

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY

COATED CEMENTED CARBIDES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MICHAL FOLTÝN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc.

BRNO 2008

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na povlakované slinuté karbidy, metody povlakování, materiály a vlastnosti povlaků. V první části práce je uvedeno základní rozdělení nástrojových materiálů. Nejtvrdší nástrojový materiál je polykrystalický diamant, který je vhodný zejména pro obrábění keramických materiálů a neželezných kovů. Druhá část práce je zaměřena na metody depozice povlaků, vlastnosti povlaků a metody jejich zkoušení. Povlaky mohou být vytvářeny dvěma odlišnými depozičními metodami, metodou CVD a PVD. Výhodou metody PVD jsou nízké depoziční teploty. Výhodou metody CVD je vynikající schopnost adheze povlaku k substrátu. Poslední část práce je věnována nabídkám výrobců povlakovaných slinutých karbidů. Ukazuje se, že je výhodné vytvářet povlaky kombinací obou depozičních metod, kdy je např. metodou CVD vytvořena tvrdá, otěruvzdorná vrstva a metodou PVD tenká, lubrikační vrstva, snižující tření a opotřebení.

Klíčová slova

Povlak, slinutý karbid, substrát, depozice.

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focused on coated cemented carbides, methods for coatings, materials and properties of coatings. In the first part of this thesis there is mentioned basic subdivision of cutting materials. The hardest cutting material is polycrystalline diamond, which is especially suitable for machining ceramic materials and non-ferrous metal. Second part of this thesis is focused on the coating deposition methods, properties of coatings and testing methods. Coatings are created by two different methods, by the method CVD and PVD. The advantage of the PVD method is low deposition temperature. The advantage of the method CVD is excellent ability of adhesion between coating and substrate. The last part of this thesis is focused on the offer of certain producers of coated cemented carbides. Now is evidence that there are advantage to create coating by the combination of both depositing methods, for example by the method CVD is created hard, wear resistance coating and by the method PVD thin lubricating layer, reducing friction and wearing.

Key words

Coating, cemented carbide, substrate, deposition.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FOLTÝN, M. *Povlakované slinuté karbidy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.

Prohlášení

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

Datum

.....
Jméno a příjmení bakaláře

Poděkování

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

OBSAH

Abstrakt.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah	6
Úvod	7
1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLŮ	8
2 METODY POVLAKOVÁNÍ SLINUTÝCH KARBIDŮ.....	10
2.1 Metoda CVD.....	10
2.2 Metoda PVD	14
2.2.1 Naprašování	15
2.2.2 Napařování.....	18
2.2.3 Iontová implantace	20
2.2.4 Povlaky vytvářené metodou PVD	21
2.2.4.1 Jednovrstvé povlaky	21
2.2.4.2 Strukturované povlaky.....	23
2.2.4.3 Kluzné povlaky	24
3 PŘEDDEPOZIČNÍ PŘÍPRAVY	25
3.1 Úprava ostří.....	25
3.2 Chemické čištění substrátu	26
3.3 Iontové čištění substrátu.....	26
3.4 Stripping	27
4 VLASTNOSTI POVLAKOVANÝCH SLINUTÝCH KARBIDŮ	28
5 ZKOUŠENÍ VLASTNOSTÍ POVLAKŮ	30
6 POVLAKOVANÉ SK V NABÍDKÁCH VYBRANÝCH VÝROBCŮ	34
6.1 Pramet.....	34
6.1.1 Materiály s povlaky MTCVD	34
6.1.2 Materiály s povlaky PVD	35
6.1.3 Materiály s duálními povlaky	36
6.2 Ceratizit	37
6.2.1 Materiály s povlaky CVD	37
6.2.2 Materiály s povlaky PVD	38
6.3 Sandvik Coromant.....	39
6.3.1 Materiály s povlaky CVD	39
6.3.2 Materiály s povlaky PVD	40
Závěr.....	42
Seznam použitých zdrojů	43
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	45

Úvod

Žijeme v době, kdy strojírenský průmysl zažívá rychlý technologický rozvoj, jak v oblasti vývoje nových obráběcích strojů, tak zejména v oblasti vývoje výkonných řezných nástrojů, které jsou v současnosti až na výjimky, opatřovány speciálními povlaky.

Mnohaletý výzkum v oblasti problematiky povlakování umožnil výrazné kvalitativní zlepšení vlastností povlaků a rozšířil oblast jejich použití. Pozornost byla věnována zejména novým metodám povlakování a novým typům povlaků. V případě povlakovaných slinutých karbidů (SK) došlo během vývoje k výraznému zlepšení jejich užitných vlastností. Moderní povlaky mohou až několikanásobně prodloužit trvanlivost nástroje a umožňují pracovat s vyššími řeznými a posuvovými rychlostmi při zachování požadované jakosti obroběného povrchu. U některých typů povlakovaných SK je možné z procesu obrábění vyřadit použití procesních kapalin a uspořit tak nemalé finanční prostředky.

Různé typy povlakovaných SK jsou určeny pro různá nasazení. Jednotlivé materiály se liší druhem povlaku, kombinací vrstev, tloušťkou povlaku, metodou povlakování a vlastnostmi substrátu. Moderní povlakované SK již obvykle nemají povlaky tvořené pouze jedinou vrstvou, ale bývají tvořeny složitými mnohovrstevnými strukturami.

V rámci snižování nákladů na výrobu se v poslední době věnuje stále větší pozornost možnostem obnovení řezivosti opotřebovaných nástrojů opatřených povlaky. Vznikají specializované firmy, které jsou schopny pomocí různých postupů a technologií odstranit z opotřebovaného nástroje starý povlak, znovu nástroj přebrousit a nově napovlakovat.

1 Základní rozdělení nástrojových materiálů

Nástrojové materiály mohou tvořit buď pouze samotnou řeznou část nástroje nebo přímo celý nástroj. Mezi základní požadavky na každý nástrojový materiál patří zejména jeho tvrdost, houževnatost, pevnost v ohybu a odolnost proti otěru. Tyto základní vlastnosti musí být zachovány při vysokých teplotách po dostatečně dlouhou dobu. Souhrnem těchto vlastností je tzv. řezivost. Řezivost je hodnocena obvykle podle řezných rychlostí, při kterých si ještě nástroje zachovávají dostatečnou tvrdost.

Nástrojové oceli (NO) - Jsou nejstarším nástrojovým materiálem, který ale stále nachází řadu uplatnění. Rozlišujeme NO uhlíkové a slitinové. Mezi slitinové řadíme NO nízkolegované a vysokolegované (rychlořezné). Postupným vývojem nástrojových ocelí slitinových a to zejména nástrojových ocelí rychlořezných, ztratily dnes uhlíkové nástrojové oceli značně na významu. Dříve byly jedinými oceli pro výrobu nástrojů. I přes nižší řezné rychlosti mají NO široké spektrum využitelnosti. Jejich výhodou je dobrá houževnatost a nižší pořizovací cena. Nevýhodou je nízká otěruvzdornost a nižší tepelná stabilita.

Slinuté karbidy (SK) - Patří do skupiny velmi tvrdých materiálů odolných proti opotřebení. Jsou vyráběny práškovou metalurgií z karbidů kovů s vysokou teplotou tavení a vhodného pojiva. Jako základní materiál jsou nejčastěji používány karbidy wolframu a titanu (WC, TiC). Jako pojivo se nejčastěji používá kobalt (Co). Poměrové množství jednotlivých složek zásadně měrou ovlivňuje tvrdost, houževnatost a odolnost proti otěru. SK se nejčastěji používají pro výrobu vyměnitelných břitových destiček, které se mechanicky upínají do příslušných držáků. Některé nástroje menších rozměrů mohou být přímo vyrobeny jako monolitní, tj. vyrobeny celé z jednoho druhu SK. SK jsou vhodné pro obrábění vysokými posuvovými rychlostmi i pro přerušované řezy. Z důvodu jejich nižší termochemické stability nejsou vhodné pro obrábění vysokými řeznými rychlostmi.

Povlakované slinuté karbidy - Jsou to SK opatřené tvrdým, termochemicky stabilním povlakem. Povlaky jsou tvořeny oxidy, nitridy, karbidy, případně jejich kombinací. Jako materiál povlaků se někdy používá i polykrystalický diamant. Povlaky neobsahují žádné pojivo, proto mají výrazně vyšší tvrdost než podkladový materiál. Povlaky jsou tvořeny jemnozrnnou strukturou a obsahují velmi malé množství strukturních vad. Často se používají multivrstvé povlaky, u kterých se kombinují různé typy vrstev za účelem co nejlepších užitečných vlastností. Povlaky jsou zároveň bariérou proti difúznímu opotřebení nástroje. Moderní povlaky také výrazně zlepšují řezivost a prodlužují trvanlivost. Povlakované SK mají široké spektrum využití. Jsou používány pro obrábění vysokými posuvovými a řeznými rychlostmi a hlubokým úběrem. Některé typy se také hodí pro náročné obrábění s přerušovaným řezem.



Obr. 1.1 Povlakované břitové destičky GC2025 Sandvik Coromant ²³

Cermety - Jsou řezné materiály vyráběné práškovou metalurgií. Používají se zejména pro výrobu vyměnitelných břitových destiček. Obsahují tvrdé částice v kovovém pojivu. Vzhledem ke složení tohoto nástrojového materiálu by měly cermety vykazovat výhodnou kombinaci tvrdosti keramiky a houževnatosti kovu. Ve skutečnosti však houževnatost není příliš vysoká. Z důvodu nižší houževnatosti jsou cermety používány pouze pro střední a lehké dokončovací operace. Mohou pracovat při vyšších posuvových rychlostech než keramika a při řezných rychlostech odpovídající povlakovaným SK. Často se používají pro obrábění korozivzdorných ocelí.

Řezná keramika - Je nástrojový materiál, který vykazuje vysokou tvrdost za tepla, vysokou termochemickou stabilitou a nízkou tepelnou vodivost. Řezná keramika je používána pro výrobu vyměnitelných břitových destiček, které jsou mechanicky upínané v tělese nástroje. Pro výrobu řezných nástrojů se používá řezná keramika na bázi Al_2O_3 nebo Si_3N_4 , popřípadě kombinací obou. Keramika na bázi Si_3N_4 má vyšší houževnatost a může pracovat při vyšší posuvové rychlosti než keramika Al_2O_3 . Její užití je však omezeno na obrábění šedé litiny, neboť při obrábění oceli nebo tvárné litiny vykazuje rychlé opotřebení.¹⁰

Polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB) - Má velmi vysokou tvrdost, která se blíží tvrdosti diamantu. Kromě vysoké tvrdosti tento řezný materiál nabízí také vynikající odolnost proti opotřebení. Nevýhodou PKNB je jeho vysoká cena. Z ekonomických důvodů se proto obvykle nevyrábí celé břitové destičky, ale pouze malé segmenty, které se připájí na špičku břitové destičky ze SK. PKNB se nejčastěji používá pro obrábění superslitin a kalených ocelí.

Polykrystalický diamant (PKD) - Je nejtvrdší známý materiál, který vyniká také velmi vysokou odolností proti opotřebení. Materiál je tvořen jemnými krystaly diamantu, spojenými za vysokých teplot a tlaků vhodným pojivem. Vzhledem k vysoké ceně, se podobně jako u PKNB, vyrábějí pouze malé řezné segmenty, které se připájí na špičku břitové destičky ze slinutého karbidu. PKD není vhodný pro obrábění materiálů s vysokou afinitou k uhlíku.⁴ Proto se používá k obrábění keramických, nekovových materiálů a k vysokorychlostnímu obrábění barevných kovů a jejich slitin.

2 Metody povlakování slinutých karbidů

Povlaky pro řezné nástroje, byly vyvinuty zejména za účelem prodloužení trvanlivosti a zlepšení řezivosti bříty. S postupným zdokonalováním slinutých karbidů také rychle vznikají nové typy povlaků a nové technologie jejich depozice. Souhrnně můžeme jednotlivé technologie povlakování rozdělit do dvou základních skupin:

První způsob vytváření povlaků je metoda PVD (Physical Vapour Deposition). Metoda je založena na fyzikálních principech, napařování nebo naprášování pevných materiálů na povrch substrátů při teplotách nižších než 500 °C.¹⁰ Metoda byla původně vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí, kde je nižší depoziční teplota důležitá proto, aby nedošlo k nežádoucímu tepelnému ovlivnění nástroje. V současnosti se metoda PVD velmi rychle rozvíjí a nachází stále větší uplatnění i v oblasti slinutých karbidů.

