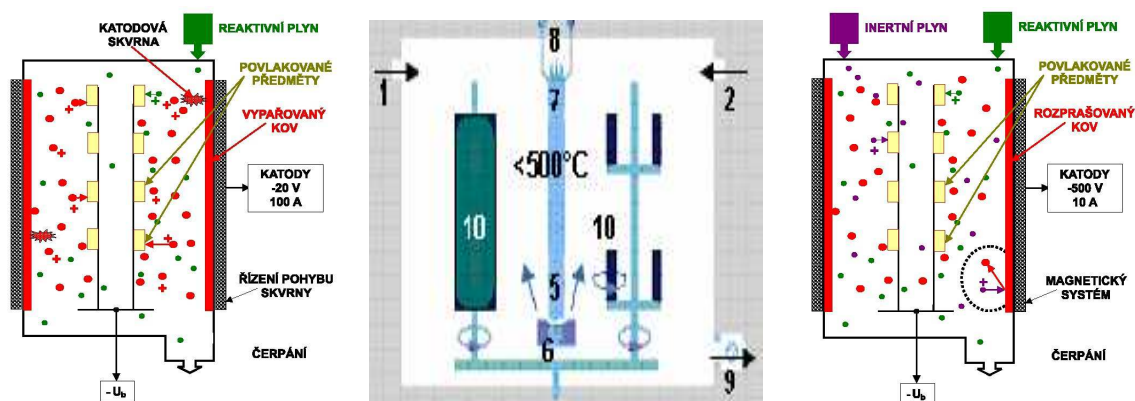
6.3.2 PVD technologie (Physical Vapour Deposition)

Ekologická metoda depozice vrstev bez toxických látek. Výhodami PVD depozice jsou vysoká odolnost vrstev, nízký koeficient tření, množství různých druhů (kombinací) vrstev, malá a snadno reprodukovatelná tloušťka vrstev. Proces je realizován ve vysokém vakuu za teploty 150 – 500°C. Vysoká čistota procesu je zajištěna tepelným odpařováním materiálu (Ti, Cr a Al), jenž je použit k povlakování. Současně je vypuštěn aktivní plyn (N₂), který reaguje s kovovými parami, čímž se vytvoří chemická sloučenina, která se posléze deponuje na nástroj nebo v podobě tenké přilnavé vrstvy. Podstatou fyzikální depozice je vypařování materiálu (vytvářejícího vrstvu) ve vakuu nebo rozprašování ve výboji udržovaném za nízkých tlaků. Povlakovací proces lze rozdělit do 3 na sebe navazujících kroků: převedení materiálu do plynné fáze, transport par ze zdroje k substrátu a vytváření vrstvy na povrchu substrátu.

Napařování se realizuje ve středním vakuu (tlak pod 1Pa), kde se pomocí elektrického oblouku odpařují částice kovu (Ti), reagují s plynnou atmosférou komory (Ar, N₂), dopadají na povrch substrátu, kde vytvářejí tenkou homogenní vrstvu pevně spojenou s podkladem.²¹

Naprašování je proces, kde prostřednictvím elektrického výboje v atmosféře komory vznikají kationty plynu bombardující katodu z čistého kovu. Díky vysoké energii iontů se bombardováním uvolní z terče kovu částice potřebného chemického složení, které se následně usazují na povrchu substrátu a vytvářejí daný povlak.²¹

Iontová implantace je metoda kombinující napařování a naprašování. Mezi substrátem a odpařovačem je vytvořeno silné elektrické pole, následuje elektrický výboj v plynné atmosféře komory, výboj ionizuje částice plynu a odpařovaného kovu, jejichž vzájemnou reakcí vzniká na povrchu substrátu povlak.²¹

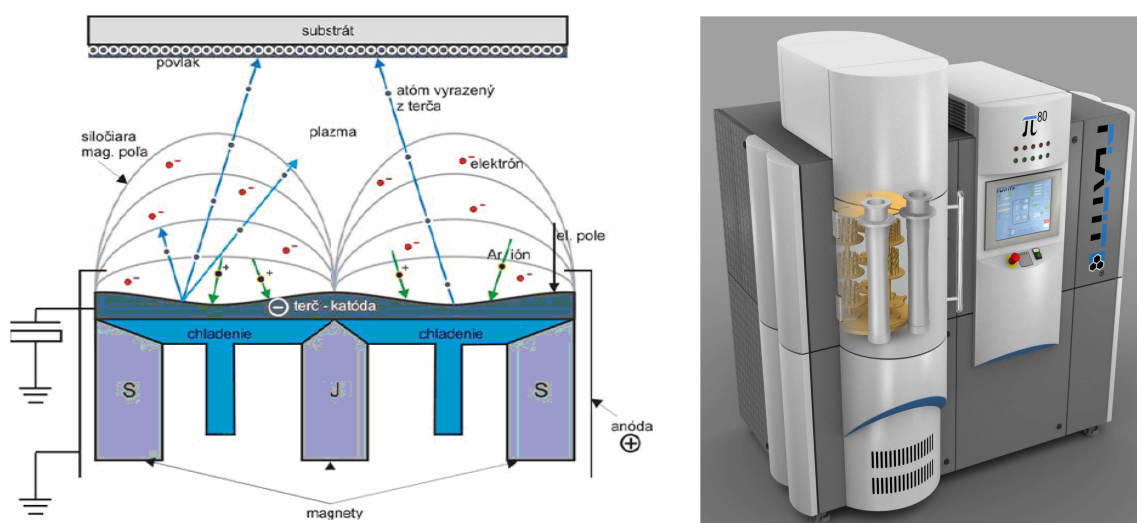


Obr. 6.14 Schéma procesu napařování, iontové implementace a napařování ¹⁰

Modernější PVD technologií je **obloukové odpařování s využitím rotačních katod**. Nízkonapěťový oblouk je výhodný pro svoji relativně vysokou rychlost odpařování materiálu elektrod a současně vysokou ionizaci plazmatu. Délky procesů se pohybují v řádu několika hodin. Vysoká ionizace plazmatu zase přináší možnosti přípravy povlaků a struktur běžně se v přírodě nevyskytujících. Podstatou přípravy nanokrystalických kompozitů $\text{nc}-(\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}/\text{a-Si}_3\text{N}_4$, je splnění požadavku na řízené odpaření velkého množství částic a jejich velkou ionizaci. To lze splnit využitím poměrně silného magnetického pole, které ovlivňuje hoření oblouků při relativně vysokých parciálních tlacích reakčních atmosfér. Takové podmínky splňuje technologie s rotačními válcovými elektrodami. Elektrody jsou v zařízení umístěny ve středu komory, centrálně k povlakovaným nástrojům. Poslední variantou je kombinace centrálního a bočního umístění. V různých pozicích se navíc může měnit i počet targetů. Pro přípravu více komponentních povlaků není výjimkou použití i více různých targetů, mnohdy i s odlišnou funkcí. Rotační planetový pohyb nástrojů je rovněž velmi důležitým parametrem ovlivňujícím rezný výkon povlaků. Synchronizací rychlosti rotace ve vztahu k proudům na elektrody lze dosáhnout z hlediska tvrdosti optimalizované tloušťky nanovrstev 5-7 nm.

Magnetronové napařování je proces rozprašování pevného terče, který je katodou, ionty pracovního plynu extrapolovanými z plazmatu doutnavého výboje, který je lokalizován pomocí magnetického pole v těsné blízkosti katody. Elektrony plazmatu se zachycují v magnetickém poli a driftují podél tunelu, čímž se značně prodlouží jejich dráha, zvýší počet srážek a vytvoří husté plazma. Kladné ionty dopadají z plazmatu na terč. Částice rozprášeného terče procházejí plazmatem směrem k substrátu, na kterém je záporné předpětí.

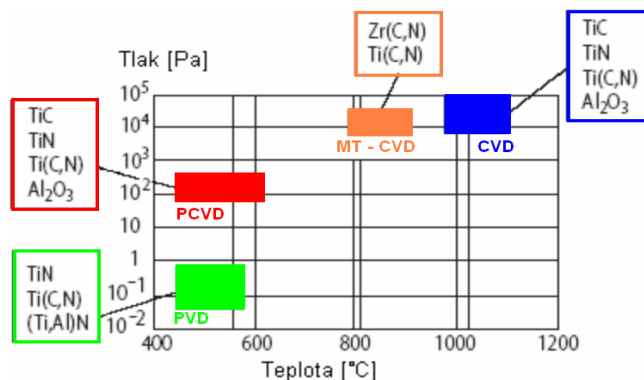
Vývoj přípravy PVD povlaků se v posledních letech z hlediska aplikací mění stejně rychle, jako se mění požadavky na nové aplikace. Z hlediska samotných principů PVD technologií a sortimentu materiálů a struktury PVD povlaků už změny nejsou tak bouřlivé. To neznamená, že zde není pokrok, ale spíše to znamená, že nedávno „objevené“ struktury a materiálová složení jsou značně nadčasové. Týká se to především nanokompozitních povlaků na bázi $\text{nc}-(\text{Ti}_x\text{Al}_{1-x})\text{N}/\text{a-Si}_3\text{N}_4$ resp. $\text{nc}-(\text{Cr}_x\text{Al}_{1-x})\text{N}/\text{a-Si}_3\text{N}_4$ resp. $\text{nc-TiN}/\text{a-Si}_3\text{N}_4$. Nově se rozvíjí kombinace těchto tvrdých vrstev s kluznými a jinak funkčními vrstvami a dochází k obecnému rozšíření přípravy a aplikací nanokompozitních vrstev.⁴⁰

Obr. 6.15 Princíp magnetronového naprašovania a PVD povlakovací zariadení Platit ⁴⁴

6.3.3 Modifikace základních povlakovacích metod

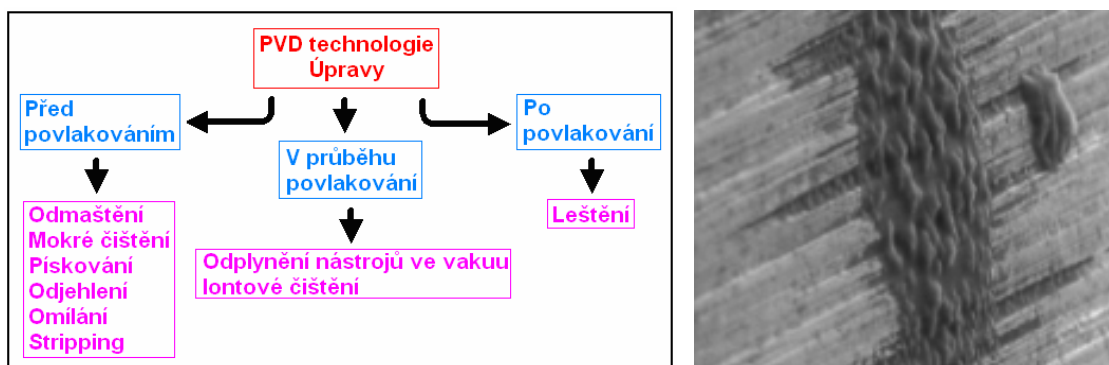
Metoda PCVD = PACVD (Plasma Activated CVD) řeší problém objemových změn při vysokoteplotních procesech CVD. Využívá výhody chemické reakce aktivované plazmovým výbojem, tudíž probíhá za teploty nižší než je popouštěcí teplota použitého materiálu (500°C). Plazmu lze vytvořit pomocí vnějšího elektrického zdroje nebo reaktivním plynem (NH₃). Výhodou je zanedbatelná difuze mezi povlakem a podkladem v důsledku nízké teploty povlakování. Vývoj směřuje k náhradě vrstvy PVD odolnější PACVD vrstvou, hodnocení je ve stádiu zkoušek. Touto metodou se vytváří i povlaky jiného složení. Příkladem je povlakování na formy pro tlakové lití Al na bázi TiB₂.⁴³

MTCVD (Middle Temperature CVD). Tato metoda umožňuje nanášet povlaky z plynné fáze - acetonitril (CH₃CN) za teplot kolem 700–850°C. Jako zdroj Ti je používán chlorid titaničitý. Mezi hlavní výhody patří nižší reakční teplota a tím zabránění poklesu tvrdosti podkladového SK. VBD s tímto podkladem jsou odolnější proti mechanickým rázům a mohou být použity u vyšších hodnot posuvových rychlostí. Mikrotvrdost běžně připravených karbonitridů má klesající tendenci od substrátu k povrchu vzorku, což je důsledek narůstání zrnitosti (závisí na reakčních podmínkách při povlakování) spolu s narůstáním povlaku.⁸

Obr. 6.16 Porovnání povlakovacích metod v závislosti na typu povlaku a pracovních podmínkách ²⁷

6.3.4 Předdepoziční a podepoziční úpravy povlakovaných SK

Velmi dramaticky se rozvíjejí mechanické úpravy substrátů před a po povlakování, které mohou přinést velmi překvapivě výrazné zvýšení užitných vlastností povlakovaných substrátů.⁴⁰



Obr. 6.17 Průběh úprav u metody PVD a nečistoty na nástroji před povlakováním⁴¹

Jako materiály pro povlakované VBD se dnes majoritně používají RO a SK. Zvláště u SK je třeba přípravě nástroje na depozici věnovat zvýšenou pozornost z důvodu vysoké křehkosti materiálu a náchylnosti ostrých hran k odštipnutí. Je třeba se vyhnout prudkým nárazům při manipulaci s nástroji, jejich vzájemnému kontaktu a příliš dlouhému procesu čištění v ultrazvukové lázni. U nástrojů ze SK se provádí úprava řezných hran některým ze způsobů finišování povrchu – otryskávání, kartáčování. Po takovéto úpravě povrchu následuje chemické čištění v ultrazvukové lázni a osušení nástroje. Nakonec se nástroje upevňují do držáků, které se pak vloží do depoziční komory. V depoziční komoře následuje poslední etapa čištění substrátu – iontové čištění, na které bezprostředně navazuje depozice tenké vrstvy.⁴⁵

V případě **redepozice nástroje** předchází všem těmto procesům ještě proces odstranění vrstvy – tzv. stripping. Možnosti opakované depozice využívají velké zahraniční firmy, které zjistily že opakované povlakování se z hlediska nákladu vyplatí. Nástroj před opakovaným povlakováním nesmí být mechanicky poškozen - otupen je jen povlak. Před opakovanou depozicí se musí zbytky starého povlaku z celého nástroje odstranit, což se děje v chemické lázni. V opakované depozici se nejedná jen o podstatné snížení nákladů, ale také dopady na ekologii a suroviny. **Řezné hrany ze SK** jsou po broušení různě „otřepené“ a plné defektů. Lokality s těmito defekty jsou velmi náchylné na porušení tenké vrstvy po jejich napovlakování. Na ostrých hranách dochází nejdříve k adhezivně-kohezivnímu porušení tenké vrstvy při řezném procesu. Ostré hrany mohou být často koncentrátorem napětí a způsobit porušení tenké vrstvy ještě před nasazením nástroje při obrábění z důvodu zbytkových pnutí v tenké vrstvě. Hrany nástrojů se po nabroušení speciálně omílají, kartáčují, honují nebo otryskávají. Při těchto způsobech povrchové úpravy dochází ke změnám mikrogeometrie nástroje max. do 10 μ m a může být dosaženo zvýšení životnosti nástroje až 200% oproti nástroji s neupravenou řeznou hranou. **Otryskávání** se provádí proudem vzduchu, kterým je unášeno jemné abrazivo v podobě diamantového prášku.⁴⁵

Při **chemickém čištění** nástrojů je cílem zbavit povrch mastnoty, ale také prachu, brusiva a jiných pevných částic ulpělých na povrchu. Jako čisticí kapaliny se používají různé uhlovodíky.

Principem **iontového čištění** (iontový bombard) je přivedení záporného předpětí na substrát a dopad takto urychlených iontů na substrát. Ionty při dopadu na substrát vyrážejí mikronečistoty ulpělé na povrchu. V první fázi dochází k ionizaci atomů plynu (Ar). Ionizované atomy plynu jsou záporným předpětím substrátu urychlovány a dopadají na substrát, ze kterého vyrážejí atomy nečistot. Druhá fáze je čištění nízkonapěťovým el. obloukem. Na katodě se vytvoří katodová skvrna, která je pak zdrojem iontů, které jsou záporným předpětím urychlovány. Dopadem těchto iontů je substrát dočištěn.⁴⁵

Stripping tenkých vrstev z povrchu SK není úplně nemožný, ale představuje přeci jen technologický problém z hlediska nebezpečí napadání Co pojiva používanými rozpouštědly. Jako rozpouštědla se používají roztoky na bázi hydroxidů a peroxidu vodíku. Všechna dosud používaná rozpouštědla vrstev intenzivně napadají i substrát a proto musí následovat přebroušení ostří. Výrobci, kteří první dokážou odpovlakovat celokarbidové nástroje bez nutnosti jejich následného přebroušení získají velkou konkurenční výhodu a posunou depoziční technologie zase o krok dále.⁴⁵

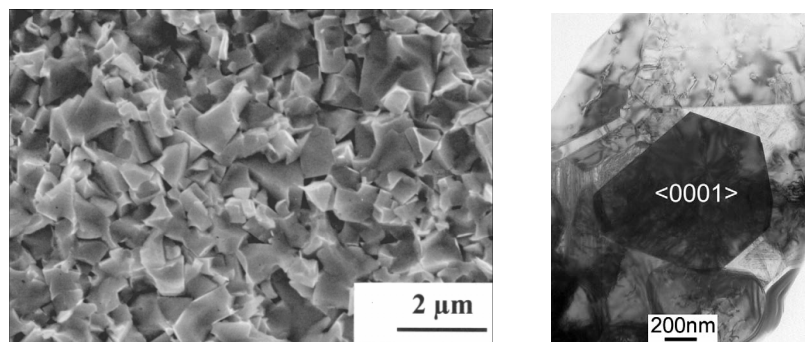
7 STRUKTURA A VLASTNOSTI SLINUTÝCH KARBIDŮ

7.1 Systém WC–10Co

Prášky SK na základě WC–10Co s velikostí zrna okolo 250 nm s přídavkem různé míry Cr_3C_2 byly zpevněny na plnou hustotu jiskrovým plazmovým slinováním. Byla změřena hustota, tvrdost a lomová houževnatost zpevněných vzorků a byla pozorována mikrostruktura, povrch lomu a velikost zrna pomocí SEM. Rentgenové difrakční zkoumání vzorků WC–Co slinovaných jiskrovou plazmou odhalilo, že se nevytvořila žádná nová fáze. WC–10Co prášky směsi byly plně zhuštěny do 5 minut metodou jiskrového slinování při teplotě 1200 °C, což je mnohem nižší teplota než u běžného slinování tekutou fází pod tlakem 40MPa. Přidání inhibitorů růstu zrna Cr_3C_2 snížilo velikost zrna na 435 nm, ale vedlo k nižší hustotě. Přidávané množství Cr_3C_2 by mělo být kontrolováno v určitém rozsahu a vzorky s přidaným patřičným poměrem Cr_3C_2 mohou získat vyšší tvrdost a houževnatost.⁵¹

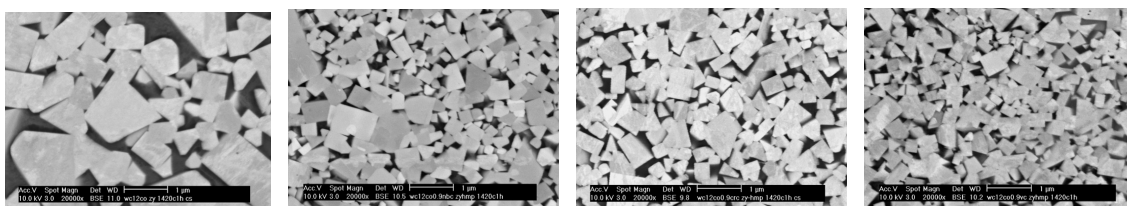
Nanokrystalické SK s mikrostrukturou WC–10Co slinované při teplotě 1100 °C z prášků zpracovaných nanokrystalickou přeměnou rozprašováním mají relativní hustotu 99%, tvrdost 2250 HV30, $K_{IC} = 15.3 \text{ MPa m}^{1/2}$ a velikost krystalitů karbidu wolframu kolem 50 nm. Zvýšení slinovací teploty na 1200 °C má za následek zvýšení velikosti WC krystalitů na zhruba 110 nm při snížení tvrdosti na 2200 HV30 a snížení K_{IC} na $11.9 \text{ MPa}^{1/2}$. Tyto nanokrystalické WC–10Co prášky SK byly vyrobeny redukcí a karbonizací nanokrystalických prášků, které byly připraveny procesem sušení a rozprašováním roztoku obsahujícího metawolframan amonný a dusičnan kobaltový. Prášky karbidu wolframu byly homogenně smíchány s Co pojivovou fází a byly slinovány při 1375 °C. Za účelem srovnání mikrostruktury a mechanických vlastností s těmi, které mají nanokrystalické WC–10Co, byly smíchány běžné prášky WC o

průměru zrna od 0,57 – 4 μm s Co prášky a byly slinovány za stejných podmínek jako nanokrystalické prášky. TaC, Cr₃C₂ a VC různého množství byly přidány do nanokrystalických WC–10Co SK jako inhibitory růstu zrna. Tvrdost WC–10Co SK se zvýšila se snížením velikosti WC zrna dle typu vztahu Hall–Petch. Lomová houževnatost WC–10Co SK vzrostla se zvyšujícím se poměrem HCP/FCC Co fáze pomocí HCP/FCC fázové přeměny.⁴⁹



Obr. 7.1 Struktura a detail SK systém WC-10Co⁴⁹

U nanokompozitních SK typu WC–10Co s vysokou tvrdostí a vysokou houževnatostí se předpokládá nalezení širokého použití. Nanokompozitní prášky SK typu WC–10Co–0.4VC–0.4Cr₃C₂ (hm.%), s průměrnou velikostí zrna 30 nm, byly vyrobeny nástřikovou pyrolytickou souvislou redukcí a karbo-nizační technologií. Takto připravené nanokompozitní prášky byly analyzovány rastrovací elektronovou mikroskopií, transmisí elektronovou mikroskopií a mikroskopií atomárních sil, které potvrdily, že bylo dosaženo požadovaných vlastností a mikrostruktury, kterých bylo docíleno pomocí velkého množství trojných uzlů, které tato struktura obsahovala. V procesu slinování bylo použito sinterhipu, čímž byly připraveny velmi jemné WC–10Co SK s průměrnou velikostí zrna 240 nm. Přispěli k tomu stejnoměrně rozprášené inhibitory růstu zrna VC a Cr₃C₂. Materiál vykazoval vysokou tvrdost HRA92.8 a HV₁1918, a pevnost v ohybu 3780MPa.⁵⁰

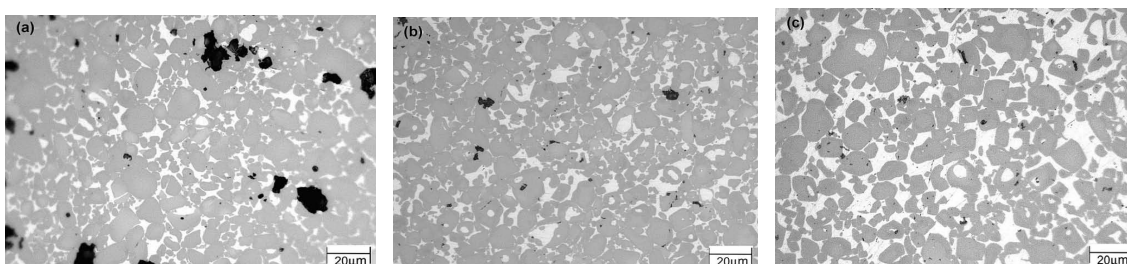


Obr. 7.2 Struktura SK WC–10Co, WC–10Co–0.9NbC, WC–10Co–0.9Cr₃C₂ a WC–10Co–0.9VC⁵⁰

Povrchové pohlcování během přípravného procesu nano WC a u SK typu WC-10Co-0.35VC-0.45Cr₃C₂ ultrajemného SK byl zkoumán rentgenovou difrakcí, rastrovací elektronovou mikroskopií a energetickou dispersní rentgenovou spektroskopií. Ukazuje se, že se tvoří nové fáze na povrchu nano wolframového karbidu a spékaného obalu ultrajemného SK kvůli interakci mezi částicemi nečistoty z pece nebo částicemi nečistoty a slitin doprovázené změnou vlastností povrchu. Nicméně tvorba částic nečistoty obsahujících sáze na spékaném obalu SK nemá za následek žádnou evidentní abnormálnost ve vnitřní mikrostrukturu. Wolframová karbidová zrna ve SK jsou homogenně rozložena a dobře krystalizována s průměrnou velikostí zrna 200–300 nm.⁵⁴

7.2 Systém WC–TiC(TaC)–10Co

Velký vliv na mechanické vlastnosti SK typu WC–TiC–10Co má poměr velikosti zrn WC/TiC. SK byl vyroben procesem sinterhip. Poměr WC/TiC velikosti zrna byl kontrolován změnou průměrné velikosti WC prášků v rozmezí od 0.5 do 4 μ m se zachováním velikosti TiC prášku na 1 μ m. U SK s poměrem velikosti zrna WC/TiC 0.5 byly fáze okraje jádra TiC/(Ti, W)C rozloženy v matici. Zatímco u SK s poměrem velikosti zrna WC/TiC nad 0.8 byly WC a TiC/(Ti, W)C fáze okraje jádra obklopeny Co pojivovou fází. Tvrdost se zvýšila s klesajícím poměrem velikosti zrna WC/TiC od 4 do 0.8 podle modifikované rovnice Hall–Petch typu. Avšak tvrdost WC–TiC–10Co SK s poměrem velikosti zrna WC/TiC 0.5 vykazuje mnohem vyšší hodnoty. Pevnost tohoto SK vzrůstá s klesajícím poměrem velikosti zrna WC/TiC.⁵³



Obr. 7.3 Struktura SK systém WC-TiC(TaC)-10Co, WC-TiC(TaC)-20Co a WC-TiC(TaC)-30Co⁵³

Velikosti WC částic má velký vliv na mikrostrukturu a lomové chování WC–(Ti,Ta)C–10Co. Běžné WC částice velikosti 4 μ m a ultrajemné částice velikosti 0.2 μ m jsou zavedeny do systému v různém poměru. Bylo prokázáno, že mikrostruktura toho typu SK je citlivě závislá na poměru běžných WC částic k ultrajemným WC částicím. Okrajová fáze vzrostla s nárůstem množství ultrajemných částic. Tvrdost SK vzrostla s nárůstem množství okrajové fáze. Pevnost v ohybu vykázala podobnou tendenci tvrdosti. Lomové chování se změnilo ze smíšeného modu na transgranulární lomový modus, když byl poměr běžných WC částic k ultrajemným změněn z 2:1 na 1:2.⁵²

7.3 Model tvrdosti slinutých karbidů

Navržený nový model pro tvrdost SK je založen na hlavním předpokladu, že velmi tenké pojivové vrstvy vázané mezi zrny tvrdé fáze jsou nuceny se chovat mechanicky jako vázací materiál. Když se zvýší tloušťka pojivové vrstvy, vliv tvrdé fáze klesne - exponenciální vztah. Tento model má výhodu proti současným modelům v tom, že předpovídá tvrdost pouze z údajů o velikosti karbidických zrn a objemové frakce bez potřeby pracné karbidické hodnoty styčnosti. Také pokrývá širší škálu velikostí karbidických zrn a pojivových objemových zlomků než dosavadní modely. Tento model byl ověřen na velmi široké škále směsí SK pokrývajících rozpětí tvrdosti 800–2400 HV. Skrz toto rozpětí souhlasí vypočítané hodnoty tvrdosti s naměřenými hodnotami tvrdosti v rozmezí 15%. To činí tento model užitečným nástrojem ve vývoji nových WC–Co SK pro interpretaci výsledků opotřebení a pro odhadování velikosti zrna a hodnot objemové frakce kobaltu.

