



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

METODY POVLAKOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

COATING METHODS FOR CUTTING TOOLS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN DOLEŽAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Doležal

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

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

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Metody povlakování řezných nástrojů

v anglickém jazyce:

Coating methods for cutting tools

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce je zaměřena na metody povlakování materiálů pro řezné nástroje (slinuté karbidy, cermety, řezná keramika, supertvrdé materiály) a vyhodnocení jednotlivých metod z hlediska technologických možností nanášení tvrdých vrstev a jejich mechanických, tepelných a chemických vlastností.

Cíle bakalářské práce:

1. Charakteristika jednotlivých metod nanášení tvrdých otěruvzdorných povlaků
2. Povlakované slinuté karbidy v sortimentu výroby vybraných domácích a světových producentů nástrojů a nástrojových materiálů
3. Vývojové trendy v oblasti povlakování řezných nástrojů

Seznam odborné literatury:

1. BUNSHAH, R.F. et al. Handbook of Hard Coatings. Norwich, New York, USA: Noyes Publications/William Andrew Publishing, LLC. 2001. 550 p. ISBN 0-8155-1438-7.
2. DANDY, D.S. Diamond Thin Films Handbook - Chapter 4. Colorado State University. Fort Collins, Colorado, USA. [online]. [cit. 16. března 2006]. Dostupné na [www: http://navier.engr.colostate.edu/pubs/DiamondHandbook.pdf](http://navier.engr.colostate.edu/pubs/DiamondHandbook.pdf).
3. HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. MM publishing s. r.o., Praha. 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
4. LEICHTFRIED, G., SAUTHOFF, G., SPRIGGS, G.E. Refractory, Hard and Intermetallic Materials. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2002. 267 p. ISBN 3-540-42961-1.
5. Technické materiály a prospekty firem, které se zabývají povlakováním: CemeCon, Ionbond, Oerlikon Balzers, Platit, SHM Šumperk.
6. Technické materiály a prospekty výrobců řezných nástrojů: Ceratizit, Iscar, Kennametal, Korloy, Kyocera, Mitsubishi, Pramet Tools, Sandvik Coromant, Seco, Sumitomo, Walter, Widia.
7. Odborné časopisy International Journal of Refractory Metals & Hard Materials (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/02634368>), Surface and Coatings Technology (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/02578972>), Thin Solid Films (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00406090>), Wear (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00431648>).

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá metodami povlakování řezných nástrojů a jejich technickými vlastnostmi. V práci je dále uveden sortiment současných výrobců povlakovaných slinutých karbidů. V závěru této práce je zpracován vývoj povlakování řezných nástrojů a typy nanášených povlaků.

ABSTRACT

Bachelor work describes methods of coating of cutting tools and their technical characteristics. The work is given below the current product range of manufacturers of coated cemented carbides. At the end of this work is treated the development of coating cutting tools and types of applied coatings.

KLÍČOVÁ SLOVA

povlakování, řezné nástroje, PVD, CVD, slinutý karbid, KBN, diamant

KEY WORDS

coating, cutting tools, PVD, CVD, cemented carbide, CBN, diamond

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOLEŽAL, J. *Metody povlakování řezných nástrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humár, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Metody povlakování řezných nástrojů vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 26. května 2011

.....
Jan Doležal

PODĚKOVÁNÍ

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

OBSAH

1.	ÚVOD	11
2.	MATERIÁLY PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE.....	12
2.1	SLINUTÉ KARBIDY	12
2.2	CERMETY	12
2.3	ŘEZNÁ KERAMIKA	12
2.4	SUPERTVRDÉ ŘEZNÉ MATERIÁLY	12
3.	METODY POVLAKOVÁNÍ.....	13
3.1	METODA POVLAKOVÁNÍ CVD.....	15
3.1.1	<i>Slinuté karbidy s diamantovým povlakem</i>	16
3.2	METODA POVLAKOVÁNÍ PVD	17
3.2.1	<i>Napařování</i>	17
3.2.1.1	<i>Napařování pomocí elektrického oblouku</i>	18
3.2.1.2	<i>Vakuové napařování (odporové)</i>	18
3.2.2	<i>Naprašování</i>	18
3.2.2.1	<i>Naprašování doutnavým výbojem rovinné diody</i>	19
3.2.2.2	<i>Magnetronové naprašování</i>	19
3.3	METODA PACVD (PLASMA-ASSISTED CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION)	20
3.4	METODA MTCVD (MODERATE TEMPERATURE CHEMICAL VAPOR DEPOSITION)	21
3.5	ION PLATING (IONTOVÁ IMPLANTACE)	22
3.6	PVD+CVD POVLAKOVÁNÍ SLINUTÝCH KARBIDŮ.....	23
4.	POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY V SORTIMENTU VÝROBY VYBRANÝCH PRODUCENTŮ NÁSTROJŮ A NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLŮ	24
4.1	PRAMET TOOLS S.R.O.	24
4.2	ISCAR.....	25
4.3	SANDVIK COROMANT	26
4.4	WIDIA	28
5.	VÝVOJOVÉ TRENDY V OBLASTI POVLAKOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ.....	29
5.1	MODIFIKOVANÉ POVLAKY TiAlN NANÁŠENÉ POMOCÍ PULZNÍHO MAGNETONOVÉHO NAPRAŠOVÁNÍ S DALŠÍMI PRVKY V POVLAKU.....	29
5.2	POVLAK Z KUBICKÉHO NITRIDU BORU.....	30
5.2.1	<i>Multivrstvý povlak s fází KNB</i>	31
5.2.2	<i>Kompozitní povlak KNB-TiN</i>	31
5.3	DEPOZICE NANOKOMPOZITNÍHO POVLAKU DIAMANT/B-SiC NA ŘEZNÝ NÁSTROJ.....	32
6.	ZÁVĚR	34
	LITERATURA	35
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	37

1. ÚVOD

Třískové obrábění je nedílnou součástí výroby ve strojírenství. K obrábění výrobků se používá různých druhů materiálů. Od rychlořezných ocelí přes slinuté karbidy až po nejnovější uměle vyrobené materiály, jako jsou polykrystalický diamant nebo kubický nitrid boru. Výroba těchto materiálů v čisté formě je velice drahá a problematická, proto se vývoj zaměřil na nanášení povlaků z těchto materiálů.

Povlakováním lze výrazně zlepšit řezné vlastnosti daného materiálu, jako je například tvrdost či houževnatost. Povlak také zajišťuje ochranu řezného materiálu před opotřebením. Povlakovaný nástroj tak má výrazně vyšší životnost a výkonnost, což jsou hlavní požadavky, které má zákazník. Z těchto důvodů povlakované řezné nástroje vytlačují ty nepovlakované. Další výhodou povlakování v dnešní době je, že lze napovlakovat prakticky jakýkoliv materiál. Povlakování se rozšířilo i do dalších oblastí, jako je například elektronika, lékařství či výpočetní technika.

První povlakované břitové destičky ze slinutého karbidu na trh uvedla švédská firma Sandvik Coromant v roce 1969. Jednalo se o tenký 4-5 μm tlustý jednovrstvý povlak karbidu titanu (TiC). Další vývoj na sebe nenechal dlouho čekat a na trhu se objevily další povlaky, z nejvýznamnějších například povlaky TiN a TiCN. První povlaky byly nanášeny chemickou metodou CVD, která využívá reaktivních plynů k nanášení vrstev. S rozvojem techniky se vyvinula další metoda povlakování. Jednalo se o metodu PVD, jejíž povlaky se vyznačovaly velice dobrými vlastnostmi při přerušovaných řezech. Nejužívanějším povlakem nanášeným touto metodou byl nitrid titanu TiN. S rostoucími požadavky na výkonnost povlakovaných řezných nástrojů se vyvíjely další, upravené metody. Například MTCVD (middle temperature CVD), PACVD (plasma assisted CVD), iontová implantace a další. S rozvojem povlakovacích metod se rozvíjely i povlaky samotné. V současné době existuje mnoho typů povlaků. Nejužívanější v technické praxi jsou vícevrstvé povlaky, pomocí nichž lze lépe využít vlastnosti jednotlivých vrstev.⁸

Vývoj povlaků se zaměřuje především na povlakování supertvrdými materiály jako jsou diamant a kubický nitrid boru. Nanášení povlaků z těchto materiálů je velice náročné jak na přípravu substrátu před povlakováním, tak na samotný proces nanášení otěruvzdorné vrstvy daného materiálu. Na trhu se zatím objevují pouze diamantové povlaky. Zatímco povlak z kubického nitridu boru se nachází převážně ve vývoji.

Vlastnosti povlaku závisí nejenom na materiálech použitých na vrstvy, z nichž je složen, ale i na struktuře daného povlaku. Za nejmodernější povlaky dle struktury jsou považovány nanokompozitní povlaky (povlak tvořen více vrstvami navzájem nerozpustnými a alespoň jedna z nich musí být krystalická), gradientní povlaky (povlak se mění v celém průřezu), supermřížkové povlaky a tzv. inteligentní povlaky.¹

2. MATERIÁLY PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE

2.1 Slinuté karbidy

Základním materiálem pro výrobu slinutých karbidů je karbid wolframu (WC), jako pojivo se využívá kobalt (Co) a dále lze využít pro lepší vlastnosti řezného materiálu, i jiné složky jako jsou např.: karbidy titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC) a chromu (Cr_3C_2).

Dělení SK dle normy ČSN ISO 513:

- Skupina **K**: WC (87 – 92) % + Co (4 - 12) % + (TaC.NbC)
 -pro obrábění materiálů, které vytvářejí krátkou a drobivou třísku (šedé litiny).
- Skupina **P**: WC (30 - 82) % + Co (5 - 17) % + TiC (8 – 64) % + (TaC.NbC)
 -pro obrábění materiálů, které vytvářejí dlouhou třísku (uhlíkové oceli)
- Skupina **M**: WC (79 - 84) % + Co (6 – 15) % + TiC (5 – 10) % + TaC.NbC (4 - 7) %
 -pro obrábění materiálů, které tvoří střední až dlouho třísku (austenitické oceli, tvárné litiny, korozivzdorné oceli)

Dále ještě existují skupiny **N** (neželezné slitiny), **S** (speciální slitiny Ni, Co), **H** (tvrdé kalené materiály).

2.2 Cermety

Vývoj materiálu pro obrábění měl spojit vlastnosti keramiky (tvrdost) a kovu (houževnatost). Název vznikl spojením prvních písmen v názvu těchto materiálů CERamics-METal. Jsou to materiály, jejichž tvrdá fáze je tvořena zejména TiC, TiN, Ti(C,N), Mo_2C a jako pojivo se využívá Ni, Mo, (Co). Dle normy ČSN ISO 513 se cermety označují symbolem HT. Vývoj cermetů nyní probíhá, z důvodu nedostatku wolframu a kobaltu především v Japonsku.

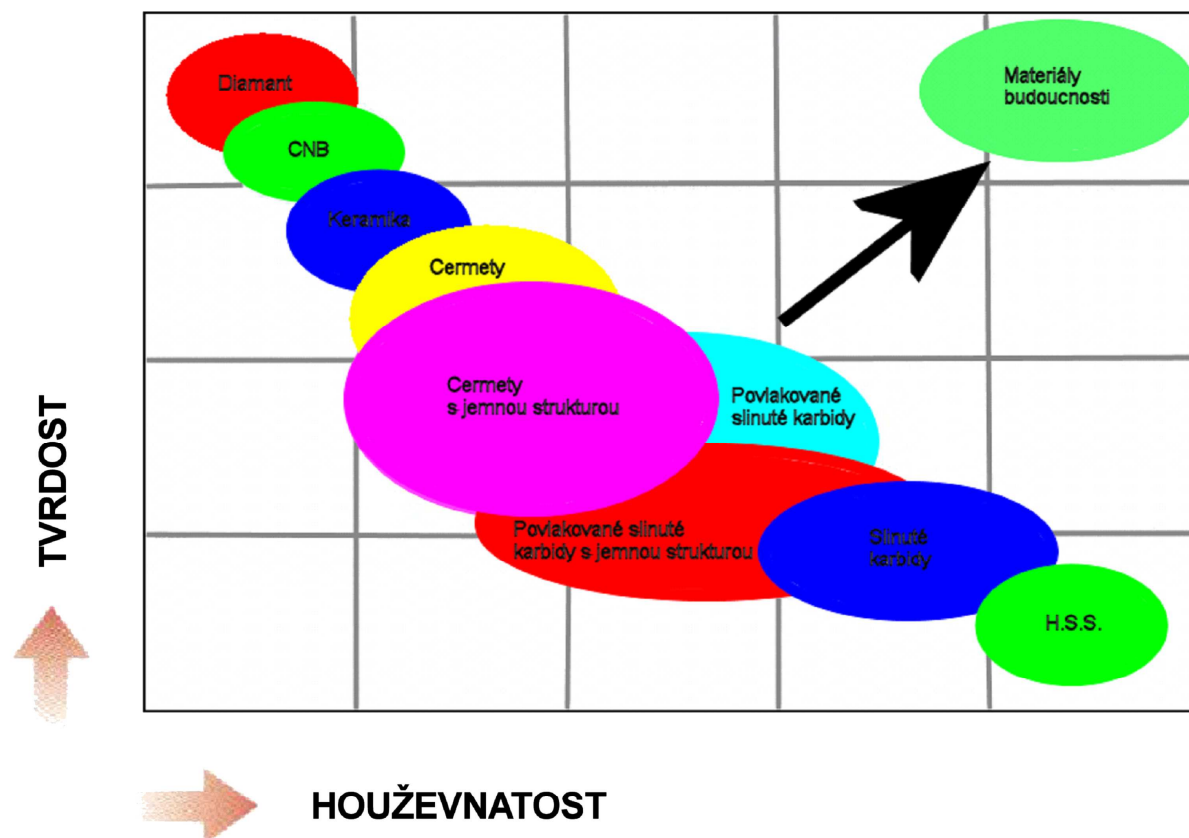
2.3 Řezná keramika

Moderní definicí je keramika obecně charakterizována jako převážně krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Keramika se využívá jako řezný materiál hlavně pro její vysokou tvrdost a odolnost proti plastické deformaci. Dále pro odolnost proti působení vysokých teplot, odolnost proti mechanickému namáhání (tlakem), chemické stálosti a v neposlední řadě i poměrně nízké pořizovací ceně.

Řezná keramika se dělí na **oxidovou** – Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, **nitridovou** – Si_3N_4 a **sialonovou** – SiAlON.

2.4 Supertvrde řezné materiály

Mezi supertvrde řezné materiály je řazen syntetický diamant (PKD) a kubický nitrid boru (KNB). Tyto materiály se vyznačují především vysokou tvrdostí. Diamant má poměrně nízkou teplotní stálost. Kvůli vysoké afinitě k železu ho nelze využít na obrábění materiálů, v nichž je obsaženo, proto se využívá pro hliníkové slitiny s vysokým obsahem Si při otáčkách až $5\,000\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. KNB se využívá pro soustružení a frézování kalených ocelí i tvrdých litin.