Druhým způsobem depozice tenkých vrstev je metoda CVD (Chemical Vapour Deposition). K vytváření povlaků dochází chemickým napařováním z chemicky reaktivních plynů, jako jsou např. TiCl_3 , AlCl_3 , CH_4 apod., při teplotách až 1500 °C.¹¹ Tato metoda je hlavním způsobem povlakování slinutých karbidů. Pro jiné materiály je její použití omezeno vysokými teplotami při procesu depozice, které negativně ovlivňují mechanické vlastnosti povlakovaných substrátů. Metoda CVD může být realizována v různých variantách, kde jsou plynné složky aktivované buď klasicky tepelně, pomocí laseru, elektronového paprsku či plazmy.¹⁰

2.1 METODA CVD

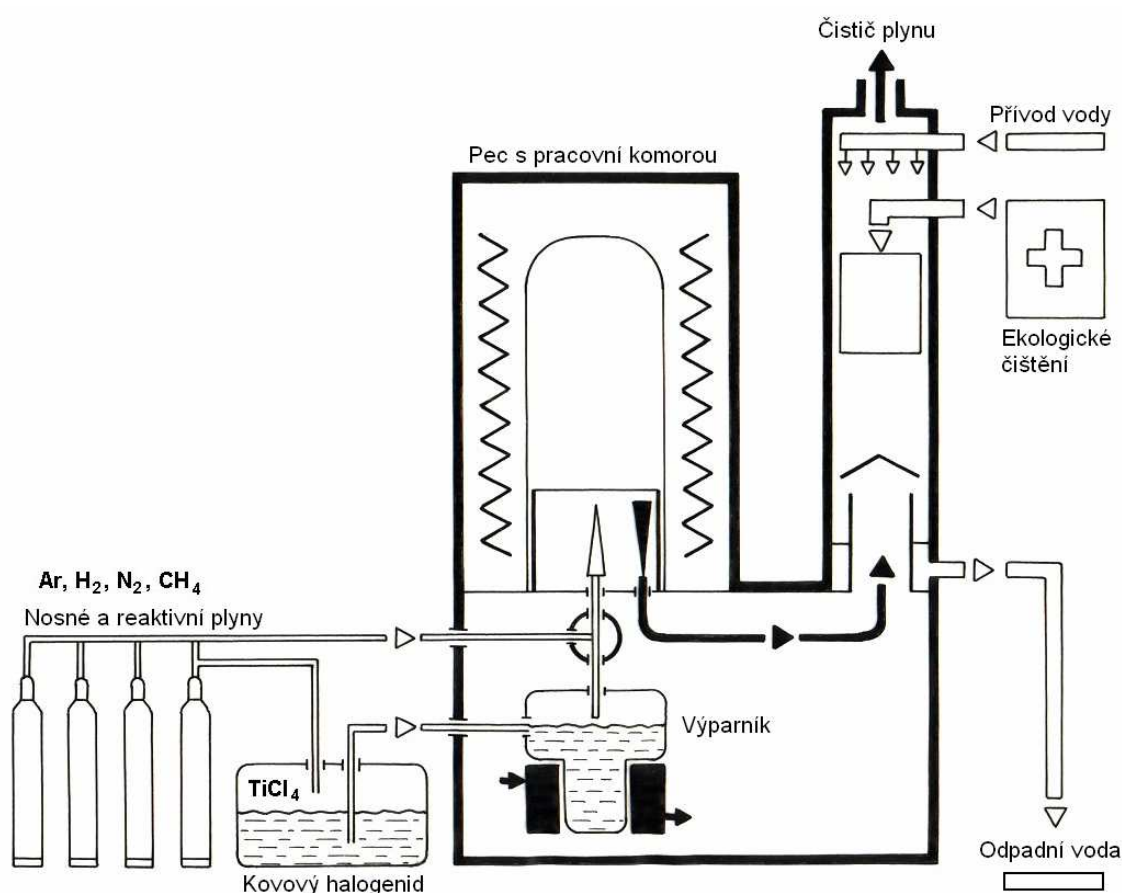
Depoziční proces probíhá za vysokých teplot, nejčastěji při teplotách 700÷1100 °C a tlaků plynné atmosféry 1÷100 kPa.¹¹

Tenká vrstva se na povrchu substrátu vytváří v důsledku chemických procesů probíhajících v objemu plazmatu a přímo na rozhraní mezi plazmatem a povrchem substrátu. Její tloušťka může být až 13 μm. Reakční složky jsou přiváděny v plynné fázi, které se za vysokých teplot rozkládají. Vrstva vzniká na povrchu substrátu heterogenní reakcí. Základním požadavkem přitom je, aby výchozí plyny obsahovaly stabilní, ale přitom prchavou sloučeninu, která by se v důsledku přivedení energie (ohřevem, plazmovým obloukem, laserem) chemicky rozkládala (např. kovový halogenid, TiCl_4). Produkty jejího rozkladu jsou pak ukládány na ohřátý povrch povlakovaného předmětu a působí zde jako katalyzátor. Aby proběhla požadovaná reakce (vytvoření vrstvy povlaku), musí být v plynech obsažen i nekovový reaktivní plyn (N_2 , NH_4 , CH_4).^{10,13}

Metodou CVD je možné vytvářet jednovrstvé i multivrstvé povlaky. Multivrstvy jsou povlaky, kde se střídají alespoň dva druhy vrstev. Přejechy mezi jednotlivými vrstvami zvyšují odolnost proti šíření poruch, což vede ke zvýšení tvrdosti a houževnatosti. Multivrstvy se vytvářejí cíleným řízením obsahu plynné směsi v průběhu depozičního procesu.⁹

Součástí plyné směsi je vždy i určité procento tzv. nosného plynu (Ar , H_2), který dopravuje plynou směs k povrchu substrátu. Nosný plyn výrazně ovlivňuje rychlost tvorby povlaku, jeho adhezi k substrátu a v některých případech se účastní i samotné chemické reakce.¹¹

U technologie CVD jsou nejčastěji používány dva typy reaktorů - reaktor s horkou stěnou a reaktor se studenou stěnou. V první variantě je nádoba reaktoru vyhřívána topnými elementy, čímž se udržuje stejná teplota stěny reaktoru i substrátu. Nevýhoda tohoto řešení je ta, že se povlak vytváří i na stěně reaktoru a případné chemické reakce par s materiálem vyhřívané stěny by mohly kontaminovat vlastní povlak na substrátu. Z tohoto důvodu se tento koncept používá pouze pro exotermické reakce (reakce vytvářející teplo), kdy právě vysoká teplota stěny reaktoru zabraňuje tvorbě povlaku na jejím povrchu. Druhý typ reaktoru je používán pro endotermické reakce (reakce spotřebovávající teplo). U tohoto typu je vyhříván pouze držák se substrátem. Stěna komory je obvykle chlazená vodou, díky čemuž prakticky nedochází k nežádoucí tvorbě povlaku na stěně reaktoru a případné kontaminaci tvořícího se povlaku.¹



Obr. 2.1 Princip povlakovacího zařízení pro metodu CVD¹⁰

Kromě konvenční CVD metody jsou v současnosti používány i různé její modifikace:

PECVD - *Plasma Enhanced CVD*, plazmaticky aktivovaná CVD metoda. Plazma lze vytvořit pomocí vnějšího elektrického napájecího zdroje (nízkofrekvenční střídavé napětí, vysokofrekvenční střídavé napětí, stejnosměrné napětí, pulzní stejnosměrné napětí) nebo reaktivním plynem (např. C_2H_2 , CH_4). PECVD je nejčastěji používanou depoziční metodou přípravy vrstev na bázi uhlíku. V povlakovací komoře je plynná atmosféra ionizována a aktivována v plazmatickém výboji, čímž se zvýší její energie. Díky tomu mohou chemické reakce, potřebné pro tvorbu povlaku, probíhat za výrazně nižších teplot, než u konvenčního CVD procesu.¹³

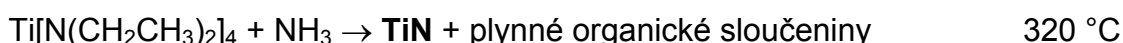
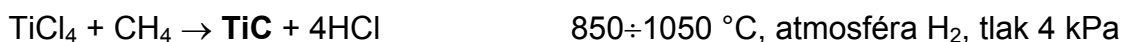
MWPCVD - *MicroWave Plasma CVD*, mikrovlnná plazmatická CVD metoda. Od klasické CVD metody se liší nízkými pracovními teplotami (běžně 600 °C), přičemž se nemění její princip.¹³

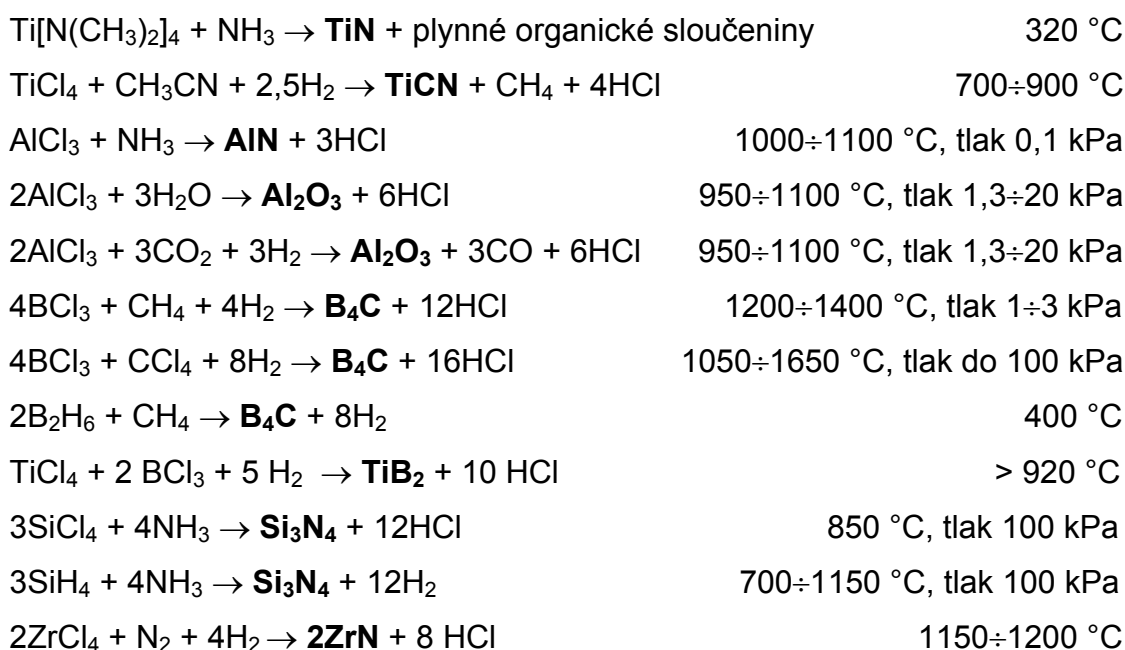
MTCVD - *Middle Temperature CVD*, metoda CVD za středních teplot. MTCVD umožňuje nanášet povlaky z plynné fáze za výrazně nižších teplot (700÷850 °C) než je tomu u konvenční CVD metody, kde teploty běžně přesahují 1000 °C. Díky nižším teplotám nevznikají ve vrstvě příliš velká pnutí a nedochází tak téměř k žádné tvorbě nežádoucích trhlinek. To má velmi pozitivní vliv na houževnatost.⁷ MTCVD metoda využívá jako vstupní sloučeninu acetonitril (CH_3CN , zdroj dusíku), nebo též vysoce toxický a hořlavý metykyanid. U konvenční CVD je používán plynný metan CH_4 (zdroj uhlíku) a čistý dusík. Jako zdroj titanu je u obou metod použit chlorid titaničitý ($TiCl_4$).¹¹

HFCVD - *Hot-Filament CVD*, CVD využívající žhavé vlákno. U této metody jsou plynné složky rozkládány odporově ohřátým vláknem (až 2400 °C). Vlákno je umístěno blízko substrátu (80 mm). Produkty pyrolytické reakce se usazují na povrchu substrátu, kde reagují a vytvářejí tenký povlak. Rychlost deposice povlaků je o jeden řád vyšší než u klasické CVD metody. HFCVD je používána např. pro vytváření diamantových povlaků.¹⁵

LICVD - *Laser Induced CVD*, laserově indukovaná CVD metoda. Metoda se používá ve dvou provedeních. První variantou je pyrolytická metoda, u které dochází ke štěpení molekul plynu na rozhraní plyn-substrát, v místě lokálního ohřátí laserovým paprskem. Tato metoda je dobře použitelná pouze v případech, kdy jsou zdroje par pro danou vlnovou délku laserového záření dobře průteplivé a povrch substrátu silně absorbující. Druhou variantou je foto-lytická metoda, kde jsou molekuly poblíž substrátu štěpeny fotochemickou reakcí.¹¹

Příklady některých chemických reakcí vedoucích ke tvorbě povlaku typu TiC , TiN , $TiCN$, AlN , Al_2O_3 , B_4C , TiB_2 , Si_3N_4 , $2ZrN$:^{8,17,27}





Výhody povlakování metodou CVD:¹¹

- vysoká hustota povlaku,
- vysoká teplotní stabilita povlaku,
- vysoká homogenita povlaku (dobré pokrytí substrátu),
- vynikající adheze k podkladovému materiálu, rovnoměrná tloušťka u tvarově složitých nástrojů a součástí,
- dobrá stechiometrie povlaku (možnost jejího řízení v širokých mezích),
- možnost vytvářet poměrně složité vrstvy a to nejen nitridu kovů (Al_2O_3 , uhlíkové kluzné vrstvy, diamantové vrstvy),
- ekonomická výhodnost tvorby silných vrstev povlaků,
- povlakování předmětu ze všech stran v důsledku poměrně vysokých pracovních tlaků plyné směsi (1÷100 kPa),
- relativně nízké pořizovací i provozní náklady, slučitelnost s ostatními výrobními postupy.

Nevýhody metody CVD:¹¹

- vysoké pracovní teploty, které mohou mít nepříznivý vliv na vlastnosti povlakovaného předmětu i samotného povlaku,
- nelze vytvářet některé typy povlaků (např. kombinací různých typů kovů - Ti-AlN),
- nelze napovlakovat ostré hrany,
- vysoká energetická náročnost,
- dlouhý pracovní cyklus 8÷10 hodin,
- ekologicky nevyhovující pracovní plyné směsi (toxické chloridy),
- tahová napětí ve vrstvě (rozdílný koeficient tepelné roztažnosti).



