

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TESTOVÁNÍ ŘEZIVOSTI NÁSTROJŮ ZE SLINUTÝCH KARBIDŮ POVLAKOVANÝCH PVD NANOKRYSTA- LICKÝMI KOMPOZITY

CUTTING PERFORMANCE OF CEMENTED CARBIDE TOOLS WITH NANO-CRYSTALLINE PVD
COATINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. PAVEL HUDEČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. MIROSLAV PÍŠKA, CSC.

BRNO 2009

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou rozboru vlastností tvrdých a otěruvzdorných povlaků nanesených PVD technologií. Je zaměřena především na přípravu, provedení a vyhodnocení testovaných povlaků na čelních kulových frézách.

Klíčová slova

vlastnosti povlaků, testování, analýza, trvanlivost, čelní kulová fréza

ABSTRACT

This thesis deals with the analysis of properties of hard coatings and wear resistance PVD coated technology. It focuses on the preparation, execution and evaluation of test coatings on the front ball milling cutter.

Key words

properties of coatings, testing, analysis, frontal spherical milling cutter, durability

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HUDEČEK, P. *Testování řezivosti nástrojů ze slinutých karbidů povlakovaných PVD nanokrystalickými kompozity*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Testování řezivosti nástrojů ze slinutých karbidů povlakovaných PVD nanokrystalickými kompozity vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Podpis diplomanta

.....
Pavel Hudeček

Poděkování

Děkuji tímto panu doc. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

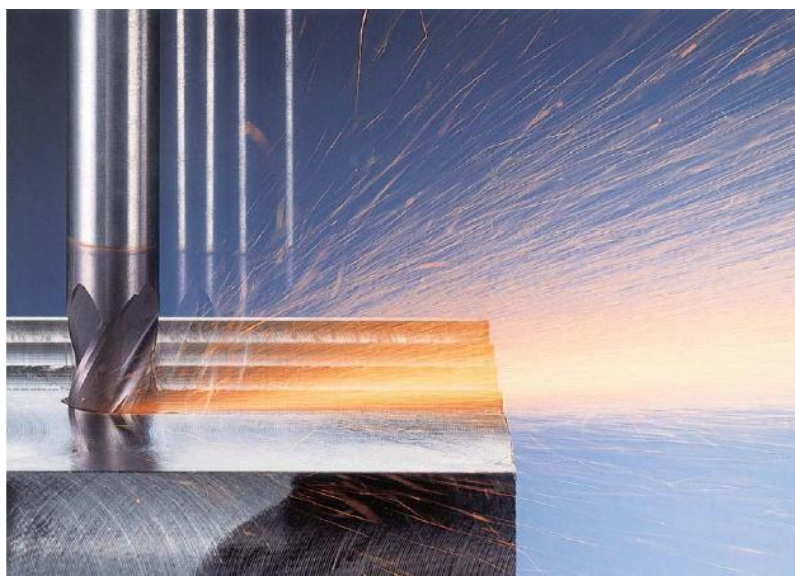
Abstrakt	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah	7
ÚVOD	9
1 Vývoj vakuové techniky, elektřiny a magnetismu	10
1.1 Vakuová technika, plazma a povlakování	10
1.2 Elektřina a magnetismus	11
2 Metody povlakování	12
2.1 Metoda CVD	13
2.2 Metoda PVD	14
3 Typy vrstev a složení	15
3.1 Strukturované vrstvy	16
3.2 Multivrstvy	17
3.3 Gradientní vrstvy	18
3.4 Nanostrukturované vrstvy	19
3.5 Nanokompozitní vrstvy	20
3.6 Struktura slinutého karbidu	22
4 Druhy vrstev a jejich vlastnosti	23
4.1 Vrstvy TiN, TiCN, TiAlN a TiAlCN	23
4.1.1 Vrstva TiN	23
4.1.2 Vrstva TiCN	23
4.1.3 Vrstva TiAlN	24
4.1.4 Vrstva AlTiCN	25
4.2 Difuzní mechanismy při oxidaci vrstev TiAlN	26
4.3 Nanokompozitní struktura nc- (Ti _{1-x} Al _x)/a-Si ₃ N ₄	27
4.4 Nanokompozitní vrstva na bázi Al-Cr-Si-N	29
4.4.1 Složení a struktura	32
4.4.2 Chrom místo Titanu	33
4.4.3 Aplikace	34
4.4.4 Tepelná stabilita	34
4.5 Kluzné vrstvy	35
4.5.1 Kluzné vrstvy na bázi oxidů a uhlíku	35
4.5.2 Popis a vlastnosti vrstvy	35
4.6 Univerzální vrstva?	39
4.7 Vlastnosti vybraných vrstev	39
5 Vlastnosti povlaků na nástrojích a jejich měření	44
5.1 Tvrdost	44
5.2 Tloušťka	45
5.3 Drsnost	46
5.3.1 Drsnost vrstev a řezné zkoušky	47
5.4 Adheze	47
5.5 Kluzné vlastnosti	48
5.6 Odolnost vůči oxidaci	48
5.7 Chemická stabilita	49