Obr. 1 Závislost tvrdosti na houževnatosti u různých materiálů ³⁵

Požadavky na řezné materiály jsou jak vysoká tvrdost (odolnost proti opotřebení), tak i houževnatost. Tyto vlastnosti, podle obr. 1, nejlépe splňují povlakované slinuté karbidy a povlakované slinuté karbidy s jemnozrnnou strukturou. V závislosti na vzrůstající tvrdosti lze volit vyšší řezné rychlosti a s rostoucí houževnatostí řezného materiálu lze zvyšovat posuvové rychlosti. Dnešní výzkum se zaměřuje právě na vývoj lepších řezných materiálů, ale i dokonalejších povrchových úprav (povlakování), aby se dosáhlo velmi výkonného nástroje.

3. METODY POVLAKOVÁNÍ

Povlakování řezných materiálů se provádí za účelem zlepšení jejich vlastností. Nanáš se tenká vrstva materiálu s vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení. Tyto vlastnosti jsou dosaženy tím, že nanášený materiál neobsahuje žádné pojivo, má jemnější zrnitost než podklad a méně strukturních defektů. Dále povlak tvoří bariéru proti difuznímu mechanismu opotřebení a podílí se na zamezování tvorby nárůstku na břitu nástroje a tím zvyšuje i jeho trvanlivost.

Metody povlakování lze rozdělit do dvou základních skupin:

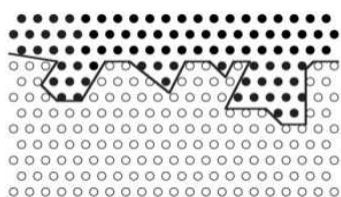
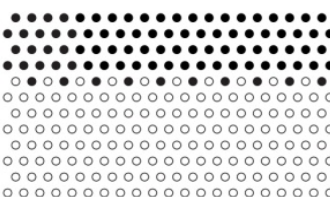
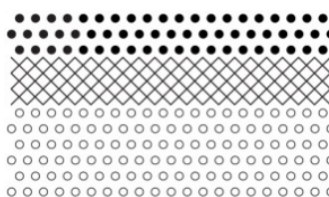
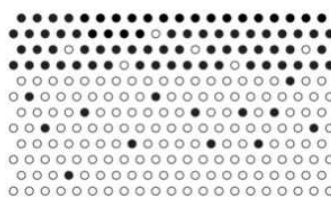
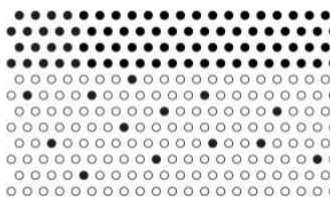
- **CVD** (chemical vapour deposition, chemický proces povlakování),
- **PVD** (physical vapour deposition, fyzikální proces povlakování).

Vývoj povlaků pro řezné materiály se stal velice důležitou součástí zejména kvůli zefektivnění výroby a s ní spojenou cenou na daný obrobek. Povlakované materiály mají výrazně lepší vlastnosti (houževnatost, tvrdost, životnost, atd.).

Jako první se na trhu objevil jednovrstvý povlak výhradně z TiC o tloušťce 6-7 μm , který měl ale špatnou přilnavost k substrátu. Dnes se tento povlak již nevyužívá samostatně. Další vývoj směřoval právě ke zlepšení přilnavosti. Byl vyvinut povlak bez eta-karbidů v přechodu na substrát. Nanášené povlaky TiC, TiCN, TiN měly tloušťku 7-10 μm a bylo zmenšeno odlupování od substrátu. Následovaly vícevrstvé povlaky, které se hojně využívají i dnes. Jedná se o povlaky obvykle 2-3vrstvé s různými vlastnostmi jednotlivých vrstev. Nanášeny jsou od povlaků s nejlepšší přilnavostí na substrát po povlaky s vysokou tvrdostí na vrchních vrstvách. Povlaky jsou řazeny v tomto pořadí: TiC-Al₂O₃, TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC-Al₂O₃-TiN. Celkový povlak má tedy dobrou přilnavost k povrchu a zároveň vysokou tvrdost. Nyní se vývoj v povlakování zaměřuje na multivrstvé povlaky (10 a více vrstev). Využívají se stejné materiály jako u vícevrstvých povlaků. Přechod mezi vrstvami je méně či více výrazný. K výhodám těchto povlaků se řadí nejenom vysoká tvrdost a přilnavost k substrátu, ale i zpomalení či zastavení šíření trhlin v povlaku. Mezi tyto povlaky lze zařadit povlaky z diamantu, nanokompozitní povlaky, gradientní povlaky, supermřížkové povlaky a další. Jako velice perspektivní povlak se jeví povlak z kubického nitridu boru, který má srovnatelné vlastnosti jako diamant (tvrdost a houževnatost), ale lze jím obrábět i materiály na bázi železa.¹

Povlaky jsou spojeny se substrátem různými přechodovými oblastmi. Mezi nejběžnější přechodové oblasti patří:¹

- *mechanická přechodová oblast* - povlak je spojen se substrátem výhradně pomocí mechanické vazby, vyplnění rýh a dutin (obr. 2),
- *přechod monovrstva/monovrstva* - přechod povlaku přes jednu nebo několik atomových rovin (obr. 3),
- *spojený přechod* - mezi podkladem a povlakem se tvoří jasně ohraničená mezivrstva s definovaným chemickým složením (obr. 4),
- *difuzní přechod* - mezivrstva se strukturně gradientním přechodem z materiálu podkladu do materiálu povlaku (obr. 5),
- *pseudodifuzní přechod* - částice s vysokou energií proniknou v krystalové mřížce do určité hloubky a tam zůstanou uvězněny, aniž by začal působit difuzní mechanismus (obr. 6).


Obr. 2¹

Obr. 3¹

Obr. 4¹

Obr. 5¹

Obr. 6¹

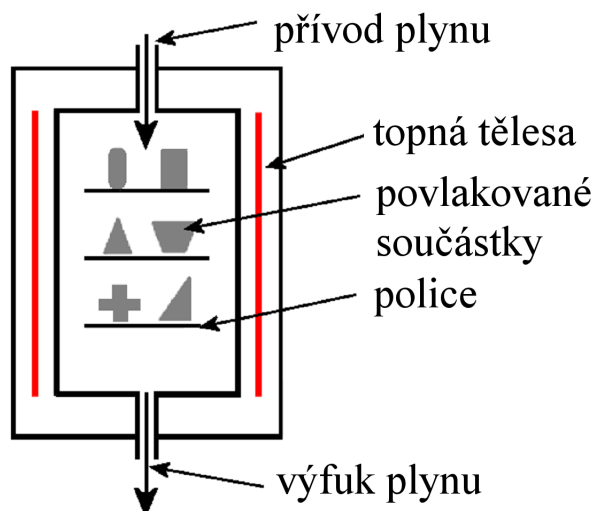
3.1 Metoda povlakování CVD

Jedná se o chemický proces povlakování, který je založen na reakci plynných chemických sloučenin (např.: CH_4 , TiCl_4 , AlCl_3 atd.) v plazmě, která se tvoří v bezprostřední blízkosti povrchu podkladového materiálu, a následném uložení produktů heterogenní reakce na tomto povrchu. Povlakování pomocí metody CVD probíhá za poměrně vysokých teplot, které se pohybují v rozsahu 900-1100 °C.

V současné době jsou povlaky získané metodou CVD ve velkém měřítku používány na povlakování slinutých karbidů. Navzdory tomu, že povlaky (primárně TiC, TiCN, TiN, oxidu hlinitého a jejich kombinací) poskytují prodloužení životnosti materiálu slinutého karbidu, konvenční metoda CVD je prováděna při vysokých teplotách (přes 1000 °C), což vede k dekarbonizaci slinutých karbidů, rezultující ve významné snížení houževnatosti a pevnosti. Tato skutečnost limituje aplikace povlakovaných karbidů. Obvykle tyto karbidy povlakované klasickou metodou CVD nejsou využívány v aplikacích, kde je zapotřebí využití ostrých břitů nebo velké výdrže karbidu za nepříznivých řezných podmínek.^{1,19}

Mezi reaktory používané při metodě povlakování CVD patří reaktory s horkou stěnou a reaktory se studenou stěnou.³

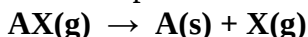
- **s horkou stěnou** – komora, která obsahuje substrát na povlakování, je obklopena ohřívacím systémem (obr. 2). Substrát je uložen do komory, ta je ohřívána na požadovanou teplotu a poté jsou do ní vpuštěny reaktivní plyny. Reaktory mají vysokou provozní teplotu, která je limitována pouze povlakovaným materiálem a konstrukcí ohřívacího zařízení. Metoda CVD povlakování s horkou stěnou se výhradně používá pro povlakování řezných nástrojů.
- **se studenou stěnou** – substrát je ohříván, ale stěny se chladí. Systém má stěny chlazené vodou s rotačním držákem, který je odporově ohříván zespodu. Reaktory se studenou stěnou jsou provozovány za vysokých tlaků, řádově desítky kPa. Výhodou je menší ukládání materiálu na stěny, menší tepelné zatížení substrátu a menší energetickou spotřebu. Nevýhoda je nerovnoměrnost teploty substrátu, což může vést k různé tloušťce povlaku. Tato metoda se využívá hlavně v elektrotechnice.



Obr. 7 Schéma horkostěnného CVD³

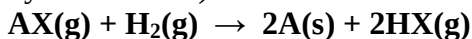
Reakce, při kterých je u metody CVD vytvářen povlak, lze rozdělit do čtyř základních kategorií:¹

Reakce tepelného rozkladu (pyrolytické reakce).

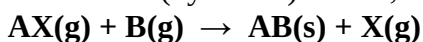


Kde AX je plynná sloučenina, A je pevná látka a X je plynný produkt reakce

Redukční reakce, ve kterých je plynná sloučenina rozložena redukčním činidlem (obvykle vodíkem).



Substituční (výměnné) reakce, v molekule AX je prvek X nahrazen prvkem B.



Disproporční (nepoměrné) reakce, oxidační číslo prvku roste nebo klesá během tvorby dvou nových složek.



Výhody CVD povlakování:⁴

- všestrannost (univerzálnost) – lze povlakovat slepé dutiny, porézní materiály, trubky s velkým poměrem L/D,
- vysoká čistota – až 99,99 %,
- vysoká hustota,
- povlak je konformní (rovnoměrná vrstva povlaku),
- povlakování ze všech stran (plyn).

Technické specifikace:⁵

- energie: teplotní,
- teplota: 800 až 1100 °C,
- napětí – tahové 0 až 2 GPa,
- tloušťka vrstvy: 8-16 μm,
- materiály povlaku: TiN, TiCN, Al₂O₃,
- frézování.

3.1.1 Slinuté karbidy s diamantovým povlakem

Diamant je považován za jeden z nejlepších materiálů na řezné nástroje, protože vykazuje výborné vlastnosti, jako jsou například tvrdost, odolnost proti opotřebení a dobrá tepelná vodivost. Kombinací těchto vlastností diamantu (na povlaku) a slinutého karbidu (substrát) je takto vyrobený nástroj velice vhodný na obrábění neželezných materiálů, jako jsou například hliníkové a měděné slitiny. Ve srovnání s diamantovými řeznými nástroji mají povlakované slinuté karbidy diamantem metodou CVD nižší cenu a povlaky mohou být nanášeny na nástroje se složitými tvary. Toto činí povlakovaný slinutý karbid slibným a vysoce výkonným řezným nástrojem.

Slinuté karbidy, na které lze nanášet povlak z diamantu pomocí metody CVD, jsou limitovány obsahem kobaltu. V literatuře se uvádí limitní hodnota obsahu kobaltu jako pojiva ve slinutém karbidu na 10 hm. %. Výroba samotného povlakovaného slinutého karbidu probíhá vhodnou volbou podkladového karbidu, odstraněním kobaltu z povrchové vrstvy a zdrsňením povrchu substrátu. Tyto kroky jsou velice důležité k tomu, aby se zabránilo katalytické reakci kobaltu s diamantem a zajistila se dostatečná mechanická vazba mezi podkladem a tenkým diamantovým povlakem. Následně je substrát očištěn a naočkován diamantem k docílení dobrých nukleačních podmínek před vlastním povlakováním pomocí metody CVD. Nejvhodnější podkladový materiál, vzhledem ke zbytkovým napětím na rozhraní substrátu a

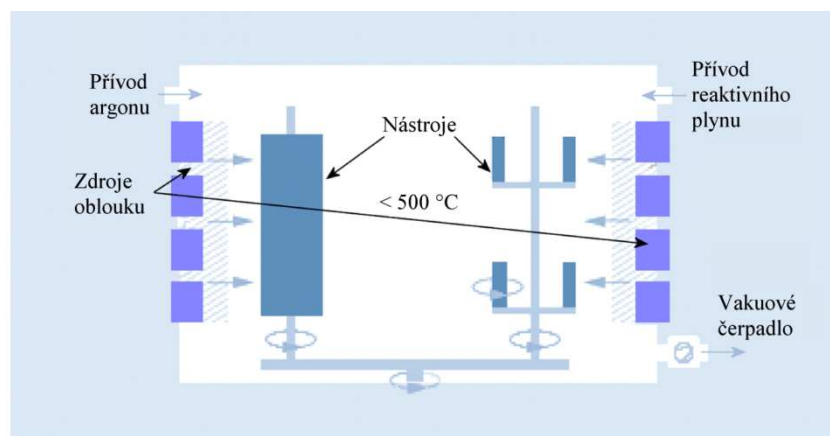
diamantového povlaku, je jemnozrnný slinutý karbid (případně keramika na bázi křemíku). Zbytkové napětí na rozhraní také ovlivňuje příprava substrátu a podmínky povlakování.⁶

3.2 Metoda povlakování PVD

Metoda PVD je povlakování za nižších teplot, jenž nevede k dekarbonizaci slinutého karbidu, který si zachovává i po povlakování svou houževnatost a pevnost. Navzdory tomu je životnost nástroje ze slinutého karbidu povlakovaného klasickou metodou PVD mnohem nižší než u řezného nástroje povlakovaného metodou CVD. Nižší životnost je způsobena relativně špatnou adhezí povlaku a substrátu a vyšší úrovní pnutí v povlaku nanášeného metodou PVD. Z těchto důvodů není povlakování slinutých karbidů pomocí metody PVD tak rozšířené v průmyslu, jako je tomu u chemické metody.

Mezi největší výhodu povlakování materiálu pomocí PVD patří její nízká teplota (do 600 °C, vyskytují se ovšem i teploty kolem 350 °C). Zprvu byla tedy využívána pro povlakování rychlořezných ocelí, které se pomocí metody CVD povlakovaly obtížně. V dnešní době se touto metodou povlakuji mimo jiné slinuté karbidy pro přerušovaný řez (frézování). Další předností metody je schopnost povlakování ostrých hran. Nevýhodou metody je ovšem „stínový efekt“ (schopnost povlakovat jenom plochy, které jsou natočeny na terč), kvůli kterému se musí substrát umísťovat na složité rotující držáky.