Obr. 2.2 Multivrstvý povlak firmy Valenite, obsahující 62 alternujících vrstev TiN/TiCN (každá o tloušťce 50nm) vytvořený metodou MTCVD¹²

2.2 METODA PVD

PVD proces se uskutečňuje v prostředí vysokého vakua (0,1 až 1,0 Pa), při teplotách v rozmezí 150÷500 °C. K povlakování dochází v důsledku kondenzace atomů, případně shluků atomů, které jsou uvolňovány z tzv. terčů. Takto vytvořené povlaky mají obecně menší tloušťku než stejné typy povlaků vytvářené metodou CVD. V dnešní době jsou nejčastěji využívány tři principiálně odlišné PVD technologie. Prvním typem je napařování, jehož základním mechanismem je uvolňování částic z terče (zdroje částic) působením urychlených iontů Ar. Druhým typem je napařování, kde k uvolňování částic dochází v důsledku působení nízkonapěťového oblouku, laseru, elektronového paprsku nebo indukci. Uvolněné částice jsou ionizovány a reagují s atmosférou komory, která je tvořena inertním a reaktivním plynem. Po dopadu na povrch substrátu vytvářejí tenkou (1÷5μm) homogenní vrstvu. Třetím způsobem je iontová implantace, kde jsou ionizované uvolněné částice urychlovány elektrickým polem směrem k povrchu substrátu, kde dochází k jejich implantaci.^{11,13}

Metoda PVD je ekologicky nejšetrnější metodu depozice vrstev, neboť se zde nepoužívají žádné nebezpečné materiály a při procesu depozice se neuvolňují žádné toxické látky.¹³ Výhodou je možnost povlakovat i ostré hrany s poloměrem zaoblení pod 20μm a možnost vytvářet vícevrstvé povlaky z různých typů vrstev. Mohou se kombinovat např. tvrdé, otěruvzdorné vrstvy s kluznými vrstvami, čímž je možné docílit delší životnosti nástroje.¹¹

Nevýhodou všech metod PVD je ale poměrně složitý vakuový systém a nutnost pohybovat povlakovaným předmětem, aby bylo zaručeno rovnoměrné vytvoření povlaku. Tento požadavek souvisí s tzv. stínovým efektem. Na plochách, které neleží ve směru pohybu deponovaných částic, se buďto povlak vůbec nevytvoří nebo je vzniklý povlak velmi nekvalitní.¹⁰

2.2.1 Naprašování

Proces povlakování probíhá ve vakuu nebo při nízkém tlaku plynu (do 0,7Pa). Díky nízkému tlaku plynu se odprašované částice z terče nedostanou do kolize s molekulami plynu v prostoru mezi substrátem a zdrojem. V některých případech se používá vyšší tlak (0,7÷2Pa).¹¹ Zde dochází v důsledku kolizí odprašených částic s molekulami plynu ke zvyšování teploty částic ještě před vlastním kontaktem s povrchem substrátu.

Aby bylo možné odprašovat částice z terče, musí na něj být nejprve přiveden vysoký záporný elektrický potenciál, řádově ve stovkách až tisících voltů. Poté je do vakuové komory přiveden pracovní plyn (nejčastěji Ar) o nízkém tlaku. Před terčem se zapálí doutnavý výboj, přičemž kladné ionty pracovního plynu jsou urychlovány a bombardují záporně nabitý terč. Záporně nabitě částice (elektrony) dopadají na stěny komory, která má kladný potenciál. Kladné ionty svou kinetickou energií při dopadu rozprašují terč. Odprašené částice se často průchodem oblastí ionizovaného pracovního plynu samy ionizují a ve formě kondenzátu usazují na vnitřních površích ve vakuové komoře. Substráty se proto umísťují před terč, aby se odprašené částice usazovali přednostně na nich a vytvářely povlak. V případě potřeby vytvářet povlak z nevodivého materiálu (keramika), narážíme na určité problémy s použitím nevodivého terče. U nevodivých terčů se postupně na povrchu vytváří elektrický náboj, který zabraňuje dalšímu bombardování. Tohoto nežádoucího jevu se lze zbavit použitím střídavého elektrického proudu. Při odprašovacím procesu dochází k eroznímu úbytku hmoty terče.^{11,14} Jeho rychlost lze určit dle vzorce (2.1).

Vzorec pro výpočet rychlosti eroze terče¹

$$R_e = 62,3 \frac{J \cdot S \cdot m_t}{\rho} [\text{\AA} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.1)$$

Kde: J [mA.cm⁻²] - je proudová hustota iontů
 S [atomy/iont] - je výtěžnost naprašování
 m_t [g] - je atomová hmotnost
 ρ [g.cm⁻³] - je měrná hmotnost materiálu terče

Naprašováním lze vytvářet tenké povlaky z těžkovitelných materiálů bez toho, aniž bychom museli ohřívat terč na vysokou teplotu. Ve vytvářené

vrstvě se zachovává složení slitinového terče ve stejném poměru jednotlivých složek a je možná homogenní depozice vrstev i na větších plochách.¹¹

Naprašování doutnavým výbojem rovinné diody - Je nejjednodušší naprašovací proces. Terč je zapojen jako katoda a držák, ve kterém jsou uloženy substráty, jako anoda. Terč slouží jako zdroj částic a jako zdroj sekundárních elektronů, které udržují doutnavý výboj. Pro principiální jednoduchost a relativní snadnost výroby terčů ze širokého spektra materiálů, je tato metoda poměrně rozšířená. Její jednoduchost je však do jisté míry vykoupena některými nedostatky. Těmito jsou např. nízká rychlost depozice a nežádoucí ohřev substrátu v důsledku bombardování odprášenými částicemi.^{11,13}

Rychlost depozice lze ovlivňovat vzdáleností substrátu od terče, tato bývá nejčastěji v rozsahu 50÷100mm. Dále tlakem pracovního plynu a materiálem terče. Tlak plynu ale nesmí být zvýšen nad určitou mez. Začalo by totiž docházet k jevu, kdy plyn naprašované atomy rozptyluje a snižuje tak rychlost depozice. Rychlost depozice lze také zvyšovat použitím vyšší hustoty výkonu na povrchu terče. Musí být ale zajištěno adekvátní účinné chlazení terče. To bývá obvykle realizováno vodní chladicí soustavou.¹

Magnetronové naprašování - Metoda je založena na rozprašování pevného terče, který je zapojen jako katoda magnetronového výboje. Výboj hoří ve velmi řídké atmosféře. Atmosféra je obvykle tvořena argonem, který je nezbytný pro udržení výboje. Je-li spolu s argonem přiváděna do povlakovací komory reaktivní příměs, např. kyslík nebo dusík, díky které je možné vytvářet oxidy a nitridy odprašovaného materiálu, jedná se o reaktivní magnetronové naprašování.¹⁴ Tlak pracovního plynu je řízen ve vakuové komoře, která je současně anodou výboje. Nad záporně nabitým terčem o potenciálu 500÷1000V je udržováno výbojem argonové plazma.²⁸ Vhodně nastaveným magnetickým polem se docílí rozšíření plazmatu až k povlakovým substrátům. Elektrony plazmatu jsou zachyceny v tzv. tunelu siločar magnetického pole o intenzitě několik set gaussů, které ale téměř vůbec neovlivňuje chování iontů (z důvodu jejich daleko větší hmotnosti), a unášeny podél tunelu. Tím se značně prodlouží jejich dráha, zvýší počet srážek (většinou s atomy plynu) a vytvoří tak husté plazma. Kladné, elektrickým polem urychlené ionty dopadají z plazmatu na terč a odprášují jeho částice. Ty poté prochází plazmatem směrem k substrátu, na kterém je záporné předpětí a postupně vytváří tenký povlak. Vzhledem k vysoké účinnosti tohoto ionizačního mechanismu může být proces provozován při nízkých tlacích kolem 0,1 Pa, s vysokou proudovou hustotou a nízkým napětím. Nižší tlak se zde pozitivně projevuje zejména ve větší čistotě vytvářených vrstev.¹³

Katoda může existovat v různých tvarech a provedeních. V případě použití válcové katody se magnety vytvářející magnetické pole umísťují podél stěny a do osy průřezu. Pokud je síla vnějších magnetů přibližně stejná jako síla magnetů v ose, jedná se o **vyvážený magnetron**. Takto vyvážené magnetické pole udržuje elektrony a tím i plasmu v nejbližším okolí terče (katody). Magnetické pole je rovnoběžné s povrchem katody a současně kolmé na elektrické pole. Celková síla na primární elektrony působí tak, že se mají snahu rychle pohybovat podél katody a ionizovat neutrální atomy argonu. Magnetické pole působí také na sekundární atomy vzniklé při dopadu kladných iontů

argonu na povrch terče. Tyto sekundární elektrony pak podobně, jako primární, ionizují další neutrální atomy argonu a zvyšují hustotu plazmatu.⁶

V případě, že síly od vnějších magnetů jsou větší než síly od magnetů v ose katody, je možné seřizovat sekundární plazmu tak, aby se plazma rozšířila k povrchu substrátu a zajistila dostatek kladně nabitých odprášených iontů a tím požadovanou rychlost depozice. Takový systém se nazývá **nevyvážený magnetron**.⁶

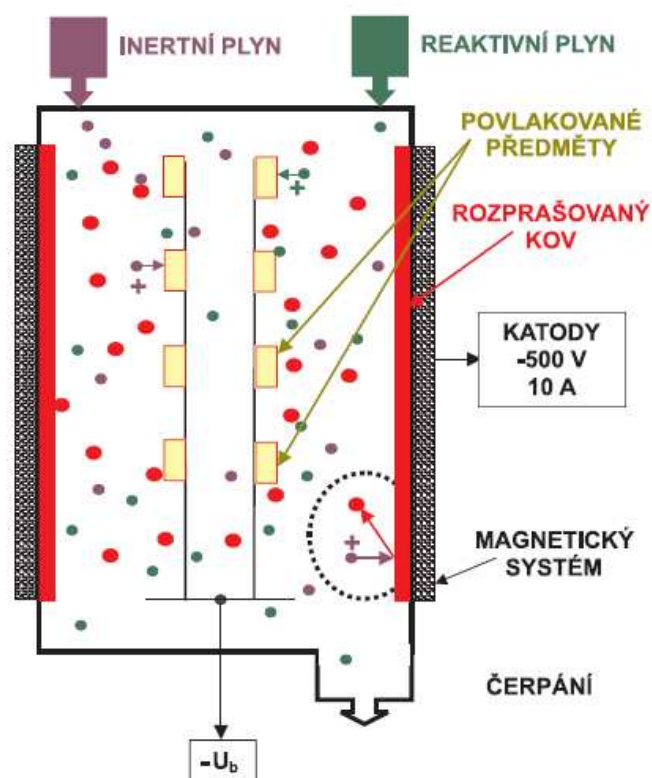
Výhodou magnetronového naprašování je možnost odprašovat prakticky libovolný materiál, včetně slitin a nevodičů. V případě odprašování nevodičů je nutné použít místo stejnosměrného výboje pulzní nebo vysokofrekvenční magnetronový výboj. Výhodou je také nepřítomnost nežádoucích makročásteček ve vytvořených povlacích. Metodou magnetronového naprašování je možné snadno vytvářet povlaky tvořené více vrstvami o různém chemickém složení a gradientní vrstvy (s průběžně se měnícím složením). Nevýhodou je nižší schopnost adheze povlaku k substrátu.²⁸

Výhody naprašování:¹⁶

- je možné odprašovat a ukládat prvky, slitiny i sloučeniny,
- odprašovaný terč je stabilní zdroj par a má dlouhou životnost,
- v některých uspořádáních může být terč ve tvaru prutu nebo válce,
- v některých uspořádáních může být reaktivní depozice snadno zdokonalena použitím reaktivních plynů, které jsou aktivovány v plazmě,
- velmi nízké zatížení tepelnou radiací,
- terč a substrát mohou být umístěny blízko sebe,
- depoziční komora může mít malý objem.

Nevýhody naprašování:¹⁶

- intenzita naprašování je ve srovnání s intenzitou tepelného odpařování nízká,
- v mnoha uspořádáních je distribuční tok depozice nerovnoměrný, pro vytvoření povlaku s rovnoměrnou tloušťkou je nutné pohybovat se substrátem,
- terče jsou často drahé, využití materiálu je malé,
- většina energie, která dopadá na terč, se mění na teplo, které se musí odvádět,
- v některých případech je v plazmě aktivována plynová kontaminace, která znečišťuje povlak více než u naprašování,
- u reaktivního naprašování je nutné přesné řízení složení plyné atmosféry, aby nedošlo k znečištění terče.