5.8	Tepelná stabilita.....	49
6	Technologie úprav nástrojů.....	50
6.1	Příprava nástrojů před a po povlakování	50
6.2	Výběr materiálu.....	50
6.3	Broušení nástroje.....	50
6.4	Úpravy nástrojů před povlakováním	51
6.4.1	Omílání v granulátech.....	51
6.4.2	Odmaštění	52
6.4.3	Mokrý čištění	52
6.4.4	Pískování	52
6.4.5	Odjehlení	52
6.4.6	Stripping	52
6.5	Čištění nástrojů v průběhu PVD procesů.....	53
6.6	Leštění po povlakování	53
7	Geometrie nástroje	54
8	Ekonomický pohled.....	55
8.1	Faktory ovlivňující proces obrábění	56
9	Analýza řezivosti povlakovaných celokarbi- dových fréz	57
9.1	Úvod	57
9.2	Cíl zkoušek	60
9.3	Obecný popis testů, metodiky měření a analýzy měřených hodnot.....	60
9.3.1	Materiál obrobku	60
9.3.2	Upnutí řezných nástrojů.....	61
9.3.3	Obráběcí stroj	61
9.3.4	Řezné podmínky	61
9.3.5	Způsob snímání zatížení nástroje, metodika měření a analýza naměřených hodnot	62
9.4	Dosažené výsledky	62
9.4.1	Předběžné testy	62
9.4.2	Vlastní srovnávací testy	63
9.5	Závěr	68
10	Seznam použitých zdrojů.....	69
11	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	72

ÚVOD

Moderní povlakovací metody se staly důležitou součástí průmyslové praxe. Pro některé materiály a operace je použití otěruvzdorných a tvrdých povlaků absolutní nezbytností, pro ostatní jsou klíčem k větší efektivnosti a produktivitě.

Díky povlakování se zlepšily vlastnosti řezných nástrojů a výměnných břitových destiček. Jejich důležitou funkcí je snížení tření, čímž je nižší tepelné zatížení nástroje a to se projeví ve zvýšení trvanlivosti. Řezivost nástroje je závislá také na volbě vhodného substrátu břitové destičky, typu povlaku a jeho tloušťce.



Frézování ¹⁷

Zaměření vývoje přípravy PVD povlaků se v posledních letech z hlediska aplikací mění stejně rychle, jako se mění požadavky na nové aplikace. Pro ně je třeba nějakým způsobem optimalizovat „tradiční“ PVD povlaky. „Z hlediska samotných principů PVD technologií a sortimentu materiálů a struktury PVD povlaků už změny nejsou tak zásadní. To neznamena, že není pokrok, ale spíše to znamená, že struktury a materiálová složení jsou ve značném náskoku.“¹⁸ A to zejména především nanokompozitních povlaků na bázi $\text{nc}-(\text{Ti}_x\text{Al}_{1-x})\text{N}/\text{a-Si}_3\text{N}_4$ resp. $\text{nc}-(\text{Cr}_x\text{Al}_{1-x})\text{N}/\text{a-Si}_3\text{N}_4$ resp. $\text{nc-TiN}/\text{a-Si}_3\text{N}_4$. Nově se rozvíjí především kombinace těchto velmi tvrdých vrstev s kluznými a jinak funkčními vrstvami a dochází k obecnému rozšíření přípravy a aplikací nanokompozitních vrstev.