Byly provedeny „nano-vtlačovací“ testy ke změření modulu pružnosti a tvrdosti WC částic. S použitím obecného vztahu mezi modulem pružnosti, tvrdostí a charakteristickým napětím vtlačování byl pro WC částice nano-vtlačovacím testem určen omezující faktor, tj. mez tvrdosti. S tímto vstupním údajem byly provedeny simulace konečných prvků vtlačování WC–Co SK a byl získán omezující faktor. Na základě takto určených omezujících faktorů je navržena modifikace Lee a Gurlandova modelu. Srovnání upraveného Lee a Gurlandova modelu tvrdosti s výsledky simulací konečných prvků a pokusnými výsledky vyplývá, že upravený model dává lepší odhad tvrdosti WC–Co SK.⁵⁶

Modely rovnováhy a geometrie pro kontakt karbidových krystalů ve slinutých karbidech jsou použity u kulatých karbidových krystalů s dostatečným množstvím pojivové fáze. Nárůst hranatosti karbidových krystalů nebo pokles obsahu pojiva vedou k tomu, že musí být vzata v úvahu geometrická složka dotyku. V obou případech energetická výhoda kontaktu karbid–karbid nad nahrazeným rozhraním karbid–pojivo určuje existenci kontaktu. Vliv tvarové sousosti na dotyk WC krystalů je pozorován u WC–TiC–Ni SK a vysvětlen modelem kombinujícím geometrii a energetickou výhodou těchto kontaktů. Základ-základ, hranol-hranol a hranol-základ WC/WC kontakty a jejich přispívání k poklesu celkového kontaktu jsou vzaty v úvahu a hodnoceny odděleně pokud jde o pokles tvarové sousosti WC krystalů.⁵⁷

7.4 Mikrostruktura a lomová houževnatost slinutých karbidů

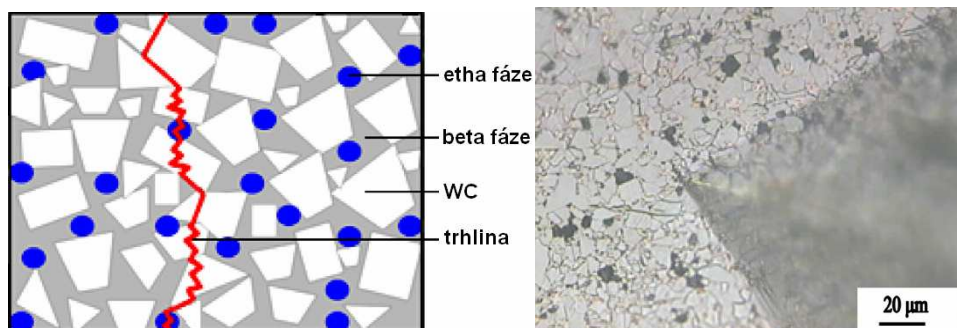
Závislost lomové houževnatosti a šíření trhlin na tvaru sousosti WC krystalů je zkoumána na WC–TiC–Ni SK. Lomová houževnatost K_{1C} lineárně koreluje ke střední lineární dráze v pojivové fázi bez ohledu na tvar a kontakt WC krystalů a rovněž navzdory změně dráhy lomu WC–TiC–Ni SK. Je experimentálně dokázáno, že lomová houževnatost K_{1C} nekoreluje v závislosti na dotyku karbidových krystalů u WC–TiC–Ni SK, když se tvar WC krystalů změní. Relativní množství trans-krystalického lámání skrz karbidové krystalové plochy a celková plocha lámání skrz karbidovou fázi vzrůstá, zatímco relativní množství inter-krystalického lámání podél karbid–karbid hranic klesá u WC–TiC–Ni SK s ploššími WC krystalami a nižší hodnotou kontaktu WC krystalů.⁵⁸

Obrobení elektrickým výbojem EDM je alternativní cestou tvarování pro výrobu komplexních tvarů z tvrdých materiálů jako jsou WC–Co SK. Avšak to má za následek špatnou povrchovou celistvost, která často vede k mechanické degradaci těchto materiálů. Vliv sekvenčního el. výboje na lámavost a únavové chování SK typu WC–10Co je porovnán s chováním vykázaným za referenčních podmínek dosažených obvyklým mechanickým obroušením a leštěním s použitím diamantu jako brusiva. Lámavost je v poměru s existujícími vadami, které jsou způsobeny během výroby vzorku nebo obrobením. Proto je provedeno detailní fraktografické zkoumání, aby se rozlišil původ nedostatků. Pokusná zjištění naznačují, že ohybová síla WC–10Co SK jak s monotonickým tak s cyklickým zatížením je silně ovlivněna EDM. Analýza výsledků s použitím přístupu lineární-elastické mechaniky lámavosti dovoluje stanovit jasné spojení mezi povrchovou celistvostí a mechanickou silou. Kvantitativní odchylky mezi odhadovanými a pokusně změřenými kritickými velikostmi trhlin pro všechny EDM vzorky jsou zdůvodněny existencí značného

zbytkového tažného napětí na tvarovaném povrchu. Z pohledu únavového chování je toto zbytkové napětí a tlaky ještě škodlivější, protože znamenají dodatečný středový tlak, tudíž vyšší poměr efektivního zatížení na EDM povrchu. To má za následek, že únavová citlivost EDM vzorků je vyšší než za referenčních podmínek. Ulehčení od těchto napětí pomocí žíhání se ukázalo být poměrně účinnou alternativou pro zlepšení lámavosti a únavového chování WC–10Co SK tvarovaných EDM.⁵⁹

Studie vztahu mezi strukturálními parametry a lomovou houževnatostí SK ukazuje, že pro různé SK typu WC-Co s různým obsahem Co existují různé kritické velikosti zrna R_c a kritická volná dráha pojiva M_c . R_c , M_c se chová jako kritérium, které podmiňuje chování růstu trhlin. Když průměrná volná dráha kobaltového pojiva $M < M_c$ nebo velikost WC zrna $R < R_c$, trhliny se budou šířit hlavně napříč kobaltovým pojivem, což bude mít za následek intergranulární lámání; když $M > M_c$ nebo $R > R_c$, dojde k transgranulárnímu lámání; když $M = M_c$ nebo $R = R_c$, dojde souběžně k intergranulárnímu a transgranulárnímu lámání. R_c a M_c se sníží se snížením obsahu Co a následně se zvýší lomová houževnatost. Rozměr trhlin v kruhové oblasti tvoření trhliny je také určujícím faktorem, který ovlivňuje lomovou houževnatost SK.⁶⁰

Zkoumání charakteristiky šíření trhlin tvořených v rozích Vickersova vtlačování a změny tuhosti funkčně vícevrstvého WC–Co SK se strukturou duální fáze ukázalo, že trhliny mají tendenci se šířit jak kolem tak i napříč WC krystalovým zrnem a v přítomnosti křehké η fáze napříč $\eta(W_3Co_3C)$ fází s vysokou rezistencí. Tím nastaly změny tuhosti v mikrostruktuře.⁶¹



Obr. 7.4 Schéma průběhu trhliny v SK a struktura SK s nežádoucí β a η fází⁶¹

Mikrostruktura a mechanické chování vícevrstvých SK vyrobených předspékáním vrstev s nedostatečným obsahem uhlíku a následným nauhličováním může být přičteno Ostwaldovu zrání navozeného difuzí a rozptýlením uhlíku. Rozdíly v míře Ostwaldova zrání v oblastech s různým obsahem uhlíku vedou k rozdílům ve struktuře obalu WC zrna a tím řídí tok tekutého Co z povrchu dovnitř. Teoretické výsledky založené na difuzi uhlíku v tekutém Co se shodují s pokusnými měřeními. Vícevrstvé SK se vyznačují dobrou kombinací tvrdosti a pevnosti a vykazují skvělou výkonnost v obráběcích aplikacích. Avšak vysoká karburizační teplota a dlouhá doba namáčení vedou k nadměrnému růstu WC zrn ve vnější vrstvě, což zabrání další difuzi uhlíku do těla slitiny a rovněž zhorší mechanické chování.⁶²

Čistý WC lze slinout jiskrovým plazmovým slinováním pro použití bezpojivových SK. Relativní hustota WC slinutého plazmovou jiskrou byla přes

98%, kdy teplota u SPS byla 1700°C pod tlakem 50MPa. Růst zrna WC lze potlačit úplným zhutňováním a zkrácením času slinování. Počáteční velikost WC prášku je od 0.57 do 4.06µm, slinovaná hustota se zmenšila se zmenšující se velikostí prášku WC, při zhušťování se přidává volný uhlík. Vyšší množství povrchového kyslíku v jemnějším WC prášku je považováno za příčinu dekarbonizace během procesu slinování. U WC prášků velikosti 4.06µm došlo k abnormálnímu růstu zrna, doba slinování byla přes 1hod a teplota slinování přes 1700°C. Tento výsledek ukazuje, že abnormální růst zrna u WC slinutých procesem SPS může být řízen přidáním uhlíku. Abnormální růst zrna u slinutých WC poněkud zvýšil lomovou houževnatost.⁵⁵

Překážkou výroby vícevrstvých SK tradičním slinováním tekutou fází je vysoká míra migrace tekutého pojiva s nevyhnutelnou následnou homogenizací obsahu pojiva ve vzorcích. Během analýzy hnací síly této migrace se ukazuje, že tato migrace je ovládána nejen kapilárními silami, ale také přídatnými tlaky, které vznikají díky povrchovému napětí na rozhraních mezi pevnou a tekutou fází. To má za následek, že k migraci dochází i v neporézních vícevrstvých vzorcích. Pro předpověď toku pojiva se spojitou deformací ohnivzdorného jádra během slinování tekutou fází je navržen numerický přístup. Jsou to SK slinované s obsahem vícevrstvého kovového pojiva. Kalkulace předpovídají, že úplného zhutnění vzorků s uchováním a rozložením vícevrstvého pojiva může být dosaženo dlouhým slinováním v pevném stavu zakončeným krátkým stadiem tekuté fáze při vysoké teplotě.⁶³

Měření volného rozkladu vnitřního tření jako funkce teploty a frekvence byla použita ke studiu vnitřního viskózního chování Co pojiva přítomného na rozhraní zrna WC/Co SK. Přítomnost vrcholu uvolnění byla vztažena k mikromechanismu, klouzání nepružné hranice zrna a byla představena analýza posunu vrcholu jako funkce frekvence. S použitím mechaniky dopružování mohla být určena jak viskozita tak i aktivační energie intergranulárního Co pojiva. Bylo provedeno srovnání údajů o intergranulární viskozitě s údaji získanými o velkém objemu Co kovu jak ve stavu vysoké čistoty tak v tuhém roztoku s malou objemovou frakcí WC. Viskozita Co pojiva, tak jak byla určena vnitřním třením, vykazovala shodu s tuhým roztokem Co/WC, jehož chemické složení bylo patrně nejbližší intergranulárnímu. Na základě shody mezi intergranulární viskozitou a tuhým roztokem stejně jako hodnotami aktivační energie se předpokládá, že současná metoda může být všeobecněji použita pro materiály ze SK nebo cermetů.⁶⁴

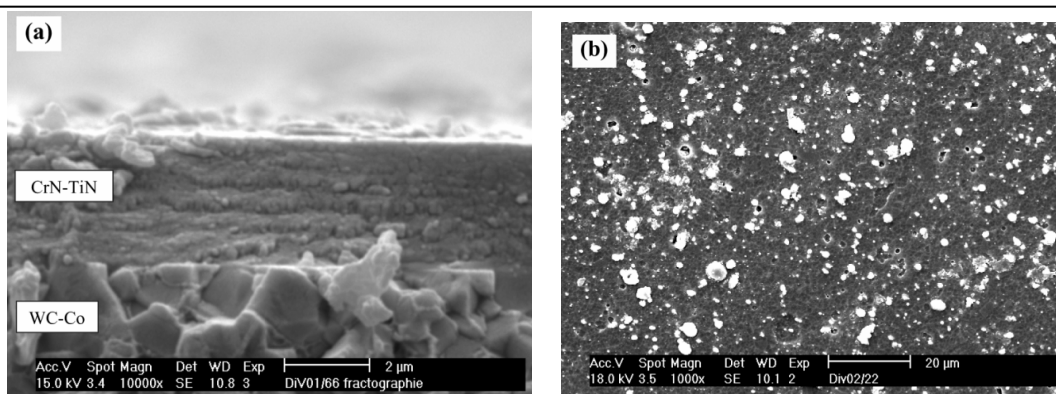
7.5 Mikrostruktura a vlastnosti povlaků

Mikrostruktury a vlastnosti povlaku ze slinutého karbidu WC–Fe–Co–Ni na substrátu oceli 45 jsou zkoumány v závislosti na teplotě slinování. Výsledky naznačují, že povlak je silně metalurgicky vázán se substrátem vzájemnou difuzí a penetrací Fe směrem k povlaku a W, Co, Ni směrem k substrátu při teplotách slinování od 1280 °C do 1300 °C. Získaný povlak vykazuje kompaktní strukturu a rovnoměrné rozložení WC s jemným zrnem a pórovitostí bez vad, vysokou mikrotvrdost a lepší otěruvzdornost. Je zřejmé, že struktura rozhraní mezi povlakem a substrátem, rozložení mikrotvrdosti a otěruvzdornost povlaku jsou závislé na teplotě slinování.⁶⁵

Skutečným přínosem je porovnání výkonu řezných nástrojů ze SK s diamantovým povlakem s a bez mezivrstvy boridu. Namísto odstranění Co z povrchu substrátu SK nebo vložení bezkobaltové mezivrstvy mezi substráty a diamantové povlaky se naskýtá alternativa v použití mezivrstvy boridu k modifikaci katalytických vlastností Co na povrchu substrátu, která zabrání vzájemnému působení Co s nánosem diamantových povlaků. Skutečný účinek použití této mezivrstvy je v tom, že dovoluje depozici přilnavých diamantových povrchů v relativně širokém rozmezí teplot, což zlepšuje opakovatelnost povlakovacích procesů. Přítomností mezivrstvy bylo dosaženo 20x vyšší životnosti nástrojů ve srovnání s nástroji bez povlaku. Takovéto zvýšení životnosti nástrojů může být přičteno zlepšené přilnavosti diamantových povlaků.⁶⁶

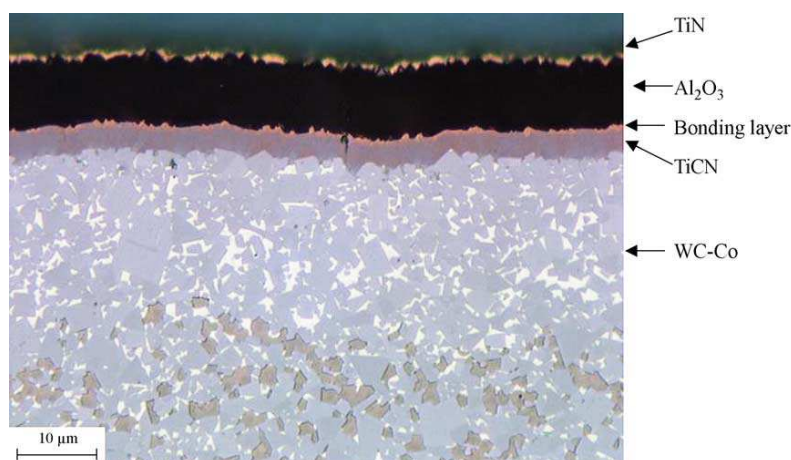
SK stále získávají na důležitosti v oblasti obráběcích, těžebních a tvářecích nástrojů. V současnosti dominuje na trhu jako pojivo Co díky svým unikátním vlastnostem. Avšak použití Co jako pojiva má několik nevýhod souvisejících s jeho šesterečnou mřížkou a fluktuací tržní ceny. Tyto problémy tlačily na vývoj před-legovaných pojivových prášků, které obsahují méně než 40% Co. Výsledky rozsáhlých výzkumů slinování WC-Fe/Ni/Co SK, předběžné úpravy povrchu a nanášení diamantových vrstev použitím průmyslového žhavicího vakuového reaktoru, ukázaly, že takto upravené SK dosahují vynikajících mechanických vlastností. Před depozicí byly substráty podrobeny povrchovému zdrsnění Murakamiho leptáním a odstranění povrchového pojiva lučavkou královskou. Přilnavost byla zhodnocena zkouškou dle Rockwella a porovnána s přilnavostí diamantových vrstev na WC-Co substrátech, které byly podrobeny podobné předběžné úpravě leptáním a identickým podmínkám nanášení. Výsledky ukázaly, že diamantové vrstvy na substrátu WC-6Fe/Ni/Co se střední velikostí zrna vykázaly dobré úrovně přilnavosti srovnatelné s těmi, které byly získány chemickým vakuovým napařováním diamantu na WC-Co SK s podobnou mikrostrukturou.⁶⁷

Alternativou k vrstvám TiAlN jsou vrstvy na bázi CrAlN bez přítomnosti Ti připravené odpařováním pomocí el. oblouku. Výhodou vrstev na bázi CrAlN je jejich vysoká chemická stabilita při vysokých teplotách a zvýšená adheze k substrátu. Byly nalezeny dvě oblasti složení vrstev s maximem tvrdosti. Varianta vrstvy Cr-Al-Si-N s nízkým obsahem Cr kolem 6% přitom dosahuje velmi vysoké hodnoty tepelné odolnosti. Tím i při vysokých pracovních teplotách nebude docházet k oxidaci vrstvy. Maximální poměr obou metalických složek při zachování kubické struktury je Cr : Al \approx 30 : 70. To je značná výhoda proti systému TiAlN. Další zvyšování podílu Al ale vede k vytváření nových fází AlN, které zhoršují fyzikálně-chemické vlastnosti vrstev. Přitom vysoký podíl Al má příznivý vliv na oxidační odolnost vrstev – vytváří oxidickou ochrannou vrstvu Al-Cr-O, která brání další difuzi kyslíku do vrstvy. Jedna z cest, jak se dostat se systémy CrAlN do vyšších oxidačních odolností, je opět příprava multivrstev případně nanokompozitních vrstev. Multivrstevné varianty umožňují i zlepšení adheze k substrátu a snížení vnitřního napětí ve vrstvách. To znamená, že PVD vrstvy Cr-Al-N resp. Cr-Al-Si-N lze připravit ve velkých tloušťkách až do 10 μ m, což je pro běžné PVD vrstvy nemyslitelné.⁶⁸



Obr. 7.5 Struktura SK s povlakem Cr-TiN a povlakem TiAlN⁶⁸

Požadavky na rozdílné vlastnosti povrchu a jádra u SK pro řezné nástroje vedly k vývoji funkčních gradientů tj. systému SK, u kterého je záměrně a plynule měněna struktura od povrchu směrem k jádru. Substrát gradientu směrem dovnitř se plynule stává tvrdým jádrem SK, naopak směrem k povrchové vrstvě obsahuje větší množství Co a menší podíl zrn WC. Vyšší houževnatost povrchu vede ke snížení tvorby trhlin, které vznikají po deponování tenkých vrstev. Vznik gradientu probíhá slinováním za působení difuze N₂ a Ti. U materiálů bez obsahu TiN musí být vytvořena atmosféra N₂ na začátku procesu. Při slinování v roztavené pojivové matici nejprve probíhá vnější difuze N₂ a následně v důsledku termodynamické vazby mezi N a Ti začne probíhat vnitřní difuze Ti. Výsledná struktura se skládá ze 3 oblastí: povrchová vrstva – zvýšený obsah pojiva a minimum kubických nitridů, prostřední mezivrstva – snížený obsah pojiva, s obsahem kubických karbidů a základní materiál – pojivo, karbidy WC a TiC. Ve funkčních gradientech se aplikuje vrstva Ti(C,N) jejíž koncentrace směrem do materiálu klesá, je tvrdší než samotný substrát. Ve výsledku to znamená, že vznikne obrácený gradient, kde tvrdost roste a houževnatost klesá směrem k povrchu.⁴ Do budoucna lze předvídat, že vývoj řezných materiálů se bude ubírat právě tímto směrem a SK s funkčním gradientem a boridovými PVD povlaky budou zaujímat výsostné postavení v sortimentu všech předních světových výrobců řezných nástrojů.



Obr. 7.5 Struktura SK typu WC-Co s vícevrstevným povlakem⁶⁸

8 HODNOCENÍ ŘEZIVOSTI NÁSTROJE

8.1 Opotřebení řezného nástroje

Opotřebení je nežádoucí změna povrchu nebo rozměru těles způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a médií, které opotřebování vyvolávají. Je nežádoucím jevem, proto má být sníženo na minimum. Opotřebení je výsledkem funkce všech strojních součástí, které jsou ve vzájemném kontaktu a relativním pohybu.⁴⁷

Existuje řada případů, kdy se strojní součásti pohybují po sobě, dochází ke tření a ke ztrátě materiálu jedné nebo obou součástí. Opotřebení řezného nástroje nastává v průběhu řezného procesu, dochází ke kontaktnímu pohybu mezi nástrojem a obrobkem respektive nástrojem a třískou (na hlavním a vedlejším hřbetě a špičce nástroje) a odcházející třískou na čele nástroje. Proces opotřebení závisí na fyzikálních a mechanických vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu, druhu obráběcí aplikace, na geometrii nástroje, na pracovních podmínkách a řezném prostředí. V kontaktu mezi nástrojem a obrobkem probíhá několik odlišných fyzikálně-chemických mechanismů opotřebení. K základním patří: abraze, adheze, difuze, oxidace, plastická deformace a křehký lom, dále pak mechanická únava, tepelná únava, delaminační opotřebení, termoelektrické a elektrochemické opotřebení.⁴⁶

Difuze a oxidace jsou mechanismy chemické a spolu s fyzikální abrazí a adhezí působí na nástroj postupně. Jako mechanismy náhlé čili ty, které způsobují okamžitou destrukci nástroje, můžeme označit křehký lom a plastickou deformaci. Vyvolávají změnu tvaru řezné hrany VBD, lavinové opotřebení a ulomení špičky nástroje. V závislosti na aplikaci obrábění, řezných podmínkách (v_c , f , a_p), geometrii nástroje a použité procesní kapaliny můžeme stanovit, kde bude opotřebení nástroje největší respektive nejmenší (čelo, hřbet a špička nástroje). Na hřbet nástroje působí nejvíce abraze a oxidace, na čelo nástroje pak především adheze, difuze a oxidace.⁴⁶

Adheze nastává, když povrchy, které jsou v kontaktu, jsou k sobě přiblíženy tak, že tvoří pevné spojení. Když takto vytvořené spojení je pevnější než lokální pevnost materiálu, může dojít k přenosu částic z jednoho povrchu na druhý. U malých částic otěru se hovoří o zadírání.

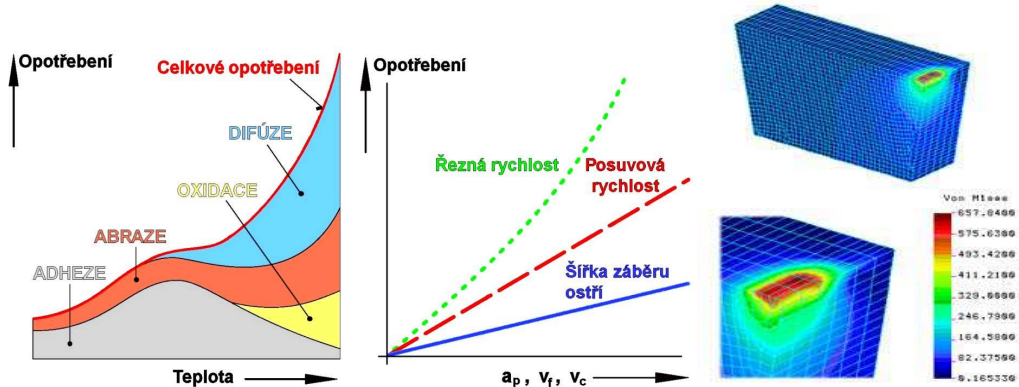
Abraze je vzájemný brusný otěr částicemi z nástroje a obrobku, aby vznikl, musí být jeden materiál třecí dvojice tvrdší než ten druhý, nebo se tvrdé částice tvoří chemickou reakcí části otěru, nebo jejich oxidací. Povrchy by měly být mazány, aby se dosahovalo nízkého součinitele tření.

Difuze ovlivňuje povrch s rostoucí teplotou a při nízké rychlosti pohybů povrchů vůči sobě - zatížené třecí dvojice, kdy dochází v povrchové vrstvě k tečení. Při velmi vysokých rychlostech je mezní vrstva natavena a tím je rychlost difuze velmi vysoká. Difuze je pohyb atomů z obráběného do řezného materiálu, kdy vznikají nežádoucí sloučeniny. Krystaly WC nástroje z SK se na povrchu rozkládají a C difunduje do povrchu třísky. Růst koncentrace C zpevňuje povrch třísky a to znamená růst rychlosti opotřebení. Přenos prvků difuzí závisí na chemickém složení materiálu, na teplotě, času a na koncentraci difundujících prvků.⁴⁷

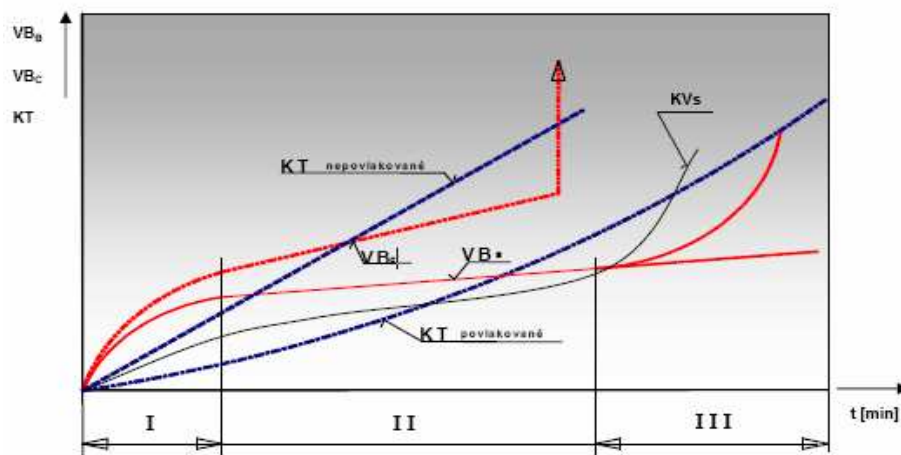
Oxidace je jev, při kterém vznikají na povrchu nástroje nežádoucí chemické sloučeniny v důsledku přítomnosti O_2 v okolním plynném prostředí.