Obr. 2.3 Schéma magnetronového naprašování²⁸

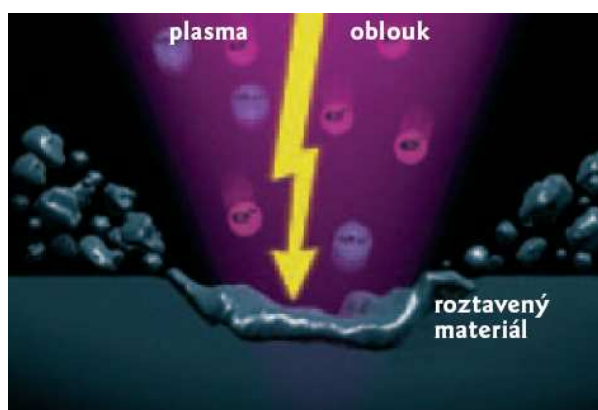
2.2.2 Napařování

Napařování je způsob povlakování, založený na odpařování materiálu z terče a kondenzaci par na substrátu. K odpařování materiálu se využívá skutečnosti, že bod varu látek klesá s tlakem, neboli, že tlak nasycených par látky roste s teplotou.⁵ Pro získání par pevných látek jsou proto za nižších tlaků třeba podstatně nižší teploty než za atmosférického tlaku. K přeměně hmoty terče na plynné skupenství se nejčastěji používá obloukové odpařování, ale může být použit i elektronový paprsek, laser nebo odporový ohřev. Povlakovací procesy se uskutečňují ve vakuu nebo nízkém tlaku inertních nebo reaktivních plynů.¹³

Obloukové odpařování - K odpařování materiálu terče se využívá nízký napěťový oblouk. Napěťový oblouk hoří mezi anodou (vakuovou komorou) a katodou (terčem). Zatímco na anodě hoří oblouk po celé její ploše, na terči hoří pouze bodově. Bodovým hořením je zajištěna vysoká lokální rychlost odpařování a současně i ionizace odpařených částic, která má velmi pozitivní vliv na adhezi povlaku k substrátu. Ionizované částice jsou urychlovány směrem k substrátu záporným předpětím, které je na něj přiloženo. Teplota substrátu bývá 400÷550 °C a tlak ve vakuové komoře 0,5÷3 Pa. Katoda při odpařování jako celek zůstává pevná, taví se jen v místě hoření oblouku zvaném katodová skvrna. Její velikost je obvykle kolem 10 μm. Teplota v místě katodové skvrny

dosahuje hodnoty kolem 15000 °C a závisí na velikost elektrického proudu, který bývá 50 až 450A.²⁹ Při takové teplotě není problém vypařit prakticky jakýkoli materiál. Z důvodu požadavku na kvalitnější tvorbu vrstev a efektivnější využití terče je možné náhodný pohyb katodové skvrny usměrňovat použitím magnetického pole. Touto metodou lze však odpařovat pouze elektricky vodivé materiály. Ve vytvořeném povlaku je nežádoucím jevem přítomnost makročástic. Makročástice jsou mikroskopické kapičky odpařovaného materiálu, zhoršující některé důležité vlastnosti, jako jsou např. drsnost povrchu, koeficient tření a odolnost proti korozi. Dopadu makročástic lze zabránit použitím elektromagnetického filtru, který ale výrazně zpomaluje proces povlakování. Je proto vhodný pouze pro speciální aplikace.²⁸

Délka procesu je u obloukového odpařování poměrně krátká a pohybuje se řádově v hodinách. Díky tomu patří v současné době k nejpoužívanějším metodám vytváření vrstev.



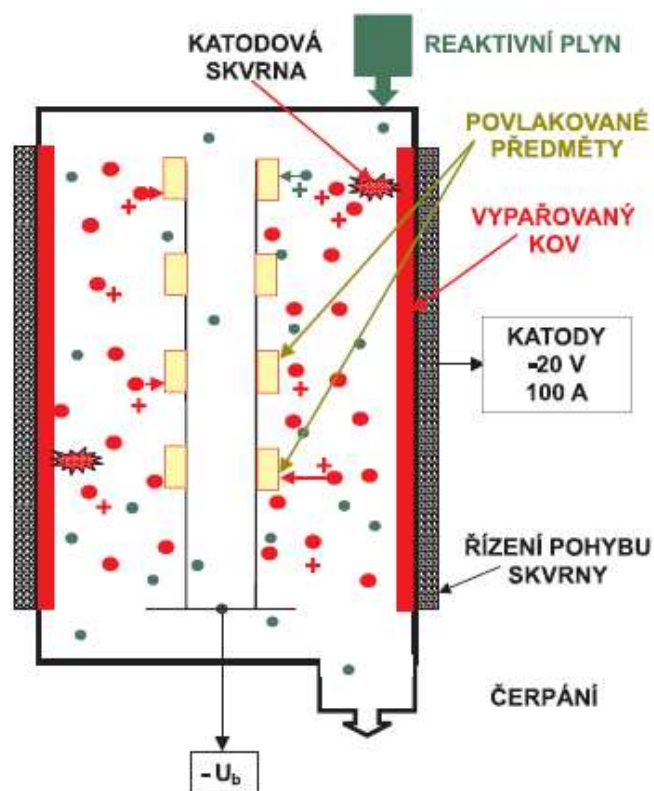
Obr. 2.4 Schéma katodové skvrny²⁹

Výhody obloukového odpařování:¹⁶

- lze odpařovat všechny elektricky vodivé materiály,
- plazmový oblouk efektivně ionizuje odpařovaný materiál i reaktivní plyny,
- ionizovaným odpařeným částicím může být před dopadem na substrát udělena vysoká energie,
- nízké zatížení tepelnou radiací (katodická oblouková depozice),
- reaktivní plyny jsou aktivovány v plazmě, což zlepšuje procesy depozice,
- znečištění terče je mnohem menší než u reaktivního naprašování.

Nevýhody obloukového odpařování:¹⁶

- lze odpařovat pouze elektricky vodivé materiály,
- vysoké zatížení tepelnou radiací (anodická oblouková depozice),
- roztavené kapénky (makročástice) vyvržené z katody se mohou dostat do povlaku a vytvořit na jeho povrchu kuličky.

Obr. 2.5 Schéma obloukového napařování²⁸

2.2.3 Iontová implantace

Látka určená k vytváření povlaku se do plynného skupenství převádí fyzikálním procesem (odpařování či odprašování). Proces deponování se odehrává ve vakuové komoře při tlacích atmosféry 0,01 až 10 Pa. Jako atmosféra komory se pro prvotní proces čištění obvykle používá inertní argon. Po procesu čištění jsou do komory přivedeny reaktivní plyny (N_2 , O_2 , CH_4) určené k vytváření chemických sloučenin s materiálem terče. Substrát je zapojen jako katoda a terč jako anoda. Povrch substrátu je bombardován urychlenými ionty, jejichž energie je úměrná zápornému předpětí, které je přiloženo na substrát. Velikost předpětí se v průběhu povlakovacího procesu podle potřeby upravuje. Před samotným povlakovacím procesem je na substrát přivedeno záporné předpětí kolem 1000 V, čímž dojde ke vzniku elektrického výboje, který ionizuje částice plynné atmosféry a v dalších fázích i oddělené částice terče. Mezi substrátem a terčem je tím vytvořeno silné elektrické pole, jehož účinek udílí iontům plynu dostatečnou energii na to, aby působily na povrch substrátu čistícím účinkem. Po očištění a zahájení povlakovacího procesu je napětí sníženo na 50 až 100 V. Nižší elektrický potenciál má za následek oslabení elektrického pole, které již iontům neudílí tolik energie. Energie však stále dostačuje na to, aby dopadající ionty plynu odprašovaly z povrchu substrátu během růstu vrstvy hůře vázané atomy povlaku. Dopad iontů během depozičního procesu má za následek výrazné zlepšení vlastností vzniklé vrstvy. Jde zejména o zlepšení schopnosti adheze k povrchu substrátu a zvýšení tvrdosti.²⁸

Iontovou implantací je možno nanášet povlaky rozmanitého složení s vynikajícími mechanickými vlastnostmi. Díky nízkým teplotám substrátu (200 až 450 °C) v průběhu depozičního procesu je možné povlakovat i tepelně zpracované materiály.^{11,28}

Výhody iontové implantace:¹¹

- přivedení velkého množství energie do povrchu rostoucího povlaku,
- odstranění kontaminované vrstvy na povrchu substrátu bombardováním částicemi s vysokou energií,
- přesně definované chemické složení povlaku,
- rovnoměrný průběh procesu a s ním spojený dokonalý růst vrstvy povlaku,
- pro zlepšení vlastností povlaku (chemické složení, adheze, hustota, zbytková napětí) lze použít řízené bombardování,
- vlastnosti povlaku jsou méně závislé na úhlu dopadu toku deponovaného materiálu než čistě u metod naprašování a napařování,
- vynikající adheze povlaku k podkladu,
- vysoká hustota povlaku,
- možnost snížení teploty substrátu pod 160 °C,
- široký rozsah podkladových i deponovaných materiálů (nejčastěji se jedná o povlak TiN dále lze vytvořit povlaky TiCN, TiAlN, TiAlVN, CrN, CrAlN, TiZrN, TiN/NbN).

Nevýhody iontové implantace:¹¹

- je třeba řídit mnoho procesních parametrů,
- často je obtížné docílit rovnoměrné bombardování celého povrchu substrátu (nutné pro vytvoření požadovaných vlastností povlaku po celé ploše),
- může dojít k nadměrnému ohřevu substrátu,
- za určitých podmínek mohou bombardující atomy plynu zůstat zachyceny v rostoucím povlaku,
- za určitých podmínek mohou být v povlaku vytvořena nadměrná tlaková zbytková napětí.

2.2.4 Povlaky vytvářené metodou PVD

2.2.4.1 Jednovrstvé povlaky⁹

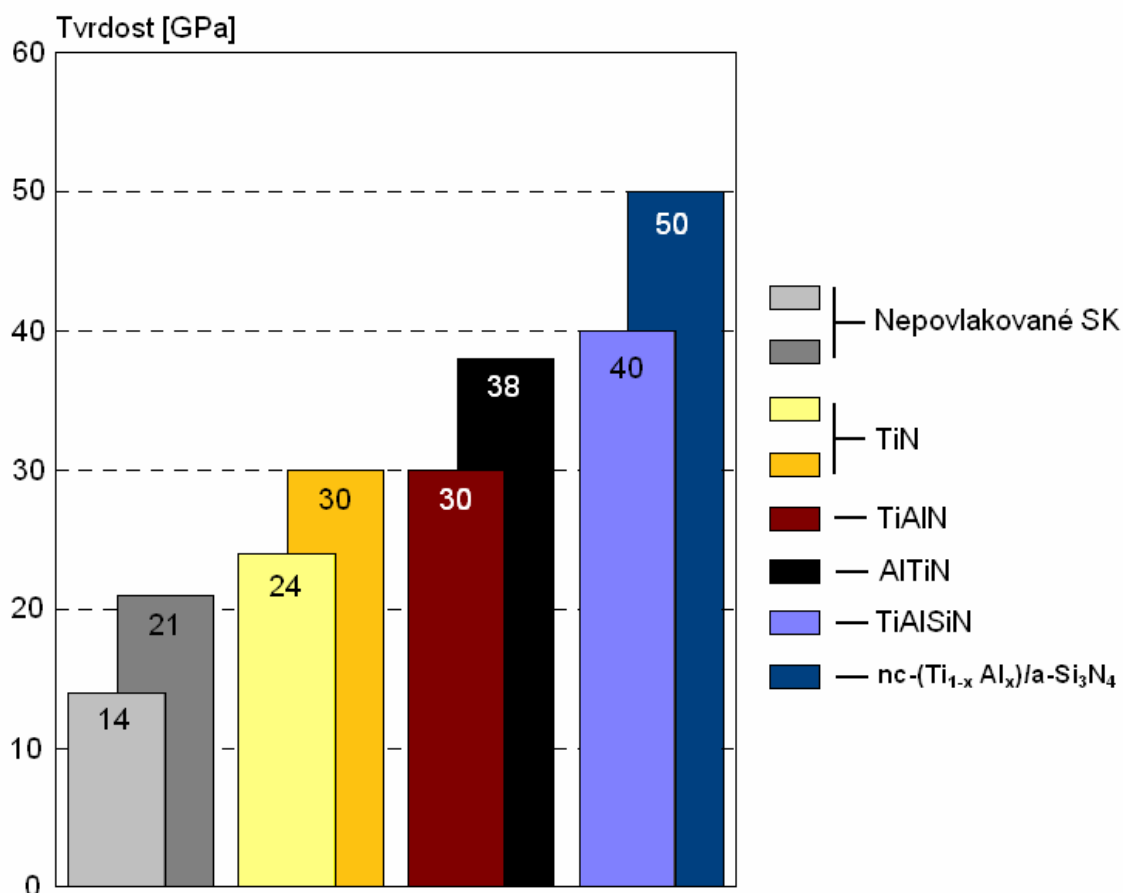
První skupinou jsou nejstarší a nejdéle používané povlaky TiN (nitrid titanu). Tento povlak je charakteristický svou zlatavou barvou. Výhodou TiN je dobrá elasticita a adheze. TiN dosahuje tvrdosti HV 20÷25 GPa a je použitelný téměř ve všech aplikacích. Jeho použití je limitováno maximální pracovní teplotou 600 °C.

Rostoucí požadavky na odolnost proti abrazi daly vzniknout vrstvám s velmi vysokou tvrdostí. Jedná se o vrstvu TiCN (karbonitrid titanu) vynikající

vysokou s tvrdostí HV 30÷40 GPa, ale nižšími maximálními provozními teplotami do 450 °C. Z těchto důvodů je povlak TiCN používán jen v úzce specifikovaných aplikacích. Výhodou TiCN oproti TiN je kromě vyšší tvrdosti také nižší koeficient tření. Z důvodu některých technických problémů spojených s rovnoměrností nanášené vrstvy, existuje v současnosti snaha jej nahrazovat novými povlaky na bázi TiAlN.

Povlaky na bázi TiAlN (titan aluminium nitrid) mají vysokou tvrdost HV 25÷33 GPa a až 800 °C vysokou maximální provozní teplotu. Obvykle se používá poměru Ti:Al=50:50. Dalším zvyšováním obsahu Al se snižuje tvrdost vrstvy a zlepšuje se odolnost proti oxidaci. Díky výborné odolnosti proti vysokým teplotám jsou ideální pro vysokorychlostní obrábění. Díky jejich výhodným vlastnostem se jejich zastoupení na trhu každoročně zvyšuje.

Zajímavou alternativou k povlakům na typu TiAlN jsou vrstvy na bázi CrAlN a CrAlSiN. Uplatňují se převážně při obrábění neželezných kovů. Výhodou těchto vrstev je zvýšená adheze k povrchu substrátu a jejich lepší chemická stabilita při vysokých teplotách. U těchto vrstev mohou být vytvářeny povlaky s poměrem Cr:Al=30:70. Maximální pracovní teploty jsou nad 800 °C. Další zvyšování pracovní teploty je možné pouze dalším zvýšením podílu Al. Povlaky na bázi CrAlN dosahují tvrdosti HV i přes 35 GPa.