Mezi nejrozšířenější a nejpoužívanější fyzikální metody povlakování pomocí PVD patří napařování (využití katodického oblouku nebo svazku elektronů) a naprašování (urychlenými ionty Ar vytvářenými ve zkříženém elektromagnetickém poli). Oba procesy probíhají za sníženého tlaku (0,1-1Pa). Substrát je „bombardován“ pozitivně nabitými ionty, na něž se usazují a vytvářejí povlak. Do vakuové komory mohou být přiváděny inertní a reaktivní plyny (např.: Ar a N₂) pro vytvoření požadovaného povlaku na substrátu. Výsledkem povlakovacího procesu je velmi silná vazba mezi substrátem a povlakem a vhodné fyzikální, strukturální a tribologické vlastnosti.^{1,7,8,19}



Obr. 8 Napařovací komora⁹

3.2.1 Napařování

Povlakování pomocí napařování (obr. 8) probíhá za pomoci tzv. terčů (zdroj povlaku), které jsou ohřívány na určitou teplotu stejně jako substrát. Povlakování probíhá při vakuu nebo pro zlepšení vlastností povlaku za přítomnosti plynu (např.: argonu) při nízkých tlacích 0,7 až 26,7 Pa.^{1,9,10}

3.2.1.1 Napařování pomocí elektrického oblouku

Využívá se nízkonapětového elektrického oblouku, který je mezi substrátem a terčem. Elektrický výboj se pohybuje na terči v průměru několika mikrometrů a způsobuje odpařování materiálu. Odpařený materiál je vysoce ionizovaný a tvoří plazmu o vysoké energii. Kovové ionty se spojí s reaktivním plynem a vytváří požadovaný povlak na povrchu substrátu.^{1,9,10}

Výhody odpařování pomocí elektrického oblouku:¹⁰

- odpařovány mohou být materiály jak s nízkým tak vysokým bodem tavení,
- nízké zatížení tepelnou radiací (katodická oblouková depozice),
- odpařovaný materiál může být urychlen na vysokou energii před dopadem na substrát,
- mohou být povlakovány všechny vodivé materiály,
- umožňuje povlakování tvarově složitých součástí.

Nevýhody odpařování pomocí elektrického oblouku:¹⁰

- lze odpařovat pouze elektricky vodivé materiály,
- vysoké zatížení tepelnou radiací (anodická oblouková depozice).

3.2.1.2 Vakuové napařování (odporové)

Zdroje povlaku jsou ve formě vyhřívaných spirál, loděk nebo kelímků (pro materiál s teplotou tavení pod 1500 °C). Materiál je z tepelného zdroje odpařován za pomoci tepelné reakce a dopadne na substrát bez kolize s molekulami plynu v prostoru mezi zdrojem a substrátem. Tlak plynu v povlakovací komoře je obvykle okolo 10^{-4} až 10^{-8} Pa, v závislosti na úrovni znečištění, které lze tolerovat v povlaku. Aby bylo dosaženo dostatečných depozičních rychlostí, musí se dosáhnout takové teploty, že tlak v páře je asi 0,1 Pa.¹⁰

Výhody vakuového odpařování:

- vysoká čistota nanášeného povlaku z vysoce čistého zdroje,
- pevný odpařovaný materiál může být v jakékoliv formě a o jakékoliv čistotě,
- umožňuje použití masek a clon, aby se zabránilo ukládání povlaku, které není žádoucí,
- rychlost povlakování je snadno regulovatelná a monitorovatelná,
- jedná se o nejlevnější metodu povlakování pomocí PVD.

Nevýhody vakuového odpařování:

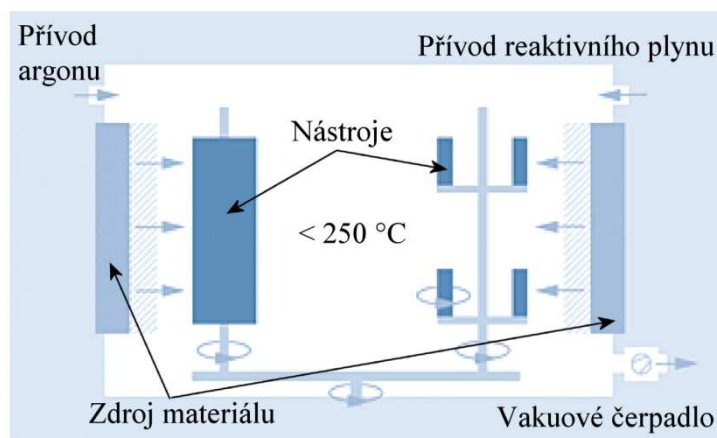
- obtížné ukládání slitin a mnohých sloučenin,
- špatné napovlakování složitých povrchů,
- nerovnoměrná tloušťka povlaku,
- nízké využití odpařovaného materiálu,
- velká zátěž tepelnou radiací,
- velké komory v důsledku snížení zatížení tepelnou radiací.

3.2.2 Naprašování

Při naprašování jsou povlakované díly nejprve zahřáty a následně iontově leptány „bombardováním“ ionty argonu. Takto upravený povrch je čistý a zbavený jakékoliv atomové kontaminace, což je velice důležité pro přilnavost povrchu. Následně se na zdrojový materiál (terč) přivede záporné elektrické napětí. Elektrický výboj v plynu, který se takto zapálí, vytvoří kladné argonové ionty, které se urychlují ve směru k nanášenému materiálu a rozprašují ho. Naprašování lze provádět ve vakuu nebo při nízkém tlaku (<0,6 kPa), přičemž odprašované

částice nekolidují s plynem (jeho molekulami) mezi terčem a substrátem. Proces lze ovšem provádět i při vyšším tlaku plynu (0,6 - 2 kPa), kde energetické částice, které jsou odprašovány z terče, jsou „ohřívány“ kolizemi s plynnou fází, než se dostanou k povrchu povlakovaného materiálu. Terč při procesu napařování není nutné ohřívat na vysokou teplotu, jako je tomu u povlakování pomocí odpařování. Výsledkem tohoto procesu je tenká soudržná vrstva požadovaného složení a struktury.

Napařovací komora (obr. 9) se skládá ze zdroje napařovaného materiálu, povlakovaného materiálu (substrátu), umístěného na planetovém rotujícím mechanismu, vakuového čerpadla. Dále do komory se zavádí reaktivní plyn a argon.^{1,10,11}



Obr. 9 Napařovací komora¹¹

3.2.2.1 Napařování doutnavým výbojem rovinné diody

Napařování doutnavým výbojem rovinné diody je nejjednodušší a pravděpodobně nejvíce využívaná povlakovací metoda. Tento systém se skládá z katody a anody. Katoda slouží jako zdroj povlakovaného materiálu (terč), na anodě je připevněn substrát. Vzdálenost mezi elektrodami je od 50 do 100 mm. Katoda také slouží k udržení doutnavého výboje, který ji ohřívá, a proto bývá velmi často chlazena vodou. Rychlost ukládání materiálu na substrát je ovlivněna především hustotou výkonu na povrchu terče, vzdáleností elektrod (terče a substrátu), povlakovaným materiálem, tlakem v pracovní komoře a velikostí erodované oblasti. Typické podmínky povlakování doutnavým výbojem rovinné stejnosměrné diody jsou:

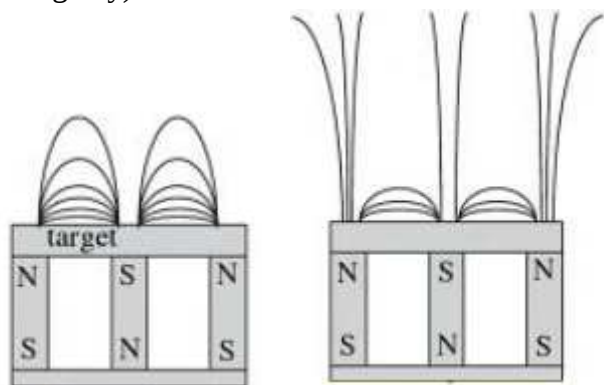
- hustota proudu na katodě 1 mA/cm^2 ,
- napětí výboje $3\,000 \text{ V}$,
- tlak argonu 10 Pa ,
- rychlost depozice 40 nm/min ($2,4 \text{ } \mu\text{m/h}$).

Mezi hlavní nevýhody této metody patří velice nízká rychlost depozice a ohřev substrátu. Ovšem výhodou je jednoduchost a snadná výroba.^{1,2}

3.2.2.2 Magnetronové napařování

Napařování pomocí magnetronu dosahuje relativně velké rychlosti a oblasti depozice a menšího teplotního zatížení substrátu. Magnetronové napařovací zdroje mohou být definovány jako diodová zařízení, v nichž je užito magnetického pole k formování elektronových pastí. Existuje mnoho konfigurací magnetronů, například rovinné nebo cylindrické (válcové). Katoda obsahuje koncové desky, vyrobené z materiálu, který má být nanášen. Ty jsou umístěny do povlakovací komory s magnetickým polem, které směřuje souhlasně s osou katody. Magnetické pole o síle až pár set gaussů působí pouze na elektrony v plazmě (ionty neovlivňuje).

Zachycené elektrony postupují směrem k anodě a podílí se na kolizích. Dle síly vnějších a vnitřních magnetů lze magnetrony rozdělit na vyvážené (stejná síla magnetů) a nevyvážené (většinou silnější vnější magnety).



Obr. 10 Vyvážený a nevyvážený magnetron ¹²

Použití nevyváženého magnetronu vede k expanzi plazmatu od terče směrem k substrátu. Efektem magnetického pole je zachytit rychle se pohybující sekundární elektrony, které unikají ze substrátu. Tyto elektrony se ionizují srážkami s neutrálními atomy plynu a produkují vyšší počet iontů a elektronů, které značně zvýší iontové bombardování substrátu, což je vyžadováno u tvrdých povlaků.

Použití vyváženého magnetronu je určeno především pro mikroelektronické aplikace a je navržen tak, aby udržel plazmu i elektrony v okolí terče a vyhnul se tak bombardování substrátu. ^{1,2,13}

Typické podmínky povlakování za pomoci magnetronu:²

- hustota proudu na katodě 20 mA/cm²,
- proud výboje 1 až 50 A,
- napětí výboje 800 V,
- tlak argonu 0,13 Pa,
- rychlost povlakování 200 nm/min (12 μm/h).

3.3 Metoda PACVD (Plasma-Assisted Chemical Vapour Deposition)

Metoda PACVD se snaží kombinovat některé z výhod předešlých povlakovacích metod PVD a CVD. Typický pro tuto metodu je provozní tlak, který je v rozmezí desítek až stovek pascalů. Vyšší tlaky také předpokládají snížení doby na odplynění během ohřívání, v porovnání s PVD. Teploty povlakování této metody jsou v rozmezí 470-530 °C, tím umožňují povlakovat i ocelové nástroje, což metoda CVD neumožňovala. Povlaky se vyznačují velice nízkým koeficientem tření, který může dosáhnout hodnoty až 0,1. Nástroje jsou povlakovány až po konečném zušlechťení na danou tvrdost. Během procesu nedochází ke změnám rozměrů. Uspořádání povlakovací komory (obr. 11) se podobá procesu naprašování. Vlastní proces povlakování probíhá nejprve přívodem plynu, který obsahuje prvky materiálu povlaku. Následně se v komoře uskuteční elektrický výboj v plynu. Ve výboji vznikají ionty a radikály, které vytvářejí na nástroji (substrátu) kompaktní vrstvu povlakovaného materiálu. Vlastnosti dané vrstvy se dají ovlivňovat změnou přivedeného napětí ve výboji.

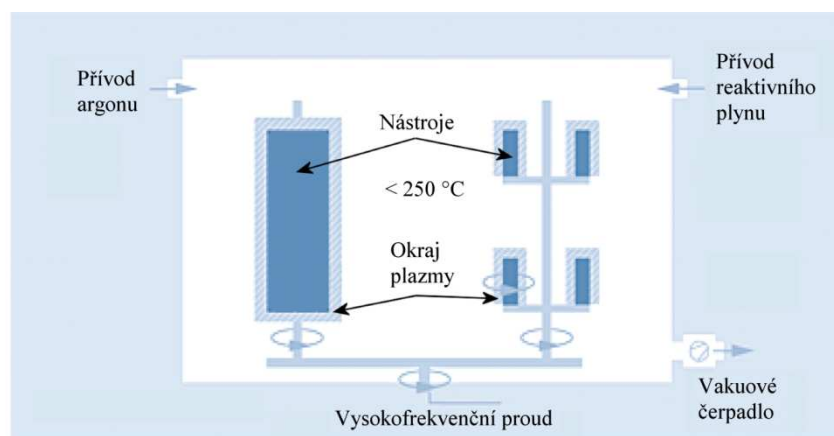
Výhody nástrojů povlakovaných PACVD:

- nízký koeficient tření (snížení spotřeby mazadel a separátorů),
- výborné tribologické vlastnosti,
- žádné změny v mikrostruktuře a rozměrech,
- možnost povlakování dutin.

Mezi další výhody metody PACVD patří to, že umožňuje nejenom povlakování, ale i nitridaci a iontové čištění povrchů.

Iontové čištění povrchů – kladně nabitě ionty procesního plynu dopadají na povrch substrátu a předáním vysoké kinetické energie (řádově 10 eV) dochází k odstranění (vyražení) nečistot zakotvených v povrchu substrátu.

Plazmová nitridace povrchu – provádí se pro zlepšení adheze mezi povlakem a substrátem.