Plastická deformace je vyústěním nakumulované tepelné a mechanické energie v čase, důsledkem čehož nastává změna tvaru nástroje.

Křehký lom je výsledkem mechanického přetížení v průběhu přerušovaného řezu a způsobuje porušení ostří nástroje kvůli vměstkům v obrobku.⁴⁷

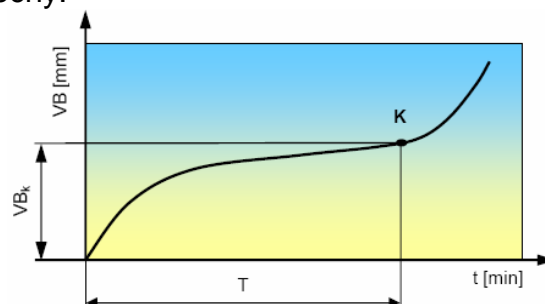


Obr. 8.1 Vliv teploty a řezných podmínek na mechanismy opotřebení a rozložení napětí na VBD⁴⁷

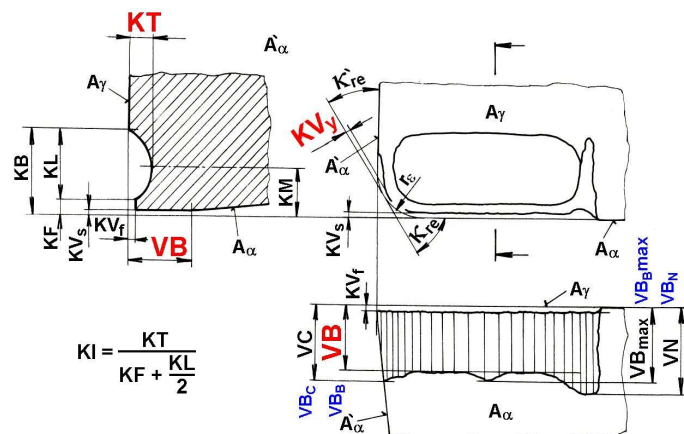


Obr. 8.2 Časový průběh opotřebení¹⁶

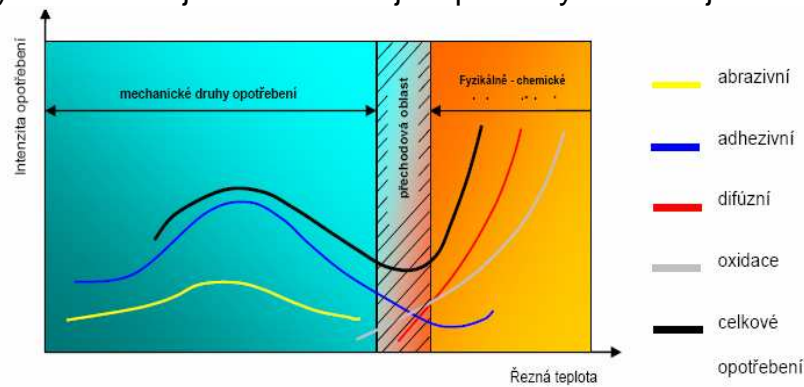
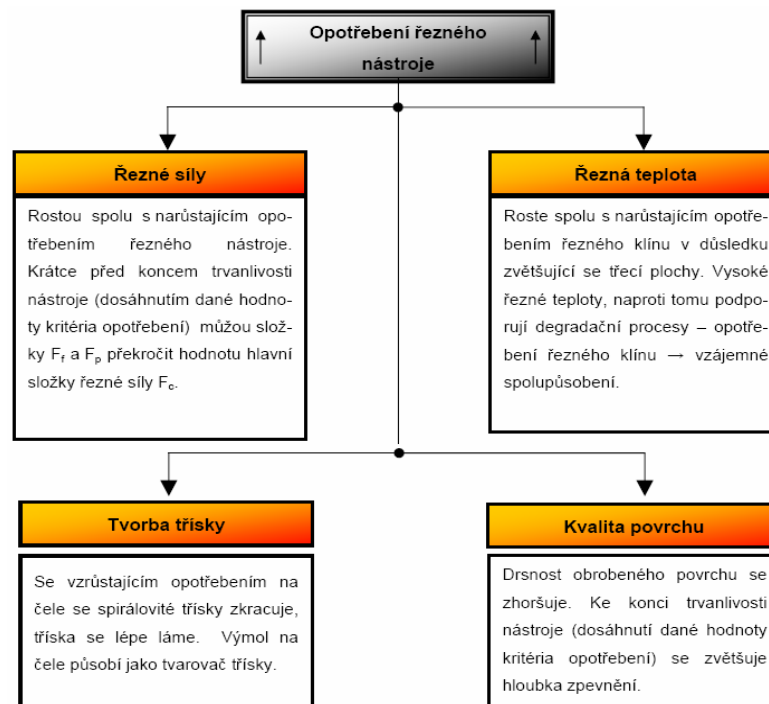
Za normálních podmínek má řezný nástroj křivku opotřebení charakterizovanou třemi fázemi: I. fáze – opotřebení vlivem nerovnosti ostří, II. fáze – rovnoměrné opotřebení, III. fáze – intenzivní opotřebení. Kritéria opotřebení jsou VB – šířka fazety opotřebení na hřbetě, KT – hloubka výmolu na čele, KV₅ – změna rozměru plochy.



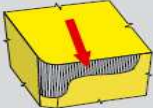
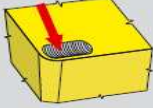
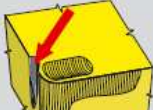
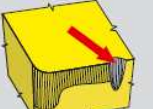


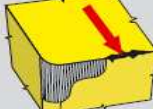

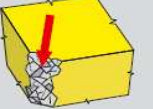
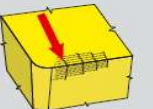
Obr. 8.3 Kritérium otupění řezného nástroje¹⁶

Obr. 8.4 Kritéria opotřebení řezného nástroje ¹⁶

Při určitých podmínkách obrábění se na celkovém opotřebení nepodílejí všechny děje zároveň a stejnou měrou. Jeden nebo více dějů můžou převládat nad jiným. Rozhodujícím činitelem je teplota styku nástroje s obrobkem.

Obr. 8.5 Vliv řezné teploty na mechanismy opotřebení ¹⁶Obr. 8.6 Vliv opotřebení řezného nástroje ¹⁶

Tab. 8.1 Typy opotřebení VBD z SK

Charakter opotřebení	Popis opotřebení a návrh opatření
	Opotřebení hřbetu - kritérium charakterizující trvanlivost VBD. Vzniká v důsledku působení mechanismů opotřebení na nástroj. Jeho velikost lze pouze snížit. Doporučení: použít otěruvzdornější typ SK, použít chladicí emulzi, snížit v_c , při f pod 0,1 mm/ot zvětšit f (povlaky CVD, MTCVD).
	Výmol na čele - charakteristické opotřebení, které se nejvýrazněji projevuje u VBD s rovným čelem. Doporučení: použít jiný typ SK, snížit řeznou rychlost, použít jiný (pozitivnější) typ řezné geometrie.
	Oxidační rýha na vedleším hřbetu - kritérium limitující životnost VBD. Propojení oxidační rýhy s výmolem na čele se projeví na zvýšení drsnosti povrchu obrobku, dojde k jevu nazývanému „chlupacení“. Doporučení: použít povlakovaný typ SK, dovolují-li povlak Al_2O_3 , použít chladicí emulzi resp. zvýšit intenzitu chlazení, snížit řeznou rychlost.
	Vrubové opotřebení na hlavním hřbetu - vzniká v oblasti styku bříty nástroje s povrchem obrobku. Je zapříčiněno převážně zpevněním povrchových vrstev obrobku a otřepy. Vyskytuje se u nerezavějících austenitických ocelí a u operací, kde kolísá hloubka řezu. Doporučení: použít VBD s povlakem Al_2O_3 , zvolit nástroj s menším úhlem nastavení.
	Plastická deformace špičky - důvodem tohoto typu opotřebení je přetížení bříty v důsledku vysokých řezných rychlostí a posuvů. Doporučení: použít otěruvzdornější typ SK, snížit v_c , snížit f , použít chladicí emulzi resp. zvýšit intenzitu chlazení, použít VBD s větším úhlem špičky.
	Tvorba nárůstku - nalepování obráběného materiálu na břit nástroje. Nárůstek má charakter mikronávaru na břitu. Při odtrhávání může dojít k porušení bříty nástroje a tím ke zhoršení jakosti obráběného povrchu. Doporučení: zvýšit v_c , zvýšit f , aplikovat typy SK (PVD), použít pozitivnější geometrii, použít kapalinu s vyšším protinárůstkovým účinkem.
	Porušování řezné hrany mimo záběr - příčinou je nevhodné utváření třísky, která při odchodu naráží na břit a ten mechanicky poškozuje. Doporučení: změnit posuv, zvolit nástroj s jiným úhlem nastavení, použít jinou řeznou geometrii (jiný utvařeč), použít houževnatější typ SK.
	Křehké porušování řezné hrany - vyskytuje se v kombinaci s jiným typem opotřebení, je samostatně obtížně identifikovatelné. Doporučení: použít houževnatější typ SK, zvolit méně intenzivní řezné podmínky, použít jinou řeznou geometrii, při najíždění do záběru zmenšit posuv.
	Destrukce bříty - špičky nástroje - příčiny tohoto jevu mohou být různé a jsou závislé na materiálu nástroje i materiálu obrobku, stavu a zejm. tuhosti soustavy stroj-nástroj-obrobek, vliv mají i záběrové podmínky. Doporučení: použít houževnatější typ SK - stabilizovat řeznou hranu, zvolit nižší řezné podmínky, VBD s větším poloměrem zaoblení špičky.
	Hřebenové trhliny - tento jev je důsledkem dynamického tepelného zatížení při přerušovaném řezu. Doporučení: upustit od chlazení kapalinou (možno použít vzduch z důvodu odstranění třísek z místa řezu), zvolit houževnatější materiál VBD, snížit řeznou rychlost.

8.2 Řezivost nástroje

Řezivost nástroje vyjadřuje schopnost materiálu břitu nástroje obrábět obrobek za daných technologických podmínek. V praxi porovnáváme řezivost dvou nástrojů, zjišťujeme, který má za daných podmínek vyšší řezivost = určíme tzv. index řezivosti i_R .

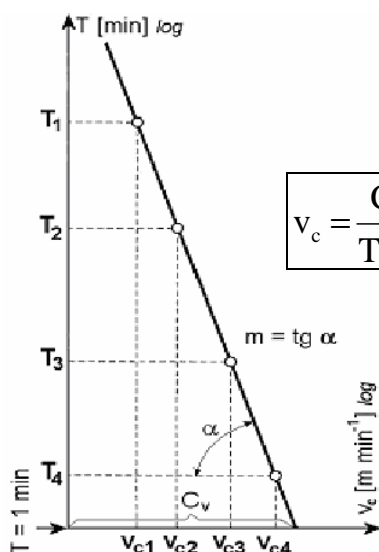
$$i_R = i_O = \frac{v_T}{v_{Te}} [-] \quad (8.1)$$

v_{Te} – je v_c [m.min⁻¹] při zvolené T [min] při obrábění etalonovým nástrojem.

v_T – je v_c [m.min⁻¹] při stejné T [min] dosažená při obrábění zkoušeným nástrojem za jinak stejných řezných podmínek.

Obrobitelnost materiálu vyjadřuje schopnost materiálu obrobku být efektivně obráběn za daných podmínek. Absolutní hodnotu obrobitelnosti nelze stanovit, proto ji stanovíme porovnáváním zkoušeného materiálu s jiným vzorovým tzv. etalonovým materiálem. Stanovuje se index obrobitelnosti i_o .

Řezivost nástroje lze popsat jako schopnost efektivně odebrat třísku z obráběného materiálu. Tato schopnost se odvíjí především od vlastností obrobku, též ale od vlastností řezného nástroje, řezných podmínek a prostředí. Kritériem pro hodnocení řezivosti nástroje je T - v_c závislost. Výsledná přímka popisuje vlastnosti – řezivost materiálu nástroje.⁴⁷



$$v_c = \frac{C_v}{T^{1/m}} [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (8.2)$$

T - trvanlivost [min],
 C_v - konstanta [-],
 v_c - řezná rychlost [m.min⁻¹],
 m exponent [-]

Obr. 8.7 T - v_c závislost (Taylorova závislost)⁴⁷

Dále lze zhodnotit řezivost nástroje stanovením závislosti $J = f(v_c)$, kde J je intenzita opotřebení.

$$J = \frac{VB}{v_c \cdot T} [\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (8.3)$$

VB [mm] - šířka fazetky opotřebení na hřbetě, v_c [m.min⁻¹] - řezná rychlost, T [min] - trvanlivost

8.3 Trvanlivost řezného nástroje

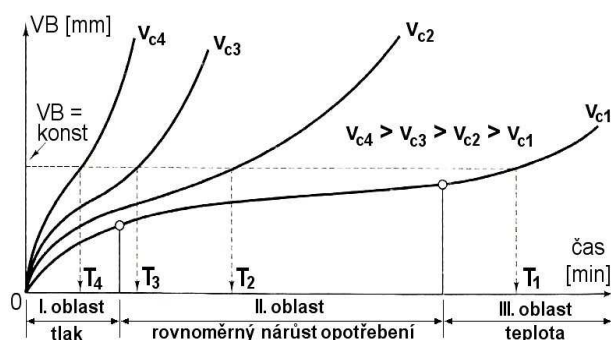
Trvanlivost nástroje je určena intervalem mezi nasazením do řezného procesu a vznikem poruchy, kterou končí provozuschopný stav nástroje. Trvanlivost je doba trvání řezného procesu, která koresponduje s provozuschopným stavem břítu. Je to čas, ve kterém je nástroj schopen efektivně plnit požadované funkce, které jsou popsány vybranými parametry. Vady nástroje lze dělit na postupné – pozvolná změna jednoho parametru nebo náhlé – prudká změna jednoho nebo více parametrů.

Z hlediska spolehlivosti se nástroj posuzuje jako obnovovaný (přeostřeň) nebo neobnovovaný objekt. U neobnovovaných nástrojů je trvanlivost totožná s životností a koresponduje s dobou poruchy. U obnovovaných nástrojů je životnost definována jako součet všech jeho trvanlivostí nebo jako celková doba jeho technického života tj. od prvního nasazení až do jeho vyřazení.³⁶

T břítu je závislá na řezných podmínkách (v_c , f , a_p , K_r), aplikaci obrábění a vlastnostech nástroje a obrobku. Taylorovým vztahem se popisuje závislost trvanlivosti na řezné rychlosti, která má na T největší vliv. Konstanty nabývají hodnot C_V ($10^2 - 10^3$) a C_T ($10^8 - 10^{12}$) a velikost exponentu m charakterizuje vlastnosti řezného materiálu ($RO=3$, $SK=2$ a $ŘK=1,2$). Grafické vyjádření závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti při ostatních daných řezných podmínkách je vyjádřeno $T = f(v_c)$. V kartézských souřadnicích se T zobrazí jako exponenciální křivka a v logaritmických souřadnicích $\log T$ jako přímka.

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} [\text{min}], \text{ kde } C_V = C_T^{1/m} \quad (8.4)$$

C_T – konstanta [-], v_c – řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$], m – exponent [-]



Obr. 8.8 Vliv řezné rychlosti na časový průběh opotřebení na hřbetě⁴¹

Pro stanovení optimální hodnoty trvanlivosti břítu nástroje pro specifické podmínky se vychází ze vztahů pro minimální výrobní náklady pro obrobení dané plochy nebo pro maximální výrobnost za jednotku času.³⁶

$$T_{\text{optN}} = \frac{60 \cdot N_T \cdot T \cdot (m-1)}{D_s} [\text{min}] \quad (8.5) \quad T_{\text{optV}} = (m-1) \cdot T \cdot t_{AS} [\text{min}] \quad (8.6)$$

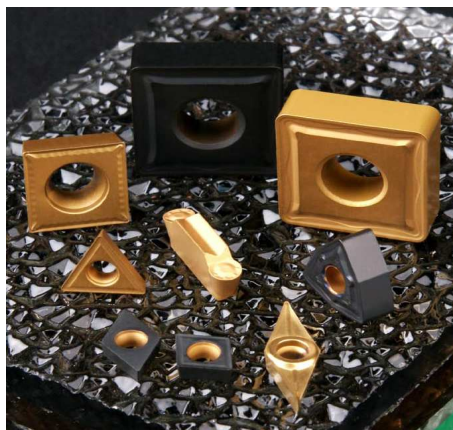
N_T [Kč] – náklady na jednotku a výměnu vztažené na jednu trvanlivost, D_s [Kč / h] – náklady na hodinu strojní práce, m [-] – exponent závislosti $T-v_c$, t_{AS} [min] – jednotkový strojní čas

9 SLINUTÉ KARBIDY V SORTIMENTU NEJVÝZNAMNĚJŠÍCH SVĚTOVÝCH PRODUCENTŮ ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

Filozofie výrobců nových moderních řezných materiálů je vyrábět nástroje pro co nejširší použití v mnoha provedeních, aby si zákazník mohl vybrat pro něj nejlepší poměr kvality k ceně. Vyrábí se proto materiály nejrůznějších jakostí a povlaků pro nejrůznější obráběcí aplikace. Jsou vyvíjeny nové, specifičtější materiály (gradienty, nanokompozity), které pro zákazníka znamenají snížení konečných nákladů na výrobu. Hledají se stále nové povrchové úpravy pro rychlejší a efektivnější obrábění při co nejdelší životnosti na těžko obrobitelných materiálech, jako jsou třeba nerezové oceli, Inconell, Nimonic a Al slitiny. V neposlední řadě při velkokosérové výrobě si může výrobce dovést držet nejnižší ceny při dobré produktivitě práce a vysoké kvalitě výrobků.⁶⁹

V současné době již vazby mezi výrobcem a uživatelem nekončí jejich prodejem nebo pořízením. Výrobci nástrojů věnují stále větší pozornost informovanosti zákazníků o celém výrobním sortimentu, přednostech a rozsahu aplikací každého materiálu, doporučených řezných podmínkách s ohledem na typ nástroje a obráběný materiál, velmi často dávají k dispozici výsledky vlastních zkoušek a technické údaje o realizovaných případech obrábění daným materiálem. Zřetelná je snaha výrobců řezných nástrojů nabídnout výrobek s možností univerzálního využití, ale i zákazník přichází se svým obrobkem a výrobce mu vypracovává kompletní nabídku pro jeho celkové obrobení. Kompletní nabídka obsahuje detailní popis a chování řezného materiálu, výkresy nástrojů vytvořených „na míru“, technologické časy, v případě potřeby i přípravky, CNC programy a upozornění na kolize a ekologická rizika.⁷⁰

Pro analýzu nabídky sortimentu v oblasti SK byli zvoleni čtyři přední světový výrobci řezných materiálů. AB Sandvik Coromant, Seco Tools AB, Iscar Metals a český výrobce Pramet Tools. Rozsah sortimentu každé firmy je zcela odlišný a specifický, proto byly vybrány pro zhodnocení jejich nabídky řezných materiálů typu SK vyměnitelné břitové destičky používané v aplikaci pro soustružení. Mapují se zde dva směry pro vývoj řezných materiálů a to alternativa s nabídkou se širší řadou specializovanějších materiálů a portfolio několika málo univerzálních řezných materiálů.

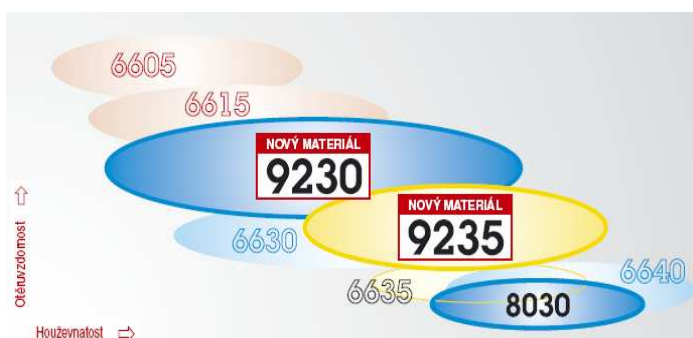


Obr. 9.1 VBD z SK s odbroušeným povlakem na ploškách firmy Seco Tools⁴⁸

9.1 Pramet Tools



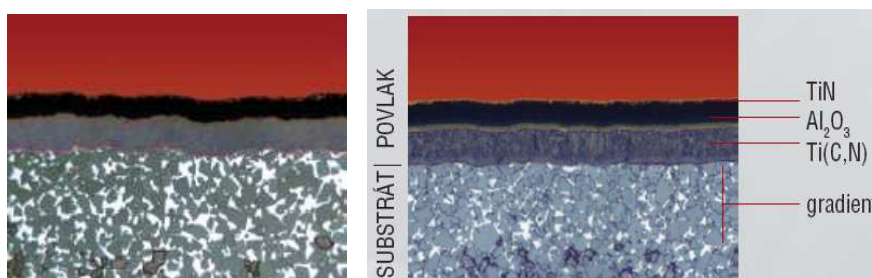
Pramet Tools je domácím zástupcem výrobců řezných materiálů respektive SK. Nabídka je charakteristická orientací na nejběžnější rozměrové řady nástrojů, průměrným počtem nabízených velikostí a produkcí VBD v omezených hodnotách. Dodávané materiály jsou v příznivé cenové relaci i pro domácí zákazníky. Díky vlastnímu vývoji a výzkumu byl prakticky kompletně inovován výrobní sortiment nástrojů pro třískové obrábění, a to jak po stránce materiálové, tak po stránce nových tvarů a geometrií nástrojů ze SK. Dnes plně odpovídá požadavkům moderních technologických postupů obrábění s nárůstem výkonnosti o mnoho desítek procent.



Obr. 9.2 Materiály Pramet Tools pro soustružení ⁷²

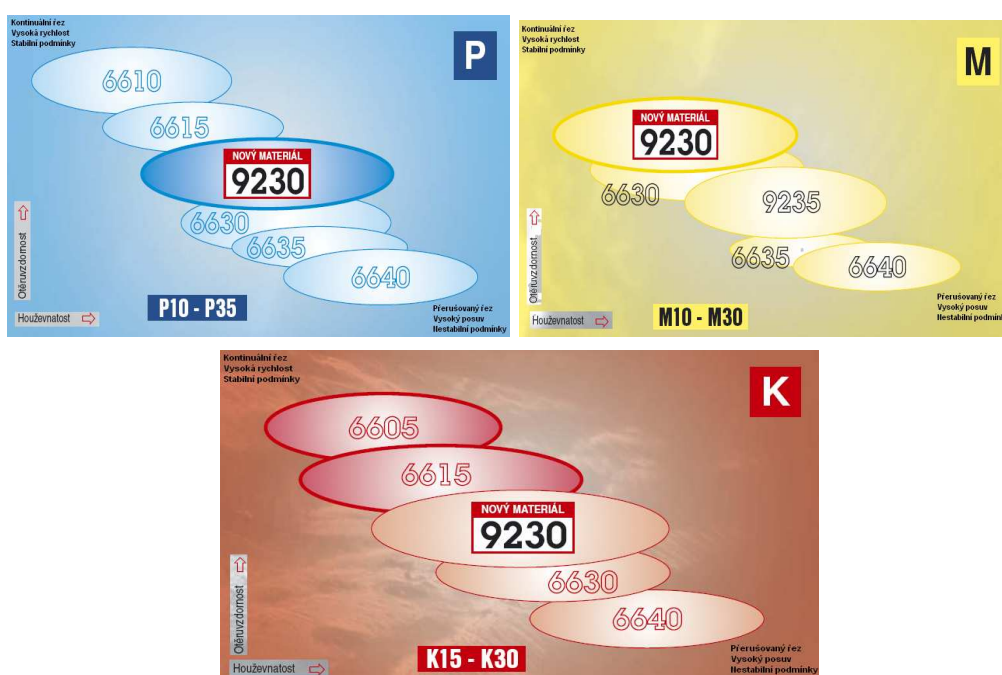
❖ Řezné materiály řady 9000

Optimální využití nového soustružnického materiálu **9235** se nachází v aplikační oblasti P15-P40, M15-M35 a K20-K35. Jde o houževnatý, funkčně gradientní substrát s moderním, středně silným speciálním MTCVD povlakem se speciální povrchovou úpravou. Je vhodný pro střední až hrubovací operace soustružení, střední a vyšší řezné rychlosti a kontinuální i přerušovaný řez. ⁷²



Obr. 9.3 Struktura soustružnického materiálu 9235 a 9230 ⁷²

Soustružnický materiál **9230** s vysokou produktivitou má aplikační oblasti P10-P35, M10-M30, K15-K30 a S15-S25. Je to široko rozsahový SK s funkčně gradientním univerzálním středozrnným substrátem, se středním obsahem kubických karbidů, opatřený moderním, středně silným speciálním MTCVD povlakem. Jedná se o základní typ pro soustružení spojující odolnost proti otěru s dobrou houževnatostí. Je vhodný pro střední a vyšší řezné rychlosti v nepřerušovaném i přerušovaném řezu. Povlak poskytuje VBD dostatečnou tepelnou ochranu, která umožňuje odolávat mnohem vyšším teplotám při zvýšené řezné rychlosti. Kombinace substrátu a povlaku poskytuje VBD rezistenci vůči plastické deformaci. ⁷²

Obr. 9.4 Parametrické začlenění soustružnického materiálu 9230 ⁷²

❖ Řezné materiály řady 8000

Řezný materiál **8016** má aplikační oblasti dle primárního uplatnění K05–K25, N05–N25, H05–H10, P05–P20, M05–M20 a S05–S15. Jedná se o “nejotěruvzdornější” materiál řady 8000 určený pro dokončovací až polohrubovací operace. Jemnozrnná struktura podkladového SK zaručuje dobrou otěruvzdornost ještě umocněnou povlakem na bázi nanostrukturálních kompozitů. Naopak struktura WC+Co v kombinaci s PVD metodou povlakování garantuje dobrou provozní spolehlivost. Z hlediska obráběných materiálů se jedná o velmi univerzální řezný materiál, jehož aplikace je však pro jednotlivé skupiny podmíněna užitím vhodné geometrie. Uplatňuje se při jemném až polohrubovacím soustružení běžných i korozivzdorných ocelí (HRC>55). Dále pak pro obrábění žárupevných a žáruvzdorných ocelí. Lze ho také použít pro soustružení litin a slitin na bázi Al, Cu a pro operace s vysokým teplotním zatížením. ⁷²

Obr. 9.5 Struktura soustružnických materiálů 8016, 8030 a 8040 ⁷²

Soustružnický materiál **8030** je houževnatý typ s vysokou pevností břitu a odolností proti mechanickému namáhání. Tento materiál nachází velmi širokou oblast použití, zejména kvůli své vysoké provozní spolehlivosti. Jeho oblasti použití jsou P25-P40, M20-M35, K20-K40, N15-N30 a S15-25. Má submi-

kronový substrát bez kubických karbidů (typ H) s vysokým obsahem Co. Nanostrukturní povlak nanesený metodou PVD kombinuje dobrou otěruvzdornost a spolehlivost. Z hlediska obráběných materiálů je velmi univerzální. Nachází využití v operacích charakterizovaných vysokou mechanickou zátěží bříty a středních řezných rychlostech. Je vhodný pro soustružení korozivzdorných austenitických ocelí a superslitin, soustružení závitů, zapichování a vícesměrné kopírovací soustružení. Materiál lze za určitých podmínek také aplikovat při obrábění zušlechťených materiálů a slitin neželezných kovů.⁷²