Obr. 2.6 Porovnání tvrdosti SK bez povlaků a s povlaky¹⁸

2.2.4.2 Strukturované povlaky⁹

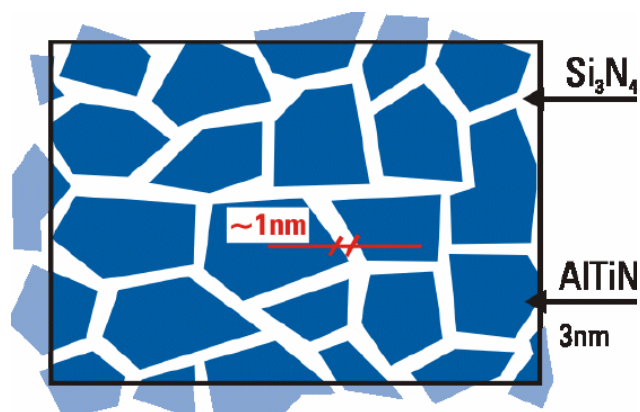
Dominantní postavení zde mají vrstvy zejména na bázi TiAlN. Byly vyvinuty pro zvlášť náročné požadavky na teplotní a chemickou stabilitu, kde již jednovrstvé povlaky nestačí. V zásadě rozlišujeme čtyři druhy:

Multivrstvy - jsou povlaky, kde se střídají alespoň dva druhy vrstev. Multivrstvy jsou obvykle vytvářeny ve větších tloušťkách ($12\div 13\ \mu\text{m}$) než jednovrstvé povlaky. Přechody mezi jednotlivými vrstvami zlepšují odolnost proti šíření poruch, což vede ke zvýšení tvrdosti a houževnatosti.

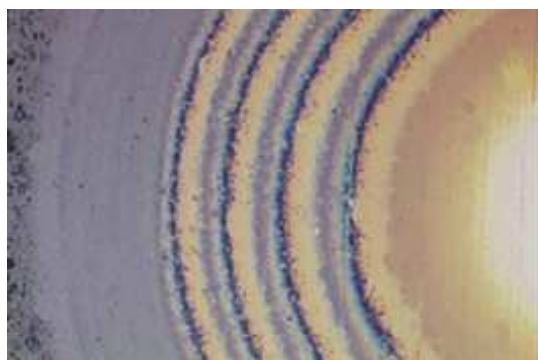
Gradientní a nanogradientní vrstvy - jsou povlaky, u nichž se průběžně mění složení vrstvy. U vrstvy typu TiAlN se směrem k povrchu zvyšuje množství Al, čímž se výrazně zlepšuje odolnost proti oxidaci při zachování vysoké tvrdosti.

Nanovrstvy - V zásadě se jedná o multivrstvy, kde má každá jednotlivá vrstva tloušťku pod 10 nm. Vhodným střídáním vrstev je možné dosáhnout výrazného zvýšení tvrdosti.

Nanokompozitní vrstvy - Jsou tvořeny malými krystalky jedné fáze o velikosti několika nanometrů, které jsou zakotveny v amorfni matrici jiné fáze, přičemž obě fáze jsou vzájemně nerozpustné. Velikost mezikrystalických hranic je pod 1 nm. Díky malé zrnitosti vynikají velmi vysokou tvrdostí HV o hodnotách $40\div 50\ \text{GPa}$. Vynikají také vysokou teplotní stabilitou a odolností proti oxidaci.



Obr. 2.7 Schéma Nanokompozitní struktury nc-(Ti_{1-x}Al_x)/a-Si₃N₄⁹



a)



b)

Obr. 2.8 Výbrus strukturovaných povlaků (2.8a – multivrstvý povlak s vrchní vrstvou TiAlN, 2.8b – nanogradientní povlak TiAlN)¹²

2.2.4.3 Kluzné povlaky

Jsou charakteristické nízkým koeficientem tření. Jejich vlastnosti omezují tvorbu nárůstků a snižují velikosti řezných sil. Do této skupiny patří tzv. měkké vrstvy, které se používají pouze v kombinaci s tvrdými vrstvami zmíněnými na předchozích stranách. Tím se vhodně kombinují kluzné vlastnosti s vysokou tvrdostí. Mezi tyto vrstvy patří MoS₂, WC a vrstvy DLC (diamod like carbon = diamantu podobný uhlík), jejíž tvrdost HV má hodnotu kolem 20 GPa. V praxi jde především o vytvoření vhodné kombinace tvrdé a měkké vrstvy s dobrými třecími vlastnostmi, dobrou tvrdostí a odolností proti abrazi.⁹

3 PŘEDDEPOZIČNÍ PŘÍPRAVY

Předdepoziční přípravy se provádějí z toho důvodu, aby byla zajištěna co nejlepší soudržnost mezi substrátem (podkladem) a povlakem. Po vyrobení nástroje se na jeho ostří vyskytují stopy po broušení, různé otřepy a nerovnosti. Povlak se na těchto místech při zatížení může začít odlupovat, což vede ke snížení řezivosti a trvanlivosti nástroje. Tímto nežádoucím jevem trpí zejména povlaky vytvořené depoziční metodou PVD, které mají obecně nižší adhezi k podkladu než stejné povlaky vytvořené metodou CVD.¹⁹

Předdepoziční přípravy zahrnují tyto činnosti:¹³

1. Úprava ostří
2. Chemické čištění substrátu
3. Iontové čištění substrátu
4. V případě redepozice tenké vrstvy předchází pochodům 1 - 3 tzv. **strip-ping**-odpovlakování.

Všechny tyto procesy mají nezanedbatelný vliv na adhezi.

3.1 Úprava ostří^{11,19}

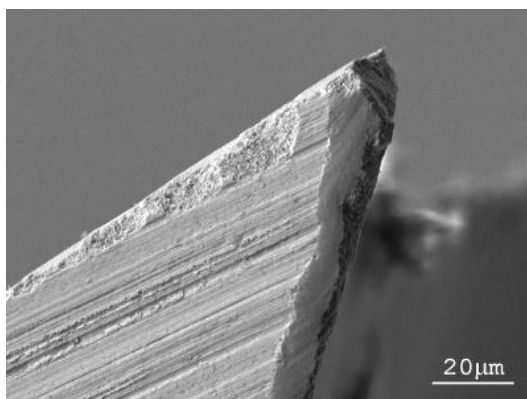
Hrany nástrojů se po nabroušení speciálně omílají, kartáčují, honují nebo otryskávají. Při těchto způsobech povrchové úpravy dochází ke změnám mikrogeometrie nástroje max. v řádech mikrometrů (obvykle cca do 10 μm) a může být dosaženo zvýšení životnosti nástroje až o 200% oproti nástroji s neupraveným ostřím.

Otryskávání - Jemné abrazivo je unášeno proudem vzduchu, které vysokou rychlostí dopadá na povrch. Abrazivní účinek je závislý na druhu abraziva, jeho hmotnosti, tvaru a úhlu dopadu.

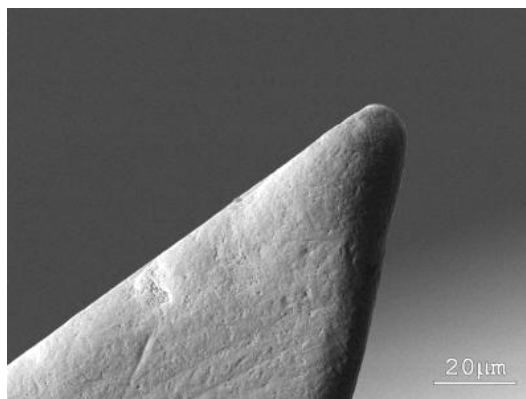
Omílání kartáčem - U kartáčů jsou používány různé druhy vláken. Podle druhu slinutého karbidu jsou používána ocelová popřípadě tvrdá polymerní vlákna s abrazivem.

Omílání v granulátech - Omílaný předmět je umístěn v nádobě s granulátem a abrazivem. Nuceným pohybem předmětu dochází k úpravám ostří.

Honování - Pro úpravu řezných hran se používají také gumové disky nebo jiné elementy za přítomnosti abrazivního média.



a)



b)

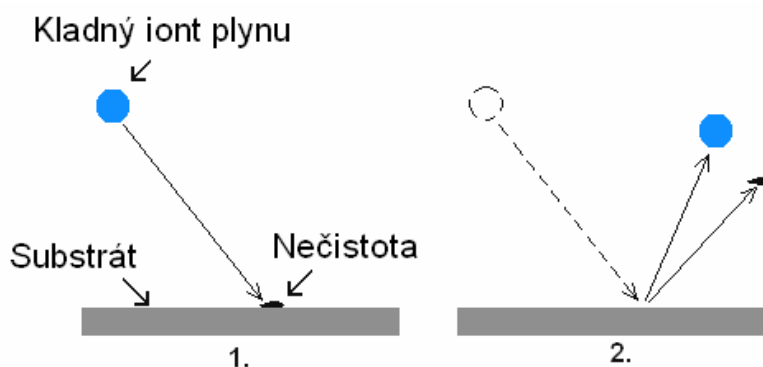
Obr. 3.1 Detail břitu nástroje (3.1a – před úpravou ostří, 3.1b – po mechanické úpravě)²⁴

3.2 Chemické čištění substrátu

Cílem je zbavit povrch mastnoty, částic brusiva a dalších nečistot, které ulpívají na povrchu čistěného předmětu různými typy čistících kapalin. Jako čistící kapaliny se používají různé alifatické uhlovodíky – alkoholy na ropné bázi a mastné kyseliny. Aromatické uhlovodíky, jako toluol, benzol, xylol a jiné, se používají jen když je potřeba zajistit vysokou rozpustitelnost silných znečišťovadel.¹⁹ Pro urychlení čistícího procesu je navíc možné použít ultrazvuk. Po očištění následuje důkladné vysušení.

3.3 Iontové čištění substrátu

Iontové čištění se provádí přímo v depoziční komoře. Používá se pouze u metody PVD. Do depoziční komory je před vlastním povlakováním přiveden inertní plyn (např. Ar), který je doutnavým výbojem ionizován. Kladné ionty plynu jsou záporným předpětím na substrátu urychlovány směrem k jeho povrchu, kde odstraňují nečistoty.¹⁹



Obr. 3.2 Princip iontového čištění

3.4 Stripping

Strippingem se rozumí odstranění staré vrstvy z již použitého nástroje před depozicí nové vrstvy. Stripping se používá výhradně pro monolitní nástroje. Stripping břitových destiček není ve většině případů ekonomicky výhodný. V současnosti je možné bez větších problémů odstraňovat i multivrstvé povlaky. Pro stripping slinutých karbidů se používají rozpouštědla na bázi hydroxidů a peroxidů vodíku. Negativní vlastností těchto rozpouštědel je ovšem jejich agresivita vůči kobaltovému pojivu, které je jimi intenzivně napadáno. Z tohoto důvodu je nutné nástroj před nanesením nového povlaku znovu přebrousit.^{11,19}

4 Vlastnosti povlakovaných slinutých karbidů

Fyzikální a mechanické vlastnosti jsou u povlakovaných SK ovlivněny druhem povlaku, jeho tloušťkou, metodou povlakování a vlastnostmi substrátu. Pro dobrý řezný výkon a dobrou trvanlivost je také důležitý nízký koeficient tření a nízká drsnost povlaku. Důležitou charakteristikou povlaků je jejich odolnost proti opotřebení, které může být abrazivního nebo tepelného charakteru. Dobrou odolnost proti abrazivnímu opotřebení vykazuje velmi tvrdá vrstva TiC, která ale může být použita pouze do určité teploty, po jejíž překročení by začalo docházet k výraznému snižování tvrdosti. Při vysokém tepelném zatížení břitů se používají povlaky, které si dokáží udržet tvrdost i při vyšších teplotách. V tomto případě se velmi často používá vrstva Al_2O_3 , která vyniká vysokou termochemickou stabilitou a dokáže si na rozdíl od TiC udržet tvrdost i za vysokých teplot. Povlaky na bázi Al_2O_3 jsou proto používány pro vysoké řezné rychlosti, kde převládá tepelné opotřebení. U nižších řezných rychlostí narůstá abrazivní opotřebení, proto se z důvodu vyšší trvanlivosti břitů používají tvrdé TiC povlaky.¹⁰

Tab.4.1 Obecné porovnání vlastností základních povlakových materiálů¹¹

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

Většinou se povlaky na slinutých karbidech vytvářejí o tloušťkách 5÷10 μm . U větších tloušťek se zvyšuje riziko jeho odlupování. Povlaky vytvořené metodou CVD mají vynikající adhezi a odolnost proti opotřebení, proto se obvykle používají pro soustružení a nepřerušované řezy. Tvorba povlaku se děje za vysoké teploty, což vede ke vzniku nežádoucího tahového pnutí ve vrstvě, které může vést až ke vzniku trhlinek. Naopak, u depoziční metody PVD vzniká ve vrstvě výhodnější tlakové pnutí, díky čemuž mají povlaky vytvářené touto metodou vyšší odolnost proti vydrolování. Díky těmto výhodným vlastnostem se PVD povlaky často uplatňují např. pro frézování a obrábění s přerušovaným řezem. Díky možnosti povlakovat i ostré hrany (bez zaoblení) se také využívají pro povlakování celokarbidových vrtáků a stopkových fréz.¹¹

Pokud je vrstva povlaku příliš tenká, je řezný výkon povlakovaných SK silně ovlivněn vlastnostmi podkladu. Opotřebení nástroje na hřbetě je urychlováno plastickou deformací břitů, proto i u tenkých povlaků hřbetní opotřebení

klesá s rostoucí tvrdostí podkladu. Pro lehké řezy se mohou používat podklady o vyšší tvrdosti, čímž se zamezí nežádoucímu vydrolování a dojde ke zvýšení trvanlivosti. V případě těžkých řezů nebo těžkých přerušovaných řezů se vydrolování eliminuje použitím houževnatých podkladů, i když běžné opotřebení je pak vyšší než u tvrdého podkladu. Kvůli zlepšení odolnosti proti vydrolování jsou v poslední době pro těžké řezy často užívány substráty s gradientní strukturou.¹⁰

5 Zkoušení vlastností povlaků

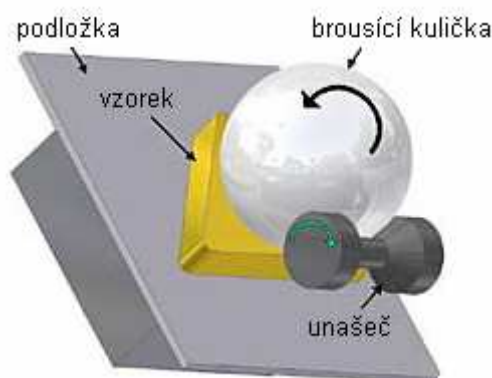
Zkoušky jsou velmi důležité zejména pro výzkum a vývoj nových vrstev a pro ověřování vlastností povlaků na nástrojích.

