



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

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. JAROSLAV TUNA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jaroslav Tuna

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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 diplomové práce:

### **Metody povlakování rezných nástrojů**

v anglickém jazyce:

### **Coating methods for cutting tools**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na metody povlakování materiálu pro rezné nástroje (slnuté karbidy, cermety, rezná keramika, supertvrdé materiály) a vyhodnocení jednotlivých metod z hlediska technologických možností nanášení tvrdých vrstev a jejich mechanických, tepelných a chemických vlastností. Cílem práce je komplexní zpracování získaných technických poznatků a zejména vyhodnocení a porovnání pracovních podmínek (druh obráběného materiálu, rezné podmínky - vc, f, ap), které vybraní výrobci doporučují pro efektivní soustružnické aplikace svých povlakovaných nástrojových materiálů.

Cíle diplomové práce:

1. Charakteristika jednotlivých metod nanášení tvrdých otěruvzdorných povlaků
2. Vývojové trendy v oblasti povlakování rezných nástrojů
3. Hodnocení řezivosti nástroje
4. Povlakované slnuté karbidy v sortimentu výroby vybraných domácích a světových producentů nástrojů a nástrojových materiálů
5. Doporučené pracovní podmínky pro efektivní využití povlakovaných rezných materiálů

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]. [vid. 16. března 2006]. Dostupné z: <http://navier.engr.colostate.edu/pubs/DiamondHandbook.pdf>.
3. CSN-ISO 3685. Zkoušky trvanlivosti při soustružení jednobřitým nástrojem. Praha. Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993.
4. HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing s. r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
5. LEICHTFRIED, G., SAUTHOFF, G., SPRIGGS, G.E. Refractory, Hard and Intermetallic Materials. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2002. 267 p. ISBN 3-540-42961-1.
6. Technické materiály a prospekty firem, které se zabývají povlakováním: CemeCon, Ionbond, Oerlikon Balzers, Platit, SHM Šumperk.
7. Technické materiály a prospekty výrobcu rezných nástrojů: Ceratizit, Iscar, Kennametal, Korloy, Kyocera, Mitsubishi, Pramet Tools, Sandvik Coromant, Seco, Sumitomo, Walter, Widia.
8. Odborné časopisy International Journal of Refractory Metals & Hard Materials (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/02634368>), Journal of Materials Processing Technology (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09240136>), Materials Science and Engineering: A (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09215093>), 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 diplomové práce: doc. Ing. Anton Humár, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12

V Brně, dne 9.11.2011

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

# METODY POVLAKOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

## ANOTACE

Diplomová 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. Cílem této práce je komplexní zpracování získaných technických poznatků a zejména vyhodnocení a porovnání pracovních podmínek (druh obráběného materiálu, řezné podmínky –  $v_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ), které vybraní výrobci doporučují pro efektivní soustružnické aplikace svých povlakovaných nástrojových materiálů.

### Klíčová slova:

CVD a PVD metody, povlakování, povlakované slinuté karbidy, řezné nástroje, KBN, doporučené řezné podmínky.

## Coating methods for cutting tools

### ANNOTATION

This diploma thesis is aimed on methods of the coating cutting material (cemented carbide, cermets, cutting ceramic, super hard materials) and evaluation individual method regarding technological possibilities of deposition of hard coatings a their mechanical, thermal and chemical properties. The task of the work is full elaboration obtained technical knowledges and mainly evaluation a comparison of the work conditions (kind of the cutting materials, cutting conditions) that selected producers recommended for effective turning applications of the coatings cutting materials.

### Key words:

CVD and PVD methods, coatings, coating cemented carbide, cutting tools, KBN, recommended cutting conditions.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TUNA, J. *Metody povlakování řezných nástrojů: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 97 s.  
Vedoucí práce: doc. Ing. Anton Humár, CSc.

## **Prohlášení**

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

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Vysoké učení technické v Brně (VUT) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu VUT.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti VUT; v tomto případě má VUT právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Datum: 25.5.2012

Podpis:

## **PODĚKOVÁNÍ:**

*Dovoluji si touto cestou poděkovat svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Antonu Humárovi CSc. za odborné rady a nesmírnou trpělivost, kterou projevil při vypracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své přítelkyni Martině Novákové za pomoc při formálních a pravopisných úpravách a taktéž za trpělivost.*

# OBSAH

Úvod.....	10
1 Rozdělení nástrojových materiálů.....	11
1.1 Nástrojové oceli (NO).....	11
1.2 Slinuté karbidy.....	11
1.3 Řezná keramika (ŘK).....	13
1.4 Cermety.....	13
1.5 Supertvrdé řezné materiály.....	14
1.5.1 Polykrystalický diamant (PKD).....	14
1.5.2 Polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB).....	14
2 Povlakování.....	15
2.1 Chemická depozice vrstev – metody CVD.....	15
2.1.1 Plazmou urychlená depozice vrstev.....	17
2.1.1.1 PECVD za pomoci dielektrického bariérového výboje.....	18
2.1.2 Chemická depozice za středních teplot.....	19
2.1.3 Mikrovlnná plazmatická CVD.....	19
2.1.4 Metoda CVD využívající žhavicí vlákno.....	19
2.1.5 Laserem indukovaná CVD metoda.....	19
2.1.6 Metoda CVD s lavinovým plazmatickým výbojem.....	20
2.1.7 Metoda – epitaxe atomových vrstev.....	20
2.1.8 Metoda CVD za asistence aerosolu.....	20
2.1.9 Metoda CVD s organokovovými prekurzory.....	20
2.2 Fyzikální depozice vrstev – metoda PVD.....	21
2.2.1 Napařování (evaporation).....	22
2.2.1.1 Napařování za pomoci odporového ohřevu.....	22
2.2.1.2 Obloukové napařování.....	23
2.2.1.3 Napařování elektronovým paprskem.....	24
2.2.1.4 Laserem indukované napařování.....	24
2.2.2 Naprašování (sputtering).....	25
2.2.2.1 Naprašování doutnavým výbojem rovinné diody.....	27
2.2.2.2 Magnetronové naprašování.....	27
2.2.2.3 Radiofrekvenční naprašování.....	29
2.2.2.4 Naprašování iontovým paprskem.....	29
2.2.3 TetraBond technologie.....	30
2.2.4 Iontová implantace.....	30
3 Předdepoziční procesy při výrobě tenkých vrstev.....	32
3.1 Výběr materiálu.....	32
3.2 Mechanická úprava řezných hran.....	32
3.2.1 Pískování.....	32
3.2.2 Kartáčování.....	33
3.2.3 Finišování za pomoci gumových disků.....	34
3.2.4 Omílání v granulátech.....	34
3.2.5 Leštění po povlakování.....	34
3.3 Chemické čištění.....	35
3.3.1 Odmaštění.....	35
3.3.2 Mokré čištění.....	35
3.4 Stripping.....	35
3.5 Iontové čištění.....	35
3.6 Vliv tvaru břitu řezné nástroje na tenkou vrstvu.....	36
4 Druhy povlaků.....	38

4.1	Jednovrstvé povlaky .....	39
4.2	Strukturované povlaky .....	40
4.2.1	Gradientní a nanogradientní vrstvy .....	40
4.2.2	Multivrstvy .....	40
4.2.3	Nanokompozitní vrstvy .....	41
4.2.4	Nanovrstvy .....	41
4.3	Povlak z kubického nitridu bóru .....	42
4.4	Povlaky z diamantu .....	43
4.5	Povlaky DLC .....	44
4.6	Kluzné povlaky .....	45
4.7	Nejnovější trendy v povlakování.....	46
4.7.1	Povlakované slinuté karbidy s funkčně gradientní vrstvou.....	47
4.7.2	Povlaky z kubického nitridu bóru .....	50
4.7.3	Nanokompozitní povlak cBN – TiN .....	51
4.7.4	Trojité vrstvy – TripleCoating.....	52
4.7.5	Nanokompozitní povlaky na bázi Cr – Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .....	52
4.7.6	Povlak TiN s mikrozásobníky tuhého maziva.....	54
4.7.7	Multivrstvy TiAl/TiB <sub>2</sub> připravené metodou IBAD .....	57
4.7.8	Fulereny a Grafen .....	58
5	Zkoušení povlaků .....	60
5.1	Tvrdost povlaku.....	60
5.2	Tloušťka povlaku .....	60
5.3	Adheze a koheze povlaku.....	61
5.4	Kluzné vlastnosti povlaku .....	62
5.5	Drsnost povlaku.....	63
5.6	Odolnost proti oxidaci .....	63
5.7	Tepelná stabilita .....	64
5.8	Chemická stabilita .....	64
5.9	Chemické složení .....	64
6	Hodnocení řezivosti nástroje .....	65
6.1	Opotřebení řezných nástrojů .....	65
6.1.1	Mechanismy opotřebení .....	65
6.1.2	Kritéria opotřebení .....	66
6.2	Trvanlivost řezného nástroje .....	67
7	Povlakované slinuté karbidy v sortimentu výroby vybraných domácích a světových producentů nástrojů .....	69
7.1	Výběr z nabízeného sortimentu firmy PRAMET.....	69
7.1.1	Povlakované materiály pro soustružení .....	69
7.1.2	Doporučené řezné podmínky podle skupin ISO .....	70
7.2	Výběr z nabízeného sortimentu firmy SANDVIK – COROMANT.....	73
7.2.1	Povlakované materiály pro soustružení.....	73
7.2.2	Doporučené řezné podmínky podle skupin ISO .....	75
7.3	Výběr z nabízeného sortimentu firmy ISCAR METALS .....	77
7.3.1	Povlakované materiály pro soustružení.....	77
7.3.2	Doporučené řezné podmínky podle skupin ISO .....	79
7.4	Porovnání doporučených řezných podmínek u vybraných významných výrobců nástrojových materiálů .....	82
8	Analýza trvanlivosti řezného nástroje při změně povlaku .....	86
8.1	Popis problému.....	86
8.2	Popis nástroje .....	86



8.3 Obrobek .....	86
8.4 Výrobní zařízení .....	88
8.5 Návrh řešení .....	89
8.6 Popis testu .....	89
8.7 Výsledky testu .....	89
8.7.1 Průběh provozní zkoušky .....	89
8.7.2 Mercedes test .....	90
8.7.3 Analýza tloušťky povlaku .....	91
8.7.4 Vyhodnocení testu .....	91
Závěr .....	92
Seznam použité literatury .....	93
Seznam použitých zkratk .....	96
Seznam použitých symbolů .....	97

# Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na metody povlakování materiálů pro řezné nástroje. V úvodu by bylo vhodné vysvětlit důvod pro povlakování řezných nástrojů.

Povrch řezného nástroje má zásadní důležitost z mnoha důvodů. V první řadě se zatížení každé součásti téměř vždy dostává do materiálu jejím povrchem, při únavovém zatížení dochází převážně k iniciaci trhliny na povrchu součásti. V neposlední řadě je také korozní odolnost materiálu dána korozní odolností jeho povrchu.

Vhodným povlakováním nástrojů získáme nástroje s úplně jinými mechanickými vlastnostmi. Především povlak o tloušťce v řádech jednotkách  $\mu\text{m}$  se „pyšní“ vlastnostmi daleko lepšími než samotný substrát z téhož materiálu, to především z důvodů jemnější zrnitosti, snížení strukturních poruch a neposledně také z důvodu neobsahování pojiva. Z těchto důvodů je povlak tvrdší, hladší a má větší odolnost proti abrazivnímu opotřebení, vyšší odolnost proti oxidačním vlivům apod.

Tato diplomová práce se zabývá depozicí těchto povlaků především za pomoci plazmatických výbojů, a to pomocí metod PVD (Physical Vapour Deposition = fyzikální napařování) a CVD (Chemical Vapour Deposition = chemické napařování z plynné fáze).

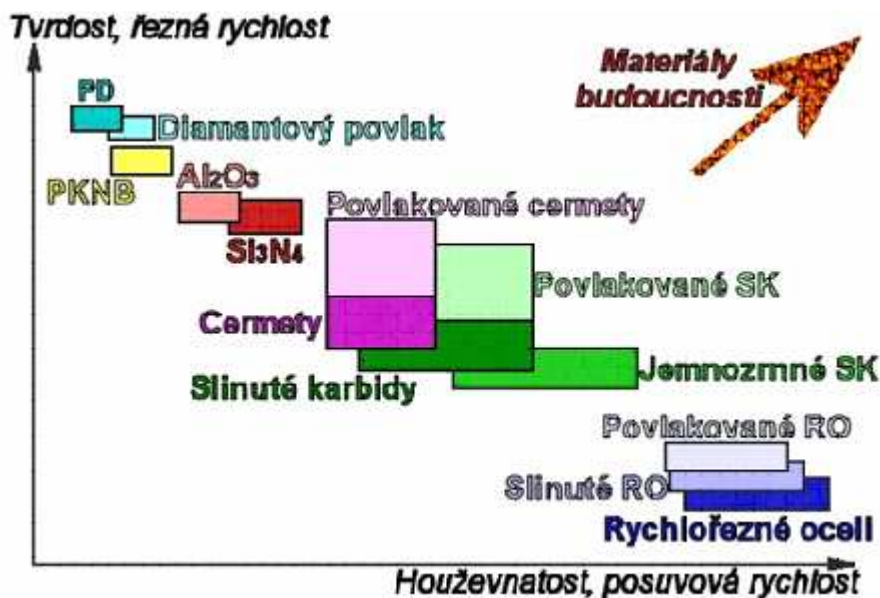
Plazma přináší nesporné výhody při depozici těchto otěruvzdorných tvrdých vrstev. Především běžné chemické reakce se odehrávají většinou za atmosférického tlaku. Teploty při těchto reakcích se pohybují v nepřilíživě širokém rozmezí. Toto omezení klasické chemie odstraňuje plazmová chemie. Nejenže se teploty mohou pohybovat v širokém rozmezí řádově jednotek kelvinů až po desetitisíce kelvinů, tak stejně i tlak může být v rozptylu od vakua až po tlak atmosférický. Díky tomu, že reaktanty jsou již před reakcí ionizované, stávají se reaktivními také látky, které jsou za běžných podmínek inertní. Z této teorie pak vyplývá, že díky plazmatu můžeme vytvořit „exotické“ sloučeniny a struktury, které se běžně v přírodě nevy-skytují.

# 1 Rozdělení nástrojových materiálů

Soudobé řezné nástroje pro strojní obrábění jsou vyráběny z rozmanitých materiálů od nástrojových ocelí, přes slinuté karbidy (bez povlaků i s tvrdými otěruvzdornými povlaky), cermety (včetně povlakovaných), řeznou keramiku, (včetně povlakované) až po supertvrdé materiály jakými jsou syntetický diamant a kubický nitrid bóru<sup>1</sup>.

## 1.1 Nástrojové oceli (NO)

Mezi první nástrojové materiály patří nástrojové oceli. Ty můžeme rozdělit na nástrojové uhlíkové, slitinové a rychlořezné oceli. Nástrojové oceli vynikají vysokou houževnatostí, ale v dnešní době již nestačí se svojí tvrdostí, odolností proti opotřebení a s tím související nízkou řezivostí. Ale i přesto, pokud pomineme uhlíkové nástrojové oceli, které ztratily na významu, rychlořezné oceli stále nacházejí široké spektrum uplatnění, to především díky nízké pořizovací ceně a vysoké houževnatosti oproti ostatním nástrojovým materiálům. Povlakováním těchto materiálů je možné zvýšit jejich tvrdost a řeznou rychlost – viz obr.1.1. Mikrostruktura nástrojové oceli je na obr. 1.2.



Obr. 1.1. Vliv mechanických vlastností řezného materiálu na pracovní podmínky<sup>1</sup>

## 1.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou materiály obsahující tvrdé částice (karbidy) v kovovém pojivu (nejčastěji Co), které vykazují daleko větší tvrdost, odolnost oproti opotřebení, vyšší řeznou rychlost a vyšší životnost oproti nástrojovým ocelím. Jsou vyráběny práškovou metalurgií. Mají poměrně vysoký modul pružnosti, ohybovou pevnost a lomovou houževnatost, a proto mohou být použity nejen pro obrábění vysokými posuvovými rychlostmi, ale i pro těžké přerušované řezy. Povlakované slinuté karbidy lze považovat za jednoduché kompozitní materiály, protože jsou složeny z pevného a relativně houževnatého karbidového podkladu a termochemicky stabilního, tvrdého povlaku. Výsledkem jsou řezné materiály pro nejširší aplikace při vysokých řezných i posuvových rychlostech, které umožňují velké úběry materiálu a jsou vhodné i pro přerušované řezy. Typická struktura slinutého karbidu je znázorněna na obr. 1.4.

Slinuté karbidy se - jakožto nejpoužívanější obráběcí materiál - rozdělují dle normy ČSN ISO 513 do šesti rozlišených skupin, ve kterých jsou schovány další podskupiny, jak

ukazuje tab. 1.1. Jednotlivé podskupiny s číslem značí obsah kobaltového pojiva. S rostoucím číslem podskupiny se zvyšuje obsah pojivého kovu, roste houževnatost a pevnost v ohybu, naopak klesá tvrdost a otěruvzdornost, z hlediska doporučených řezných podmínek klesá řezná rychlost a roste rychlost posuvu a průřez odebírané třísky<sup>1</sup>.

Tab. 1.1 Základních rozdělení slinutých karbidů do skupin<sup>1</sup>

Skupina	Podskupina	Základní chemické složení	Efektivní aplikace pro obráběný materiál
<b>P</b>	P01, P05, P10, P15, P20, P25, P30, P35, P40, P45, P50.	WC (30-82) % +TiC (8-64) % +TaC.NbC +Co (5-17) %	Slinuté karbidy určeny pro obrábění, které tvoří dlouhou třísku, jako jsou uhlíkové oceli, slitinové oceli, feritické korozivzdorné oceli. Řezný proces je obvykle doprovázen velkými řeznými silami a značným opotřebením na čele.
<b>M</b>	M01, M05, M10, M15, M20, M25, M30, M35, M40.	WC (79-84) % +TiC (5-10) % +TaC.Nb.C (4-7) % +Co (6-15) %	Slinuté karbidy pro univerzální použití a je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou a střední třísku, jako jsou lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli, tvárné litiny apod. Řezné síly dosahují středních až vysokých hodnot, dochází k vydrolování ostří.
<b>K</b>	K01, K05, K10, K15, K20, K25, K30, K35, K40.	WC (87-92) % +Co (4-12) % +TaC.NbC	Slinuté karbidy určené pro obrábění materiálů, které vytvářejí krátkou, drobnou třísku zejména pro šedé litiny neželezné slitiny a nekovové materiály. Řezné síly jsou obvykle relativně nízké a převládá abrazivní a adhezní opotřebením
<b>N</b>	N01, N05, N10, N15, N20, N25, N30.		Slinuté karbidy pro obrábění neželezných slitin na bázi hliníku, hořčíku nebo mědi, obrábění plastů, kompozitů a dřeva.
<b>S</b>	S01, S05, S10, S15, S20, S25, S30.		Slinuté karbidy pro obrábění slitin titanu, žárovečných slitin na bázi niklu, kobaltu nebo železa.
<b>H</b>	H01, H05, H10, H15, H20, H25, H30.		Slinuté karbidy pro obrábění zušlechťených a kalených ocelí s větší pevností jak 1500 MPa a obrábění tvrzených litin.

Skupina **K** je určena pro obrábění materiálů, které vytvářejí krátkou, drobnou třísku (zejména šedé litiny, neželezné slitiny ap.) Důvodem je to, že jedinou tvrdou strukturní složkou této skupiny je karbid wolframu, který má sice tvrdost za pokojové teploty srovnatelnou s většinou ostatních karbidů, ale s rostoucí teplotou její hodnota klesá rychleji než u jiných karbidů, a proto nejsou vhodné pro obrábění materiálů tvořících dlouhou třísku, která mnohem více tepelně zatěžuje čelo nástroje kvůli větší ploše styku s čelem nástroje.

Skupina **P** je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku např. korozivzdorné oceli. Tato skupina obsahuje velké množství karbidu titanu a tantalu, které zlepšuje odolnost proti vymílání na čele nástroje.

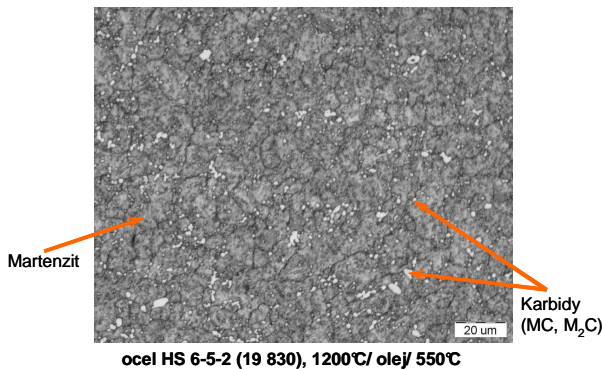
Skupina **M** má univerzální použití a je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou a střední třísku jako jsou lité oceli tvárné litiny ap.

Skupiny **N,S,H** slouží k obrábění speciálních materiálů viz tab.1.1

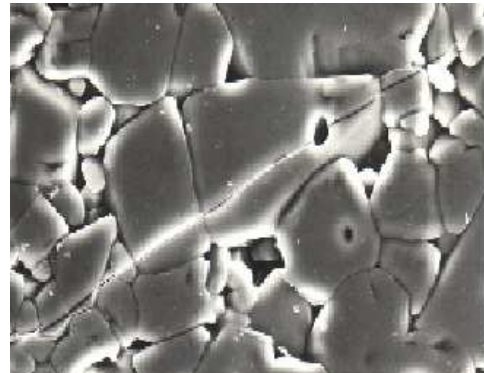
Uvedená norma tedy pouze specifikuje použití slinutých karbidů v jednotlivých základních skupinách. Není proto možné podle této normy kontrolovat vlastnosti případně složení, a tím vyjádřit materiály, které nesplňují požadavky normy, případně hodnotit jednotlivé výrobce a dodavatele podle toho, jak jejich výrobky převyšují minimální hodnoty předepsaných parametrů.<sup>1</sup>

### 1.3 Řezná keramika (ŘK)

Řezná keramika patří mezi velmi tvrdé materiály. Především se používá keramika na bázi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Si}_3\text{N}_4$  vyráběná práškovou metalurgií. Materiály na bázi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jsou využívány pro obrábění vysokými řeznými rychlostmi a nízkými posuvovými rychlostmi, protože mají vysokou tvrdost za tepla a vysokou termochemickou stabilitu, ale rovněž disponují i nízkou houževnatostí. Řezná keramika na bázi  $\text{Si}_3\text{N}_4$  má vyšší houževnatost, a proto umožňuje použití vyšších posuvových rychlostí než keramika  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Její užití je ovšem omezeno pouze na obrábění šedé litiny, neboť při obrábění ocelí (s výjimkou směsných oxidových keramik) vykazuje rychlé opotřebení<sup>1</sup>. Mikrostruktura řezné keramiky je znázorněna na obr. 1.3.



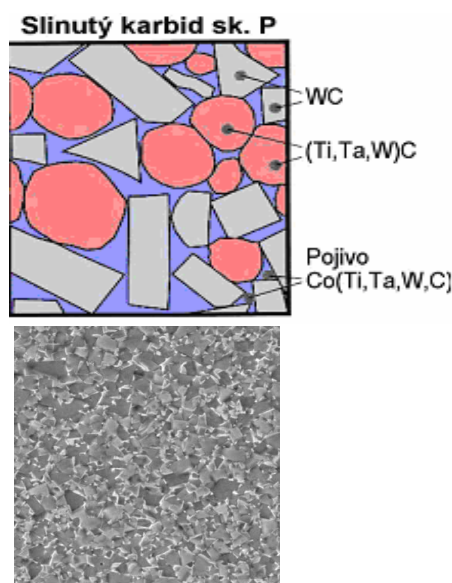
Obr. 1.2 Mikrostruktura rychlořezné oceli<sup>54</sup>



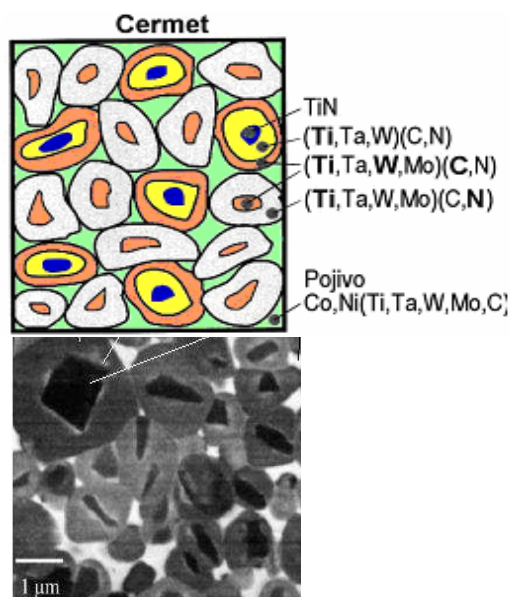
Obr. 1.3 Mikrostruktura  $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>55</sup>

### 1.4 Cermety

Cermety jsou řeznými materiály vyráběnými práškovou metalurgií stejně jako slinuté karbidy, obsahují velmi tvrdé částice (karbidy, nitridy, karbonitridy) v kovovém pojivu (nikl, kobalt). Pro cermety je typická plášťová struktura odlišná od slinutých karbidů – viz obr.1.5. Cermety mohou být užity pro vyšší posuvové rychlosti než řezná keramika a pro řezné rychlosti na úrovni povlakovaných slinutých karbidů. Vzhledem k nižší houževnatosti jsou však jejich aplikace většinou omezeny na lehké a střední řezy. Při vyšších posuvech se začíná projevovat jejich nižší tepelná vodivost, dochází k vyšší koncentraci tepla v oblasti špičky, a tím i k rychlému plastickému porušení břitu.<sup>1</sup>



Obr. 1.4 Struktura slinutého karbidu<sup>1</sup>



Obr. 1.5 Struktura cermetu<sup>1</sup>

## 1.5 Supertvrde řezné materiály

Pod tímto názvem se skrývají dva velmi tvrdé a drahé materiály, a to polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB) a polykrystalický diamant (PKD).

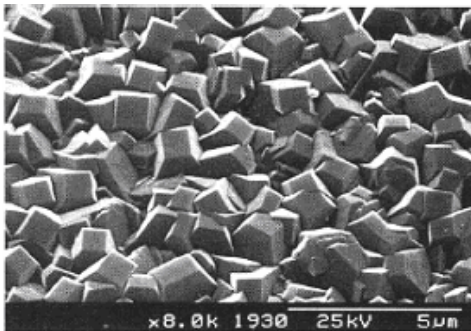
### 1.5.1 Polykrystalický diamant (PKD)

Je nejtvrdějším dosud známým materiálem, který taktéž vykazuje vysokou odolnost proti opotřebení. Materiál je tvořen malými krystalky (obr. 1.7) spojenými vhodným pojivem. Především se používá nejen k obrábění keramických, kompozitních materiálů, ale i k obrábění hliníkových slitin, především slitin s příměsí křemíku. Není vhodný k obrábění ocelí z důvodů vysoké afinity uhlíku k železu při teplotě nad 600 °C.<sup>8</sup>

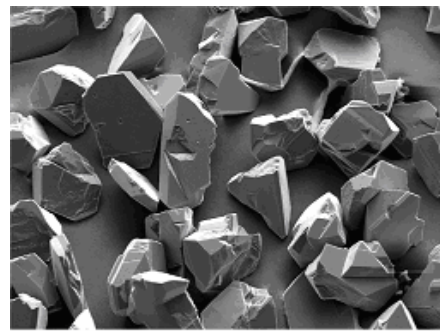
### Polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB)

Jako jediný materiál se svojí tvrdostí blíží tvrdosti diamantu. Nejenže vykazuje velice vysokou tvrdost, ale mezi jeho přednosti patří především i vysoká odolnost proti opotřebení. Využívá se především na obrábění kalených ocelí s tvrdostí nad 45 HRC. Jeho velkou nevýhodou je vysoká cena, z tohoto důvodu se nevyrábí celé břitové destičky, ale pouze malé roušky připájené na destičku<sup>8</sup>. Krystaly syntetického diamantu jsou na obr. 1.6.

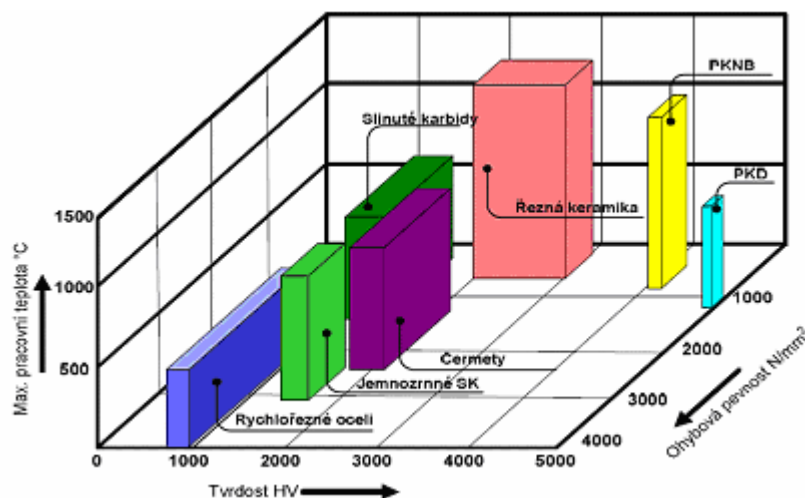
Vlastnosti nástrojových materiálů jsou graficky shrnuty na obr. 1.8, ze kterého je zřejmé, že řezná keramika je materiálem pro aplikace za nejvyšších teplot, avšak má nejnižší ohybovou pevnost. Naproti tomu nástrojové oceli vykazují nejvyšší ohybovou pevnost, ale s maximální pracovní teplotou nepřesahující 500 °C.<sup>8</sup>



Obr.1.6 Krystaly syntetického diamantu<sup>8</sup>



Obr. 1.7 Krystaly kubického nitridu bóru<sup>8</sup>

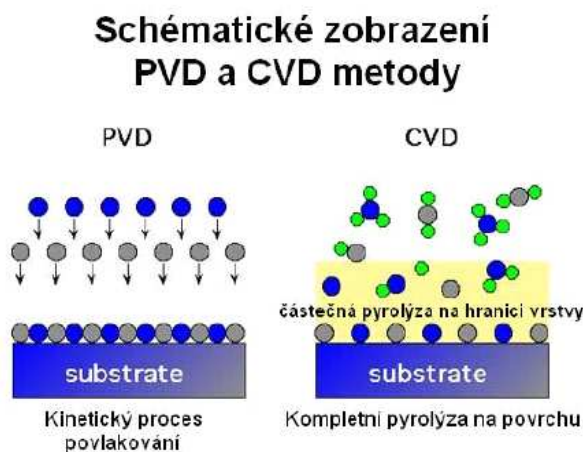


Obr. 1.8 Vlastnosti nástrojových materiálů<sup>1</sup>

## 2 Pvlakování

Zatížení každé součásti se dostává do materiálu téměř vždy povrchem, iniciace trhliny začíná na povrchu, tření je vždy dáno drsností povrchu, odolnost materiálu proti korozi je taktéž dána odolností jejího povrchu, z čehož tedy plyne, že povrch má významnou funkční vlastnost a jeho úpravou, modifikací měníme vlastnosti celého materiálu. Fyzikálním povrchem je ta část tělesa poblíž rozhraní, jejíž vlastnosti jsou odlišné od vnitřního objemu díky nesymetrii působících sil a jejíž tloušťka (v jednotkách nanometrů) je malá ve srovnání s rozměry.

V následující části je uveden přehled metod, které se využívají k depozici tvrdých, ořezávacích tenkých vrstev. Jedná se především o metody chemického napařování z plynné fáze - CVD (Chemical Vapour Deposition) a fyzikální napařování – PVD (Physical Vapour Deposition). Schématické zobrazení metody PVD a CVD je na obr. 2.1. Podrobnější popis jednotlivých metod je v následující kapitole.



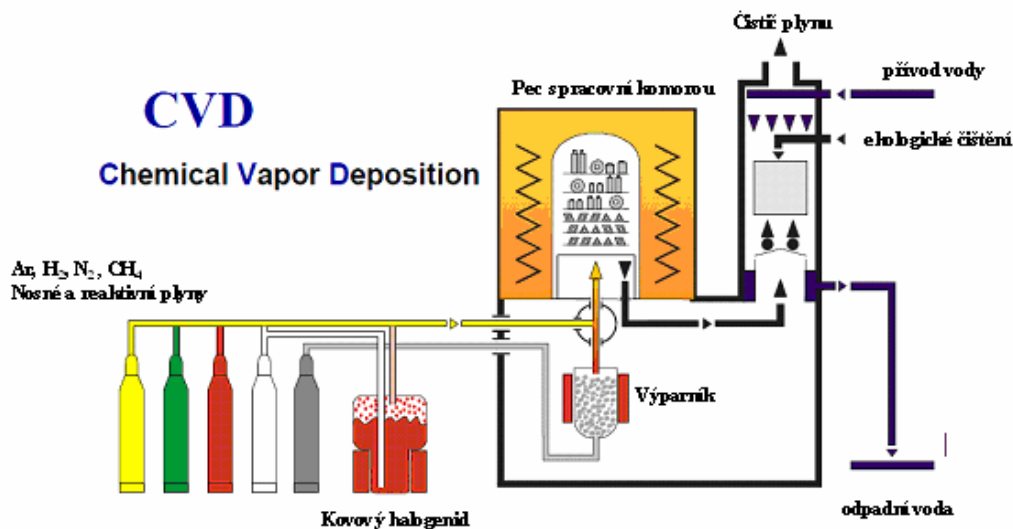
Obr. 2.1 Způsob přípravy vrstev u PVD a CVD metody <sup>12</sup>

### 2.1 Chemická depozice vrstev – metody CVD

Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition) – chemické napařování z plynné fáze, je založena na rozkladu chemických sloučenin v blízkosti jeho povrchu (obr. 2.1). První aplikace na řezné nástroje byla zahájena v 60. letech 20. století. Prvním materiálem povlaku byl karbid titanu<sup>1,2</sup>.

Jedná se o chemický proces povlakování, který je založen na reakci plynných chemických sloučenin a následném uložení produktů heterogenní reakce na tomto povrchu. Základním požadavkem přitom je, aby výchozí plyny obsahovaly stabilní, ale přitom prchavou sloučeninu, která se v důsledku přivedené energie (ohřevem, plazmovým obloukem, laserem) chemicky rozkládá (např. kovový halogenid,  $\text{TiCl}_4$ ,  $\text{ZrCl}_4$ ,  $\text{AlCl}_3$ ). Produkty jejího rozkladu jsou pak ukládány na ohřátý povrch povlakovaného předmětu a působí zde jako katalyzátor<sup>1,2</sup>.

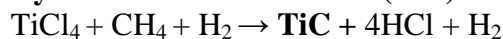
Aby proběhla požadovaná reakce (vytvoření vrstvy povlaku), musí být v plynech obsažen i nekovový reaktivní plyn ( $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ). Poměrně velkým procentem je v přiváděných plynech zastoupen též nosný plyn (např.  $\text{Ar}$ ,  $\text{H}_2$ ), který dopravuje danou směs plynů k povlakovanému předmětu, umožňuje řízení celého procesu a výrazně ovlivňuje rychlost růstu vrstvy povlaku. Cíleným řízením obsahu plynné směsi druhu a množství jednotlivých složek v čase lze dosáhnout plynulé změny ve složení povlakové vrstvy a vytvářet tak multivrstvé povlaky<sup>1,2,51</sup>. Schéma celého povlakovacího zařízení je znázorněno na obr. 2.2



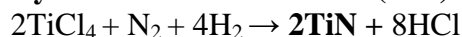
Obr. 2.2 Schéma povlakovacího zařízení metodou CVD<sup>5</sup>

Chemické reakce, při kterých vznikají základní CVD povlaky, lze popsat následujícími rovnicemi<sup>2</sup>:

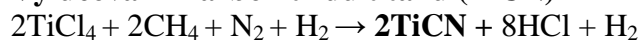
#### Vylučování karbidu titanu (TiC)



#### Vylučování nitridu titanu (TiN)



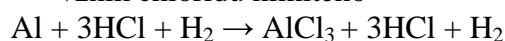
#### Vylučování karbonitridu titanu (TiCN)



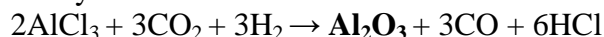
Zdrojem titanu ve všech třech případech je nažloutlá tekutina - chlorid titaničitý, který je přiváděn z nádrže do výparníku a jeho teplota se blíží teplotě varu. Následně jsou jeho páry unášeny nosným plynem  $\text{H}_2$  a reaktivním plynem  $\text{CH}_4$  pro vyloučení TiC nebo  $\text{N}_2$  pro vyloučení TiN. Kombinací obou případů se vylučuje TiCN.

#### Vznik vrstvy $\text{Al}_2\text{O}_3$

- vznik chloridu hlinitého



- vylučování oxidu hlinitého



Chemickou reakcí plynné kyseliny chlorovodíkové a hliníku v pevném stavu vzniká chlorid hlinitý, který oxiduje na oxid hlinitý a jako vedlejší produkt vzniká opět kyselina chlorovodíková a oxid uhelnatý. Při vylučování oxidu hlinitého, dochází jak k modifikaci  $\alpha$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , (stabilní, mřížka hexagonální), tak i k modifikaci  $\kappa$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , (metastabilní, mřížka ortorombická)<sup>26</sup>.

Jak je patrné z výše uvedených rovnic, vzniká při reakcích vždy nějaký halogenovodík – nejčastěji chlorovodík nebo fluorovodík. To jsou plyny, které ve styku s vodou vytváří poměrně silné kyseliny. Vzniká kyselé prostředí, čemuž je nutné přizpůsobit konstrukci celého zařízení především vývěv<sup>26</sup>.

Jedním z omezení povlakovací metody CVD je to, že povlakování probíhá za vysokých teplot 900 – 1200 °C, což vede k omezení povlakování pouze slinutých karbidů popř. cermetů. Nástrojové oceli se touto metodou většinou nepovlakuji z důvodu ovlivnění substrátu. Vzhledem k tomu, že nejen struktura ale i složení vznikající vrstvy se dá jen stěží měnit, nelze tímto způsobem získat povlaky s kombinací různých typů kovů ( $\text{TiAlN}$ )<sup>26</sup>.



Mezi další omezení patří skutečnost, že není možné povlakovat ostré hrany z důvodů zbytkových tahových napětí v povlaku. Naopak k výhodám patří především velmi dobrá adheze mezi podkladem a povlakem a možnost nanesení vrstev o tloušťce 5 - 13  $\mu\text{m}$ . Rychlost růstu povlaku je mimo jiné úměrná tlaku růstu v reaktoru, přičemž k většímu přírůstku hmotnosti dochází v místě kontaktu povlaku s podložkou. Tento jev je vysvětlován tím, že v počáteční fázi povlakování TiC dochází k odebírání volného uhlíku ze substrátu což vede k oduhličení slinutého karbidu a vytváření  $\eta$  – fáze pod povrchem povlaku, což je nežádoucí, protože tato fáze se vyznačuje vyšší tvrdostí. To vede ke snižování houževnatosti slinutého karbidu.

K tomu, abychom vyloučili nebo aspoň omezili vznik  $\eta$  – fáze, lze použít následující metody na začátku povlakování<sup>2</sup>:

- použít slinutý karbid s vyšším obsahem volného uhlíku, avšak hrozí zde uhlíková porezita;
- před vlastním povlakování je možno nasytit povrch substrátu uhlíkem např. za pomoci metanu a následně povlakovat TiC;
- zahájení povlakování TiN, který má vynikající odolnosti proti difuzi, takže vrstva TiN slouží jako difuzní bariéra. Nevýhodou je nižší přilnavost TiN k substrátu než TiC;
- povlakovat metodou MTCVD.

Kromě konvenční metody CVD jsou známé i její další modifikace (PECVD, MWP-CVD, MTCVD, HFCVD, LICVD) lišící se rozdílnou aktivací, které přinášejí především výhodu takovou, že deponování probíhá za snížených teplot.

### 2.1.1 Plazmou urychlená depozice vrstev

PECVD (plasma enhanced chemical vapour deposition) plazmaticky aktivovaná CVD metoda je kombinací chemických a fyzikálních procesů. Jedná se v podstatě o přechod mezi CVD a PVD. Tato metoda byla vyvinuta v 60. letech 20. století pro výrobu polovodičů, především pro depozici nitridu křemíku.<sup>17,18</sup>

Největším rozdílem oproti metodě CVD a zároveň také výhodou je nižší teplota procesu. To byl jeden z nejdůležitějších důvodů, proč tato metoda byla vyvinuta. Touto metodou dochází k vytváření povlaků pomocí plazmy, naopak chemická CVD je metodou bezplazmovou. Tato plazmochemická metoda je založena na procesu probíhající v plazmatu za sníženého tlaku  $10^0 - 10^3$  Pa, za zvýšení energie plynné atmosféry v povlakovací komoře pomocí její ionizace a aktivace v plazmatickém výboji<sup>17,18</sup>.

Takto chemicky aktivovaná plazma umožňuje snížit teplotu potřebnou pro ukládání povlaku na povrchu substrátu. Plazmu lze vytvořit pomocí vnějšího elektrického napájecího zdroje (nízkofrekvenční střídavé napětí, vysokofrekvenční střídavé napětí, stejnosměrné napětí, pulzní stejnosměrné napětí). Za nejvýhodnější metodu je považována metoda pulzní, u které je vysoké stejnosměrné napětí přiváděno na katodu ve formě pečlivě řízeného sledu pulzů<sup>17,18</sup>.

Pulzy zapálí plazmu bez nebezpečí vzniku elektrických oblouků. V důsledku možnosti řízení jejich délky a přestávek mezi nimi lze užít právě takové urychlující napětí, které postačuje pro vytvoření povlaku s požadovanými parametry a nezpůsobuje přitom příliš vysoký ohřev substrátu<sup>1</sup>.

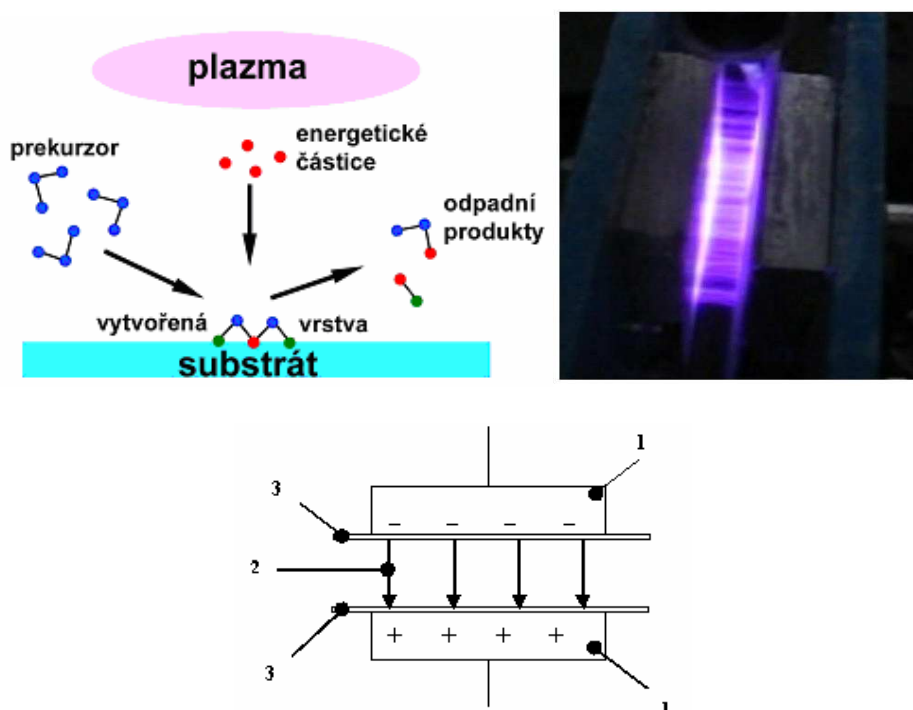
Díky tomu, že proces probíhá při nižší teplotě než u CVD, můžeme pro depozici použít i substráty s nízkou teplotou tání, např. hliník nebo organické polymery. Díky nízké teplotě depozice je potlačen vliv rozdílné tepelné roztažnosti substrátu a filmu. Při nízké teplotě vznikají amorfnní nebo polykrystalické vrstvy, které mají často velmi výhodné vlastnosti<sup>1</sup>.