Řezný materiál **8040** je absolutně nejhůževnatější materiál z řady PRAMET 8000. Jeho aplikační oblasti dle primárního uplatnění jsou K10–K25, N10–N30 a M20–M40. Je určen pro extrémně přerušované řezy, špatné záběrové podmínky a pro nejvyšší mechanické namáhání bříty. Své použití nachází při soustružení litin a hlavně pak těžkoobrobitelných slitin na bázi Ni, Co a Fe. Obrábění licí a kovací kůry. I když má tento materiál vysoký obsah Co, má poměrně velmi dobrou otěruvzdornost a to zejména za nižších v_c .⁷²

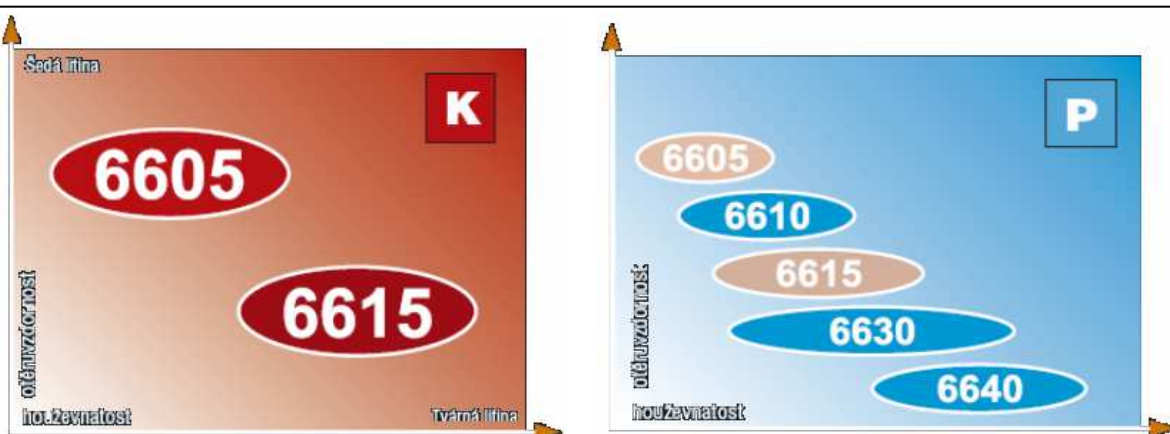
❖ Řezné materiály řady 6000



Obr. 9.6 Mikrostruktura soustružnických materiálů 6605 a 6615⁷³

Materiál **6605** má aplikační oblasti P10-P20, K05-K15 a H05-H15. Vynikající otěruvzdornost a tepelná stabilita tohoto řezného materiálu je zaručena substrátem na bázi WC+Co a navíc umocněna duálním povlakem naneseným kombinací metod MTCVD a PVD s nosnou vrstvou Al_2O_3 . Tato kombinace, vedle unikátních frikčních vlastností, garantuje rovněž vynikající odolnost vůči fyzikálně chemickým opotřebením charakteristických pro vysoce produktivní řezné podmínky. Je určen pro dokončovací až hrubovací soustružení kontinuálním řezem, vysoké v_c a příznivé záběrové podmínky.⁷³

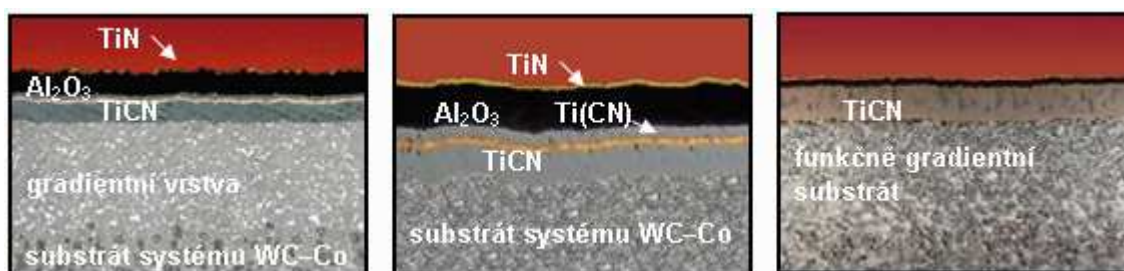
Soustružnický materiál **6615** má oblasti použití v rozmezí P15-P25 a K15-K25. Širokorozsahovost a vysoká provozní spolehlivost jsou dominantními vlastnostmi tohoto řezného materiálu. Těchto vlastností bylo dosaženo kombinací funkčně gradientního substrátu s relativně nízkým obsahem kobaltu a unikátního středně silného povlaku, jehož prvá část je nanášena metodou MTCVD, která garantuje dobrou odolnost vůči opotřebení. Druhá část je nanášena metodou PVD s nosnou vrstvou TiCN a vedle zvýšení odolnosti vůči opotřebení má nezanedbatelný přínos i v komplexním zlepšení frikčních vlastností a řízení vnitřního stresu v povlakové vrstvě, čímž se eliminuje resp. snižuje možnost vytváření a následného šíření mikrotrhlin. Je určen pro dokončovací až hrubovací soustružení, vyšší řezné rychlosti a kontinuální a podmíněně i mírně přerušovaný řez.⁷³



Obr. 9.7 Parametrické začlenění soustružnických materiálů 6605 a 6615⁷³

Materiál **6610** se uplatňuje při dokončovacích operacích při soustružení uhlíkových i slitinových ocelí a obrábění litiny. Aplikační oblasti jsou P10–P25, K5–K20 a M10–M25. Použitím funkčně gradientní vrstvy substrátu (nízký obsah Co) je dosaženo vysoké funkční odolnosti vůči plastickým deformacím. MTCVD povlak typu TiN (2100 HV) – Al₂O₃ (2300 HV) – TiCN (3200 HV).⁷²

Soustružnický materiál **6620** je “nejvýkonnější” materiál řady 6000 určený pro dokončovací až hrubovací operace nepřerušovaným řezem. Jeho aplikační oblasti jsou K10–K25, P10–P20 a H05–H15. Tento materiál se vyznačuje vysokou otěruvzdorností, která je zajištěna relativně velmi silným povlakem MTCVD, jednu z jehož hlavních složek tvoří vrstva Al₂O₃ garantující velmi dobrou odolnost vůči oxidačnímu opotřebení, dále kombinace TiN a TiCN. Vysoká tepelná stabilita. Dominantní aplikační oblastí jsou litiny, ale materiál lze použít i pro dokončování a polohrubování uhlíkových i slitinových ocelí a podmíněně i pro obrábění zušlechťených a kalených materiálů.⁷²

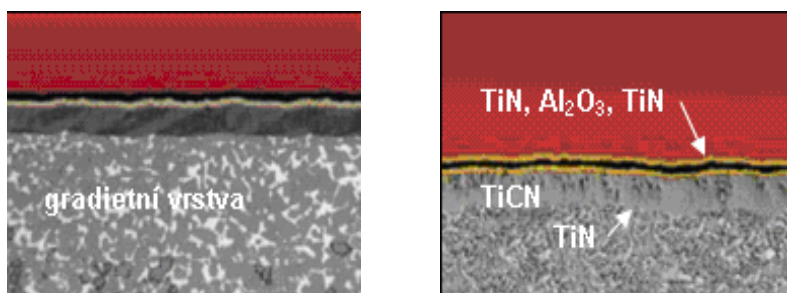


Obr. 9.8 Mikrostruktura soustružnických materiálů 6610, 6620 a 6630⁷²

Řezný materiál **6630** lze z hlediska použití charakterizovat jako “nejuniverzálnější” z řady 6000. Spojení funkčně gradientního substrátu s povlakem o tloušťce 9–14 μm s nosnou vrstvou TiCN nanesený metodou MTCVD předurčuje tento materiál pro dokončovací až hrubovací soustružení, pro plynulý a přerušovaný řez. Při praktických aplikacích je nutno brát v úvahu charakteristickou vlastnost FGM materiálů (dojde-li při rázovém zatížení k porušení břítu, je nutno přenést zatížení dále od ostří tj. zvýšit posuv). Univerzální materiál pro soustružení ocelí se širokou aplikační oblastí P10–P35, M10–M30, K20–K30 a S20, vhodný též pro obrábění korozivzdorných ocelí. Lze ho použít i pro obrábění litiny a podmíněně i některých superslitin. Spojuje dobrou otěruvzdornost s vysokou houževnatostí.⁷²

Soustružnický materiál **6635** má oblast použití v rozmezí P20–P40, M15–M35 a K20–K30. Jeho funkčně gradientní substrát s relativně vysokým obsahem Co a tenký povlak nanesený metodou MTCVD předurčují tento materiál pro aplikace u středních a vyšších průřezů třísky, nepříznivé záběrové podmínky a přerušovaný řez. Je vhodný pro obrábění austenitické a austeniticko–feritické korozivzdorné oceli, běžné uhlíkové i slitinové oceli.⁷²

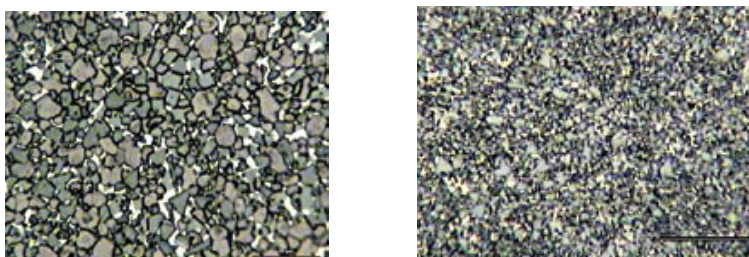
Materiál **6640** s oblastí použití P20–P40, M20–M35, K20–K30 a S20–S30 je nejhouževnatější člen řady 6000, podkladový substrát na bázi WC-Co zajišťuje dostatečnou provozní spolehlivost a spolu s jemnější strukturou i dostatečnou otěruvzdornost. Povlak s nosnou vrstvou TiCN, MTCVD. Uplatnění najde zejména u operací se silným mechanickým namáháním břitu tj. přerušovaný řez, nepříznivé záběrové podmínky, hrubá kůra výkovků a odlitků. Tento materiál je vhodný pro obrábění uhlíkových a slitinových ocelí a zejména pak korozivzdorných materiálů. Své uplatnění najde i při obrábění litin a podmíněně i těžkoobrobitelných materiálů. Při aplikaci materiálů s povlaky nanesenými metodou MTCVD platí, že minimální hranice posuvu je 0,1 mm na otáčku a při kombinaci s funkčně gradientním substrátem 0,15 mm na otáčku. Celková šířka povlaků řady 6000 nanesených metodou MTCVD se pohybuje v rozmezí 5–18 μm .⁷²



Obr. 9.9 Mikrostruktura soustružnických materiálů 6635 a 6640⁷²

❖ Nepovlakované slinuté karbidy

S30 je materiál s kubickými karbidy (typ S) s aplikační oblastí P20-P35. Doporučené řezné podmínky pro efektivní obrábění jsou střední a vyšší posuvy a nízké řezné rychlosti. **HF7** je vhodný pro soustružení šedé litiny, temperované tvárné litiny, korozivzdorných ocelí, žáruvzdorných a žárupevných ocelí a speciálních slitin. Soustružení slitin Al a Cu a zušlechťených ocelí (HRC > 55). Aplikační oblast dle primárního použití K10–K25, N10–N30 M10–M20, S10–S20 a H10–H20. Jde o submikrometrický materiál bez kubických karbidů (typ H) – systém WC–Co. Tento řezný materiál je určen pro malé až střední průřezy třísek a stabilní záběrové podmínky.⁷²



Obr. 9.10 Struktura soustružnických materiálů S30 a HF7⁷²

Tab. 9.1 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Pramet pro ISO skupinu P

P (oceli a ocelolitiny)							
Řezný materiál, VBD - C	6605	6610	6615	6620	6630	6635	6640
Šířka záběru ostří [mm]	1-5	1-5	1-5	1-5	1-5	1-5	1-5
Posuv na otáčku [mm]	0,1-0,8	0,1-0,8	0,1-0,8	0,1-0,8	0,1-0,8	0,1-0,8	0,1-0,8
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]							
P05							
P10							
P15	245-195	205-150		200-145			
P20			240-210				
P25					195-145		
P30						155-120	145-115
P35							
P40							
P45							

Tab. 9.2 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Pramet pro ISO skupinu M

M (korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli)							
Řezný materiál, VBD - C	6610	6630	6635	6640	8040	9230	9235
Šířka záběru ostří [mm]	4-12	4-12	3-12	4-12	5-10,5	5-10,5	5-10,5
Posuv na otáčku [mm]	0,45-1,2	0,4-1,28	0,5-1,2	0,4-1,3	0,4-0,8	0,5-1,05	0,5-1,05
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]							
M05							
M10							
M15	125-95						
M20		120-90				120-95	
M25			95-75	80-50	60-40		120-105
M30							
M35							
M40							
M45							

Tab. 9.3 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Pramet pro ISO skupinu K

K (litiny)								
Řezný materiál, VBD - C	6605	6610	6615	6620	6635	6640	8040	9230
Šířka záběru ostří [mm]	2,4-12	4-16	2,4-12	2,5-16	4-16	2,5-16	5-16	5-16
Posuv na otáčku [mm]	0,1-1,1	0,45-1,7	0,15-1,1	0,3-2	0,45-2	0,3-2	0,5-1,7	0,5-1,6
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]								
K05								
K10	230-180							
K15		190-160	230-200					
K20				215-185				
K25					140-110			195-155
K30						105-75		
K35							95-65	
K40								
K45								

* tmavá barva symbolizuje hlavní oblast použití materiálů, světlá barva pak vedlejší použití

Tab. 9.4 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Pramet pro ISO skupiny N

N (neželezné kovy, pro slitiny Al a Cu)								
Řezný materiál, VBD -C	8016	8030	HF7	Al ← → Cu	8016	8030	HF7	
Šířka záběru ostří [mm]	1-5	1-5	1-5		1-5	1-5	1-5	1-5
Posuv na otáčku [mm]	0,1-0,8	0,1-0,8	0,1-0,8		0,1-0,8	0,1-0,8	0,1-0,8	0,1-0,8
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]								
N05								
N10								
N15	450-300					300-260		
N20		420-300	400-300				280-250	260-220
N25								
N30								
N35								
N40								
N45								

Tab. 9.5 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Pramet pro ISO skupiny S

S (speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti)							
Řezný materiál, VBD -C	6630	6640	8016	8030	8040	9230	HF7
Šířka záběru ostří [mm]	1-5	1-5	1-5	1-5	1-5	1-5	1-5
Posuv na otáčku [mm]	0,1-0,8	0,1-0,8	0,1-0,8	0,1-0,8	0,1-0,8	0,1-0,8	0,1-0,8
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]							
S05							
S10							
S15			40-30				45-15
S20				35-25		60-45	
S25	65-55	45-35			30-20		
S30							
S35							
S40							
S45							

Tab. 9.6 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Pramet pro ISO skupiny H

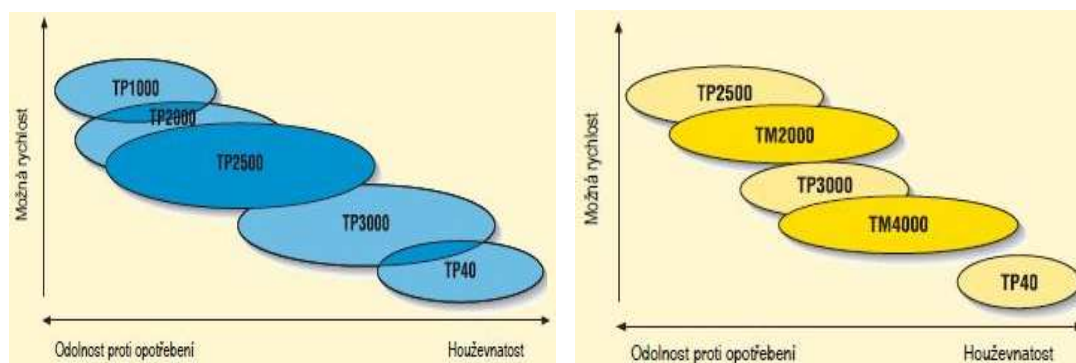
H (zušlechtnuté oceli s pevností nad 1500MP, HRC 60 a tvrzené litiny)							
Řezný materiál, VBD - L	6605	6620	8016	8030	HF7		
Šířka záběru ostří [mm]	1-2,5	1-2,5	1-2,5	1-2,5	1-2,5		
Posuv na otáčku [mm]	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,3		
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]							
H05							
H10							
H15	55-45	45-40	45-40				
H20					40-25		
H25				40-30			
H30							
H35							
H40							
H45							

* se zvyšujícím se posuvem a zvětšujícím se úběrem materiálů se snižuje řezná rychlost

9.2 Seco Tools AB



Švédská společnost **Seco Tools AB** má ve své nabídce zahrnuto více než 21 000 produktů (skvělé upínací držáky řezných nástrojů) a poskytuje komplexní řešení pro aplikace frézování, soustružení a vrtání. Tento nadnárodní koncern má strategii zabývat se problematikou obrábění v oblasti řezných materiálů komplexně. Je zde patrná snaha o univerzálnost nástrojů, ale i o vyvíjení kvalitních nástrojů uzpůsobených k mnoha specifickým operacím. Zvláště ve vývoji kombinovaných nástrojů předčí konkurenci. Kvalitou vyráběných řezných materiálů a kompletně dostupnými službami se řadí mezi špičku mezi výrobci. Ceny se pohybují v evropském průměru.



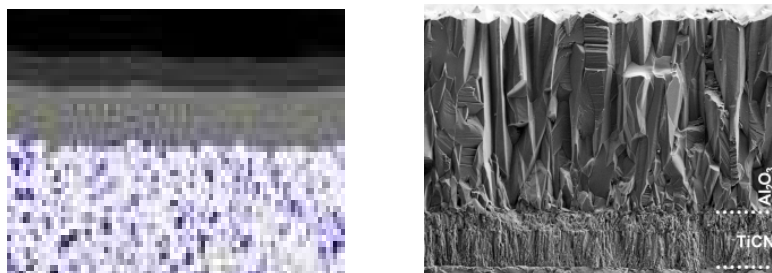
Obr. 9.13 Materiály Seco Tools AB pro soustružení ⁷⁵

❖ Materiály povlakované technologií CVD

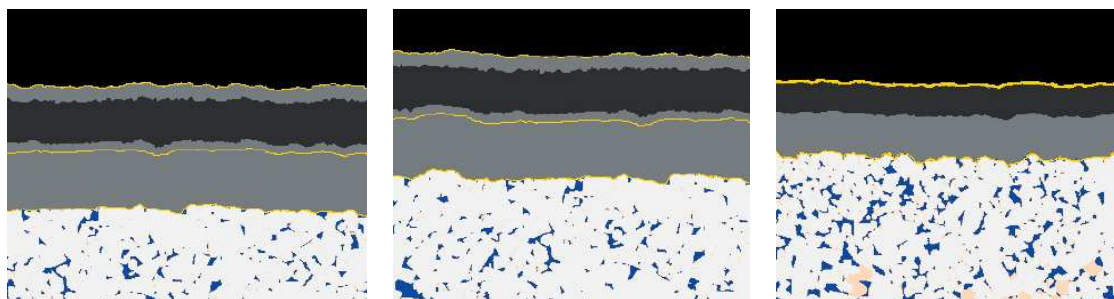
Řezný materiál **TP1000** je nejvíce odolný vůči opotřebení ze všech materiálů Seco pro obrábění načisto a střední hrubování legovaných ocelí. Materiál vykazuje vysokou odolnost vůči opotřebení a houževnatost, která zaručuje dlouhou a předpověditelnou životnost nástroje. Je to vhodná volba, jestliže na předním místě požadavků na výrobu je produktivita. Struktura povlaku od povrchu k substrátu je tvořena systémem $Ti(C,N)+Al_2O_3+Ti(C,N)+TiN$. Aplikační oblast materiálů je P01-P25, K05-K25 a H10-H25. ⁷⁵

Materiál **TP2000** je určen k soustružení slitinových ocelí. Houževnatost a vysoká pevnost umožňují nasazení při nepříznivých řezných podmínkách a vysoké v_c . Je to první volba při obrábění v sériové výrobě. Vrstvy povlaku jsou $Ti(C,N)+Al_2O_3+Ti(C,N)+TiN$. Oblast použití materiálu je v rozmezí P10-P35. ⁷⁵

Nový nástrojový materiál **TP2500** s jistotou obrábí až 80% všech ocelí i nerez. Dobrá volba pro soustružení litiny, kterou obrábí s konzistentní trvanlivostí. Odolnost vůči opotřebení a pevnost spolu s velkou univerzálností činí z této třídy přednostní volbu pro četné oblasti použití. To je dáno novým povlakem **DurAtomic** $Ti(C,N)+Al_2O_3$ - MTCVD se strukturou řízenou na atomární úrovni – zvýšení mechanických a tepelných vlastností. TP2500 dosahuje výborné výsledky při obrábění s vyššími v_c a v_f s řeznou kapalinou. Má velice stabilní řeznou hranu, což zaručuje přesnost součástí jako výsledek vysoké odolnosti proti hřbetnímu opotřebení a výbornou jakost povrchu díky odolnosti proti tvoření nárustku na břitu nástroje a hlavně schopnost obrábění od lehkého dokončování po střední hrubování a dokonce středně přerušované obrábění. Aplikační oblast materiálů je široká: P05-P35, M05-M20 a K15-K40. ⁷⁶

Obr. 9.14 Struktura řezného materiálu TP2500 a povlaku DurAtomic⁷⁵

Řezný materiál **TP3000** je určen k aplikacím, u kterých je prvořadý požadavek na houževnatost a spolehlivost VBD při obrábění ocelí a nerezových ocelí. Dále je vhodný pro přerušovaný řez a soustružení povrchů řezaných plamenem. Struktura povlaku materiálu je tvořena vrstvami $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$. Aplicační oblastí této třídy je P15-P40 a M15-M35.⁷⁵

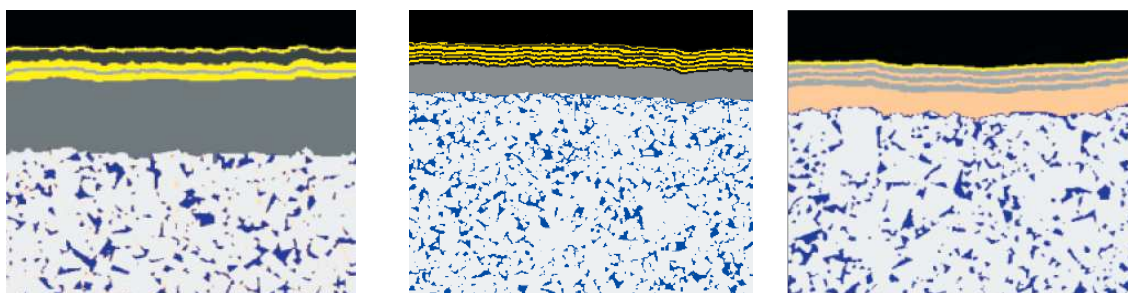
Obr. 9.15 Struktura soustružnických materiálů TP1000, TP2000 a TP3000⁷⁵

TP200 je univerzální materiál s možností všestranného použití při soustružnických aplikacích na oceli a nerezové oceli a je to také dobrá volba pro soustružení litiny. Struktura povlaku $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$. Aplicační oblast P15-P35, M05-M25 a K15-K35.⁷⁵

Soustružnický materiál **TP40** ve velkém rozsahu doplňuje univerzální třídy. Velmi houževnatá třída pro náročné operace u ocelových odlitků a výkovků a u všech typů nerezových ocelí. Složení povlaku $\text{TiC}/\text{Ti}(\text{C}, \text{N})+\text{TiN}$. Oblast použití P25-P45, M20-M40 a K15-K35.⁷⁵

Materiál **TP400** je určen k obrábění austenitických, feritických a korozi-vzdorných ocelí. Má vysokou odolnost proti plastické deformaci a vylamování ostří. Aplicační oblast P30-P45 a M20-M45. Jeho povlak je tvořen systémem $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$.⁷⁵

Obr. 9.16 VBD TK2000 a TP2500 s povlakem DurAtomic⁷⁶

Obr. 9.17 Struktura řezných materiálů TP200, TP400 a TP40⁷⁵

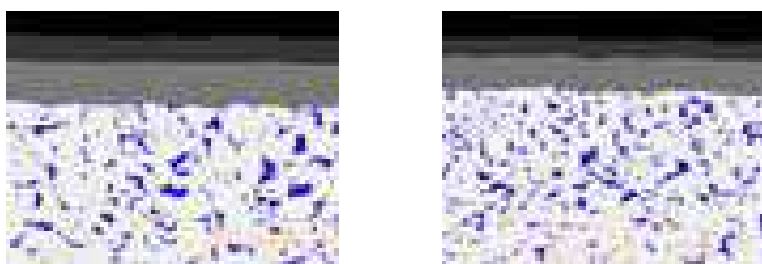
Doplňující materiály **TX100** a **TX150** jsou používány zejména pro obrábění litin, ale i kalených ocelí jako náhrada za univerzální typy.⁷⁵

Řezný materiál **TM2000** je nejodolnější materiál mezi třídami Seco pro obrábění nerezových ocelí. Vyšší odolnost vůči otěru umožňuje vyšší . Aplikační oblast P10-P30 a M05-M25. Povlak $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$ DurAtomic.⁷⁵

Materiál **TM4000** je díky své odolnosti vůči otěru a vynikající tuhosti hrany nejlepší volbou pro aplikace u nerezových ocelí. Oblast použití P25-P45 a M15-M40. Povlak má strukturu $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$ DurAtomic.⁷⁵

TK1000 je nejvíce otěruvzdorný materiál pro obrábění šedé a tvárné litiny. Aplikační oblast P01-P10, K01-K15 a H10-H25. Tento materiál je díky svým speciálně navrženým vlastnostem vynikající alternativou pro obrábění abrazivních ocelí. Povlak je tvořen vrstvami $\text{Ti(C, N)+Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$.^{75, 76}

Vysoce houževnatý soustružnický materiál **TK2000** je vhodný pro obrábění šedé a tvárné litiny. Díky kombinaci vynikající tuhosti ostří a tvrdého povlaku řezného materiálu odolného proti opotřebení je možné dosahovat špičkového výkonu i za nestabilních podmínek a při velmi přerušovaném řezu. Může být použit i při obrábění kalené oceli a vysoce pevné ocelové slitiny. Tento materiál se také osvědčil jako vynikající pro obrábění houževnatých ocelí a pro aplikace, při nichž se požaduje dobrá jakost povrchu. Povlak typu $\text{Ti(C, N)+Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$. Aplikační oblast P05-P25, K05-K35 a H15-H30.^{75, 76}