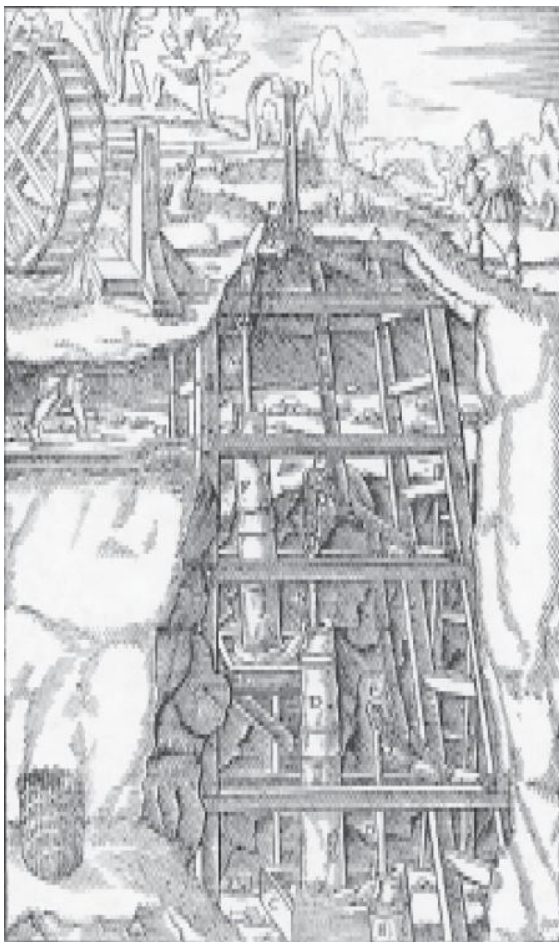
Velmi dramaticky se rozvíjí mechanické úpravy substrátů před a po povlakování, které mohou přinést velmi výrazné zvýšení užitečných vlastností povlakovaných substrátů.

1 VÝVOJ VAKUOVÉ TECHNIKY, ELEKTŘINY A MAGNETISMU

Historie PVD (Physical Vapor Deposition) je úzce spojena s vývojem vakuové techniky, magnetismu a také plynné chemie.

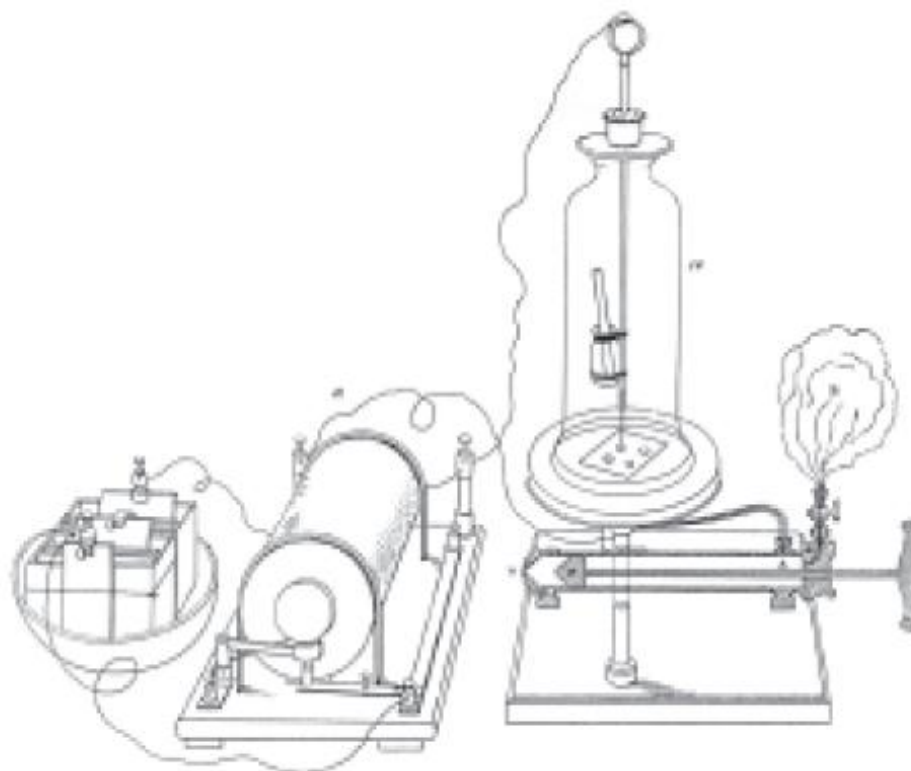
1.1 Vakuová technika, plazma a povlakování

První pístový typ vakuové pumpy (vývěvy) vynalezl **Otto van Guericke** na čerpání vody z dolů v roce 1640. Nicméně první osoba, která byla schopna použít vakuovou pumpu k vytvoření plazmy ve „výbojce“, (vakuová trubice) byl **M. Faraday** v roce 1838, který použil mosazné elektrody a vakuum.