Za zmínku ještě stojí plazmochemická depozice vrstev PECVD za pomoci bariérového výboje.

### 2.1.1.1 PECVD za pomoci dielektrického bariérového výboje (DBD – dielectric barrier discharge)

Bariérový výboj je využíván jako zdroj nízkoteplotního nerovnovážného plazmatu. Je nutné využít střídavého zdroje napětí, ve kterém dochází ke změně polarity napětí s každou půlvlnou. Samotný výboj je tvořen mnohými nezávislými mikrovýboji, které si lze představit jako plazmové kanálky. Charakter těchto plazmových kanálků (obr. 2.3) se podobá doutnavému výboji. Vzniknou tehdy, když intenzita elektrického pole dosáhne průrazného napětí. V oblasti mikrovýboje dochází k hromadění povrchového náboje. To způsobí lokální pokles intenzity, což se projeví zhasnutím tohoto výboje. Po obrácení polarity nahromaděný povrchový náboj z předchozího výboje zvyšuje lokální intenzitu el. pole a dojde ke vzniku mikrovýboje, což je důvodem proč tyto výboje vznikají na původních místech. Celý proces se opakuje. V okolí mikrovýbojů tedy vzniká nízkoteplotní nerovnovážná plazma. Ta obsahuje různé chemicky aktivní částice, mezi které se řadí elektrony s vysokou energií, ionty a volné radikály, čehož se využívá např. pro opracování povrchu materiálu nebo k depozici vrstev. Typická pro nerovnovážné plazma je skutečnost, že teplota lehkých částic (elektronů) je nižší, než teplota těžkých částic (atomů). Je to dáno tím, že atom má větší hmotnost (až 1000 krát) než elektron, to znamená, že nedosáhne takové rychlosti ani teploty jako elektron, a pokud dojde ke zhasnutí výboje, zbrzdí se rychleji než elektron a po opětovném zapálení nedosáhne dostatečné rychlosti, tudíž ani teploty. Znamená to tedy, že čím větší bude frekvence střídavého napětí, bude se výboj podobat elektrickému výboji se zdrojem stejnosměrného napětí pouze s tím rozdílem, že teplota bude daleko nižší, což je dáno nižší ionizací, zhasínáním výboje a opětovným zapálením. Celý proces probíhá za atmosférického tlaku, což je další výhodou oproti výše zmiňovaným metodám, protože se nemusí používat drahé vakuové zařízení, které zvyšuje náklady celého procesu<sup>51</sup>. Schéma depozice vrstev za atmosférického tlaku s odpadními produkty je na obr. 2.3.

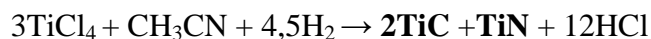
Tato metoda zatím není příliš vhodná k depozici tvrdých, ořezavodných povlaků. Využití této metody je převážně v povlakování měkkých vrstev např. TiO<sub>2</sub>.



Obr. 2.3 Princip PECVD metody za atmosférického tlaku a filamentární výboj; 1 - kovová elektroda z Al slitiny, 2 - filamentární výboj, 3 - dielektrická bariéra (destička z korundu)<sup>51</sup>

## 2.1.2 Chemická depozice za středních teplot

MTCVD metoda (Middle Temperature Chemical Vapour Deposition – CVD za střední teploty). Na rozdíl od konvenční CVD technologie, při které teploty nanášení povlaků přesahují hodnoty 1000 °C, umožňuje technologie MTCVD nanášet povlaky z plynné fáze za teplot podstatně nižších (700 - 850 °C). Díky nižším teplotám nevznikají ve vrstvě příliš velká pnutí a nedochází téměř k žádné tvorbě trhlinek. Zatímco u metody CVD je používán plynný metan CH<sub>4</sub> (zdroj uhlíku) a plynný dusík, MTCVD metoda využívá jako vstupní sloučeninu acetonitril (CH<sub>3</sub>CN, zdroj uhlíku a dusíku), nebo též vysoce toxický a hořlavý metylkyanid. Zdrojem titanu je u obou metod chlorid titaničitý (TiCl<sub>4</sub>). Povlaky TiC a TiN se z plynné fáze vylučují podle této rovnice<sup>2</sup>:



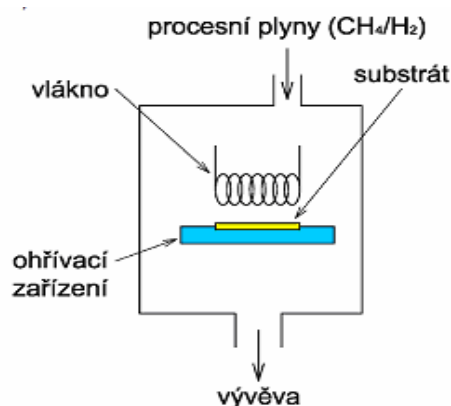
Hlavní výhodou MTCVD technologie je to, že v důsledku nižší reakční teploty dochází ke značnému nárůstu houževnatosti, případně jejímu zachování. Mikrotvrdotost běžně připravených karbonitridů má klesající tendenci ve směru od substrátu k povrchu vzorku. Je to logický důsledek faktu, že ve směru narůstání povlaku roste i jeho zrnitost, která je příčinou poklesu mikrotvrdotosti. Zrnitost TiCN vrstvy je nejmenší právě v místech, kde vrstva začíná růst<sup>2,53</sup>.

## 2.1.3 Mikrovlnná plazmatická CVD

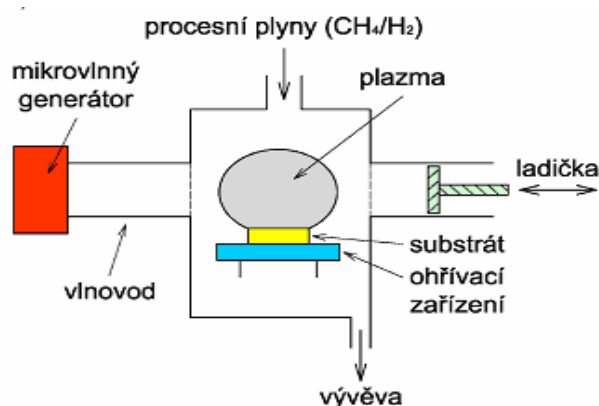
MWPCVD metoda (Microwave plasma chemical vapour deposition) – pracovní teplota se pohybuje kolem 600 °C přičemž se nemění princip oproti klasické metodě CVD to znamená, vytváření povlaku z plynné fáze (obr.2.4)<sup>2,53</sup>.

## 2.1.4 Metoda CVD využívající žhavicí vlákno

HFCVD metoda (Hot-Filament Chemical Vapour deposition) – 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, na kterém reagují a vytvářejí tenký povlak. Rychlost depozice je o jeden řád vyšší než u klasické CVD metoda. Touto metodou se nanášejí např. diamantové povlaky (obr. 2.5)<sup>2,53</sup>.



Obr. 2.4 Schéma metody MWPCVD<sup>53</sup>



Obr. 2.5 Schéma metody HFCVD<sup>53</sup>

## 2.1.5 Laserem indukovaná CVD metoda

LICVD metoda (Laser Induced Chemical Vapour Deposition) existuje ve dvou variantách – jako pyrolytická a fotolytická. U pyrolytické metody jsou molekuly plynu na mezifázovém rozhraní plyn-substrát štěpeny lokalizovaným ohřevem substrátu, na který dopadá papr-

sek laseru. Tato metoda je limitovaná volbou kombinace laser - zdrojový plyn - substrát. Zdroje par by měly být při dané vlnové délce laserového záření relativně transparentní. U fotokatalytické metody jsou molekuly poblíž substrátu štěpeny fotochemickou reakcí.

### 2.1.6 Metoda CVD s lavinovým plazmatickým výbojem

CACVD metoda (Cascade Arc Plasma-assisted Chemical Vapour Deposition) – metoda založena na principu reaktoru, který využívá vlastnosti homogenního sloupce lineárního plazmatického výboje (ve válcové nebo pravoúhlé komoře s délkou více než 1m). Pracuje v rozsahu tlaků od 13 Pa až po atmosférický tlak, v plynném prostředí Ar - H<sub>2</sub> - CH<sub>4</sub>. Držáky substrátu jsou sestaveny tak, aby působily jako virtuální obal, který udržuje výboj v kanálu s rozmístěnými substráty. Plazmový výboj je tvarován magnetickými poli, která udržují jednotné plazmové prostředí po celé délce komory. Metoda umožňuje nanášení diamantových a podobných povlaků na 3D substráty<sup>2,12,52</sup>.

### 2.1.7 Metoda – epitaxe atomových vrstev

ALCVD metoda (Atomic Layer Chemical Vapour deposition) při které jsou do reakční komory přivedeny dva prekurzory (Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> a H<sub>2</sub>O). Jeden z prekurzorů je adsorbován na povrchu substrátu, ale ke kompletní dekompozici nedojde bez přítomnosti druhého prekurzoru. ALCVD umožňuje dobrou kontrolu kvality vznikajícího filmu<sup>2,12,52</sup>.

### 2.1.8 Metoda CVD za asistence aerosolu

AACVD – metoda (Aerosol Assisted Chemical Vapour deposition) kde prekurzor je dopraven k substrátu ve formě aerosolu generovaného ultrazvukem. Tato technika je využitelná i pro netěkavé prekurzory<sup>2,12,52</sup>.

### 2.1.9 Metoda CVD s organokovovými prekurzory

MOCVD – Methal Organic Chemical Vapour Deposition ) jako prekurzory se používají organokovové látky, např. ethoxid tantaličný Ta(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>5</sub> pro přípravu oxidu tantaličného Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.<sup>2,12,52</sup>

Mezi hlavní výhody povlakování metodou CVD patří<sup>1,2,26</sup>:

- vysoká hustota povlaku;
- vysoká homogenita povlaku (dobré pokrytí substrátu);
- vynikající adheze k podkladovému materiálu, rovnoměrná tloušťka u tvarově složitých nástrojů, součástí a dobrá stechiometrie povlaku;
- možnost vytvářet poměrně složité vrstvy;
- ekonomická výhodnost tvorby silných vrstev povlaků;
- povlakování předmětu ze všech stran v důsledku poměrně vysokých pracovních tlaků plynné směsi (1-100 kPa)

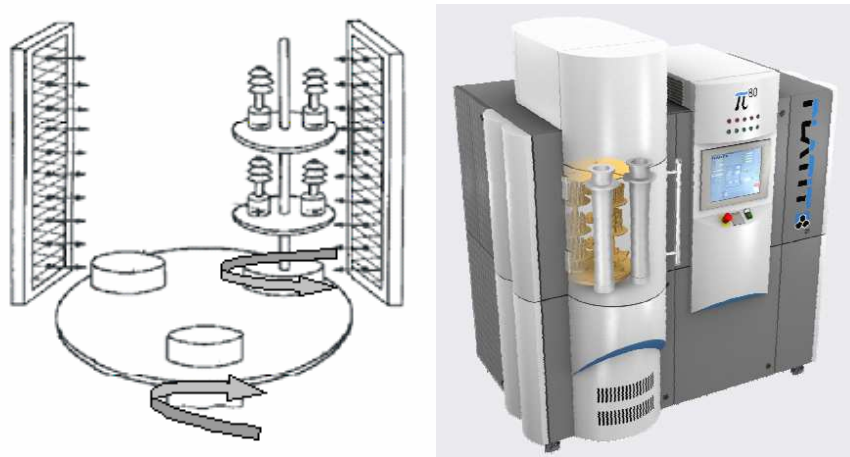
Nevýhody metody CVD<sup>1,2,26</sup>:

- vysoké pracovní teploty, které mohou mít nepříznivý vliv na vlastnosti povlakovaného předmětu i samotného povlaku – po povlakování následuje tepelné zušlechťení;
- nelze vytvářet některé typy povlaků (např. kombinací různých typů kovů TiAlN);
- nelze povlakovat ostré hrany;
- vysoká energetická náročnost;
- dlouhý pracovní cyklus (8-10 h);
- ekologicky nevyhovující pracovní plynné směsi (toxické chloridy);
- tahová napětí ve vrstvě (rozdílný koeficient délkové roztažnosti)

## 2.2 Fyzikální depozice vrstev – metoda PVD

Metoda PVD (Physical Vapour Deposition) – fyzikální napařování je charakteristické nízkými pracovními teplotami pod 500 °C. Vzhledem k vysoké teplotě povlakovaného předmětu u CVD metody se 80. letech začaly prosazovat PVD metody povlakování, které dnes již převládají. Tato metoda byla původně vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí, protože nízká teplota PVD zaručuje, že podklad substrátu nebude tepelně ovlivněn. V posledním období dochází k velmi významnému rozvoji metody PVD a rozšiřování jejich aplikací<sup>2,7,14</sup>.

Disponuje řadou výhod oproti metodě CVD, a to především vytváření tlakových zbytkových napětí v povlaku, možnosti povlakovat i ostré hrany a již zmiňované neovlivnění základního materiálu díky nižší teplotě. Na druhé straně vyžaduje mnohem důkladnější přípravu povrchu vzorku před povlakováním a má směrový účinek tzn., že plochy, které jsou odvrácené od místa odpařování povlakového kovu, by bez neustálého pohybu zůstaly bez povlaku. Tento požadavek souvisí s tzv. stínovým efektem, který u dané metody způsobuje, že na plochách, které neleží ve směru pohybu odpařovaných částí, se vytváří nedokonalá vrstva povlaku případně se povlak vůbec nevytvoří. Mezi další nevýhody patří relativně složitý vakuový systém<sup>2,7,14</sup>. Schéma PVD metody je na obr. 2.6.



Obr. 2.6 Schématický náčrt PVD metody a povlakovacího zařízení  $\pi^{80}$  firmy PLATIT<sup>14,20</sup>

U této metody jsou povlaky vytvářené za velmi nízkého tlaku (0,1-1 Pa) kondenzací částic (atomy, případně shluky atomů), které jsou uvolňovány ze zdroje částic (terčů) fyzikálními metodami – rozprašováním (většinou urychlenými ionty Ar vytvářenými ve zkříženém elektromagnetickém poli) nebo odpařováním (indukčně, nízkonapěťovým obloukem, laserem nebo elektronovým paprskem), některé metody využívají i klasický odporový ohřev. Uvolněné částice jsou ionizovány, reagují s atmosférou komory, kterou tvoří inertní a reaktivní plyn (např. Ar, N<sub>2</sub>) a záporným předpětím (stovky voltů) jsou urychlovány k povrchu substrátu, kde se usazují ve formě tenké vrstvy homogenního povlaku<sup>2,7,14</sup>.

Povlak je nejčastěji vytvářen *napařováním - evaporation* (přímé, reaktivní, s asistencí iontového paprsku), *naprašováním - sputtering* (stejnoseměrná nebo RF dioda, trioda, magnetron) iontový paprsek (jediný, dvojitý) a *iontovou implantací - ion-plating* - doutnavý výboj (stejnoseměrná nebo RF dioda, trioda, výboj v duté katodě, naprašování), iontový paprsek (přímý iontový paprsek, iontový paprsek, skupinový iontový paprsek.)<sup>2</sup>.

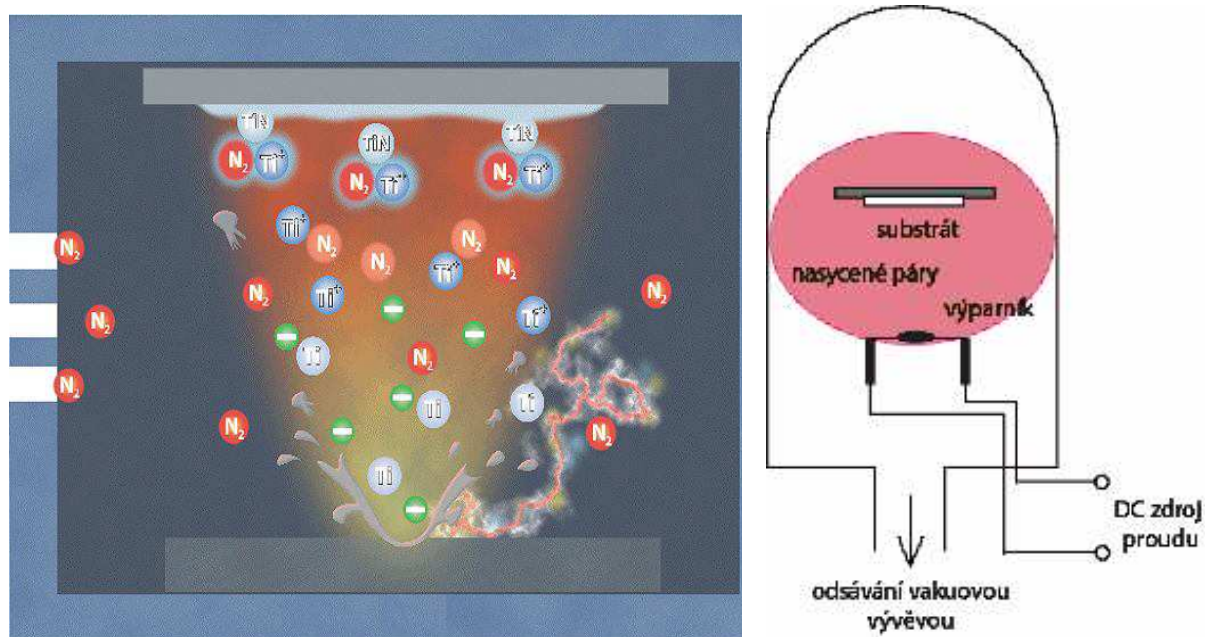
## 2.2.1 Napařování (evaporation)

O napařování hovoříme tehdy, pokud dochází k odpařování budoucího materiálu povlaku z kapalné fáze (var) nebo fáze pevné (sublimace) a jeho páry kondenzují na chladnějším povrchu substrátu (obr. 2.7). Protože se většinou jedná o materiál s vysokou teplotou varu za atmosférického tlaku, je třeba pro odpařování použít vysoké vakuum ( $10^{-3}$  -  $10^{-8}$  Pa).<sup>2,7</sup>

Kvůli zmenšení střední volné drůhy je do komory přiváděn odpovídající plyn (např. argon) pod tlakem 0,7 - 26,7 Pa tak, že odpařené složky při transportu na substrát prodělají vícenásobné srážky, což vede k vytvoření povlaku s rovnoměrnou tloušťkou<sup>7,14,26</sup>.

Nejjednodušší je **odporový ohřev**, při němž je odpařovaný materiál umístěn v nádobce – tzv. lodičce z žáruvzdorného materiálu. Protože při odporovém ohřevu vznikají poměrně nízké teploty, je často využíván jiný zdroj tepla a to **elektrický oblouk**, **silný elektronový paprsek** (tzv. elektronové dělo – s přídatnou ionizací), popř. **laser**.

I když tyto tři metody dovolují odpařovat materiál s libovolnou teplotou materiál, u vrstev ze sloučenin (karbidů, nitridů, oxidů), bývá obtížné získat vrstvu z těchto materiálů, protože se sloučeniny při odpařování rozkládají. Kromě tohoto důvodu je taktéž třeba, aby terč byl elektricky vodivý, což některé sloučeniny nesplňují. Proto se používá tzv. reaktivní napařování, při kterém je do vakuové komory připouštěn reaktivní plyn, s kterým může odpařovaný materiál reagovat – např. je-li odpařován čistý hliník a bude-li do vakuové komory připouštěn čistý kyslík, dochází k depozici vrstvy korundu  $Al_2O_3$ . Tímto způsobem je možné získat karbidy (připouštěním uhlovodíků) nebo nitridy (připouštěním dusíku)<sup>7,14,26</sup>.



Obr. 2.7 Technologie obloukového napařování a jeho schéma<sup>8,21</sup>

Struktura povlaku vznikající při napařování kondenzací par na substrátu závisí především na teplotě povrchu substrátu. Model struktury vznikající vrstvy napařování a napařování ukazují obrázky 2.16. Vznik struktury je popsán v kapitole 2.2.2.2.

### 2.2.1.1 Napařování za pomoci odporového ohřevu

Nejjednoduššími odporovými zdroji jsou vyhřívané dráty a kovové fólie různého typu. Jsou dostupné v různých velikostech a tvarech, jejich cena je nízká, a proto mohou být po provedení jednoho experimentu v případě potřeby vyřazeny. Obvykle jsou vyráběny z kovů, které mají vysokou teplotu tavení a nízký tlak par, takže nekontaminují vytvářených povlak<sup>2</sup>.

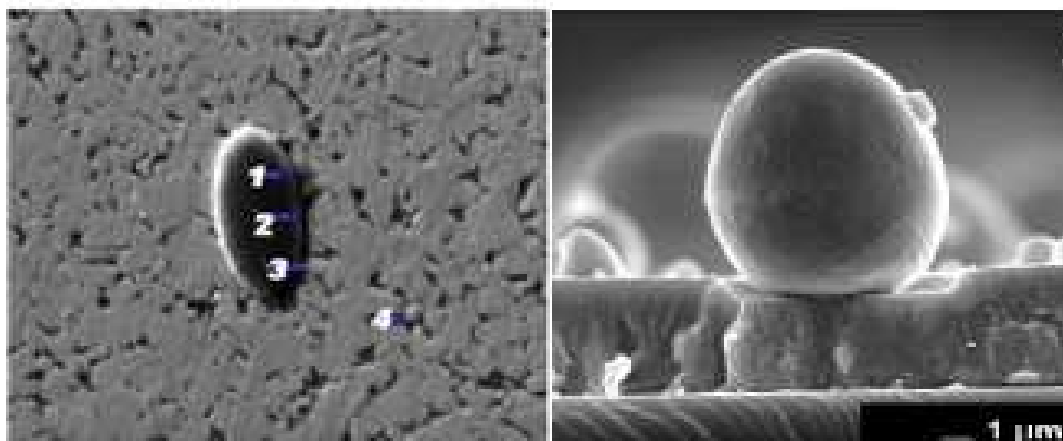
### 2.2.1.2 Obloukové napařování

Nanášená látka je katodou – mínus pól (terč) vakuového obloukového výboje – anodou bývá vakuová komora – plus pól a je jí lokálně odpařována a současně ionizována. Katoda jako celek zůstává pevná, taví se jen v místě katodové skvrny výboje o průměru cca 0,1 mm, která se po jejím povrchu pohybuje (obr. 2.8) na rozdíl od anody (komora), kde hoří oblouk po celé její ploše. Tento náhodný pohyb elektrického oblouku po katodě lze magnetickým polem usměrnit (tzv. řízený oblouk) a tak zvýšit kvalitu vrstev i využití terče<sup>2,7</sup>.



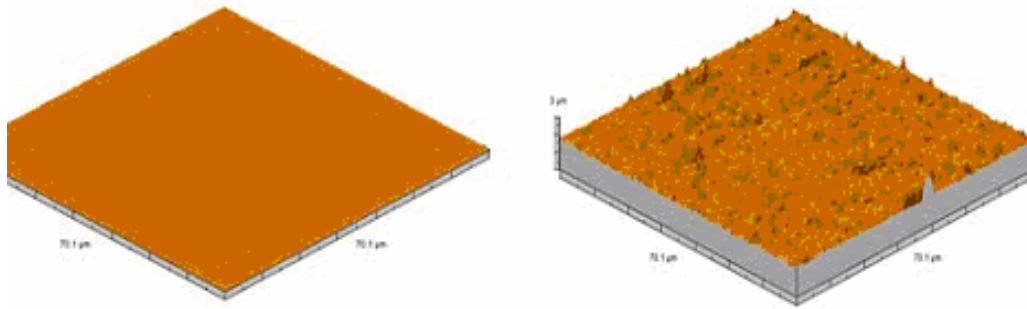
Obr. 2.8 Schéma a pohyb katodové skvrny<sup>4,7,16</sup>

Podstatná část odpařené látky je ionizována, což zlepšuje přilnavost (adhezi) vrstvy k substrátu. Lze odpařovat pouze vodivé materiály, možno i slitiny. Povlak obsahuje makročástečky (mikroskopické kapičky odpařovaného kovu) jak je znázorněno na obr. 2.9, které negativně ovlivňují některé jeho vlastnosti jako je drsnost povrchu, koeficient tření (obr.2.10), odolnost proti korozi. Dopadu makročásteček na povlakované předměty lze zabránit použitím elektromagnetického filtru<sup>2,34</sup>.



Obr.2.9 Makročástečky titanu emitovaná během iontového echingu a makročástečky hliníku v povlaku<sup>16</sup>

Na obr. 2.10 jsou porovnávány vrstvy TiN připravené magnetronovým a obloukovým napařováním, z kterého je zřejmá nižší drsnost povlakovaného povrchu magnetronovým napařováním. Všechny vrstvy mají přibližně stejnou tloušťku 2,5 μm<sup>16</sup>.

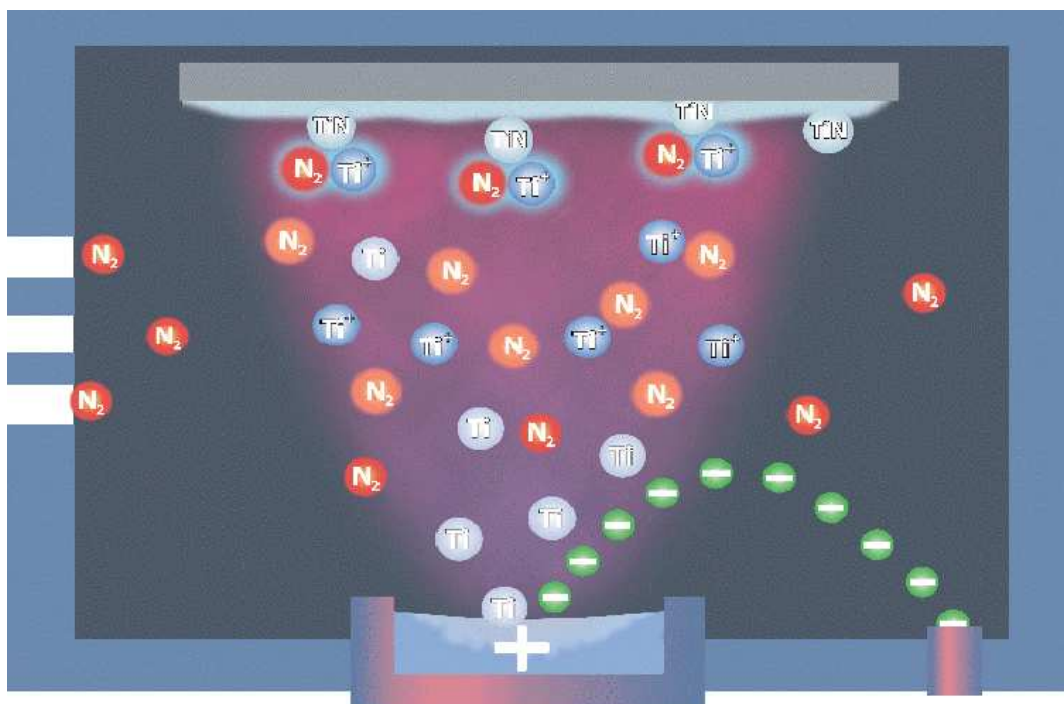


Obr. 2.10 Porovnání drsnosti vrstev magnetronového a obloukového napařování<sup>16</sup>

### 2.2.1.3 Napařování elektronovým paprskem

Nanášená látka je ve vakuové komoře odpařována elektronovým svazkem a takto uvolněné atomy jsou před dopadem na povlakovaný předmět částečně ionizovány. Schéma technologie je na obr. 2.11. Tyto elektrony jsou uvolňovány z wolframového žhavicího vlákna a urychlovány elektrickým napětím mezi anodou a vláknem (katodou). Vychylování elektronového paprsku do tyglíku s titanem způsobuje magnetická cívka. Hlavní výhodou tohoto řešení je možnost vytvoření paprsku požadovaného tvaru změnou elektrického proudu v cívice, čímž dojde k rovnoměrnému pokrytí povrchu odpařovaného materiálu.

Lze pracovat v čistém vakuu bez pomocného plynu (Ar). Proces nanášení je velmi stabilní. Odpařovaná látka je v kapalném stavu, takže její zdroje musí být uloženy vodorovně v dolní části povlakovací komory.<sup>34</sup>



Obr. 2.11 Technologie napařování za pomoci elektronového paprsku<sup>21</sup>

### 2.2.1.4 Laserem indukované napařování

Při laserem indukovaném odpařování je materiál z povrchu terče odpařován pomocí laserového paprsku. Laserové odpařování má několik omezení<sup>2</sup>:



- pro přenos paprsku od laseru umístěného mimo vakuovou komoru na odpařovaný materiál uvnitř komory je třeba použít složitý přenosový a zaostřovací systém;
- ne vždy lze najít vhodnou vlnovou délku, která by byla kompatibilní s absorpčními vlastnostmi odpařovaného materiálu;
- malá velikost povlakované plochy vyplývající z malého bodu, na který dopadá laserový paprsek a velmi nízká energetická účinnost;
- rozstříkací efekt vytváří mikročástice a ty snižují kvalitu povlaku

K hlavním výhodám laserového odpařování patří produkce složek s vysokou energií, které zlepšují kvalitu povlaku a vynikající přesnost stechiometrie mezi terčem a povlakem. Odpařování lze provádět i s přídavnou ionizací, kdy jsou atomy odpařené látky před dopadem na povlakovaný předmět částečně ionizovány např. svazkem elektronů.

#### Výhody odporového odpařování a odpařování elektronovým paprskem<sup>2</sup>:

- lze deponovat vysoce čisté povlaky z vysoce čistých zdrojových materiálů;
- zdrojem odpařovaného materiálu může být tuhé těleso libovolného tvaru a čistoty;
- přímočará dráha a omezený povrch zdroje umožňují použití různých masek pro vymezení povrchu substrátu, na který je ukládán povlak a clo mezi zdrojem a substrátem pro zabránění depozice, pokud to je zapotřebí;
- relativně snadné sledování a řízení – nejlevnější PVD metoda

Odpařovací zdroje ohříváné elektronovým svazkem mají navíc další dvě výhody – velmi vysokou výkonovou hustotu a možnost vodního chlazení odpařovaného materiálu.<sup>2</sup>

#### Nevýhody odporového odpařování a odpařování elektronovým paprskem<sup>2</sup>:

- obtížná depozice mnoha slitin a sloučenin;
- přímočará dráha a omezený povrch zdroje způsobují špatné pokrytí povrchů složitých tvarů a nerovnoměrnou tloušťku povlaku;
- pro řízení vlastností povlaku lze využít pouze několik procesních parametrů;
- nízké využití materiálu zdroje, vysoké zatížení tepelnou radiací;
- kvůli udržení dostatečné vzdálenosti mezi horkým zdrojem a substrátem jsou zapotřebí velké vakuové komory

#### Výhody obloukového odpařování<sup>2</sup>:

- lze odpařovat všechny elektricky vodivé materiály;
- plazmový oblouk efektivně ionizuje odpařovaný materiál i reaktivní plyny;
- před depozicí mohou být ionty materiálu povlaku urychlovány na vysokou energii;
- nízké zatížení tepelnou radiací (katodická oblouková depozice)
- reaktivní plyny jsou aktivovány plazmou, což zlepšuje procesy depozice;
- znečištění terče je mnohem menší než u reaktivního naprašování

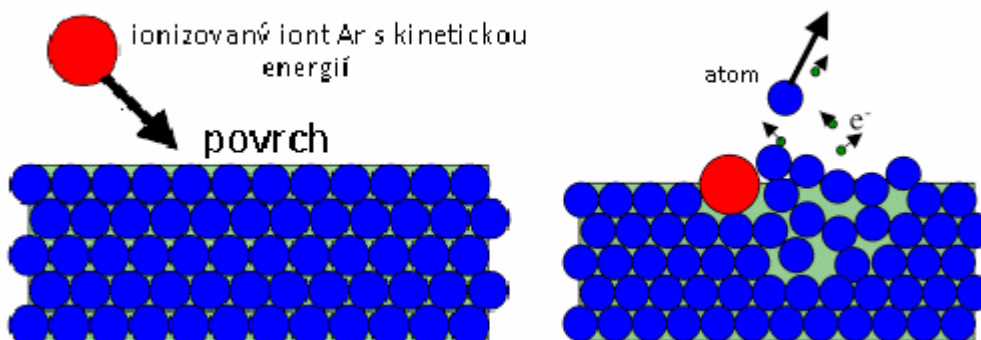
#### Nevýhody obloukového odpařování<sup>2</sup>:

- 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. 2.9)

### **2.2.2 Naprašování (sputtering)**

Naprašovací metody jsou založené na mechanismu odprašování terče (obr. 2.12) účinkem elektrického výboje ve vakuu ( $<0,7$  Pa), kdy se odprašené částice dostanou na povrch

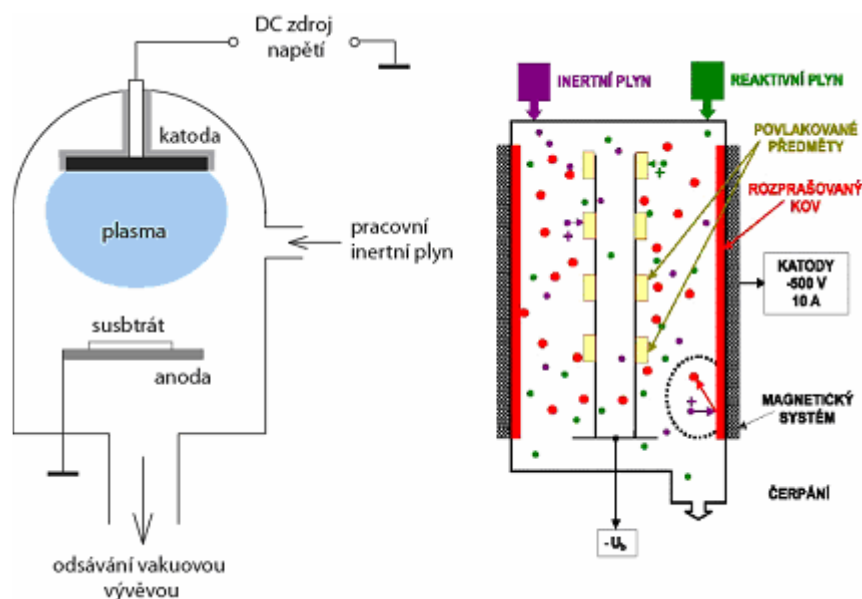
substrát bez kolize s molekulami v prostoru mezi zdrojem a substrátem. Nejčastěji to bývá účinkem doutnavého výboje ve vhodném plynu.



Obr. 2.12 Schéma mechanismu odprašování<sup>60</sup>

Nejvýhodnější z hlediska stability jsou silně zředěné vzácné plyny. Odprašovat lze prakticky jakýkoliv materiál terče bez ohledu na jeho teplotu tání<sup>26</sup>.

Podle schématu na obr. 2.12 dochází ke katodovému odprašování, kde kationty argonu jsou přitahovány k terči, který je napojen na katodu stejnosměrného zdroje. Dopadající ionty argonu odprašují nejen atomy terče ale i jeho ionty. Odprašený materiál poté kondenzuje na povrchu substrátu umístěného v cestě odprašeným atomům.



Obr. 2.13 Schéma depozice naprašováním<sup>2,8</sup>

Touto metodou lze vytvářet povlaky z těžkovitelných materiálů bez požadavku ohřevu terče na vysokou teplotu, která je potřebná při odpařovacím procesu. Nad záporně nabitým terčem (500 - 1000 V) se pomocí výboje udržuje argonová plazma, jejíž kladné ionty jsou elektrickým polem urychleny na terč a při dopadu z jeho povrchu v důsledku přenosu pohybové energie vyrážejí jednotlivé atomy nebo molekuly. Doprovodnými jevy jsou sekundární emise elektronů a iontů, odraz nahodilých částic, emise záření, desorpce plynů, chemický rozklad atd. Rychlost eroze terče lze vyjádřit pomocí vztahu<sup>2</sup>:

$$R = 62,3 \cdot \frac{J \cdot S \cdot m_t}{\rho} [\text{Å min}^{-1}],$$

kde:  $J$  [ $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ] je proudová hustota iontů,

$S$  [atomy/ionty] je výtěžnost naprašování,

$m_t$  [g] je atomová hmotnost,

$\rho$  [ $\text{g} \cdot \text{cm}^3$ ] je měrná hmotnost materiálu tyče

Výhodnější je neodprašovat přímo materiál, který má tvořit povrchovou vrstvu, ale základní materiál, který pak reaguje s atmosférou obsahující reaktivní plyn např. dusík, uhlíkový ke vzniku nitridu případně karbidu. Mluvíme pak o **reaktivním naprašováním**.

Nejednodušším systémem naprašování je **naprašování doutnavým výbojem rovinné diody** (Planar Diode Glow Discharge Sputter Deposition).

### 2.2.2.1 Naprašování doutnavým výbojem rovinné diody

Tento systém se skládá z katody (terč) a anody (substrát) umístěných proti sobě na vzdálenost 50 - 100 mm. Terč, který obvykle chlazený vodou, má dvě funkce – je zdrojem povlakovacího materiálu a zároveň zdrojem sekundárních elektronů, které udržují doutnavý výboj<sup>2,22</sup>.

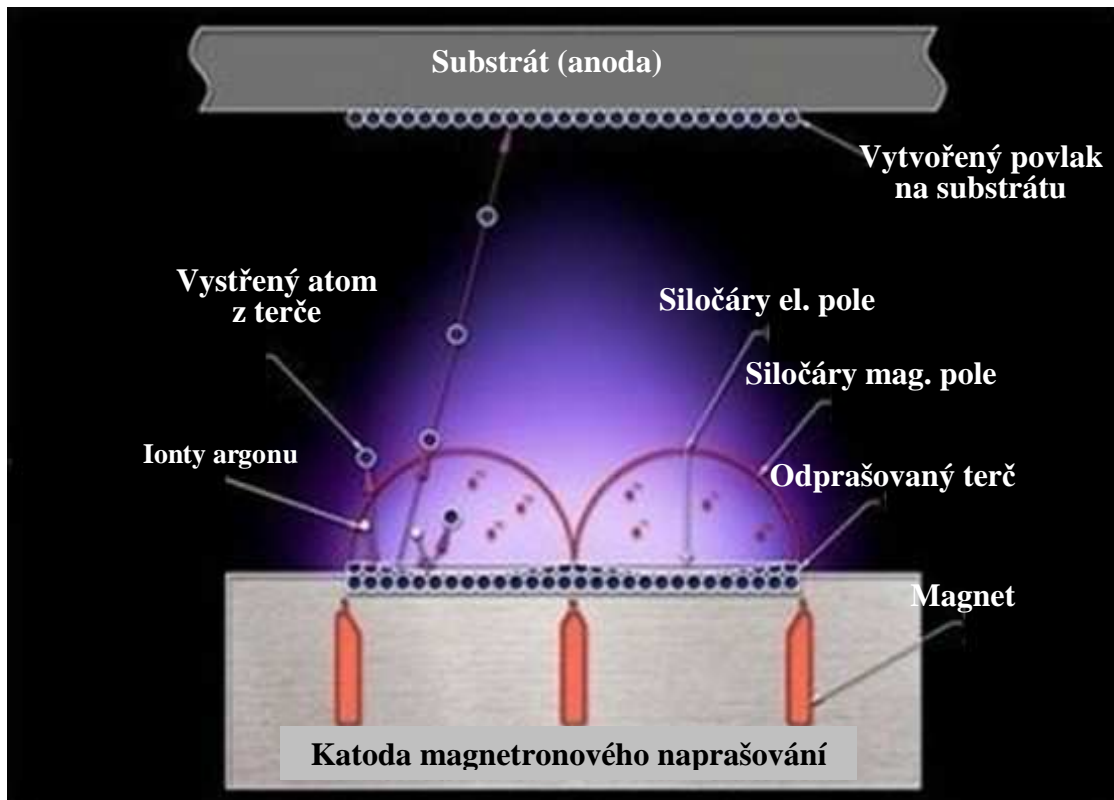
Při reaktivním odprašování je zapotřebí dostatečné množství reaktivního plynu (např. dusík), aby mohlo dojít k reakci s odprašeným materiálem. Aby však bylo dostatečné množství tohoto plynu v atmosféře, nesmí být tlak příliš malý. Ovšem zvýšení tlaku vede k malé účinnosti odprašování. Účinnost odprašování se proto zvyšuje prodloužením dráhy elektronů a iontů v oblasti substrátu vhodně tvarovaným elektrickým a magnetickým polem v tzv. **planárním magnetronu**<sup>2,22,26</sup>.

### 2.2.2.2 Magnetronové naprašování (Magnetron Sputter Deposition)

U běžné rovinné diody jsou ionty generovány relativně daleko od terče, a proto je pravděpodobnost, že ztratí svoji energii vůči stěnám komory vysoká. Navíc počet primárních elektronů, které dopadají na anodu (substrát) s vysokou energií bez způsobení kolize, narůstá s klesajícím tlakem, a proto účinnost ionizace klesá. Tyto ztráty elektronů nejsou kompenzovány emisí sekundárních elektronů indukovaných dopadem iontů<sup>2,22</sup>.

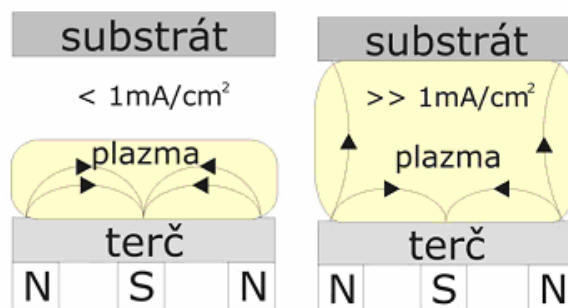
Vhodně nastaveným magnetickým polem se docílí rozšíření plazmatu až k substrátu. Elektrony plazmatu jsou zachyceny v tzv. tunelu siločar magnetického pole o vysoké intenzitě a unášeny podél tunelu (ionty nejsou ovlivněny díky větší hmotnosti oproti elektronům), a tím se značně prodlouží jejich dráha, zvýší se počet srážek a vytvoří se husté plazma. Kladné, elektrickým polem urychlené ionty dopadají z plazmatu na terč a odprašují jeho částice. Ty poté prochází plazmatem směrem k substrátu na kterém je záporné předpětí, tyto ionty jsou přitahovány a postupně tvoří povlak – viz obr. 2.14<sup>2,22</sup>.

V oblasti zkříženého elektrického a magnetického pole, kde se pohybují nabitě částice po spirále, vzniká toroidní oblast koncentrované plazmy, jejímž dotykem s terčem vzniká mezikruží velmi intenzivního odprašování. Elektron je zadržen v oblasti těsně nad terčem. Všechny jim vytvořené ionty jsou přitahovány elektrickým polem k terči. Vzniká velké množství sekundárních elektronů (výboj) a odprašených atomů (nanášení). Magnety magnetronů jsou umístěny podél vnějšího okraje a uprostřed katody. Pokud je síla vnitřních a vnějších magnetů přibližně stejná, jde o **vyvážený magnetron** a většina siločar vytváří smyčku mezi vnitřními a vnějšími magnety. Pokud je jeden za magnetů silnější než druhý jedná se o **nevyvážený magnetron**<sup>2,22,26</sup>.



Obr. 2.14 Schéma technologie magnetronového naprašování<sup>22</sup>

Magnetické pole normálního, vyváženého magnetronu je navrženo tak, aby drželo elektrony, a tedy i plazmu v nejbližším okolí terče (obr. 2.15)<sup>2,22</sup>.