Testovány jsou jak fyzikální, tak i chemické vlastnosti povlaků. Zkoušeny jsou tyto nejdůležitější vlastnosti: Tvrdost, tloušťka, drsnost, adheze, kluzné vlastnosti, odolnost proti oxidaci, chemická a tepelná stabilita.

Tvrdost - je nejzákladnější vlastnost každého povlaku. Na její hodnotě závisí odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Tvrdost je definována jako schopnost materiálu odolávat pronikání cizího tělesa.³⁰ Na této definici je postaven test, u kterého je do povrchu povlaku vtlačován měřicí hrot.

Vzhledem k malým tloušťkám povlaků je třeba zajistit, aby měřicí hrot (obvykle Vickers) pronikl maximálně do 1/10 tloušťky vrstvy. Velikost zátěže při měření tvrdosti vrstev se proto volí v řádu desítek mN. Hloubka vtisku při takové zátěži je pod 0,5 μm . Tím se zajistí, že měření tvrdosti vrstvy nebude ovlivněno vlastnostmi podkladového materiálu. Vzniklý vtisk je pro vyhodnocování mikroskopy příliš malý, z tohoto důvodu se používají speciální mikrotvrdoměry, které souběžně se zatěžováním hrotu měří hloubku jeho pronikání do vrstvy s přesností na jednotky nm. Hodnota mikrotvrdosti je obvykle udávána v GPa.³⁰

Tloušťka - Různé povlaky jsou určeny pro různé aplikace. Každý povlak má svou předepsanou ideální tloušťku, při jejímž nedodržení může dojít ke snížení trvanlivost nástroje a zvýšení řezných sil. Pro určování tloušťek povlaků se nejčastěji používá tzv. kalotest.



Obr. 5.1 Princip kalotestu²⁶

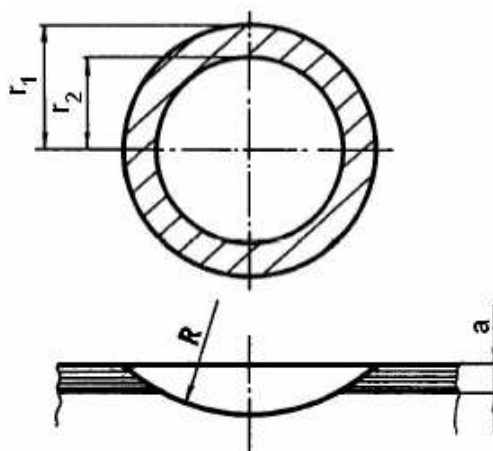
Výbrus se obvykle provádí ocelovou leštěnou kuličkou o průměru 25mm. Otáčením kuličky, na níž je nanесena diamantová brusná pasta, se do vzorku vybrousí kulový vrchlík do hloubky větší, než je tloušťka povlaku. V čelním pohledu se výbrus jeví jako mezikružší. Pomocí mikroskopu se poté měří vnější a

vnitřní průměry, resp. poloměry výbrusu, ze kterých je pak možno výpočtem určit tloušťku vrstvy.¹³

Vzorec pro výpočet tloušťky povlaku¹³

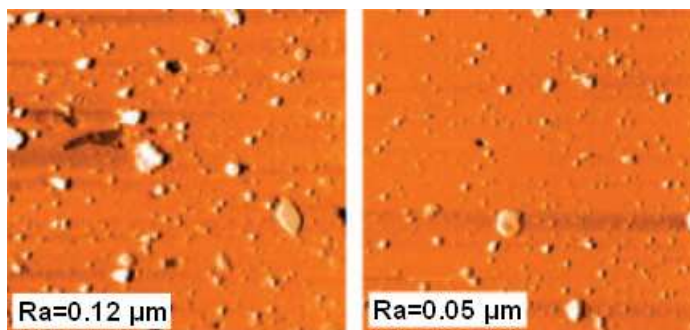
$$a = \sqrt{R^2 - r_2^2} - \sqrt{R^2 - r_1^2} \text{ [}\mu\text{m]} \quad (5.1)$$

Kde: R [μm] - je poloměr kuličky
 r_1 [μm] - je vnější poloměr výbrusu
 r_2 [μm] - je vnitřní poloměr výbrusu



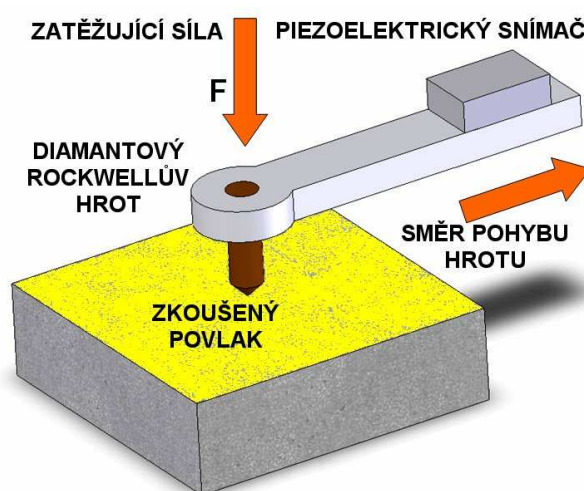
Obr. 5.2 Schéma výbrusu¹³

Drsnost - U povlaků deponovaných metodou PVD je výsledná drsnost ovlivněna jak kvalitou povrchu podkladu, tak povlakem. Zdrojem zvýšené drsnosti jsou makročástice, které se vytvářejí během procesu povlakování. Zvýšená drsnost znamená zvýšení řezných sil při obrábění. Měření drsnosti se provádí na vyleštěných substrátech běžnými dílenskými drsnoměry nebo speciálními mikroskopy.²⁶



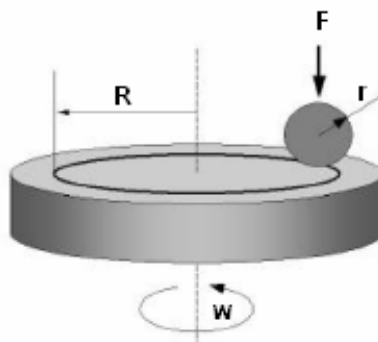
Obr. 5.3 Povrch povlaku s makročásticemi²⁶

Adheze - Pro vyhodnocování přilnavosti vrstvy k povlakovanému nástroji se používá tzv. scratch test. Princip spočívá v posouvání špičky diamantového Rockwellova hrotu po měřené vrstvě, přičemž zátěžná síla působící na hrot postupně roste. S ohledem na běžné velikosti přilnavosti se používá zátěžná síla v rozsahu 20÷120 N. Při měření vrstvy je detekována akustická emise, která se mění při odtržení vrstvy, což koresponduje s určitou hodnotou v N. Tato kritická hodnota, při které dochází k odtržení vrstvy, se označuje jako adheze vrstvy. Navíc je možné provést závěrečnou kontrolu pomocí optického mikroskopu. Pomocí mikroskopu se určí na vzniklé dráze místo, kde došlo k odtržení vrstvy a je odečtena přesná hodnota kritické zátěže.²⁵



Obr. 5.4 Princip scratch testu ²⁶

Kluzné vlastnosti - K určování kluzných vlastností se používá metoda „PIN-on-DISC“. Měření spočívá ve vtačování pevně uchyceného zkušebního tělíska (pinu) ve tvaru kuličky nebo hrotu předem definovanou silou (zatížení 1÷10 N) do zkušebního vzorku, který se otáčí danou rychlostí. Přímým výstupem měření je průběh koeficientu tření v závislosti na počtu cyklů. Po testu se dále analyzuje charakter opotřebení zkušebního tělíska, jeho velikost a parametry tribologické stopy.¹³



Obr. 5.5 Schéma metody PIN-on-DISC ¹³

Odolnost vůči oxidaci - K opotřebení vrstvy dochází i oxidací. Jsou rozlišovány dva druhy oxidace, povrchová a hloubková. U povrchové oxidace se vytvoří tenká vrstva, která může zabraňovat další oxidaci. U hloubkové oxidace obvykle dochází k destrukci vrstvy, čímž dojde k poklesu tvrdosti. Stupeň oxidace je závislý na teplotě.³⁰

K měření odolnosti vůči oxidaci se ve většině případů používá gravimetrická metoda, při které se hodnotí změna hmotnosti vrstvy v závislosti na teplotě účinkem vzdušného kyslíku. Podmínkou ovšem je, že testovaný vzorek musí být celoplošně pokryt zkoumanou vrstvou.³⁰

Chemická stabilita - Vyjadřuje míru odolnosti vrstvy vůči chemickým reakcím s obráběným materiálem, které mohou vznikat zejména za vyšších teplot. Chemická stabilita vrstvy se může měnit v závislosti na druhu obráběného materiálu a řezných podmínkách.³⁰

Tepelná stabilita - Při zvýšení teploty vlivem obrábění může docházet ke změně vnitřní struktury, např. nárůstem krystalitů, přechodem k jinému krystalickému uspořádání, změnou vnitřního napětí apod. Tyto charakteristiky, které se navenek projevují změnou mechanických vlastností, se obvykle vyhodnocují pomocí TEM (transmisní elektronová mikroskopie) či XRD (rentgenová difrakce).³⁰

6 Povlakované SK v nabídkách vybraných výrobců

V této kapitole je uvedena základní nabídka tří vybraných výrobců povlakovaných SK. Jako první bude představena nabídka jediného českého výrobce Pramet, dále nabídka firmy Ceratizit a nabídka největšího světového výrobce Sandvik Coromant.

6.1 Pramet

Pramet je jediným výrobcem povlakovaných slinutých karbidů v ČR. Firma má 50 letou tradici. V roce 1951 byla v Šumperku zahájena výroba součástí ze slinutého karbidu a také zde započala výroba řezných nástrojů osazených slinutým karbidem. Pramet si udržuje vedoucí pozici v daném sortimentu na našem území a zároveň získává stále větší podíl i na náročných exportních trzích.²⁰

6.1.1 Materiály s povlaky MTCVD²¹

6620 (P10-20, K10-25, H05-15) - Materiál s nejvyšší otěruvzdorností z řady 6000. Vhodný pro dokončovací až polohrubovací soustružení litiny, uhlíkových i legovaných ocelí. Lze ho také (podmíněně) použít pro jemné a dokončovací soustružení kalených ocelí a tvrzených litin.

- Druh povlaku: $\text{Ti(C,N)} + \text{TiN} + \text{Ti(C,N)} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$

6630 (P15-35, M10-30, K20-30, S15-25) - Univerzální materiál pro soustružení ocelí se širokou aplikační oblastí. Vhodný též pro obrábění litiny i korozi-vzdorných ocelí. Spojuje dobrou otěruvzdornost s vysokou houževnatostí.

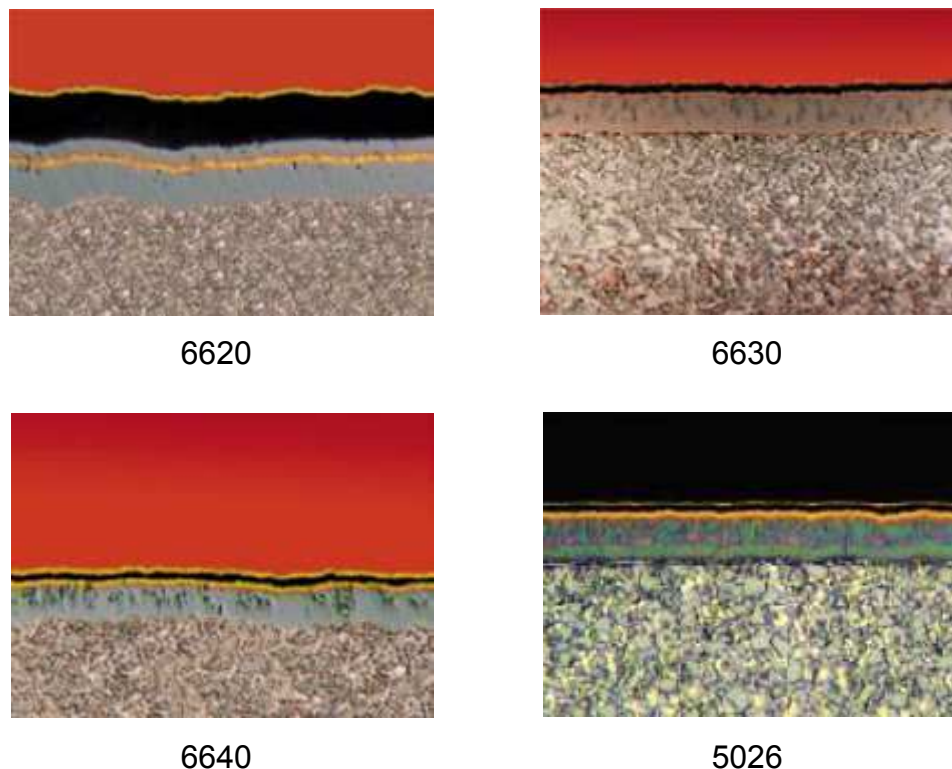
- Druh povlaku: $\text{TiN} + \text{Ti(C,N)} + \text{TiN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$

6640 (P20-40, M20-35, K25-40, S20-30) - Nejhouževnatější z materiálů řady 6000. Je vhodný pro operace s velkým mechanickým namáháním břitů, jako je obrábění s přerušovaným řezem a obrábění kůry výkovků a odlitků. Materiál je také vhodný pro soustružnické operace upichování a zapichování běžných i korozi-vzdorných ocelí.