Obr. 1.1 Vodní pumpa na odčerpávání vody z dolu ²³

V roce 1852 **W. R. Grove** byl prvním, který přišel na děj, co se stalo známým jako "povlakování", zatímco studoval účinky doutnavého výboje. Grove použil tip drátu jako povlakovací zdroj pro povlakování na vysoce leštěný stříbrný povrch. Stříbrný povrch jako anodu a drát jako katodu v elektrickém okruhu. Jeho depozice měla kruhovou strukturu, avšak on nestudoval vlastnosti povlaku, ale spíše ho zajímal efekt napětí výboje. V roce 1854 M. Faraday taktéž oznámil nanesení filmu pomocí naprašování v trubici doutnavého výboje. V 1858 Julius Plucker zaznamenal vytváření platinového filmu uvnitř výbojové trubice, vytvořil „krásné metalické zrcadlo“,



Obr 1.2 Groveův „povlakovací„ přístroj (1852) ²³

V roce 1877 prof. **A. W. Wright** z Yale University zveřejnil dokument v American Journal of Science and Arts na použití "elektrického depozičního přístroje", jež použil k vytvoření zrcadla a ke zkoumání jejich vlastností. Tady existuje spor, jestli použil naprašování nebo plynný hoření oblouku.

Tato forma povlakování může být založena spíše na obloukovém napařování (evaporation) než naprašování (sputtering) jak US patentový úřad citoval jeho práci, když soutěžil s **T. Edisonovým** patentem (udělen 1894). Edisonův patent aplikovaný pro vakuové povlakovací zařízení sloužící pro povlakování válcového fonografu (gramofon) před následným galvanickým (elektronickým) pokovením. Edison úspěšně argumentoval tím, že jeho vynález byl nepřetržitý oblouk, zatímco Wrightův proces byl impulsový oblouk. Edison by tedy mohl být prohlášen za prvního člověka, který komerčně využil povlakování. Avšak prof. Wright charakterizoval vakuové povlakování vrstev pro jejich činitele odrazu a barvu.

1.2 *Elektrina a magnetismus*

Ke konci 30. let 20. století **F. M. Penning** vyvinul "elektronovou past", tj. omezit elektrony blízko povrchu pomocí kombinace elektrických a magnetických polí. Tato kombinace elektrických a magnetických polí zvýšila ionizaci plazmatu blízko povrchu, tento děj byl pojmenován jako Penningův jev (výboj). Penning použil svůj vynález k naprášení z vnitřku válce. To byl důležitý vývoj v historii povlakování.

2 METODY POVLAKOVÁNÍ

Na slinuté karbidy se nanáší tenké vrstvy materiálu s vlastnostmi jako je tvrdost, odolnost proti opotřebení. Tyto vrstvy neobsahují pojivo, mají velmi jemnou zrnitost a menší počet strukturních defektů. Také zabraňují k difuznímu mechanickému opotřebení nástroje.

V 70. letech bylo první CVD (chemical vapor deposition) povlakování aplikované na nástroj, které byly založeny na bázi Ti. V 80. letech se objevuje PVD (Physical Vapour Deposition) a to na bázi TiN.

1970	CVD TiC
1975	CVD TiC / TiCN / TiN
1980	CVD TiC / Al ₂ O ₃ / TiN CVD TiC / Al ₂ O ₃ / TiN ...
1985	MTCVD TiCN PVD TiN
1990	PVD TiCN PVD TiAlN
1995	Diamond PVD TiN / TiAlN / TiN / TiAlN