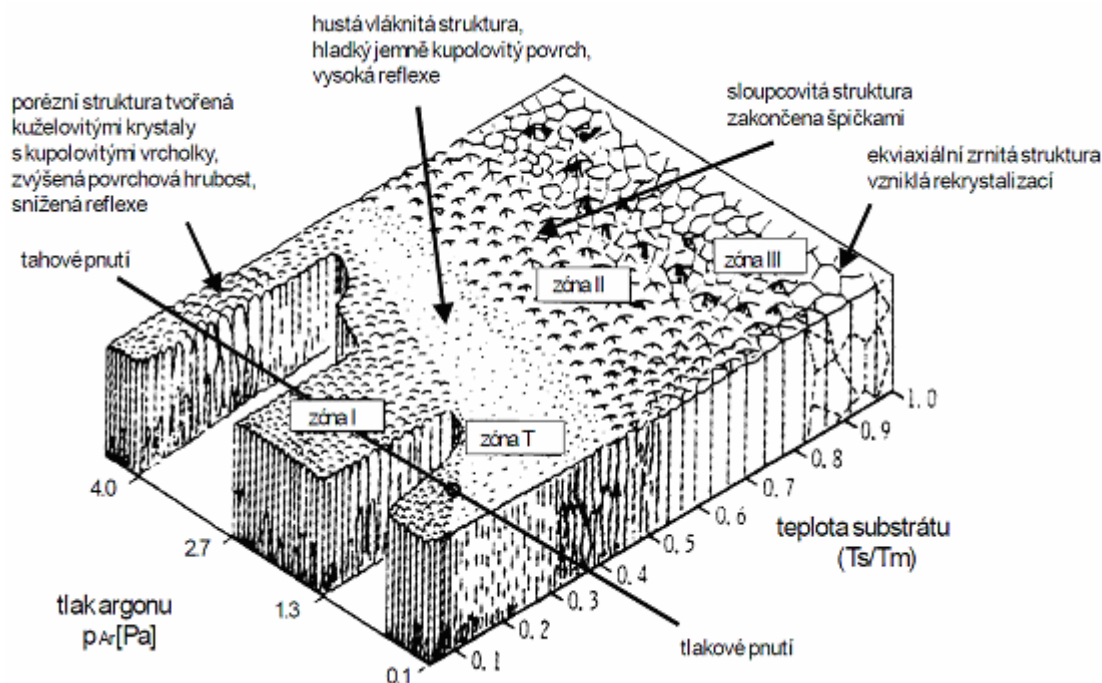
Obr. 2.15 Magnetické pole vyváženého nevyváženého magnetronu<sup>56</sup>

Nevyvážený magnetron využívá sekundární plazmy poblíž substrátu jako zdroje energetických částí pomocí samostatného iontového děla nebo odpovídající změny magnetických polí mezi vnitřní a vnější sestavou magnetů naprašovací katody (obr. 2.15), aby se plazma mohla rozšířit po povrchu substrátu a zajistit tak požadované iontové bombardování.<sup>2,22</sup>

Morfologická struktura povlaku při magnetronovém naprašování se vytváří podle schématu Thorntona obr. 2.16. Struktura povlaku závisí zejména na poměru teplot  $T_s/T_m$ , kde  $T_s$  je skutečná teplota povlaku v průběhu depozice (odpovídá teplotě substrátu) a  $T_m$  je jeho teplota tavení. Jemnozrná struktura v zóně I ( $T_s/T_m < 0,3$ ) obsahuje kuželovitá vláknitá zrna s klenutými vrcholy, na hranicích zrn je vysoká hustota mřížkových defektů a pórů. Vytváří se velmi málo krystalizačních zárodků, a proto se mezi nimi nacházejí dutiny. Vytvářejí hrubý povrch povlaku. Při vyšších teplotách substrátu roste pohyblivost atomů, vytvářejí se více zárodků, které narůstají do hutné vláknité struktury, kterou vykazuje zóna T.

Hrubší sloupkovitá zrna v zóně II ( $0,3 < T_s/T_m > 0,5$ ) jsou výsledkem zvýšené intenzity povrchové a objemové difúze při vyšších teplotách. Zrna mají tendenci vytvářet silně fazetované vrcholy, čímž povrch povlaku získává hladký, ale matný vzhled.

V důsledku objemové difúze nebo rekrytalizace narůstá šířka sloupkovitých zrn v zóně III ( $T_s/T_m > 0,5$ )<sup>2,22</sup>.



Obr. 2.16 Model struktury povlaku vytvořeného magnetronovým naprašováním<sup>33</sup>

### 2.2.2.3 Radiofrekvenční naprašování (Radio Frequency Sputter Deposition)

Specifikum tohoto nanášení je v tom, že se používá terč z nevodivého materiálu, ze kterého nelze získávat materiál přiložením stejnosměrného proudu, v důsledku akumulace elektrického náboje na jejich povrchu. Využívá se zde vysokofrekvenčního signálu (obvykle 13,56 MHz), kterým je vybuzena plazma. V první části se zapálí výboj na terči, ve druhé části je výboje zhášen<sup>2</sup>.

### 2.2.2.4 Naprašování iontovým paprskem (Ion Beam Sputter Deposition)

Tato metoda zajišťuje vynikající adhezi, vysokou čistotu povlaku a velmi nízký ohřev substrátu. Iontový paprsek o vysoké energii je vytvořen v nezávislém zdroji a namířen na terč z požadovaného materiálu. Zdrojem iontového paprsku je inertní nebo reaktivní plyn. Substrát zachytává složky odprášené z terče. Ionty ze zdroje jsou nasměrovány na terč a odprášený materiál se ukládá na substrátu ve formě tenkého povlaku (odprašování iontovým paprskem) nebo jsou ionty ze zdroje nasměrovány na substrát, který je povlakován materiálem generovaným nějakým nezávislým způsobem (depozice za asistence iontového paprsku)<sup>2</sup>.

Výhody naprašování<sup>2</sup>:

- lze odprašovat a ukládat prvky, slitiny a chemické sloučeniny;
- velmi nízké zatížení tepelnou radiací;
- terč a substrát mohou být umístěny blízko sebe;
- depoziční komora může mít malý objem

### Nevýhody naprašování<sup>2</sup>:

- intenzita naprašování je ve srovnání s intenzitou tepelného odpařování nízká;
- většina energie dopadající na terč se mění na teplo, které se musí odvádět;
- v některých případech je v plazmě aktivován znečišťující plynová kontaminace;
- u reaktivního naprašování je nutné řízení složení plyné atmosféry (znečištění terče);
- velké vnitřní napětí v povlaku

### **2.2.3 Tetrabond technologie**

Tato technologie byla vytvořena firmou Ionbond a je založena na PVD procesu, která dovoluje deponovat extrémně tvrdé a hladké povlaky. Depozice probíhá při teplotě pod 150 °C, což znamená, že doba pracovního cyklu je snížena díky skutečnosti, že kroky jako ohřev a chlazení nejsou vyžadovány. Původně se touto technologií povlakovaly nástroje pro obrábění neželezných materiálů. Tetrabond povlaky jsou nejvhodnější pro obrábění hliníku, grafitu, mědi a kompozitního materiálů<sup>25</sup>.

Slovo Tetrabond je odvozené od čtyřstěnného amorfního uhlíku (obr.2.18). Tetrabond povlaky mají vysoký podíl sp<sup>3</sup> vazeb v rozsahu 80 - 90%. Tato sp<sup>3</sup> vazba je typická pro přírodní diamant. Studie ukazují, že sp<sup>3</sup> vazby souvisejí přímo s tvrdostí povlaku. Tvrdost amorfního diamantu byla změřena v rozsahu 70 - 90 GPa což je shodné s diamantovým povlakem připravený metodou CVD. Abrazivní odolnost je porovnatelná s CVD diamantovým povlakem. Tloušťka povlaku je od 0,4 - 1,5 μm. Pracovní cyklus je kolem 3 hodin, což je oproti CVD diamantovému povlaku nesrovnatelně menší (8 hodin)<sup>25</sup>.

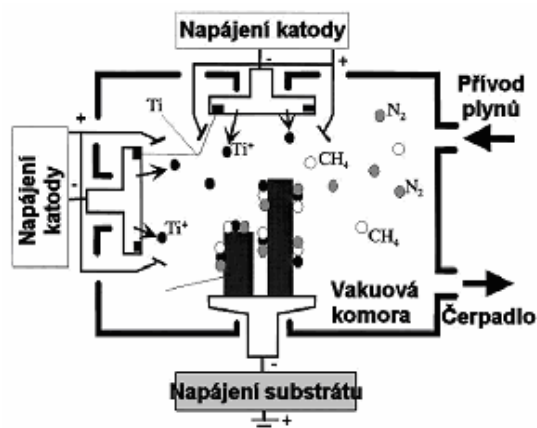
### Výhody<sup>25</sup>:

- tetrabond může být strippován, což umožňuje přepovlakování;
- je možné komplexně povlakovat bez omezení tvaru nástroje včetně vhodně tvarovaných lamačů třísek;
- hloubka řezu není omezena do délky diamantového segmentu, tak jak je u PCD nástrojů;
- tetrabond není omezen jistou kvalitou karbidů;
- proces je šetrný k životnímu prostředí

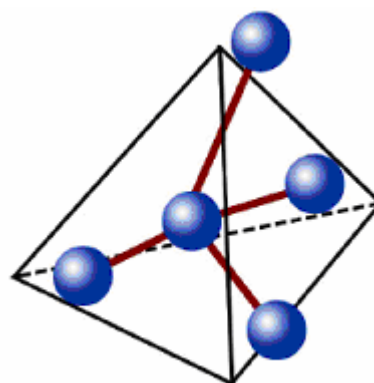
### **2.2.4 Iontová implantace**

Iontová implantace (obr.2.17) je hybridní PVD proces povlakování, u kterého je povrch substrátu nebo deponovaný povlak bombardován svazkem částí s vysokou energií. Zdrojem deponovaných složek může být odpařování, odprašování, plyny nebo páry. Protože na povrch substrátu nedopadají jenom samotné atomy ale i kladné ionty z odprašeného terče, je možné tyto ionty urychlit přídatným napětím mezi terčem a substrátem se záporným pólem na substrátu. Takto urychlené ionty bombardují již vzniklou vrstvu a částečně ji odprašují, čímž se rychlost depozice zpomaluje, ale zároveň kvalita povlaku roste.

V podstatě je možné dopadající ionty na substrát libovolně urychlovat přiloženým napětím. Energie urychlovaných iontů se často vyjadřuje v pomocných jednotkách **elektronvolt** (kladný ion s jedním odtrženým elektronem je urychlen na 1eV při projití napětím 1 V). Jestliže ionty urychlíme nad 100 keV, budou pronikat pod povrch substrátu – tento děj je označován jako iontová implantace<sup>2,26</sup>.



Obr. 2.17 Schéma iontové implantace <sup>2</sup>



Obr. 2.18 Struktura krystalu čtyřstěnného amorfního uhlíku <sup>24</sup>

#### Výhody iontové implantace<sup>2,26</sup>:

- nezáleží na vzájemné rozpustnosti, je možné dosáhnout libovolně přesyceného tuhého roztoku, lze implantovat libovolné ionty do povrchu libovolné látky;
- do povrchu jsou „vstřelovány“ jednotlivé ionty, nedochází ke změně rozměru substrátu;
- vynikající adheze povlaku k podkladu, vysoká hustota povlaku a tlakové napětí ve vrstvě;
- odstranění kontaminované vrstvy na povrchu substrátu bombardováním částicemi s vysokou energií a přesně definované chemické složení povlaku;
- rovnoměrný průběh procesu a s ním spojený dokonalý růst vrstvy povlaku;
- široký rozsah podkladových i povlakových materiálů (nejčastěji TiN)

#### Nevýhody iontové implantace<sup>2</sup>:

- hloubka průniku je velmi malá a je úměrná energii iontů;
- průnik svazku do povrchu je prakticky bodový, pokud chceme implantaci na větší plochu musí být svazek rozmítán, což představuje značnou komplikaci v zařízení;
- může dojít k nadměrnému ohřevu substrátu;
- za určitých podmínek mohou bombardující plyny zůstat zachyceny v rostoucím povlaku

### 3 Předdepoziční procesy při výrobě tenkých vrstev

Vymyslíme-li sebelepší povlak s vlastnostmi takřka nejdokonalejšími, bude snaha vývojových pracovníků zmařena, pokud nebude povlak dostatečně držet na substrátu. To, jak připravíme podklad pro povlak, bude ovlivňovat životnost daného řezného materiálu. Po sliňovacímu procesu se provádí broušení nástrojů, po broušení zůstávají hrany otřepené s rýhami, které jsou příčinou odlupujícího se povlaku na nástroji, proto je zapotřebí řeznou hranu upravit a následně zajistit čištění, odmaštění, případně iontový bombard. Neméně důležitým vlivem pro povlakování je také vhodný výběr materiálu<sup>10,11</sup>.

#### 3.1 Výběr materiálu

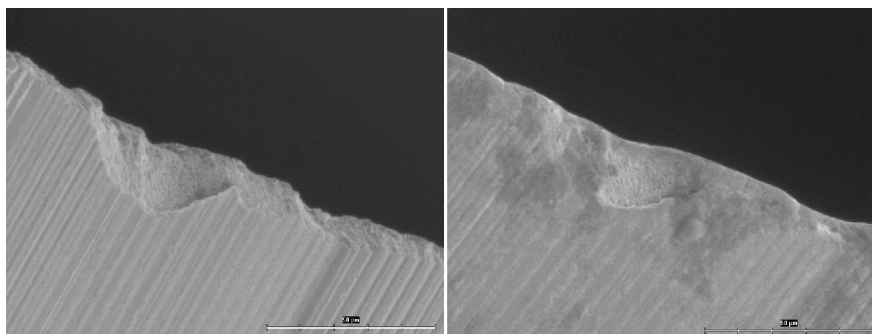
Výběr materiálu má zásadní význam pro rozhodnutí jaké úpravy před povlakování budou použity a jaká technologie povlakování se zvolí. Podstatný rozdíl je především při volbě nástrojů z HSS či slinutého karbidu (HM). Rozdíly jsou v odolnosti zmíněných materiálů vůči vysokým teplotám, vůči chemickým procesům a vůči abrazivnímu otěru<sup>10,11</sup>.

#### 3.2 Mechanická úprava řezných hran

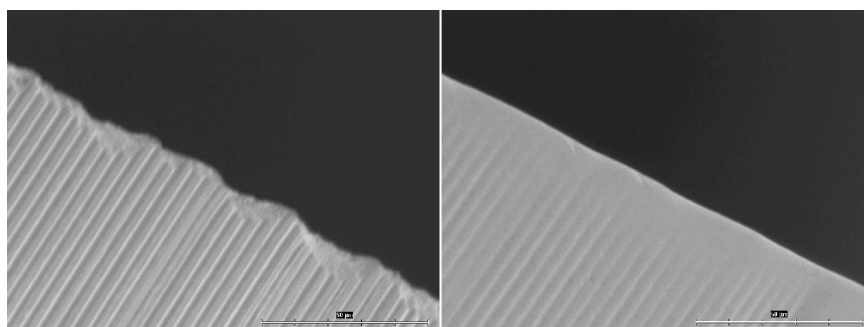
Jak již bylo zmíněno v úvodu, po obrábění jsou nástroje otřepené a mají ostré hrany plné defektů, které jsou iniciátory trhlin v povlaku a kvůli zbytkovému napětí může dojít k adhezivně-kohezivnímu porušení a výraznému snížení životnosti nástrojů<sup>10,11</sup>.

##### 3.2.1 Pískování

Pískováním lze odstranit pevně ulpívající nečistoty na povrchu případně i nečistoty uchycené v mírně pórovitém povrchu. Jako vhodné médium se používá abrazivo SiC nebo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Volba parametrů pískování a řešení automatizace jsou záležitostmi do značné míry empirickou. Bez dlouhodobých seriálních experimentů nelze zabránit případným negativním vlivům<sup>10,11</sup>.



Obr. 3.1 Řezná hrana před a po úpravě tvrdým abrazivem<sup>10,11</sup>

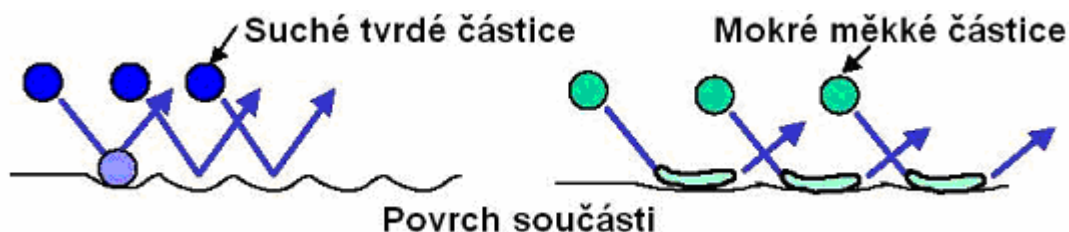


Obr. 3.2 Řezná hrana před a po úpravě měkkým abrazivem<sup>10,11</sup>



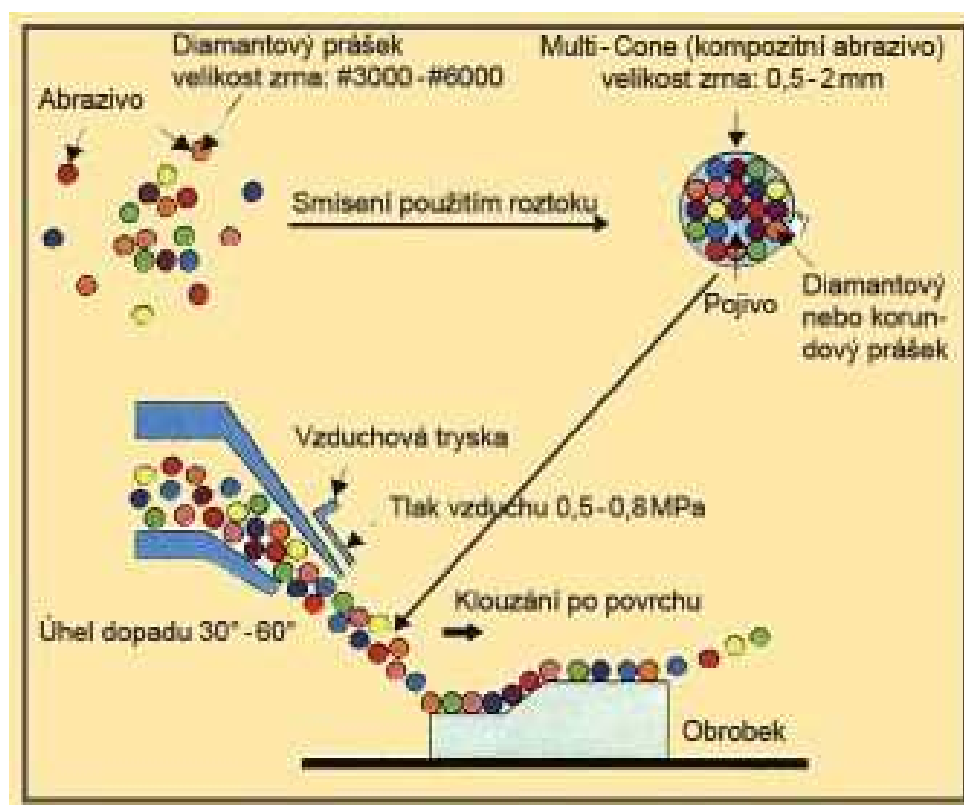
Obrázky 3.1 a 3.2 ukazují, jaký může mít vliv použití různého druhu abraziva. Zatímco na obr. 3.1 bylo použito tvrdší abrazivo – ořechové skořápky – patrné defekty, tak na obr. 3.2 je hrana s nepatrnými defekty díky použití elastických částic s pojivem<sup>10,11</sup>.

Na obr. 3.3 je zase znázorněn rozdíl mezi tryskáním běžným a tryskáním za pomoci speciální technologie AERO-LAP. Je zřejmé, že při použití tvrdých částic dochází k předání větší energie do hrany nástroje a „většímu poškození“.<sup>10,11</sup>



Obr. 3.3 Rozdíl mezi tryskáním tvrdých a měkkých částic<sup>10,11</sup>

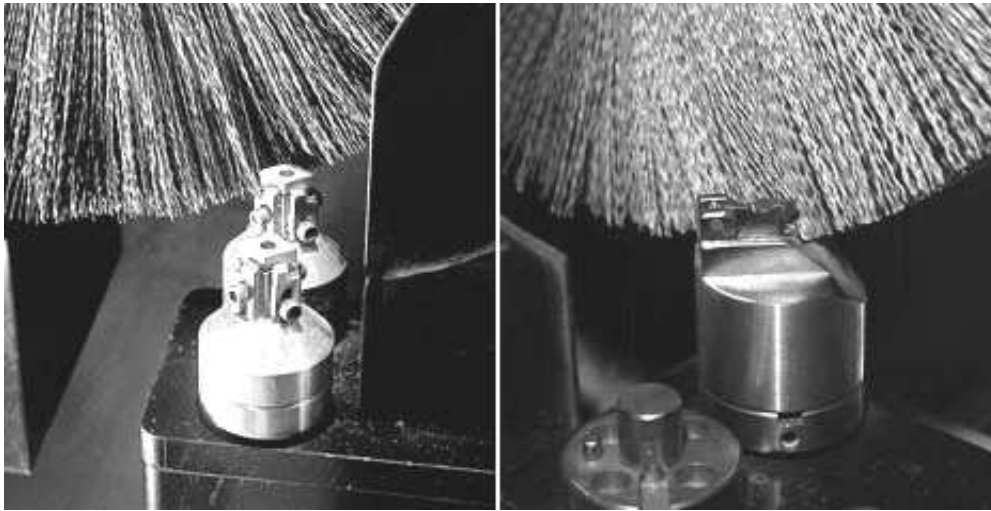
Schéma procesu tryskání povrchu částic v elastickém pojivo je na obr. 3.4. Částice jsou na povrch vrhány po úhlem 30 - 60°. Díky dopadovému úhlu nedochází k úplnému odrazu, ale náraz je částečně utlumen, protože se částice částečně svezou po povrchu<sup>10,11</sup>.



Obr. 3.4 Schéma procesu tryskání povrchu abrazivními částicemi v elastickém pojivu<sup>10,11</sup>

### 3.2.2 Kartáčování

Je to další způsob omílání hran kartáčem buď ocelovým nebo polymerním s vhodným abrazivem viz obr. 3.5. Pokud je nástroj určen pro povlakování, neměly by se používat kartáče s plastovým vlasem, protože dochází ke kontaminaci povrchu a tyto nečistoty se těžce odstraňují<sup>10,11</sup>.



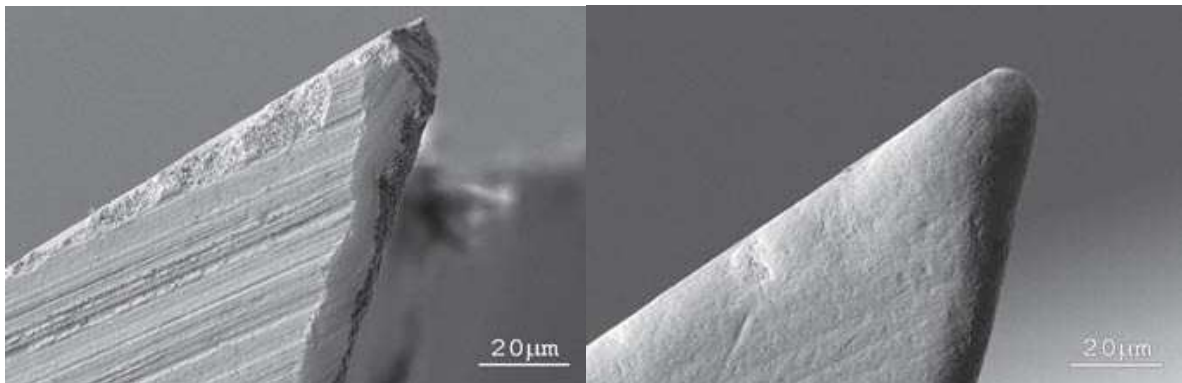
Obr. 3.5 Úprava řezných hran pomocí kartáče<sup>10,11</sup>

### 3.2.3 Finišování za pomoci gumových disků

Jedná se o méně používanou metodu. Gumové disky nebo jiné elementy omílají hrany za pomoci různého abraziva (vápencová kaše)<sup>10,11</sup>.

### 3.2.4 Omílání v granulátech

Břit je omílán v zařízení s planetovým pohybem. Součástka se vynuceně pohybuje v nádobě naplněné granulátem. U nástrojů ze slinutých karbidů lze touto metodou výrazně zlepšit adhezi povlaku na funkčních plochách nástroje. Omíláním se zmenší nerovnosti po předchozí operaci broušení (obr.3.6). Omílání probíhá ve směsi jemných abrazivních zrn např. SiC a drcených ořechových skořápek, které plní funkci nosiče abraziva<sup>10,11</sup>.



Obr. 3.6 Břit před a po mikroúpravě<sup>10,11</sup>

### 3.2.5 Leštění po povlakování

Jedná se o metodu, která má za úkol odstranit případné makročástice po povlakování a snížit celkovou drsnost funkčních ploch a břitů. Většinou se používá ruční leštění pomocí tkanin s abrazivem<sup>10,11</sup>.

### 3.3 Chemické čištění

#### 3.3.1 Odmaštění

Slouží k odstranění konzervačních a jiných mastných látek z povrchů nástrojů za pomoci průmyslových odmašťovadel na bázi ropných derivátů. Odmašťovací prostředky obsahují dearomatizované uhlovodíky a tenzidy, které brání nadměrnému odpařování a zajišťují dobrou smáčivost<sup>10,11</sup>.

#### 3.3.2 Mokrý čištění

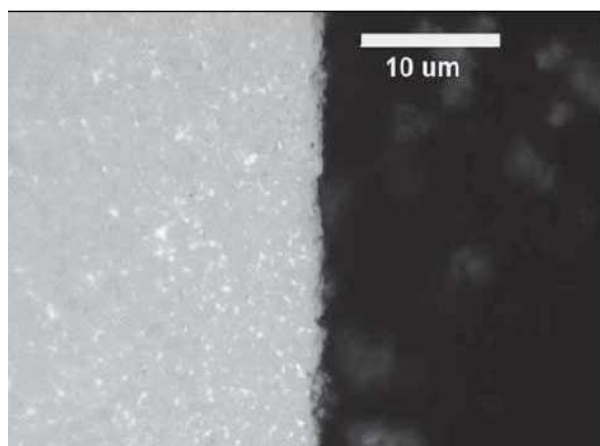
Jedná se o kombinované metody využívající oplachy, tlakové oplachy, ultrazvuk, elektrochemické metody, vakuové sušení. Tyto metody mají za úkol odstranit nečistoty z povrchu, prach, brusivo a různé organické nečistoty. Pro zajištění kvalitního povrchu bez zbytkových „map“ je potřeba dosáhnout rychlého osušení smáčených povrchů<sup>10,11</sup>.

### 3.4 Stripping

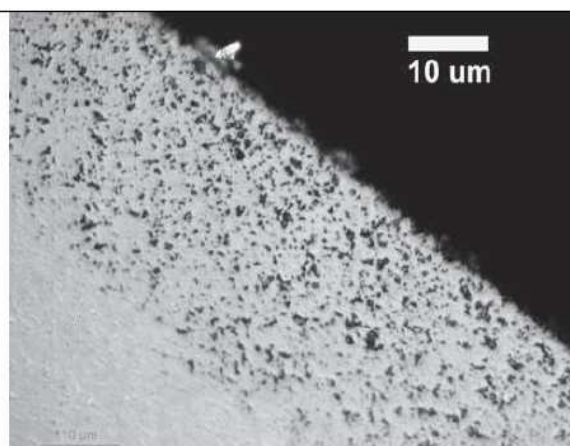
Metoda která se zabývá odstraňováním starých povlaků u přebrušovaných nástrojů. Stripping je prováděn chemickou nebo elektrochemickou cestou. Dobu rozpouštění povlaku elektrochemickou cestou lze určit z Faradayova zákona pro elektrolýzu. Pro HSS se nejčastěji používá roztok peroxidu vodíku, vody a tetranatriumdifosfátu. Provádí se kolem teploty 70 °C. Bezprostředně po provedeném strippingu je nutné povrch jak opláchnout, tak i krátkodobě pasivovat vhodným činidlem<sup>10,11</sup>.

Odstraňování starých povlaků z HM je daleko komplikovanější než u HSS. Nevhodně zvolená technologie může způsobit vyleptání kobaltu ze struktury, což způsobí vážné problémy při následném povlakování. I pro tuto technologii se využívá roztok peroxidu vodíku ale daleko v nižší koncentraci a většinou za pokojové teploty. Všechna dosud používaná rozpouštědla napadají substrát a tak je třeba po strippingu vždy přebrousit ostří<sup>10</sup>.

Výrobci, kteří dokáží odpovlakovat celokarbidový nástroj bez nutného ostření získají velkou konkurenční výhodu a posunou depoziční technologii zase o krok dále. Špatný a dobrý stripping je znázorněn na obr. 3.7 a 3.8.



Obr. 3.7 Kvalitní stripping<sup>10,11</sup>

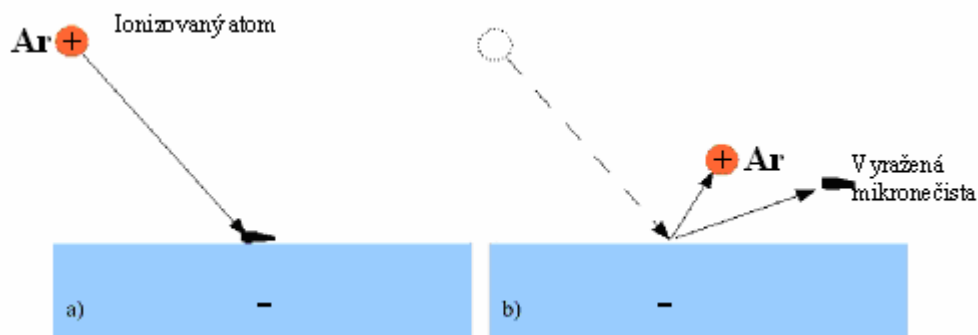


Obr. 3.8 Nekvalitní stripping<sup>10,11</sup>

### 3.5 Iontové čištění

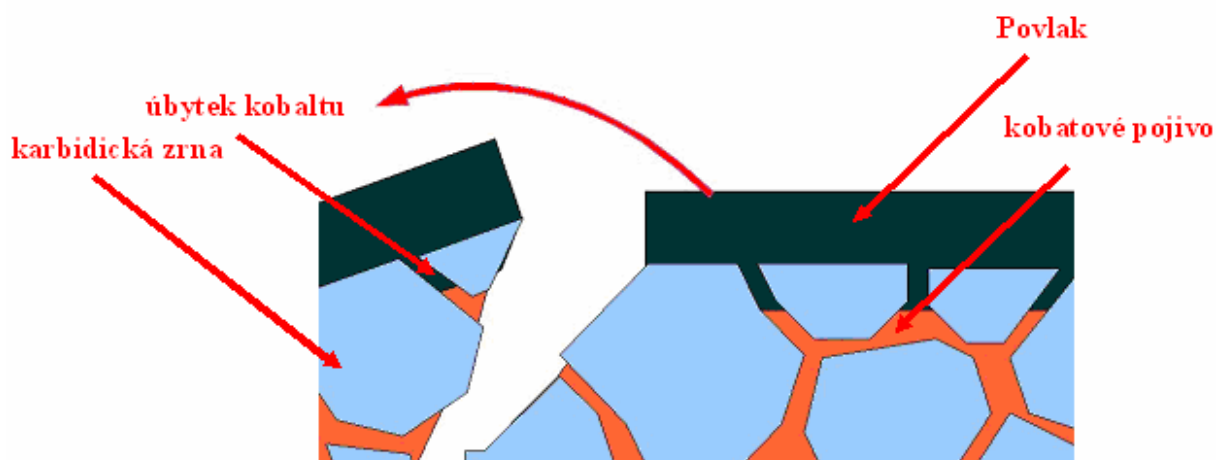
Jedná se o metodu, která využívá k čištění povrchu substrátu od mikronečistot ionizované těžké atomy např. Ar<sup>+</sup>. Ionty jsou urychlovány záporným předpětím přivedeného na sub-

strát. Urychlené ionty bombardují povrch a vyrážejí mikronečistoty ulpívající na povrchu substrátu<sup>10,11</sup>. Dopadem těchto iontů je povrch dočištěn – viz obr. 3.9.



Obr.3.9 Princip iontového čištění<sup>10,11</sup>

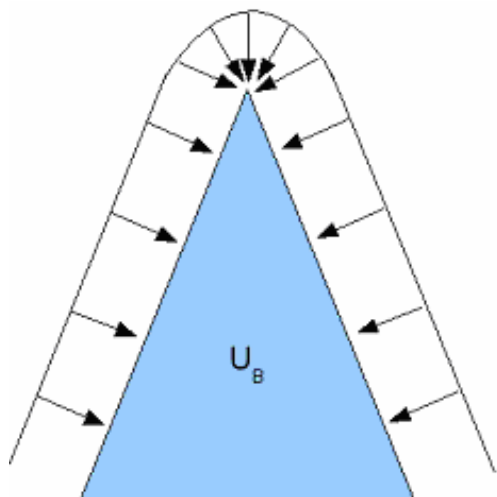
U slinutého karbidu dochází vlivem bombardu k odprašení kobaltového pojiva, což může mít negativní i pozitivní vliv na povlak. Byl zkoumán vliv čištění na kvalitu povrchu pod DLC vrstvou. Povrch byl bombardován za pomoci argonových iontů iontovým dělem po dobu jedné hodiny při rozdílu elektrického potenciálu 4200 V. Protože odprašovací rychlost kobaltu je daleko větší než odprašovací rychlost karbidu wolframu, zanechal tento proces povrch slinutého karbidu se sníženým obsahem kobaltového pojiva. Jelikož povlak DLC má velmi slabou vazbu ke kobaltu, tímto procesem dochází ke zvýšení adheze mezi povlakem a substrátem. Na druhou stranu snížený obsah kobaltu způsobuje oslabení vazby mezi zrna WC a toto oslabení může vést až k celkové destrukci nástroje, jak je ilustračně ukázáno na obr. 4.10.<sup>10,11</sup>



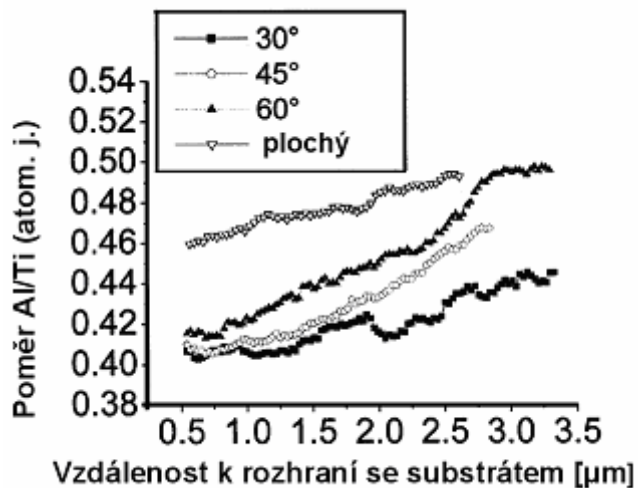
Obr. 3.10 Degradace nástroje vlivem úbytku kobaltu<sup>10,11</sup>

### 3.6 Vliv tvaru břitu řezné nástroje na tenkou vrstvu

Bylo prokázáno, že tvar břitu řezného nástroje neovlivňuje jenom sám o sobě řezné schopnosti nástroje, ale také vlastnosti deponované vrstvy. Oproti rovnému povrchu budou na břitu jiné vlastnosti deponované vrstvy důsledkem rozdílného iontového proudění. Byl zkoumán vliv deponované vrstvy TiAlCrYN. Vrstvy deponované na břitu měly menší poměr Al/Ti díky odprašení hliníku v důsledku většího bombardu v okolí břitu, jak ukazuje obr. 3.11. Vyšší koncentrace iontů dochází k tzv. vyplachování hliníku (pokles 11-14%)<sup>10,11</sup>.



Obr. 3.11 Schématický nákres plazmového pláště okolo klínovitého nástroje při jeho depozici<sup>10,11</sup>



Obr. 3.12 Závislost poměru Al/Ti pro různé úhly klínu na vzdálenosti rozhraní substrát-povlak<sup>10,11</sup>

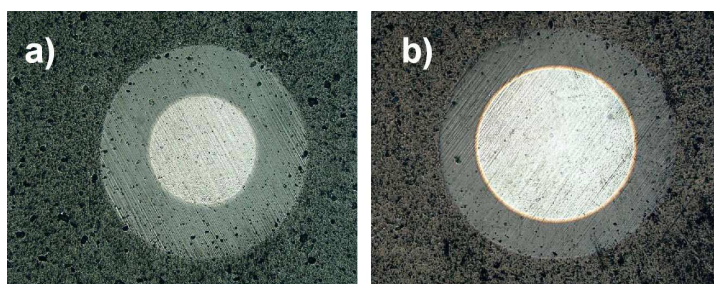
Dále byl pozorován vliv poloměru ostří a úhel klínu. Bylo zjištěno, že při zmenšujícím poloměru ostří se „vyplachování“ hliníku zintenzivňuje. Poměr Al/Ti se mění podle vzdálenosti od rozhraní substrát-povlak. Obr. 3.12 znázorňuje vliv úhlu ostří a vzdálenost rozhraní substrát-povlak<sup>10,11</sup>.

Jedním z řešení jak se zbavit „vyplavování“ hliníku je např. zvýšení plazmové hustoty, a tím zmenšit poměr šířky plazmového pláště k poloměru špičky, která vede k redukci fokuse iontů<sup>10,11</sup>.

## 4 Druhy povlaků

První povlakované břitové destičky ze slinutého karbidu pro obrábění se na trhu objevily koncem 60. let 20. století (Sandvik Coromant) s povlakem TiC a tloušťkou vrstvy 4-5  $\mu\text{m}$ . Jednalo se o jednovrstvý povlak se špatnou soudržností podkladu a povlaku, která byla způsobena nedokonalou technologií výroby, kdy mezi podkladem a povlakem docházelo ke tvorbě křehkého eta-karbidu, kvůli němuž se povlak odlupoval a nástroj se znehodnocoval (obr. 4.1a)<sup>2</sup>.

Brzy nato byly vyvinuty povlaky typu TiN a TiCN. Byly to povlaky jednovrstvé, ale už bez nevhodného eta-karbidu mezi povlakem a podkladem což umožňovalo deponovat vrstvy o tloušťce 7-10  $\mu\text{m}$  bez nebezpečí odlupování (obr. 4.1b)<sup>2</sup>.

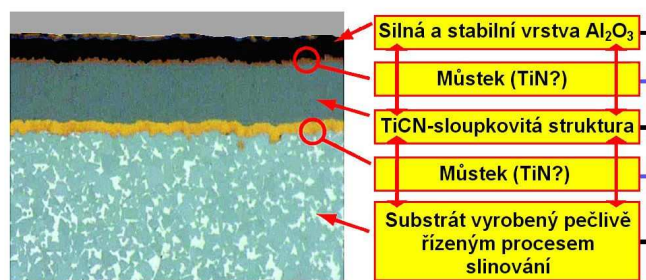


Obr. 4.1 Kalotest povlaků;

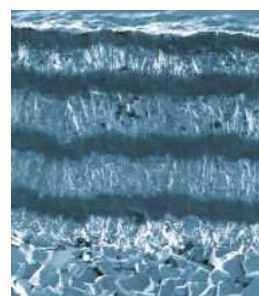
a) Povlak – monovrstva (eta karbid);

b) Povlak – monovrstva (bez eta karbidu) + „adhezní“ vrstvička<sup>1</sup>

V dnešní době se již zmiňované povlaky nepoužívají. Později byly vyvinuty povlaky vícevrstvé s ostře ohraničenými přechody (obr. 4.2) mezi jednotlivými vrstvami. Řazení vrstev odpovídá jejich vlastnostem tak, že jako první jsou na podklad obvykle nanášeny vrstvy s lepší přilnavostí k podkladu, které mají relativně nižší odolnost proti opotřebení, a jako poslední jsou nanášeny vrstvy, které nemusí mít dobrou přilnavost k podkladu, ale dobrou přilnavost k předchozí vrstvě např. TiC-  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , TiC- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN ap.(od podkladu k povrchu)<sup>2</sup>.



Obr. 4.2 Vícevrstvý povlak ostrými přechody<sup>1</sup>



Obr. 4.3 Multivrstvý diamantovým povlak<sup>1</sup>

Speciální vícevrstvé (multivrstvé) povlaky složené z více než deseti vrstev a mezivrstev jsou dalším stupněm ve vývoji povlaků (obr. 4.3). Za tyto povlaky jsou považovány povlaky diamantové, nanokompozitní, gradientní, supermřížkové, inteligentní a v budoucnu se k nim přiřadí i povlaky z kubického nitridu bóru.

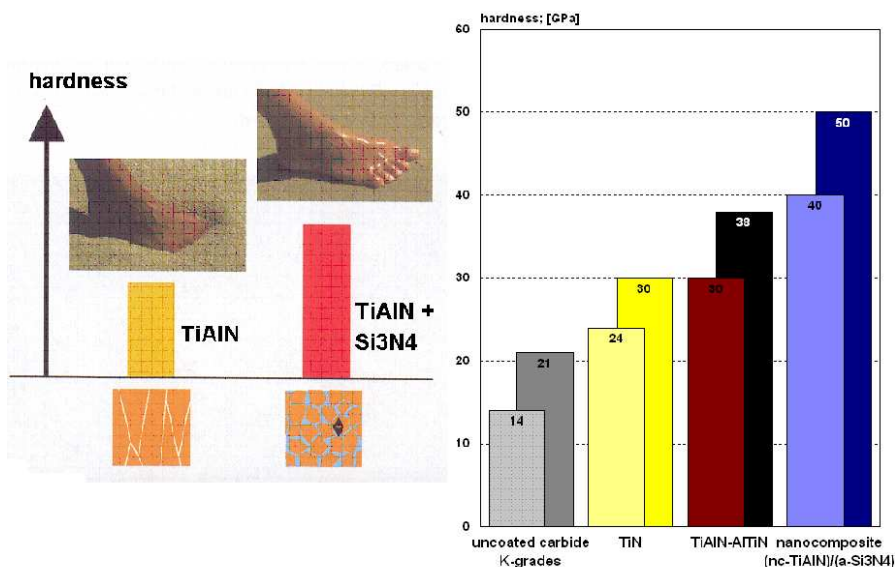
Podle tvrdosti jsou povlaky obvykle děleny do dvou skupin. Tvrdé povlaky s tvrdostí  $<40$  GPa a supertvrdé povlaky s tvrdostí  $>40$  GPa. Ve srovnání s velkým počtem tvrdých povlaků lze do skupiny supertvrдых povlaků zahrnout pouze několik materiálů – kubický nitrid bóru (KBN), (DLC), amorfni nitrid uhlíku ( $\text{a-CN}_x$ ) a polykrystalický diamant (PKD).

## 4.1 Jednovrstvé povlaky

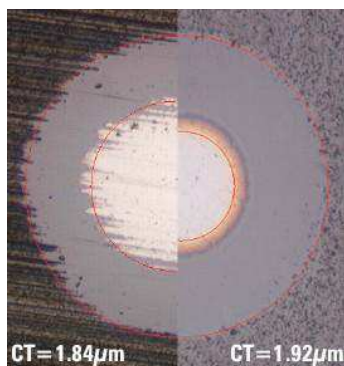
Výhodou těchto povlaků je rychlost depozice a cena. Při výrobě jsou všechny terče v povlakovací komoře odkryty a proto je růst vrstvy rychlý.