- Druh povlaku: $\text{TiN} + \text{Ti(C,N)} + \text{TiN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$

5026 (P15-30, M15-25, K15-30, H10-20) - Tento materiál je určen zejména pro frézování uhlíkových i slitinových ocelí a litin středními a vyššími řeznými rychlostmi a středními posuvy. Jedná se o materiál s vysokou otěruvzdorností danou speciálně vyvinutým podkladovým materiálem a koncepčně novým typem povlaku.

- Druh povlaku: $\text{TiN} + \text{Ti(C,N)} + \text{TiN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$



Obr. 6.1 Mikrostruktura MTCVD povlaků Pramet ²¹

6.1.2 Materiály s povlaky PVD ²¹

8016 (P05-20, M05-20, K01-25, N01-25, S05-15, H05-15) - Materiál pro jemné až polohrubovací soustružení běžných, korozivzdorných i zušlechťených ocelí (HRC>55). Dále pak pro obrábění žárovevných a žáruvzdorných ocelí. Lze ho také použít pro soustružení litin a slitin na bázi Al a Cu. V oblasti frézování je tento materiál doporučen pro obrábění běžných, žárovevných, žáruvzdorných ocelí a litin nižšími a středními posuvy.

- Druh povlaku: (Ti,Al,Si)N + TiN

8026 (P15-30, M15-35, K15-35, N10-30, S15-25, H10-20) - Tento materiál má dominantní postavení při frézování korozivzdorných ocelí, ale lze ho použít i při obrábění běžných uhlíkových i slitinových ocelí a ocelolitiny vyššími a středními posuvy, středními a vyššími rychlostmi. Lze ho použít pro obrábění litin a dle typu VBD i frézování Al a Cu resp. slitin neželezných kovů. Vhodný jak pro běžné tak i kopírovací frézování.

- Druh povlaku: (Ti,Al,Si)N + TiN

8030 (P25-40, M20-35, K25-40, N15-25, S15-25, H15-25) - Tento materiál nachází velmi širokou oblast použití, zejména díky své vysoké provozní spolehlivosti. Je určen pro VBD sloužících k závitování, upichování, zapichování a kopírovacímu soustružení. Používá se při obrábění běžných i korozivzdorných ocelí a dále pak pro jemné a dokončovací soustružení korozivzdorných a vy-

soce legovaných ocelí a superslitin. Jednou z jeho hlavních aplikačních oblastí je vedle závitování i vrtání, kde se používá jak pro vnitřní tak i obvodové VBD.

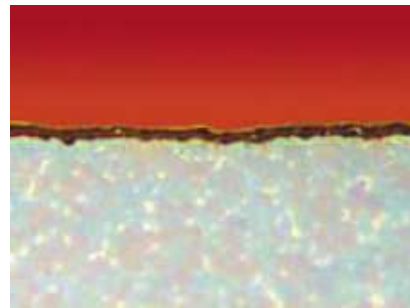
- Druh povlaku: (Ti,Al,Si)N + TiN

8040 (P30-50, M20-40, K20-40, S20-30) - Jedná se o nejhouževnatější materiál, který je určen pro extrémně přerušované řezy a špatné záběrové podmínky. Ve frézování ho lze doporučit jako prvou volbu pro nástroje určené k obrábění uhlíkových a slitinových ocelí. Své použití dále nachází při soustružení i frézování litin a hlavně pak těžkoobrobitelných slitin na bázi Ni, Co a Fe.

- Druh povlaku: (Ti,Al,Si)N + TiN



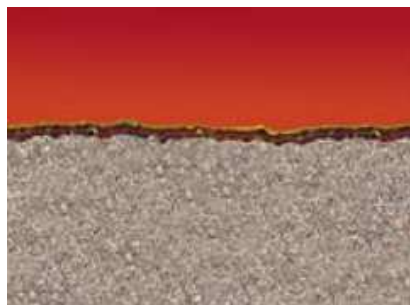
8016



8026



8030



8040

Obr. 6.2 Mikrostruktura PVD povlaků Pramet²¹

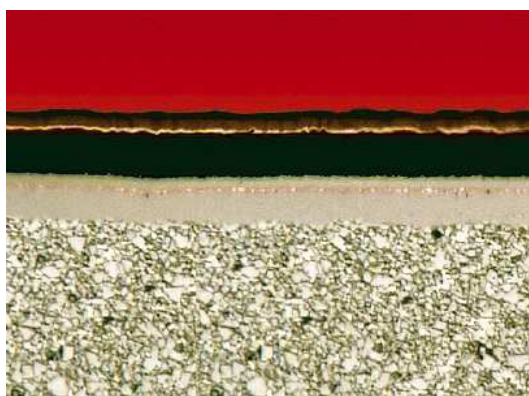
6.1.3 Materiály s duálními povlaky²²

6605 (P10-20, K05-15, H05-15) – Materiál s vysokou odolností proti opotřebení. Vhodný pro obrábění litin a obrábění bez chlazení.

- Druh povlaku: **MTCVD:** Ti(C,N) + Al₂O₃ + TiN, **PVD:** Lubrik SI

6615 (P15-25, K15-25) – Materiál je vhodný pro obrábění litin a ocelí. Má dobrou odolnost proti opotřebení i při obrábění v přerušovaném řezu.

- Druh povlaku: **MTCVD:** Ti(C,N) + Al₂O₃ + TiN, **PVD:** Lubrik SI



6605



6615

Obr. 6.3 Mikrostruktura duálních povlaků Pramet²²

6.2 Ceratizit

6.2.1 Materiály s povlaky CVD²

SR17 (P15, K15) – Materiál s dobrou odolností proti oxidaci, vysokou tepelnou odolností a výbornou odolností proti opotřebení.

- Složení: Co 6,0%; míchaný karbid 8,0%; WC zbytek
- Druh povlaku: TiC + Ti (C,N) + Ti (C,N,O) + Al₂O₃
- Síla povlaku: 11 μm

SR127 (P25, M20, K20) – Vhodný pro oceli a litiny, dobrá odolnost proti oxidaci, dobrá houževnatost, výborná odolnost proti opotřebení.

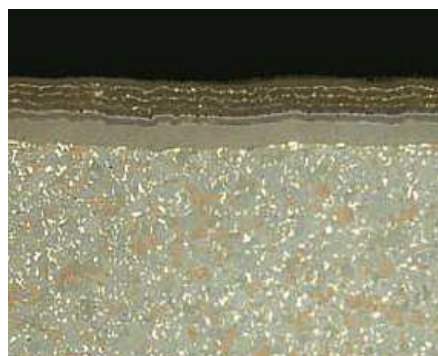
- Složení: Co 6,0%; míchaný karbid 0,6%; WC zbytek
- Druh povlaku: TiC + Ti (C,N) + TiN + Al₂O₃
- Síla povlaku: 12 μm

GM40 (P35, M30) – Univerzální použití, vysoká houževnatost a odolnost proti vylomení bříty.

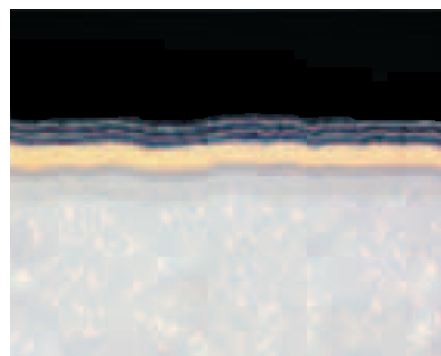
- Složení: Co 11,0%; míchaný karbid 12%; WC zbytek
- Druh povlaku: TiC + Ti (C,N) + TiN
- Síla povlaku: 5.5 μm

GM517 (P15, M15, K15) – Velmi dobrá tepelná odolnost, vysoká odolnost proti otěru a opotřebení, vysoká odolnost proti vymílání.

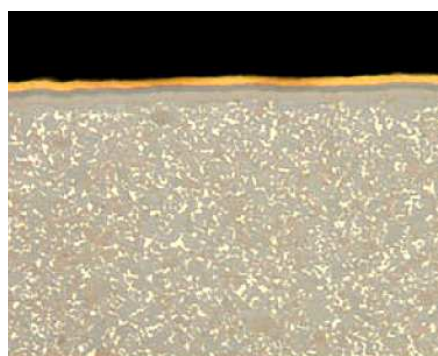
- Složení: Co 5,8%; míchaný karbid 6,4%; WC zbytek
- Druh povlaku: Ti (C,N) + Ti (C,N) + TiN + Al₂O₃ + Ti(N,B) + TiN
- Síla povlaku: 11÷12 μm



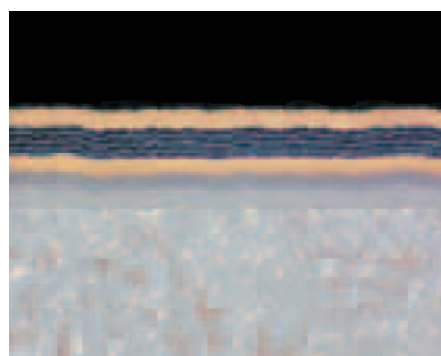
SR17



SR127



GM40



GM517

Obr. 6.4 Mikrostruktura CVD povlaků Ceratizit^{2,3}

6.2.2 Materiály s povlaky PVD^{2,3}

CM40 (P40, M35) – Vhodný pro obrábění korozivzdorné oceli, vynikající houževnatost a výborná odolnost proti vylamování bříty.

- Složení: Co 11,0%; míchaný karbid 12,0%; WC zbytek
- Druh povlaku: TiAlN
- Síla povlaku: 2÷4 μm

CM45 (P40, M35) – Vhodný pro obrábění širokého spektra materiálů, vynikající houževnatost.

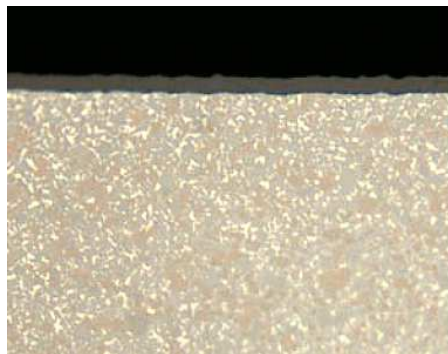
- Složení: Co 10,0%; WC zbytek
- Druh povlaku: TiAlN
- Síla povlaku: 2÷4 μm

CTP2120 (M20) – Materiál vhodný pro obrábění korozivzdorné oceli, dobrá houževnatost.

- Složení: Co 10,0%; míchaný karbid 2,0%; WC zbytek
- Druh povlaku: TiAlN
- Síla povlaku: 2÷5 μm

CTP2440 (P40, M35, K25) – Dobrá odolnost proti opotřebení a dobrá houževnatost. Vhodný pro obrábění korozivzdorných ocelí.

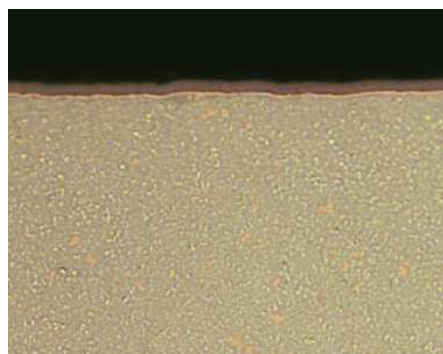
- Složení: Co 10,0%; míchaný karbid 2,0%; WC zbytek
- Druh povlaku: TiAlN
- Síla povlaku: 2÷5 µm



CM40



CM45



CTP2120



CTP2440

Obr. 6.5 Mikrostruktura PVD povlaků Ceratizit³

6.3 Sandvik Coromant

6.3.1 Materiály s povlaky CVD²³

GC2015 (P25, M15) – Vysoká odolnost proti opotřebení, dobrá odolnost proti difuznímu opotřebení a plastické deformaci za vysokých teplot.

- Druh povlaku: Ti(C,N) + Al₂O₃ + TiN
- Síla povlaku: 9 µm

GC3115 (P15, K15) – Dobrá odolnost proti plastické deformaci, vysoká tvrdost i za vysokých teplot, vhodný pro obrábění litin vysokými řeznými rychlostmi.