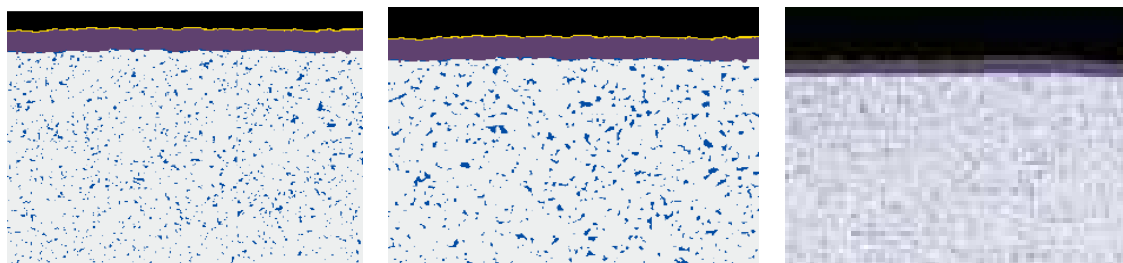
Obr. 9.18 Struktura řezných materiálů TM2000, TM4000⁷⁵Obr. 9.19 Struktura řezných materiálů TK1000 a TK2000⁷⁵

❖ Materiály povlakované technologií PVD

Materiál **CP200** je tvořen tvrdou mikrostrukturou, je určen zejména pro obrábění načisto u vysoce legovaných slitin s pevností za tepla, které obsahují Ni, Co a Fe a pro obrábění nelegovaného Ti. Dobrý výkon podává i při obrábění načisto u nerezových ocelí. Povlak typu (Ti, Al)N+TiN. Oblast použití je P05-P20, M01-M20, K05-K25, S05-S20 a H20-H30.⁷⁵

Typ **CP250** je houževnatější alternativa k materiálu CP200. Je určen hlavně pro hrubování vysoce legovaných slitin s vyšší pevností za tepla. Povlak materiálu je tvořen systémem (Ti, Al)N+TiN. Aplikační oblast je P10-P25, M10-M25, K10-K25 a S05-S15.⁷⁵

Řezný materiál **CP500** má velmi houževnatou mikrostrukturu, je určen pro obrábění načisto a střední hrubování nerezových ocelí. Dobře zvládá přerušovaný řez. Je to také alternativa pro obrábění slitin Al. Struktura povlaku je tvořena vrstvami (Ti, Al)N+TiN. Oblast jeho aplikace se nachází v rozmezí P15-P40, M05-M35, K15-K35 a S05-S25,⁷⁵



Obr. 9.20 Struktura řezných materiálů CP200, CP250 a CP500⁷⁵

❖ Nepovlakované slinuté karbidy

Materiál **890** má mikrostrukturu s vysokou tvrdostí a dobrou houževnatostí. Je určen pro obrábění vysoce legovaných slitin, které obsahují Ni, Co a Fe. Je rovněž vhodný pro kalené oceli, litinu a neželezné slitiny jako Al či Cu. Aplikační oblast tohoto materiálu se nachází v rozmezí M10-M20, K05-K25, N05-N20, S05-S30 a H20-H30.⁷⁵

Řezný materiál **883** je houževnatější alternativa k 890. Je určen zejména pro hrubování vysoce legovaných slitin s vyšší pevností za tepla. Oblast použití je v intervalech M15-M25, K15-K35, N10-N30 a H20-H30.⁷⁵

Soustružnický materiál **HX** nachází využití zejména při obrábění litiny a kalených ocelí. Rovněž vhodný pro Al a jiné neželezné materiály. Aplikační oblast tohoto materiálu je M10-M20, K05-K25, N05-N25 a H15-H30.⁷⁵

KX je jemnozrný SK vhodný pro obrábění neželezných kovů. Oblast použití se nachází v mezích N05-N25, S05-S25 a H15-H30.⁷⁵



Obr. 9.21 Struktura nepovlakovaných slinutých karbidů 890, 883, HX a KX⁷⁵

Tab. 9.7 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Seco pro ISO skupinu P

P (oceli a ocelolitiny)							
Řezný materiál, VBD - C	TP1000	TP2000	TP2500	TP3000	TP200	TK1000	TK2000
Šířka záběru ostří [mm]	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]							
P05							
P10						740-245	
P15	640-190						675-185
P20							
P25		540-180	580-170				
P30				420-130	480-140		
P35							
P40							
P45							

Tab. 9.8 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Seco pro ISO skupinu M

M (korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli)							
Řezný materiál, VBD - L	TP2500	TP3000	TP40	TM2000	TM4000	CP200	CP500
Šířka záběru ostří [mm]	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,1-0,45	0,1-0,45
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]							
M05							
M10						220-65	
M15	325-60						
M20				300-85			190-60
M25							
M30		225-45			240-65		
M35			200-60				
M40							
M45							

Tab. 9.9 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Seco pro ISO skupinu K

K (litiny)							
Řezný materiál, VBD - L	TP1000	TP2000	TP2500	TP200	TK1000	TK2000	890
Šířka záběru ostří [mm]	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]							
K05							
K10					530-200		
K15	295-135						150-60
K20		250-130				345-105	
K25			335-125	220-85			
K30							
K35							
K40							
K45							

Tab. 9.10 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Seco pro ISO skupinu N

N (neželezné kovy, slitiny Al a Cu)							
Řezný materiál, VBD - L	TP200	890	HX	KX	883		
Šířka záběru ostří [mm]	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5		
Posuv na otáčku [mm]	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6		
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]							
N05							
N10		595-305					
N15							
N20			515-265	515-265			
N25	870-450				485-250		
N30							
N35							

Tab. 9.11 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Seco pro ISO skupinu S

S (speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti)							
Řezný materiál, VBD - L	TP40	CP200	CP250	CP500	890	HX	883
Šířka záběru ostří [mm]	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,2-0,6	0,1-0,45	0,1-0,45	0,1-0,45	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]	35-25					30-20	
S05							
S10		50-35					
S15			50-30		35-20		
S20				45-30			30-20
S25							
S30							
S35							

Tab. 9.12 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Seco pro ISO skupinu H

H (zušlechtně oceli s pevností nad 1500MP, HRC 60 a tvrzené litiny)							
Řezný materiál, VBD - L	TP1000	TP2500	TK1000	TK2000	890	HX	883
Šířka záběru ostří [mm]	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5	2,0-2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,2-0,6	0,1-0,45	0,1-0,45	0,1-0,45	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]		115-75					
H05							
H10			175-105				
H15	130-80			110-80	55-35		
H20						50-30	45-30
H25							
H30							
H35							

- * tmavá barva symbolizuje hlavní oblast použití materiálů, světlá barva pak vedlejší použití
- * se zvyšujícím se posuvem a zvětšujícím se úběrem materiálů se snižuje řezná rychlost
- * startovací řezná rychlost je uváděna pro životnost nástroje 15min a hrubovací operace

9.3 AB Sandvik Coromant



Produkce švédského kolosu **AB Sandvik Coromant**, nejvýznamnějšího světového výrobce řezných nástrojů, materiálů a nástrojových systémů pro kovoobráběcí průmysl, je charakterizována širokým rozsahem vyráběných norm, velké variabilitě rozměrů a použitím výchozího řezného materiálu. Speciální katalogy a aplikační příručky nabízejí užitečné informace a aplikační techniky, které jsou prezentovány obchodními zástupci v 60 zemích světa. Z hlediska nákladů se nabídka pohybuje mezi finančně náročnějšími, i když je známo, že konečná cena za dodávané aplikace je smluvní a závisí na odebraném objemu nástrojů, délce smluvního vztahu a podpůrných službách, jako je poradenství nebo řešení technologických zadání pro nové výroby. Tři centrální skladovací místa zajišťují efektivní distribuci po celém světě do 24 hodin.

❖ Řezné materiály řady GC1000

Soustružnický materiál **GC1005** je tvořen kombinací tvrdého substrátu s nízkým obsahem kobaltu (dobrá odolnost proti plastické deformaci) a PVD povlakem (vysoká odolnost proti opotřebením za vysokých teplot), čímž je tento materiál předurčen pro dokončování korozivzdorných ocelí při vysokých řezných rychlostech. Kombinace tvrdého, jemnozrnného substrátu s vysoce odolným povlakem činí z tohoto materiálu nejvhodnější volbu pro hrubovací operace Al a pro obrábění tepelně odolných superslitin na bázi Ni, Fe nebo Co. Má úzkou aplikační oblast M05-M20, N05-N15 a S05-S25.⁷⁷

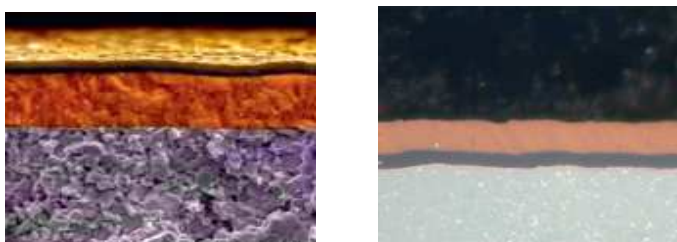
Ultrajemnozrnný karbid **GC1025** s fyzikálně naneseným povlakem se strukturou TiAlN-TiN o tloušťce 4μm se doporučuje pro dokončování nízkouhlíkových ocelí a dalších materiálů snadno ulpívajících na břitu nástroje s vysokými nároky na kvalitu povrchu nebo ostrý řez. Pro skvělou odolnost proti tepelným rázům a tvorbě vrubů se hodí i pro přerušované řezy. Doporučuje se pro obrábění tepelně odolných superslitin a slitiny titanu při nízkých řezných rychlostech. Aplikační oblasti tohoto materiálu jsou v intervalech P15-P35, M10-M25 a S10-S25.⁷⁷

❖ Řezné materiály řady GC1100

GC1105 - substrát se skládá z tvrdého jemnozrnného WC s 6% příměsí Co, což přináší zvýšenou tvrdost za vysokých teplot a dobrou odolnost vůči plastické deformaci. Nový tenký PVD povlak z TiAlN má vynikající přilnavost i k ostrým břítům a zaručuje houževnatost, rovnoměrné opotřebením hřbetu a vysokou výkonnost při obrábění tepelně odolných superslitin. Uplatnění při dokončovacím obrábění korozivzdorné oceli při vysokých řezných rychlostech v leteckém a zdravotnickém průmyslu a také při velkosériovém obrábění drobných součástí. Aplikační oblast materiálu M05-M20, S05-S20.⁷⁷

GC1115 je nejnovější materiál s PVD povlakem (prodlužuje dobu záběru nástroje) a představuje jedinečné řešení pro hrubování a polodokončování žáruvzdorných superslitin (HRSA a titan) a dokončování korozivzdorné oceli (austenitické materiály a precipitačně vytvrzené materiály) s maximální výrob-

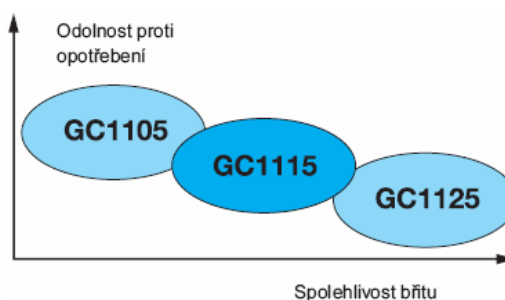
ní spolehlivostí. Oxidický PVD povlak zvyšuje odolnost vůči opotřebení ve tvaru žlábků a snižuje tendenci k tvorbě nárůstku a vydrolování břitu. Vyniká pevnými a ostrými břity, které umožňují obrábění s úzkými tolerancemi a malými řeznými silami. Vyvážený poměr houževnatosti a odolnosti vůči opotřebení předurčuje tento materiál pro použití v širokém spektru aplikací. Současně vyniká univerzálností, která umožňuje obrobek s použitím jediné třídy. GC1115 je vysoce výkonnou alternativou k materiálům GC1105 a GC1125, které nabízejí dokonale ostrý břit optimalizovaný pro vysokou spolehlivost výroby. Tento materiál umožňuje dosáhnout těch nejužších výrobních tolerancí díky zvýšení životnosti nástroje a snížení počtu výměn nástrojů a korekcí na opotřebení. Aplikační oblast ISO M a ISO S.⁷⁷



Obr. 9.22 Struktura řezných materiálů GC1115 a GC1125⁷⁷

Řezný materiál **GC1125** s PVD povlakem TiAlN byl speciálně vyvinut tak, aby pokrýval široké spektrum aplikací. Jemnozrný substrát je optimalizovaný pro obrábění korozivzdorných ocelí. Vyšší tvrdost umožňuje zvýšení hodnot řezných podmínek. Tento materiál je vynikající volba v případě vysokých nároků na ostrý řez a mimořádnou houževnatost břitu nebo v případě požadavku na vysokou kvalitu obrobeného povrchu. Dobrá odolnost vůči opotřebení břitu ve tvaru vrubu a proti tepelným rázům předurčuje tento materiál pro použití při středně náročných operacích s krátkou dobou kontaktu nástroje s obrobkem. Též ho lze použít jako doplněk k GC1515 při dokončování na nízkouhlíkových ocelích při malých posuvech nebo malých řezných rychlostech. Uplatnění nachází i při obrábění žárovzdorných superslitin při malých řezných rychlostech. Aplikační oblast P10-P30, M10-M30, N15-N30 a S20-S30.⁷⁷

Řezný materiál **GC1515** je ultrajemnozrný karbid s CVD povlakem. Využívá se pro dokončovací operace nízkouhlíkových až nízkolegovaných ocelí při nízkých . Skvělá volba při velkých nárocích na kvalitu povrchu nebo ostrý řez. Je vhodný také pro lehké přerušované řezy, oblast použití je P10-P30 a M10-M25. Doporučuje se též pro dokončování korozivzdorných ocelí, kdy je odolnost proti opotřebení důležitější, než houževnatost břitu.



Obr. 9.23 Materiály Sandvik Coromant pro soustružení⁷⁷

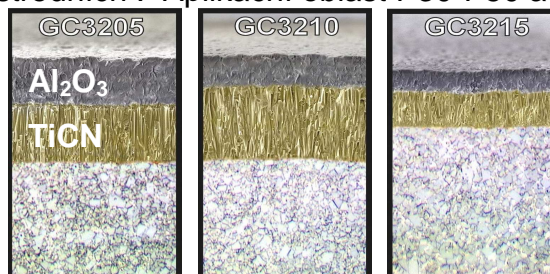
❖ Řezné materiály řady GC2000

GC2015 je SK s chemicky naneseným povlakem. V kombinaci s ostrými geometriemi pro snadný řez se doporučuje pro dokončování až lehké hrubování uhlíkových ocelí a dalších materiálů snadno ulpívajících na břitu. Substrát umožňuje práci za vysokých teplot a multivrstvý CVD povlak (5,5 μ m) má velkou odolnost proti opotřebení. Proto je tento materiál první volbou pro nepřerušované řezy při středních až vysokých řezných rychlostech při dokončování korozivzdorných ocelí. Aplikační oblast v rozmezí P20-P30 a M05-M25.⁷⁷

Materiál **GC2025** je SK s CVD povlakem, optimalizovaný pro hrubování a polodokončování austenitických a duplexních korozivzdorných ocelí při středních řezných rychlostech. Má dobrou odolnost vůči tepelným a mechanickým rázům – použití při přerušovaných řezech. Alternativa pro obrábění oceli s nároky na houževnatost. Aplikační oblast P25-P40 a M15-M35.⁷⁷

Slinutý karbid **GC2035** s PVD povlakem (TiAlN-TiN) o tloušťce 4 μ m se využívá pro polodokončování až hrubování austenitických a duplexních korozivzdorných ocelí při malých až středních řezných rychlostech. Díky vysoké odolnosti vůči tepelným rázům je tato třída vhodná pro aplikace s rychle přerušovaným řezem a těžké hrubování. Aplikační oblast M25-M40.⁷⁷

Materiál **GC235** je SK s CVD povlakem pro hrubování korozivzdorných ocelí a odlitků (s obtížně obrobitelnou kúrou) za nejnepříznivějších podmínek. Houževnatý substrát má extrémně spolehlivé břity, což umožňuje velmi těžké řezy při nízkých až středních . Aplikační oblast P30-P50 a M25-M40.⁷



Obr. 9.24 Struktura řezných materiálů GC 3205, GC3210, GC3215 ⁷⁹

❖ Řezné materiály řady GC3000

GC3005 je SK s CVD povlakem, který se vyznačuje velkou odolností vůči opotřebení a velmi dobrou adhezí k tvrdému substrátu, který má velmi dobré předpoklady pro práci za vysokých teplot v místě řezu. Využívá se pro dokončování vysoce legovaných ocelí při vysokých řezných rychlostech a pro dokončování až hrubování nodulární litiny, vysokopevné temperované litiny a legované šedé litiny ulpívající na břitu. Aplikační oblasti P01-P25 a K01-K20.⁷⁷

Materiál **GC3205** má silný, hladký a opotřebení odolný CVD povlak (Al_2O_3 -TiCN o velikosti 15 μ m) a velmi tvrdý substrát. Doporučené použití pro vysokorychlostní obrábění šedé litiny (GCI). Aplikační oblast K01-K15.⁷⁷

Slinutý karbid **GC3210** má silný, hladký a opotřebením odolný CVD povlak a velmi tvrdý substrát. Doporučen pro obrábění tvárné litiny vysokými rychlostmi (NCI). Aplikační oblast K01-K20.⁷⁷

GC3215 SK s CVD povlakem, který je schopen vydržet i zatížení při přerušovaném řezu. Využívá se jako první volba pro hrubování všech typů litiny při malých a středních . Aplikační oblast K01-K25.⁷⁷

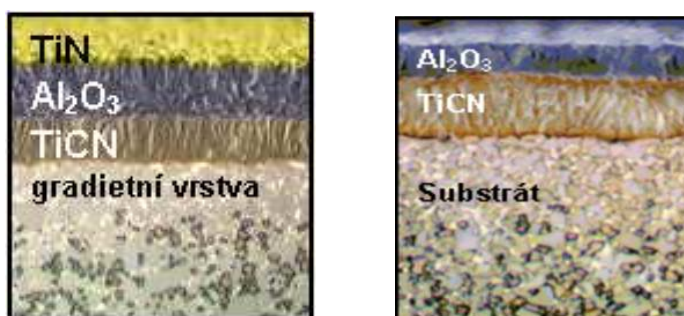
❖ Řezné materiály řady GC4200

GC4205 je materiál s CVD povlakem a se špičkovou odolností proti opotřebení ve tvaru žlábků a plastické deformaci. Odolnost vůči vysokým teplotám bez negativního vlivu na spolehlivost břítu a to jak při obrábění za mokra, tak při obrábění za sucha. Využívá se pro spojitý řez nebo pro aplikace, při kterých je požadována vyšší rychlost úběru kovu. Vhodný je i pro hrubovací až polodokončovací operace v šedé a nodulární litině, při středních až vysokých v_c . Aplikační oblast P01-P15, K05-K15 a H05-H20.⁷⁷

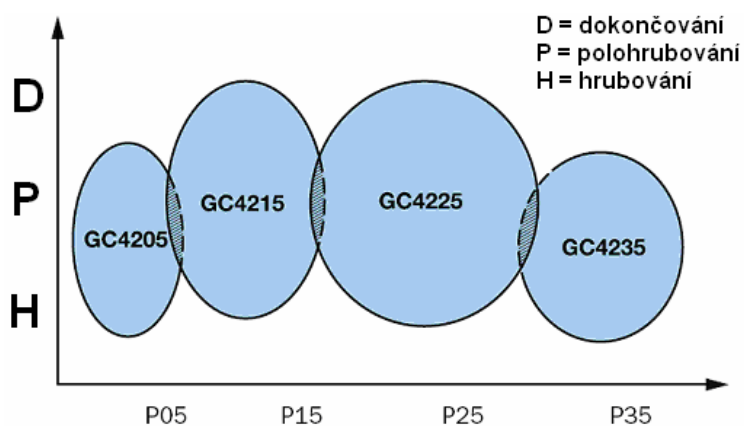
Řezný materiál **GC4215** je SK s chemicky naneseným povlakem pro dokončovací a hrubovací aplikace se spojitým nebo lehce přerušovaným řezem v ocelích nebo ocelolitině. Gradientní substrát poskytuje optimální tvrdost a houževnatost a povlak skvělou odolnost proti opotřebení. Využívá se též pro dokončovací operace v šedé a nodulární litině při malých až středních řezných rychlostech. Tento materiál má schopnost odolávat vysokým teplotám v místě řezu bez ztráty spolehlivosti břítu jak při obrábění za mokra, tak i za sucha. Aplikační oblast materiálu je P01-P30, K10-K25 a H05-H25.⁷⁷

Slinutý karbid **GC4225** s CVD povlakem pro dokončovací až hrubovací operace v oceli a ocelolitině. Funguje dobře také při obrábění korozivzdorných ocelí. Substrát (tvrdost a houževnatost) v kombinaci se silným povlakem odolným proti opotřebení předurčuje tento SK pro soustružení ocelí. Tento materiál je vhodný pro spojitě i přerušované řezy s velkým úběrem materiálu. GC4225 má širokou oblastí použití - P10-P35, M05-M25.⁷⁷

Materiál **GC4235** je karbid s CVD povlakem pro hrubovací operace v korozivzdorných ocelích a ocelových odlitcích za nepříznivých podmínek. Jde o kombinaci gradientního substrátu s tvrdostí a houževnatostí optimalizovanou pro soustružení ocelí se silným povlakem odolným proti opotřebení. Dobrá odolnost proti tepelným a mechanickým rázům činí břit velice spolehlivým a tím umožňuje provádět s tímto materiálem přerušované řezy s vysokou rychlostí úběru materiálu. Oblast použití je v rozmezí P20-P45 a M15-M30.⁷⁷



Obr. 9.25 Struktura řezných materiálů GC 4000 a GC 4225^{79, 78}

Obr. 9.26 Nové materiály Sandvik Coromant ⁷⁷

❖ Nepovlakované slinuté karbidy

H13A je nepovlakovaný slinutý karbid, který se vyznačuje kombinací dobré odolnosti proti opotřebení (otěru) a houževnatosti. Využívá se pro střední až těžké soustružení tepelně odolných ocelí, tvrzených materiálů, Ti a Al slitin při nízkých řezných rychlostech a vysokých hodnotách posuvu. Oblast použití má rozmezí K10-K30, N05-N25, S10-S30 a H15-H25.⁷⁷

Nepovlakovaný SK **H10** je kombinací vynikající odolnosti proti otěru a ostrosti bříty. Využívá se pro hrubování až dokončovací soustružení slitin Al. Aplikační oblast tohoto materiálu leží v intervalu N01-N25.⁷⁷

Materiál **H10A** je nepovlakovaný SK, ve kterém se snoubí dobrá odolnost proti otěru s houževnatostí. Aplikuje se pro střední až těžké soustružení tepelně odolných ocelí a titanových slitin. Oblast použití je S01-S20.⁷⁷

Soustružnický materiál **H10F** je jemnozrný nepovlakovaný SK, který se doporučuje pro obrábění tepelně odolných superslitin nebo slitin titanu při velmi nízkých řezných rychlostech. Skvělá odolnost proti tepelným rázům a tvorbě vrubů znamená, že je též vhodný pro dlouhotrvající spojitě i přerušované řezy. Aplikační oblast tohoto materiálu je S10-S30.⁷⁷

S05F je karbid s chemicky naneseným povlakem. Používá se pro dokončování HRSA při vysokých řezných rychlostech, nebo pro dlouhotrvající spojitě řezy při nižších řezných rychlostech. V aplikacích, kde tvorba vrubů nečiní vážné problémy, tj. oblé břitové destičky, velký úhel nastavení a měkčí materiály, lze materiál použít i pro hrubování. Oblast použití je S05-S15.⁷⁷

Obr. 9.27 Vyměnitelné břitové destičky pro HRSA firmy Sandvik Coromant ⁷⁷

Tab. 9.16 Doporučené řezné podmínky materiálů Sandvik Coromant pro ISO skupinu N

N (neželezné kovy, slitiny Al a Cu)							
Řezný materiál	H10		H13A		GC1005		GC1125
Šířka záběru ostří [mm]	2,5		2,5		2,5		2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,15-0,8		0,15-0,8		0,15-0,8		0,15-0,8
Aplikace / v_c [$m \cdot min^{-1}$]							
N05							
N10					770-85		
N15	2000-300		1900-270				
N20							
N25							770-85
N30							
N35							

Tab. 9.17 Doporučené řezné podmínky materiálů Sandvik Coromant pro ISO skupinu S

S (speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti)								
Řezný materiál	S05F	GC1005	GC1105	H10A	H13A	GC1025	GC1125	H10F
Šířka záběru ostří [mm]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,1-0,3	0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-0,5
Aplikace / v_c [$m \cdot min^{-1}$]								
S05								
S10	160-55			85-16				
S15			150-24					
S20		150-24						
S25					80-16	75-12		
S30							75-12	75-10
S35								

Tab. 9.18 Doporučené řezné podmínky materiálů Sandvik Coromant pro ISO skupinu H

H (zušlechtněné oceli s pevností nad 1500MP, HRC 60 a tvrzené litiny)						
Řezný materiál		H13A		GC4205		GC4215
Šířka záběru ostří [mm]		2,5		2,5		2,5
Posuv na otáčku [mm]		0,1-0,6		0,1-0,6		0,1-0,6
Aplikace / v_c [$m \cdot min^{-1}$]						
H05						
H10						
H15				70-17		65-15
H20						
H25		45-11				
H30						

- * tmavá barva symbolizuje hlavní oblast použití materiálů, světlá barva pak vedlejší použití
- * se zvyšujícím se posuvem a zvětšujícím se úběrem materiálů se snižuje řezná rychlost
- * startovací řezná rychlost je uváděna pro životnost nástroje 15min a operace hrubování

9.4 Iscar Metals



Porovnáním s dalším výrazným světovým výrobcem, izraelskou společností **Iscar Metals**, je možno registrovat zvýšený rozsah produkce VBD, zvláště směrem k menším typům. Strategické zaměření na inovaci starších nástrojů je realizováno změnou substrátu materiálu, výkonnějším odolnějším povlakem a změnou geometrie. Ojedinelé v její nabídce je však zaměření na přesnost a upínání VBD a úspory seřizovacích časů. Víze firmy spočívá nejen v důrazu na vysokou kvalitu a výkonnost vyráběných rezných materiálů, ale též v jejich upotřebitelnosti jak v podmínkách sériové tak i kusové výroby, mnohdy při velmi speciálních požadavcích na nástroj. Cenami patří mezi středně finančně náročné dodavatele. Poskytuje špičkový elektronický katalog a generátor rezného procesu.