Mezi nejstarší povlaky patří TiN (nitrid titanu). Jedná se o velmi univerzální povlak žluté barvy (mění se podle množství dusíku). Tvrdost se pohybuje mezi 20 - 25 GPa přičemž větší tvrdost je pro slabě podstechiometrické složení. Podobné vlastnosti má TiC (karbid titanu), který je s nitridem titanu izomorfní a liší se pouze jinou mřížkovou konstantou. Barva povlaku je kovově šedá. Nevýhodou je, že vlivem izomorfie dochází od teplot 500 °C u TiN i TiC k oxidaci a přeměně na TiO. Vlivem tohoto dochází k odlupování povlaku od substrátu<sup>2,3,26</sup>. Typický příklad monovrstvy je na obr.4.5 kde je proveden kalotest.

Z důvodu nízké tepelné odolnosti se k těmto povlakům přidával Al a vznikl povlak TiAlN popř. AlTiN (záleží podle množství Al). Tyto povlaky vykazují větší tvrdost (25 - 33 GPa) při vyšších teplotách (800 °C). Zvyšování Al se snižuje tvrdost, ale zvyšuje odolnost proti oxidaci. Zajímavou alternativou těchto povlaků jsou povlaky na bázi CrAlN popř. CrAl-SiN pro obrábění převážně neželezných kovů. Dosahují tvrdosti vyšší než 35 GPa při teplotách >800 °C<sup>2,3,26</sup>. Tvrdosti jednotlivých povlaků jsou schematicky znázorněny na obr. 4.4.



Obr. 4.4 Porovnání tvrdostí SK bez povlaku a s povlakem<sup>5</sup>



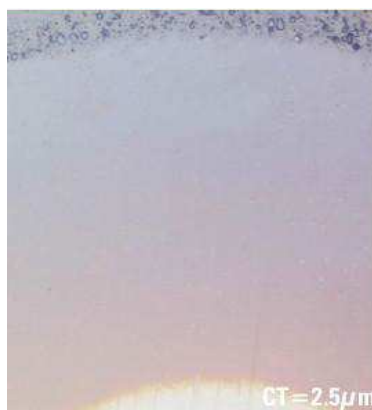
Obr. 4.5 Monovrstva<sup>7</sup>

## 4.2 Strukturované povlaky

Pokud existuje vážný požadavek průmyslových aplikací na zvýšenou tepelnou a chemickou stabilitu velmi tvrdých vrstev, pak běžné vrstvy na bázi TiN, TiC, TiAlN či AlTiN nestačí. Proto jsou již několik let připravovány vrstvy na bázi TiAlN i jiné v různých strukturovaných modifikacích, které umožňují zlepšit některé jejich fyzikálně-chemické vlastnosti. Hovoříme pak o multivrstvách, gradientních vrstvách a nanostrukturovaných vrstvách, kam patří i zvláštní skupina nakompozitních vrstev<sup>2,3</sup>.

### 4.2.1 Gradientní a nanogradientní vrstvy

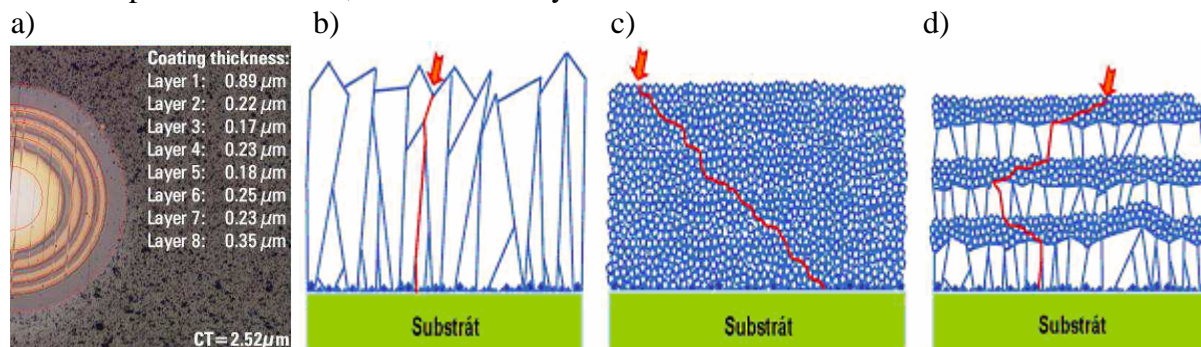
Na povlakovaném nástroji se nejdříve vytvoří adhezční vrstvička (obvyčejně TiN, CrN), následně se vytvoří vrstva, která obsahuje tvrdé komponenty (např. AlTiN). Množství tvrdých komponentů se průběžně zvyšuje. Na povrchu je dosažena maximální tvrdost. Dalším příkladem gradientní vrstvy je u vrstvy typu TiAlN. Od substrátu směrem k povrchu se zvětšuje obsah Al, a tím se zvýší odolnost proti oxidaci při zachování vysoké tvrdosti – viz obr. 4.6.<sup>2,3</sup>



Obr. 4.6 Gradientní vrstva<sup>2</sup>

### 4.2.2 Multivrstvy

Multivrstvy jsou vrstvy, kde se střídají alespoň dva druhy vrstev. Tloušťka těchto multivrstev je větší než u monovrstev (10-13 μm). Přechody mezi jednotlivými vrstvami zlepšují odolnost proti šíření trhlin, což vede ke zvýšení tvrdosti a houževnatosti<sup>2,7</sup>.



Obr. 4.7 Multivrstva a schéma šíření trhliny<sup>7</sup>

- kalotest multivrstvy
- jednovrstvý krystalický povlak
- jednovrstvý nanokrystalický povlak
- multivrstvý povlak

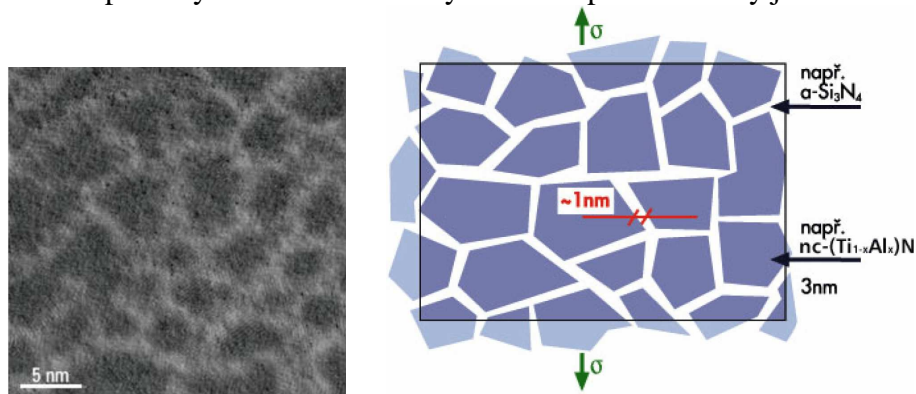


Jak je vidět na obr. 4.7b u jednovrstvého krystalického diamantu se trhliny snadno šíří, protože postupují přímočaře po hranicích zrn až k povrchu nástroje. Velmi jemná zrna u jednovrstvého nanokrystalického povlaku (obr. 4.7c) výrazně zvětšují lomovou houževnatost a zapříčiňují, že se trhliny šíří k povrchu substrátu po úhlem  $45^\circ$ . U multivrstvého povlaku (obr. 4.7d) se díky mnohonásobným vrstvám výrazně zvětší pevnost a trhliny jsou neustále odchylovány od povrchu substrátu<sup>2,7</sup>.

Multivrstva se „vyrobí“ tak, že dochází ke střídavému odpařování různých terčů a ukládání na substrát<sup>2,7</sup>.

### 4.2.3 Nanokompozitní vrstvy

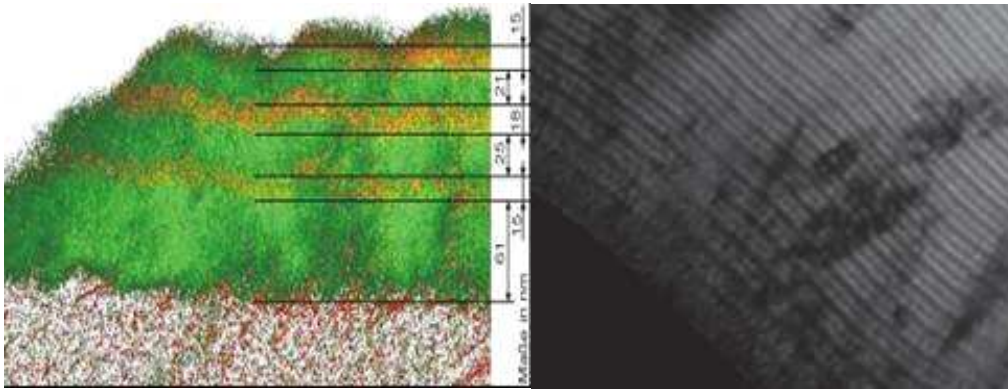
Nanokompozitní vrstva vzniká tak, že se odpařují různé materiály např. Ti, Al, Cr, Si...). Vzniká amorfni matrice  $\text{Si}_3\text{N}_4$  do které se usazují malé krystalky o velikosti nanometrů jiné fáze (TiAlN, AlTiN, AlCrN). Obě dvě fáze jsou vzájemně nerozpustné a alespoň jedna z nich musí být krystalická. Jedná se o termodynamicky stabilní materiál, a to i z hlediska zrnitosti. Nedochozí tedy k růstu zrnitosti ani za vyšších teplot. Hranice zrn slouží jako efektivní bariéra proti šíření poruch, a tím je dána vysoká tvrdost těchto materiálů (až 50 GPa). Hranice mezi jednotlivými krystaly jsou velmi úzké (pod 1 nm). Chování těchto materiálů je určeno zejména procesy probíhajícími v hraničních oblastech, protože počet atomů v zrnech je srovnatelný nebo menší než počet atomů v těchto oblastech. Za těchto podmínek neexistují dislokace, protože hranice zrn brání jejich tvorbě. V současné době se aplikují jak jednovrstvé, tak i vícevrstvé povlaky<sup>7</sup>. Schéma struktury nanokompozitní vrstvy je na obr. 4.8.



Obr. 4.8 Schéma nanokompozitní vrstvy<sup>7</sup>

### 4.2.4 Nanovrstvy

V podstatě se jedná o konvenční multivrstvy, kde jednotlivé vrstvy nepřesáhnou tloušťku 10 nm. Jedná se o supermřížkové povlaky, kde jednotlivé nanovrstvy ze dvou různých materiálů se střídají se supermřížkovou periodou. Zajímavé je, že celková tvrdost supermřížkového povlaku je vyšší než je tvrdost materiálů jednotlivých složek (např.  $H_{\text{TiN/NbN}} = 52$  GPa,  $H_{\text{TiN}} = 21$  GPa,  $H_{\text{NbN}} = 14$  GPa). Někteří autoři přisuzují tento nárůst tvrdosti tomu, že aby došlo ke zvýšení tvrdosti je nezbytné, aby se hodnoty modulů pružnosti materiálů dvou vrstev navzájem lišily, a že koherentní napětí na fázovém rozhraní dvou vrstev má minimální účinek. Jiní zase tvrdí, že navýšení tvrdosti je způsobené omezeným pohybem dislokací uvnitř jednotlivých vrstev povlaku i mezi nimi. Nejvyšší tvrdosti je podle tohoto modelu dosaženo v případech, kdy materiály dvou vrstev mají rozdílné hodnoty modulu pružnosti ve smyku a hranice mezi vrstvami jsou ostré<sup>2</sup>.



Obr. 4.9 Nanovrstva o celkové tloušťce 2  $\mu\text{m}$  <sup>7,14</sup>

V dnešní době je už možné připravit multivrstvý povlak o 2000 nanovrstvách. Nanovrstvy Ti/AlN mají tloušťku vrstvy pouhých 1,25 nanometrů, střídavě tvořených nitridem titanu a nitridem hliníku. Tento povlak byl vyvinut firmou SUMITOMO a nazván **povlakem ZX**<sup>7,14</sup>.

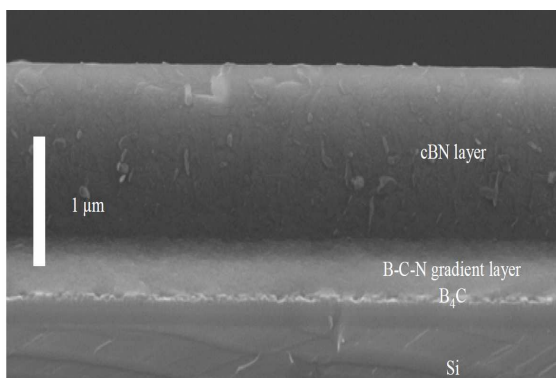
Vrstvy TiN (kubická struktura) a AlN (supermřížková kubická struktura) se v prostorově středěné kubické struktuře střídavě ukládají v rovinách (111). Tvrdost tohoto povlaku se blíží tvrdosti kubického nitridu bóru (4000 HV). AlN vytvořený při nízkých teplotách má hexagonální strukturu s tvrdostí pouze 1200 HV, ale v povlaku ZX jej „supermřížkový“ efekt nutí přijmou vysokoteplotní kubickou strukturu. Povlak ZX má vedle vysoké tvrdosti vysokou odolnost vůči tvorbě trhlin za tepla, vůči oxidaci a z toho vycházející vyšší odolnosti vůči opotřebení, delší životnost a výjimečně hladký povrch<sup>7,14</sup>.

### 4.3 Povlak z kubického nitridu bóru (CBN)

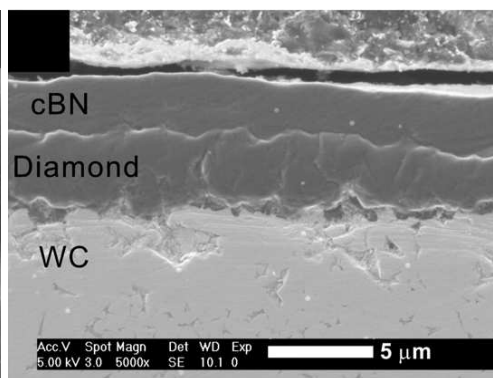
Roubíky z kubického nitridu bóru jsou již běžně používané. Tyto materiály vykazují vysokou tvrdost a tepelnou odolnost (1500 °C), která se hodí pro obrábění kalených ocelí. Spékáním prachu získáme polykrystalický kubický nitrid bóru. Vývojem povlaků z CBN se intenzivně zabývá řada firem i vývojových skupin. Zatím se bohužel nepodařilo nanést povlak z kubického nitridu bóru, který by oplýval vlastnostmi, který by předčil veškeré dosavadní povlaky. To proč se stále nedaří vyrobit takovýto povlak má několik důvodů. Problém adheze, tloušťky povlaku (max. 2  $\mu\text{m}$ ), znečišťujících látek, které jsou obsaženy v povlaku. Velmi špatná adheze cBN je řešena ukládáním povlaku na různé mezivrstvy<sup>23</sup>.

Nečistoty byly problémem při prvních povlacích v 80. letech 20.st., kde povlakování bylo prováděno metodou CVD (např. rozklad boridu chloristého  $\text{BCl}_3$ ). Docházelo převážně k deponování nevhodného hexagonálního nitridu bóru (hBN), jehož vlastnosti se podobají grafitu. K vytvoření kubického nitridu bóru (cBN) je zapotřebí metod využívajících iontovou asistenci (PECVD, PACVD...), protože z cBN roste za termodynamicky nerovnovážných podmínek. K nanášení povlaku z cBN je vhodnější metoda PVD a její různé modifikace, ovšem i za těchto podmínek je reprodukovatelnost a příprava čistých povlaků cBN stále velmi obtížná. Většina povlaků totiž obsahuje určitý podíl h-BN a nespécifikovatelné množství běžných znečišťujících přísad, jako je vodík, kyslík a uhlík<sup>2,23</sup>.

V dnešní době lze poměrně dobře nanášet tyto povlaky na substrát z čistého křemíku (obr. 4.10). Celý povlak se skládá z karbidu bóru  $\text{BC}_4$ , gradientní vrstvě B-C-N, kde směrem k povrchu roste obsah dusíku, ale klesá obsah bóru a uhlíku. Poté je nanesen povlak z cBN (cca 1,5  $\mu\text{m}$ )<sup>23,29,57</sup>.



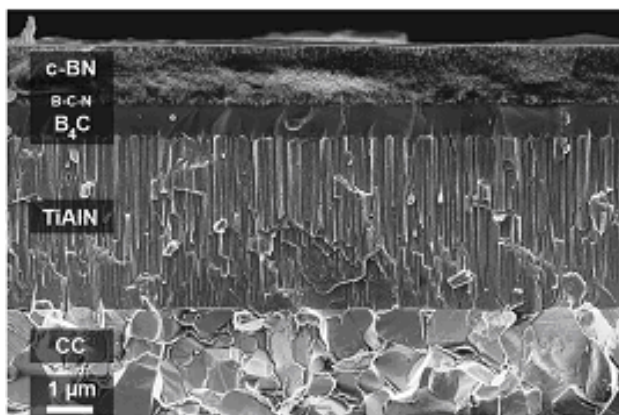
Obr. 4.10 Příčný řez povlakem z cBN na Si substrátu<sup>23</sup>



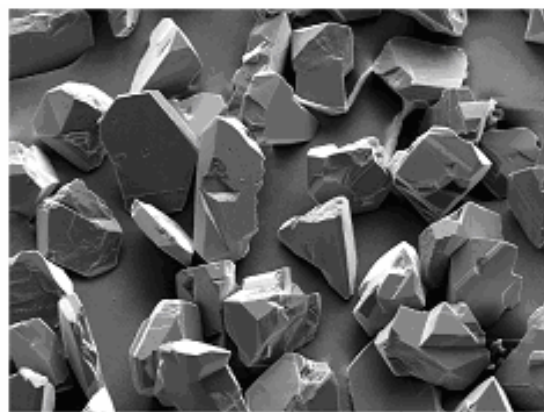
Obr. 4.11 Povlak cBN s diamantovou mezivrstvou<sup>23</sup>

Pokusy o nanesení povlaku z cBN na substrát ze slinutého karbidu byly také prováděny. Všechny mají společnou vrstvu z karbidu bóru a vrstvu cBN nanesenou na gradientní vrstvu. Jako mezivrstva mezi substrátem a karbidem bóru je použit čistý titan nebo TiN, TiAlN s jasně rozeznatelnými rozhraní. Vrstvy TiN a TiAlN vykazují sloupkovitou strukturu. Předpokládá se, že vrstva  $BC_4$  je amorfni, velmi tenká vrstva B-C-N (max. 0,2 µm) má převážně hexagonální strukturu a vrstva cBN je nanokrystalická s velikosti zrn cca 10-20 nm (obr 4.12).

Dále byly zkoušeny např. vrstvy na slinutý karbid WC-Co, ve kterém byl snížen obsah kobaltu a poté nanesen diamantový povlak, na který se nanasla vrstva z cBN viz obr. 4.11. Zatím žádný ze systému nanášení povlaku z c-BN nepřinesl revoluci v průmyslovém obrábění. Stále je to velká výzva pro všechny firmy zabývající se povlakováním nástrojů nejen v obrábění<sup>23,29,57</sup>.



Obr. 4.12 Povlak cBN se systémem mezivrstev<sup>57</sup>



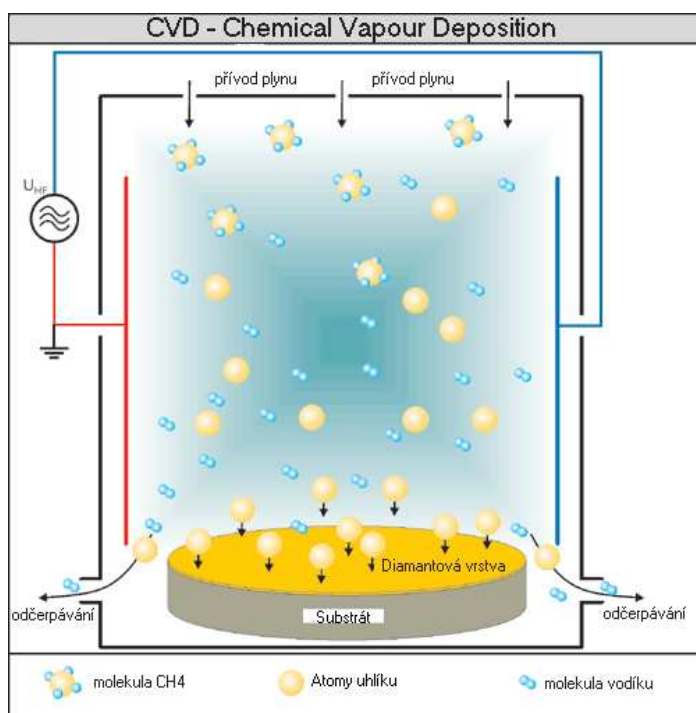
Obr. 4.13 Krystaly cBN<sup>23</sup>

## 4.4 Pvlaky z diamantu

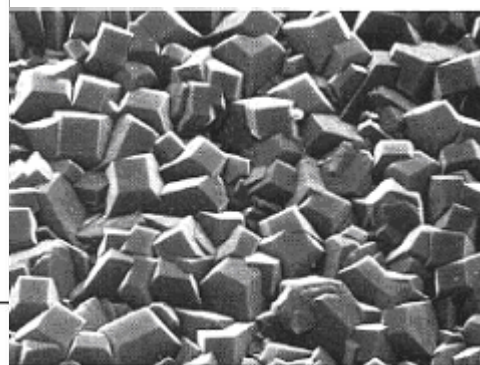
Diamant je považovaný ze nejtvrďší materiál na světě. Jeho tvrdost se pohybuje kolem 8000-13000 HV. Jako nástrojový materiál je velmi vhodný k obrábění nezelezných kovů a slitin převážně hliníkových s křemíkem, kompozitních materiálů, keramiky a různé materiály, u kterých je zapotřebí vysoká odolnost vůči abrazi. Nehodí se na obrábění kovů na bázi železa z důvodu difúze uhlíku do železa. Diamantové pvlaky jsou tvořeny shlukem malých krystalů o zrnitosti 1-10 µm (obr. 4.15). Každý krystal (pevně spojený se sousedními krystaly) je prakticky identický s přírodním diamantem a syntetickým diamantem vyrobeným při vysokém

tlaku. Tyto povlaky se obvykle nanášejí chemickou metodou CVD (obr. 4.14) a jejími dalšími modifikacemi při nízkých tlacích ze směsi metanu a vodíku. Tato směs je chemicky vybuze-  
na, aby produkovala vodík a uhlovodíkové radikály. Diamantový povlak se tvoří na substrátu  
ohřátém na teplotu 900 °C a roste za rovnovážných termodynamických podmínek bez nutnos-  
ti iontové asistence<sup>2,8</sup>.

Hlavním problémem při nanášení diamantu na slinitý karbid je kobaltové pojivo. Ko-  
balt není přítomný jen mezi karbidickými zrny, ale je také rozetřen na povrchu substrátu dů-  
sledkem broušení nebo lapování povrchu slinitého karbidu. V důsledku vysoké rozpustnosti  
uhlíku v kobaltu, dochází na rozhraní povlaku a substrátu při ochlazování k vylučování uhlíku  
ve formě grafitu, který snižuje adhezi diamantu k substrátu. Dalším aspektem ovlivňujícím  
adhezi povlaku jsou vysoká zbytková napětí (v diamantovém povlaku tlaková, v SK substrátu  
tahová) vznikají v důsledku velkého rozdílu v hodnotách koeficientu délkové roztažnosti<sup>2,8</sup>.



Obr. 4.14 Schéma depozice diamantového povlaku<sup>1</sup>

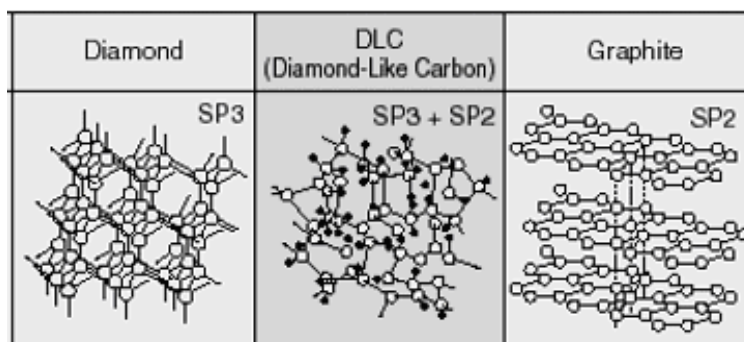


Obr. 4.15 Krystalická struktura povlaku<sup>8</sup>

Ke zlepšení adheze mezi povlakem a substrátem ze slinitého karbidu přispívá výběr substrátu s nízkým obsahem kobaltu, zvýšení drsnosti povrchu substrátu, snížení teploty substrátu při povlakování, vytváření mezivrstev na rozhraní substrát-povlak a nebo leštění substrátu diamantovými částicemi. Drsnost se sice zmenšuje, ale na druhou stranu hustota nukleace se zvětšuje z důvodu osévání diamantovými zárodky, čímž zvyšuje počet nukleačních míst<sup>2,8</sup>.

## 4.5 Povlaky DLC

Diamant má polykrystalickou mikrostrukturu. Pokud existuje materiál jehož mechanické a fyzikální vlastnosti jsou podobné diamantu, ale nevykazují při ozáření rentgenového paprsku difrakci ani Ramanův posuv, lze tento povlak považovat za „uhlík jako diamant“ (DLC – Diamond-Like Carbon). V některých publikacích je definice „diamant“ a „jako diamant“ založena na objemovém podílu a zrnitosti nanokrystalických diamantových struktur<sup>2,9</sup>. Rozdíl ve struktuře je znázorněn na obr. 4.16.

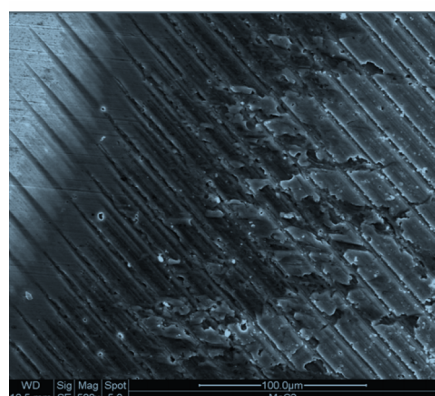


Obr. 4.16 Struktura DLC v porovnání s diamantem a grafitem<sup>8</sup>

Oproti diamantovému povlaku se DLC povlak liší amorfni mikrostrukturou, která je tvořena z grafického uhlíku, diamantového uhlíku a z vodíku v různých poměrech v závislosti na daném procesu s maximální tloušťkou povlaku 3 μm (diamant mnoho μm), tvrdost 3000 - 6000 HV (diamant 8000 - 12000 HV). Povlaky na bázi uhlíku je možné deponovat za nízkých tlaků s použitím různých depozičních technik. U plazmaticky aktivovaných CVD metod PECVD jsou povlaky DLC obvykle vytvářeny z uhlovodíkových reaktivních plynů (metan, propan, acetylen), které jsou štěpeny a ionizovány v nízkoteplotní plazmě. Radikály a ionty vzniklé z plynné fáze dopadají na povrch substrátu, což vede k růstu vrstvy. Přidáním dalších plynů (vodík, kyslík, dusík nebo další přísadové prvky) lze řídit změny chemického složení a atomové struktury povlaku. Je možné použít i PVD metody nejvíce katodové obloukové napařování a magnetronové napařování. Odpařovaná nebo odprašovaná je taková katoda, kterou tvoří uhlíkový terč, a jako pracovní plyn se většinou používá argon<sup>2,9</sup>.

## 4.6 Kluzné povlaky

Další oblastí moderních vrstev jsou kluzné (lubrikační) vrstvy, které se liší od předšlých vrstev především nižší tvrdostí. Jejím úkolem je vytvořit systém vrstev, také s kombinací vrstev tvrdých na bázi TiN, TiAlN, TiCN a DLC, které mají vynikající kluzné vlastnosti s dobrou tvrdostí. Snahou vývoje je vytvořit vhodnou kombinací „tvrdé“ a „měkké“ složky optimálně abrazivně odolnou vrstvu s velmi nízkým koeficientem frikce. Měkká vrstva má za „úkol“ lepší záběh nástroje při procesu, celkově je úkolem výrazně snížit tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou čímž se sníží tepelné zatížení nástroje, což se projeví ve zvýšení jeho trvanlivosti<sup>3</sup>.



Obr. 4.17 Lubrikační vrstva MoS<sub>2</sub> nanesená na AlTiN<sup>3</sup>



Obr. 4.18 Záznam tribologické analýzy pin-on-disk vrstvy MoS<sub>2</sub><sup>3</sup>

Jedním z takovýchto povlaků je samomazný povlak na bázi  $\text{MoS}_2$  (obr. 4.17) s velmi nízkým koeficientem tření (0,1). Použitelnost tohoto povlaku je do teploty  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , tloušťka povlaku je malá (0,5 - 2  $\mu\text{m}$ ) a nanotvrdost je 20 GPa. V prvopočátku procesu dochází k opotřebení tohoto povlaku nanesený na tvrdý povlak. Po zaběhnutí je tření dáno podkladovým materiálem – obr.4.18.<sup>3</sup>

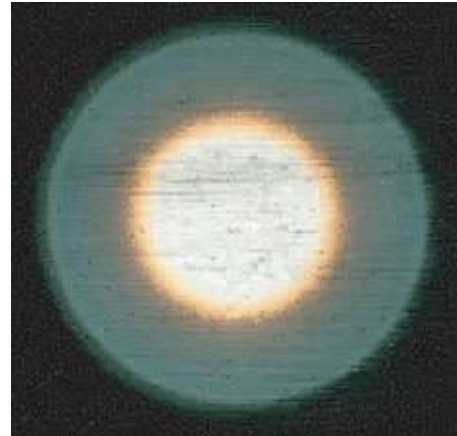
Další systém lubrikačních vrstev je založen na bázi oxidu hliníku  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Tyto oxidy vynikajících vlastností jako je tepelná a chemická stabilita, doprovázená výbornými mechanickými vlastnostmi. Systém těchto lubrikačních vrstev je převážně tvořen oxidy hliníku a titanu s přidávkem izotropně rozděleného uhlíku. Obsah uhlíku je optimalizován právě pro kluzné aplikace. Ve struktuře je dominantní fáze  $\text{Al}_2\text{O}_3$  s příspěvkem TiC. Z pohledu kluzných vlastností je velmi důležitá přítomnost vazeb C-C, C-O, a C=O. Převážná část složek je amorfni<sup>3</sup>.

Lubrikační vrstvy se nanáší jako závěrečná část již zavedených povlaků (metoda PVD). Např. nanokompozitní monovrstva MARWIN SI ( $\text{nc}-(\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N/a-Si}_3\text{N}_4$ ), gradientní vrstva MARWIN G nebo nanokompozitní multivrstva měnící poměr Ti/AlSi MARWIN MT – firma SHM Šumperk. Název lubrikačních vrstev se potom nazývají podle zavedených povlaků jako LUBRIC SI ap. – viz obr.4.19 a 4.20.<sup>3</sup>

Tyto povlaky byly testovány nejenom laboratorně. Podle dosavadních výsledků jsou výsledky pozitivní co se týče zvyšující se životnosti nástrojů a lze předpokládat, že tyto kluzné vrstvy jsou pouze vstupní branou k mnoha rozsáhlejším systémům lubrikačních vrstev<sup>3</sup>.



Obr. 4.19 Lubric SI<sup>3</sup>



Obr. 4.20 Lubric G<sup>3</sup>

## 4.7 Nejnovější trendy v povlakování

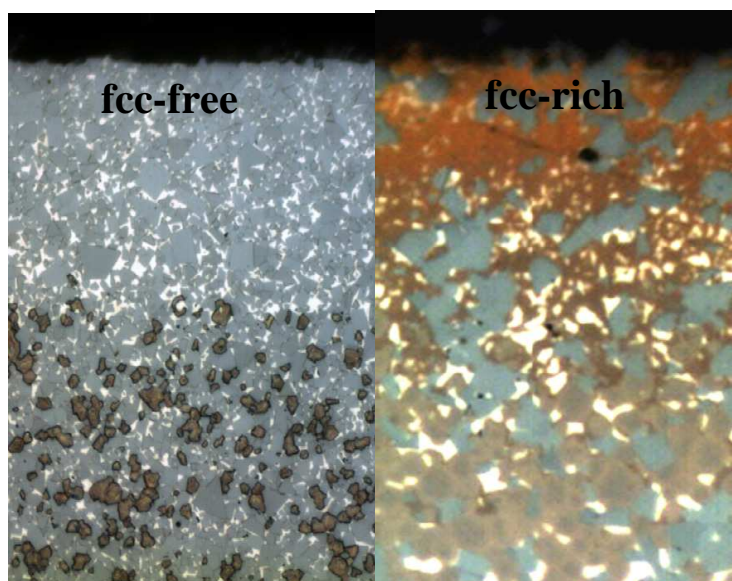
Nedá se příliš předpokládat, že by došlo k výraznému vývoji materiálů nebo objevení úplně jiného druhu materiálu s diametrálně lepšími vlastnostmi pro výrobu řezných nástrojů, proto se vývoj spíše zaměřuje na různé druhy povlaků již stávajících materiálů, jejich modifikace a technologie povlakování.

Velkou výzvou pro všechny firmy, které se zabývají povlakováním řezných nástrojů, je vytvořit funkční povlak pro průmyslové aplikace z kubického nitridu bóru. Podle dosavadních výsledků se stále nedaří získat povlak, který by oplýval vlastnostmi tohoto materiálu v čisté formě. Samozřejmě vývoj slepě „nezamrzl“ jen na vývoji tohoto materiálu. Dále jsou uvedeny některé aplikace nejnovějších povlaků, které se zatím objevily jak na laboratorní úrovni, tak i na úrovni průmyslové.

#### 4.7.1 Povlakované slinuté karbidy s funkčně gradientní vrstvou

V práci José Garcia a Reinharda Pitonaka bylo zkoumáno opotřebení povlakovaných slinutých karbidů s gradientně funkčním substrátem. Substrát byl obohacen o kubické karbidy, které mají za následek zvýšení odolnosti proti opotřebení. Multivrstvý povlak z TiN – HT-Ti(C,N) –  $\chi$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - TiN, byl nanesen na gradientní substrát CVD metodou a dosahoval nejlepších výsledků.<sup>28</sup>

Funkčně gradientní vnější vrstva substrátu obohacená o kubické karbidy byla vytvořena nitrací jako slinovaná směs (HM-1). Funkčně gradientní vnější vrstva substrátu bez kubických karbidů byla vytvořena slinováním obsahující TiN (HM-2). Gradientní vrstvy byly vytvořeny difúzním procesem kontrolovaným během slinování prášku. Na obrázku 4.21 jsou představeny typické mikrostruktury funkčně gradientních substrátů vyšetřovaných v práci Garcia a Pitonaka.<sup>28</sup>



Obr. 4.21 Vlevo mikrostruktura funkčně gradientního substrátu chudá na kubické karbidy (houževnatá gradientní vrstva) a vpravo obohacená o kubické karbidy (vysoká odolnost proti opotřebení)<sup>28</sup>

Vnější vrstva substrátu chudá na kubické karbidy (Fcc-free) se skládá z WC-Co s obsahem kobaltu 1,5 násobek větším než celý objem substrátu. Tyto vrstvy bez kubických karbidů představují vyšší houževnatost pro břitové destičky.<sup>28</sup>

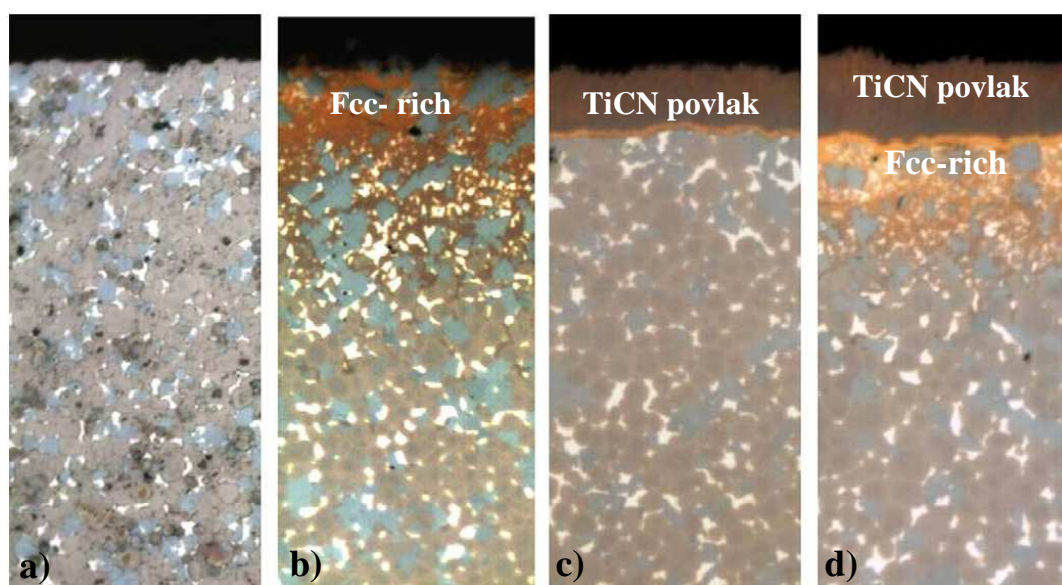
Vnější vrstva substrátu obohacená o kubické karbidy (Fcc-rich) se skládá z Ti(C,N) zrn se sníženým množstvím kobaltového pojiva, která představuje vyšší odolnost proti opotřebení pro břitové destičky.

V druhé části byly tyto modifikované vnější vrstvy povlakovány. Všechny vrstvy byly vytvořeny CVD metodou s horkou stěnou reaktoru. Dva druhy Ti(C,N) vrstev byly vytvořeny střední teplotou a vysokou teplotou Ti(C,N) (označené v tabulce 4.1 MT-Ti(C,N) a HT-Ti(C,N)). Vrstva z  $\chi$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> byla vybrána jako teplotní bariéra. Pro lepší identifikace ukazatele opotřebení byla použita vrchní vrstva z TiN o tloušťce 0,5  $\mu$ m. Multivrstvy byly deponovány s podobnou tloušťkou z důvodu lepší porovnatelnosti. V tabulce 4.1 je přehled zkoumaných povlakovaných vzorků.<sup>28</sup>

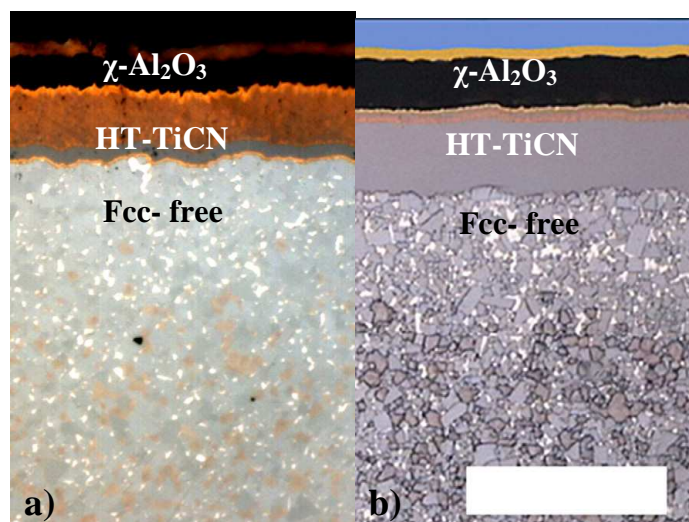
Mikrostruktury jednotlivých zkoumaných vzorků jsou uvedeny na obr. 4.22 pro skupinu číslo 1. Pro skupinu číslo 2 jsou na obr. 4.23 a na obr. 4.24 pro skupinu číslo 3.

Tab.4.1 Skupina zkoumaných vzorků<sup>28</sup>

Skupina	Vzorek	Gradientní povrch vrstvy	CVD povlak
1	HM-1	-	-
	HM-1-N2	FCC-rich	-
	HM-1-TiCN	-	TiN/HT-Ti(C,N)
	HM-1-N2-TiCN	FCC-rich	TiN/HT-Ti(C,N)
2	HM-2-MT-TiCN	FCC-free	TiN/MT-Ti(C,N)/ $\chi$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiN
	HM-2-HT-TiCN	FCC-free	TiN/HT-Ti(C,N)/ $\chi$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiN
3	HM-1-N2-multivrstva	FCC-rich	TiN/HT-Ti(C,N)/ $\chi$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiN
	HM-2-multivrstva	FCC-free	TiN/MT-Ti(C,N)+HT-Ti(C,N)/ $\chi$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiN

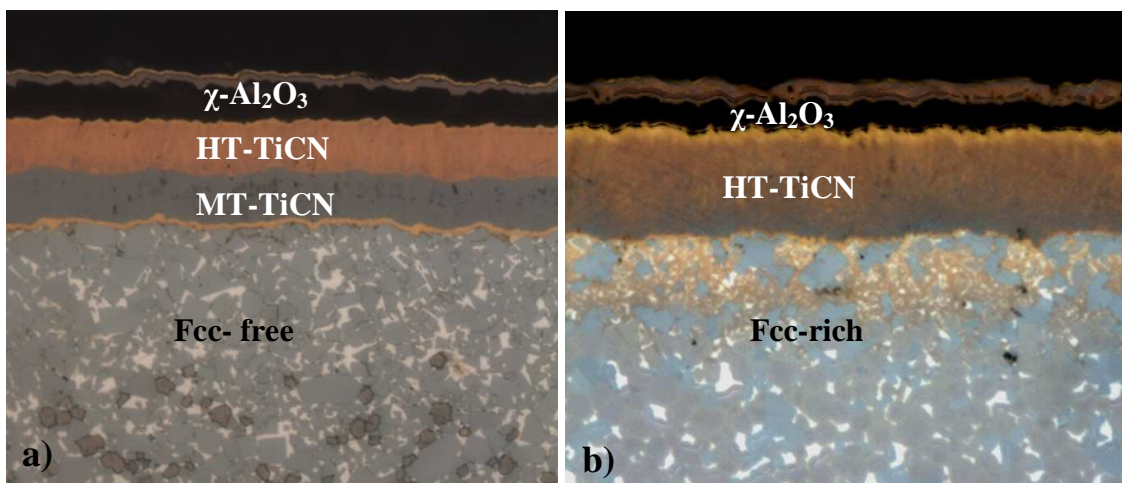


Obr. 4.22 Mikrostruktura vzorků první skupiny: a) HM-1; b) HM-1-N2; c) HM-1-TiCN; d) HM-1-N2-TiCN<sup>28</sup>



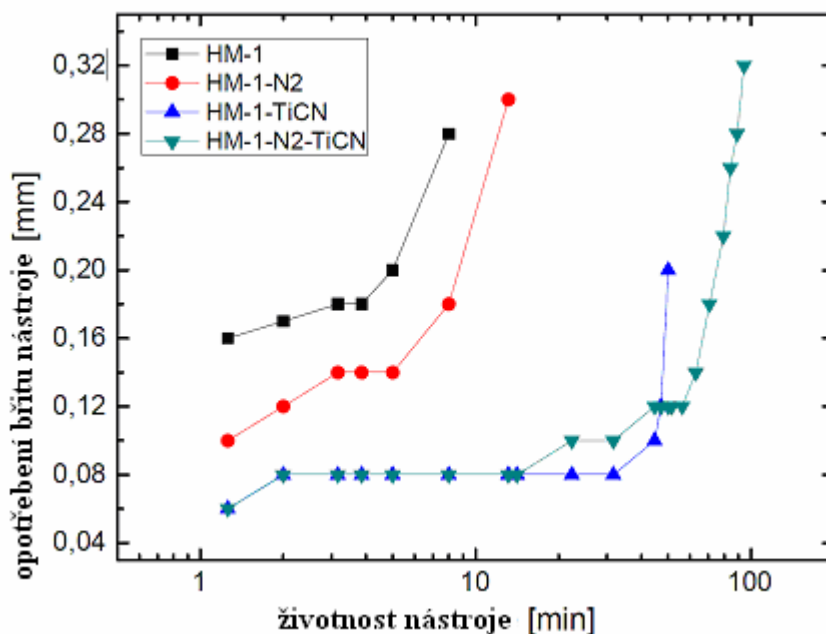
Obr. 4.23 Mikrostruktura vzorků druhé skupiny: a) HM-2-MT-TiCN; b) HM-2-HT-TiCN<sup>28</sup>





Obr. 4.24 Mikrostruktura vzorků třetí skupiny: a)HM-2-multivrstva; b)HM-1-N2-multivrstva<sup>28</sup>

První skupina vzorků byla navržena tak, aby stanovila vliv nitridačního procesu na obráběcí výkon slinutých karbidů. Dalším cílem zkoumání je porovnání odolnosti proti opotřebení mezi vrstvami Ti(C,N) vytvořené CVD metodou a Ti(C,N) gradientní vrstvou vytvořené nitridací slinutého karbidu. Jak je patrné z obr. 4.25, došlo k dramatickému zvýšení obráběcího výkonu díky kombinaci funkčně gradientního nitridovaného slinutého karbidu a CVD vrstvy z Ti(C,N)<sup>28</sup>.