Obr. 11 Povlakovací komora pro PACVD ¹⁴

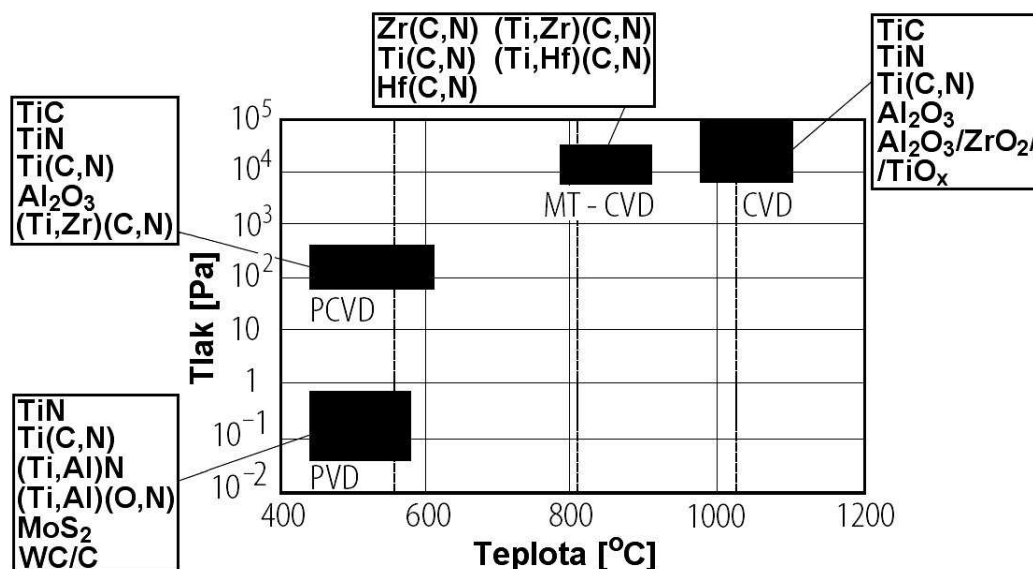
Povlakování slinutých karbidů touto metodou již kompletně umožnilo odstranit nežádoucí účinky dekarbonizace během povlakování. Vyměnitelné břitové destičky ze slinutých karbidů povlakovaných touto metodou byly úspěšně použity při obráběcím procesu. Metoda byla vhodná k povlakování jak destiček s ostrou hranou, tak destiček, které vyžadují vysokou spolehlivost za nepříznivých řezných podmínek. Ačkoliv metoda povlakování PACVD umožnila dosáhnout velmi dobrých vlastností povlakovaných vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu, její vysoká náročnost na vybavení a technologie ji činí značně dražší než konvenční CVD metodu povlakování. ^{14,15,16,19}

3.4 Metoda MTCVD (Moderate Temperature Chemical Vapor Deposition)

Metoda MTCVD byla vyvinuta ke snížení pracovních teplot při chemickém povlakování. Snížení teploty povlakování je z původních 900 až 1100 °C (CVD) na teploty 700 až 850 °C. Metoda využívá k povlakování chemickou sloučeninu acetonitril (CH_3CN) nebo vysoce toxický a hořlavý metylkyanid, místo methanu nebo dusíku, jak je tomu u klasické metody CVD. Zdrojem povlaků jsou stejně jako u metody CVD sloučeniny TiCl_4 , AlCl_3 atd. Rychlost růstu vrstvy povlaku například TiCN je u metody MTCVD třikrát vyšší než u původní metody CVD. Substrát díky vysoké reaktivitě sloučenin TiCl_4 a CH_3CN neovlivňuje materiál povlaku. Mezi hlavní výhody metody MTCVD patří, jak již bylo zmíněno, nižší teplota povlakování, než u klasického CVD. Při nižší teplotě nedochází ke ztrátě houževnatosti slinutých karbidů a vyměnitelné břitové destičky jsou odolnější proti mechanickým rázům při obrábění a lze tedy použít vyšší posuvové rychlosti a tím zvýšit produktivitu výroby. Tyto teploty ovšem nejsou dostatečně nízké, aby kompletně odstranili dekarbonizaci na daném substrátu ze slinutého

karbidu, ovšem její projevy jsou podstatně sníženy. Dále lze vyrábět břitové destičky s většími kladnými úhly čela, bez rizika jejich vylomení.

Porovnání výše uvedených povlakovacích metod je uvedeno na obr. 12, společně s nejčastějšími typy povlaku, které se jednotlivými metodami nanáší a v tab. 1.



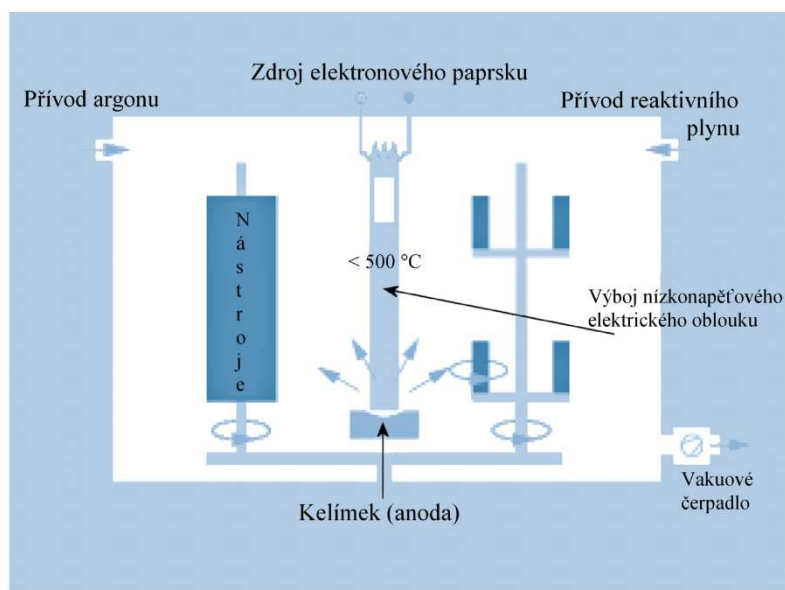
Obr. 12 Porovnání povlakovacích metod ¹

Tab. 1 Porovnání metod povlakování

Technologie povlakování	Teplota [°C]	Tlak [Pa]	Rotace	Drsnost povrchu
CVD	900 – 1100	atmosférický	ne	vysoká
MTCVD	700 - 800	atmosférický	ne	vysoká
PACVD	470-530	100 - 400	ne	nízká
PVD	do 600	0,1 - 1	ano	střední

3.5 Ion plating (Iontová implantace)

Iontové povlakování (obr. 13) je vakuový povlakovací proces, ve kterém je povrch substrátu čištěn naprašováním a udržován čistý až do doby, kdy materiál povlaku vytvoří na podkladu tenkou vrstvu. Následně je vrstva nepřetržitě nebo periodicky „bombardována“ částicemi o vysoké energii, které mohou být inertní nebo reaktivní. Bombardování ovlivňuje nukleaci, růst a vlastnosti daného povlaku. Zdrojem deponovaných atomů může být vakuové odpařování, odprašování nebo obloukové odpařování, chemický plynný prekurzor, nebo kombinace různých zdrojů, např. odprášený titan a uhlík z rozkladu acetylénu u nízkotlaké CVD metody, které vytvoří sloučeninu TiC. K „bombardování“ substrátu může dojít působením inertních nebo reaktivních iontů, které jsou urychlovány z plazmy do povlakovací komory (plazmová iontová implantace), nebo z oddělených „iontových děl“ (vakuové iontové povlakování). Povlakování s použitím iontových paprsků je označováno jako Ion Beam Assisted Deposition (IBAD).¹⁸

Obr. 13 Povlakovací komora pro iontovou implantaci ²¹

3.6 PVD+CVD povlakování slinutých karbidů

Z důvodu zlevnění procesu povlakování a zachování dobrých vlastností podkladu ze slinutého karbidu, byl vyvinut proces povlakování konvenčními metodami CVD a PVD. Kvůli eliminaci dekarbonizace a tvorbě η -fáze pod povlakem nanášeným pomocí PVD, byla vyvinuta metoda iontové implantace (ion plating). Tato technologie umožnila depozici vysoce přilnavého, nízkonapěťového povlaku z titanu, který zároveň neobsahoval žádné defekty. Substrát ze slinutého karbidu tak nebyl poškozen a nevznikala v něm žádná dekarbonizace. Tato podkladová vrstva tvořila zároveň bariéru proti tepelnému poškození substrátu při povlakování metodou CVD. Povlakované slinuté karbidy kombinovanou metodou PVD-CVD se vyznačovali dlouhou životností jak ve frézování, tak v soustružení. Metoda také umožnila unikátní kombinaci nezměněných pevnostních vlastností povlakovaného slinutého karbidu s tak výbornou odolností povlaku, jako bylo dosaženo pomocí samotné metody CVD.¹⁹

4. POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY V SORTIMENTU VÝROBY VYBRANÝCH PRODUCENTŮ NÁSTROJŮ A NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLŮ

První slinutý karbid pro komerční výrobu byl vyvinut Friedrichem Kruppem v Essenu. Název slinutého karbidu byl Widia-N (Wie Diamant), který obsahoval 6% kobaltu. První demonstrace tohoto karbidu proběhla v roce 1927 v Lipsku. Obráběným materiálem byla litina, která obsahovala 12 % manganu. Řezné rychlosti demonstrovány na této litině byly 2-3x vyšší, než byla dosud obvyklá řezná rychlost při jejím obrábění.³⁶

První povlakované slinuté karbidy se objevily v 70. letech minulého století. Povlak zlepšoval vlastnosti slinutých karbidů a prodlužoval jejich životnost při obrábění.

Výrobou povlakovaných slinutých karbidů se nyní zabývá mnoho firem, které mají sídla po celém světě. V České republice se povlakováním slinutých karbidů zabývá pouze firma Pramet Tools s.r.o.

4.1 Pramet Tools s.r.o.

Firma Pramet Tools s.r.o. se sídlem v Šumperku je jediným výrobcem povlakovaných slinutých karbidů v České republice. Historie společnosti sahá už do 30. let minulého století. V roce 1951 byla zahájena výroba součástí ze slinutého karbidu a také započala výroba řezných nástrojů osazených slinutým karbidem. V dnešní době již firma expanduje i do zahraničí, má například pobočky v Polsku a Itálii. Firma nabízí povlakované slinuté karbidy na frézování i soustružení (tab. 2, přílohy 1 až 2).³³

Firma Pramet Tools nabízí širokou škálu povlakovaných slinutých karbidů pro obrábění. Povlak s označením 8016 lze využít jak pro frézování, tak pro soustružení. Nejčastěji nabízí firma Pramet Tools povlakované slinuté karbidy k obrábění ocelí typu P. Pro povlakování je využito metod PVD a MTCTD. V sortimentu lze vybrat univerzální i speciální povlaky.

Tab. 2 Sortiment povlakovaných slinutých karbidů firmy Pramet Tools^{28,29}

Povlakované slinuté karbidy pro frézování			Povlakované slinuté karbidy pro soustružení		
Typ	Oblast použití	Způsob nanášení a typ povlaku	Typ	Oblast použití	Způsob nanášení a typ povlaku
2215 ¹⁾	P20, K20	Tenký povlak nanesený metodou MTCVD.	6605 ¹⁾	K15	Duální povlak nanesený kombinací metod MTCVD a PVD s nosnou vrstvou Al ₂ O ₃ .
2230 ¹⁾	P30		6615 ³⁾	P25, K20	Duální povlak nanesený kombinací metod MTCVD a PVD s nosnou vrstvou TiCN.
5026 ¹⁾	P40, K40		6620 ¹⁾	K25	Silný povlak s vrstvou Al ₂ O ₃ nanesený metodou MTCVD.
5040 ²⁾	P45		6630 ³⁾	P35, M30	Střední povlak s nosnou vrstvou TiCN nanesený metodou MTCVD.
7010 ¹⁾	K25, N25, H10	Multivrstvý nanostrukturní povlak s vysokým obsahem Al nanesený metodou PVD.	6635 ⁴⁾	P40, M35	Tenký povlak nanesený metodou MTCVD.
7025 ²⁾	P40		6640 ¹⁾	P40, M35	Tenký povlak s nosnou vrstvou TiCN nanesený metodou MTCVD.
7040 ¹⁾	M35, K35		9210 ⁴⁾	P25	Silný povlak s nosnou vrstvou Al ₂ O ₃ nanesený metodou MT-CVD.
7205 ¹⁾	K15, H10	PVD povlak nového typu se zvýšenou odolností proti oxidaci a unikátní kluzné vlast.	9230 ³⁾	P35, M30	Moderní, středně silný, speciální MTCVD povlak.

Tab. 2 - pokračování

Typ	Oblast použití	Způsob nanášení a typ povlaku	Typ	Oblast použití	Způsob nanášení a typ povlaku
7215 ¹⁾	K25, H15	Gradientní povlak nanesený metodou PVD.	9235 ⁴⁾	P40, M35	Středně silný povlak nanášený metodou MTCVD.
7230 ¹⁾	P40, K35	Gradientní povlak nanesený metodou PVD se zvýšenou odolností proti oxidaci.	8016 ¹⁾	K25, N25, H15	Nanostrukturní povlak nanesený metodou PVD.
8016 ¹⁾	K25, N25, H15	Nanostrukturní povlak nanesený metodou PVD.	8030 ¹⁾	P40, M35, K40	
8026 ¹⁾	M35, K35		8040 ¹⁾	M35, S30	
8026T ²⁾	P40				
Pozn.: 1) Substrát typu H, 2) substrát typu S, 3) funkčně gradientní substrát s nízkým obsahem kobaltu, 4) funkčně gradientní substrát s vysokým obsahem kobaltu.					

4.2 Iscar

Iscar je výrobcem řezných nástrojů pro všechny průmyslové aplikace třískového obrábění. Společnost byla založena v roce 1952 Stefem Wertheimerem. Současné sídlo firmy se nachází v Izraeli v průmyslové zóně TEFEN v západní Galilei. Iscar během let expandoval z původní jediné jednotky do nadnárodní společnosti reprezentované dnes ve více než 50 zemích světa, včetně České Republiky. Výběr ze sortimentu povlakovaných slinutých karbidů firmy je uveden v tabulce 3.³²

Slinuté karbidy od firmy ISCAR jsou povlakovány pomocí PVD metody a kombinací metod MTCVD a CVD. Povlaky řady 5000 jsou určeny pro obrábění jednoho druhu materiálu (P nebo K), povlaky řady 8000 a 800 nabízí obrábění více druhů materiálů (kromě N). Firma hojně využívá povlaky na bázi hliníku, jako je například povlak Al_2O_3 nebo TiAlN , společně s povlakem z TiCN .

 Tab. 3 Sortiment povlakovaných slinutých karbidů firmy ISCAR²⁷

Typ povlaku	Charakteristika povlaku
	Velmi tvrdý substrát s obohacenou kobaltovou vrstvou. Povlak TiCN nanášen pomocí MTCVD a tlustá vrstva alfa Al_2O_3 nanášená pomocí CVD metody. Nástroj se vyznačuje výbornou teplotní stabilitou, odolností proti vylomení a plastické deformaci. Doporučeno na vysokorychlostní obrábění za stabilních nebo mírně nestabilních podmínek.
	Houževnatý substrát s obohacenou kobaltovou vrstvou, povlakem TiCN (MTCVD) a tlustým alfa povlakem Al_2O_3 (CVD). Doporučené k obrábění ocelí za všech podmínek. Nástroj se vyznačuje dobrou houževnatostí, odolností proti vylomení a plastické deformaci.
	Velmi houževnatý substrát s obohacenou vrstvou kobaltu, povlakem TiCN (MTCV) a tlustým alfa povlakem Al_2O_3 (CVD). Vynikající houževnatost a odolnost proti vylomení řezného nástroje. Doporučeno pro přerušované řezy a nestabilní řezné podmínky.
	Velmi tvrdý substrát s povlakem TiCN (MTCVD) a tlustým alfa povlakem Al_2O_3 (CVD). Řezný nástroj se vyznačuje výbornou tepelnou stabilitou, odolností proti vylomení a plastické deformaci. Doporučeno k obrábění ocelí při stabilních a mírně nestabilních podmínkách. Lze také použít pro obrábění šedých litin.
	Houževnatý substrát s alfa povlakem Al_2O_3 . Doporučeno k frézování šedých litin při vysokých řezných rychlostech. Vysoká trvanlivost nástroje.