❖ Řezné materiály řady SUMO TEC IC8000

Řezný materiál **IC8150** má velmi tvrdý karbidový substrát s povrchem napuštěným Co. Povlak je tvořen vrstvou TiCN nanosenou metodou MTCVD a silnou vrstvou Al_2O_3 nanosenou metodou CVD. Vyznačuje se vysokou teplotní stabilitou, odolností proti vyštípování a plastické deformaci. Doporučuje se pro rychlostní obrábění ocelí za stabilních až mírně nestabilních podmínek. Aplikační oblast P01-P30 a K05-K15.⁸⁰

Univerzální materiál **IC8250** je tvořen houževnatým karbidovým substrátem s povrchem Co a MTCVD TiCN povlakem s vrstvou CVD Al_2O_3 . Aplikuje se k obrábění ocelí za širokého rozsahu rezných podmínek. Oblast použití tohoto materiálů je P10-P35 a M05-M20.⁸⁰

Houževnatý karbid **IC8350** s chemicky naneseným povlakem TiCN a Al_2O_3 se pro svou odolnost proti vyštípování používá při soustružení ocelí s přerušovaným řezem za nestabilních podmínek. Aplikační oblast tohoto materiálu je v intervalech P20-P45 a M15-M30.⁸⁰

❖ Řezné materiály řady SUMO TEC IC5000

Soustružnický materiál **IC5005** má velmi tvrdý karbidový substrát posílený chemicky nanesenou depoziční vrstvou TiCN a Al_2O_3 . Vyznačuje se výbornou tepelnou stabilitou, odolností proti plastické deformaci a zároveň zvýšenou odolností proti otěru. Doporučuje se hlavně pro soustružení nodulární respektive šedé litiny při stabilních podmínkách. Oblast použití je v mezích P05-P15, K05-K20 a H15-H25.⁸⁰

SK **IC5010** s MTCVD povlakem TiCN a CVD povlakem Al_2O_3 se pro svou houževnatost používá pro obrábění šedé litiny za stabilních až mírně nestabilních podmínek. Úspěšně ho lze také použít pro obrábění tvárné litiny. Aplikační oblast tohoto materiálu je v rozmezí K05-K20.⁸⁰

❖ Řezné materiály řady SUMO TEC IC800

Materiál **IC807** má houževnatý submikronový substrát posílený TiAlN povlakem naneseným PVD metodou pro lepší odchod třísek. Vhodný pro soustružení žárupevných slitin a kalených ocelí při nízkých až středních řezných rychlostech. Aplikační oblast tohoto materiálu je v intervalech P10-P30, M05-M20, S05-S20 a H05-H15.⁸⁰

Slinutý karbid **IC808** tvoří submikronová struktura substrátu spolu s PVD povlakem TiAlN. Pro svou houževnatost je vhodný pro obrábění ocelí, austenitických nerezí a žárupevných slitin při středních až vysokých řezných rychlostech a přerušovaném řezu. Velmi dobře odolává vrubovému opotřebení a tvorbě nárůstku. Široká oblast použití tohoto materiálu je v rozmezí P15-P30, M20-M30, K20-K40, S05-S20 a H05-H15.⁸⁰

❖ Řezné materiály označení ISCAR

Řezný materiál **IC3028** je tvořen houževnatým substrátem a fyzicky nanesený povlakem TiN-TiCN. Využívá se pro obrábění nerezových ocelí a vysokoteplotních slitin při středních řezných rychlostech. Vyhovuje i podmínkám přerušovaného řezu a těžkým soustružnickým aplikacím. Aplikační oblast tohoto materiálu se nalézá v rozmezí P25-P45 a M05-M35.⁴

Slinutý karbid **IC354** je materiál s jemnozrnným substrátem a s PVD TiN-TiCN povlakem. Je úspěšně aplikován při všeobecných soustružnických operacích na uhlíkových, legovaných a nerez ocelích za středních a vyšších řezných rychlostech. Oblast použití materiálu je P20-P40 a M10-M30.⁴

Další povlakované slinuté karbidy firmy ISCAR využívané pro ISO soustružnické aplikace jsou **IC507** s rozsahem P10-P30, M05-M20, S05-S20 a H05-H15, **IC635** s aplikací P30-P50 a M20-M40, **IC9015** s použitím P10-P30 a K10-K15 a **IC9025** s oblastí využití P20-P30 a M15-M30 a povlakované SK **IC8048** a **IC9007** s oblastí použití P10-P20 a K10-K20.⁸⁰

❖ Nepovlakované slinuté karbidy

IC10 je nepovlakovaný jemnozrnný karbid. Využívá se pro obrábění nerezů a vysokoteplotních slitin při nízkých až středních řezných rychlostech. Aplikační oblast K20-K30, N10-N30 a S10-S30.⁴

Nepovlakovaný slinutý karbid **IC20** je aplikován při soustružení hliníku pro operace pro polohrubování a dokončování za nízkých posuvů a při středních řezných rychlostech. Široká oblast použití M10-M25, K10-K20, N05-N25, S05-S20 a H05-H15.⁴

Tab. 9.19 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Iscar pro ISO skupinu P

P (oceli a ocelolitiny)							
Řezný materiál, VBD - C	IC807	IC808	IC8150	IC8250	IC8350	IC8048	IC3028
Šířka záběru ostří [mm]	3,5-8	3,5-8	2,5-10	1,5-12	1,5-15	1,5-6,0	1,5-10
Posuv na otáčku [mm]	0,3-0,8	0,3-0,8	0,3-1,0	0,25-1,0	0,25-1,5	0,25-0,5	0,25-1,0
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]							
P05							
P10							
P15							
P20							
P25	300-200	300-200	200-150	200-150			
P30							
P35					200-150	250-150	130-50
P40							
P45							

Tab. 9.20 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Iscar pro ISO skupinu M

M (korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli)							
Řezný materiál, VBD - C	IC807	IC808	IC8250	IC8350	IC3028	IC635	IC9025
Šířka záběru ostří [mm]	3-10	3,5-8	1,5-12	1,5-15	1,5-10	1,5-10	1,5-10
Posuv na otáčku [mm]	0,3-1,0	0,3-0,8	0,25-1,0	0,25-1,5	0,18-1,0	0,25-0,7	0,25-0,8
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]							
M05							
M10							
M15	250-150		150-100				
M20							
M25		300-150		250-150	130-50		220-100
M30						100-80	
M35							
M40							
M45							

Tab. 9.21 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Iscar pro ISO skupinu K

K (litiny)							
Řezný materiál, VBD - S	IC808	IC8150	IC5005	IC5010	IC9015	IC8048	IC9007
Šířka záběru ostří [mm]	1,0-5,0	1,5-10	1,5-10	1,0-5,0	2,0-10	1,5-10	15,5-5,0
Posuv na otáčku [mm]	0,15-0,5	0,2-0,6	0,3-0,5	0,15-0,5	0,3-1,0	0,2-0,6	0,3-0,5
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]							
K05							
K10							
K15		250-150	500-250	300-250	250-140	160-120	300-100
K20							
K25							
K30	400-250						
K35							
K40							
K45							

Tab. 9.22 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Iscar pro ISO skupinu N

N (neželezné kovy, slitiny Al a Cu)							
Řezný materiál, VBD - C	IC08		IC10		IC20		IC520
Šířka záběru ostří [mm]	2,5		2,5		2,5		2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,01-0,25		0,01-0,25		0,15-0,8		0,15-0,8
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]							
N05							
N10							
N15							
N20	2400-95		2000-100		2500-150		
N25							2100-80
N30							
N35							
N40							
N45							

Tab. 9.23 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Iscar pro ISO skupinu S

S (speciální žárupevné slitiny na bázi Ni,Co, Fe a Ti)							
Řezný materiál, VBD - C	IC807	IC808	IC3028	IC507	IC07	IC10	IC20
Šířka záběru ostří [mm]	1,0-10,0	0,5-8,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,3-1,0	0,15-1,0	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,3
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]							
S05							
S10							
S15	200-30			180-25			160-15
S20		180-30			160-20	150-20	
S25			160-10				
S30							
S35							
S40							
S45							

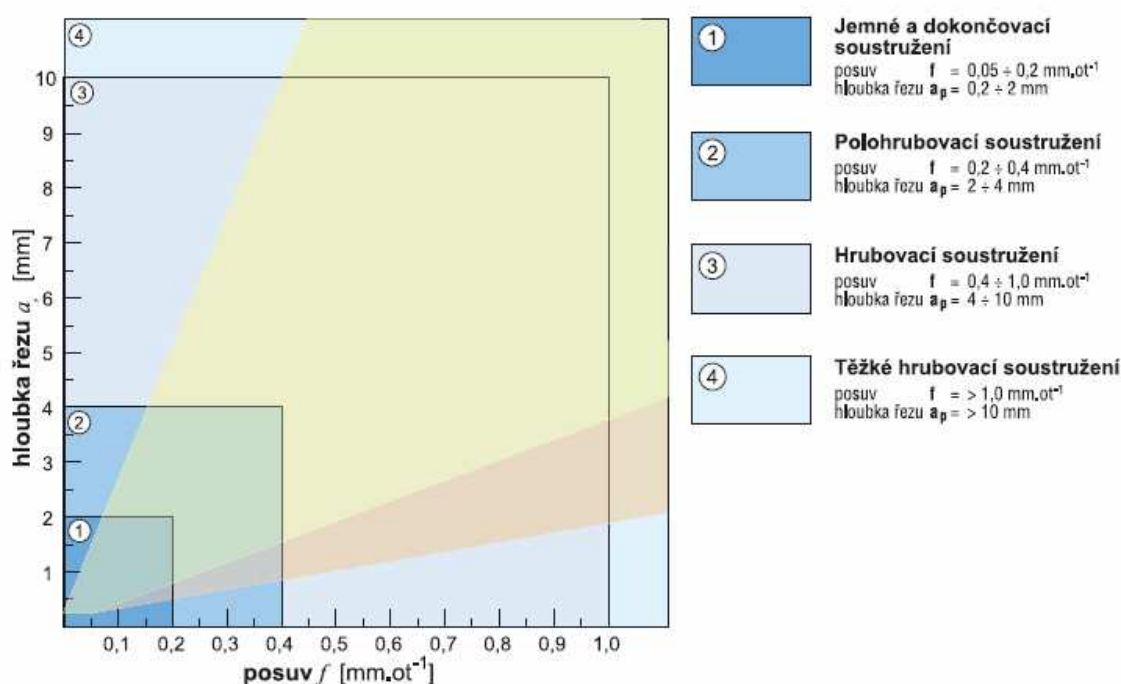
Tab. 9.24 Doporučené řezné podmínky soustružnických materiálů Iscar pro ISO skupinu H

H (zušlechťené oceli s pevností nad 1500MP, HRC 60 a tvrzené litiny)							
Řezný materiál, VBD - C	IC807	IC900	IC808	IC1008	IC5005	IC20	IC507
Šířka záběru ostří [mm]	1,0-4,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,16-0,45	0,1-0,6	0,1-0,6	0,1-0,6	0,1-0,6	0,1-0,6	0,1-0,6
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]							
H05							
H10	100-30					70-30	100-40
H15		150-50					
H20					150-50		
H25			120-40	100-50			
H30							
H35							
H40							

10 POROVNÁNÍ MATERIÁLŮ ČTYŘ SVĚTOVÝCH VÝROBCŮ DLE ŘEZNÝCH PODMÍNEK

Porovnání nabídky sortimentu světových výrobců nástrojových materiálů je v podstatě vyhodnocení pracovních možností (rozsah aplikace, univerzálnost, trvanlivost nástroje) dostupných řezných materiálů dle doporučených řezných podmínek dle technických katalogů, elektronických generátorů řezného procesu či praktických zkoušek zveřejněných výrobcem. Cílem této kapitoly je následné vyhledání nejlepší varianty řezného materiálu pro použití v určité soustružnické aplikaci vzhledem k ISO v daném uživatelském provozu a podmínkách obrábění respektive sestavení klíče pro výběr nejvhodnějšího nástrojového materiálu či jeho efektivních alternativ při jeho technické nebo ekonomické nedostupnosti pro uživatele.

Jako hlavní kritéria pro posouzení nabídky čtyř světových výrobců řezných materiálů (Pramet Tools, Seco Tools, Sandvik Coromant a Iscar Metals) byla zvolena řezná rychlost, která je závislá na posuvu na otáčku, šířce záběru ostří, obráběném a řezném materiálu a aplikační oblasti nástrojového materiálu vzhledem k ISO 513. Řezná rychlost, která ovlivňuje řezný proces (obrobitelnost, trvanlivost a řezivost nástroje) ze všeho nejvíce dle $T-v_c$ závislosti zmíněné výše je udávána pro životnost nástroje 15min. V jednotlivých skupinách (P, M, K, N, S, H) je vždy vybrán jeden konkrétní obráběný materiál a typ VBD pro vybrané řezné materiály z SK. Takto nastaveným systémem lze docílit a analyzovat, který z posuzovaných řezných materiálů je nejuniverzálnější, nejefektivnější či nejvýkonnější v dané aplikační oblasti a tudíž pro uživatele nejvhodnější pro praktické využití v daném specifickém obráběcím procesu.



Obr. 10.1 Doporučené řezné podmínky pro obrábění firmy Pramet Tools ⁷²

Tab.10.1 Srovnání aplikačních oblastí řezných materiálů povlakovaných metodou MTCVD

Výrobce / Materiál								
	6630							
Pramet Tools	6620					6640		
	TP05	TP10	TP15	TP20	TP25	TP30	TP35	TP40
Seco Tools	TP100						TP300	
	TX100	TX150	TP200					
	GC3005	GC2015	GC4025				GC4035	
Sandvik Coromant	GC3015	GC3020	GC3025	GC2025				GC2035
			GC4015					
			IC815	IC825		IC856		IC635
Iscar Metals	IC428		IC9015		IC9025			
			IC8048			IC835		IC3028

Tab.10.2 Srovnání aplikačních oblastí řezných materiálů povlakovaných metodou PVD

Výrobce / Materiál								
	8026			8030				
Pramet Tools	8016					8040		
			F20M	CP25		T60M		CP50
Seco Tools			F25M				F40M	
	F15				F30M			
					GC1020			
Sandvik Coromant	GC1015				GC1025			
		GC1020			GC1125	GC2030		
			IC250	IC950			IC928	
Iscar Metals		IC220		IC308	IC354			IC328
			IC910	IC508				IC3028

Tab. 10.3 Porovnání řezných podmínek soustružnických materiálů pro ISO skupinu P

P (oceli a ocelolitiny)								
Řezný materiál	6610	6630	TP2000	TP2500	GC4215	GC4225	IC8150	IC8250
Šířka záběru ostří [mm]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,1-0,8	0,1-0,8	0,2-0,6	0,2-0,6	0,1-0,8	0,1-0,8	0,3-1,0	0,3-1,0
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]								
P05								
P10								
P15								
P20	205-150				570-105		200-150	
P25		195-145	540-180	580-170		590-90		200-150
P30								
P35								
P40								
P45								

- * tmavá barva symbolizuje hlavní oblast použití materiálů, světlá barva pak vedlejší použití
- * se zvyšujícím se posuvem a zvětšujícím se úběrem materiálů se snižuje řezná rychlost
- * startovací řezná rychlost je uváděna pro životnost nástroje 15min a operace hrubování

Tab. 10.4 Porovnání řezných podmínek soustružnických materiálů pro ISO skupinu M

M (korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli)								
Řezný materiál	9230	9235	TM2000	TM4000	GC1125	GC2015	IC807	IC9025
Šířka záběru ostří [mm]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,5-1,0	0,5-1,0	0,2-0,6	0,2-0,6	0,1-0,3	0,1-0,3	0,3-1,0	0,2-0,8
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]								
M05								
M10								
M15				240-65		260-105	250-150	
M20	120-95	120-105	300-85		280-90			
M25								220-100
M30								
M35								
M40								
M45								

Tab. 10.5 Porovnání řezných podmínek soustružnických materiálů pro ISO skupinu K

K (litiny)								
Řezný materiál	6615	6620	TK1000	TK2000	GC3210	GC3215	IC5005	IC5010
Šířka záběru ostří [mm]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,15-1,1	0,3-2,0	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,3-0,5	0,15-0,5
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]								
K05								
K10	230-200	215-185	530-200	345-105	385-170	260-115	500-250	300-250
K15								
K20								
K25								
K30								
K35								
K40								
K45								

Tab. 10.6 Porovnání řezných podmínek soustružnických materiálů pro ISO skupinu N

N (neželezné kovy, slitiny Al a Cu)							
Řezný materiál	8016	HF7	TP200	890	GC1005	H10	IC20
Šířka záběru ostří [mm]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,1-0,8	0,1-0,8	0,2-0,6	0,2-0,6	0,15-0,8	0,15-0,8	0,15-0,8
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]							
N05							
N10	450-300	400-300	870-450	595-305	770-85	2000-300	2000-150
N15							
N20							
N25							
N30							
N35							
N40							
N45							

Tab. 10.7 Porovnání řezných podmínek soustružnických materiálů pro ISO skupinu S

S (speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti)								
Řezný materiál	8016	HF7	CP250	890	GC1005	S05F	IC507	IC07
Šířka záběru ostří [mm]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,1-0,8	0,1-0,8	0,1-0,45	0,2-0,6	0,1-0,5	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,8
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]								
S05								
S10								
S15	40-30	45-15	50-30	35-25	150-24	160-55	180-25	160-20
S20								
S25								
S30								
S35								
S40								
S45								

Tab. 10.8 Porovnání řezných podmínek soustružnických materiálů pro ISO skupinu H

H (zušlechtěné oceli s pevností nad 1500MP, HRC 60 a tvrzené litiny)								
Řezný materiál	6605	8016	TP1000	TK1000	GC4205	GC4215	IC900	IC507
Šířka záběru ostří [mm]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Posuv na otáčku [mm]	0,1-0,3	0,1-0,3	0,2-0,6	0,1-0,45	0,1-0,6	0,1-0,6	0,1-0,5	0,1-0,5
Aplikace / v_c [m.min ⁻¹]								
H05								
H10								
H15	55-45	45-40	130-80	175-105	70-17	65-15	150-50	100-40
H20								
H25								
H30								
H35								
H40								
H45								

Z provedené analýzy čtyř výrobců řezných materiálů vyplývá, že stávající celosvětová produkce nástrojových materiálů je velice široká a tím pokrývá všechny dostupné obráběcí aplikace v rámci ISO soustružení. Skýtá nepřehledné množství možností a kombinací, jak nejlépe provést určitou obráběcí operaci prostřednictvím vhodně vybraných řezných materiálů v závislosti na optimálně zvolených řezných podmínkách v aplikačních oblastech.

Prostřednictvím srovnávacích tabulek byly vyhodnoceny nejnovější i stávající SK pro každou ISO soustružnickou oblast v rámci hrubovacích operací. Každý výrobce je připraven nabídnout v každé ISO oblasti obráběných materiálů několik zcela odlišných nástrojových materiálů (SK, Cermety, RK, PKD nebo PKNB). Zvolená kritéria (v_c , a_p , f) ukazují, že povlakované SK se v dnešní době využívají zejména k obrábění oblastí P, M a K a při soustružení obráběných materiálů ze skupin N, S a H jen jako alternativa k jiným typům řezných materiálů (nepovlakované SK). I přesto SK dokazují, že jsou nástrojové materiály s nejširší oblastí použití zejména díky svým PVD a MTCVD povlakům a jejich mechanicko-fyzikálním a chemicko-tepelným vlastnostem.

V ISO oblasti P (obrábění ocelí) respektive P20 (hlavní oblast použití) vyniká řezný materiál **TP2500** (Seco Tools AB), za řezných podmínek ($f=0,4\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$, $a_p=2,5\text{mm}$) dosahuje nejvyšší řezné rychlosti $v_c=580-170\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ a jeho aplikační oblast je P05-P35. Tyto pracovní možnosti jsou docíleny pomocí již zmíněného (kapitola 9.2) nového MTCVD povlaku DurAtomic. Jeho alternativou v této aplikační oblasti může být nástrojový materiál **GC4225** (AB Sandvik Coromant), jelikož za pracovních podmínek ($f=0,45\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$, $a_p=2,5\text{mm}$) dosahuje maximální řezné rychlosti $v_c=590-90\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ a jeho oblast použití je v rozmezí P01-P35.

Při soustružení v ISO oblasti M respektive M20 je nejvýkonnější řezný materiál **TM2000** (Seco Tools AB) s nejširší oblastí použití M15-M40. Jeho řezná rychlost se pohybuje v rozmezí $v_c=300-85\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ při hodnotách posuvu $f=0,4\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$ a šířce záběru ostří $a_p=2,5\text{mm}$. Následuje soustružnický materiál **GC1125** (AB Sandvik Coromant) s oblastí použití M15-M30, u kterého se při optimálních řezných podmínkách ($f=0,2\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$, $a_p=2,5\text{mm}$) dosahuje řezné rychlosti $v_c=280-90\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$.

V rámci ISO oblasti K (obrábění litiny) respektive K20 dosahuje největší řezné rychlosti $v_c=500-250\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ obráběcí materiál **IC5005** (Iscar Metals) při optimálních pracovních podmínkách ($f=0,4\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$, $a_p=2,5\text{mm}$). Jeho aplikační oblast je v intervalu K05-K20. Dalším výkonným řezným materiálem v této oblasti je **TK2000** (Seco tools AB), avšak s větší oblastí použití (K05-K30). Dosahuje řezné rychlosti $v_c=345-105\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ při pracovních podmínkách ($f=0,4\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$, $a_p=2,5\text{mm}$) a s řeznou kapalinou.

Při porovnání neželezných kovů v ISO oblasti N disponuje maximální řeznou rychlostí $v_c=2000-300\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ nepovlakovaný slinutý karbid **H10** (AB Sandvik Coromant), při posuvu $f=0,45\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$ a šířce záběru ostří $a_p=2,5\text{mm}$ a s oblastí použití v rozmezí N01-N25. Alternativou může být povlakovaný slinutý karbid **TP200** (Seco tools AB) s aplikační oblastí N15-N30. Jak již bylo zmíněno, v této oblasti se nejvíce používají nepovlakované slinuté karbidy, avšak pouze jako alternativa k nástrojovým materiálům z polykrystalického diamantu a polykrystalického kubického nitridu bóru.

V oblasti superslitin a obrábění titanu ve skupině ISO S respektive S20 byl nejlépe vyhodnocen řezný materiál **GC1005** (AB Sandvik Coromant), u kterého se za efektivních řezných podmínek ($f=0,3\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$, $a_p=2,5\text{mm}$) dosahuje řezných rychlostí v rozmezí $v_c=150-24\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ a **IC07** (Iscar Metals) s $v_c=160-200\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ při ($f=0,45\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$, $a_p=2,5\text{mm}$). Relativně nízké řezné rychlosti jsou dány obráběným materiálem v podobě tvrdých žáruvzdorných slitin na bázi Ni a Co.

U hodnocení obráběných tvrzených materiálů v ISO oblasti H respektive H15 se ukázal jako nejvhodnější univerzální soustružnický materiál **TP1000** (Seco Tools AB) s řeznou rychlostí $v_c=130-80\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ při řezných podmínkách ($f=0,4\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$, $a_p=2,5\text{mm}$) s aplikační oblastí v rozmezí H05-H20 a následoval soustružnický materiál **IC900** (Iscar Metals) s řeznou rychlostí $v_c=150-50\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ při pracovních podmínkách ($f=0,45\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$, $a_p=2,5\text{mm}$) s oblastí použití v rozsahu H10-H25.

11 TECHNICKO – EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

Technická úroveň řezných materiálů respektive nástrojů splňuje současné požadavky na praktické uplatnění progresivních technologií obrábění a zpracování nových konstrukčních materiálů. Současný trendem vývoje řezných nástrojů u světových výrobců je zaměření především na oblast využití vysoce efektivních řezných materiálů pro úzkou oblast použití. Budoucností jsou vysoce specializované výkonné nástrojové materiály pro omezenou aplikaci. Nastává ústup od univerzálních řezných materiálů pro široké použití. Jedná se zejména o řezné elementy z povlakovaných SK, supertvrdých řezných materiálů (PKD a PKNB) a povlakovaných cermetů, které se začínají prosazovat v některých aplikacích jako alternativa pro SK. Tyto řezné elementy jsou do základního tělesa nejčastěji mechanicky připevněny (VBD). Nástroje menších rozměrů (pod 50 mm) se vyrábějí ze SK jako monolitní.