Obr. 4.25 Výsledky testu podélného soustružení první skupiny vzorků<sup>28</sup>

Druhá skupina vzorků má za cíl zkoumat funkčně gradientní přechod mezi Ti(C,N) a  $\chi$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na obráběcí výkon a přechod TiN-Ti(C,N)-  $\chi$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -TiN multivrstev. Multivrstvy s efektem vzájemného působení mezi karbonitridy a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vrstvy (HM-2-HT-TiCN) vykazují až o 65% větší počet dosažených testovaných řezů v porovnání s multivrstvami HM-2-MT-TiCN<sup>28</sup>.

Třetí skupina vzorků má za cíl zkoumat obráběcí výkon funkčně gradientních multivrstev deponovaných na funkčně gradientní slinutý karbid s vnější vrstvou ochuzenou o kubické karbidy a vrstvou bohatou na kubické karbidy. Multivrstvý systém HM-1-N<sub>2</sub>-multivrstva, vykazuje obráběcí výkon mezi 38 - 40 řezy, což znamená o 25 - 30% vyšší odolnost vůči opotřebení v porovnání se systémem HM-2-multivrstva<sup>28</sup>.

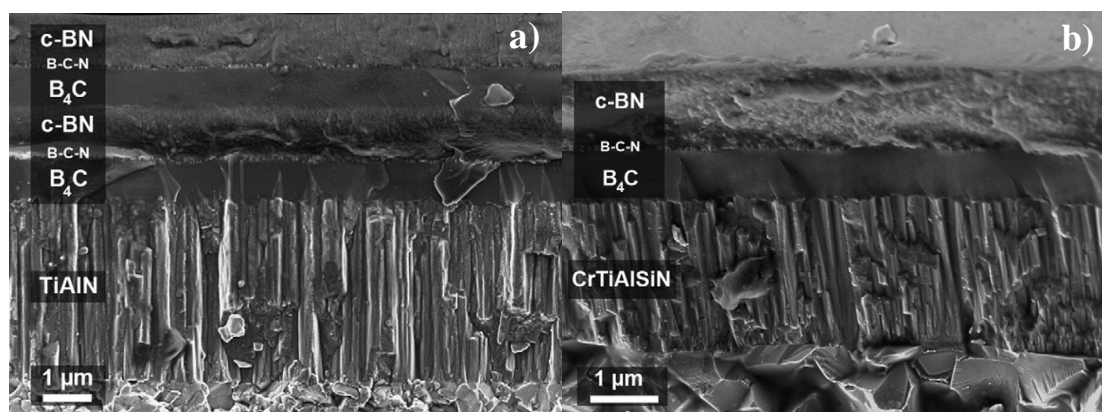
Vytváření funkčně gradientních vrstev na substrátu obohacené o kubické karbidy vede obecně k zvýšení odolnosti proti opotřebení. Odolnost proti opotřebení povlaku Ti(C,N) je pozoruhodně vyšší než odolnost proti opotřebení karbonitridů titanu vytvořených nitridací v povrchových vrstvách substrátu<sup>28</sup>.

#### 4.7.2 Povlaky z kubického nitridu bóru (cBN)

Z důvodu zvyšování adheze cBN se zkoumají různé mezivrstvy. Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, tak na substrát ze slinutého karbidu se používá mezivrstva z TiAlN a dále systém BC<sub>4</sub>, gradientní B-C-N a až na tomto povlaku vrstva z cBN<sup>57</sup>.

Podle Richetera a spol. byl odhalen jev, kdy přidání Cr nebo Cr + Si do mezivrstvy TiAlN, získáváme vlastnosti povlaku z cBN velmi podobné čistému objemu cBN, a to Yangův modul pružnosti >800 GPa, tvrdost >70 GPa a s porovnáním se standardním povlakem TiAlN mnohem nižší hodnotu opotřebení. Povlaky, které se standardně používaly jako tvrdé otěruvzdorné povlaky nástroje, slouží v tomto systému jako mezivrstvy ke zvyšování adheze k podkladovému substrátu<sup>57</sup>. Řazení jednotlivých mezivrstev je znázorněno na obr. 4.26b.

Porovnání jednotlivých vrstev je v tabulce 4.2, z které je patrné, že povlaky z cBN s mezivrstvou CrTiAlSiN dosahují největší tvrdosti. Zatímco největší tloušťky z cBN dosahuje další alternativní systém řazení mezivrstev BC<sub>4</sub> – C-B-N – cBN - BC<sub>4</sub> – C-B-N – cBN atd<sup>57</sup>. Na obr.4.26a je znázorněn takovýto systém povlakování s dvěma stohy.



Obr. 4.26 Povlak z cBN – řazení jednotlivých vrstev<sup>57</sup>

Tab. 4.2 Porovnání mechanických a tribologických vlastností vrstvy TiAlN<sup>57</sup>

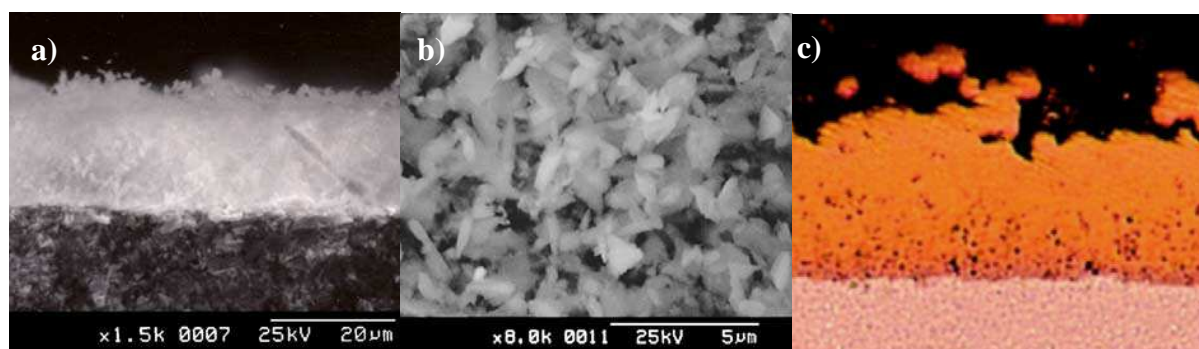
	TiAlN	CrTiAlN	CrTiAlSiN	c-BN/TiAlN	c-BN/CrTiAlN	c-BN/CrTiAlSiN	c-BN dva stohy
Tloušťka vrstvy (μm)	3,4	2,8	2,4	c-BN:1,1	c-BN:1,1	c-BN:1,1	c-BN:2,2
Mikrotvrdost (GPa)	24,2	30	31,5	71,8	71	75,2	74,8
Yangův modul pružnosti (Gpa)	345	362	340	339	329	339	341
Míra abrazivního opotřebení (x 10 <sup>-15</sup> m <sup>3</sup> N <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )	5,3	5,1	4,6	0,6	0,6	0,5	0,5
Kritické zatížení				>50	>50	>50	>50

### 4.7.3 Nanokompozitní povlak cBN – TiN

Tento povlak je tvořen základní pórovitou matricí z cBN a do těchto pórů je infiltrován nitrid titanu TiN. Důvod, proč se vlastně vytvářejí takoveto hybridní povlaky, je ten, že kubický nitrid bóru vykazuje „luxusní“ vlastnosti, které, kdybychom byli schopni získat, tak bychom získali povlak s vlastnostmi převyšujícími v jistých ohledech ostatní povlaky. Bohužel zatím takový povlak neexistuje. Kubický nitrid bóru byl studován mnohými vědeckými i průmyslovými pracovníky. Nanášen byl metodami PVD i CVD. Tyto techniky byly schopny vytvořit povlak z téměř čistého cBN ovšem jen do tloušťky 2  $\mu\text{m}$ . Nicméně i v tomto povlaku se vytváří tlakové napětí několik GPa. Dalším problémem je nízká depoziční rychlost a existence h-BN nebo t-BN. Průlom v tloušťce povlaku (5 - 20  $\mu\text{m}$ ) je nanášení částecek z cBN metodou elektrostatické naprašování (ESC – Electrostatic Spray Coating) jako pórovitou preformu a následováním metodou chemické infiltrace (CVI – Chemical Vapour Infiltration), kterou se nanese TiN jako pojivo. Tato metoda pracuje stejným principu jako proces CVD<sup>29</sup>.

První částí celého procesu je elektrostatické naprašování prachových částí z cBN. Tyto částice jsou nabíjeny elektrostatickým nábojem. Díky izolačním schopnostem cBN jsou nabíjeny průchodech přes elektrostatické dělo napojené ke zdroji vysokého napětí (stovky kV). Částice jsou volně vázány jedna na druhou. Na substrátu jsou drženy prostřednictvím elektrostatické síly<sup>29</sup>.

Poté je za pomoci metody CVI pomalu deponována vrstva z TiN, která zapouzdří částice z cBN a následuje zaplnění pórů a vytváření krycí vrstvy z čistého TiN. Příčný řez hybridním povlakem a typický naprášený povlak z cBN je na obr. 4.27a a 4.28c. Výsledkem je tedy povlak, kde základní matrice je tvořena z cBN a v této matrici je infiltrován nitrid titanu, který zároveň pokrývá i celý povrch nástroje<sup>29</sup>.



Obr. 4.27 a) Vytvořený naprášený povlak z cBN; b) póry v cBN; c) příčný řez nanokompozitním povlakem cBN-TiN<sup>29</sup>

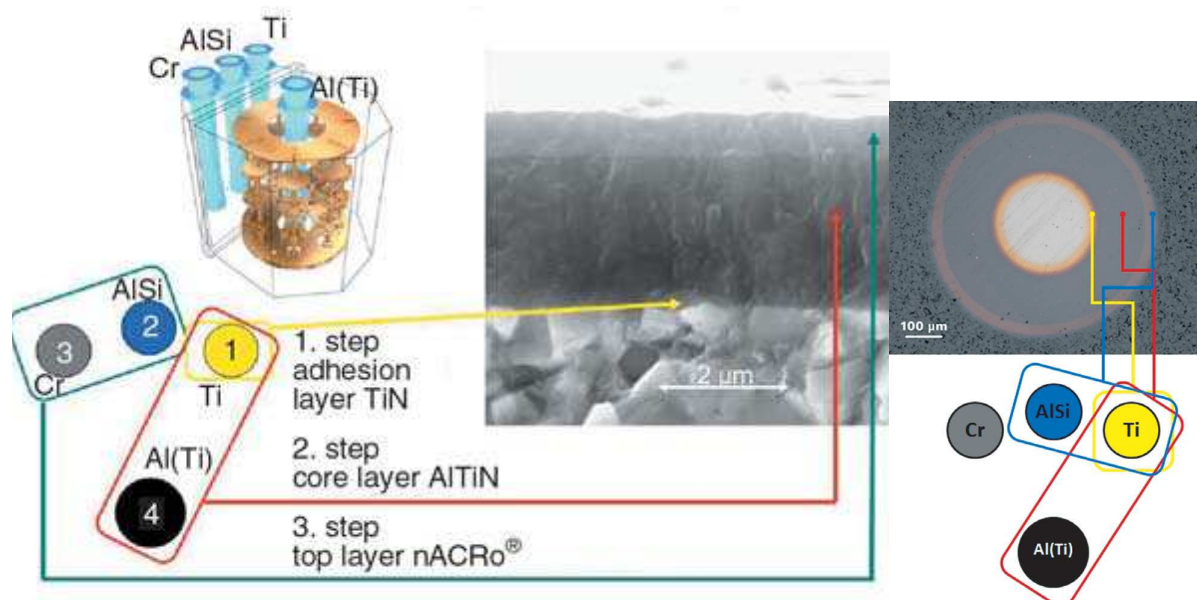
Díky výborné smáčivosti, fáze TiN s částicemi cBN vyplní veškeré póry vzniklé v naprášeném povlaku z kubického nitridu bóru. Tento nanokompozitní povlak má díky fázi TiN vynikající adhezi k substrátu. Fáze TiN má dvojí funkci – držet částice cBN pohromadě a vázat celý systém povlaku během obrábění k povrchu substrátu<sup>29</sup>.

Příčný řez na obr. 4.27c ukazuje homogenitu dispergovaných cBN částic nebo shluků v TiN matrici bez trhlin a defektů. Tloušťka povlaku včetně krycího povlaku TiN je asi 20  $\mu\text{m}$ . Morfologie povlaku ukazuje kopulovitě fazetované krystalové struktury. Drsnost povrchu byla měřena ve třech náhodně zvolených směrech v oblasti lamače třísek. Naměřené hodnoty byly menší než  $R_a = 3,0 \mu\text{m}$ . Ačkoliv povlak nebyl měřen na adhezní zatížení, „přežil“ soustružení kalené oceli bez delaminace. U tohoto povlaku je indikována excelentní adheze k substrátu<sup>29</sup>.

#### 4.7.4 Trojité vrstvy – TripleCoating

Jedná se o novou generaci povlaků vyráběných metodou obloukové technologie PVD s rotačními většinou neslitinovými terči – viz obr. 4.28. Povlaky ve vícevrstevném provedení a v kombinaci s nanokompozitní vrstvou mohou být trendem ve vývoji nových univerzální povlak, tuto myšlenku také představuje TripleCoating. K dosažení optimální adheze není možné, aby povlak začínal vícesložkovou adhezní vrstvou deponovanou ze slitinových terčů (např. TiAl nebo AlCr atd.). Optimální adheze může být zajištěna povlaky Ti-TiN nebo Cr-CrN, deponovanými z jednosložkových targetů. Obecně se tento povlak skládá ze tří vrstev<sup>6</sup>:

- jako první vrstva na substrát je nanesena adhezní vrstva nejčastěji TiN případně CrN. Adhezní vrstva je deponována z čistého Ti nebo Cr terče. Tloušťka adhezní vrstvy je cca 200 nm;
- houževnatá základní monovrstva AlTiN, TiAlN je deponována s pomocí centrálního AlTi terče (katody) umístěného ve dveřích;
- povrchová vrstva je tvořena nanokompozitním povlakem ncTiAlN/a-SiN, ncAlCrN/a-SiN, ncAlTiCrN/a-SiN, který má zajistit vysokou odolnost vůči opotřebení a extrémní vysokoteplotní tvrdost



Obr. 4.28 Povlak TiN-AlTiN- ncTiAlN/a-SiN, rozmístění katod v povlakovacím zařízení<sup>6</sup>

Podle tohoto rozmístění katod v povlakovacím zařízení je možné vytvořit několik modifikací těchto trojitých povlaků s různými poměry jednotlivých prvků a jejich kombinace.

#### 4.7.5 Nanokompozitní povlaky na bázi Cr – Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Nanokompozitní povlaky Cr-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> s nízkým koeficientem tření a vysokou houževnatostí byly připraveny na substrát z rychlořezné oceli, jejichž povrch byl upraven plazmovou nitridací. Nitridování slouží ke zlepšení tvrdosti oceli, závisí na složení oceli a nitridovacích parametrech. Nicméně maximální tvrdost nitridační vrstvy není dostačující na obráběcí aplikace. Navíc pro tyto aplikace houževnatost a koeficient tření hraje také důležitou roli. Z tohoto důvodu je zapotřebí zvyšovat mechanické vlastnosti povrchu další depoziční technikou<sup>58</sup>.

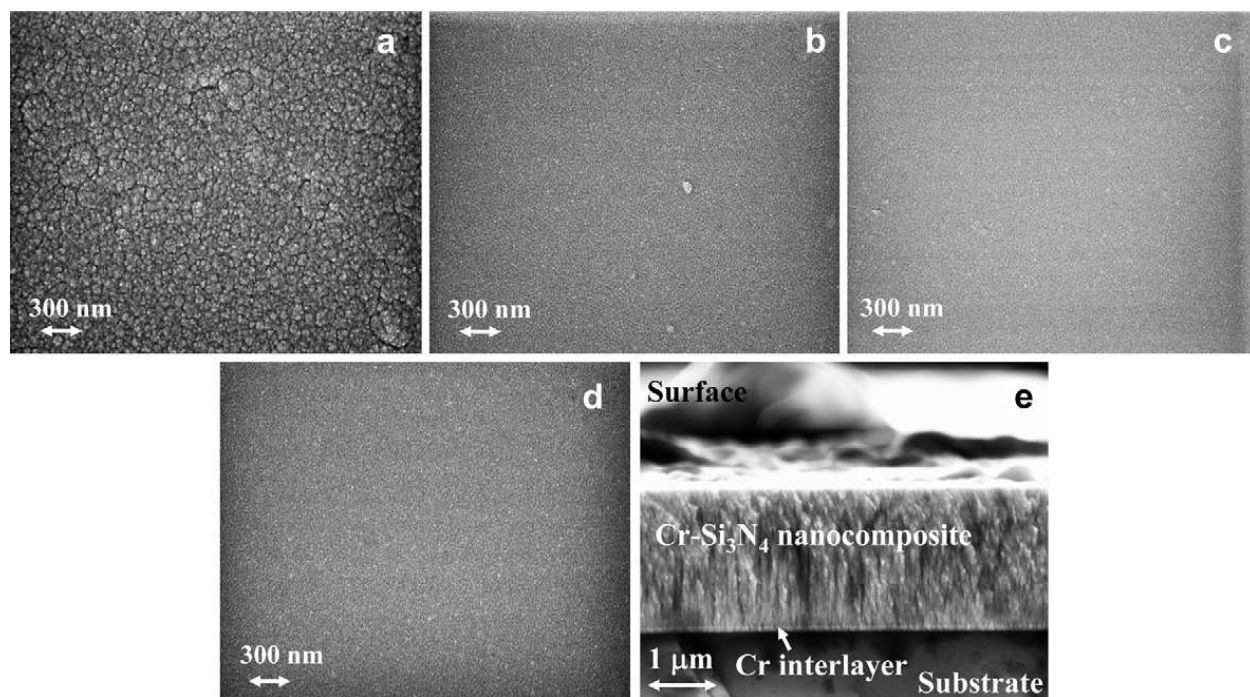
Plazmová nitridace je nejčastěji kombinovaná s metodou fyzikálního napařování (PVD) a tento proces se nazývá duplexní povlakování. Povlaky jako jsou TiN, CrN, TiAlN atd. připravené na nitridované oceli a jiných substrátech byly zkoumány v minulých letech. Povlakování nanokompozitních povlaků na nitridovaných substrátech představuje novou generaci tvrdých po-

vlaků pro různé obráběcí aplikace. Nanokompozitní povlaky mají vyšší houževnatost ale zároveň i nižší tvrdost především díky migraci a skluzu hranic zrn. Keramická fáze v nanokompozitním povlaku je představitelem tvrdosti a kovová fáze v povlaku má za úkol zvyšovat její tvárnost.<sup>58</sup>

V tomto případě je studovaný povlak Cr-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanášen za pomoci magnetronového naprašování na nitridovaný ocelový substrát. Zkoumány byly především mechanické a tribologické vlastnosti v závislosti na obsahu Cr v povlaku. Nanokompozitní povlak Cr-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> připraven magnetronovým naprašování na ocelový substrát s chemickým složením 82,7 at.% Fe, 5,2 at.% Cr, 4,5 at.% Mo, 3,5 at.% W, 3,1 at.% V a 1,0 at.% C.<sup>58</sup>

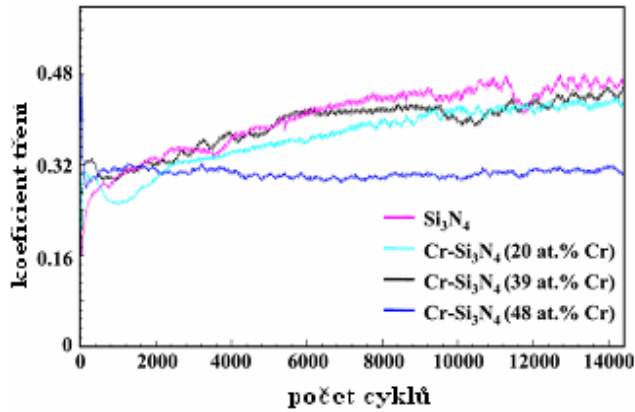
Nitridace probíhala při teplotě 500 °C po dobu 2 h. Procesní parametry plazmové nitridace byly optimalizovány z důvodu odstranění vytvořené bílé vrstvy. Dále byl povrch leštěný z důvodu odstranění monovrstev z povrchu před depozicí. Nanokompozitní vrstva byla nanášena použitím vysoce čistého Cr (99,95%) a Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (99,9%) terčů v argonové plazmě. Depozice proběhla za použití RF zdroje. Cr mezivrstva byla deponovaná na substrát z důvodu zlepšení adheze povlaku<sup>58</sup>.

Zkoumány tedy byly tribologické a mechanické vlastnosti v závislosti na rozdílném obsahu Cr (obr. 4.29a,b,c,d). Příčný řez vrstvou je znázorněn na obr. 4.29e.

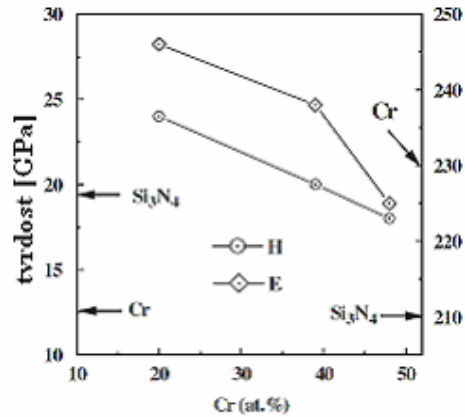


Obr. 4.29 Mikrosnímek morfologie povrchu: a) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> povlaku, a Cr-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanokompozitní povlaku s obsahem Cr; b) 20 at.%, c) 39 at.% a d) 48 at.%; e) Příčný řez nanokompozitního povlaku Cr-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> s Cr 39 at.%<sup>58</sup>

Koeficient tření a tvrdost nanokompozitního povlaku byly porovnávány s povlakem Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Podle obr. 4.30 a 4.31 jsou zřejmé lepší vlastnosti nanokompozitního povlaku, což je přiřazováno zavedením kovové fáze Cr do Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> matrice. Povlak s obsahem Cr 48% vykazoval tvrdost 18 GPa, poměrně vysokou lomovou houževnatost 2,0 MPa.m<sup>1/2</sup> a průměrný koeficient tření 0,3. Analýza stopy opotřebení nanokompozitního povlaku odhalila, že povlaky vykazovaly pouze mírné opotřebení díky vytvořeným oxidům.



Obr. 4.30 Koefficient tření pro  $\text{Si}_3\text{N}_4$  a  $\text{Cr-Si}_3\text{N}_4$  nanokompozitních povlaků s různým obsahem chromu<sup>58</sup>



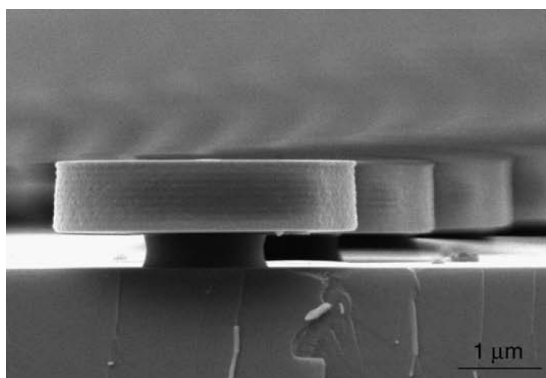
Obr. 4.31 Tvrdost a elastický modul pružnosti nanokompozitního povlaku  $\text{Cr-Si}_3\text{N}_4$  v závislosti na obsahu  $\text{Cr}$ <sup>58</sup>

Zavádění kovové fáze do křehkého keramického povlaku vytváří tvárnost především dvěma způsoby<sup>58</sup>:

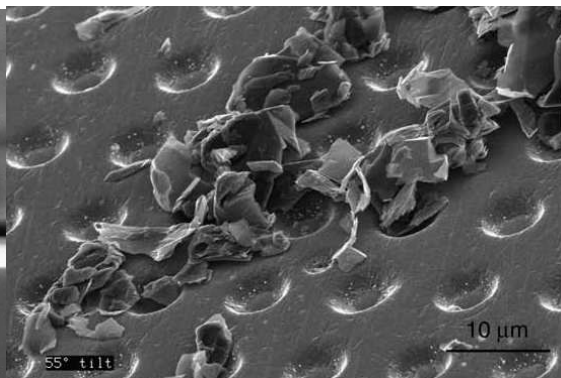
- uvolnění napětí kolem trhliny díky houževnaté deformační fázi, která způsobí otupení iniciační trhliny v oblasti houževnatých částic;
- uváznutí, zastavení šíření trhliny v houževnaté fázi

#### 4.7.6 Povlak TiN s mikrozásobníky tuhého maziva

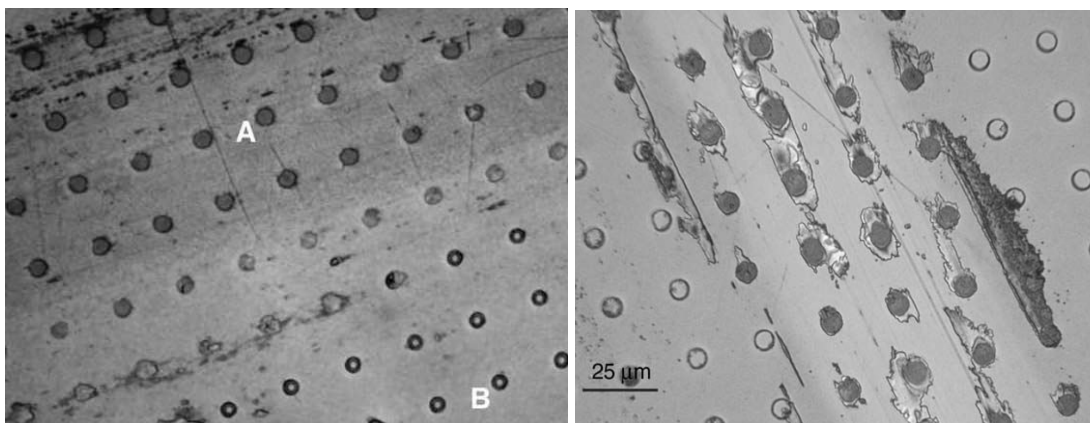
Jedná se o kluzné povrchy eliminující nedostatky povlaků, které jsou vytvořeny na základě střídajících měkkých a tvrdých vrstev jako je např.  $\text{MoS}_2$ /kov. Vytvoření takovýchto vrstev je poměrně jednoduché. Výrazně zlepšují frikčních vlastnosti, ořezuvzdornost, ale i lomovou houževnatost. Problémem těchto vrstev, které střídají vrstvu tvrdou a měkkou kluznou, je adheze na měkkých vrstvách, kde dochází k odlupování jednotlivých vrstev. Vhodnou alternativou těchto kluzných vrstev je tvrdá vrstva z TiN s ostrůvky měkké lubrikační fáze. Ostrůvky jsou kolmé na povrch substrátu. Tyto povlaky jsou mechanicky stabilnější než případ povlaků z multivrstev. Vytvoření takovéto morfologie vyžaduje vytvoření tzv. síťového substrátu. Toto síťování je možné vytvořit laserovým vrtáním nebo obráběcími metodami. Předmětem výzkumu je také fotolitografie k vytvoření fotoresistních ostrůvků (obr. 4.32), které jsou na povrchu substrát ve vzdálenosti 7  $\mu\text{m}$  a průměr ostrůvku je 2  $\mu\text{m}$ . Tyto substráty jsou následně povlakovány TiN. Fotoresistní ostrůvky jsou dále odstraněny ultrazvukem, kde vzniknou v povlaku díry, které se následně zaplní grafitem (obr. 4.33 a 4.34)<sup>30,31</sup>.



Obr.4.32 Fotoresistní ostrůvky na substrátu<sup>30,31</sup>

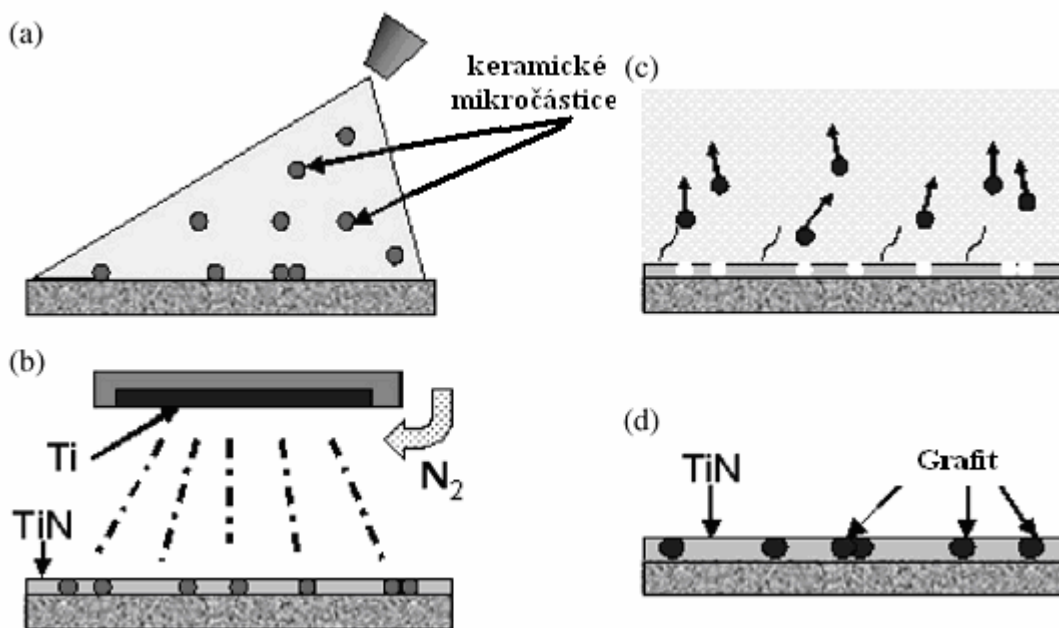


Obr. 4.33 Povrch po nanesení TiN povlaku, vytváření děr a aplikace grafitu<sup>30,31</sup>



Obr. 4.34 Optický mikrosnímek povrchu po krátkém testování pin-on-disk; zaplněné díry „A“ a nezaplňené díry vedle stopy „B“<sup>30,31</sup>

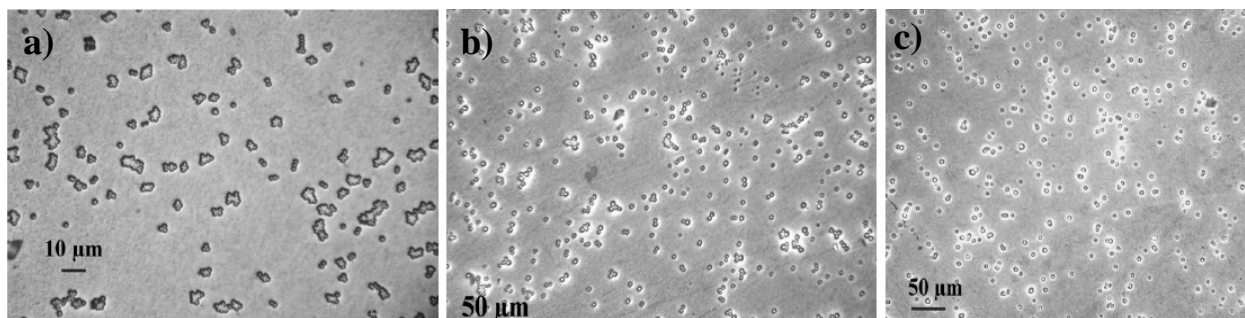
Další metodou jak vytvořit „sít“ mikrobodů na povrchu je naprašování keramických nebo polymerních mikročásteček. Tato metoda je oproti fotolitografii ekonomičtější. Princip metody je znázorněn na obr. 4.35.<sup>30,31</sup>



Obr. 4.35 Schematický proces vytváření povlaku TiN s mikrozásobníky tuhého maziva: a) keramické nebo polymerní mikročástečky naprašované na povrch substrátu; b) vytvoření povlaku z TiN; c) odstranění naprašovaných mikročásteček ultrazvukem; d) nanesení grafitu jako tuhého maziva do mikrozásobníku vytvořeného v tvrdé TiN vrstvě<sup>30,31</sup>

V prvním kroku dochází k naprašování keramických mikročásteček smíchaných ve vhodné suspenzi s ethanolem. Mikročástečky ulpívají na jeho povrchu a poté dochází k vysušení a přilnutí mikročásteček na povrch substrátu. Pak následuje depozice TiN povlaku, jehož tloušťka musí být maximálně poloviční než je průměr mikročásteček z důvodu snadného odstranění těchto mikročásteček z povrchu. Po depozici TiN povlaku se provádí odstranění mikročásteček z povrchu a vytvoření volných míst - mikrozásobníků v TiN povlaku, které se následně zaplňují tuhým mazivem obr. 4.35.<sup>30,31</sup>

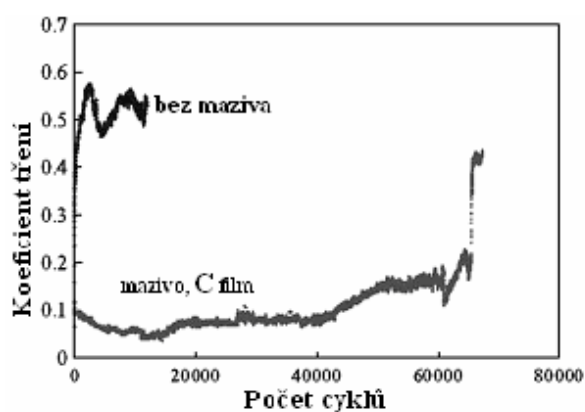
Naprašované keramické mikročástečky jsou z křemene o velikosti 1,5; 3; 5; a 10 μm (obr. 4.36). Nejčastěji zředění suspenze je v poměru 200:1 nebo 600:1.<sup>30,31</sup>



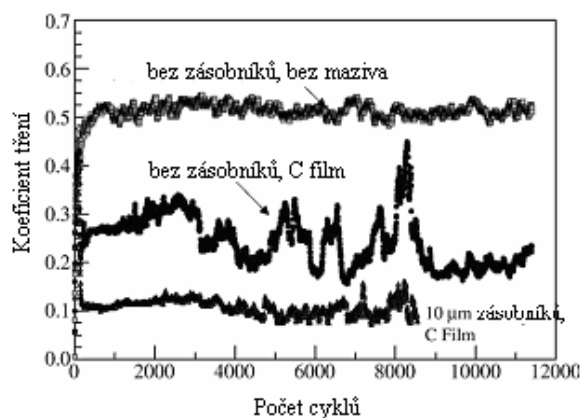
Obr. 4.36 Plocha substrátu po depozici TiN a odstranění mikročástic ultrazvukem: a) částice 1,5 μm; b) 5 μm; c) 10 μm<sup>30,31</sup>

Mikročástice o velikosti 1,5 μm vykazují významnou aglomeraci, díky které se vytvářejí mikrozásobníky větší než by se očekávalo od samostatných mikročástic. Aglomerace těchto částic je vysvětlována jako přirozený vliv povrchu snižovat jeho napětí. U mikročástic o velikosti 5 μm je sledována menší aglomerace, kde je typická dvojité či trojitá a občas i větší. Sledováno jsou asi 56% jednotlivých částic, 21% dvojných, 10% trojných, 6,7% čtverných a zbytek větší aglomerace. U mikročástic o velikost 10 μm se vyskytuje aglomerace jen zřídka, většina částic je jednotlivá. Film vytvořený použitím těchto mikročástic zapříčiňuje větší stínování během depozice. Tvrdost takového povlaku je okolo 19 GPa.<sup>30,31</sup>

Tribologické vlastnosti jsou uvedeny na obr. 4.37, 4.38, 4.39 a 4.40. Díky vlastnostem těchto mikročástic dosahují povlaky s mikrozásobníky o velikost 10 μm nejlepší tribologické vlastnosti díky dostatečné hustotě a rozmístění těchto zásobníků v povlaku. Podle výsledků je také vidět, že přítomnost mikrozásobníků v TiN povlaku bez kluzné vrstvy je nežádoucí, protože dochází k rychlé degradaci povlaku<sup>30,31</sup>.



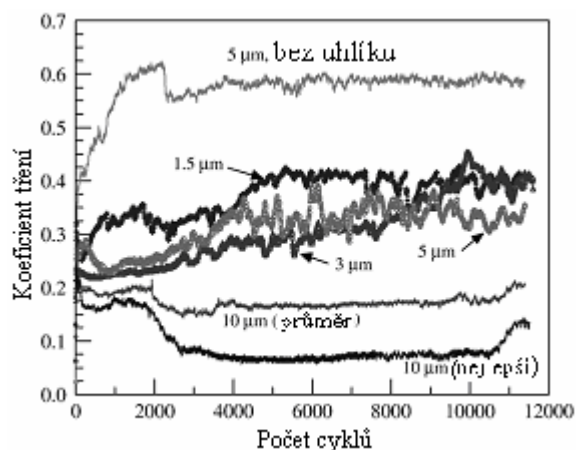
Obr. 4.37 Třecí vlastnosti TiN povlaku s 10 μm mikrozásobníky<sup>30,31</sup>



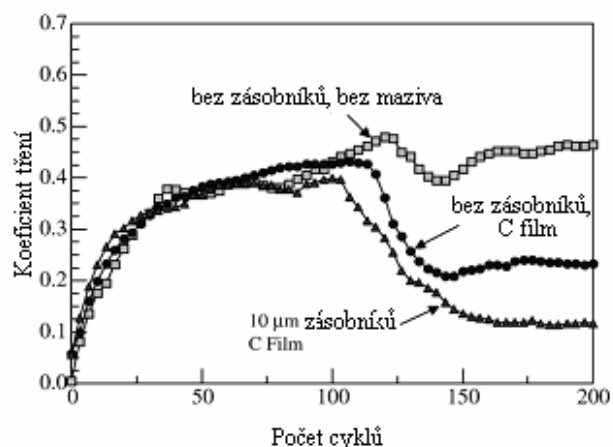
Obr 4.38 Test pin-on-disk pro povlaky s mikrozásobníky a protipovrchem z Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>30,31</sup>

Podle obr. 4.40 je zřejmé, že koeficient tření je pro prvních 100 cyklů téměř identický. V určitém bodě, se koeficient tření u povlaku bez maziva stále zvětšuje, kdežto tření u filmu z povlaku s mikrozásobníky se snižuje. Odchýlení křivky mezi 100 a 150 cyklem je podobné pro oba povlaky, ale u filmu bez zásobníku se začíná zvyšovat a se zásobníkem koeficient tření klesá k hodnotě 0,1.<sup>30,31</sup>





Obr. 4.39 Třecí vlastnosti povlaku TiN s mikrozásobníky v závislosti na jejich velikosti<sup>30,31</sup>

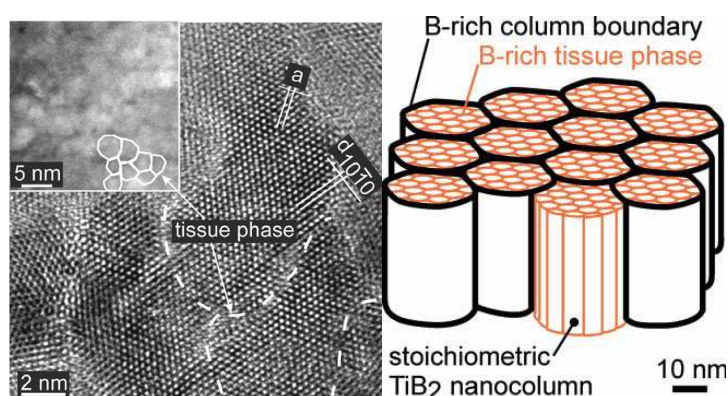


Obr. 4.40 Třecí vlastnosti do prvních 200 cyklů<sup>30,31</sup>

#### 4.7.7 Multivrstvy TiAl/TiB<sub>2</sub> připravené metodou IBAD

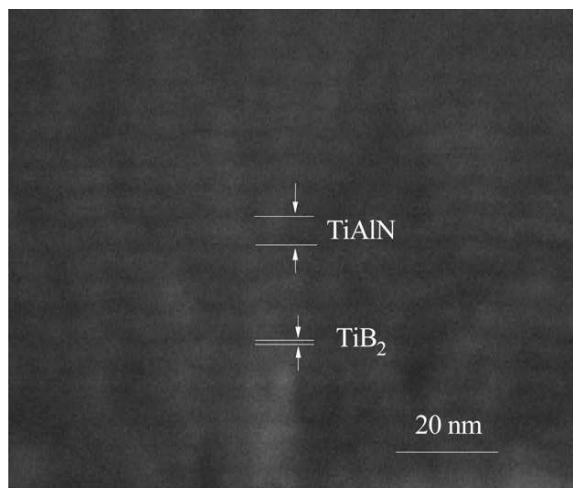
Střídající tvrdost TiAl/TiB<sub>2</sub> multivrstvy s různou periodou v rozsahu 0,6 - 27 nm a poměru ( $t_{\text{TiAlN}}: t_{\text{TiB}_2}$ ) od 8:1 do 25:1 byla připravena metodou IBAD (ion beam assisted deposition). Vliv periody a poměru multivrstvy na tvrdost, elastický modul, zbytkové napětí ve vrstvě a lomová houževnatost byla zkoumána při deponování těchto vrstev. Všechny multivrstvy s jasným rozhraním vykazovaly vyšší tvrdost než jednotlivé vrstvy TiAlN a TiB<sub>2</sub>. Maximální tvrdost 35 GPa a kritické zatížení 84 mN bylo dosaženo při periodě 2,2 - 8 nm a poměru  $t_{\text{TiAlN}}: t_{\text{TiB}_2}$  8:1. Silná TiAlN krystalografická struktura (111) i multivrstvá struktura se považuje, že je zodpovědná za zvýšení tvrdosti multivrstvy. Tím, že jsou deponovány dva různé materiály, dojde k navýšení tvrdosti omezením dislokačního pohybu. Podle dostupných literatur se nejvyšší tvrdosti dosahuje při tloušťce jedné vrstvy mezi 3 - 10 nm<sup>27</sup>.

TiB<sub>2</sub> je keramická sloučenina s hexagonální strukturou viz obr. 4.41 mající velmi zajímavé fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti jako je vysoká tvrdost, dobrá chemická stabilita a dobrou tepelnou a elektrickou vodivost<sup>27</sup>.