Obr. 2.1 Historie povrchových vrstev

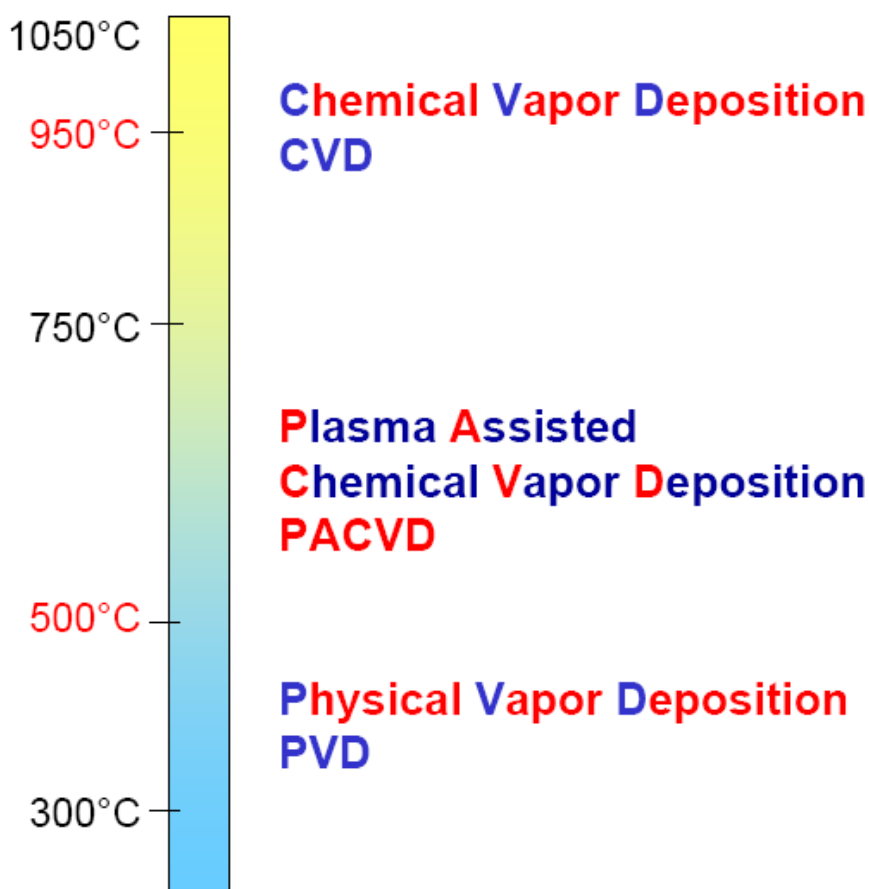
Metody povlakování se dělí do dvou skupin a to:

CVD - Chemical Vapour Deposition

PVD - Physical Vapour Deposition

Metoda CVD (chemické napařování z plynné fáze) je nejpoužívanější pro přípravu vrstev za vysokých teplot nad 900° C na nástroje ze slinutého karbidu a zahrnuje povlaky obvykle na bázi TiN, TiCN a Al₂O₃ a diamantu.

Metody PVD (fyzikální napařování) byly vyvinuty především pro účely povlakování ocelových nástrojů, ale také i ze slinutých karbidů za nízkých teplot (200 – 400 °C) - nejužívanější typy vrstev jsou TiN, TiCN, CrN, ZrN a v současné době nejúspěšnější vrstvy na bázi TiAlN.

Obr. 2.2 Základní depoziční procesy³

2.1 Metoda CVD

Tato technika využívá pro nanášení směs chemicky reaktivních plynů (např. TiCl_3 , CH_4 , AlCl_4 , apod.) při poměrně vysoké teplotě 900-1000 °C, což omezuje výběr materiálů, které mohou být nanášeny a mohou vést k narušení složky. Tloušťka je omezena na cca 10 μm vzhledem k tepelné roztažnosti vedoucí k napětí, které se vytváří při chlazení a také omezuje povlakování ostří nástroje. PVD technologie jsou založeny na fyzikálních principech, odpaření nebo odprášení pevných materiálů (Ti, Al, Si, Cr, Zr, atd.), ionizaci a jejich následné nanesení na nástroje při teplotách nižších než 600 °C.

Jedná se o chemický proces povlakování, který je založen na reakci plyných chemických sloučenin v plazmě, zapuštěny do reakční komory do těsné blízkosti substrátů tak, aby reagovaly a tvořily pevný povlak na povrchu těchto substrátů.

U vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu je tato technika významně zastoupena. Jinak je jejich použití v této oblasti omezeno právě vysokou teplotou depozice, která negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti povlakovaných substrátů.

Výhody

- vysoké tvrdosti povlaku
- dobrá přilnavost (není-li povlak příliš silný)
- dobrý nanášecí výkon (tj. rovnoměrnost povlaku)

Nevýhody

- vysoké teploty procesu (deformace)
- povlakování ostří je obtížné (tepelná roztažnost vedoucí k napětí)
- omezený výběr materiálů, které mohou být použity pro povlakování
- ekologie

2.2 Metoda PVD

V principu je PVD nanášení čistých kovů pomocí tepelného odpařování známo několik desítek let, avšak pro přípravu povlaků pro nástroje je to podstatně kratší doba. V jednoduchém rozdělení existují dvě technologie a to je magnetronové odprašování a odpařování, buď pomocí nízkonapěťového oblouku, nebo laserem.