Tab. 3 - pokračování

Typ povlaku	Charakteristika povlaku
	Tvrdý substrát s povlakem TiCN (MTCVD) a tlustým alfa povlakem Al ₂ O ₃ (CVD). Výborná tepelná stabilita a dobrá houževnatost řezného nástroje. K obrábění především šedých litin za stabilních a mírně nestabilních řezných podmínek.
	Houževnatý substrát s alfa povlakem Al ₂ O ₃ . Doporučeno k frézování ocelí při vysokých řezných rychlostech. Vysoká životnost nástroje.
	Houževnatý jemnozrnný substrát s tvrdým povlakem TiAlN (PVD) pro lepší odvod třísky. Vhodný k soustružení žáruvzdorných slitin, austenitických ocelí a tvrdých ocelí při nízkých až středních řezných rychlostech.
	Houževnatý jemnozrnný substrát s tvrdým povlakem TiAlN (PVD) pro lepší odvod třísky. Doporučeno k obrábění žáruvzdorných slitin austenitických ocelí, tvrdých slitin a uhlíkových ocelí při středních až vysokých řezných rychlostech, přerušovaných řezech a nepříznivých řezných podmínkách.
	Houževnatý substrát kombinovaný společně s vylepšeným povlakem AlTiN (PVD), který zaručuje vysokou odolností proti oxidaci. Doporučeno k frézování ocelí při vysokých řezných rychlostech a šedých litin při nízkých až středních řezných rychlostech při nestabilních podmínkách.
	Vylepšený tvrdý povlak TiAlN pro lepší odvod třísky. Vhodný pro frézování ocelí, žáruvzdorných slitin a dalších slitin. Doporučeno pro přerušovaný řez a těžké operace.
	Tvrdý jemnozrnný substrát s alfa povlakem Al ₂ O ₃ . Vyznačuje se dobrou odolností proti vylomení a opotřebení nástroje. Doporučeno pro vysokorychlostní vrtání ocelí.

4.3 Sandvik Coromant

Firma byla založena obchodníkem Göranem Fredrikem Göranssonem v roce 1862. Původní název firmy byl pouze Sandvik a vyráběla ocelové ignoty. S pokračujícím rozvojem firmy byl otevřen v roce 1942 úsek na výrobu slinutého karbidu a dostal název Sandvik Coromant. V roce 1952 byla celá produkce přesunuta do Gima v centrálním Švédsku, kde je dodnes její sídlo. Dnes je firma jedním z nejvýznamnějších producentů kovových řezných nástrojů a povlakovaných slinutých karbidů. Firma uvedla v roce 1969 na trh jako první povlakované slinuté karbidy. Jednalo se o tenký 4-5 µm tlustý jednovrstvý povlak karbidu titanu (TiC). Výběr z produkce povlakovaných slinutých karbidů švédské firmy Sandvik Coromant je v tabulce 4.³¹

Povlaky na slinuté karbidy od firmy Sandvik Coromant jsou nanášeny převážně pomocí metod PVD a MTCVD. Povlakované slinuté karbidy se vyznačují poměrně širokou oblastí použití. Mezi nejčastěji využívané povlaky se řadí multivrstvý povlak Ti(C,N)+Al₂O₃+TiN pro soustružení a povlak Ti(C,N)+Al₂O₃ pro frézování. Firma Sandvik Coromant nabízí také povlaky na vrtáky a další obráběcí nástroje.

Tab. 4 Sortiment povlakovaných slinutých karbidů firmy Sandvik Coromant pro soustružení²⁶

Typ	Oblasti použití	Charakteristika povlaku
GC1005	M15, N10, S15	Jemnozrnný slinutý karbid s tenkým povlakem (Ti,Al)N+TiN nanášeným pomocí metody PVD.
GC1025	P25, M15, S15	
GC1105	M15, S15	Jemnozrnný slinutý karbid s tenkým povlakem (Ti,Al)N nanášeným pomocí metody PVD.
GC1115	M15, N15, S20	Velmi jemnozrnný slinutý karbid s oxidovým povlakem nanášeným pomocí metody PVD o malé tloušťce.
GC1125	P25, M25, N25, S25	
GC1515	P25, M20, K25	Velmi jemnozrnný slinutý karbid se středně tlustým povlakem Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN nanášeným pomocí metody MTCVD.
GC2015	P25, M15	Gradientní slinutý karbid s tenkým povlakem Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN nanášeným pomocí metody MTCVD.
G2025	P35, M25	Slinutý karbid se středními zrny s tenkým povlakem Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN nanášeným pomocí metody MTCVD.
GC2035	M35	Slinutý karbid se středními zrny s tenkým povlakem (Ti,Al)N+TiN nanášeným pomocí metody PVD.
GC235	P45, M40	Slinutý karbid se středními zrny s tenkým povlakem Ti(C,N)+TiN povlakovaným pomocí metody CVD.
GC3005	P10, K10	Slinutý karbid se středními zrny se středně tlustým povlakem Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN nanášeným pomocí metody MTCVD.
GC3205	K05	Jemnozrnný slinutý karbid s tlustým povlakem Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN nanášeným pomocí metody MTCVD.
GC4205	P05, K10, H15	Gradientní slinutý karbid s tlustým povlakem Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN nanášeným pomocí metody MTCVD.
GC4215	P15, K15, H15	
GC4235	P35, M25	

 Tab. 5 Sortiment povlakovaných slinutých karbidů firmy Sandvik Coromant pro frézování²⁶

Typ	Oblasti použití	Charakteristika povlaku
GC1010	P10, K10, H10	Velmi jemnozrnný slinutý karbid s tenkým povlakem (Ti,Al)N nanášeným pomocí metody PVD.
GC1020	K20	Slinutý karbid se středními zrny s tenkým povlakem (Ti,Al)N nanášeným pomocí metody PVD.
GC1025	P10, M15, N15, S15, H15	Jemnozrnný slinutý karbid s tenkým povlakem Ti(C,N)+TiN nanášeným pomocí metody PVD.
GC1030	P30, M15, N15, S15, H10	
GC2030	P25, M25, S25	Slinutý karbid se středními zrny s tenkým povlakem (Ti,Al)N+TiN nanášeným pomocí metody PVD.
GC2040	P40, M30, S30	Slinutý karbid se středními zrny s tenkým povlakem Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ nanášeným pomocí metody MTCVD.
GC3040	P20, K30, H25	Slinutý karbid se středními zrny se středně tlustým povlakem Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ nanášeným pomocí metody MTCVD.

Tab. 5 - pokračování

Typ	Oblasti použití	Charakteristika povlaku
GC3220	K20	Slinutý karbid se středními zrny s tlustým povlakem Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ nanášeným pomocí metody MTCVD.
GC4220	P15, K25, H25	Slinutý karbid se středními zrny se středně tlustým povlakem Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ nanášeným pomocí metody MTCVD.
GC4230	P25, M15, K30	
K15W	K15	Jemnozrnný slinutý karbid s tenkým povlakem Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ nanášeným pomocí metody MTCVD.

4.4 Widia

Firma Widia je firma, která se zabývá nástroji pro obrábění již více než 80 let. V roce 1926 začala jako vůbec první firma na světě vyrábět slinutý karbid určený pro obrábění kovů a v roce 1927 již představila svůj první slinutý karbid na obrábění na jarním veletrhu v Lipsku. V roce 1967 firma otevřela pobočku na výrobu slinutých karbidů v Indii. Další velký úspěch slavila firma v roce 1969, kdy na trh uvedla povlak s názvem TT 15 extra. Nyní patří firma Widia pod americký koncern Kennametal, který má sídlo v USA v Pensylvánii. V současné době firma nabízí nejmodernější materiály a povlaky na obráběcí nástroje a patří k výrazným výrobcům dnešní doby.^{34,37}

Firma Widia nabízí povlaky povlakované především kombinovanou metodou MT-CVD a CVD. Jedná se o multivrstvé povlaky především TiN+TiCN+Al₂O₃+TiN, které jsou určeny převážně k obrábění ocelí skupiny P.

Tab. 6 Sortiment povlakovaných slinutých karbidů firmy Widia²⁵

Povlak	Oblast použití	Charakteristika povlaku
HCK10	N5-15	Povlakovaný slinutý karbid. Povlak PVD – TiAlN+Al ₂ O ₃ na mikrozrnném karbidu. Lehké a střední obrábění. Pro slitiny hliníku.
TN5105	K10-20	Povlakovaný karbid. MTCVD/CVD – TiN+TiCN+Al ₂ O ₃ . Vyšší odolnost proti otěru s delší životností při vysokých řezných rychlostech. Vyšší odolnost ostří proti vrubovému opotřebení při přerušovaných řezech.
TN5120	K15-25	Povlakovaný karbid. MTCVD/CVD – TiN+TiCN+Al ₂ O ₃ . Lehké a střední obrábění. Pro litiny.
TN7105	P5-10	Povlakovaný karbid. MTCVD/CVD – TiN+TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN. Velmi vysoká odolnost proti otěru. Lehké obrábění. Určeno pro oceli a tvárné litiny při nepřerušovaných řezech.
TN7110	P5-15	Povlakovaný karbid. MTCVD/CVD – TiN+TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN. Velmi otěruvzdorný. Lehké a střední obrábění. Pro oceli.
TN7115	P10-20	Povlakovaný karbid. MTCVD/CVD – TiN+TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN. Kompromis mezi odolností proti otěru a pevností. Lehké a střední obrábění. Pro obrábění ocelí.
TN7125	P20-30 M20-30	Povlakovaný karbid. MTCVD/CVD – TiN+TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN. Dobrá tuhost. Střední a těžké obrábění. Pro obrábění ocelí.
TN7135	P30-40	Povlakovaný karbid. MTCVD/CVD – TiN+TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN. Pro těžké hrubovací operace za mokra i za sucha stejně jako při přerušovaných i nepřerušovaných řezech.

5. VÝVOJOVÉ TRENDY V OBLASTI POVLAKOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Výzkum je nedílnou součástí povlakování od jeho vzniku až dodnes. Vyvíjely se nové metody, druhy povlaků a materiály, které se na povlaky používají. Nyní je hlavní vývojový trend zaměřen na kubický nitrid boru, který slibuje velice dobré řezné vlastnosti povlakovaného řezného nástroje při obrábění. Vývoj se ovšem nezastavil ani v dalších oblastech. Stále je snahou docílit levnějších a efektivnějších metod nanášení povlaku, či zlepšovat povlaky samotné. V této části jsou zmíněny modifikované povlaky TiAlN nanášené pomocí magnetonového naprašování, které mají zamezit použití chladiwa a zároveň zachování dobrého povrchu obrobku. Dále je zmíněn vývoj povlaku z kubického nitridu boru a metody, kterou se nanáší. Na závěr kapitoly je popsán výzkum nanokompozitního povlaku diamant/ β -SiC.

5.1 Modifikované povlaky TiAlN nanášené pomocí pulzního magnetonového naprašování s dalšími prvky v povlaku

V dnešní době jsou povlaky TiN, TiCN, TiAlN používány ke snížení opotřebení nástroje, dobře známy a využívány. Zvýšením produktivity práce a požadavků na kvalitu obrobku je potřeba i zvýšení výkonnosti povlakovaného nástroje. Vývoj povlaků směřuje k obrábění v suchých podmínkách, ke zvýšení řezné rychlosti a k řezání tvrdých i lehkých materiálů, kde pořád zůstávají jisté rezervy. Příprava výkonnějšího povlaku řezného nástroje vyžaduje použití povlakovacího procesu s vysokou plazmatickou aktivací, např. plazmou aktivovaného naprašování. Cestou ke zlepšení nástrojových povlaků je realizace povlakovacích systémů skládajících se z různých vrstev nebo fází v jednom povlaku, který obsahuje různé materiály s různými vlastnostmi. Pro takovéto kombinace je vhodný povlak TiAlN, který je široce využíván v průmyslu. Běžný TiAlN povlak je připraven pomocí metody PVD jako je obloukové odpařování nebo magnetronové naprašování. Typické hodnoty tvrdosti povlakované vrstvy jsou v rozmezí 30 GPa. Změna parametrů povlakování může mít vliv na hustotu, velikost krystalů a jejich orientaci v povlaku. Vlastnosti, jako jsou odolnosti proti oxidaci a vysokým teplotám, lze ovlivnit začleněním dalších prvků do povlaku (Cr, Y, Si) nebo vytvářením vícevrstevných povlaků.

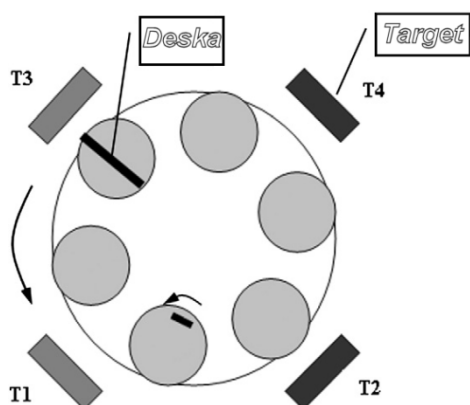
Nanášení povlaku pomocí pulzního magnetronového naprašování se sestává z pěti hlavních kroků: a) ohřev, b) leptání ionty argonu k očištění substrátu, c) naprašování vrstvy ke zvýšení adheze povlaku, d) postupné zvýšení napětí 1V/min z počátečního napětí -30 V na zvolené maximum a e) deponace povlaku TiAlN při neustálé změně podmínek.

Hlavní parametry pulzního magnetronového naprašování:

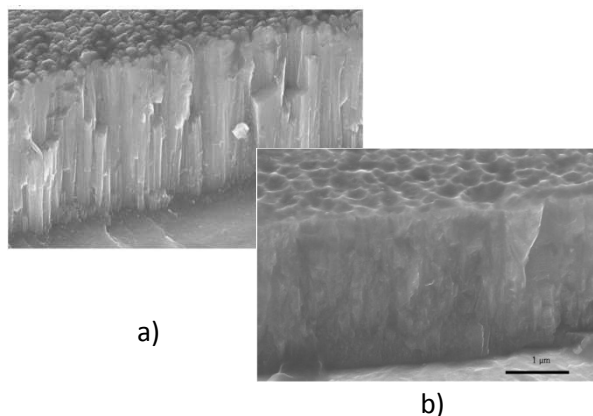
- targety: TiAl (50:50), Cr (čistota 99,9 %), Si (čistota 99,99 %), SiC (čistota 99,9 %),
- výkon targetů: TiAl (5 kW), Cr (3 kW), Si (1 kW), SiC (3kW),
- uspořádání targetů: pulzní stejnosměrný proud (50 kHz, targety T1+T3 a T2+T4 pulsují proti sobě (obr. 14),
- reaktivní plyn: dusík (N_2),
- toky plynů: Ar ($200-300 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), N_2 ($200-300 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),
- tlak plynu: průměrně 0,5 Pa,
- potenciál substrátu: od -30 do -120 V,
- teplota držáku substrátu: 350 °C.