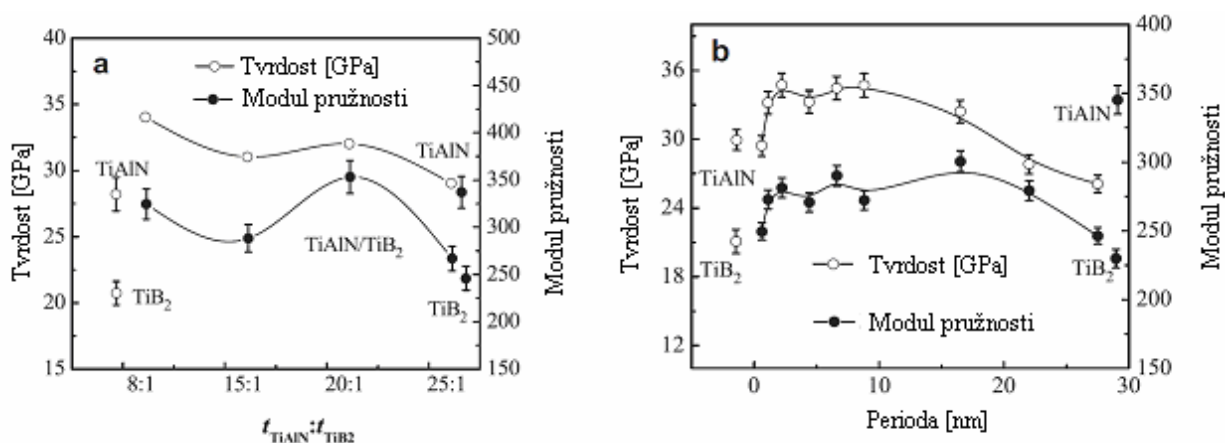
Obr. 4.41 Struktura TiB<sub>2</sub><sup>27</sup>

Na obr. 4.42 je příčný řez multivrstvou TiAlN/TiB<sub>2</sub>. Rozhraní multivrstvy je zřetelné. Světlá vrstva je TiAlN a tmavá vrstva je TiB<sub>2</sub>. Tloušťka každé vrstvy je téměř shodná a perioda je asi 9 nm<sup>27</sup>.



Obr. 4.42 Příčný řez multivrstvou TiAlN/ TiB<sub>2</sub><sup>27</sup>

Obr. 4.43 ukazuje vliv poměru obou vrstev a periody na tvrdost a modul pružnosti. Se zvyšujícím se poměrem  $t_{\text{TiAlN}}: t_{\text{TiB}_2}$  a periodou, se tvrdost multivrstvy stupňovitě snižuje. Nejvyšší tvrdost 35 GPa, bylo dosaženo při poměru 8:1 a periodě od 2,2 do 8,8 nm. Modul pružnosti pro multivrstvy má podobný trend jako závislost poměru a periody<sup>27</sup>.



Obr. 4.43 Tvrdost a modul pružnosti TiAlN/ TiB<sub>2</sub> multivrstvy v závislosti na poměru  $t_{\text{TiAlN}}: t_{\text{TiB}_2}$  (a) a periody (b)<sup>27</sup>

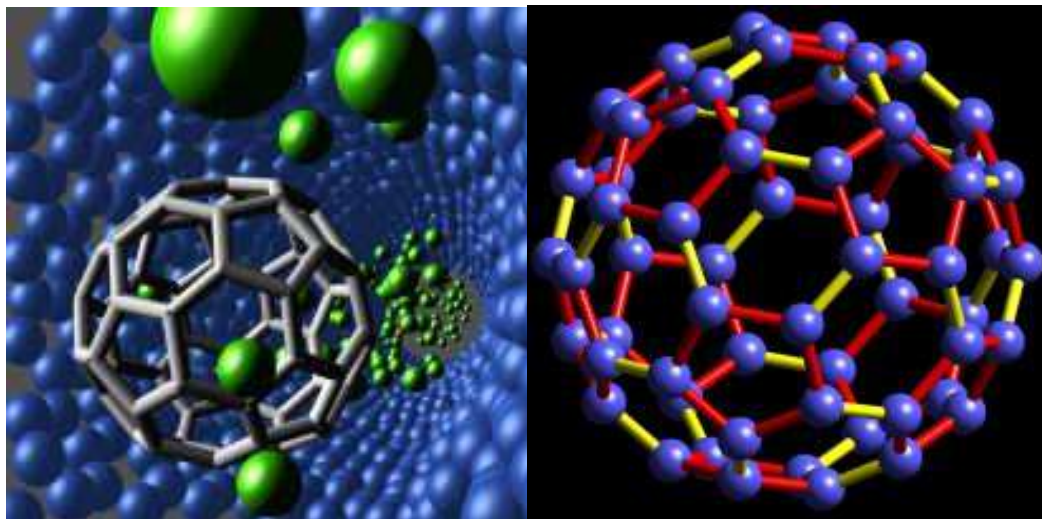
#### 4.7.8 Fulereny a Grafen

Miliardy let panující substance, která je za normálních podmínek nejtvrdším materiálem ve vesmíru, ztratila své dominantní postavení. Vědci z Bayreuthské univerzity v Německu tvrdí, že tvrdost diamantů byla pokořena materiálem zvaný fulereny. Spojením uhlíkových nano-klastrů zvaných fullereny pravděpodobně dokázali něco, co bylo po celou historii vědy pokládáno za nemožné<sup>59</sup>.

Nový materiál nese označení ACNR (Aggregated Carbon NanoRods) a byl vytvořen stlačením a zahřátím super silných uhlíkových molekul zvaných fulleren C<sub>60</sub>. Tyto molekuly jsou složeny ze 60 atomů uhlíku poskládaných do hexagonálních anebo pentagonálních tvarů (obr. 4.44) a dohromady tvoří dutou kouli podobnou fotbalovému míči. Super tuhé ACNR bylo vytvořeno stlačením právě fullerenu C<sub>60</sub> na 200 násobek atmosférického tlaku a současně zahřáním na 2226 °C.<sup>59</sup>

Vlastnosti výsledného materiálu byly poté měřeny s použitím diamantových kovadlin ve francouzském Synchrontronovém centru. Diamantová kovadlina sevřela materiál mezi další

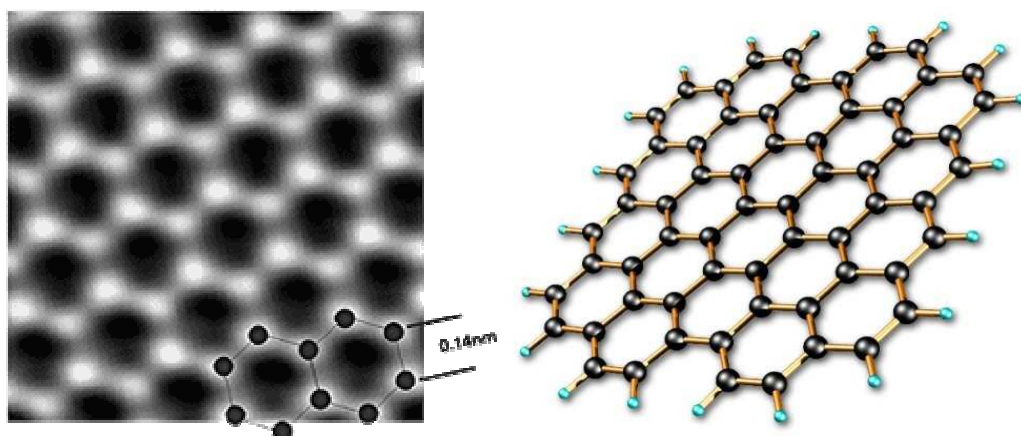
dva diamanty a umožnila tak zkoumat vlastnosti ACNR s použitím právě synchrotronu. Bylo tak možno odhalit strukturu materiálu při této zátěži. Výsledek byl překvapivý. Při hustotě o 0,3 % větší než má diamant, se stal tento materiál nejtvrdějším na světě. Zatímco obyčejný diamant má svou pevnost díky silným molekulárním vazbám mezi jednotlivými atomy, ACNR má své vlastnosti založeny na semknutých nanoklastrech fullerenu<sup>59</sup>.



Obr. 4.44 Struktura fullerenu<sup>59</sup>

Materiál tak bude mít široký rozsah použití v klasickém průmyslu. Je stabilní i při velmi vysokých teplotách a plně nahradí diamant ve všech obráběcích a vrtacích procesech. Zároveň se vědci domnívají, že jeho výroba bude lehce uskutečnitelná, jelikož samotná výroba prototypu testovaného na synchrotronu je prý velmi dobře reprodukovatelná<sup>59</sup>.

Nejnámějšími formami chemického prvku uhlíku jsou diamant a grafit. Grafitu (tuha) je velmi podobná forma uspořádání uhlíku zvaná **grafen**. **Grafen** je materiálem složeným pouze z jedné nebo dvou vrstev atomů uhlíku (obr. 4.45), které jsou uspořádány do pravidelné struktury šestiúhelníku vazbami  $sp^2$ . Jednoatomární vrstva grafenu bez příměsí vykazuje vysokou elektrickou vodivost, dvouatomární vrstva se chová podobně jako polovodič. Elektronové v grafenu dosahují nejvyšší pohyblivosti ze všech známých materiálů. Grafen je nejtenčí a současně nejpevnější materiál na světě. Předpokládá se, že grafen se stane podobně jako fullereny základem uhlíkové elektroniky příští generace. Ovšem není zcela vyloučené, že najde grafen využití i v jiných odvětvích jako jsou obráběcí nástroje. To ovšem proveří až čas<sup>59</sup>.



Obr. 4.45 Struktura grafenu<sup>59</sup>

## 5 Zkoušení povlaků

Pokud jsou vrstvy připraveny, je nutné provést kontrolu napovlakovaných substrátů. Každý povlak je charakterizován velmi širokým souborem základních vlastností a parametrů, ke kterým lze zařadit chemické a fyzikální vlastnosti. Níže jsou uvedeny důležité vlastnosti nanesených povlaků na substrát<sup>2,13</sup>.

### Fyzikální vlastnosti:

- tvrdost povlaku;
- tloušťka povlaku;
- adheze a koheze povlaku;
- kluzné vlastnosti povlaku;
- drsnost povlaku

### Chemické vlastnosti:

- odolnost proti oxidaci;
- tepelná stabilita;
- chemická stabilita;
- chemické složení

### 5.1 Tvrdost povlaku

Tvrdost je definována jako odolnost proti pronikání cizích předmětů. Běžný způsob opotřebení nástrojů je dán abrazivním otěrem. Právě proto je vysoká tvrdost základním parametrem otěruvzdorných vrstev<sup>2,13</sup>.

Při měření tvrdosti je třeba zajistit, aby měřicí hrot (obvykle Vickers) pronikl maximálně do 1/10 tloušťky vrstvy. Tím se zabezpečí, že měření tvrdosti vrstvy není ovlivněno vlastnostmi podkladového materiálu. Vzniklé stopy je velmi obtížné vyhodnocovat mikroskopem. Proto se využívají speciální přístroje – mikrotvrdoměry, které souběžně se zatěžováním hrotu měří hloubku jeho pronikání do vrstvy s přesností na jednotky nm. Přístroje využívající jiné principy měření jsou zatíženy velkou chybou způsobenou rozdílem mezi maximální hloubkou vtisku a skutečně zjištěnou velikostí zbytkového vtisku. Tvrdost vrstev se udává většinou v GPa. Ukázka stopy Vickersova jehlanu je na obr. 5.1<sup>2,13</sup>.

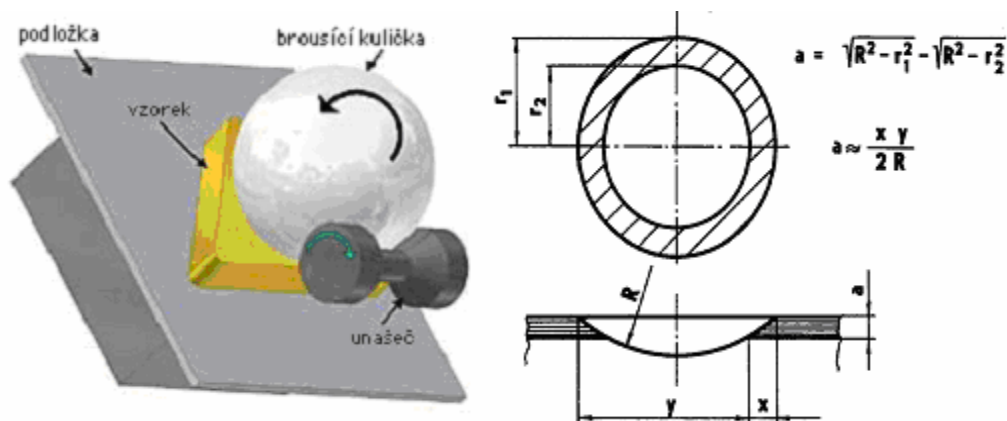


Obr. 5.1 Vtisk po Vickersovu jehlanu<sup>12</sup>

### 5.2 Tloušťka povlaku

Z hlediska praktické aplikace je volba tloušťky povlaku na břitech řezných nástrojů jednou z nejdůležitějších charakteristik. Tloušťka vrstvy výrazně ovlivňuje životnost nástroje a také řezné síly během obrábění. Protože tloušťka vrstvy se pohybuje v řádech několika málo  $\mu\text{m}$ , není možné ji určit dostatečně přesně na příčném řezu substrátu a povlaku. K přesnému určení tloušťky vrstvy je možné použít odstranění povlaku z vrstvy nebo zamaskování části povlakovaného substrátu a za pomoci profilometru změřit odskok vrstvy např. alfastep. Dále je možné vytvořit výbrus pod velmi malým úhlem k povrchu<sup>12</sup>.

Nejčastěji se ovšem používá poměrně jednoduchá a přesná metoda k určení tloušťky povlaku, která se nazývá kalotest. Princip spočívá ve vybroušení kulového vrchlíku do povlaku až na substrát za pomoci kalené kuličky a diamantového prášku. Z vytvořeného vrchlíku je možné vypočítat tloušťku jednotlivých vrstev<sup>12</sup>. Princip kalotestu je znázorněn na obr. 5.2.



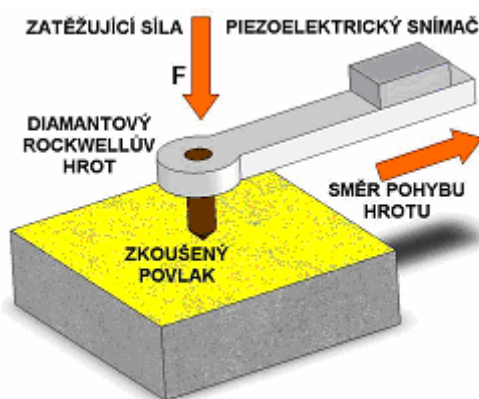
Obr. 5.2 Schéma zařízení kalotestu a princip výpočtu tloušťky vrstvy<sup>12</sup>

Přímé měření tloušťky lze provést i pomocí optického metalografického mikroskopu nebo elektronového rastrovacího mikroskopu či transmisního elektronového mikroskopu na výbrusu nebo lomu sledovaného vzorku. Vzhledem k velkému zvětšení umožňují mikroskopické metody i velmi podrobnou analýzu jednotlivých vrstev povlaku<sup>2,13</sup>.

### 5.3 Adheze a koheze povlaku

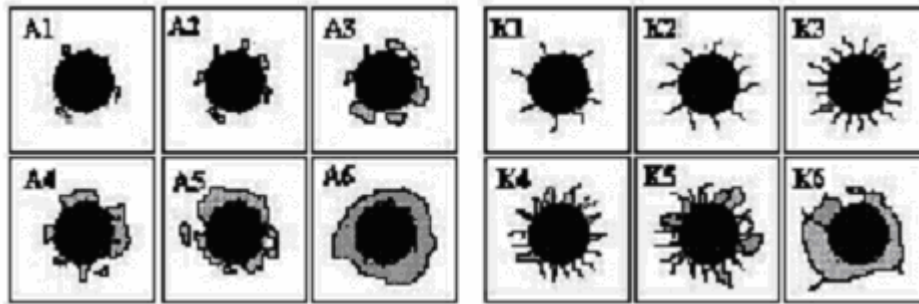
K maximálnímu využití potenciálu ořezavé vrstvy dojde pouze v případě, kdy je perfektně zajištěna její adheze k nástroji. Bez dokonalé přípravy nástroje před povlakováním nelze připravit kvalitní povlak. Standardní vrypovací metodou pro vyhodnocování přilnavosti povlaků je tzv. **scratch-test**. Pro měření se využívá principu postupně zvyšující zátěže síly na diamantový Rockwellův hrot při současném posouvání špičky hrotu po měřené vrstvě. Zátěžující síla zůstává konstantní nebo se její hodnota plynule zvyšuje (0 - 200 N)<sup>2,13</sup>.

Vyhodnocuje se poškození vrstvy povlaku podél stopy vrypu i na jeho dně. Hodnota síly, při které dojde k poškození povlaku, se nazývá kritické zatížení  $L_c$  a je prezentována jako míra adheze sledovaného povlaku. Dále se vyhodnocuje průběh normálové a tangenciální síly z které lze vypočítat koeficient tření  $\mu = F_t/F_n$ <sup>2,13</sup>. Schéma vrypovací zkoušky je na obr. 5.3.

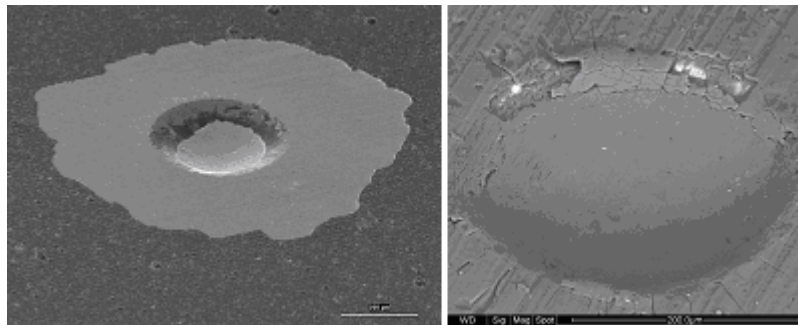


Obr. 5.3 Princip Scratch testu<sup>13</sup>

Další zkouškou, která nám dává informace o adhezních a kohezních vlastnostech je vtisková zkouška někdy označována jako „Mercedes test“. Při statickém vtiskování buď ocelové kuličky nebo diamantového kuželu, podobně jako při měření podle Rockwella, dochází k překonání vazeb mezi povlakem a substrátem. Účinkem vtisku, dochází k vytvoření napětí na rozhraní systému tenká vrstva-substrát, kde je klasifikováno porušení podle tvaru a rozměrů trhlin a oblastí delaminace povlaku. Na základě morfologie porušení, jsou vtisky rozdělovány do jednotlivých tříd, s přiřazením adhezního (A) a kohezního (K) čísla, která charakterizují stupeň poškození vrstvy (obr. 5.4) <sup>13</sup>.



Obr. 5.4 Hodnocení porušení v okolí vtisku vytvořeného Rockwelovým indentorem při zatížení 1500N <sup>13</sup>

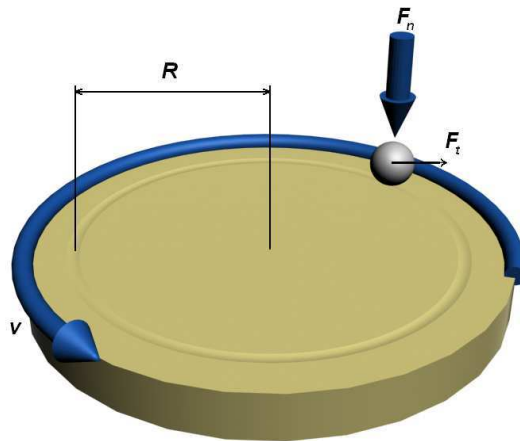


Obr. 5.5 Ukázka rozsáhlého a malého adhezního porušení <sup>13</sup>

## 5.4 Kluzné vlastnosti povlaku

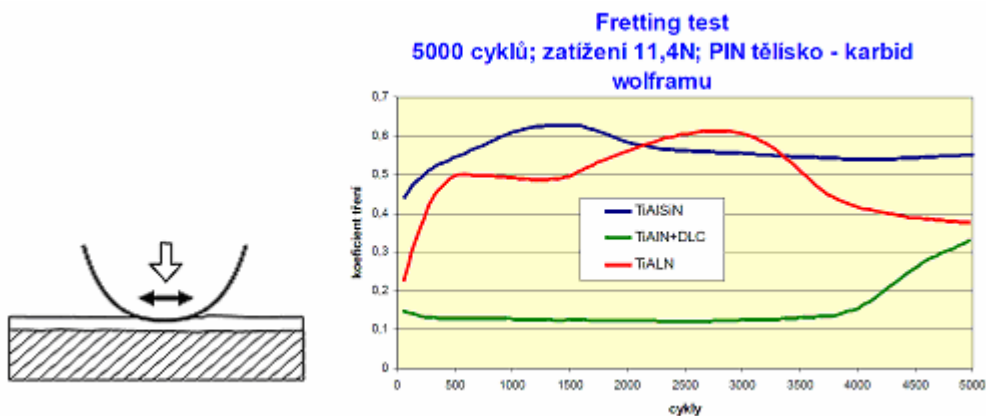
Během obrábění dochází se stoupající teplotou ke zhoršování fyzikálních a chemických vlastností podkladového materiálu, čímž dochází ke „ztrátě“ mechanické energie. Snížením frikčních sil vlivem povlaku se výrazně omezuje tepelné zatížení nástroje. K měření třecích vlastností se používá tzv. metody **pin-on-disk**, při které je zkušebním tělískem válcový kolík, diskem je zkušební vzorek a nebo obdobná metody **ball-on-disk**, kde zkušebním tělískem je kulička a diskem je zkušební vzorek <sup>13</sup>.

Testovaná vrstva je nanášena na zkušební vyleštěný vzorek a následně umístěna na otočný stolek. Na povrch je konstantní silou přitlačováno zkušební tělísko a vzorek se otáčí předem zvolenými otáčkami, přičemž je zaznamenáván počet otáček, případně celková ujetá dráha. Měří se otěr tělíška, otěr vrstvy, profil otěru apod. Při měření kluzných vlastností se používá zatěžující síly v řádu jednotek N, zatímco při řezných zkouškách jsou řezné síly o dva až tři řády vyšší. Z toho vyplývá, že měření frikčních vlastností je laboratorní metodou, která má k praktické využitelnosti poměrně daleko. Může však sloužit jako metoda k porovnání různých typů vrstev a pro získání představy o jejich kluzných vlastnostech. Princip metody je znázorněn na obr. 5.6. <sup>2,13</sup>



Obr. 5.6 Princip tribologického měření<sup>13</sup>

Frikční vlastnosti mohou být také ověřovány tzv. **fretting** metodou. Principem je prolešťování vrstvy kuličkou nebo hrotem pohybující se nízkofrekvenčními kmity (obr. 5.7).<sup>5</sup>



Obr. 5.7 Schéma fretting metody a průběh koeficientu tření závislosti na počtu cyklů<sup>5</sup>

## 5.5 Drsnost povlaku

V případě nanášení PVD vrstev je výsledná drsnost ovlivněna jak kvalitou opracování nástroje tak povlakem. Zdrojem zvýšené drsnosti vrstev jsou makročástice, které vznikají během technologického procesu povlakování. Drsnost povlaku zvyšuje řezné síly, tím dochází k tepelnému a mechanickému namáhání břitů nástrojů. Měření je vhodné provádět na vyleštěných substrátech s výchozí drsností  $R_a=0,01 - 0,02 \mu\text{m}$  běžným dílenským drsnoměrem. Existují i jiné metody vyhodnocení drsnosti povrchu např. mikroskopie atomárních sil (AFM)<sup>2,13</sup>.

## 5.6 Odolnost proti oxidaci

K opotřebení vrstvy dochází i oxidací. Je důležité rozlišovat, zda se jedná o oxidaci hloubkovou nebo povrchovou. Při povrchové oxidaci dochází k pasivaci povrchu, čímž se může vytvářet bariéra proti další oxidaci. Při hloubkové oxidaci dochází obvykle k destrukci vrstvy. Ta je doprovázena poklesem tvrdosti vrstvy, neboť se vytváří jiné typy mřížkových vazeb. Každá vrstva je charakterizována maximální teplotou použití, jejíž mez je dána právě odolností vůči oxidaci. 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<sup>13</sup>.

## 5.7 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 se navenek projevují změnou mechanických vlastností a spolehlivě se vyhodnocují za pomoci transmisní elektronové mikroskopie (TEM) nebo rentgenové difrakci (XRD). Nejvyšší tepelnou stabilitu mají v současnosti vrstvy na bázi CrAlN a nano-krystalické povlaky<sup>13</sup>.

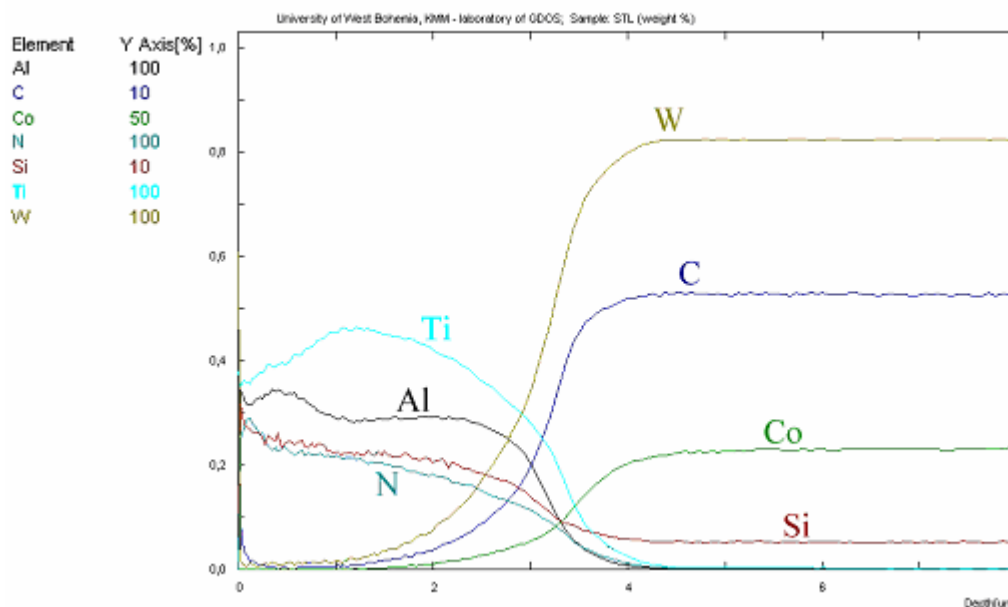
## 5.8 Chemická stabilita

Popisuje odolnost vrstvy vůči chemické reakci s obráběným materiálem zejména za vyšších teplot vznikajících během obrábění. Chemická stabilita vrstvy se může měnit s typem obráběného materiálu a s řeznými podmínkami. Klasickým případem je diamantová vrstva, jejíž chemická stabilita je naprosto nevyhovující při opracování ocelí ale vynikající při obrábění neželezných materiálů<sup>2,13</sup>.

## 5.9 Chemické složení

Důležitou charakteristikou ovlivňující vlastnosti povlaku je průběh koncentračního složení jednotlivých prvků v závislosti na hloubce od povrchu<sup>13</sup>.

Analýza GD-OES (Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy) dovoluje stanovit chemické složení elektricky vodivých prvků ve struktuře povlaku. Proces je prováděný v evakuovaném prostředí, kde při postupném odprašování vzorku vstupují do výboje atomy z jednotlivých hloubkových vrstev, čímž je možné sledovat závislost koncentrace prvků na analyzované hloubce povlaku. Excitací atomů z povrchu se získá záření o vlnové délce typické pro daný prvek, který je po výstupu z lampy analyzován optickým spektrometrem. Výsledkem měření je koncentrační profil v závislosti na hloubce odprašení (obr. 5.8)<sup>13</sup>.



Obr. 5.8 Hloubkový koncentrační profil vrstvy TiAlSiN na substrátu z SK<sup>5,12</sup>



## 6 Hodnocení řezivosti nástroje

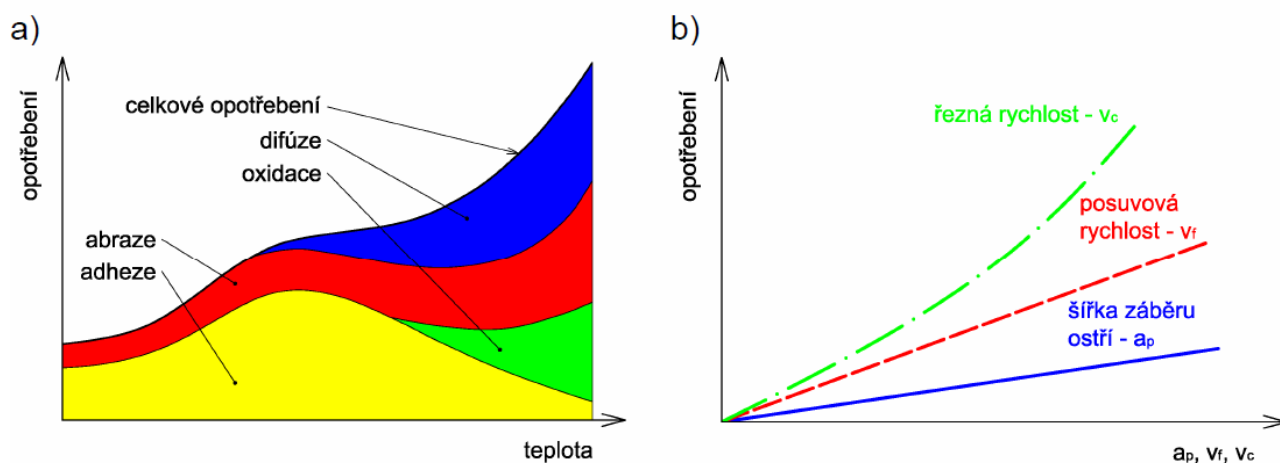
### 6.1 Opotřebení řezných nástrojů

Aby bylo možné určit řezivost nástrojů, je třeba zjistit závislost trvanlivosti nástroje na řezných podmínkách. Protože trvanlivost nástroje je definována jako doba, po kterou může nástroj hospodárně pracovat až do otupení, je třeba měřit a určit kritériu opotřebení nástroje, které vzniká důsledkem relativního pohybu nástroje po obráběném materiálu a vlivem odcházející třísky po čele nástroje<sup>1</sup>.

#### 6.1.1 Mechanismy opotřebení

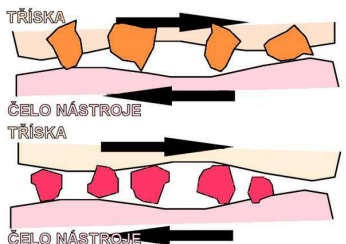

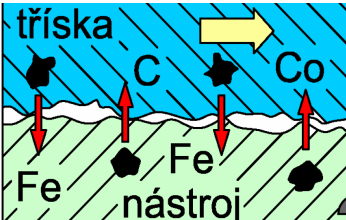
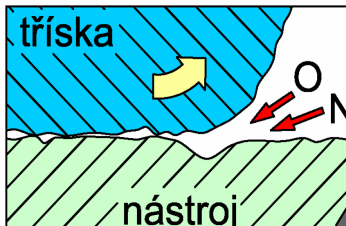
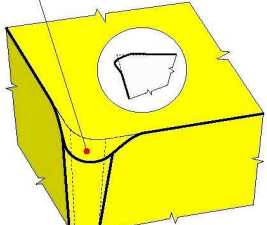
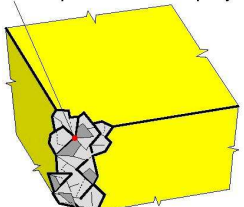
Proces opotřebení nástroje je velmi složitý děj, který závisí na mnoha faktorech, jako je např. procesní kapaliny, geometrie nástroje, způsob obrábění, vlastnosti obráběného materiálu, atd. Proces opotřebení nástroje ovlivňuje řada fyzikálních a chemických procesů jako je abraze, adheze, difúze, oxidace, ale také náhlá porušení způsobená křehkým lomem či plastickou deformací břitu nástroje. Základní mechanismy opotřebení jsou uvedené v tab.6.1.<sup>1</sup>

Kromě adheze dochází se vzrůstající teplotou k nárůstu celkového opotřebení vlivem zvýšeného podílu jednotlivých mechanismů. Kromě teploty mají vliv na opotřebení taktéž řezné parametry procesu jako je řezná rychlost, posuvová rychlost a šířka záběru ostří (obr. 6.1).<sup>1</sup>



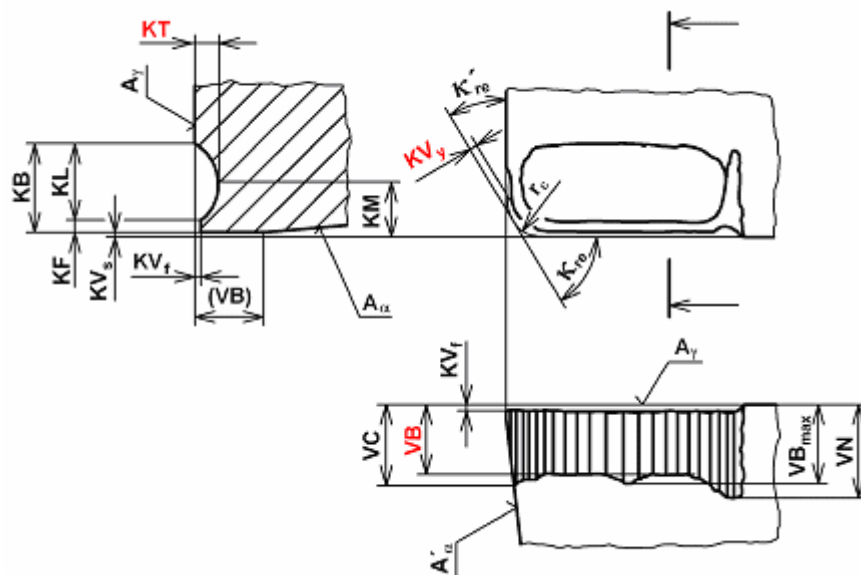
Obr. 6.1 Opotřebení řezných nástrojů v závislosti na:  
a) teplotě, b) řezných podmínkách<sup>1</sup>

Tab.6.1 Základní mechanizmy opotřebení<sup>1</sup>

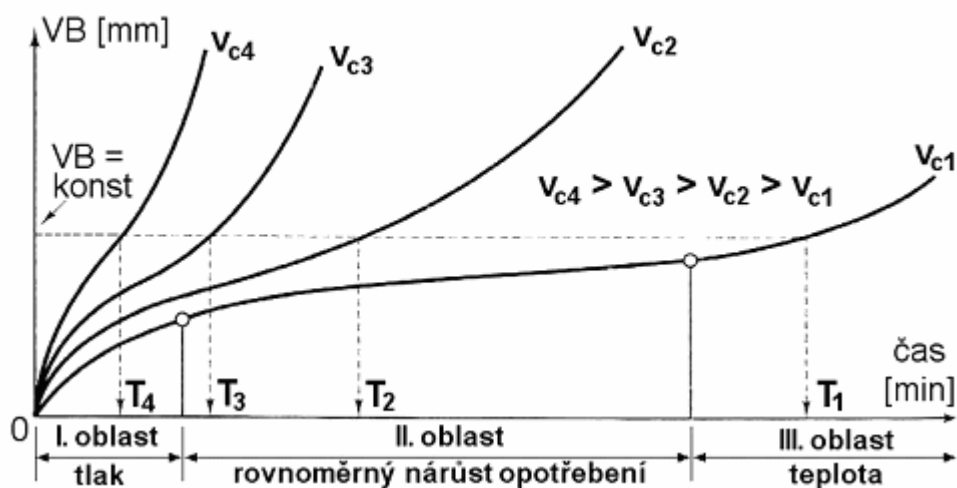
<p><b>ABRAZE</b></p>	<p>Proces mechanického otěru způsobený tvrdými částicemi z obráběného ale i řezného materiálu. Abraze je označována jako fyzikální proces opotřebení.</p>	
<p><b>ADHEZE</b></p>	<p>V důsledku vysokých teplot a tlaků dochází k vytváření a okamžitému následnému porušování mikrosvárových spojů mezi nástrojem a obráběným materiálem. Častěji se objevuje u chemicky příbuzných materiálů a kovově čistých povrchů.</p>	
<p><b>DIFUZE</b></p>	<p>Chemické opotřebení způsobené migrací atomů z nástroje do obráběného materiálu a obráceně. Vytvoření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje.</p>	
<p><b>OXIDACE</b></p>	<p>Důsledkem kyslíku dochází k vytváření chemických sloučenin na povrchu nástroje.</p>	
<p><b>PLASTICKÁ DEFORMACE</b></p>	<p>Vlivem mechanického zatížení a naakumulování tepelné energie může dojít k „odtečení“ materiálu nástroje z místa řezu a až k lavinovitému opotřebení.</p>	
<p><b>KŘEHKÝ LOM</b></p>	<p>Vlivem vysokého mechanického zatížení jako je přerušovaný řez nebo obrábění nehomogenního materiálu s tvrdými částicemi ve struktuře, může dojít k náhlému porušení břitu nástroje a ukončení jeho životnosti.</p>	

### 6.1.2 Kritéria opotřebení

Opotřebení nástrojů se hodnotí podle kritérií opotřebení. Mezi kritéria opotřebení patří např. geometrie obráběného tvaru, povrch, velikost apod. Nejčastěji používaná kritéria opotřebení jsou uvedena na obr. 6.2 červeně vyznačená, a to **VB** – šířka fazetky opotřebení na hřbetě, **KT** – hloubka výmolu na čele a **KV<sub>y</sub>** – radiální opotřebení špičky. Kritérium **KV<sub>y</sub>** je významné především u dokončovacích operací, protože způsobuje změnu rozměru obrobené plochy<sup>1</sup>.



Obr. 6.2 Kritéria opotřebení řezného nástroje<sup>1</sup>



Obr. 6.3 Časová závislost opotřebení VB pro různé řezné rychlosti<sup>1</sup>

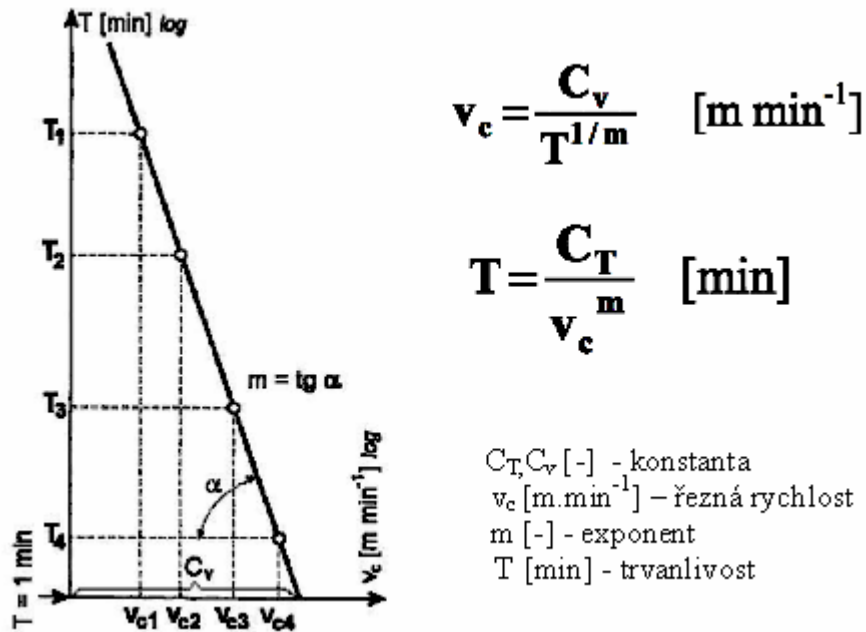
Doporučené hodnoty VB leží mezi 0,2 - 0,8 mm. Jeho charakteristický časový průběh je znázorněn na obr. 6.3. Poměrně rychlý nárůst hodnoty VB v oblasti I., pro všechny řezné rychlosti je způsoben vysokým tlakem mezi ostřím a obráběným materiálem vlivem velmi malé stykové plochy. V oblasti II. dochází k pozvolnému nárůstu VB v důsledku všech mechanismů opotřebení až do stavu III., kde naakumulované tepelné zatížení způsobí překročení limitní hodnoty VB a znehodnocení řezného nástroje<sup>1</sup>.

## 6.2 Trvanlivost řezného nástroje

Souhrn vlastností řezného materiálu, které komplexně ovlivňují velikost hospodárného úběru, nazýváme řezivost. Řezivost nástroje je vázána nejen na vlastnosti materiálu břitu, ale i na technologické podmínky obrábění (průřez třísky, řezná rychlost, geometrie břitu), řezné prostředí apod. Nelze tedy stanovit pro určitý řezný materiál absolutní řezivost, ale lze jen porovnávat řezivost dvou nebo více nástrojů za stejných řezných podmínek, na stejném obrábě-

běcím stroji a při obrábění stejného materiálu. Stupeň řezivosti závisí především na míře otupení břitu nástroje. To znamená na odolnosti vůči mechanickému a tepelnému namáhání. Pro hodnocení stupně řezivosti neexistuje dosud obecně platné kritérium ani obecná metoda experimentálního stanovení<sup>1</sup>.

Při stanovení řezivosti nástroje za určitých konkrétních řezných podmínek se vychází z Taylorova vztahu mezi trvanlivostí nástroje a řeznou rychlostí. Závislost trvanlivosti břitu a řezné rychlosti je uvedena na obr. 6.4 s příslušnými vztahy<sup>1</sup>.



Obr. 6.4 T- $v_c$  závislost

Z obecného hlediska má lepší řezivost ten nástrojový materiál, který vykazuje v závislosti T- $v_c$  vyšší hodnotu  $C_v$  a nižší hodnotu exponentu  $m$ . Jednotlivé hodnoty exponentu  $m$  pro různé nástrojové materiály jsou uvedeny v tab.6.2.<sup>1</sup>

Tab. 6.2 Hodnoty exponentu  $m$  pro různé nástrojové materiály<sup>1</sup>

Materiál	Nástrojové oceli	Rychlořezné oceli	Slinuté karbidy	Řezná keramika
$m$ [-]	10 - 8	8 - 5	5 - 2,5	2,5 - 1,5
$\alpha$ [°]	84 - 83	83 - 79	79 - 68	68 - 56

## 7 Povlakované slinuté karbidy v sortimentu výroby vybraných domácích a světových producentů nástrojů

### 7.1 Výběr z nabízeného sortimentu firmy PRAMET

V roce 1951 byla zahájena v Šumperku výroba součástí ze slinutého karbidu a také zde započala výroba řezných nástrojů osazených slinutým karbidem. Od roku 1999 odstartovala nová etapa společnosti Pramet Tools. Došlo k propojení s finančně silným partnerem SECO Tools, který zaujímá přední světovou pozici mezi výrobci obráběcích nástrojů osazených slitým karbidem. Od roku 2000 společnost Pramet Tools díky vlastnímu vývoji a výzkumu prakticky kompletně inovovala výrobní sortiment nástrojů pro třískové obrábění, a to jak po stránce materiálové, tak po stránce nových tvarů a geometrií nástrojů<sup>49,50</sup>.

#### 7.1.1 Povlakované materiály pro soustružení<sup>49, 50</sup>

- **Řada materiálů 6000 a 3000**

**Materiál 3025** - jde o submikrometrový substrát, multivrstvý PVD povlak s gradientními přechody pro aplikační oblasti P25-P40, M20-M35, K20-K40, N15-N30, S15-S25 a H15-H25.

**Materiál 6620** - substrát bez kubických karbidů, silný povlak s nosnou vrstvou  $Al_2O_3$  nanesený metodou MTCVD. Jeho aplikační oblasti jsou P10-P20, K10-K25 a H05-H15. Především pro obrábění litiny, ale i pro dokončování uhlíkových i slitinových ocelí a podmíněně pro obrábění kalených ocelí.

**Materiál 6630** - funkčně gradientní substrát, se středně silným povlakem, s nosnou vrstvou TiCN nanesený metodou MTCVD. Materiál pro širší aplikační oblast P15-P35, M10-M30, K20-K30 a podmíněně S15-S25. Pro dokončovací až hrubovací soustružení, se střední a podmíněně vyšší řeznou rychlostí.