Časová náročnost obrábění je neustále snižována vývojem nových nástrojů, zkvalitňováním dostupných řezných materiálů pomocí nových povlaků a obráběcích CNC strojů. Nové třídy řezných materiálů umožňují zvýšení řezné rychlosti a nové geometrie břítu zvýšení posuvu. O zkrácení strojních časů obrábění se kromě omezení času potřebného k nastavení nástroje, manipulaci s obrobky a jejich kontrole, zasloužila i možnost obrábět díly na jedno upnutí prostřednictvím CNC strojů. Strojní časy a řezné podmínky při obrábění do značné míry závisí na použitém nástrojovém materiálu, obráběném materiálu a na požadované kvalitě obrobeného povrchu.⁸⁶

Minimální spotřeba času na výměnu, seřízení a upínání řezných elementů i kompletních nástrojů do stroje při dosažení požadované přesnosti zejména vícebřitých nástrojů patří k základním funkčním požadavkům na současné řezné nástroje. Splnění uvedených požadavků je zajištěno především konstrukcí nástroje a přesností jeho výrobního provedení. Intenzifikačním prvkem konstrukce je uspořádání a provedení polohovacích, seřizovacích a upínacích elementů nástroje. Prvořadá pozornost je věnována zejména umístění, seřizování a upínání řezných částí nástroje. Prosazuje se snaha o využití minimálního počtu součástí na seřizovací a upínací mechanismy, i optimalizaci vztahu mezi přesností jednotlivých součástí nástroje (tj. výrobními náklady) a výslednou přesností kompletního nástroje.⁸⁶

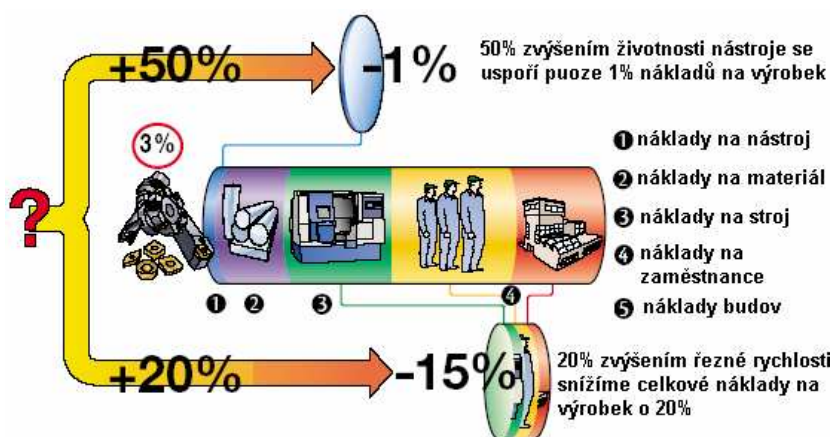
Kvalitu povrchu při obrábění ovlivňuje řezný materiál, řezná rychlost, posuvová rychlost, šířka záběru ostří, počet břitů nástroje, průměr nástroje a druh obráběného materiálu. S ohledem na požadovanou kvalitu povrchu a na namáhání břítu nástroje je vhodné volit tloušťku třísky v rozsahu velmi jemné až jemné. Menší tloušťka třísky, resp. pomalejší posuv nástroje nemá smysl, neboť se tím nezískají žádná další zlepšení kvality povrchu. Rychlost posuvu materiálu nebo nástroje má vliv na kinematické nerovnosti, protože přímo ovlivňuje délku vlnek. Volba optimální rychlosti posuvu závisí na požadované jakosti povrchu. Při zachování rychlosti posuvu a zvýšením řezné rychlosti se zmenšuje šířka záběru ostří a zvyšuje kvalita obrábění. Vyšší řeznou rychlostí se snižuje vytrhávání svazků vláken. Zvyšuje se však spotřeba energie, snižuje se trvanlivost ostří, rostou požadavky na jakost nástroje a konstrukci stroje.⁸³

Přední výrobci řezných materiálů respektive nástrojů mimo zlepšování technických parametrů svých výrobků (tj. optimálních funkčních vlastností), soustřeďují stále větší pozornost na přípravu prostředků a systémů, které uživateli umožní optimální aplikační i ekonomické využití řezných materiálů. Rozšiřuje se nabídka technických a organizačních prostředků, které sledují nástroj a jeho stav v průběhu celé jeho životnosti, evidují a organizačně zajišťují přeostření, údržbu, výměnu, plynulé doplňování zásob, příp. i likvidaci opotřebovaného řezného materiálu. Význam uvedených prostředků se zvyšuje zejména s rozšiřujícím se využíváním nákladných progresivních materiálů - syntetického diamantu a kubického nitridu bóru.²

Požadavek vysoké produktivity a minimálních nákladů při obrábění na CNC centrech vyvolává vysoké nároky na úroveň nástrojů s VBD. Tyto nástroje mají dnes dominantní podíl v moderních technologiích obrábění. Jde především o požadavek vysokého řezného výkonu, tj. velkého minutového úběru obráběného materiálu při vysoké provozní spolehlivosti, tedy při vysoké rovnoměrnosti řezných vlastností. Dalším významným prvkem je maximální odolnost břitů proti mechanickým a teplotním rázům.²

Moderní CNC stroje jsou koncepčně zaměřeny především na zkrácení vedlejších časů, a tím na kvalitativně vyšší stupeň využití časového fondu stroje pro vlastní řezání. Za těchto podmínek, kdy v průměru po více než 80% doby chodu stroje probíhá obrábění, má zásadní význam pro produktivitu neboli počet obrobků za jednotku času nasazení VBD z materiálu s maximálním řezným výkonem. Pro dosažení optimálních nákladů na opracování jednoho kusu je důležité použití nákladově optimálních hospodárných řezných podmínek.²

Z analýzy stávajících řezných nástrojů respektive materiálů vyplývá skutečnost, že disponují poměrně nízkou hodnotou N_T (náklady na jednotku trvanlivosti nástroje) a poměrně vysokou řezivostí ($m = 5,0-2,5$) viz. závislost $T-v_c$. Z důvodu relativně drahého provozu CNC strojů jsou pracovní podmínky nástroje (VBD) koncipovány pro trvanlivost 15min, tedy T_{15} . Z důvodu vysokých nákladů provozu výrobních zařízení, materiálního zabezpečení, lidských zdrojů a pracovních prostor je úspora na řezných nástrojích (při T_{15}) zanedbatelná oproti úspoře při nižších výrobních časech. Náklady vztahované na nástroj tvoří pouhé 3 % z celkových nákladů na výrobek.¹²



Obr. 11.1 Snížení nákladů na výrobek při zvýšení životnosti nástroje a řezných podmínek⁸⁸

11.1 Technicko-ekonomická optimalizace řezných podmínek

Optimalizace řezných podmínek představuje v současnosti jeden z nej-slabších článků technické přípravy výroby. Její podstatou je stanovení optimálních řezných podmínek (hloubky řezu, posuvu a řezné rychlosti) a optimální trvanlivosti nástroje, a sice podle určitého optimalizačního kritéria a v rámci omezujících podmínek. Jinak řečeno, jde o hledání extrému účelové funkce nad oblastí přípustných řešení. Tato oblast je společným průnikem všech omezujících podmínek, které se při obrábění vyskytují.⁸⁴

Kritérium minimálních výrobních nákladů představuje základní optimalizační kritérium ve strojírenské technologii. Mělo by být zásadně aplikováno, pokud nejsou závažné důvody vedoucí k použití jiného kritéria, např. kritéria maximální produktivity (výrobnosti) nebo vícekritériálního hodnocení. Většinou se dnes stanovení řezných podmínek realizuje pomocí normativů řezných podmínek. Tyto se však často interpretují nesprávně. Pak jsou nasazovány řezné podmínky, které nejsou skutečně optimálními podmínkami, což má negativní vliv jak na systém stroj-nástroj-obrobek tak i na efektivnost celé výroby.

Optimalizaci řezných podmínek je dnes vhodné realizovat komplexním výpočtem, jehož výstupem jsou optimální hodnoty řezných podmínek a trvanlivosti břitu řezného nástroje. Vzhledem ke složitosti je toto možné prakticky pouze na počítači vhodným softwarem. Optimalizace řezných podmínek je silně závislá na konkrétních podmínkách podniku.⁸⁴

Optimalizaci řezných podmínek ovlivňuje celá řada parametrů. Především jsou to nákladové položky (uvažujeme-li optimalizaci podle kritéria minimálních výrobních nákladů). Jde o ceny strojů, které ovlivňují jejich provozní náklady, mzdy pracovníků, režijní položky, ceny nástrojů, náklady na jejich ostření atd. Tyto nákladové položky představují významnou skupinu dat vstupujících do optimalizace.⁸⁴

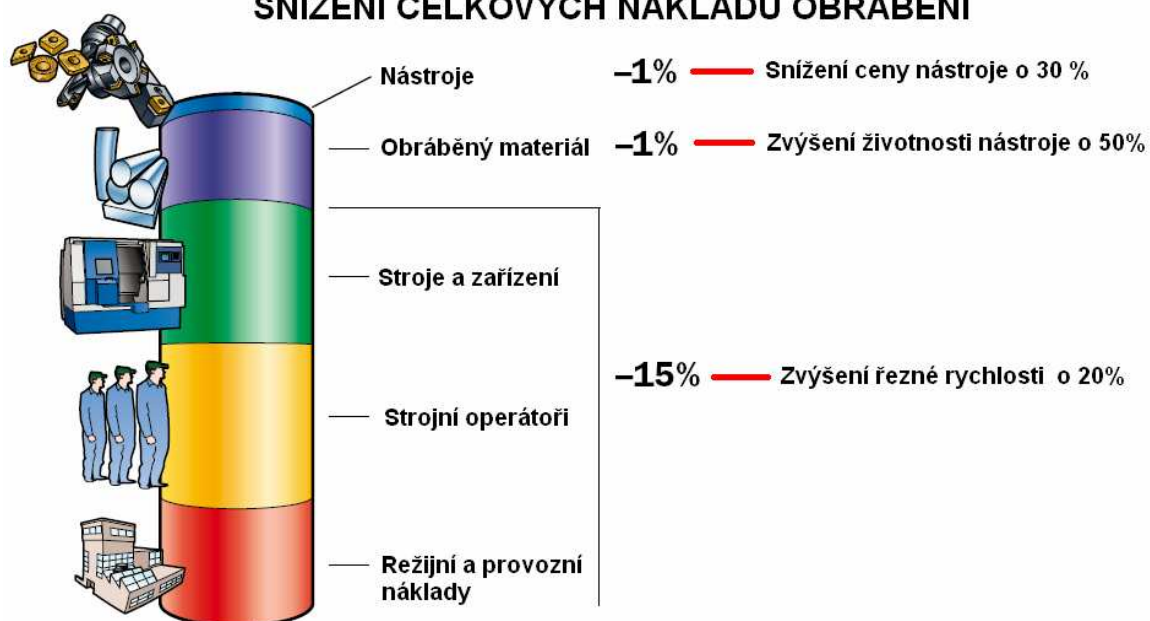
Závislost nákladů na obrábění na řezné rychlosti (mající svoje minimum) má strmější průběh u investičně náročného výrobního zařízení (CNC), ve srovnání s obráběním na konvenčních strojích. Stejná diference řezné rychlosti od optimální řezné rychlosti má pak různé ekonomické důsledky u výrobních zařízení s různými provozními náklady. Čím větší jsou tyto náklady, tím větší je růst výrobních nákladů ve srovnání s nákladovým minimem. Proto význam nasazení skutečně optimálních řezných podmínek neustále roste. Nerespektování této skutečnosti je příčinou často značných výrobních nákladů, zejména na investičně náročném výrobním zařízení.⁸⁴

Závažným problémem při stanovení optimálních řezných podmínek je rozptyl vlastností obráběného materiálu, nástrojového materiálu a řezného prostředí. Toto se promítá do rozptylu trvanlivosti nástroje při práci za určitých řezných podmínek. Rozptyl trvanlivosti nástroje ovlivňuje i optimální řezné podmínky. Pokud operátor průběžně nesleduje obráběcí proces, resp. pokud sledování není možné (např. v důsledku přívodu značného množství řezné kapaliny) nebo pokud v důsledku vysoké řezné rychlosti není možné rychlé přerušení obráběcího procesu obsluhou v případě destrukce břitu, nebo pokud stroj není vybaven monitorovacím systémem pro sledování opotřebení, resp.

destrukce břítu obráběcího nástroje, je nutné pracovat s vysokou bezpečností realizace předepsané trvanlivosti nástroje. Pro optimalizaci řezných podmínek je značně důležité vytvoření datových bank. Ty obsahují především empirické údaje o vzájemném vztahu trvanlivosti a řezných podmínek, empirické údaje o řezných silách a utváření třísky, údaje ekonomické a časové vztahující se k danému provozu, technické a ekonomické údaje o nástrojích a strojích. Tyto databanky jsou koncipovány jako otevřené, s možností doplňování a vypouštění údajů.⁸⁴

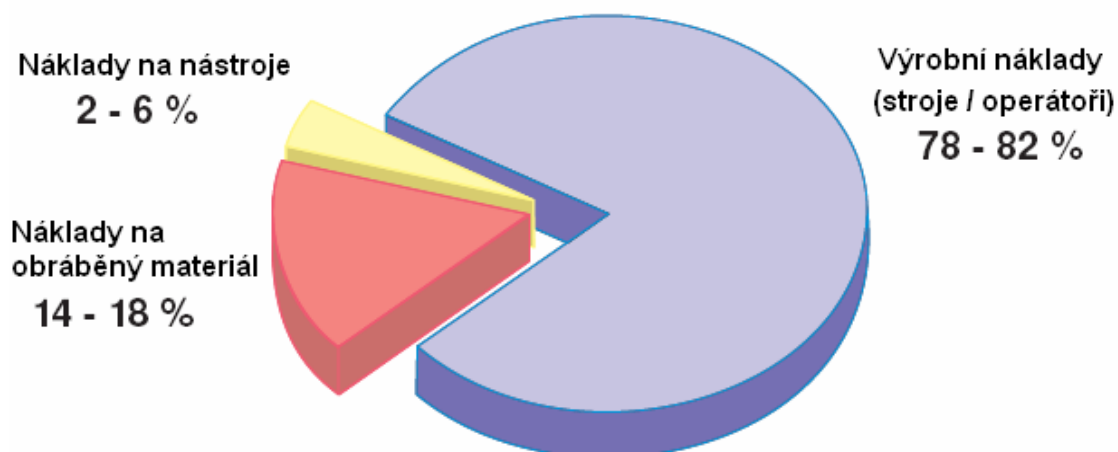
Ekonomiku strojírenské technologie lze dnes významně ovlivnit nasazováním skutečně optimálních řezných podmínek. Je však nutné konstatovat, že rezerv, často velmi významných, se mnohde vůbec nevyužívá.⁸⁴

SNÍŽENÍ CELKOVÝCH NÁKLADŮ OBRÁBĚNÍ



Obr. 11.2 Možnosti snížení nákladů na obrábění⁸⁸

Optimální rozvržení nákladů na obrábění



Obr. 11.3 Optimální rozvržení nákladů na obrábění⁹⁰

11.2 Tool Management

Technicky a ekonomicky výhodné využití moderních obráběcích strojů je podmíněno nasazením výkonných řezných nástrojů respektive nástrojových materiálů. Jen řezné nástroje připravené na vysoké konstrukční a technologické úrovni umožní plné uplatnění předností nových, často automatizovaných obráběcích strojů. Požadavky na řezné nástroje, např. univerzální použití, vysoký výkon řezání a vysoká jakost obrobeneho povrchu, zvyšují nároky na jejich provedení a širší uplatnění progresivních řezných materiálů. Tím se zvyšují náklady na řezné nástroje a zhoršují podmínky pro jejich nasazení u uživatelů s kusovou nebo malosériovou výrobou.⁸⁵

Hospodárnější využití výkonných řezných materiálů by měl zajistit soubor technických a organizačních prostředků, který začali v různých variantách nabízet především světoví výrobci nástrojů pod obecným označením Tool Management (dále TM). Vesměs se jedná o smluvní systém služeb úzce propojující výrobce s uživatelem, kterým jsou řešeny otázky dodávek nebo zápujček řezných nástrojů, sledování spotřeby s automatickým doplňováním nástrojů pro zajištění plynulé výroby, organizace a provádění ostření, údržby a oprav nástrojů a likvidace opotřebovaného řezného materiálu. Nabízené služby umožní, aby zákazník krátkodobě využil předností drahého nástroje s PKNB či PKD bez toho, že nástroj koupí a potom nechá delší dobu nevyužitý.⁸⁵

Poskytování služeb TM nabízejí především výrobci řezných nástrojů, ale i zprostředkovatelské firmy. V prvním případě se nabídka soustřeďuje především na vlastní sortiment nástrojů výrobce; využití bude zřejmě vhodnější při zavádění nové výroby, ve vývoji nových technologických postupů. Předností bude i možnost využití odborných služeb a zkušeností výrobce nástrojů. Uplatnění TM od zprostředkovatelské firmy lze předpokládat především u zavedené výroby s širokým sortimentem nástrojů od různých výrobců. V obou případech je v zájmu uživatelů, aby byla v průběhu využívání TM sledována technická i ekonomická úroveň procesu a bylo zajištěno, že systém TM využívá nové poznatky výzkumu v oboru. V dnešní době se uplatňují tři typy:

Model 1 - vlastníkem řezných nástrojů je uživatel a TM zahrnuje jen technické služby. Každá služba má ceníkem stanovenou cenu, která je uhrazena po jejím poskytnutí. Jedná se o přehledný systém hospodaření, výhodný především pro výrobu s mnoha neověřenými faktory (řezné podmínky, trvanlivost nástrojů apod.), např. u nově zaváděné výroby.

Model 2 - řezné nástroje zůstávají ve vlastnictví firmy, která zajišťuje TM. V tomto případě uživatel hradí tzv. směsnou cenu při odebrání nástroje ze skladu. Směsná cena je vypočtena z ceny nového nástroje a všech služeb (především ostření) poskytnutých v průběhu jeho životnosti. Např. u vyměnitelných břitových destiček je to jejich cena při odebrání ze skladu.

Model 3 - řezné nástroje zůstávají ve vlastnictví firmy, která zajišťuje TM. Poskytnuté služby i cena nástroje jsou účtovány za vyrobenou součást. Uživatel tedy hradí služby až poté, co byly nástrojem provedeny. Tento typ TM je především vhodný pro zavedené a ověřené výroby.⁸⁵

V procesu obrábění působí vedle řezných materiálů respektive nástrojů i řada dalších faktorů, které ovlivňují průběh a výsledek technologické operace, např. materiály výkovků podle jedné normy nemají od různých výrobců stejné vlastnosti, což ovlivní trvanlivosti nástrojů, nestandardní funkce obráběcího stroje může způsobovat poškození (zlomení) a tím vysokou spotřebu nástrojů apod. Proto je třeba při rozhodování o využití TM modelů 2 a 3 postupovat velmi obezřetně, aby výsledky zavedení systému splňovaly technické i ekonomické aspekty obou smluvních stran. Podle dosud dostupných zkušeností s využitím TM lze předpokládat, že reálné úspory za určitých podmínek mohou dosahovat až 25%.⁸⁵

Nabízené služby jsou zaměřeny na ostření, odpovlakování a povlakování především osových řezných nástrojů. Základem systému TM je četnost servisních center na ostření a opravy nástrojů, které musí být připraveny nabídnout kvalitní služby v tuzemsku i přilehlých zemích. Všechna servisní pracoviště musí být budována podle stejného modelu tak, aby při splnění technických a kvalitativních požadavků na poskytované služby byly zajištěny minimální fixní náklady. Předpokladem poskytování odborných služeb je přeprava nástrojů od zákazníka do servisních středisek a zpět. Přepravní síť zahrnuje pravidelné spojení nejen se zákazníkem, ale i mezi jednotlivými firemními středisky. Podle potřeby může být převzetí nástrojů spojeno i s poradenským servisem přímo u zákazníka. Kontrolou stanovené řezné nástroje pro přeastření jsou ukládány do manipulačních kazet, které zabraňují jejich poškození v průběhu celého technologického procesu.⁸⁵

Řezné nástroje jsou broušeny a ostřeny na konvečních, optických, profilových a pětiosých CNC nástrojařských bruskách. U nástrojů určených k obnově povlaku je zařazena operace odpovlakování. Po všech uvedených operacích, ale zejména po dokončení přípravy povrchu nástroje pro povlakování, jsou nástroje důkladně čištěny. Poněvadž kvalitní výbrus při dokončovacím broušení a ostření spolu s dokonale očištěným povrchem nástroje jsou rozhodující předpoklady pro kvalitní povlakování, je těmto operacím věnována mimořádná pozornost.⁸⁵

TM představuje smluvní spolupráci poskytovatele s objednavatelem na nástrojovém zajištění určitého druhu výroby. Dohodnutý rozsah spolupráce může zahrnovat jen pouhé přeastřování řezných nástrojů, ale také vybudování celého systému hospodaření s nástroji zahrnujícího jejich dodání, ostření, opravy, plynulé udržování dohodnutých skladových zásob a technické poradenství. Obecně se nabízené služby soustřeďují na řešení následujících částí nástrojového hospodářství: návrh nástroje a podmínek nasazení; poptávka/nabídka (porovnání a výběr dodavatelů); objednávka - typ a množství; dodání nových nástrojů; organizace a vedení hospodaření s nástroji, sledování spotřeby a zásob, automatické doplňování, likvidace spotřebovaných nástrojů, vedení skladu, příprava pro výrobu – předseřízení, přeprava nástrojů do a z výrobního procesu, kontrola stavu opotřebovaných nástrojů, přeprava, přeastření, oprava, povlakování a dodání uživateli.⁸⁵

Ekonomický přínos nabízených služeb vyplývá z porovnání nákladů na TM a úspor dosažených v oblastech využití řezných nástrojů, technologií obrábění, skladových a personálních činnostech.⁸⁵

Tool Management představuje nový racionalizační prostředek v hospodaření s řeznými nástroji a nářadím. Rozšiřující se nabídka služeb zahrnutých do TM, zejména ze strany výrobců nástrojů, umožní zvýšit technickou i ekonomickou úroveň využití funkčních vlastností moderních obráběcích nástrojů a progresivních řezných materiálů. Dosud získané zkušenosti z využití TM ukazují, že užší spolupráce výrobců a uživatelů nástrojů v rámci TM se pozitivně projeví i ve vývoji řezných nástrojů.⁸⁵

11.3 Oblasti vývoje řezných materiálů a nástrojů

Sledovat výsledky vývoje řezných nástrojů, prezentované novinkami jednotlivých výrobců, je v celé šířce prakticky nemožné. Jednak to vyplývá z obrovského sortimentu nástrojových typů a rozměrů, ale především z široké variabilní nabídky kombinací úprav, obměn již osvědčených výrobků a zcela nových konstrukčních řešení nebo použití nových depozičních vrstev. Novinky se totiž pohybují v rozmezí od rozšíření rozměrové řady stávajícího typu nástroje přes dílčí úpravy, např. nový utvařeč, až po zcela novou konstrukci, řezný materiál, typ povlaku apod. Navíc jsou technické inovace velmi často kombinovány, příp. uváděny ve spojení s doporučením využití pro určitou skupinu materiálů nebo specifickou výrobní oblast. Klasickým příkladem této praxe jsou vyměnitelné břitové destičky, u kterých rozhoduje o funkčních vlastnostech především typ a provedení substrátu (základního materiálu), otěruvzdorného povlaku a utvařeče (geometrie destičky).²

Řezné materiály se neustále zdokonalují a v posledních desetiletích znamenaly dramatický vývoj. Modernizací struktur, povlaků a výrobního procesu se rozšířilo zejména použití slinutého karbidu. Novější vývoj směřuje k menšímu, ultrajemnému zrna v substrátu SK. Pokud se zmenšuje velikost zrna, stoupá jak pevnost materiálu v příčném lomu, tak jeho tvrdost. To vede ke zlepšení odolnosti proti opotřebení a houževnatosti, zvláště když je velikost zrna menší než jeden mikron. Výzkum a vývoj v oblasti těchto materiálů povede v budoucnu k ještě jemnějším nanostrukturám. Tyto nové řezné nástroje, využívané při HSC, umožní rychleji obrábět i náročnější materiály.²

Obrábění kalené oceli, se dnes považuje za samozřejmost. Je realizováno prostřednictvím nástrojů z SK. Vývoj karbidových nástrojů s polohovatelnými břitovými destičkami otevřel řadu nových možností. Vyráběné nástroje a řezné destičky jsou neustále zdokonalovány řadou konstrukčních inovací a modernizačních úprav. Vývojové směry sledují rozšíření aplikačních možností a univerzálnosti použití, maximální zjednodušení a zlepšení upnutí řezného elementu do nástrojového držáku při současné eliminaci požadavku na nezbytné seřízení po výměně, výrazné zvýšení výkonu nástroje a zlepšení kvality obrobenej plochy.²

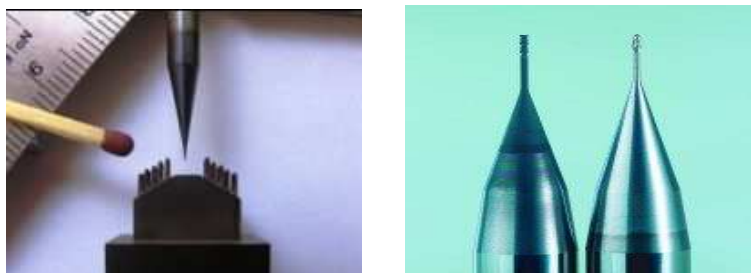
Dalším vývojovým krokem je kombinace povlakovacích metod u SK a tím zvýšení řezných podmínek. Duální povlaky vytvořené kombinací fyzikální technologie PVD (vrstva - Lubrik Si) a chemické metody MTCVD (vrstva – TiN, Al₂O₃ a Ti(C,N)) vykazují lepší fyzikálně-mechanické a tepelně-chemické vlastnosti. Tyto povlaky jsou v kombinaci s jemnozrnnými nebo gradientním substráty z SK vhodné pro efektivní obrábění litin a přerušovaný řez. Takto

koncipované řezné materiály dovolují použití v širší oblasti aplikací a zvládají vyšší řezné rychlosti, čímž se dosahuje zvýšené produktivity řezného procesu a snížení nákladů na výrobu jednoho kusu.⁷³

Cílem výrobců řezných nástrojů tedy zůstává připravit nástroje schopné efektivně obrábět moderní konstrukční materiály progresivními metodami (vysoké výkony, vysoké řezné rychlosti, úběry materiálu, atd.), při splnění funkčních požadavků na obráběné povrchy (přesnost a jakost povrchu). Zvýšený výkon obrábění, zintenzivnění řezných podmínek a obrábění tvrdých materiálů jsou hlavní směry, které sleduje vývoj řezných materiálů a nástrojů.

11. 3.1 Miniaturizace a mikroobrábění

Paralelně s rychlým vývojem simulačních systémů v oblasti přesného obrábění nástroji s přesně definovanou geometrií bříty na výrobu forem a zápusitek probíhá i miniaturizace těchto nástrojů. Na trhu se objevila široká nabídka nástrojů pro obrábění malých přesných povrchů s malým úběrem materiálu a vysokými požadavky na jakost povrchu, často pro obrábění součástí z hůře obrobitelných materiálů. Miniaturizace se přirozeně nesoustřeďuje jen na řezné části nástrojů, většinou na VBD, ale na celá nástrojová tělesa. Oblast třískového mikroobrábění zahrnuje široké pásmo, které sahá od rozměru 2 mm až pod 1 μ m. Průměr nástroje pro mikroobrábění s geometricky stanoveným břitkem se pohybuje mezi 0,1 až 2 mm.²



Obr. 11.2 Mikrofréza Horn typu DSMMK a DSMMG s průměrem řezné části 0,5 mm²

Uplatňuje se zde i monitorovací systém **Sensor Tools**, který sleduje poškození nebo destrukci řezného nástroje v průběhu obrábění, aby zabránil velmi nepříznivému technickému i ekonomickému důsledku pro výrobní proces. Nový systém zajistí detekci poškození nástroje v průběhu obrábění využitím změny elektrického odporu bříty. Speciální břitová destička je součástí elektrického obvodu, jehož odpor je měřen během obrábění. Při poškození bříty v záběru vzroste odpor obvodu, a to automaticky signalizuje změnu stavu bříty. Tento signál je přímým impulsem řízení procesu obrábění. Díky tomuto systému je omezena zmetkovost a zvýšení produktivity řezného procesu.²

V budoucnu se však očekává ústup mikroobrábění při výrobě dutiny formy. Jako náhrada by měl sloužit výkonný laser, který dutiny přímo do formy vypálí. Šetří se tak operace při výrobě. Laserový paprsek přímo odpařuje materiál a je programově řízen. Typické součásti z pásma mikroobrábění lze nalézt v hodinářském průmyslu, lékařství a biotechnice, a také v automobilovém a leteckém průmyslu.²

11.3.2 Mazání MQL

Tam, kde není možné obrábět zcela za sucha, např. u Al a jeho slitin, je výhodné aplikovat metodu používání minimálního množství procesní kapaliny, tj. MQL (Minimal Quantities of Lubricant). Existuje řada případů obrábění, které by nebyly ekonomicky proveditelné bez tzv. mazání mlhou. Spotřeba 50 ml média na hodinu obrábění - nástroje, obrobky i třísky zůstávají prakticky suché, tudíž nejsou nutné další technologické pochody pro odstranění procesních kapalin. Metoda MQL může být považována za obrábění za sucha, přesto však vznikající aerosol může vyvolat problémy s hygienou pracovního prostředí. Důsledkem je zvýšení investičních nákladů v podobě odsávání. Tato metoda zamezuje tvorbě nárůstků na nástroji a má vliv na zlepšení drsnosti a přesnosti obráběných ploch. MQL sníží koeficient tření i teplotu řezání oproti čistému obrábění za sucha nebo konvenčnímu chlazení.⁸⁹

11.3.3 HSC - High Speed Cutting (vysokorychlostní obrábění)

Dodnes neexistuje žádná zavedená definice HSC. Pod klíčovým slovem rychlost se mohou rozumět otáčky vřetene, řezná rychlost nebo rychlost posuvu. V minulosti se vývoj HSC zaměřoval především na vysoké otáčky vřetene v rozmezí od 8000 do 100 000 min⁻¹. Řada aplikací, které zůstávaly v experimentální rovině, byly brzy zavedeny do praxe (na začátku 90.let) leteckým průmyslem a japonským průmyslem obráběcích strojů. Otáčky vřetene se však zatím držely na spodní hranici HSC.⁸⁷

Hlavními výhodami HSC jsou vyšší produktivita, která snižuje náklady obrábění, vytváření lepší jakosti obrobeného povrchu, která snižuje nutnost leštění na minimum, zlepšená geometrická přesnost, která efektivněji zajišťuje vyšší jakost, nižší řezné síly, které jsou příčinou menší a stálejší výchylny nástroje, nižší teploty prodlužující životnost nástroje a umožňující vyšší řeznou rychlost, účinné obrábění kalených a tvrzených materiálů, které odstraňuje tepelné zpracování a zmenšení tvorby ostřin na obrobku, které zkracuje dobu dokončování. Vysokorychlostní obrábění bylo původně vyvinuto jako komplexní proces s vysokými otáčkami a posuvem pro obrábění grafitu. Účinnost HSC je silně závislá na nasazených strojích. Dnes lze CNC obráběcími centry (5-10 os) vyrobit téměř komplexní 3D tvary a obrysy. Téměř všechny obráběné materiály jako měď, grafit, plasty a ocel lze obrábět nástrojem s VBD.⁸⁷

Stávající stroje jsou svými parametry pro HSC nedostačující. Naopak vývoj obráběcích nástrojů směrem k vyšší výkonnosti probíhá již několik let a dosahuje výsledků, které jsou viditelné v řadě aplikací. Proto se jen čeká na podobný posun v oblasti obráběcích strojů pro HSC. Hlavním problémem jsou otáčky stroje a udržení přesnosti - různé části se zahřívají a jiné chladí. Při HSC dochází ke zcela odlišným fyzikálním procesům než u klasického třískového obrábění, a proto jsou kladeny vysoké nároky na nástroje (výchozí polotovary SK či cermet) i nářadí (vyztužené uhlíkové kompozity). Při HSC procesu se nevyužívá chlazení procesní kapalinou, protože při vyšších rychlostech odchází až 90% tepla z řezu prostřednictvím třísky obrobku.⁸⁷

ZÁVĚR

Třískové obrábění zaznamenalo v uplynulém desetiletí prudký rozvoj. Je to dáno celosvětovým intenzivním vývojem řezných materiálů, nástrojů a CNC strojů, kterých je dnes nabízen široký sortiment. Výroba řezných nástrojů zaujímá specifické postavení v široké oblasti obrábění. Vyžaduje specifické tvarové stroje, upínání a technologii. Nejpokrokovější řezné materiály jsou použity u vyměnitelných břitových destiček, jejichž použití v obrábění dnes převládá. Běžně se již používají progresivní povlakované slinuté karbidy, povlakované cermety, polykrystalický diamant, polykrystalický kubický nitrid bóru, řezná keramika a nanokompozitní materiály. Čím dál více na ústupu jsou rychlořezné oceli a nepovlakované slinuté karbidy.