Morfologie povlaku se změnila ze sloupkovitého růstu struktury na bezstrukturní (obr. 15). Změna struktury měla vliv i na tvrdost povlaku, která se zvýšila z původních 30 GPa na 35-40 GPa. Tato vlastnost se projevila i v životnosti nástroje, která byla více než 2x větší. Vliv přídatných prvků na povlak TiAlN se projevil změnou struktury a pevnosti. Přidáním Cr do povlaku způsobilo sloupcovitou strukturu a lepší přilnavost povlaku

k substrátu. Přidání Si vedlo ke sklovité struktuře. Přídavné prvky také zvýšily tvrdost povlaku, která přesahovala 40 GPa. Tyto vlastnosti činí povlaky nanášené pulsním magnetronovým naprašováním výrazně lepší než klasicky povlakované TiAlN povlaky zejména v oblasti tvrdosti a odolnosti proti opotřebení.²⁰



Obr. 14 Uspořádání targetů v povlakovací komoře²⁰



Obr. 15 a) povlak TiAlN nanášený klasickou metodou b) povlak TiAlN nanášený pulsním magnetronovým naprašováním²⁰

5.2 Povlak z kubického nitridu boru

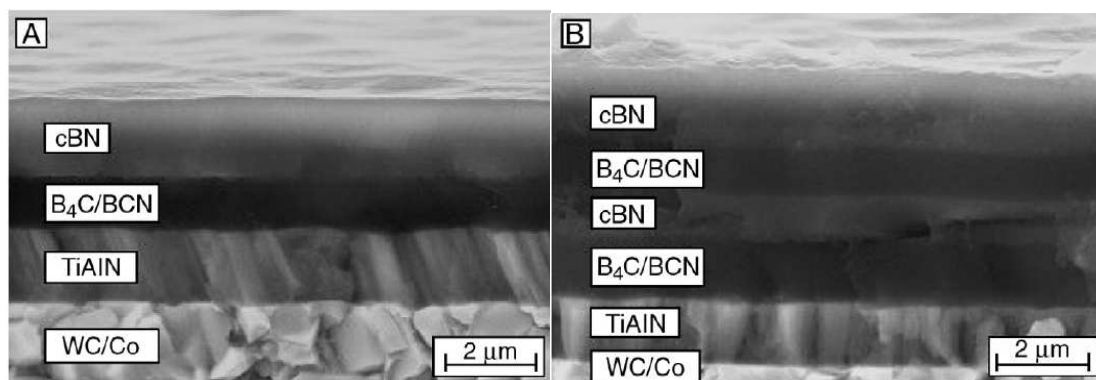
Využití kubického nitridu boru (KNB, cBN - cubic boron nitride) v obrábění stále roste. Kubický nitrid boru je po diamantu druhým nejtvrdším uměle vyráběným materiálem na obrábění, ovšem značnou výhodou oproti diamantu je možnost obrábění materiálů na bázi železa. Ve srovnání s ostatními reznými materiály se ještě kubický nitrid boru vyznačuje vysokou tepelnou stabilitou, odolností proti opotřebení a oxidaci a chemickou stabilitou. Výroba rezného nástroje z KNB je velice složitá a drahá, proto se výzkum soustředil na nanášení tenké vrstvy kubického nitridu boru na vyměnitelné břitové destičky (například ze slinutých karbidů). K nanášení povlaku z KNB není zapotřebí drahého krystalu kubického nitridu boru. Výzkum povlaku probíhá již od poloviny 80. let minulého století, kdy se na Fraunhoferském institutu pro povrchové inženýrství a tenké povlaky (IST) v Braunschweigu podařilo nanést 2 µm tlustou vrstvou kubického nitridu boru na křemíkový substrát. Povlak se vykazoval dobrou dlouhodobou stálostí a přilnavostí k substrátu. Další vývoj se zaměřil především na zlepšení vlastností povlaku, zvětšení tloušťky povlaku. V sortimentu dnešních firem se nachází kubický nitrid boru výjimečně jako samostatná břitová destička. Mnohem častěji se nachází ve formě pájených destiček na jiný podklad, který není tak drahý a složitý na výrobu, například na slinutý karbid. Vlastnosti takto vyrobených břitových destiček se ještě upravují pomocí povlaků.

Depozice povlaku z kubického nitridu boru (tloušťka 5-20 µm) má velký technologický význam, ale představuje značné potíže při nanášení z plynné fáze. Tlustý povlak může být ovšem nanášen pomocí kombinování metod. Lze k tomu využít elektrostatického nástřiku (Elektrostatic spray coating – ESC) a chemické infiltrace (Chemical Vapor Infiltration – CVI).

ESC depozice zahrnuje fyzické sprejování částic. Nabíjí částice elektrickým nábojem na konci děla, které je vystřeluje od elektrického pole generovaného ostrou elektrodou. Nabité částice postupují elektrickým polem směrem k uzemněnému substrátu, kde vytváří jednotný nátěr. Nanášení nanokrystalického kubického nitridu boru se provádí pomocí jemného prášku z karbidu boru (B₄C).^{22,23}

5.2.1 Multivrstvý povlak s fází KNB

První studie E. Uhlmann a kol. se zaměřily především na multivrstvý povlak Ti-B₄C-BCN-cBN, kde mezivrstva byla tenká vrstva titanu. Tato komponenta nyní byla nahrazena z důvodu lepší přilnavosti a umožnění lepší kombinace tvrdosti a houževnatosti, 2,5 μm tlustou vrstvou TiAlN. Další vrstvou v systému byl karbid boru o tloušťce 0,4 μm , na kterou byla nanесena finální nanokrystalická vrstva kubického nitridu boru o tloušťce přibližně 2 μm (Obr. 17). Mechanické vlastnosti takto nanášeného povlaku sou velice podobné vlastnostem kubického nitridu boru.²³



Obr. 17 Multivrstvé povlaky s obsahem fáze kubického nitridu boru²³

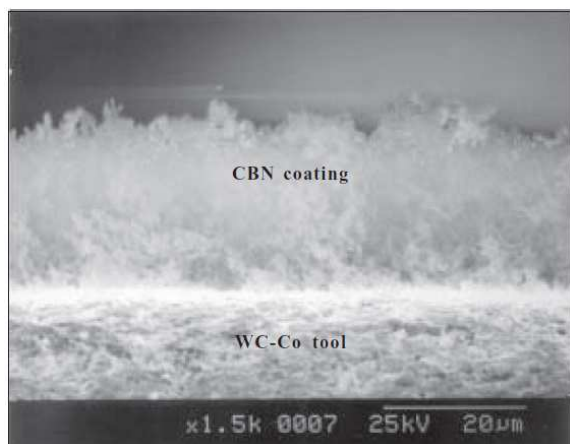
5.2.2 Kompozitní povlak KNB-TiN

Nanášení kompozitního povlaku KNB-TiN probíhá ve dvou krocích. Metoda spočívá v nanášení jemného mikrozrnného prášku kubického nitridu boru na substrát a vyplnění mezer a pórů pomocí TiN.

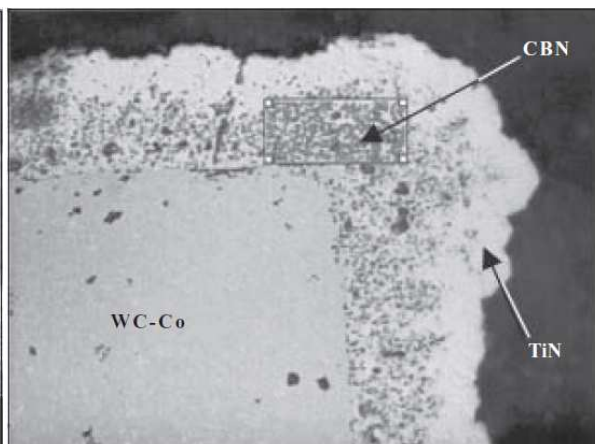
Prvním krokem je elektrostatický nástřik (ESC – Elektrostatic Spray Coating), který využívá izolačních vlastností KNB prachových částic pro přenos statického náboje na vzdálenost několika stovek milimetrů. Elektrostatický náboj je generován na částice, které jsou nabíjeny průchodem přes elektrostatické dělo, jenž je napojeno ke zdroji vysokého napětí (obvykle několik desítek kilovoltů), vzhledem k uzemněnému substrátu. Nabité částice KNB postupují elektrickým polem směrem k substrátu, kde vytvářejí povlak. Protože se prachové částice pohybují po siločarách vycházejících z celého povrchu uzemněného povrchu (substrátu), je tvorba povlaku rovnoměrná po celé jeho délce. Na vlastnosti povlaku má vliv především tlak uvnitř povlakovací komory, ale i množství prášku, velikost částic, vzdálenost mezi elektrodou děla a substrátem. Typický KNB povlak vytvořený metodou ESC je ukázán na obr. 18, který ukazuje částičky kubického nitridu boru usazené v souvislé vrstvě na povrchu nástroje. Nicméně tyto částice jsou jen volně vázány jedna k druhé a k substrátu elektrostatickou silou.

Jako druhý krok při nanášení povlaku KNB-TiN se proto využívá metody CVI (Chemical Vapor Infiltration), kterou se nanese vrstva TiN. CVI je kontrolovaný proces, který je úzce spojen s klasickou chemickou metodou (CVD). Nanášení nitridu titanu (TiN) probíhá takovým způsobem, že povlak TiN roste rovnoměrně na jednotlivých částicích KNB v celé hloubce nasprejované vrstvy pomocí ESC a zároveň na povrchu podkladu (nástroje). Výsledný kompozitní povlak je tedy složen z matrice KNB s rozprostřeným nitridem titanu, který zároveň pokrývá i celý povrch nástroje, jak je vidět na obr. 19. Toto může být užitečné pro snížení drsnosti povrchu řezného nástroje.

Vrstva TiN natolik “smáčí” částice KNB, že vyplní veškeré mezery a póry uvnitř vrstvy kubického nitridu boru. Při správné volbě slinutého karbidu (obsah kobaltu atd.) má povlak KNB-TiN vynikající adhezi k substrátu. Kontakt mezi oběma fázemi je velice důležitý k zajištění správné funkce kubického nitridu boru. Matrice TiN musí držet částice KNB na svém místě stejně jako vázat povlak k substrátu během obrábění.²²



Obr. 18 KNB povlak nanesený metodou ESC²²



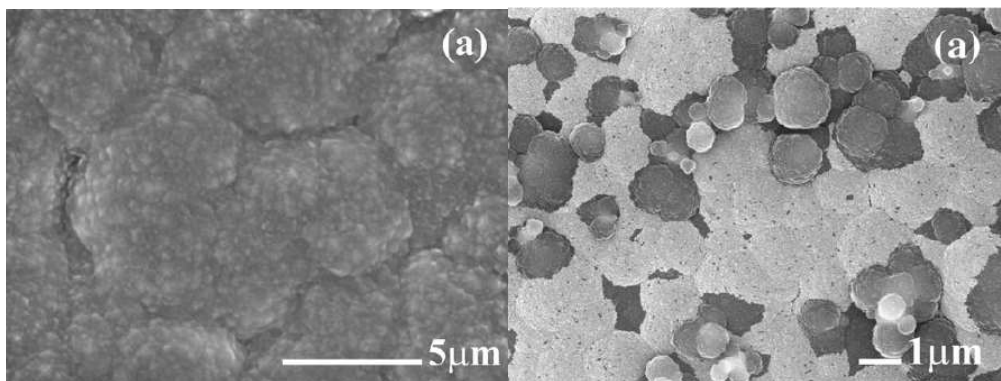
Obr. 19 Kompozitní povlak KNB-TiN na slinutém karbidu²²

5.3 Depozice nanokompozitního povlaku diamant/ β -SiC na řezný nástroj

Řezné nástroje ze slinutého karbidu jsou často používány v obrábění i neželezných materiálů. Při nanesení diamantového povlaku na tento nástroj lze výrazně zvýšit jeho trvanlivost. Povlakování pomocí klasické CVD metody je již známo mnoho let, ovšem povlaky nanášené touto metodou mají drsný povrch.

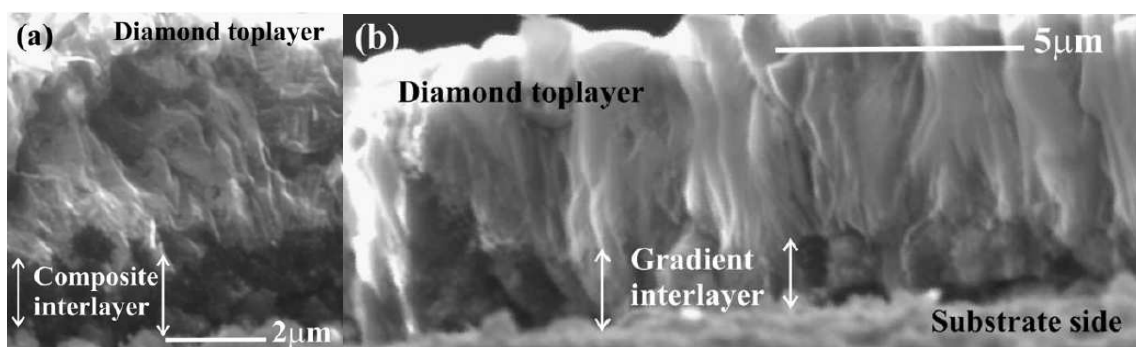
V práci Srikantha, Jianga a Kopfa byl nanokompozitní povlak diamantu/ β -SiC nanášen pomocí metody MWCVD (Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition), která využívá k povlakování plyny H_2 , CH_4 a tetramethylsilan (TMS). Povlak byl nanášen na předem očištěný substrát ze slinutého karbidu (WC -6 wt.% Co). Tlak v povlakovací komoře byl 3,5 kPa, teplota substrátu 700 °C a výkon mikrovln byl 700 W. Délka povlakování byla 6 hodin.

Výsledný povlak nanesený touto metodou byl nepřetržitý a rovnoměrně pokrýval celý povrch substrátu. Povrch odrážel různé stupně šedi, což indikovalo přítomnost kovových karbidů (WC, SiC), jejichž přítomnost byla očekávána. Vrstva diamantu výslednou barvu povrchu neovlivnila, jelikož diamant je průsvitný. Na obr. 20 lze pozorovat povrch povlaku s malými krystalky diamantu. Diamantová zrna zůstala malá díky přítomnosti TMS v plynné reakci, který nedovolil adekvátní růst těchto zrn. Na obrázku 21 lze pozorovat kontrastní fáze. Tmavé fáze tvoří β -SiC a jasné bílé fáze tvoří zrna diamantového povlaku. Z výzkumu bylo zjištěno, že při zvýšení tokového poměru TMS se zvýší i obsah β – SiC v povlaku nanášeném na slinutý karbid. Tento fakt byl úspěšně použit k nanášení vrchní diamantové vrstvy na homogenní gradientní i kompozitní povlaky. Z průřezu těmito povlaky na obr. 22 lze sledovat, že mezivrstva v obou případech je tvořena malými krystaly, zatímco horní vrstva diamantového povlaku má sloupkovitou strukturu.²⁴



Obr. 20 Morfologie povlaku²⁴

Obr. 21 Morfologie povlaku²⁴



Obr. 22 Průřez vrchní diamantovou vrstvou s kompozitní a gradientní mezivrstvou²⁴

6. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo shrnout dosavadní poznatky o metodách povlakování řezných nástrojů, výrobu tuzemských a zahraničních firem a seznámit s vývojem v povlakování řezných nástrojů.