**Materiál 6635** - funkčně gradientní substrát, středně silný povlak s nosnou vrstvou TiCN nanesený metodou MTCVD, oblast použití P20-P40, M15-M35 a podmíněně K25-K35. Pro dokončovací až hrubovací soustružení, střední a podmíněně vyšší řezné rychlosti.

**Materiál 6640** - substrát bez kubických karbidů, tenký povlak s nosnou vrstvou TiCN nanesený metodou MTCVD, aplikační oblast P20-P40, M20-M35, K25-K40 a podmíněně H20-H30. Zejména pro polohrubovací a hrubovací soustružení, pro přerušovaný řez a nepříznivé záběrové podmínky.

- **Řada materiálů 8000**

**Materiál 8016** - submikrometrový substrát bez kubických karbidů s nízkým obsahem kobaltu, nanostrukturální povlak nanesený metodou PVD, pro aplikační oblast P05-P20, M05-M20, K05-K25, N05-N25, H05-H15 a podmíněně S05-S15. Pro operace charakterizované vysokou tepelnou zátěží, stabilní záběrové podmínky, vysoké řezné rychlosti (suché obrábění).

**Materiál 8030** - submikrometrový substrát bez kubických karbidů, nanostrukturální povlak nanesený metodou PVD, pro aplikační oblast P25-P40, M20-M35, K20-K40, N15-N30, S15-S25 a podmíněně H15-H25, horší záběrové podmínky, střední řezné rychlosti.

**Materiál 8040** - submikrometrový substrát bez kubických karbidů s vysokým obsahem kobaltu, nanostrukturální povlak nanesený metodou PVD, pro aplikační oblast P30-P50, M20-M40, K20-K40 a S20-S30. Pro operace charakterizované vysokou mechanickou zátěží bříty, nestabilní záběrové podmínky, nízké až střední řezné rychlosti.

- **Řada materiálů 9000**

**Materiál 9210** - funkčně gradientní substrát s nízkým obsahem kobaltu, silný povlak s nosnou vrstvou Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, pro aplikační oblast P10-P25, K05-K20 a podmíněně M10-M20. Speciální úprava po povlakování, dokončovací až hrubovací soustružení, vyšší řezné rychlosti, kontinuální a podmíněně přerušovaný řez.

**Materiál 9230** – funkčně gradientní substrát, moderní středně silný speciální MTCVD povlak, aplikační oblast P10-P35, M10-M30, K20-K35 a podmíněně S15-S25. Speciální úprava po povlakování, dokončovací až hrubovací soustružení, kontinuální i přerušovaný řez, střední a vyšší řezné rychlosti.

**Materiál 9235** - funkčně gradientní substrát s relativně vysokým obsahem kobaltu, středně silný speciální MTCVD povlak, aplikační oblast P15-P40, M15-M35, K20-K35 a podmíněně S20-S30. Speciální úprava po povlakování, hrubovací až dokončovací soustružení, přerušovaný i kontinuální řez, střední řezné rychlosti.

## 7.1.2 Doporučené řezné podmínky podle skupin ISO

Tab. 7.1 Doporučené řezné podmínky pro skupinu P<sup>49,50</sup>

oceli a ocelolityny		P05	P10	P15	P20	P25	P30	P35	P40	P45	P50	
materiál	3025	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					70 - 340					
		šířka záběru [mm]					0,5 - 12					
		posuv [mm]					0,1 - 0,8					
	6605	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]		170 - 480								
		šířka záběru [mm]		1,5 - 5								
		posuv [mm]		0,05 - 1,3								
	6615	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			185 - 370							
		šířka záběru [mm]			1,5 - 5							
		posuv [mm]			0,15 - 0,8							
	6630	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				85 - 330						
		šířka záběru [mm]				1,5 - 12						
		posuv [mm]				0,15 - 1,3						
	6635	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					75 - 250					
		šířka záběru [mm]					1,5 - 12					
		posuv [mm]					0,15 - 1,3					
6640	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					70 - 275						
	šířka záběru [mm]					1,5 - 12						
	posuv [mm]					0,15 - 1,3						
8016	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			250 - 410								
	šířka záběru [mm]			0,5								
	posuv [mm]			0,05 - 0,1								
8030	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					65 - 275						
	šířka záběru [mm]					0,5 - 12						
	posuv [mm]					0,05 - 1,3						
8040	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]							30 - 180				
	šířka záběru [mm]							2,5 - 12				
	posuv [mm]							0,2 - 1,3				
9210	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			105 - 370								
	šířka záběru [mm]			1,5 - 5								
	posuv [mm]			0,15 - 1,3								
9230	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				90 - 355							
	šířka záběru [mm]				1,5 - 5							
	posuv [mm]				0,15 - 1,3							
9235	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					110 - 300						
	šířka záběru [mm]					1,5 - 5						
	posuv [mm]					0,15 - 1,3						

Tab. 7.2 Doporučené řezné podmínky pro skupinu M<sup>49,50</sup>

korozivzdorné, žáruvzdorné, žárupevné oceli		M05	M10	M15	M20	M25	M30	M35	M40	M45	M50
materiál	3025	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				40 - 205					
		šířka záběru [mm]				0,5 - 12					
		posuv [mm]				0,05 - 1,3					
	6630	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				50 - 200					
		šířka záběru [mm]				1,5 - 12					
		posuv [mm]				0,15 - 1,3					
	6635	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					45 - 175				
		šířka záběru [mm]					1,5 - 12				
		posuv [mm]					0,15 - 1,3				
	6640	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					10 - 280				
		šířka záběru [mm]					0,5 - 12				
		posuv [mm]					0,05 - 1,3				
8016	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]		110 - 150								
	šířka záběru [mm]		0,5 - 1,5								
	posuv [mm]		0,05 - 0,2								
8030	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					20 - 140					
	šířka záběru [mm]					0,5 - 12					
	posuv [mm]					0,05 - 1,3					
8040	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					25 - 120					
	šířka záběru [mm]					1,5 - 12					
	posuv [mm]					0,1 - 1,3					
9210	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]		85 - 225								
	šířka záběru [mm]		1,5 - 5								
	posuv [mm]		0,15 - 0,8								
9230	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					55 - 215					
	šířka záběru [mm]					1,5 - 12					
	posuv [mm]					0,15 - 1,3					
9235	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					65 - 180					
	šířka záběru [mm]					1,5 - 12					
	posuv [mm]					0,15 - 1,3					

**M**

 Tab. 7.3 Doporučené řezné podmínky pro skupinu K<sup>49,50</sup>

litiny		K05	K10	K15	K20	K25	K30	K35	K40	K45	K50
materiál	3025	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				160 - 295					
		šířka záběru [mm]				0,5 - 1,5					
		posuv [mm]				0,05 - 0,2					
	6605	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]		175 - 455							
		šířka záběru [mm]		1,5 - 5							
		posuv [mm]		0,1 - 0,8							
	6615	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]		175 - 350							
		šířka záběru [mm]		1,5 - 5							
		posuv [mm]		0,15 - 0,8							
	6630	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					65 - 290				
		šířka záběru [mm]					1,5 - 12				
		posuv [mm]					0,15 - 1,3				
6635	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					110 - 225					
	šířka záběru [mm]					1,5 - 5					
	posuv [mm]					0,15 - 0,8					
6640	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					30 - 220					
	šířka záběru [mm]					1,5 - 12					
	posuv [mm]					0,1 - 1,3					
8016	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]		200 - 285								
	šířka záběru [mm]		0,5								
	posuv [mm]		0,05 - 0,1								
8030	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					120 - 160					
	šířka záběru [mm]					0,5					
	posuv [mm]					0,05 - 0,1					
8040	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					25 - 150					
	šířka záběru [mm]					2,5 - 12					
	posuv [mm]					0,2 - 1,3					
9210	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]		100 - 340								
	šířka záběru [mm]		1,5 - 12								
	posuv [mm]		0,15 - 1,3								
9230	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					85 - 340					
	šířka záběru [mm]					1,5 - 12					
	posuv [mm]					0,15 - 1,3					
9235	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					105 - 285					
	šířka záběru [mm]					1,5 - 12					
	posuv [mm]					0,15 - 1,3					

**K**

Tab. 7.4 Doporučené řezné podmínky pro skupinu N<sup>49,50</sup>

neželezné kovy		N05	N10	N15	N20	N25	N30	N35	N40	N45	N50	
materiál	8016	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	300 - 900									
		šířka záběru [mm]	1,5 - 5									
		posuv [mm]	0,1 - 0,8									
	8030	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			300 - 650							
		šířka záběru [mm]			1,5 - 2,5							
		posuv [mm]			0,1 - 0,4							
	↻ slitiny Al											
	↺ slitiny Cu											
	8016	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	260 - 500									
		šířka záběru [mm]	1,5 - 5									
		posuv [mm]	0,1 - 0,8									
	8030	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			100 - 250							
šířka záběru [mm]				1,5 - 2,5								
posuv [mm]				0,1 - 0,4								

Tab. 7.5 Doporučené řezné podmínky pro skupinu S<sup>49,50</sup>

speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe, Ti		S05	S10	S15	S20	S25	S30	S35	S40	S45	S50
materiál	3025	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			30 - 100						
		šířka záběru [mm]			0,5 - 5						
		posuv [mm]			0,05 - 0,8						
	6630	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			40 - 90						
		šířka záběru [mm]			1,5 - 5						
		posuv [mm]			0,15 - 0,8						
	6640	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			30 - 75						
		šířka záběru [mm]			1,5 - 5						
		posuv [mm]			0,1 - 0,8						
	8016	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	28 - 65								
		šířka záběru [mm]	1,5 - 5								
		posuv [mm]	0,1 - 0,8								
8030	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			23 - 60							
	šířka záběru [mm]			1,5 - 6							
	posuv [mm]			0,1 - 0,8							
8040	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			18 - 55							
	šířka záběru [mm]			1,5 - 5							
	posuv [mm]			0,1 - 0,8							
9230	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			45 - 105							
	šířka záběru [mm]			1,5 - 5							
	posuv [mm]			0,15 - 0,8							
9235	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			50 - 90							
	šířka záběru [mm]			1,5 - 5							
	posuv [mm]			0,15 - 0,8							

Tab. 7.6 Doporučené řezné podmínky pro skupinu H<sup>49,50</sup>

zušlechtnuté oceli, tvrzené litiny		H05	H10	H15	H20	H25	H30	H35	H40	H45	H50
materiál	3025	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			25 - 50						
		šířka záběru [mm]			1,5 - 2,5						
		posuv [mm]			0,1 - 0,3						
	6605	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	50 - 95								
		šířka záběru [mm]	1,5 - 2,5								
		posuv [mm]	0,1 - 0,3								
	8016	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	38 - 70								
		šířka záběru [mm]	1,5 - 2,5								
		posuv [mm]	0,1 - 0,3								
	8030	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			28 - 60						
		šířka záběru [mm]			1,5 - 2,5						
		posuv [mm]			0,1 - 0,3						

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



## 7.2 Výběr z nabízeného sortimentu firmy SANDVIK – COROMANT

Švédská firma zabývající se výrobou nástrojových materiálů pro soustružení, frézování a vrtání byla založena roku 1862, ale výroba slinutých karbidů byla zahájena roku 1942. Tato firma má zastoupení ve 130 zemích po celém světě s celkovým počtem zaměstnanců cca 8000. Sídlo společnosti je ve městě Sandviken. Ve své nabídce má firma přes 25 000 výrobků používajících v širokém spektru průmyslu<sup>38,39,40,41,42,43,44</sup>.

### 7.2.1 Povlakované materiály pro soustružení<sup>38, 39, 40, 41, 42, 43, 44</sup>

- **Řada materiálu GC1000**

**Materiál GC1025** - ultrajemný substrát SK s PVD povlakem TiAlN o tloušťce 4 μm pro dokončování nízkouhlíkových ocelí a dalších materiálů ulpívajících na břitu nástroje, pro aplikační oblast M10-M25, a S10-S20. Vysoká odolnost proti tepelným rázům a tvorbě vrubů, proto se hodí na přerušované řezy, doporučuje se obrábět tepelně odolné superslitiny a slitiny titanu při nízkých řezných rychlostech.

**Materiál GC1115** - submikrometrový substrát, nejnovější PVD povlak z Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> prodlužuje dobu záběru nástroje, aplikační oblast M05-M25 a s05-S25. Řešení pro hrubování a polodokončování žárovzdorných superslitin (titan) a dokončování korozivzdorných ocelí a precipitačně vytvrzené materiály.

**Materiál GC1125** - PVD povlak z Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pro široké spektrum aplikací, jemnozrný substrát, vhodný pro obrábění korozivzdorných ocelí, aplikační oblast M10-M30. Dobrá odolnost vůči opotřebení břitu ve tvaru vrubu a proti tepelným rázům, pro středně náročné operace s krátkou dobou kontaktu, obrábění žárovzdorných superslitin při malých řezných rychlostech.

**Materiál GC 1515** - submikrometrový karbid s MTCVD povlakem, středně silný povlak Ti(C,N) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiN, aplikační oblast P05-P25. Pro dokončovací operace nízkouhlíkových až nízkolegovaných ocelí při nízkých řezných rychlostech, vhodný pro lehké přerušované řezy a dobrá odolnost proti tepelným rázům.

- **Řada materiálu 2000**

**Materiál 2015** - SK s multivrstvým MTCVD povlakem pro dokončování až lehké hrubování s vysokou odolností proti opotřebení a pro materiály, které snadno ulpívají na břitu nástroje, funkčně gradientní substrát, aplikační oblast P20-P30 a M05-M25. Povlak z Ti(C,N) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiN, vhodný pro přerušované řezy při středních až vysokých řezných rychlostech.

**Materiál 2025** - SK s MTCVD povlakem z Ti(C,N) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiN pro hrubování a polodokončování austenitických a duplexních korozivzdorných ocelí, středně zrnitý substrát, pro aplikační oblast P25-P40 a M15-M35. Vysoká odolnost vůči tepelným ale i mechanickým rázům, vhodný pro přerušované řezy.

**Materiál 235** - SK s CVD povlakem Ti(C,N) + TiN pro hrubování korozivzdorných ocelí a odlitků s obtížně obrobitelnou kúrou, aplikační oblast P30-P50 a M25-M40. Houževnatý substrát zaručuje extrémně spolehlivý břit nástroje, vhodný pro velmi těžké řezy při nízkých až středních řezných rychlostech.

- **Řada materiálu GC3000**

**Materiál 3005** - SK s MTCVD povlakem z  $Ti(C,N) + Al_2O_3 + TiN$  s vysokou odolností vůči opotřebení a velmi dobrou adhezí k substrátu, aplikační oblast P01-P25 a K01-K20. Tvrdý substrát střední zrnitosti, velmi dobré předpoklady pro práci za vysokých teplot v místě řezu, vhodný pro dokončování vysoce legovaných ocelí při vysokých řezných rychlostech.

**Materiál 3205** - SK s vysoce hladkým silným povlakem  $Ti(C,N) + Al_2O_3 + TiN$  nanesený metodou MTCVD, povlak o tloušťce 15  $\mu m$  vykazuje vysokou odolnost proti opotřebení, aplikační oblast K01-K15. Vhodný pro vysokorychlostní obrábění šedé litiny, vysoké řezné rychlosti, velmi tvrdý a jemnozrný substrát.

**Materiál GC3210** - SK s velmi silným hladkým povlakem  $Ti(C,N) + Al_2O_3 + TiN$  nanesený metodou MTCVD, velmi tvrdý a jemnozrný substrát, aplikační oblast K01-K20. Vhodné pro obrábění tvárné litiny vysokými řeznými rychlostmi, vysoké řezné rychlosti pro další aplikace.

**Materiál GC3215** - SK s povlakem  $Ti(C,N) + Al_2O_3 + TiN$  nanesený metodou MTCV, tvrdý substrát střední zrnitosti, aplikační oblast K01-K25. Vysoké zatížení při přerušovaném obrábění, vhodný jak pro kontinuální tak i pro přerušovaný řez, pro hrubování všech druhů litiny při malých a středních řezných rychlostech.

- **Řada materiálu GC4000**

**Materiál GC4205** - SK s CVD multivrstvým povlakem, aplikační oblast P01-P15, K05-K15 a H05-H20. Kombinuje vhodné vlastnosti gradientního substrátu; jeho houževnatost a tvrdost, silný povlak odolný vůči opotřebení.

**Materiál GC4225** - SK s povlakem  $Ti(C,N) + Al_2O_3 + TiN$  nanesený metodou MTCVD pro dokončovací až hrubovací operace pro oceli a ocelolitiny, aplikační oblast P10-P35 a M05-M25. Pro kontinuální i přerušovaný řez, funkčně gradientní substrát umožňující práci za vysokých teplot, vhodný pro operace se střední řeznou rychlostí a velkým úběrem materiálu.

**Materiál GC4235** - SK s povlakem  $Ti(C,N) + Al_2O_3 + TiN$  nanesený metodou MTCVD pro hrubovací operace korozivzdorných ocelí, aplikační oblast P20-P45 a M15-M30. Jedná se o funkčně gradientní substrát se silným povlakem a vysokou odolností proti opotřebení, dobrá odolnost proti tepelným a mechanickým rázům. Vhodný pro přerušované řezy s vysokou rychlostí úběru materiálu.

## 7.2.2 Doporučené řezné podmínky podle skupin ISO

Tab. 7.7 Doporučené řezné podmínky pro skupinu P<sup>38,39,40,41,42,43,44</sup>

oceli a ocelolitiny		P05	P10	P15	P20	P25	P30	P35	P40	P45	P50
materiál	GC1025	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			200 - 250						
		šířka záběru [mm]			1,5 - 2,5						
		posuv [mm]			0,1 - 0,4						
	GC1125	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			200 - 250						
		šířka záběru [mm]			1,5 - 2,5						
		posuv [mm]			0,1 - 0,4						
	GC1515	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			125 - 295						
		šířka záběru [mm]			1,5 - 2,5						
		posuv [mm]			0,1 - 0,4						
	GC1525	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			145 - 375						
		šířka záběru [mm]			0,5 - 1,5						
		posuv [mm]			0,05 - 0,2						
	GC2015	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					75 - 440				
		šířka záběru [mm]					2,5				
		posuv [mm]					0,1 - 0,8				
	GC2025	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]						50 - 295			
šířka záběru [mm]							2,5				
posuv [mm]							0,1 - 0,8				
GC235	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]						40 - 185				
	šířka záběru [mm]						2,5				
	posuv [mm]						0,1 - 0,8				
GC3005	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			130 - 520							
	šířka záběru [mm]			2,5							
	posuv [mm]			0,1 - 0,5							
GC4205	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]		115 - 620								
	šířka záběru [mm]		2,5								
	posuv [mm]		0,1 - 0,8								
GC4215	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			105 - 570							
	šířka záběru [mm]			2,5							
	posuv [mm]			0,1 - 0,8							
GC4225	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			90 - 510							
	šířka záběru [mm]			2,5							
	posuv [mm]			0,1 - 0,8							
GC4235	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]						65 - 425				
	šířka záběru [mm]						2,5				
	posuv [mm]						0,1 - 0,8				

P

Tab. 7.8 Doporučené řezné podmínky pro skupinu M<sup>38,39,40,41,42,43,44</sup>

korozivzdorné, žáruvzdorné, žárupevné oceli		M05	M10	M15	M20	M25	M30	M35	M40	M45	M50	
materiál	GC1005	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	200 - 380									
		šířka záběru [mm]	1,5 - 2,5									
		posuv [mm]	0,1 - 0,4									
	GC1025	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			90 - 280							
		šířka záběru [mm]			2,5							
		posuv [mm]			0,1 - 0,3							
	GC1105	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	200 - 380									
		šířka záběru [mm]	1,5 - 2,5									
		posuv [mm]	0,1 - 0,4									
	GC1125	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			90 - 280							
		šířka záběru [mm]			2,5							
		posuv [mm]			0,1 - 0,3							
	GC1515	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			100 - 305							
		šířka záběru [mm]			2,5							
posuv [mm]				0,1 - 0,3								
GC1525	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	240 - 290										
	šířka záběru [mm]	1,5										
	posuv [mm]	0,1 - 0,2										
GC2015	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]		105 - 260									
	šířka záběru [mm]		2,5									
	posuv [mm]		0,2 - 0,6									
GC2025	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				80 - 230							
	šířka záběru [mm]				2,5							
	posuv [mm]				0,2 - 0,6							
GC2035	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]						75 - 180					
	šířka záběru [mm]						2,5					
	posuv [mm]						0,2 - 0,6					
GC235	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					70 - 130						
	šířka záběru [mm]					2,5 - 5						
	posuv [mm]					0,2 - 0,8						
GC4225	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	120 - 280										
	šířka záběru [mm]	2,5										
	posuv [mm]	0,2 - 0,6										
GC4235	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				100 - 235							
	šířka záběru [mm]				2,5							
	posuv [mm]				0,2 - 0,6							

Tab. 7.9 Doporučené řezné podmínky pro skupinu K<sup>38,39,40,41,42,43,44</sup>

litiny		K05	K10	K15	K20	K25	K30	K35	K40	K45	K50	
materiál	GC3005	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	100 - 250									
		šířka záběru [mm]	2,5									
		posuv [mm]	0,2 - 0,6									
	GC3205	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	190 - 460									
		šířka záběru [mm]	2,5									
		posuv [mm]	0,2 - 0,6									
	GC3210	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	170 - 385									
		šířka záběru [mm]	2,5									
		posuv [mm]	0,2 - 0,6									
	GC3215	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	115 - 260									
		šířka záběru [mm]	2,5									
		posuv [mm]	0,2 - 0,6									
	GC4205	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]		135 - 365								
		šířka záběru [mm]		2,5								
posuv [mm]			0,2 - 0,6									
GC4215	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			125 - 325								
	šířka záběru [mm]			2,5								
	posuv [mm]			0,2 - 0,6								
GC4225	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]		75 - 275									
	šířka záběru [mm]		2,5									
	posuv [mm]		0,2 - 0,6									

Tab. 7.10 Doporučené řezné podmínky pro skupinu N <sup>38,39,40,41,42,43,44</sup>

neželezné kovy		M05	M10	M15	M20	M25	M30	M35	M40	M45	M50
materiál	GC1005	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	85 - 770								
		šířka záběru [mm]	2,5								
		posuv [mm]	0,15 - 0,8								
	GC1125	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			85 - 770						
		šířka záběru [mm]			2,5						
		posuv [mm]			0,15 - 0,8						

 Tab. 7.11 Doporučené řezné podmínky pro skupinu S <sup>38,39,40,41,42,43,44</sup>

speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe, Ti		M05	M10	M15	M20	M25	M30	M35	M40	M45	M50
materiál	GC1005	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	24 - 150								
		šířka záběru [mm]	2,5								
		posuv [mm]	0,1 - 0,5								
	GC1105	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	24 - 150								
		šířka záběru [mm]	2,5								
		posuv [mm]	0,1 - 0,5								
	GC1025	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			12 - 75						
		šířka záběru [mm]			2,5						
		posuv [mm]			0,1 - 0,5						
	GC1125	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					12 - 75				
		šířka záběru [mm]					2,5				
		posuv [mm]					0,1 - 0,5				

 Tab. 7.12 Doporučené řezné podmínky pro skupinu H <sup>38,39,40,41,42,43,44</sup>

zušlechtnuté oceli, tvrzené litiny		M05	M10	M15	M20	M25	M30	M35	M40	M45	M50
materiál	GC4205	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	17 - 70								
		šířka záběru [mm]	2,5								
		posuv [mm]	0,1 - 0,6								
	GC4215	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	15 - 65								
		šířka záběru [mm]	2,5								
		posuv [mm]	0,1 - 0,6								

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

## 7.3 Výběr z nabízeného sortimentu firmy ISCAR METALS

Jedná se izraelskou společností. Víze firmy spočívá nejen v důrazu na vysokou kvalitu a výkonnost vyráběných řezných materiálů, ale též v jejich upotřebitelnosti jak v podmínkách sériové, tak i kusové výroby mnohdy při velmi speciálních požadavcích na nástroj. Poskytují špičkový elektronický katalog a generátor řezného procesu <sup>35,36</sup>.

### 7.3.1 Povlakované materiály pro soustružení <sup>35, 36</sup>

- Řada materiálů IC200, IC300, IC400, IC500, IC600

**Materiál IC228** - houževnatý substrát s TiN PVD povlakem, aplikační oblast pro zapichovací a závitovací operace při nízkých řezných rychlostech.

**Materiál IC330** - houževnatý substrát s TiN/TiCN PVD povlakem, aplikační oblast pro, doporučený pro frézování, zapichování, upichování a vrtání, pro nižší a vyšších řezných rychlostech.

**Materiál IC354** - jemnozrný substrát s TiN/TiCN PVD povlakem, pro aplikační oblast, pro všechny soustružnické operace na uhlíkových, legovaných a nerez ocelí, pro střední a vyšší řezné rychlosti.

**Materiál IC418** - substrát s vícevrstevným CVD TiCN/TiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> povlakem, pro aplikační oblast, určen pro soustružení šedé a nodulární litiny, pro střední až vyšší řezné rychlosti, možné použít pro přerušovaný řez a těžké obrábění.

**Materiál IC428** - substrát s vícevrstevným CVD TiCN/TiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> povlakem, pro aplikační oblast, určen pro zapichování soustružení šedé a nodulární litiny, pro střední až vyšší řezné rychlosti.

**Materiál IC507** - pro obecné soustružení, rozsah P10-P30, M05-M20, S05-S20 a H05-H15.

**Materiál IC520N** - cermet s povlakem TiCN/TiN, pro aplikační oblast, vykazuje výbornou odolnost proti opotřebení a plastické deformace při vysokých řezných rychlostech a středních hodnotách posuvu, určen pro dokončovací operace soustružení.

**Materiál IC635** – pro soustružení s užším rozsahem, pro soustružnické aplikace P30-P50 a M20-M40.

- **Řada materiálů IC800, IC900**

**Materiál IC807** - houževnatý submikrometrový substrát s TiAlN PVD povlakem, pro aplikační oblast P10-P30, M05-M20, S05-S20 a H05-H15. Obrábění žáruvzdorných slitin, austenitických a tvrdých ocelí při nízkých a středních řezných rychlostech.

**Materiál IC808** - houževnatý submikrometrový substrát s TiAlN PVD povlakem, aplikační oblast P15-P30, M20-M30, K20-K40, S05-S20 a H05-H15. Obrábění žáruvzdorných slitin, austenitických a tvrdých ocelí při středních až vyšších řezných rychlostech, snáší přerušované řezy a nestabilní podmínky, vysoká odolnost vrubovému opotřebení a vzniku nárůstků.

**Materiál IC903** - ultra jemný substrát s 12% kobaltu a TiAlN s PVD povlakem, aplikační oblast, k obrábění ocelí (až 62 HRC), slitiny titanu, niklu a korozivzdorné oceli při středních a vyšších řezných rychlostech, vysoká odolnosti proti otěru.

- **Řada materiálů IC5000**

**Materiál IC5005** - substrát s vícevrstevným CVD TiCN/TiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> povlakem, aplikační oblast K10-K25, H20-H30, určen pro zapichování, soustružení šedé a nodulární litiny, pro střední až vyšší řezné rychlosti.

**Materiál IC5010** - substrát s vícevrstevným CVD TiCN/TiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> povlakem, určen pro soustružení šedé a nodulární litiny, aplikační oblast K10-K30, pro střední a vyšší řezné rychlosti.

- **Řada materiálů IC8000**

**Materiál IC8150** - velmi tvrdý substrát s vrstvou napuštěnou kobaltem, TiCN povlakem nanosen MTCVD metodou a vrchní vrstvou z Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanosenou CVD metodou, aplikační oblast P05-P30, K10-K20, vysoká termální stabilita, odolnost proti vyštipování a plastické deformaci, pro rychlostní obrábění při stabilních a mírně stabilních podmínkách.

**Materiál IC8250** - houževnatý substrát s vrstvou napuštěnou kobaltem, aplikační oblast P10-P40, M10-M25, TiCN povlakem nanosen MTCVD metodou a vrchní vrstvou z Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanosenou CVD metodou, vykazuje vysokou houževnatost a odolnost proti opotřebení.

**Materiál IC8350** - velmi houževnatý substrát s vrstvou napuštěnou kobaltem, aplikační oblast P20-P45, M20-M35, TiCN povlak nanosen MTCVD metodou a vrchní vrstva Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanosená CVD metodou, vykazuje vysokou houževnatost a odolnost proti opotřebení.

- **Materiály s CVD a PVD povlakem**

**Materiál DT7150** - houževnatý substrát s duálním povlakem MTCVD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a TiAlN PVD, doporučen pro střední až vyšší řezné rychlosti,

- obrábění šedé a nodulární litiny, vysoká odolnost proti opotřebení a vyštipování.

### 7.3.2 Doporučené řezné podmínky podle skupin ISO

Tab. 7.13 Doporučené řezné podmínky pro skupinu P<sup>35,36</sup>

oceli a ocelolityny		P										
		P05	P10	P15	P20	P25	P30	P35	P40	P45	P50	
materiál	IC807	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			200 - 300							
		šířka záběru [mm]			3,5 - 8							
		posuv [mm]			0,3 - 0,8							
	IC808	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				200 - 300						
		šířka záběru [mm]				3,5 - 8						
		posuv [mm]				0,3 - 0,8						
	IC8150	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			150 - 200							
		šířka záběru [mm]			2,5 - 10							
		posuv [mm]			0,3 - 1,0							
	IC8250	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				150 - 200						
		šířka záběru [mm]				1,5 - 12						
		posuv [mm]				0,25 - 1,0						
IC8350	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					150 - 200						
	šířka záběru [mm]					1,5 - 15						
	posuv [mm]					0,25 - 1,5						
IC8048	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					150 - 250						
	šířka záběru [mm]					1,5 - 6						
	posuv [mm]					0,25 - 0,5						
IC3028	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					50 - 30						
	šířka záběru [mm]					15, - 10						
	posuv [mm]					0,25 - 1,0						

Tab. 7.14 Doporučené řezné podmínky pro skupinu M<sup>35,36</sup>

korozivzdorné, žáruvzdorné, žárupevné oceli		M										
		M05	M10	M15	M20	M25	M30	M35	M40	M45	M50	
materiál	IC807	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]		150 - 250								
		šířka záběru [mm]		3 - 10								
		posuv [mm]		0,3 - 1								
	IC808	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				150 - 300						
		šířka záběru [mm]				3,5 - 8						
		posuv [mm]				0,3 - 0,8						
	IC8250	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]		100 - 150								
		šířka záběru [mm]		1,5 - 12								
		posuv [mm]		0,25 - 1								
	IC8350	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				150 - 250						
		šířka záběru [mm]				1,5 - 15						
		posuv [mm]				0,25 - 1,5						
IC3028	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				50 - 130							
	šířka záběru [mm]				1,5 - 10							
	posuv [mm]				0,18 - 1							
IC635	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					80 - 100						
	šířka záběru [mm]					1,5 - 10						
	posuv [mm]					0,25 - 7						
IC9025	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				100 - 220							
	šířka záběru [mm]				1,5 - 10							
	posuv [mm]				0,25 - 0,8							

Tab. 7.15 Doporučené řezné podmínky pro skupinu K<sup>35,36</sup>

litiny			K05	K10	K15	K20	K25	K30	K35	K40	K45	K50	K
			materiál	IC808	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]						250 - 400		
šířka záběru [mm]									1 - 5				
posuv [mm]									0,15 - 0,5				
IC8150	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			150 - 250									
	šířka záběru [mm]			1,5 - 10									
	posuv [mm]			0,2 - 0,6									
IC5005	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			250 - 500									
	šířka záběru [mm]			1,5 - 10									
	posuv [mm]			0,3 - 0,5									
IC5010	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			250 - 300									
	šířka záběru [mm]			1 - 5									
	posuv [mm]			0,15 - 0,5									
IC9015	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				140-250								
	šířka záběru [mm]				2 - 10								
	posuv [mm]				0,3 - 1								
IC8048	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				120 - 160								
	šířka záběru [mm]				1,5 - 10								
	posuv [mm]				0,2 - 0,6								
IC9007	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				100 - 300								
	šířka záběru [mm]				15,5 - 5								
	posuv [mm]				0,3 - 0,5								

 Tab. 7.16 Doporučené řezné podmínky pro skupinu N<sup>35,36</sup>

neželezné kovy			N05	N10	N15	N20	N25	N30	N35	N40	N45	N50	N
			materiál	(IC08)	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			95 - 2400					
šířka záběru [mm]					2,5								
posuv [mm]					0,01 - 0,25								
IC520	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					80 - 2100							
	šířka záběru [mm]					2,5							
	posuv [mm]					0,15 - 0,8							

 Tab. 7.17 Doporučené řezné podmínky pro skupinu S<sup>35,36</sup>

speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe, Ti			S05	S10	S15	S20	S25	S30	S35	S40	S45	S50	S
			materiál	IC807	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			30 - 200					
šířka záběru [mm]					1 - 10								
posuv [mm]					0,3 - 1								
IC808	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					30 - 180							
	šířka záběru [mm]					0,5 - 8							
	posuv [mm]					0,15 - 1							
IC3028	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]						10 - 160						
	šířka záběru [mm]						2,5						
	posuv [mm]						0,1 - 0,3						
IC507	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				25 - 180								
	šířka záběru [mm]				2,5								
	posuv [mm]				0,1 - 0,3								
(IC07)	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				20 - 160								
	šířka záběru [mm]				2,5								
	posuv [mm]				0,1 - 0,3								



Tab. 7.18 Doporučené řezné podmínky pro skupinu H<sup>35,36</sup>

zušlechtné oceli, tvrzené litiny		H05	H10	H15	H20	H25	H30	H35	H40	H45	H50
<b>materiál</b>	IC807	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]	30 - 100								
		šířka záběru [mm]	1 - 4,5								
		posuv [mm]	0,16 - 0,45								
	IC808	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					40 - 120				
		šířka záběru [mm]					2,5				
		posuv [mm]					0,1 - 0,6				
	IC900	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]			50 - 150						
		šířka záběru [mm]			2,5						
		posuv [mm]			0,1 - 0,6						
	IC1008	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]					50 - 100				
		šířka záběru [mm]					2,5				
		posuv [mm]					0,1 - 0,6				
	IC5005	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]				50 - 150					
		šířka záběru [mm]				2,5					
		posuv [mm]				0,1 - 0,6					
	IC507	rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]		40 - 100							
		šířka záběru [mm]		2,5							
		posuv [mm]		0,1 - 0,6							

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

Výběr materiálu a třídy obráběcího nástroje je důležitým faktorem, který je třeba uvážit již při samotném návrhu obráběcí operace.

Proto je důležitá elementární znalost každého nástrojového materiálu a jeho funkčních vlastností, aby bylo možné provést správnou volbu pro všechny aplikace. Mezi další aspekty, které je třeba uvážit při návrhu každého nástrojového materiálu, patří materiál obrobku, typ a tvar obráběné součásti, podmínky obrábění a požadovaný stupeň kvality obrobenej plochy.

Výše uvedené doporučené řezné podmínky jsou tzv. startovací. V každém výrobním procesu se provádí úprava řezných podmínek s ohledem na prostředí, stavu stroje, obráběného materiálu atd. V reálných podmínkách je možné vytvořit jakousi matici vhodných řezných podmínek pro dané aplikace, z kterých je možné kombinovat jednotlivé řezné podmínky s ohledem na aktuální stav stroje nebo požadovanou kvalitu obrábění.

Výrobci povlakovaných slinutých karbidů většinou uvádí doporučené řezné podmínky s trvanlivostí T = 15 min. Podle současně dostupných katalogů neuvádí všichni výrobci řezné podmínky s ohledem na obráběný materiál, taktéž není vždy zohledněno přesné chemické složení slinutého karbidu v závislosti na jednotlivých skupinách a proto není porovnání jednotlivých řezných podmínek jednotlivých výrobců zcela vypovídající.

Většinou v praxi to bývá tak, že na konkrétní řeznou aplikaci doporučí výrobce řezný nástroj s řeznými podmínkami s ohledem na konkrétní obráběný materiál, na konkrétní obráběný stroj, na konkrétní procesní prostředí se zohledněním geometrii obráběného tvaru.

## 7.4 Porovnání doporučených řezných podmínek u vybraných významných výrobců nástrojových materiálů

Porovnávání doporučených řezných podmínek od různých výrobců je poměrně komplikovaná záležitost, neboť každý výrobce určuje tyto řezné podmínky různě - pro různé obráběné materiály, pro různé hodnoty posuvy i hloubku záběru ostří. V následující kapitole byla snaha porovnat řezné materiály pro dané aplikační oblasti od výrobců PRAMET, SANDWIK a ISCAR. Vybrány byly z každé aplikační oblasti dva nástroje s nejvyššími řeznými rychlosti od každého výrobce a pokud to bylo možné, tak pro srovnání řezných podmínek se stejnými podmínkami jako šířka záběru ostří a posuv na otáčku. Dále byla snaha porovnávat ty výrobce a takové nástroje, které jsou určeny pro stejný nebo podobný obráběný materiál. Tedy obráběný materiálem, pro který jsou vybrané řezné podmínky, byla nezušlechťená, nízkolegovaná ocel s tvrdostí 180 HB s obrobiteľností 14b pro materiálové skupiny P, pro materiálové skupiny typ M byl vybrán materiál nezušlechťená, korozivzdorná ocel s tvrdostí 180 - 210 HB a obrobiteľností 8b, pro skupiny K – šedá litina s vysokou pevností v tahu a s tvrdostí 220 HB, u materiálové skupiny N – tepelně zpracované hliníkové slitiny s tvrdostí 100 HB, pro materiály S – žáruvzdorné superslitiny na bázi niklu s tvrdostí 250 HB a pro obráběcí skupinu H – kalená a popuštěná ocel s tvrdostí 55 HRC. Řezná rychlosti, která ovlivňuje řezný proces nejvíce, je udávána pro trvanlivost nástroje 15 min

Tab.7.19 Porovnání doporučených řezných podmínek pro obrábění skupiny P pro soustružení u firem PRAMET, SANDVIC a ISCAR

oceli a ocelolitiny			P05	P10	P15	P20	P25	P30	P35	P40	P45	P50	
materiál	Pramet	9210	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]		105 - 370								
			šířka záběru [mm]		1,5 - 5								
			posuv [mm]		0,15 - 1,3								
		9230	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]		185 - 370								
			šířka záběru [mm]		1,5 - 5								
			posuv [mm]		0,15 - 0,8								
	Sandwik	GC4215	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]		105 - 570								
			šířka záběru [mm]		2,5								
			posuv [mm]		0,1 - 0,8								
		GC3005	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]		130 - 520								
			šířka záběru [mm]		2,5								
			posuv [mm]		0,1 - 0,5								
Iscar	IC807	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]			30 - 200								
		šířka záběru [mm]			3,5 - 8								
		posuv [mm]			0,3 - 0,8								
	IC808	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]			30 - 200								
		šířka záběru [mm]			3,5 - 8								
		posuv [mm]			0,3 - 0,8								

Tab.7.20 Porovnání doporučených řezných podmínek pro obrábění skupiny M pro soustružení u firem PRAMET, SANDVIC a ISCAR

korozivzdorné, žáruvzdorné, žárupevné oceli			M05	M10	M15	M20	M25	M30	M35	M40	M45	M50	M	
materiál	Pramet	6640	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]				10 - 280							
			šířka záběru [mm]				0,5 - 12							
			posuv [mm]				0,05 - 1,3							
	Pramet	9230	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]		55 - 215									
			šířka záběru [mm]		1,5 - 12									
			posuv [mm]		0,15 - 1,3									
	Sandwik	GC1025	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]			90 - 280								
			šířka záběru [mm]		2,5									
			posuv [mm]		0,1 - 0,3									
	Sandwik	GC2015	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	105 - 260										
šířka záběru [mm]			2,5											
posuv [mm]			0,2 - 0,6											
Iscar	IC808	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]				150 - 300								
		šířka záběru [mm]				3,5 - 8								
		posuv [mm]				0,3 - 0,8								
Iscar	IC807	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	150 - 250											
		šířka záběru [mm]	3 - 10											
		posuv [mm]	0,3 - 1											

Tab.7.21 Porovnání doporučených řezných podmínek pro obrábění skupiny K pro soustružení u firem PRAMET, SANDVIC a ISCAR

litiny			K05	K10	K15	K20	K25	K30	K35	K40	K45	K50	K	
materiál	Pramet	6605	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	175 - 455										
			šířka záběru [mm]	1,5 - 5										
			posuv [mm]	0,1 - 0,8										
	Pramet	6615	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	175 - 350										
			šířka záběru [mm]	1,5 - 5										
			posuv [mm]	0,15 - 0,8										
	Sandwik	GC3205	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	190 - 460										
			šířka záběru [mm]	2,5										
			posuv [mm]	0,2 - 0,6										
	Sandwik	GC3210	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	170 - 385										
šířka záběru [mm]			2,5											
posuv [mm]			0,2 - 0,6											
Iscar	IC808	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]				250 - 400								
		šířka záběru [mm]				1 - 5								
		posuv [mm]				0,15 - 0,5								
Iscar	IC5005	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	250 - 500											
		šířka záběru [mm]	1,5 - 10											
		posuv [mm]	0,3 - 0,5											

Tab.7.22 Porovnání doporučených řezných podmínek pro obrábění skupiny N pro soustružení u firem PRAMET, SANDVIC a ISCAR

<b>neželezné kovy (Al)</b>			N05	N10	N15	N20	N25	N30	N35	N40	N45	N50	<b>N</b>		
<b>materiál</b>	<b>Pramet</b>	<b>8016</b>	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	300 - 900											
			šířka záběru [mm]	1,5 - 5											
			posuv [mm]	0,1 - 0,8											
	<b>8030</b>	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	300 - 650												
		šířka záběru [mm]	1,5 - 2,5												
		posuv [mm]	0,1 - 0,4												
	<b>Sandwik</b>	<b>GC1005</b>	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	85 - 770											
			šířka záběru [mm]	2,5											
			posuv [mm]	0,15 - 0,8											
	<b>GC1125</b>	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	85 - 770												
šířka záběru [mm]		2,5													
posuv [mm]		0,15 - 0,8													
<b>Iscar</b>	<b>IC08</b>	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	95 - 2400												
		šířka záběru [mm]	2,5												
		posuv [mm]	0,01 - 0,25												
<b>IC520</b>	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	80 - 2100													
	šířka záběru [mm]	2,5													
	posuv [mm]	0,15 - 0,8													

Tab.7.23 Porovnání doporučených řezných podmínek pro obrábění skupiny S pro soustružení u firem PRAMET, SANDVIC a ISCAR

<b>speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe, Ti</b>			S05	S10	S15	S20	S25	S30	S35	S40	S45	S50	<b>S</b>	
<b>materiál</b>	<b>Pramet</b>	<b>3025</b>	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	30 - 100										
			šířka záběru [mm]	0,5 - 5										
			posuv [mm]	0,05 - 0,8										
	<b>9230</b>	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	45 - 105											
		šířka záběru [mm]	1,5 - 5											
		posuv [mm]	0,15 - 0,8											
	<b>Sandwik</b>	<b>GC1005</b>	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	24 - 150										
			šířka záběru [mm]	2,5										
			posuv [mm]	0,1 - 0,5										
	<b>GC1105</b>	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	24 - 150											
šířka záběru [mm]		2,5												
posuv [mm]		0,1 - 0,5												
<b>Iscar</b>	<b>IC807</b>	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	30 - 200											
		šířka záběru [mm]	1 - 10											
		posuv [mm]	0,3 - 1											
<b>IC507</b>	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	25 - 180												
	šířka záběru [mm]	2,5												
	posuv [mm]	0,1 - 0,3												

Tab.7.24 Porovnání doporučených řezných podmínek pro obrábění skupiny H pro soustružení u firem PRAMET, SANDVIC a ISCAR

zušlechtné oceli, tvrzené litiny			H05	H10	H15	H20	H25	H30	H35	H40	H45	H50
materiál	Pramet	6605	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	50 - 95								
			šířka záběru [mm]	1,5 - 2,5								
			posuv [mm]	0,1 - 0,3								
		8016	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	38 - 70								
			šířka záběru [mm]	1,5 - 2,5								
			posuv [mm]	0,1 - 0,3								
	Sandwik	GC4205	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	17 - 70								
			šířka záběru [mm]	2,5								
			posuv [mm]	0,1 - 0,6								
		GC4215	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]	15 - 65								
			šířka záběru [mm]	2,5								
			posuv [mm]	0,1 - 0,6								
Iscar	IC900	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]				50 - 150						
		šířka záběru [mm]				2,5						
		posuv [mm]				0,1 - 0,6						
	IC5005	rychlost[m.min <sup>-1</sup> ]				50 - 150						
		šířka záběru [mm]				2,5						
		posuv [mm]				0,1 - 0,6						

V této kapitole bylo provedeno srovnání řezných podmínek soustružnických materiálů pro všechny dostupné obráběcí aplikace v rámci ISO soustružení. Byla vybrána česká firma PRAMET, švédská firma SANDWIK a izraelská firma ISCAR.