Zařízení používané pro techniku PVD povlakování je neustále vylepšován a upravován tak, aby se zlepšila "kvalita" a "typ" nanesených vrstev. Hybridní techniky byly a jsou stále vyvíjeny, obvykle použitím způsobu jakým se krycí materiál převádí do substrátu anebo zvýšením ionizace reaktančních plynů.

Ve všech metodách povlakování, se substrát zahřívá na teplotu 200 – 400 °C, aby zajistily dostatečnou přilnavost uložených atomů. Jedná se o zařízení umožňující udržovat konstantní teplotu, jejíž výše je závislá na druhu povlaku a druhu povlakovaného materiálu.

Tlak uvnitř reakční komory je přesně kontrolován v rozmezí 0,1 - 1Pa a je složena ze směsi reaktantu plynu, např. dusíku, metan nebo etan a diletant (pomocný plyn) např. argon. Při povlakování titanem je k dosažení vrstvy o složení TiN použit reaktivní plyn N₂ a pomocný plyn argon. V případě všech reakcí plyn / kov na povrchu substrátu, částečný tlak vybraného reaktantu plynu určuje poměr jednotlivých atomů. Míra povlakování je zpravidla v rozmezí od 1 do 10 μm/h. Vytvořená směs plynu způsobuje vylučování na povrchu zpracovávaného materiálu a dochází k tvorbě povlaku. Je možné nanést vrstvy TiN, Ti(CN) a (TiAl)N atd. Posledně jmenovaný materiál vyžaduje speciální materiál složený v potřebném poměru titanu a hliníku.

Výhody

- výborná kontrola při procesu
- nízké teploty depozice
- husté, přilnavé nátěry
- širší výběr materiálů

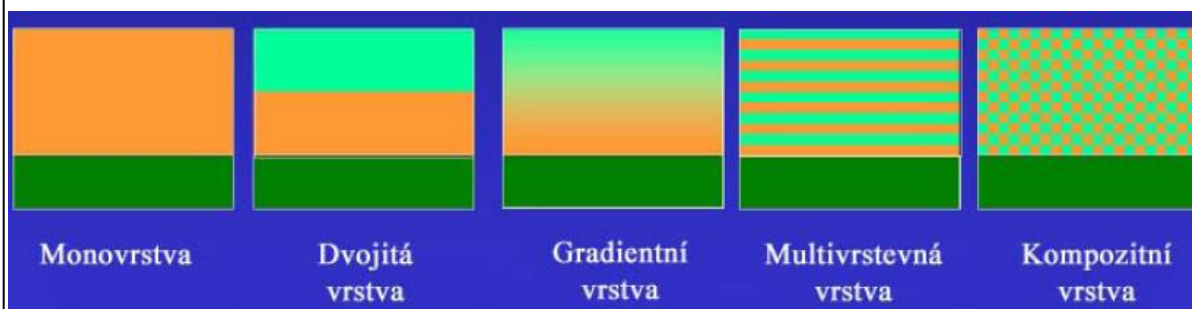
Nevýhody

- finanční náročnost (vakuové procesy)
- relativně nízká míra povlaku

Podrobnější popis těchto povlakovacích technik viz literatura (60)

3 TYPY VRSTEV A SLOŽENÍ

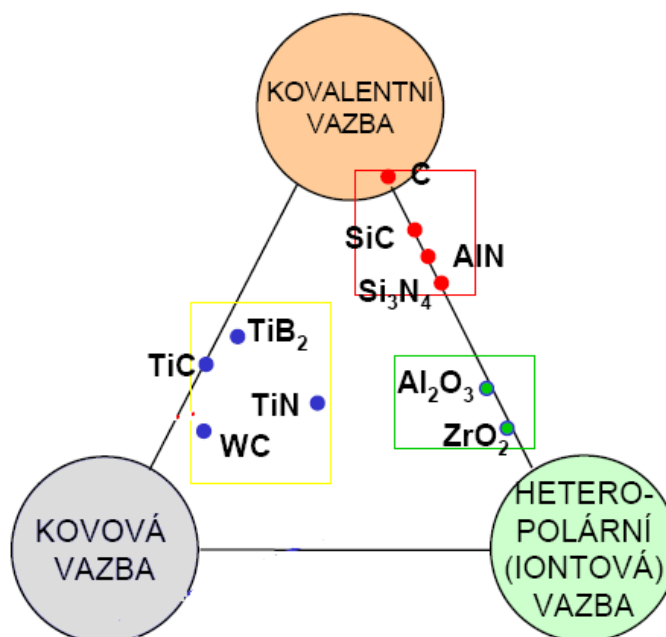
- Monovrstva
- Monovrstva s „adhezní“ vrstvičkou
- Multivrstva (sendvičová) vrstva
- Gradientní vrstva
- Nanostrukturovaná vrstva
- Nanokompozitní vrstva