V první části práce byly zmíněny nejběžnější metody povlakování jako jsou CVD a PVD metody, které se objevily na povlakovacím trhu nejdříve. Vývojem technologií a požadavků na řezné nástroje byly vyvinuty další modifikované povlakovací metody, jejich hlavní zástupci jsou zmíněny v podobě metod PACVD, MTCVD, naprašování, napařování a iontové implantace. Další modifikace metod jsou již pro konkrétní případy povlaků, jako je například diamantový povlak na slinutý karbid.

V sortimentu výroby jak tuzemských tak světových firem se objevují multivrstvé tenké povlaky, které jsou nanášeny převážně metodami PVD, CVD a MTCVD. Firmy nabízejí na materiály povlaků především TiN, TiCN a Al_2O_3 . Jediná česká firma zabývající se povlakováním slinutých karbidů, Pramet Tools s.r.o., nabízí široký sortiment vyměnitelných břitových destiček ve srovnání se světovými firmami. Nejbohatší nabídkou povlaků se prezentuje švédská firma Sandvik Coromant.

Vývoj povlaků směřuje ke zlevnění a zproduktivnění výroby obrobků. Jako vhodný kandidát pro tyto účely se jeví povlak z kubického nitridu boru. Význam tohoto povlaku spočívá především v možnosti obrábění železných materiálů, které tvoří převážnou většinu běžně obráběných materiálů. Společně s vývojem tohoto povlaku se zdokonalují i další povlaky. Jako zástupce tohoto vývoje jsem zvolil povlak TiN, protože je hojně využíván všemi firmami. Vývoj ovšem neustává ani v povlakování řezných nástrojů diamantem.

LITERATURA

1. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. MM publishing s.r.o., Praha, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2
2. BUNSHAH, R. F. *Handbook of deposition technologies for films and coatings*. Translated by AN. 2nd ed. New Jersey, USA: Noyes Publications, 1994. 863 p. ISBN 0-8155-1337-2.
3. JONG-HEE, P. *Chemical Vapor Deposition*. Translated by AN. USA: ASM International, 2001. 433 p. ISBN 0-87170-731-4.
4. ENGINEERSHANDBOOK.COM. *Chemical vapor deposition (CVD)* [online]. [vid. 2011-03-29]. Dostupné z: <http://www.engineershandbook.com/MfgMethods/cvd.htm>.
5. TAEGUTEC, Plzeň. *Příručka obrábění*. [online]. [vid. 2011-03-06]. Dostupné z: www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrabeni_331.pdf.
6. DEUERLER, Friederike; WOEHLER, Nicolas ; BUCK, Volker. Characterisation of nanostructured diamond coatings on various hard metal surfaces. *Refractory metals and hard metals*. 24, 2006, pp. 392-398.
7. RICHTER PRECISION.INC. *PVD Coatings – Physical Vapor Deposition*. [online]. [vid. 2011-03-10]. Dostupné z: <http://www.richterprecision.com/pvd-coatings.html>.
8. HUMÁR, A., DANG, V. H. Trendy v povlakování slinutých karbidů. *MM průmyslové spektrum*. 2001, č. 7. s. 43-45. ISSN 1212-2572.
9. OERLIKON BALZERS COATING AUSTRIA GmbH - organizační složka Jihlava. *Arc Evaporation*. [online]. [vid. 2011-03-14]. Arc Evaporation. Dostupné z: <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bcz/cze/01-products-services/03-coating-technology/05-arc-evaporation/indexW3DnavidW261.php>.
10. MATTOX, Donald M. *Vacuum Deposition Processes*. [online]. [vid. 2011-03-14]. Dostupné z: <http://www.pfonline.com/articles/vacuum-deposition-processes>.
11. OERLIKON BALZERS COATING AUSTRIA GmbH - organizační složka Jihlava. [online]. [vid. 2011-03-29]. *Sputtern*. Dostupné z: <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bcz/cze/01-products-services/03-coating-technology/03-sputtering/indexW3DnavidW261.php>.
12. BISHOP, Charles A. *Vacuum deposition onto webs, films, and foils*. USA: William Andrew Publishing, 2006. ISBN 0-8155-1535-9.
13. [HTTP://WWW.PVD-COATINGS.CO.UK](http://WWW.PVD-COATINGS.CO.UK). *Unbalanced magnetron*. [online]. [vid. 2011-03-20]. Dostupné z: <http://www.pvd-coatings.co.uk/theory/how-are-pvd-coatings-deposited/unbalanced-magnetron/>.
14. OERLIKON BALZERS COATING AUSTRIA GmbH - organizační složka Jihlava. *PACVD*. [online]. [vid. 2011-03-21]. Dostupné z: <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bcz/cze/01-products-services/03-coating-technology/07-pacvd/indexW3DnavidW261.php>.
15. HOŘEJŠ, S. Povlakování nástrojů metodou PACVD. *MM průmyslové spektrum*. 2008, č. 4. s.60-61. ISSN 1212-2572.
16. MITTERER, C., et al. Industrial applications of PACVD hard coatings. *Surface and coatings technology*. 163-164, 2003, pp. 716-722. ISSN 0257-8972.
18. MATTOX, Donald M. Ion plating - past, present and future. *Surface and coatings technology*. 133-134, (2000), pp. 517-521. ISSN 0257-8972.
19. KONYASHIN, I. Yu. PVD/CVD technology for coating cemented carbides. *Surface and coatings technology*. 71, (1995), pp. 277-283. ISSN 0257-8972.
20. KEUNECKE, M., et al. Modified TiAlN coatings prepared by d.c. pulsed magnetron sputtering. *Surface and coatings technology*. 205, 2010, pp. 277-283. ISSN 0257-8972.

21. OERLIKON BALZERS COATING AUSTRIA GmbH - organizační složka Jihlava. *Ion Plating* [online]. [vid. 2011-03-225]. Dostupné z:
<http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bcz/cze/01-products-services/03-coating-technology/06-ionplating/indexW3DnavidW261.php>.
22. SHARAD N, Yedave, et al. Novel Composite CBN-TiN Coating: Synthesis and Performance Analysis. *Journal of Manufacturing Processes*. 5, 2003, pp.154-162. ISSN 1526-6125.
23. UHLMANN, E. et al. Machining of high performance workpiece materials with CBN coated cutting tools. *Thin Solid Films*. 518, 2009, pp. 1451-1454. ISSN 0040-6090.
24. SRIKANTH, Vadali, JIANG, Xin, KOPF, Arno. Deposition of diamond/ β -SiC nanocomposite films onto a cutting tool material. *Surface and Coatings Technology*. 204, 2010, pp. 2362-2367. ISSN 0257-8972.
25. KENNAMETAL INC. *Soustružení*. [online]. [vid. 23.4.2011]. Dostupné z:
http://www.widia.com/images/widia/pdfs/CS_A-09-02079CS_Widia_Turning.pdf.
26. SANDVIK COROMANT. *Hlavní katalog*. [online]. [vid. 23.4.2011]. Dostupné z:
http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/catalogue/CZE/MC_2009_Klick_CZE_A.pdf.
27. ISCAR. *New products catalog*. [online]. [vid. 23.4.2011]. Dostupné z:
<http://www.iscar.com/Catalogs/Catalogs.asp/CountryID/1/MenuItemID/329/Catalogat/573>.
28. PRAMET TOOLS, s.r.o. *Soustružení 2010*. [online]. [vid. 23.4.2011]. Dostupné z:
<http://www.pramet.com/indexc1b6.html>.
29. PRAMET TOOLS, s.r.o. *Frézování 2010*. [online]. [vid. 23.4.2011]. Dostupné z:
<http://www.pramet.com/indexc1b6.html>.
30. KENNAMETAL INC. *Turning*. [online]. [vid. 23.4.2011]. Dostupné z:
http://www.widia.com/widia/en/widia_downloads/Widia_turning_2010_lang.jhtml.
31. SANDVIK COROMANT. *Our history*. [online]. [vid. 23.4.2011]. Dostupné z:
<http://www.sandvik.coromant.com/cz>.
32. ISCAR. *Headquarters*. [online]. [vid. 23.4.2011]. Dostupné z:
<http://iscar.cz/Section.asp/CountryID/6/SectionID/784/SectionFatherID/143>.
33. PRAMET TOOLS, s.r.o. *Historie a dnes*. [online]. [vid. 23.4.2011]. Dostupné z:
<http://www.pramet.com/indexad49.html?menu=firma1>.
34. TYROLINE, s.r.o. *Widia*. [online]. [vid. 25.4.2011]. Dostupné z:
<http://www.tyroline.cz/widia>.
35. SOVA, F. *Technologie obrábění a montáže*. ZČU, Plzeň, 1998.
36. SPRIGGS, Geoffrey E. *A history of fine grained hardmetal*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 13, (1995), pp. 241-255. ISSN 0263-4368
37. DVOŘÁK, R. Globalizační trumfy. *MM průmyslové spektrum*. 2006, č. 12, s 16-18. ISSN 1212-2572.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

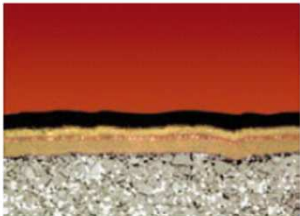
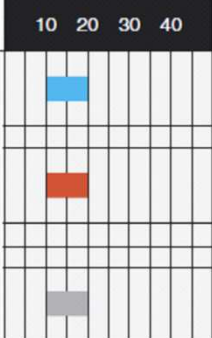
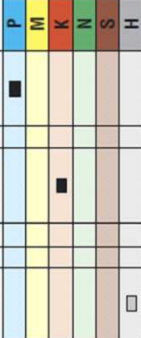
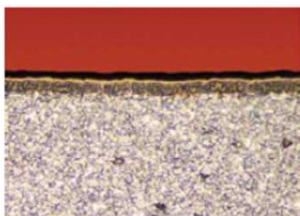
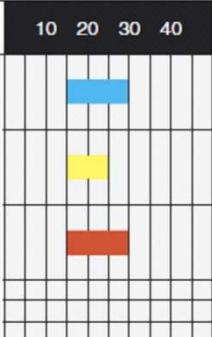
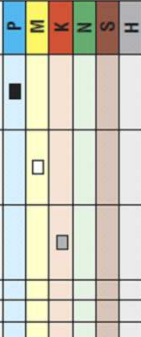
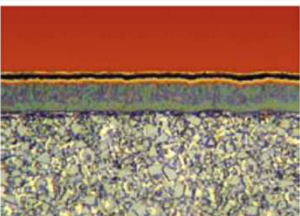
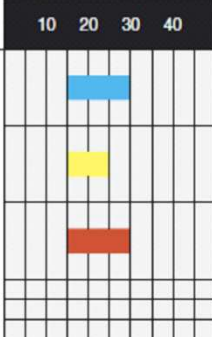
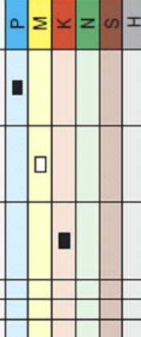
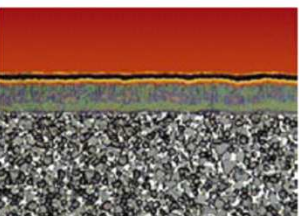
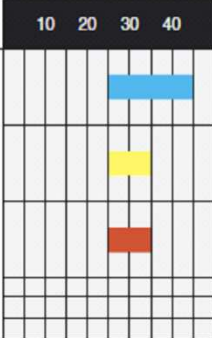
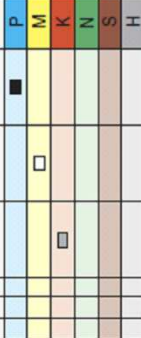
PKD	polykrystalický diamant
KNB	kubický nitrid bóru
CVD	chemický proces povlakování
PVD	fyzikální proces povlakování
PACVD	chemický proces povlakování s pomocí plazmy
MTCVD	chemický proces povlakování za středních teplot
ESC	povlakování za pomocí elektrostatického nástřiku
CVI	chemický proces povlakování
TMS	tetramethylsilan

SEZNAM PŘÍLOH

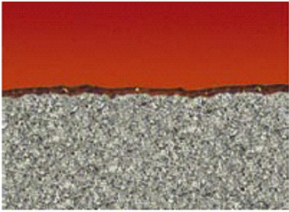
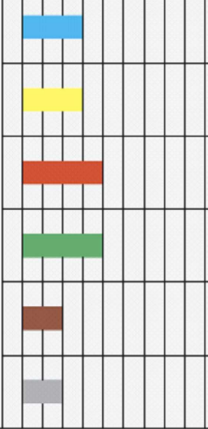
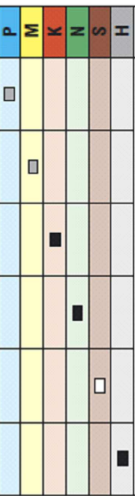
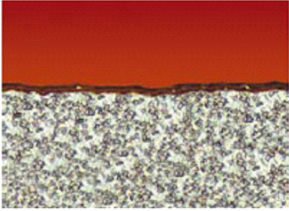
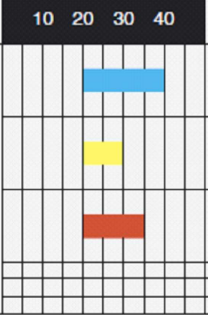
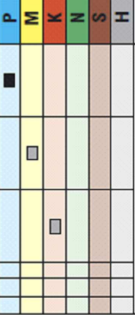
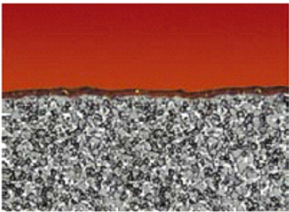
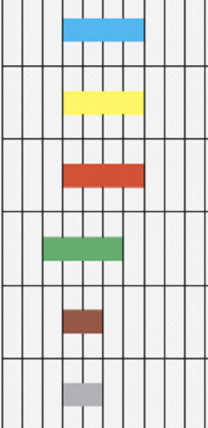
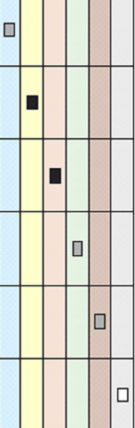
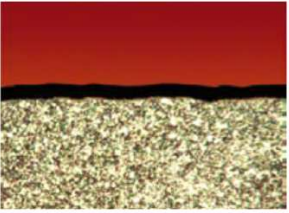
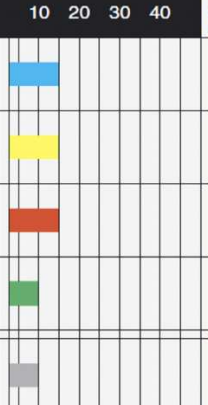
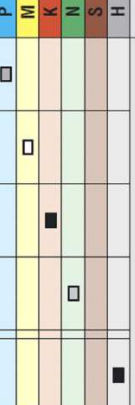
- Příloha č. 1 Povlakované slinuté karbidy Pramet Tools pro frézování
Příloha č. 2 Povlakované slinuté karbidy Pramet Tools pro soustružení