Vždy byly vybrány dva materiály pro každou obráběcí aplikaci od každého dodavatele soustružnických materiálů. Porovnávána byla řezná rychlost, která nejvíce ovlivňuje trvanlivost nástroje, řezné síly a pod. Každý z uvedených výrobců má na svých webových stránkách zveřejněný zevrubný katalog aktuálně nabízených řezných nástrojů s doporučenými řeznými podmínkami. Z tohoto srovnání lze konstatovat, který materiál pro danou aplikaci je nejvýhodnější respektive, který z uvedených dodavatelů doporučuje nejvyšší řeznou rychlost.

Pro aplikační oblast P (tab.7.19). dosahuje nejvyšší řezné rychlosti  $v_c = 105-570$  m.min<sup>-1</sup> při posuvu na otáčku  $f = 0,1-0,8$  mm a záběru ostří  $a_p = 2,5$ mm řezný materiál s označením GC4215 od firmy SANDWIK.

Pro aplikační oblast M (tab.7.20) dosahuje nejvyšší řezné rychlosti  $v_c = 150-300$  m.min<sup>-1</sup> při posuvu na otáčku  $f = 0,3-0,8$  mm a šířkou záběru ostří  $a_p = 3,5 - 8$  mm materiál s označením IC808 od firmy ISCAR.

Pro aplikační oblast K (tab. 7.21) dosahuje nejvyšší řezné rychlosti  $v_c = 250-500$  m.min<sup>-1</sup>, posuvem na otáčku  $f = 0,3-0,5$  mm a šířkou záběru  $a_p = 1,5 - 10$  mm materiál firmy ISCAR s označením IC5005.

Pro aplikační oblast N (tab. 7.22) dosahuje nejvyšší řezné rychlosti  $v_c = 80 - 2100$  m.min<sup>-1</sup> při posuvu na otáčku  $f = 0,15-0,18$  mm a šířkou záběru ostří  $a_p = 2,5$  mm materiál firmy ISCAR s označením IC520.

Pro aplikační oblast S (tab. 7.23) dosahuje nejvyšší řezné rychlosti  $v_c = 30 - 200$  m.min<sup>-1</sup> při posuvu na otáčku  $f = 0,3-1$  mm a šířkou záběru ostří  $a_p = 1 - 10$  mm materiál firmy ISCAR s označením IC807.

Pro aplikační oblast H (tab. 7.24) dosahuje nejvyšší řezné rychlosti  $v_c = 50 - 150$  m.min<sup>-1</sup> při posuvu na otáčku  $f = 0,1-0,6$  mm a šířkou záběru ostří  $a_p = 2,5$  mm materiál firmy ISCAR s označením IC900 a IC5005.

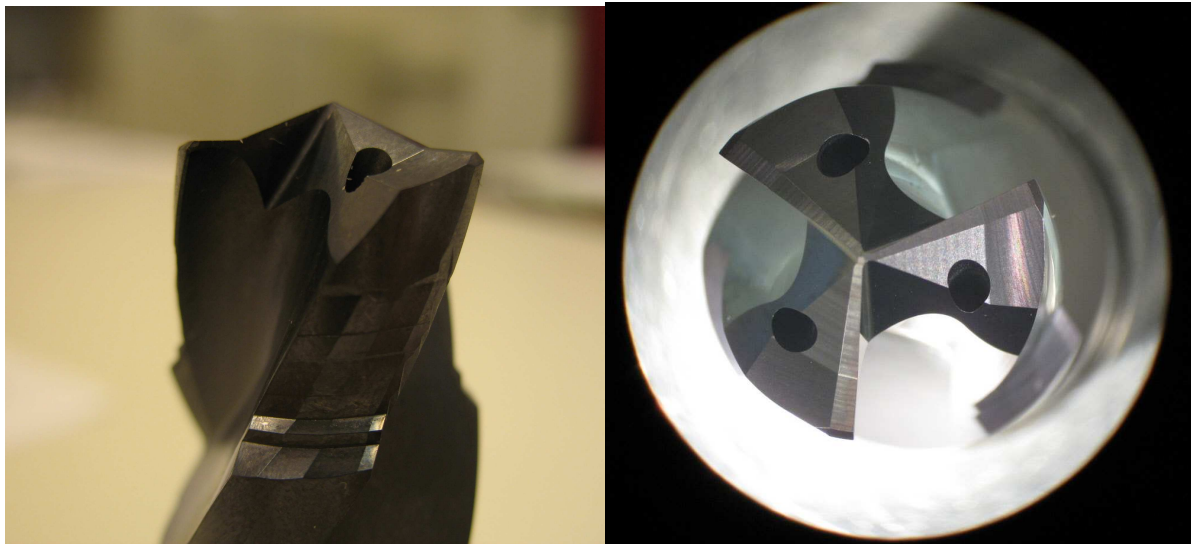
## 8 Analýza trvanlivosti řezného nástroje při změně povlaku

### 8.1 Popis problému

Na dílci se obrábí dno čelní axiální plochy, která má za úkol utěsnit dílec před únikem paliva. Protikusem je podložka, která se „zamáčkne“ do této těsnící plochy. Při obrábění je problematické dodržet předepsanou drsnost, čelní házení a rovinnost těsnící plochy. Tuto specifikaci je možné dodržet pouze za podmínky výměny nástroje před ukončením jeho plánované trvanlivosti. V praxi to způsobuje řadu problémů, především nebezpečí možné reklamace u zákazníka, snížení produktivity v důsledky častější výměny nástroje a v neposlední řadě zvýšené náklady na nástroje.

### 8.2 Popis nástroje

Jedná se tříbřitý pravotočivý dokončovací nástroj z monolitního slinutého karbidu (WC 90%, Co 10%, velikost zrna 0,5  $\mu\text{m}$ , tvrdost 1700 HV) s naneseným PVD povlakem z AlTiN. Nástroj je opatřen třemi chladicími kanálky (obr. 8.1).



Obr. 8.1 Testovaný nástroj

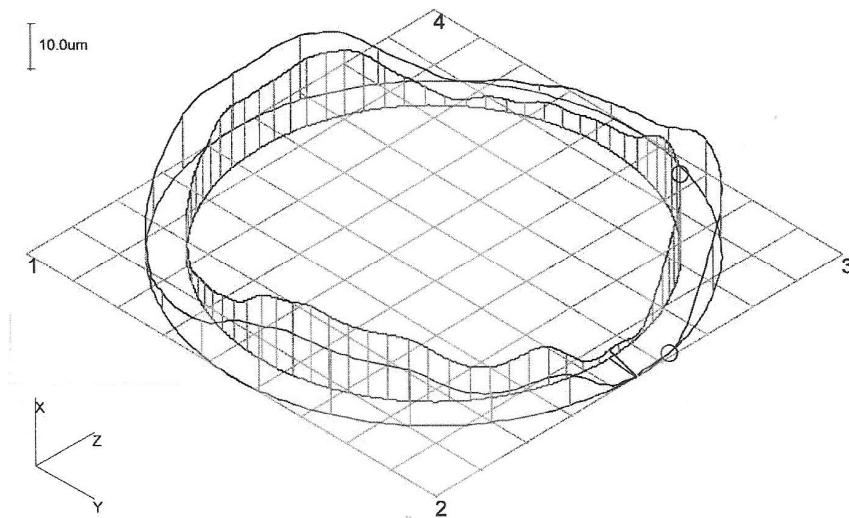
### 8.3 Obrobek

Obrobkem je válcovaná tyč o průměru 30 a 33 mm s délkou od 250 - 450 mm s vnitřním průměrem hlubokého vrtání o průměru 9 a 10 mm. Obrobený materiál je 20MnCrS5 (14 220) normalizačně žháný. Mechanické vlastnosti materiálu obrobku jsou uvedeny v tabulce 8.1 a problematická obráběná část dílce je na obr. 8.2 s vyznačenými vadami na 3D protokolu a fotografii (obr. 8.3 a obr. 8.4).

Tab. 8.1 Mechanické vlastnosti obráběného materiálu a jeho chemické složení

Ocel 14220 (20MnCrS5)						
Tvrdost [HB]	Tažnost A <sub>5</sub> [%]	Pevnost v tahu [MPa]	Obsah uhlíku [%]	Obsah manganu [%]	Obsah chromu [%]	Obsah síry [%]
280 - 330	12	900 - 1050	0,18 - 0,25	1,25 - 1,45	1,15 - 1,35	0,008 - 0,015

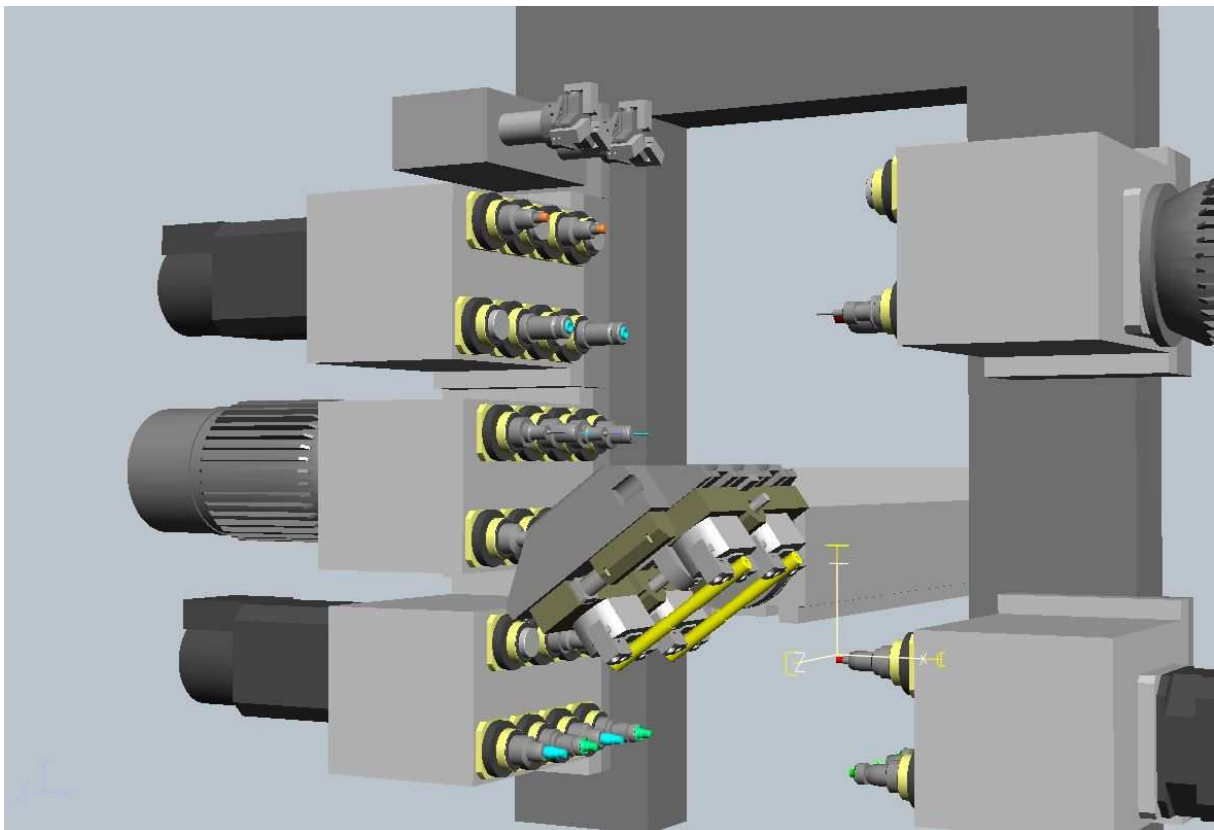




Obr. 8.4 Příklad 3D protokolu poškozeného sedla

## 8.4 Výrobní zařízení

Obrábění proběhlo na jednoúčelovém víceřetenovém CNC stroji. Model výrobního stroje s označením hlavních os pohledem od obsluhy je na obr. 8.5. Při této operaci probíhá obrábění dvou kusů polotovarů zároveň vždy samostatným nástrojem. Jako procesní kapalina byl použit minerální olej MULTICAT 10 k chlazení a mazání. Řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 8.2.



Obr. 8.5 Model výrobního zařízení



Tab.8.2 Řezné podmínky pro testované povlaky a jejich vlastnosti

Povlak	Řezné podmínky			Vlastnosti povlaku			
	Posuv f [mm.min <sup>-1</sup> ]	Otáčky [min <sup>-1</sup> ]	záběr ostří ap [mm]	Tvrdość [GPa]	max. teplota použití [°C]	koefficient tření	tloušťka povlaku [μm]
AlTiN	500	4600	0,3	33	850	0,7	4
nAlCo <sup>®</sup>	500	4600	0,3	45	1200	0,45	4

## 8.5 Návrh řešení

Nástroj se již v minulosti optimalizoval, co se týče geometrie. Tudíž není možné očekávat, že změnou geometrie dojde k zlepšení stávajícího stavu. Z důvodu udržení produktivity nelze předpokládat, že by došlo ke snížení řezné rychlosti. Navíc v minulost již pokusy o změnu (snížení) řezné rychlosti probíhaly a nevedly ke kýženému výsledku. Zdá se tedy, že jedinou cestou je buď změna materiálu řezného nástroje a nebo změna jeho povlaku. Změna povlaku se jeví jako jednodušší a levnější varianta.

Cílem testu tedy bylo prověřit, zda použitím jiného povlaku nelze docílit zvýšení trvanlivosti nástroje a ke splnění kvalitativních požadavků. Dále bylo nutné prověřit vhodnost povlaku i z ekonomického hlediska.

## 8.6 Popis testu

Test proběhl na standardním výrobním zařízení za neměnných řezných podmínek (tab.8.2). Nástroje byly upnuty vždy do stejných vřeten tak, aby byl co nejvíce eliminován vliv stroje. Povlaky byly nanášeny na standardní nové nástroje s proměřenou geometrií, aby byl eliminován vliv broušení po povlakování a vliv v rozdílnosti povlaků. Napovlakované byly dvě sady nástroje se stávajícím povlakem AlTiN a další dvě sady nástroje byly povlakovány nanokompozitním povlakem nAlCo<sup>®</sup> firmy Liss.

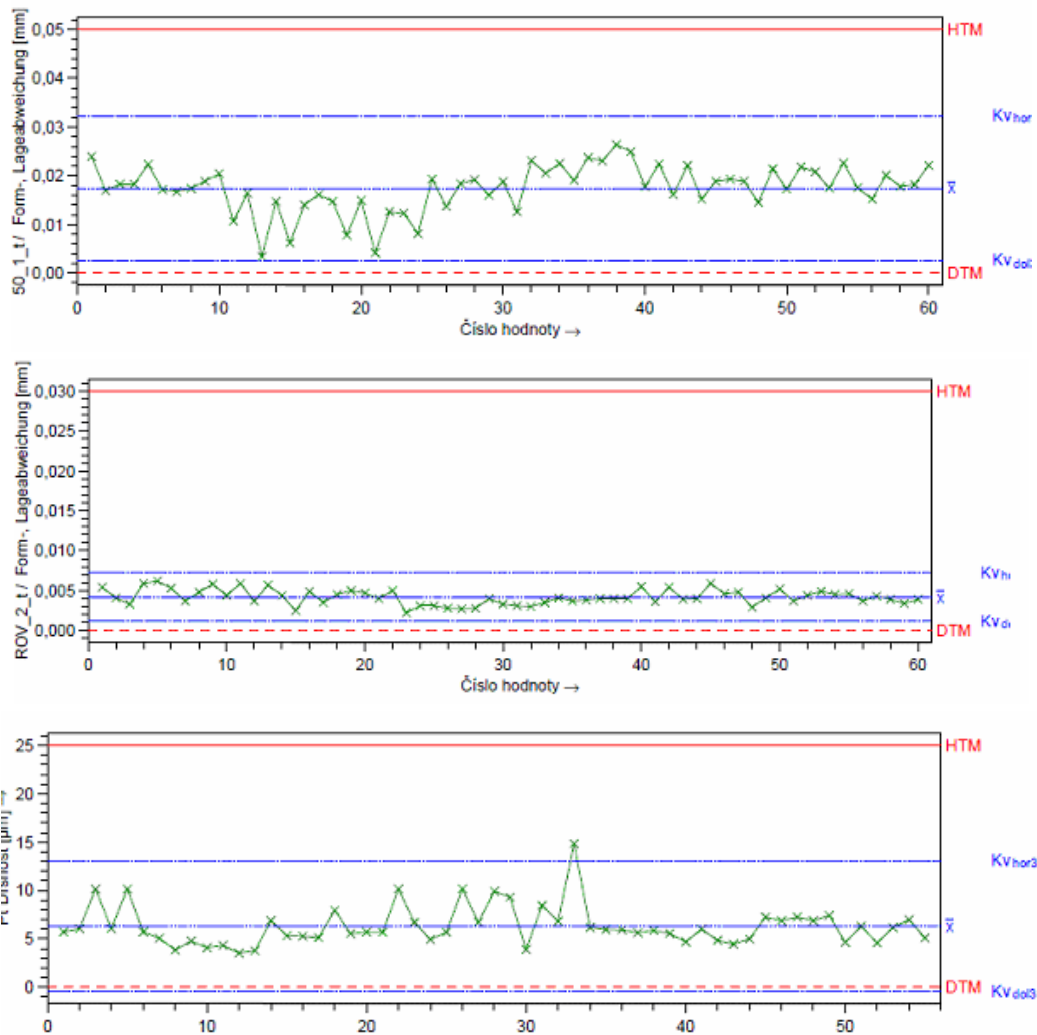
## 8.7 Výsledky testu

Vyhodnocena byla kvalita těsnícího otvoru a trvanlivost nástroje. V prvním případě byly na těsnící ploše měřeny parametry jako je drsnost povrchu (Pt), čelní házení a rovinnost plochy. Výsledky byly vyhodnoceny z měřených kusů při zvýšené četnosti měření, abychom zabránili případnému znehodnocení výrobku a aby měření mělo větší vypovídací hodnotu.

K vyhodnocení byl použit program Q-stat a byla vyhodnocena způsobilost procesu (Cp a Cpk). Výsledky jsou uvedeny na obr. 8.6. Dále byla provedena zkouška povlaku a to adhezní zkouška tzv. „Mercedes test“ (obr. 8.7), a zkouška tloušťky povlaku kalotest (obr. 8.8). Byla vyhodnocena pouze trvanlivost nástroje do prvního přebroušení z časových důvodů a z důvodu eliminace chyby při přebroušení nástroje, která se v průběhu praxe při obrábění této části obrobku projevila.

### 8.7.1 Průběh provozní zkoušky

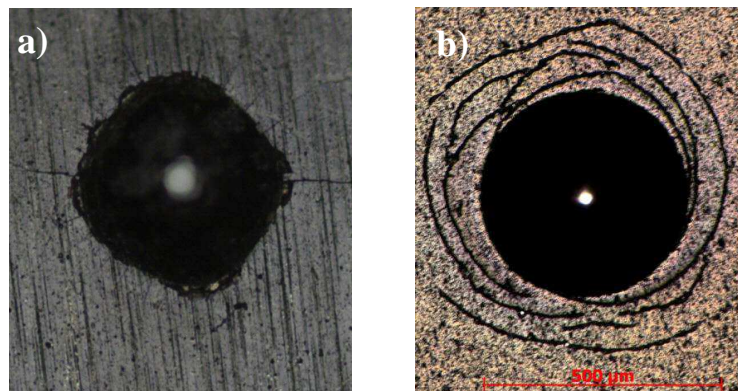
Měření probíhalo podle plánu v sériové výrobě. Snahou bylo, aby test proběhl bez přerušení a bez vlivu jednotlivých šarží vstupních materiálu, aby se co nejvíce eliminoval vliv druhu materiálu. Z důvodu pochybnosti, aby nebyl velký rozdíl mezi vstupním materiálem, byly sledovány výsledky vstupní kontroly a to především tvrdość materiálu. Tvrdość jednotlivých šarží se lišila a pohybovala v rozsahu 295 - 318 HB, což je ve specifikaci tohoto materiálu. Měření proběhlo na přístroje Marsurf a Prismo (Zeiss).



Obr. 8.6 Výsledky měření (nACO<sup>®</sup>); a) čelní házení Cpk = 2,19; b) rovinnost Cpk = 8,43; c) drsnost povrchu Cpk = 2,77; proces byl vyhodnocen jako schopný.

### 8.7.2 Mercedes test

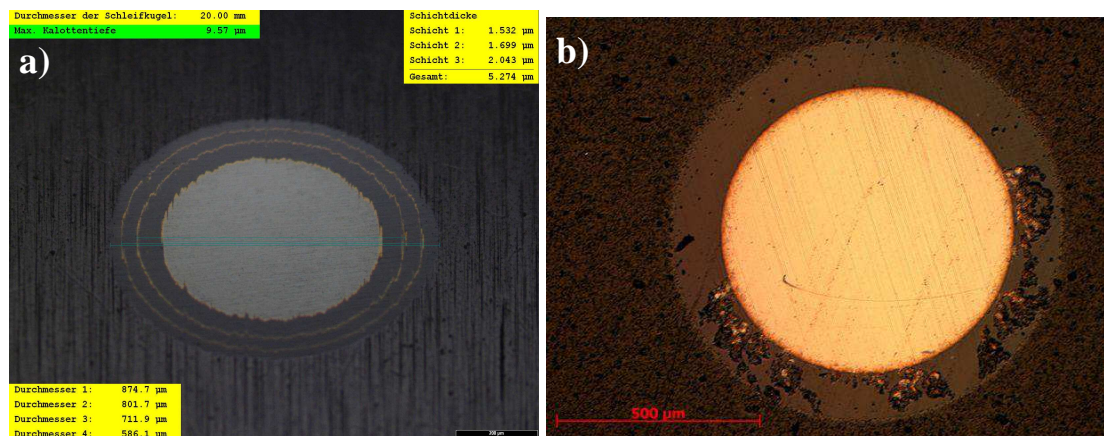
Jako testovací zařízení byl použit univerzální tvrdoměr Digi Testor 930 a metalografický mikroskop Zeiss Axio Imager. Jako vnikající těleso byl použit diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° se zatěžovací silou 1470 N.



Obr. 8.7 Mercedes test; a) AlTiN, kolem vpichu velmi nepatrné praskliny bez odloupení povlaku od substrátu; hodnoceno jako vyhovující A1/K1; b) nACO<sup>®</sup> - v okolí vpichu jsou spirálové trhliny, které odpovídají rozdílnému mechanismu šíření trhlín (vyhodnocení A1/K1)

### 8.7.3 Analýza tloušťky povlaku

Testovací zařízení kalotest; kulička o průměr 20 mm, otáčky  $500 \text{ min}^{-1}$ , čas 120 s, brusivo diamantová pasta ( $0,7 \text{ }\mu\text{m}$ ); metalografický mikroskop Zeiss Axio Imager; přesnost  $0,0005 \text{ mm}$ , zvětšení 16 - 506krát.



Obr. 8.8 Kalotest; a) AlTiN; vypočítaná tloušťka je  $5,274 \text{ }\mu\text{m}$  což odpovídá specifikaci; b) nACo<sup>®</sup>

### 8.7.4 Vyhodnocení testu

V průběhu testu se nevyskytly nežádoucí jevy ani žádné poruchy, které by ukončily celý test. Test v podstatě proběhl plynule s pozitivním výsledkem na trvanlivost nástroje s povlakem nACo<sup>®</sup>. Výsledky testu a ekonomické zhodnocení je názorně ukázáno v tab. 8.3.

Trvanlivost nástroje byla stanovena na 5000 obrobených kusů. Nástroj s povlakem AlTiN dosáhl průměrné trvanlivosti 3520 kusů při 5 kusech vyhodnocených jako nevyhovující. Trvanlivost nástroje s povlakem nACo<sup>®</sup> dosáhla 5000 kusů při 7 kusech označených jako nevyhovující. Procentuální podíl neshodných výrobků je přibližně stejný u obou povlaků. Eliminace chyb na povrchu těsnící plochy se sice nepodařila odstranit novým povlakem, ale zvýšila se trvanlivost nástroje při stávajících neshodných výrobcích.

I přes vyšší náklady na povlakování nástroje je zřejmé z tabulky 8.3, že nový nanokompozitní povlak nACo<sup>®</sup> je správnou cestou ke snížení nákladů na nástroje byť bez zlepšujícího výsledku na kvalitativní problém. Ovšem pro ověření těchto výsledků by bylo vhodné celý test zopakovat popř. provést i na vícero strojích. Za zvážení by stálo napovlakovat nástroj lubrikačním povlakem, který byl v minulých letech představen firma SHM Šumperk. Jedná se o lubrikační povlaky LUBRIC SI a LUBRIC G viz kapitola 4.6.

Tab. 8.3 Ekonomické zhodnocení testu

	Průměrná životnost nástroje (ks)	Cena povlaku (kč)	Cena nástroje (kč)	Cena nástroj/obrobek (kč/ks)	Úspora (%)
nACo <sup>3</sup>	5000	500	2800	0,66	22,35
AlTiN	3520	225	2800	0,85	

Za předpokladu potvrzení tohoto výsledku dalšími testy by při roční produkci 1 500 000 ks činila úspora na tento nástroj cca 285 000 Kč.

## Závěr

Neuvěřitelná snaha zvyšovat neustále produktivitu výroby nejen v obrábění vede k neustálému zdokonalování technologií. Nedílnou součástí technologie obrábění jsou nástroje, které hrají důležitou roli jak ekonomického směru tak kvalitativního směru. Snahou je najít správný kompromis mezi kvalitou a kvantitou produkce. Vysoké produktivity i kvality lze dosáhnout správně zvoleným nástrojem. Výzkum v oblasti řezných nástrojů - a především v oblasti povlakování řezných nástrojů, je velmi rozsáhlý a zabývá se jím mnoho vědeckých skupin po celém světě. Jelikož se nedá očekávat, že by se objevily převratné materiály s „kosmickými“ vlastnostmi, je věnována velká pozornost vývoji povlaků ze známých chemických prvků a sloučenin, a to především jejich modifikací.

Tato diplomová práce je zaměřena především na metody povlakování řezných nástrojů. Cílem práce je komplexní zpracování získaných technických poznatků a zejména vyhodnocení a porovnání pracovních podmínek (druh obráběného materiálu, řezné podmínky –  $v_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ), které vybraní výrobci doporučují pro efektivní soustružnické aplikace svých povlakovaných nástrojových materiálů.

Taktéž jsou v této práci uvedeny některé zajímavé novinky z „říše“ povlakování. Nejzajímavějšími povlakami, především co se týče jejich mechanických vlastností, se zdají být povlaky z kubického nitridu bóru. Prozatím se nedaří vytvořit povlak, který by se honosil vlastnostmi, jaké by odpovídali tomuto materiálu. Za zmínku stojí dva materiály, které nemají na světě dlouhého trvání, a to fullereny a nedávno objevený materiál grafen. Zřejmě až budoucnost ukáže, zda je jejich potenciál i v obráběcích aplikacích.

Pro srovnání jednotlivých řezných podmínek, které doporučují jednotlivé zahraniční i tuzemské firmy, byly použity nejnovější katalogy těmito firmami doporučené. Pro názornost byly vybrány česká firma Pramet, izraelská firma Iscar a švédská firma Sandvik. Pozornost těchto výrobců nástrojových materiálů začíná také směřovat do oblasti těžce obrobitelných materiálů jako jsou superslitiny, titanové slitiny, kompozitní materiály aj., které se čím dál více začínají používat v průmyslové sféře.

Na závěr této diplomové práce, byl proveden test a krátké ekonomické zhodnocení povlaků. Cílem tohoto testu bylo poukázat na skutečnost, že mnohé problémy v oblasti obrábění je možné řešit velmi jednoduchou změnou stávajícího povlaku za povlak jiný. Jak test ukázal, při změně povlaku AlTiN na povlak nAlCo<sup>®</sup> beze změny stávajícího materiálu nástroje došlo k výrazné úspoře nákladů na nástroje i když ke zlepšení kvalitativních problémů nedošlo.

## Seznam použité literatury

1. HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění 1. část* [online]. Studijní opory. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, 138s Dostupné na World Wide Web: <[http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/technologie\\_obrabeni\\_1.pdf](http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/technologie_obrabeni_1.pdf)>.
2. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha : MM publishing, s. r. o.,2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
3. HOLUBÁŘ, P., ZINDULKA, O., JÍLEK, M., JANKŮ, R. *Nový systém kluzných PVD povlaků MM Průmyslové spektrum*. Duben 2005 s. 2. ISSN 1212-2572.
4. ZINDULKA, O., JÍLEK, M. *Moderní metody povlakování*. 2004. [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.shm-cz.cz>.
5. KRÍŽ, A., *Povrchové inženýrství* 2008. [online]. [cit. 2012-04-04]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ateam.zcu.cz>.
6. ŠÍMA, M., MAIXNER, V., HOLUBÁŘ, P. *Aplikace nových modifikací třívrstvých PVD povlaků. MM Průmyslové spektrum*. Duben 2011 s. 2. [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.mmspectrum.com/110444>.
7. ŠÍMA, M., HOLUBÁŘ, P., JÍLEK, M., ZINDULKA O., *Vývoje a praktické aspekty povlakování řezných nástrojů technologií PVD* [online]. [cit. 2012-04-10]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.shm-cz.cz>.
8. KAVECKÝ, Š. *Moderné povlaky* [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupné na World Wide Web: [www.matdesign.sav.sk/data/long.../kavecky.pdf](http://www.matdesign.sav.sk/data/long.../kavecky.pdf).
9. LEDRAPPIER, F., HOUZE, L.,HEAU, C., GERSTENBERGER, J. *Tenké povlaky pro snížení ztrát třením: Tribologie povlaku typ DLC*. 2008. s. 9.
10. PODANÝ P., KRÍŽ, A. *Předdepoziční procesy při výrobě tenkých vrstev. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam – materiálový výzkum*. [online]. [cit. 6. května 2012]. Dostupné na World Wide Web:[http://www.ateam.zcu.cz/podany\\_metal06.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/podany_metal06.pdf).
11. PODANÝ P. *Studium vlivu předdepozičních procesů na vlastnosti progresivních tenkých vrstev. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam – materiálový výzkum*. [online]. [cit. 6. května 2012].Dostupné na World Wide Web:[http://www.ateam.zcu.cz/podany\\_metal06.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/podany_metal06.pdf).
12. Kříž, A. *Tenké vrstvy*. [online]. 2008. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ateam.zcu.cz>.
13. HOLUBÁŘ, P., ZINDULKA, O., JÍLEK, M. *Měření vlastností povlaků nanástrojích. MM Průmyslové spektrum*. Duben 2010, s. 36. ISSN 1212-2572.
14. HOŘEJŠ, S., FAJKUS, M., PRŮŠÁKOVÁ, L., BLÁHOVÁ, O., *PACVD povlakování nástrojů. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam – materiálový výzkum*. 2008. s. 25.
15. VALTER, J., *Naprašování + napařování vakuovým obloukem*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.hvm.cz>.
16. RŮŽIČKA, M., JÍLEK, M., ZINDULKA, O. *Drsnost vrstev připravovaných obloukovým napařováním*. [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.shm-cz.cz>.
17. SCHMIDT, Lukáš. et al. *Fyzika plazmatu* [online]. [cit. 6.května 2012]. Dostupné na World Wide Web: <http://atrey.karlin.mff.cuni.cz>.
18. STACH, V. *Úvod do fyziky plazmatu*. České Budějovice: Pedagogická fakulta,1987.
20. PLATIT AG, *Selzach, Switzerland. Platit PL 1001 Compact*. [online]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.platit.com/coatingequipment/platit-pl1001-compact>.
21. Oficiální web CemeCon. [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné na World Wide Web: [http://www.cemecon.de/company/history/index\\_eng.html](http://www.cemecon.de/company/history/index_eng.html).
22. ENGINEER LIVE. *Magnetron sputtering cathodes*. [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné na Word Wide Web: [http://www.engineerlive.com/Design-Engineer/Materials\\_Processes/Magnetron\\_sputtering\\_cathodes/18921/](http://www.engineerlive.com/Design-Engineer/Materials_Processes/Magnetron_sputtering_cathodes/18921/).

23. DE BEERS INDUSTRIAL DIAMONDS, *Inc. PCBN Cutting Tool Materials*. [online]. [cit. 2012-03-13]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.debid.ie>.
24. CHIN-MIN SUNG, J., MONTEITH, B., SUNG, M. *Amorphous Diamond Elektron Emitter. Advanced Diamond Solution. 2005* [online]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.advanceddiamond.com/AmorphDiamonds.pdf>.
25. IONBOND – *Cutting Tools*. [online] [cit. 2012-05-12]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ionbond.com/dynasite.cfm?dsmid=84846>.
26. DAĐOUREK, K. *Vybrané technologie povrchových úprav*. Technická Univerzita Liberec. Skripta. 2006. s.120.
27. SUN, Y.D., YAN, J.Y., ZHANG, S., XUE, F.Y., LIU, G.Q., LI, D.J., E. Fabrication and tribological properties of titanium nitride coatings incorporating solid lubricant microreservoirs. *Surface & Coatings Technology*. 202/2008. s.2023 - 2032. ISSN 0257-8972.
28. GARCIA, J., PITONAK, R. The role of cemented carbide functionally graded outer-layers on the wear performance of coated cutting tools. *Surface & Coatings Technology*. 202/2011, s. 8. ISSN 0257-8972.
29. WENPING, J., MALSCHE, A.P., GOFORTH, R.C. Cubic Boron Nitride (cBN) based nanocomposite coatings on cutting inserts with chip breakers for hard turning applications. *Surface & Coatings Technology*. 2005. s. 6. ISSN 0257-8972.
30. GULERYUZ, C. G., KRZANOWSKI, J. E. Mechanisms of self-lubrication in patterned TiN coatings containing solid lubricant microreservoirs. *Surface & Coatings Technology*. 202/2008, s. 2023 - 2032. ISSN 0257-8972.
31. ZIMMERMAN, J. H., GULERYUZ, C. G., KRZANOWSKI, J. E. Fabrication and tribological properties of titanium nitride coatings incorporating solid lubricant microreservoirs. *Surface & Coatings Technology*. 202/2008, s. 2023 - 2032. ISSN 0257-8972.
32. PLATIT AG. *Grenchen, Switzerland. Coating Guide 2006*. [online]. [cit. 2012-07-12]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.platit.com/download/CoatingGuide2006.pdf>.
33. MUSIL, J. VYSKOČIL, J. *Tenké vrstvy nitridu titanu*, ACADEMIA Praha 1989. s. 181.
34. VALTER, J. *Plazmové povlakování* [online]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.strojarstvo.sk/inc/index.php?ln=SK&tl=3&tpl=archiv.php&ids=2&cislo=9/2000&idclan=70>.
35. ISCAR. *New products catalog*. [online]. [cit.2012-04-23]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.iscar.com/Catalogs/Catalogs.asp/CountryID/1/MenuItemID2/329/CataloCat/573>.
36. ISCAR ČR s.r.o., *Nástroje pro obrábění kovů* [online]. [cit. 2012-04-26]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.iscar.cz/>.
37. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění – Kniha pro praxi*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
38. SANDVIK AB. *Sandviken, Sweden, All about Cemented Carbide* [online]. 2008 [cit. 2012-05-26]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.allaboutcementedcarbide.com>.
39. SANDVIK AB. *Sandviken, Sweden. Catalogue supplement 10.1*. [online]. [cit. 2012-04-12]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.sandvik.coromant.com/sandvik/3300/Coromant/Internet/SE03570.NSF>.
40. SANDVIK AB. *Sandviken, Sweden. Main Catalogue 2012*. [online]. [cit. 2012-01-26]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.sandvik.coromant.com/sandvik/3300/Coromant/Internet/SE03570.NSF>.
41. SANDVIK AB. *Sandviken, Sweden. Steel turning star*. [online]. [cit. 2012-01-26]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.sandvik.coromant.com/sandvik/3300/Coromant/Internet/SE03570.NSF>.

44. SANDVIK AB. *Sandviken, Sweden. Technical guide 2010*. [online]. [cit. 2012-01-26]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.sandvik.coromant.com/sandvik/3300/Coromant/Internet/SE03570.NSF>>.
45. CHONG, Y. M., ZHANG, W. J., YANG, Y., YE, Q., BELLO, LEE, S. T. Deposition of cubic boron nitride films on diamond-coated WC:Co inserts. *Diamond and Related Materials*. 18/2009, s. 1387 - 1392. ISSN 0925-9635.
46. 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
47. CEMECON AG, Würselen, Germany, *DLC coating* [online]. 2010 [cit. 2012-03-02]. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.cemecon.de/e4375/e4897/e5017/e5141/e5375/e5384/e5390/2007-03-22\\_153808\\_cr\\_cr\\_ge.jpg](http://www.cemecon.de/e4375/e4897/e5017/e5141/e5375/e5384/e5390/2007-03-22_153808_cr_cr_ge.jpg)>.
48. CERATIZIT S. A., Mamer, Luxemburg. Main Catalogue. [online]. [cit. 2012-05-26]. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.ceratizit.com/4170\\_DEA\\_HTML.php](http://www.ceratizit.com/4170_DEA_HTML.php)>.
49. PRAMET TOOLS S. R. O., Šumperk, Česká Republika. Frézování 2012. [online]. [cit. 2012-05-12]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.pramet.com/indexc1b6.html?menu=down1>>.
50. PRAMET TOOLS S. R. O., Šumperk, Česká Republika. Soustružení 2012. [online]. [cit. 26. března 2012]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.pramet.com/indexc1b6.html?menu=down1>>.
51. TUNA, JAROSLAV. *Plazmové nanášení tenkých vrstev za atmosférických podmínek*. Bakalářská práce v oboru „Materiálové inženýrství“. Liberec: TUL-FS. Katedra Materiálu. 2009. 63 s.
52. LIMB, S.J., LAU, K.S., GLEASON, E. *Preparation of asymmetric membranes using Hot-Filament CVD* [online]. 2004 [cit. 2012-02-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?WO=2004041397&IA=WO2004041397&DISPLAY=DESC>>.
53. MAY, P.W. *Diamond thin films: a 21st-century material* [online]. School of Chemistry, University of Bristol, 2000 [cit. 2012-02-19], 23 s. Dostupný z World Wide Web: <<http://www.chm.bris.ac.uk/pt/diamond/pdf/rscreview.pdf>>.
54. NĚMEC, KAREL. *Nástrojové oceli* [online]. Dostupné z World Wide Web: <[ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/3SV/04C-3SV.ppt](http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/3SV/04C-3SV.ppt)>.
55. KLOCKER, F. *Cutting materials, tools and coolants for machining with geometrically defined cutting edges- part 2*. [online]. [cit. 4. února 2010]. Fraunhofer, Institut produktionsstechnologie, Dostupné na World Wide Web: <[http://www.wzl.rwthachen.de/en/99bb29b71821808dc1256f33004f81ce/mti\\_105.pdf](http://www.wzl.rwthachen.de/en/99bb29b71821808dc1256f33004f81ce/mti_105.pdf)>.
56. MIKULA, MARIÁN. *Moderné tvrdé a supertvrde vrstvy pripravené PVD metódami*. Slovenská akadémia vied. Ústav materiálov a mechaniky strojov.
57. STEIN, CH. KEUNECKE, M. BEWILOGUA, K. CHUDOBA, T. Cubic boron nitride based coating systems with different interlayers for cutting inserts. *Surface & Coatings Technology*. 202/2011, s. 4. ISSN 0257-8972.
58. HARISH, C. BARSHILIA, B. DEEPHI, G. SRINIVAS, K.S. RAJAM. Sputter deposited low-friction and tough nanocomposite coatings on plasma nitrided M2 steel. *Surface & Coatings Technology*. 2011, s.8. ISSN 0257-8972.
59. *Diamanty už nejsou nejtvrděší*. Svět vědy 11/2005 [online]. Dostupné z World Wide Web: <[http://www.oknavesmiru.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=137&Itemid=57](http://www.oknavesmiru.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=137&Itemid=57)>.
60. DR. ZBIGNIEW POSTAWA. *Sims*. Jagelonská universita, Krakow. [online]. [cit. 2012-05-12]. Dostupné z World Wide Web: <<http://users.uj.edu.pl/~ufpostaw/>>.

## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Popis
AACVD	Chemické nanášení povlaků za asistence aerosolu
ACNR	Agregované uhlíkového nanoklastry (fulereny)
AFM	Mikroskopie atomárních sil
ALCVD	Epitaxe atomových vrstev
CACVD	Chemické nanášení povlaků s lavinovým plazmatickým výbojem
CBN	Kubický nitrid boru
Cpk	Ukazatel dlouhodobé způsobilosti
CVD	Chemické nanášení povlaků
CVI	Chemická nanášení infiltrací
DBD	Dielektrický bariérový výboj
DLC	Diamantu podobný uhlík
ESC	Elektrostatické nanášení povlaků
GD-OES	Optická emisní spektroskopie na základě doutnavého výboje
HFCVD	Chemické nanášení povlaků se žhavicím vláknem
HM	Slinutý karbid
HSS	Rychlořezné oceli
IBAD	Naprašování iontovým paprskem
LICVD	Laserem indukované chemické nanášení povlaků
LPCVD	Nízkotlaké chemické nanášení povlaků
MTCVD	Chemické nanášení povlaků za středních teplot
MOCVD	Chemické nanášení povlaků organokovovými prekurzory
MWPCVD	Mikrovlnné plazmatické chemické nanášení povlaků
PACVD	Plazmaticky aktivované chemické nanášení povlaků
PECVD	Plazmaticky aktivované chemické nanášení povlaků
PKD	Polykrystalický diamant
PVD	Fyzikální nanášení povlaků
RFD	Radiofrekvenční naprašování
SK	Slinutý karbid
TEM	Transmitní elektronová mikroskopie
Fcc	Kubická mřížka
XRD	Rentgenová difrakce



## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
$C_T$	[-]	Konstanta
$C_v$	[-]	Konstanta
$C_{vT}$	[-]	Konstanta
$k$	[-]	Konstanta – relativní řezivost
HV	[GPa]	Tvrдость podle Vickerse
HB	[HB]	Tvrдость podle Brinela
KT	[mm]	Hloubka výmolu na čele
$KV_y$	[mm]	Radiální opotřebení špičky
Ra	[ $\mu\text{m}$ ]	Drsnost
T	[min]	Trvanlivost
$a_p$	[mm]	Šířka záběru ostří
f	[mm]	Posuv na otáčku
m	[-]	Exponent
VB	[mm]	Šířka fazetky opotřebení
$V_c$	[ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	Řezná rychlost
$V_{cT}$	[ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	Řezná rychlost při konstantní trvanlivosti
$V_{TE}, V_T$	[ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	Řezná rychlost