Povlakované slinuté karbidy se vyznačují vysokou tvrdostí, odolností proti opotřebením a houževnatostí. Právě tyto vlastnosti podtrhují skutečnost, že slinuté karbidy tvoří 45% stávajícího trhu s řeznými materiály. Vývoj technologie výroby a povlakování u slinutých karbidů je hnán stále větší konkurencí v této oblasti výroby řezných nástrojů a postupně vzrůstajícími požadavky na řezné podmínky obrábění, ve kterých slinuté karbidy musí pracovat (přerušovaný řez, vysoké v_c , tvrzené materiály). Soudobé slinuté karbidy drží krok s požadavky doby a trhu prostřednictvím funkčně gradientních struktur substrátu (plynulý přechod z houževnatého povrchu do tvrdého jádra) a na nich deponovaných moderních povlaků prostřednictvím stále lepších povlakovacích fyzikálních a chemických metod (PVD, MTCVD a PCVD). Dalším krokem ve vývoji slinutých karbidů je úspěšné zmenšování velikosti zrn karbidů – výsledkem jsou jemnozrné a ultrajemné struktury s posílenými fyzikálně-mechanickými vlastnostmi. Trendem ve výrobě SK je speciální způsob konsolidace – lisování spojené se slinováním – technologie sinterHIP, která zkracuje výrobní čas, šetří energii a tím snižuje celkové náklady na výrobu.

Je zřejmé, že uvést vyčerpávající přehled novinek v oblasti řezných nástrojů ze slinutých karbidů jako výsledek určitých vývojových směrů je velmi obtížné. Vyplývá to jednak z tvarově a rozměrově rozsáhlého sortimentu nástrojů, které jsou nabízeny pro každou metodu obrábění, a jednak z charakteru vývoje řezných nástrojů - velmi široký rozsah zlepšení funkčních vlastností nástrojů sahá od jednoduchých změn (např. nový utvařeč) přes kombinované úpravy (např. současné změny v konstrukci nástroje a struktuře řezného materiálu) až po přípravu zcela nových nástrojů. V každém případě vývoj řezných nástrojů reaguje jak na technické požadavky uživatelů, tak i na komplexní vývoj technologií obrábění. Důkazem je několik málo univerzálních řezných materiálů pro široké spektrum obráběcích aplikací (program EcoCut firmy Ceratizit), ale i specifické nástroje z úzkým zaměřením a velmi vysokými výkony.

Tato diplomová práce byla věnována slinutým karbidům a jejich efektivnímu využití. Byla zhodnocena výroba slinutých karbidů a jejich fyzikálně-mechanické a chemicky-tepelné vlastnosti. Prostřednictvím nových depozičních vrstev a technologií deponování byli popsány povlakované slinuté karbidy s upozorněním na moderní povlaky, které dodávají řezným nástrojům specifické vlastnosti. Dále byly nastíněny trendy a další vývoj v oblasti nástrojů a materiálů ze slinutých karbidů.

Pozornost byla věnována možnostem při volbě správného nástrojového materiálu pro vyměnitelné břitové destičky s doporučením optimálních řezných podmínek v procesu ISO soustružení. Analýza nabídky sortimentu čtyř zástupců světových výrobců řezných materiálů zhodnotila možnosti využití a dostupnosti řezných nástrojů při každodenním použití v praxi. Výstup tohoto srovnání ukazuje možnosti vývoje a využití moderních povlakovaných slinitých karbidů do budoucna.

Velice malé zastoupení v sortimentu světových výrobců řezných materiálů mají dnes již překonané nepovlakované slinité karbidy, které se prosazují pouze u obrábění materiálů z ISO N, S a H. V případě povlakovaných slinitých karbidů je sortiment opravdu široký. Prosazují se fyzikálně nanosené PVD povlaky s nanovrstvenou nebo nanokompozitní strukturou substrátu a MTCVD respektive PCVD povlaky na substrátech s gradientní strukturou.

Hlavním směrem v oblasti vývoje řezných materiálů je vyrábět stále progresivnější řezné nástroje, které budou zvládat moderní obráběcí technologie. Tím zajistí efektivitu celého obráběcího procesu prostřednictvím optimálních řezných podmínek a zvýšeného řezného výkonu. Dalším cílem bude snaha o zvýšení intenzity procesu obrábění u těžkoobrobitelných materiálů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ČEP, Robert a HATALA, Michal. *Výběr vhodného řezného materiálu Sborník vědeckých prací VŠB-TU Ostrava*. 2006, roč. LII, č.1, s. 23-28.
2. NOVÁK, Z., *Řezné nástroje současnosti. MM průmyslové spektrum*. Květen/2002, s. 50-51. ISSN 1212-2572.
3. JAKUBÉCZYOVÁ, D., *Hodnocení trvanlivosti řezných hran na PM nástrojích povlakovaných PVD metodou. Výrobné inženýrstvo*. Květen/2008.
4. HUMÁR, A., *Materiály pro řezné nástroje*. 1.vyd. Praha:MM Publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
5. SALAJKA Jaroslav. *Nové moderní nástroje pro frézování*. Bakalářská práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno:VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2006. 65 s.
6. ČEP Robert. *Vliv řezných podmínek na přesnost výroby při obrábění 3D ploch*. Diplomová práce v oboru „Obrábění a montáž“. Ostrava: VŠB-FS, Ústav obrábění a montáže. 2000. 91 s.
7. KOUŘIL, Karel. *Nástroje a vyměnitelné břitové destičky osazené polykrystalickými supertvrdými materiály. Pramet 1996-Progresivní řezné nástroje*. Ostrava. 1996, s. 42-46.
8. ČEP, Robert. *Zkoušky nástrojů z řezné keramiky v podmínkách přerušovaného řezu*. Disertační práce. Ostrava: VŠB-FS, Ústav obrábění a montáže. 2005. 101 s.
9. *Rotační nástroje*. AB SANDVIK COROMANT-SANDVIK CZ s.r.o. Dánsko: Stibo Graphic. Leden 1999. Výrobky pro obrábění kovů. CZE 99.01.
10. KŘÍŽ, A., *Prášková metalurgie*. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam-materiálový výzkum. [online]. [cit. 10. února 2008]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ateam.ic.cz/praskova_metalurgie.pdf>.
11. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění-kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. Praha: Scientia, s.r.o. 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cutting – A Practical Handbook*. ISBN 91–97 22 99–4–6.
12. HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vydání. Brno: CCB spol. s. r.o., 1995. 265 s. ISBN 80– 85825–10–4.
13. KOCMAN, K. *Speciální technologie obrábění*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 227 s. ISBN 80-214-2562-8.
14. KOLDER Petr. *Zkoušky frézovacích nástrojů vyráběných práškovou metalurgií*. Bakalářská práce. Zlín: UTB-FT, 2006. s 112.
15. LUKOVICS, I. *Konstrukční materiály a technologie*. 1.vyd. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992. 272 s.
16. JANKOVIČ, Robert. *Trvanlivost povlakovaných rezných nástrojů*. Disertační práce. TU Bratislava-FM, Ústav materiálové techniky, 2005. 120 s.
17. MATOUŠKOVÁ Petra, *Zkoušky řezivosti řezné keramiky při přerušovaném řezu*. Diplomová práce. Ostrava: VŠB-FS, Ústav obrábění a montáže. 2003. 85 s.
18. CARBIDES. [online]. [cit. 08. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.itia.uk>>.
19. HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění 1.část* [online]. [cit. 11. června 2008]. Studijní opory. VUT v Brně, Fakulta strojního inže-

- nýrství, 2003, 138s. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/technologie_obrabení_1.pdf>.
20. WEB MINERALS [online]. [cit. 10. února 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.webmineral.com/specimens.shtml>>.
 21. TECHNIK Radim. *Řezné materiály a jejich aplikace ve strojírenství*. Baka-lářská práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno:VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2006. 70 s.
 22. NOVÁK, Z., Prášková metalurgie. *MM průmyslové spektrum*. Lispad/2002, s. 52. ISSN 1212-2572.
 23. DVOŘÁK, Milan a MAREČKOVÁ, Michaela. *Technologie tváření* [online]. [cit. 10. září 2009]. Studijní opory pro podporu samostudia v oboru „Strojírenská technologie“ MS studijního programu „Strojírenství“ VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006, 105s. Dostupné na World Wide Web: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/technologie_tvareni/index>.
 24. KRÍŽ, A., *Vliv mikrostruktury slinutých karbidů na životnost nástrojů a strojních součástí*. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam-materiálový výzkum. [online]. [cit. 10. května 2008]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ateam.ic.cz/fraktografie_prednaska2.pdf>.
 25. HUMÁR, A., *Materiály pro řezné nástroje*. Studijní opory. VUT–FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2006. [online]. [cit. 1. května 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabení/opory/>>.
 26. WIKIPEDIE. Otevřená encyklopedie. [online]. [cit. 5. září 2008]. Dostupné na World Wide Web: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlavn%C3%AD_strana>.
 27. LEICHTFRIED, G., SAUTHOFF, G., SPRIGGS, G.E. *Refractory, Hard and Intermetallic Materials*. Springer–Verlag Berlin Heidelberg. 2002. 267 p. ISBN 3–540–42961–1.
 28. DUFEK, V., BROŽEK, V., JANČA, J., Příprava manometrického práško-vého karbidu wolframu. *Sborník vědeckých prací-Konference Nano 2002*. Fakulta chemicko-technická ČVUT Praha, s. 125-128.
 29. WITEAM. [online]. [cit. 5. května 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.witeam.rademarket.com>>.
 30. SANDVIK COROMANT AB, Sandviken, Sweden. *Corokey guide 2008*. on-line]. [cit. 15. května 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.coromant.sandvik.com>>.
 31. NOVÁK, Z., *Řezné materiály a nástroje pro výkonné obrábění 2. díl. MM průmyslové spektrum*. Duben/2004, s. 49-51. ISSN 1212-2572.
 32. LENFELD, P. *Technologie II*. Studijní opory. TU-FS v Liberci, KST, Odbor tváření kovů a plastů. 2005. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.htm>.
 33. NITTA. [online]. [cit. 17. února 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.nitta.co.jp/>>.
 34. ČSN ISO 513. *Klasifikace a použití tvrdých řezných materiálů k obrábění kovů určeným ostřím – Označování skupin a podskupin použití*. Český normalizační institut. Praha. Březen/2006.
 35. KRÍŽ, A., *Nové trendy vývoje tenkých vrstev vytvořených PVD a CVD technologií v aplikaci na řezné nástroje*. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam-materiálový výzkum. [online]. [cit. 21. května 2008]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.benjamin.ic.cz/Habilitacni_prednaska.pdf>.

36. KOCMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
37. NOVÁK, Z., *Současná technická úroveň řezných materiálů 1. díl. MM - Průmyslové spektrum*. Duben/2003. ISSN 1212-2572.
38. ŠÍMA, M., ZINDULKA, O., *Měření vlastností povlaků na nástrojích. MM - Průmyslové spektrum*. Červen/2003, s.30-31. ISSN 1212-2572.
39. HUMÁR, A., *Trendy v povlakování slinutých karbidů. MM - Průmyslové spektrum*. Červenec/2001. ISSN 1212-2572.
40. CSELLE, T., HOLUBÁŘ, L., *Nové trendy v přípravě PVD povlaků*. [online]. [cit. 17. prosince 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.shmcz.cz/files/literatura/40.pdf>>.
41. ATEAM, ZCU, ČR. *Tenké vrstvy*. [online]. [cit. 25. července 2008]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ateam.zcu.cz/tenké_vrstvy_sma.pdf>.
42. OERLIKON BALZERS COATING AUSTRIA GmbH, Jihlava, Česká republika. *Technologie povlakování*. [online]. [cit. 27. dubna 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.oerlikon.com/coatingservices/cz/>>.
43. POVRCHOVÁ ÚPRAVA. Odborný server. [online]. [cit. 07. června 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.povrchovauprava.cz>>.
44. PLATIT AG. Grenchen, Switzerland. *Coating Guide 2006*. [online]. [cit. 12. července 2008]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.platit.com/download/CoatingGuide2006.pdf>>.
45. KŘÍŽ, A., PODANÝ, P., *Předdepoziční procesy při výrobě tenkých vrstev. Sborník vědeckých prací-Konference Metal 2006*. ZCU v Plzni, s. 1-7.
46. FOREJT, M., HUMÁR, A., PÍŠKA, M., JANÍČEK, L., *Experimentální metody* [online]. [cit. 20. října 2009]. Studijní opory pro podporu samostudia v oboru „Strojírenská technologie-obrábění-tváření, svařování-management“ MS. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, 83 s. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/exp_metody.pdf>.
47. BUMBÁLEK, B. *Fyzikální podstata řezání* [online]. Studijní opory. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005, 125 s. [cit. 14. března 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/ust/fyz.podstat.rez.pdf>>.
48. PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk, ČR. *Příručka obrábění*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.pramet.cz/pramet.cz/index.html>>.
49. SEUNG, I., SOON, H., GOOH, H., BYUG, K. Mechanical properties of WC-10Co cemented carbides sintered from nanocrystalline spray conversion processed powders. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 19 (2001). Pp. 397-403. ISSN 0958-0611.
50. SHI, X. L., SHAO, G. Q., DUAN, X. L., XIONG, Z., YANG, H. Characterizations of WC-10Co nanocomposite powder and subsequently sinterhip sintered cemented carbide. *Materials Characterization*. 57 (2006). pp. 358-370. ISSN 1044-5803.
51. LAN, S., CHENGUCHANG, J., RUIJAN, C., CHENGUANG, L. Effects of Cr₃C₂ additions on the densification, braun growth and properties of ultra-fine WC-11Co composites by spark plasma sintering. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 26 (2008). pp. 357-361. ISSN 0958-0611.

52. AKHTAR, F., HUMAIL, I., ASKARI, S. J., JIANJUN, T., GUO, S. Effect of WC particle size on the microstructure, mechanical properties and fracture behavior of WC-(W, Ti, Ta) C-6wt%Co cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 25 (2008). pp. 405-410. ISSN 0958-0611.
53. MICHALSKI, A., and SIEMIASZKO, D. Nanocrystalline cemented carbides sintered by the pulse plasma method, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 25 (2007)., pp.153-158
54. LI, Z., LIU, G., YANG, G., CHEN, S., JUANY, B., ZHANG, CH. Surface adsorption phenomenon during the preparation process of nano WC and ultrafine cemented carbide, A. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 25 (2007). pp. 166-170. ISSN 0958-0611.
55. SEUNG, I., CHA, S., HONG, H. Microstructure of binderless Tungsten carbides sintered by spark plasma sintering proces. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 365 (2003). pp. 381-389. ISSN 0958-0611.
56. ENGQVIST, H., JACOBSON S., AXÉN, N. A model for the hardness of cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 252 (2002). pp. 384-393. ISSN 0958-0611.
57. KLEME, S., REPONEN, P., LIIMATAINEN, J., HELLMAN, J., HANNULA, S. Abrasive wear properties of tool steel matrix composites in rubber wheel abrasion test and laboratory cone crusher experiments, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 263 (2007). pp. 180-187. ISSN 0958-0611.
58. SHATOV, A.V., PONOMAREV, S.S., FIRSTOV, S.A. Fracture of WC–Ni cemented carbides with different shape of WC crystals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 26 (2008). pp. 68-76. ISSN 0958-0611.
59. CASAS, B., TORRES, Y., LLANES, L. Fracture and fatigue behavior of electrical-discharge machined cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 24 (2006). pp. 162-167. ISSN 0958-0611.
60. BINGHAI, L., YUE, Z., SHIXI, O. Study on the relation between structural parameters and fracture strength of WC-Co cemented carbides. *Materials Chemistry and Physics*. 62 (2000). pp. 35-43. ISSN 0254-0584.
61. LI, Z., YUAN, W., XIAN, Y., SHU, CH., XIANG, X. Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC–Co cemented carbide. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 11 (2007). pp. 160-167. ISSN 0958-0611.
62. YONG, L., HAIBING, W., ZHENG YI, L., LAW, P., JIANGAO, Y., BAIYUN, J. Microstructural evolution and mechanical behaviors of graded cemented carbides. *Materials Science and Engineering*. 426 (2006). pp. 346-354. ISSN 0921-5107.
63. MAXIMENKO, A., ROEBBEN, G., VAN DER BIEST, O., Modelling of metal-binder migration during liquid-phase sintering of graded cemented carbides. *Journal of Materials Processing Technology*. 160 (2005). pp. 361-369. ISSN 0924-0136.

64. PEZZOTTI, G., OTA, K., SBAIZERO, O., NISHIDA, T. Elastic after-effect in WC/Co cemented carbide. *Journal of the European Ceramic Society*. 19 (1999). pp. 419-425. ISSN 0955-2219.
65. XIAO, P., HUA, L. Microstructures and properties of coating from cemented carbide by vacuum powder sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 22 (2004). pp. 247-250. ISSN 0958-0611.
66. TANG, W., WANG, Q., WANG, S., LU, F. A comparison in performance of diamond coated cemented carbide cutting tools with and without a boride interlayer. *Surface and Coatings Technology*. 153 (2002). pp. 298-303. ISSN 0257-8972.
67. POLINI, R., DELOGU, M., MARCHESELLI, G. Adherent diamond coatings on cemented tungsten carbide substrates with new Fe/Ni/Co binder phase. *Thin Solid Films*. 494 (2006). pp. 133-140. ISSN 0040-6090.
68. HOLUBÁŘ P., JÍLEK M., RŮŽIČKA M., Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření. *MM Průmyslové spektrum*. 9/2004. s. 106–107. ISSN 1212–2572.
69. HOŘEŠOVSKÝ, K., Tvrdokovové frézy pro vysokorychlostní obrábění. *MM Průmyslové spektrum*. 3/2002. ISSN 1212-2572.
70. KLAUS, M., Specialista na závity. *MM - Průmyslové spektrum*. 4/2002. ISSN 1212-2572
71. BUMBÁLEK, B. *Vysoce přesné metody obrábění a jejich fyzikální podstaty*. [online]. Studijní opory. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005, 125 s. Dostupné na World Wide Web: <<http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/ust/fyz.podstat.rez.pdf>>.
72. PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk, ČR. *Roughing CZE*. [online]. [cit. 15. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.pramet.cz/pramet.cz/index1b6.html>>.
73. PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk, ČR. *Litina 2007_CZ*. [online]. [cit. 15. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.pramet.cz/pramet.cz/index.html>>.
74. PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk, ČR. *Turning 2009*. [online]. [cit. 15. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.pramet.cz/pramet.cz/index.html>>.
75. SECO TOOLS AB. Fagersta, Sweden. *Turning 2009_CZ*. [online]. [cit. 10. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://legacy.secotools.com/template/start.asp?id=9392>>.
76. SECO TOOLS AB. Fagersta, Sweden. *GB_LR_Duratomic brochure*. [online]. [cit. 15. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.secotools.com/template/start.asp?id=9392>>.
77. SANDVIK COROMANT AB, Sandviken, Sweden. *Main catalogue 2009 Czech*. [online]. [cit. 15. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.coromant.sandvik.com/cz>>.
78. SANDVIK COROMANT AB, Sandviken, Sweden. *Grade GC2025*. [online]. [cit. 15. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.coromant.sandvik.com/cz>>.
79. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. *MM Průmyslové spektrum – Speciální vydání*. Zář 2004. s. 84–96. ISSN 1212–2572.

80. ISCAR METALS, Tel Aviv, Izrael. New Products katalog 2009. [online]. [cit. 10. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.isacr.cz/PDF/New%20Products%20Catalog.pdf>>.
81. ISCAR METALS, Tel Aviv, Izrael. Komplete machining solutions. [online]. [cit. 15. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.isacr.cz/PDF/Complete%20machining%20solutions.pdf>>.
82. ISCAR METALS. [online]. [cit. 19. dubna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.isacr.cz/Index.asp/CountryID/6/MenuteamID1/8>>.
83. SANDVIK COROMANT AB. [online]. [cit. 19. dubna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.coromant.sandvik.com/cz>>.
84. MÁDL, J., Optimalizace při obrábění (řezné podmínky). [online]. [cit. 2. května 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://fstroj.utc.sk/journal/sk/013/013.html>>.
85. NOVÁK, Z., Tool management – optimální využití moderních řezných nástrojů. *MM - Průmyslové spektrum*. Červenec/2002. ISSN 1212-2572.
86. JENDROL, L., Opracování obtížně obrobitelných dílů. *MM - Průmyslové spektrum*. Září/2002. ISSN 1212-2572.
87. CHRISTOFFEL, K., Vývoj nástrojů pro rychloobrábění 1. díl. *MM - Průmyslové spektrum*. 10/2003. ISSN 1212-2572.
88. SANDVIK COROMANT AB, Sandviken, Sweden. *Turning 2009_CZ*. [online]. [cit. 15. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.coromant.sandvik.com/cz>>.
89. ZEMAN, P., Účinek řezného prostředí na trvanlivost břítu. *MM - Průmyslové spektrum*. 12/2005. ISSN 1212-2572.
90. CERATIZIT SA. Mamer, Luxemburg. *EcoCutCatalog*. [online]. [cit. 15. ledna 2009]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ceratizit.com/products_applications_ENG_HTML.htm>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
CIP	[-]	Izostatické lisování za studena
CNC	[-]	Číslicově řízené stroje
CVD	[-]	Chemická metoda deponování
EDM	[-]	Obrábění elektrickým obloukem
FCC	[-]	Kubická plošně středěná mřížka
HCP	[-]	Šesterečná mřížka
HIP	[-]	Vysokoteplotní izostatické lisování
HRC	[MPa]	Tvrдость dle Rockwella
HSC	[-]	Vysokorychlostní obrábění
HV	[MPa]	Tvrдость dle Vickerse
ISO	[-]	Internacional standart organization
MQL	[-]	Mazání mlhou
MTCVD	[-]	CVD metoda za středních teplot
PCVD	[-]	Plazmatická CVD metoda
PKD	[-]	Polykrystalický diamant
PKNB	[-]	Polykrystalický kubický nitrid bóru
PVD	[-]	Fyzikální metoda deponování
PM	[-]	Prášková metalurgie
RO	[-]	Rychlořezná ocel
ŘK	[-]	Řezná keramika
SK	[-]	Slinutý karbid
SPS	[-]	Jiskrové plazmové slinování
TM	[-]	Tool management
TZ	[-]	Tepelné zpracování
VBD	[-]	Vyměnitelná břitová destička
a_p	[mm]	Šířka záběru ostří
C_v	[-]	Konstanta v $T-v_c$ závislosti
C_T	[-]	Konstanta v $T-v_c$ závislosti
D_s	[Kč/hod]	Náklady na 1 hodinu práce stroje
f	[mm]	Posuv na otáčku při soustružení
i_o, i_R	[-]	Index obrobitelnosti resp. řezivosti
J	[mm/m]	Intenzita opotřebení resp. řezivost
K_{IC}	[MN/m ^{3/2}]	Lomová houževnatost
KT	[mm]	Hloubka výmolu na čele VBD
KVy	[mm]	Změna rozměru plochy
m	[-]	Exponent v $T-v_c$ závislosti
N_T	[Kč]	Náklady na jednu trvanlivosti stroje
T	[min]	Trvanlivost nástroje
t_{AS}	[min]	Jednotkový strojní čas
T_{opt}	[min]	Optimální trvanlivost nástroje
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
v_f	[m/min]	Posuvová rychlost
v_T	[mm]	Řezná rychlost při konst. trvanlivosti
VB	[mm]	Šířka fazety opotřebení hřbetu VBD

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Obráběné materiály dle ISO 513

Příloha 1

NOVÉ	STARÉ	
P	P_I P_{II}	uhlíkové (nelegované) oceli třídy 10, 11, 12 nízko a středně legované oceli sk. 13 (13 0., 13 1., legované oceli tříd 14, 15, 16 feritické a martenzitické korozivzdorné oceli (tř. 17 a lité 4229..) nástrojové oceli uhlíkové (19 1.., 19 2.., 19 3..) legované nástrojové oceli (19 3.. až 19 8..) uhlíková ocelolitina sk. 26 (4226..) nízko a středně legované ocelolitiny sk. 27 (42 27..)
M	M_I	austenitické a feriticko-austenitické oceli korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli nemagnetické a ořezvzdorné
K	K_I	šedé litiny nelegované i legované (42 24..) tvárné litiny (42 23..) temperované litiny (42 25..)
N	K_{II}	neželezné kovy, slitiny Al a Cu
S	M_{II}	speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti
H	M_{III}	zušlechtěné oceli s pevností nad 1500 MPa kalené oceli HRC 48 - 60 tvrzené kokilové litiny HSh 55 - 85