Příloha č. 1

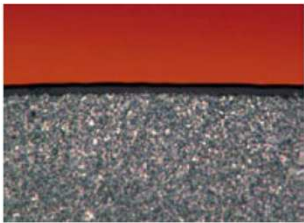
Povlakované slinuté karbidy Pramet Tools pro frézování

Označení materiálu a mikrostruktura	Aplikační oblasti	Skupina obráběných materiálů	Popis materiálu a doporučené užití
2215	10 20 30 40	P M K N S H	
			- substrát typu H s nízkým obsahem kobaltu - tenký povlak nanesený metodou MTCVD - obrábění materiálů skupin P a K dále H - určen zejména pro VBD s úhlem břitu blízkým 90° - střední až vyšší průřezy třísek - vysoké řezné rychlosti - vyšší a střední průřezy třísek - suché obrábění
2230	10 20 30 40	P M K N S H	
			- substrát typu H s vyšším obsahem kobaltu - tenký povlak nanesený metodou MTCVD - obrábění materiálů skupin P a K a podmíněně aplikovatelný i pro skupinu M - střední až vyšší průřezy třísek - střední řezné rychlosti - vyšší a střední průřezy třísek - suché obrábění
5026	10 20 30 40	P M K N S H	
			- substrát bez kubických karbidů (typ H) - tenký povlak nanesený metodou MTCVD - obrábění materiálů skupin P a K podmíněně aplikovatelný i pro skupiny M a H - určen zejména pro VBD s úhlem břitu blízkým 90° - střední až vyšší průřezy třísek - vysoké řezné rychlosti (bez možnosti aplikace řezných kapalin) - pro dobré záběrové podmínky
5040	10 20 30 40	P M K N S H	
			- substrát s kubickými karbidy (typ S) - tenký povlak nanesený metodou MTCVD - obrábění materiálů skupin P dále K a podmíněně aplikovatelný i pro skupinu M - určen pro kopírovací frézování - střední průřezy třísek - nižší až střední řezné rychlosti - méně příznivé záběrové podmínky

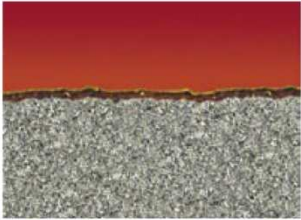
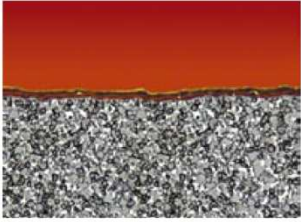
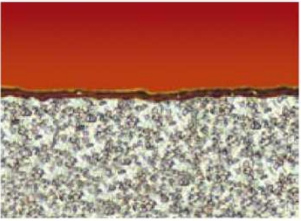
Příloha č.1 - pokračování

7010	10 20 30 40	P M K N S H	
			- jemnozrnný substrát bez kubických karbidů (typ H) - s velmi nízkým obsahem kobaltu - multivrstevnatý nanostrukturní povlak s vysokým obsahem Al nanosený metodou PVD - pro operace charakterizované vysokou tepelnou zátěží - z hlediska obráběných materiálů velmi univerzální (využitelný pro všechny skupiny) - malé až střední průřezy třísek - vysoké řezné rychlosti - stabilní záběrové podmínky
7025	10 20 30 40	P M K N S H	
			- substrát s vysokým obsahem kubických karbidů (typ S) - multivrstevnatý nanostrukturní povlak s vysokým obsahem Al nanosený metodou PVD - obrábění materiálů skupin P dále M a podmíněně aplikovatelný i pro skupinu K - střední a vyšší posuvy - střední až vysoké řezné rychlosti - stabilní záběrové podmínky
7040	10 20 30 40	P M K N S H	
			- substrát bez kubických karbidů (typ H) - multivrstevnatý nanostrukturní povlak s vysokým obsahem Al nanosený metodou PVD - kombinuje dobrou otěruvzdornost spolu s dobrou provozní spolehlivostí - z hlediska obráběných materiálů velmi univerzální (využitelný pro všechny skupiny) - střední řezné rychlosti - horší záběrové podmínky
7205	10 20 30 40	P M K N S H	
			- ultrasubmikronový substrát bez kubických karbidů (typH) - s velmi nízkým obsahem kobaltu - vysoká tvrdost při zachování ohybové pevnosti - velmi dobrá odolnost proti mechanickému opotřebení - PVD povlak nového typu se zvýšenou odolností proti oxidaci a unikátními kluznými vlastnostmi - vysoké rychlosti a nižší až střední průřezy třísek - stabilní záběrové podmínky - prakticky použitelný pro všechny skupiny obráběných materiálů s výjimkou superslitin (skupiny S)

Příloha č.1 - pokračování

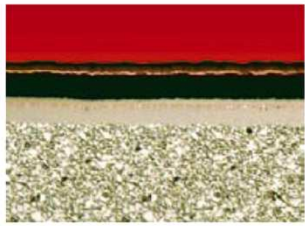
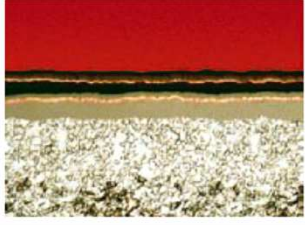
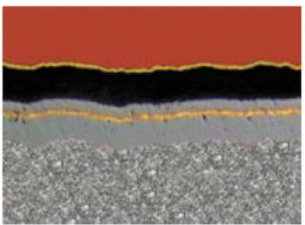
7215		10	20	30	40	P	M	K	N	S	H	
												- submikronový substrát bez kubických karbidů (typ H) s nízkým obsahem kobaltu - nový gradientní povlak nanesený metodou PVD - střední a vyšší řezné rychlosti a malé až střední průřezy třísek - zvýšená odolnost vůči oxidaci - unikátní kluzné vlastnosti - stabilní záběrové podmínky - prakticky použitelný pro všechny skupiny obráběných materiálů
												- submikronový substrát bez kubických karbidů (typ H) s vyšším obsahem kobaltu - nový gradientní povlak nanesený metodou PVD se zvýšenou odolností vůči oxidaci - unikátní kluzné vlastnosti - střední řezné rychlosti a nižší a střední průřezy třísek - horší záběrové podmínky - prakticky použitelný pro všechny skupiny obráběných materiálů

Příloha č.1 - pokračování

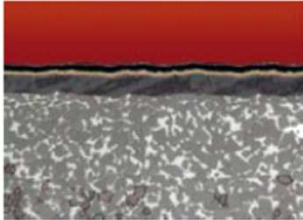
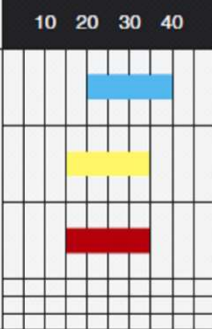
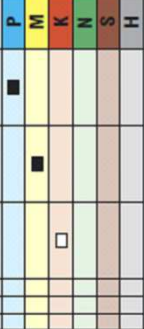
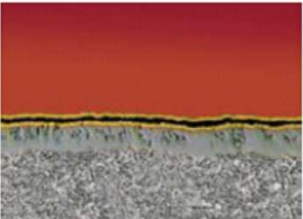
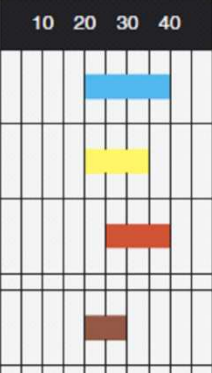
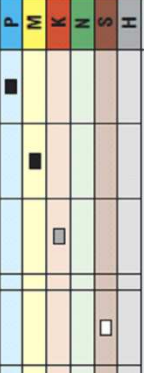
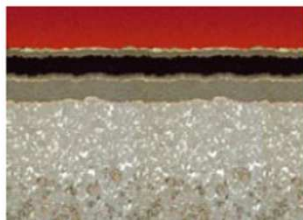
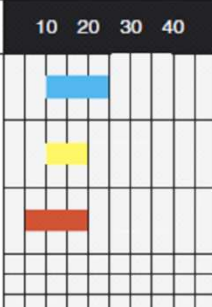
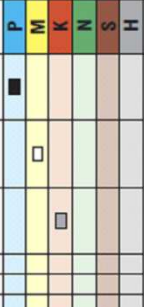
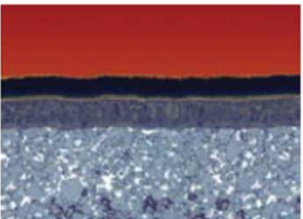
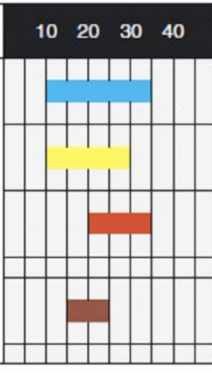
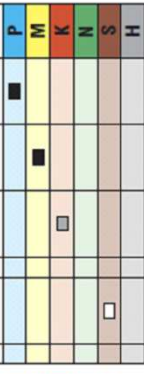
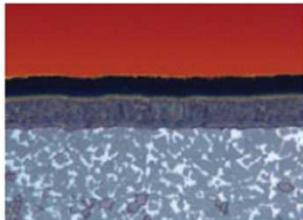
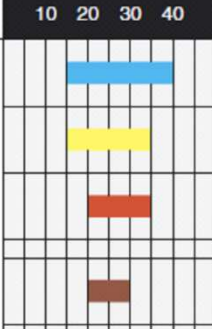
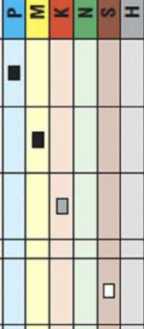
8016		10	20	30	40	P	M	K	N	S	H	
												- nejotěruvzdornější člen řady 8000 - submikronový substrát bez kubických karbidů (typ H) - s nízkým obsahem kobaltu - nanostrukturní povlak nanesený metodou PVD - pro operace charakterizované vysokou tepelnou zátěží - z hlediska obráběných materiálů velmi univerzální (využitelný pro všechny skupiny) - malé až střední průřezy třísek - vysoké řezné rychlosti - stabilní záběrové podmínky
8026		10	20	30	40	P	M	K	N	S	H	
												- substrát bez kubických karbidů (typ H) - nanostrukturní povlak nanesený metodou PVD - kombinuje dobrou otěruvzdornost spolu s dobrou provozní spolehlivostí - z hlediska obráběných materiálů velmi univerzální (využitelný pro všechny skupiny) - střední řezné rychlosti - horší záběrové podmínky
8026T		10	20	30	40	P	M	K	N	S	H	
												- substrát s vysokým obsahem kubických karbidů (typ S) - nanostrukturní povlak nanesený metodou PVD - obrábění materiálů skupin P dále M a podmíněně aplikovatelný i pro skupinu K - střední a vyšší posuvy - střední až vysoké řezné rychlosti - stabilní záběrové podmínky

Příloha č. 2

Povlakované slinuté karbidy Pramet Tools pro soustružení

Mikrostruktura	Aplikační oblasti				Skupina obráběných materiálů						Doporučené použití
6605	10	20	30	40	P	M	K	N	S	H	popis materiálu
											- nejotěruvzdornější materiál řady 6000 - substrát typu H - unikátní duální povlak nanesený kombinací metod MTCVD a PVD s nosnou vrstvou Al₂O₃ - obrábění materiálů skupin K dále P a H - určen pro dokončovací až hrubovací soustružení kontinuálním řezem - vysoké řezné rychlosti (suché obrábění) - příznivé záběrové podmínky
6615	10	20	30	40	P	M	K	N	S	H	popis materiálu
											- funkčně gradientní substrát s relativně nízkým obsahem kobaltu - unikátní duální povlak nanesený kombinací metod MTCVD a PVD s nosnou vrstvou TiCN - dokončovací až hrubovací soustružení - obrábění materiálů skupin P dále K a podmíněně aplikovatelný i pro skupinu M - vyšší řezné rychlosti - kontinuální a podmíněně i mírně přerušovaný řez
6620	10	20	30	40	P	M	K	N	S	H	popis materiálu
											- substrát bez kubických karbidů (typ H) - silný povlak s nosnou vrstvou Al₂O₃ nanesený metodou MTCVD - dokončovací až hrubovací soustružení - zejména pro materiály skupiny K dále použitelný i pro skupiny P a H - střední a vyšší řezné rychlosti - kontinuální řez za dobrých záběrových podmínek
6630	10	20	30	40	P	M	K	N	S	H	popis materiálu
											- nejuniverzálnější materiál řady 6000 - funkčně gradientní substrát - střední povlak s nosnou vrstvou TiCN nanesený metodou MTCVD - dokončovací až hrubovací soustružení - obrábění materiálů skupin P, M dále K a podmíněně aplikovatelný i pro sk. S - střední a podmíněně vyšší řezné rychlosti - kontinuální i přerušovaný řez

Příloha č.2 - pokračování

6635	10 20 30 40	P M K N S H	popis materiálu
			- funkčně gradientní substrát s relativně vysokým obsahem kobaltu - tenký povlak MTCVD - střední a hlavně vyšší průřezy třísek - pro obrábění materiálů skupin P a M a podmíněně i K - nižší až střední řezné rychlosti - nepříznivé záběrové podmínky a přerušovaný řez
6640	10 20 30 40	P M K N S H	popis materiálu
			- substrát bez kubických karbidů (typ H) - tenký povlak s nosnou vrstvou TiCN nanesený metodou MTCVD - zejména polohrubovací a hrubovací soustružení - zejména pro materiály skupiny P a M, dále použitelný i pro skupinu K a podmíněně i S - nižší až střední řezné rychlosti - přerušovaný řez a nepříznivé záběrové podmínky
9210	10 20 30 40	P M K N S H	popis materiálu
			- nejotěruvdomější materiál řady 92XX - funkčně gradientní substrát s relativně nízkým obsahem kobaltu - silný povlak s nosnou vrstvou Al_2O_3 nanesený metodou MTCVD - speciální úprava po povlaku - dokončovací až hrubovací soustružení - obrábění materiálů skupin P dále K a podmíněně aplikovatelný i pro sk. M - vyšší řezné rychlosti - kontinuální a podmíněně i mírně přerušovaný řez
9230	10 20 30 40	P M K N S H	popis materiálu
			- nejuniverzálnější materiál nové generace - řady 9000 - funkčně gradientní substrát - moderní středně silný speciální MTCVD povlak - speciální úprava po povlaku - dokončovací až hrubovací soustružení - obrábění materiálů skupin P, M dále K a podmíněně aplikovatelný i pro skupinu S - střední a vyšší řezné rychlosti - kontinuální i přerušovaný řez
9235	10 20 30 40	P M K N S H	popis materiálu
			- funkčně gradientní substrát s relativně vysokým obsahem kobaltu - středně silný speciální MTCVD povlak - speciální úprava po povlaku - hrubovací až dokončovací soustružení - obrábění materiálů skupin P, M dále K a podmíněně aplikovatelný i pro skupinu S - střední řezné rychlosti - nepříznivé záběrové podmínky, přerušovaný i kontinuální řez

Příloha č.2 - pokračování

[illegible]