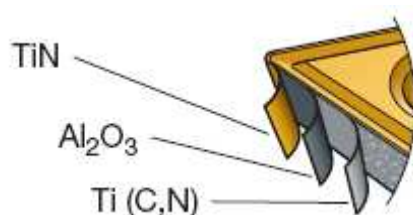
- Druh povlaku: Ti(C,N) + Al₂O₃

GC4015 (P15, M15) – Vynikající odolnost proti opotřebení, dobrá odolnost proti vylomení břitu, udržuje si dobrou řezivost i za vyšších teplot, vhodný pro obrábění šedé a tvárné litiny.

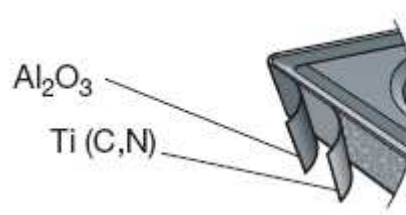
- Druh povlaku: $\text{Ti}(\text{C},\text{N}) + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$
- Síla povlaku: 14 μm

GC235 (P45, M40) – Dobrá odolnost proti vylomení břitu, dobrá odolnost proti opotřebení, vhodný pro obrábění korozivzdorných ocelí nízkými a středními řeznými rychlostmi.

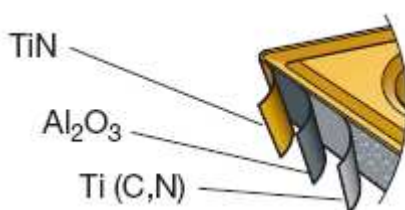
- Druh povlaku: $\text{TiC} + \text{Ti}(\text{C},\text{N}) + \text{TiN}$
- Síla povlaku: 2,5 μm



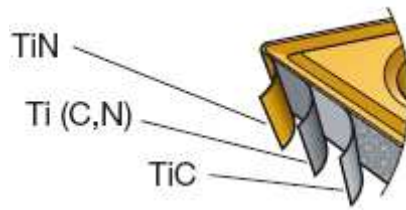
GC2015



GC3115



GC4015



GC235

Obr. 6.6 Schéma CVD povlaků Sandvik Coromant ²³

6.3.2 Materiály s povlaky PVD ²³

GC1020 (P25, M20) – Materiál je vhodný pro řezání závitů širokého spektra materiálů. Materiál vykazuje velmi dobrou řezivost díky vhodné kombinaci tenkého povlaku a jemnozrnného substrátu.

- Druh povlaku: TiN
- Síla povlaku: 1÷2 μm

GC1025 (P25, M15, S15) – Materiál je vhodný pro dokončovací operace korozivzdorných ocelí. Vyniká vysokou odolností proti vylamování břitu.

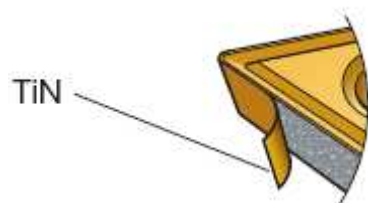
- Druh povlaku: $\text{TiAlN} + \text{TiN}$
- Síla povlaku: 4 μm

GC2035 (M25) – Velmi dobrá odolnost proti opotřebení a houževnatost. Je vhodný pro hrubovací operace a pro obrábění přerušovaným řezem.

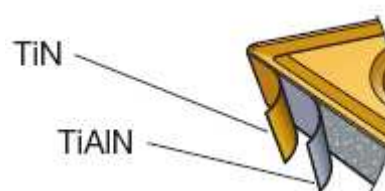
- Druh povlaku: TiAlN + TiN
- Síla povlaku: 4 μm

GC4125 (P30, M25, K30, S25) – Univerzální materiál s dobrou odolností proti opotřebení dobrou houževnatostí.

- Druh povlaku: TiAlN + TiN
- Síla povlaku: 4 μm



GC1020



GC1025, GC2035, GC4125

Obr. 6.7 Schéma PVD povlaků Sandvik Coromant ²³

Závěr

Povlakované slinuté karbidy patří v současnosti, díky širokému spektru aplikačních oblastí, k nejpoužívanějším řezným materiálům. Jejich řezné vlastnosti jsou ovlivněny vlastnostmi podkladového materiálu, typem povlaku a metodou jeho depozice. Důležitá je také úprava ostří a čištění před depozičním procesem, které hraje významnou roli zejména u PVD povlaků. Trendem poslední doby již není vytváření pouze jednovrstvých a vícevrstevných povlaků, ale zejména vytváření pokročilých multivrstvých, gradientních a nanokompozitních povlaků, které jsou určeny zejména pro ty nejnáročnější aplikace. V některých případech se navíc deponují speciální kluzné vrstvy, které díky nízkému koeficientu tření snižují řezné síly a opotřebení. Dalším důvodem depozice kluzných vrstev je možnost obrábět v některých případech bez použití procesních kapalin, díky čemuž odpadají náklady související s likvidací použitých kapalin a práce související s čištěním obrobků a obráběcích strojů.

Trendem u depoziční metody CVD je snižování pracovních teplot, což rozšiřuje oblast použitelnosti i na materiály, u kterých by jinak docházelo vlivem vysokých teplot k nežádoucímu ovlivnění struktury. Perspektivní jsou především plazmaticky aktivované CVD procesy, které využívají ionizaci par pro urychlení procesu povlakování a zlepšení adheze povlaku k podkladu. K posledním trendům také patří depozice diamantových povlaků o tloušťkách až 13 μm . Diamantové vrstvy vynikají nízkým koeficientem tření a velmi vysokou tvrdostí. Jsou určeny zejména pro obrábění hliníku a jeho slitin. Předmětem výzkumu není pouze hledání nových vrstev, ale také zdokonalování těch starých. Nyní je možné vytvářet např. vrstvy Al_2O_3 v tloušťkách až 8 μm , které se v kombinaci s jinými vrstvami uplatňují zejména v náročných hrubovacích operacích.

Vývoj v oblasti vytváření povlaků metodou PVD se ubírá několika hlavními směry. Trendem je vytváření multivrstvých povlaků a zlepšování vlastností současných povlaků dotováním různými chemickými prvky. Předmětem výzkumu je také snaha zjemňovat strukturu povlaku, čímž se zlepšuje odolnost proti šíření trhlinek. Kromě multivrstvých povlaků se vyvíjejí i nové gradientní a nanokompozitní vrstvy. Výzkum přináší nové gradientní a nanogradientní povlaky, zejména na bázi TiAlN , které se vyznačují velmi vysokou odolností proti oxidaci. Nanokompozitní vrstvy vynikají velmi vysokou tvrdostí a vynikající tepelnou stabilitou. Poslední směrem vývoje je výzkum zcela nových vrstev např. na bázi Al_2O_3 nebo snaha deponovat vrstvy, které bylo dosud možné vytvářet pouze metodou CVD. Do oblasti výzkumu nových vrstev patří také vrstvy DLC, jejichž vlastnosti a možnosti přípravy ještě nebyly úplně prozkoumány.

V některých případech může být výhodné vytvářet povlaky kombinací obou depozičních metod. Takové povlaky nabízí např. česká firma Pramet, jejíž materiály 6605 a 6615 nabízejí oproti běžným vrstvám lepší řezivost a delší trvanlivost.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BUNSHAH, R.F. et al. *Handbook of Hard Coatings*. Norwich, New York, USA: Notes Publications/William Andrew Publishing, LLC. 2001. 550 p. ISBN 0-8155-1438-7.
2. CERATIZIT USA Inc. Latrobe, Pennsylvania, USA. *Nástroje a břitové destičky pro soustružení* [online]. [2004] [cit. 2008-04-17]. Dostupný z WWW: <http://www.ceratizit.com/2623_ENG_HTML.htm>.
3. CERATIZIT USA Inc. Latrobe, Pennsylvania, USA. *Tools and inserts for turning* [online]. [2006] [cit. 2008-04-18]. Dostupný z WWW: <http://www.ceratizit.com/downloads/usa/pdf_pas_ctg_turning_catalogue.pdf>.
4. ČEP, R. *Výkonné řezné materiály* [online]. 2003 [cit. 2008-02-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vykonne-rezne-materialy>>.
5. ČVUT PRAHA - Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra fyzikální elektroniky. *Plazma a nové materiály* [online]. 1997 [cit. 2008-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/plazma/plazma.htm>>.
6. DEEPTHI, B. *A Report on Development of Superhard Nanocomposite Coatings by Unbalanced Magnetron Sputtering Process* [online]. [2006] [cit. 2008-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://nal-ir.nal.res.in/1129/01/reportdeepthi.pdf>>.
7. GRAHAM, D. *New Coatings Meet New Challenges* [online]. 1997 [cit. 2008-03-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.ctemag.com/dynamic.articles.php?id=134>>.
8. HARLOFF, J. *Beschichtung von Hartmetallen nach dem CVD-Verfahren* [online]. 1991-1992 [cit. 2008-03-21]. Dostupný z WWW: <<http://staff.ub.tu-berlin.de/~harloff/resint/engmat/cvdpro.pdf>>.
9. HOLUBÁŘ, P., JÍLEK, M., RŮŽIČKA, M. *Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření* [online]. 2004 [cit. 2008-03-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.shm-cz.cz/files/literatura/30.pdf>>.
10. 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.
11. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje* [online]. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2006 [cit. 2008-02-09]. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf>.
12. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. *MM Průmyslové spektrum – Speciální vydání*. Září 2004. ISSN 1212-2572. s. 84-96.
13. KŘÍŽ, A. *Tenké vrstvy* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam - materiálový výzkum. [2005] [cit. 2008-04-02]. Dostupný z WWW: <http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf>.
14. LIBRA, M. Naprašování tenkých vrstev . *Elektro* [online]. 2003, č. 7 [cit. 2008-03-16]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25484>.
15. LIMB, S.J., LAU, K.S., GLEASON, E. *Preparation of asymmetric membranes using Hot-Filament CVD* [online]. 2004 [cit. 2008-02-26]. Dostupný z WWW:

- <<http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?WO=2004041397&IA=WO2004041397&DISPLAY=DESC>>.
16. MATTOX, D.M. *Vacuum Deposition Processes* [online]. [2006] [cit. 2008-03-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.pfonline.com/articles/069901.html>>.
 17. PIERSON, H.O. *Handbook of Refractory carbides and Nitrides*. Westwood, New Jersey, USA: Noyes Publications. 1996. 340 p. ISBN 0-8155-1392-5.
 18. PLATIT AG. Grenchen, Switzerland. *Nanostructured Coatings and Processes on an Industrial Scale* [online]. 2002 [cit. 2008-04-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.shm-cz.cz/files/literatura/21.pdf>>.
 19. PODANÝ, P., KRÍŽ, A. *Předdepoziční procesy při výrobě tenkých vrstev* [online]. 2006 [cit. 2008-04-04]. Dostupný z WWW: <http://www.ateam.zcu.cz/podany_metal06.pdf>.
 20. PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk, ČR. *Historie a dnes* [online]. [2000] [cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.pramet.com/index.html>>.
 21. PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk, ČR. *Příručka obrábění* [online]. 2004 [cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <http://www.abarth.cz/novypramet/download/katalog/prirucka_cz.zip>.
 22. PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk, ČR. *Nová generace materiálů pro soustružení litiny a oceli* [online]. 2007 [cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.abarth.cz/novypramet/download/katalog/Katalog%20Novinky%202007%20CZ.zip>>.
 23. SANDVIK AB, Sandviken, Sweden. *Small Part Machining* [online]. [2007] [cit. 2008-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/smallparts/catalogue_04_2/ENG/full_catalogue.pdf>.
 24. ŠÍMA, M. *Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky* [online]. 2007 [cit. 2008-04-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.shm-cz.cz/files/literatura/41.pdf>>.
 25. ŠÍMA, M, et al. *Měření vlastností povlaků na nástrojích* [online]. 2004 [cit. 2008-04-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-vlastnosti-povlaku-na-nastrojich>>.
 26. ŠÍMA, M., ZINDULKA, O. *Měření vlastností povlaků na nástrojích* [online]. 2004 [cit. 2008-04-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.shm-cz.cz/files/literatura/29.pdf>>.
 27. UPADHYAYA, G.S. *Cemented Tungsten Carbides - Production, Properties, and Testing*. Westwood, New Jersey, USA: Noyes Publications. 1998. 403 p. ISBN 0-8155-1417-4.
 28. VALTER, J., VYSKOČIL, J. Plazmové povlakování (1. část). *MM - Průmyslové spektrum*. 5/2000. s. 18-19. ISSN 1212-2572.
 29. ZINDULKA, O. *Moderní metody povlakování nástrojů* [online]. 2004 [cit. 2008-03-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.shm-cz.cz/files/literatura/31.pdf>>.
 30. ZINDULKA, O. *PVD technologie přípravy otěruvzdorných a kluzných vrstev v průmyslových podmínkách* [online]. 2006 [cit. 2008-04-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.shm-cz.cz/files/literatura/37.pdf>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CVD		chemical vapour deposition
DLC		diamantu podobný uhlík
MTCVD		CVD metoda za středních teplot
MWPCVD		mikrovlnní plazmatická CVD metoda
NO		nástrojové oceli
PECVD		plazmaticky aktivovaná CVD metoda
PKD		polykrystalický diamant
PKNB		polykrystalický kubický nitrid bóru
PVD		physical vapour deposition
SK		slinuté karbidy
TEM		transmisní elektronová mikroskopie
VBD		vyměnitelné břitové destičky
XRD		rentgenová difrakce
J	[mA.cm ⁻²]	proudová hustota iontů
R	[μm]	poloměr kuličky
R _e	[Å.min ⁻¹]	rychlosti eroze terče
S	[atomy/iont]	výtěžnost naprašování
a	[μm]	tloušťka povlaku
m _t	[g]	atomová hmotnost
r ₁	[μm]	vnější poloměr výbrusu
r ₂	[μm]	vnitřní poloměr výbrusu