Obr 3.1 Obecné druhy vrstev ¹⁵

Tenké vrstvy se často liší vlastnostmi, ale i svými vazbami k objemovým materiálům. Následkem nerovnovážných depozičních procesů vznikají metastabilní fáze.

Příkladem je vrstva **TiN**, která má jistý stupeň **kovové vazby**, přičemž **objemový materiál** se vyznačuje vysokým stupněm **iontové vazby**.



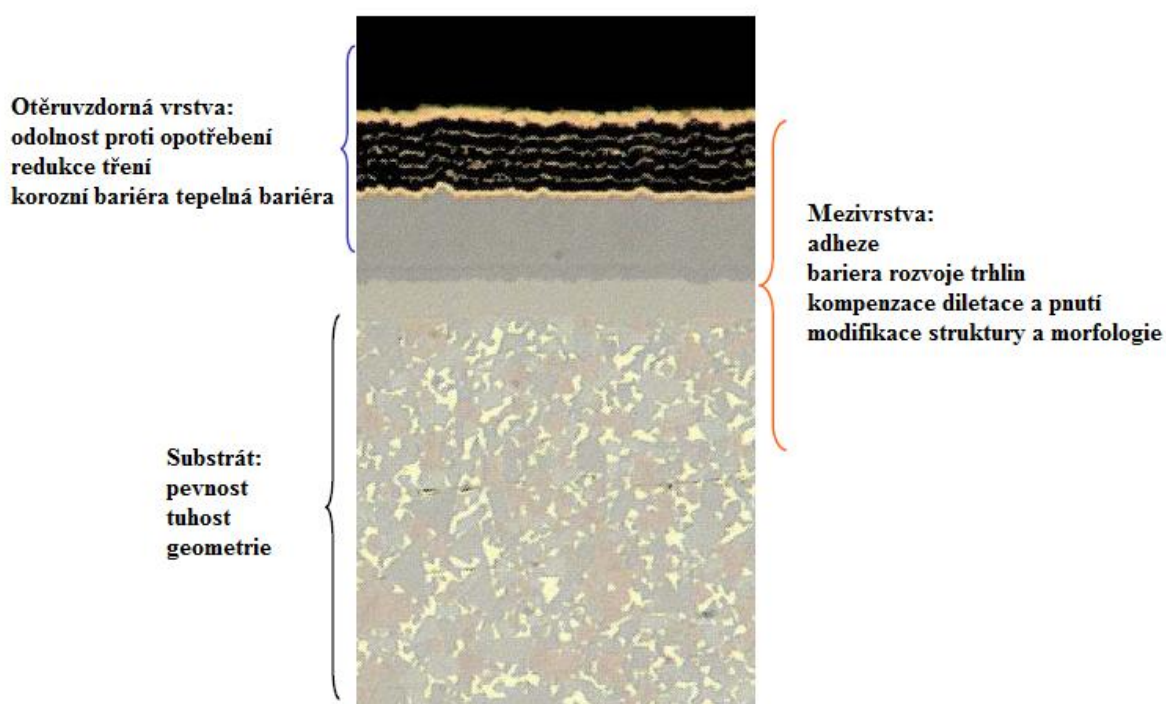
Obr. 3.2 Druhy vazeb ³

Tvrdý materiál vhodný pro nanesení tenké vrstvy keramického povlaku jsou obvykle karbidy, nitridy, boridy z IV., V. a VI. skupiny periodické tabulky.

Keramické povlaky jsou tvořeny pomocí dusíku, uhlovodíku během procesu povlakování. Cílem je vytvořit keramickou směs na povrchu substrátu. Nejběžnější jsou dostupné keramické povlaky jako TiN, TiCN a TiAlN.



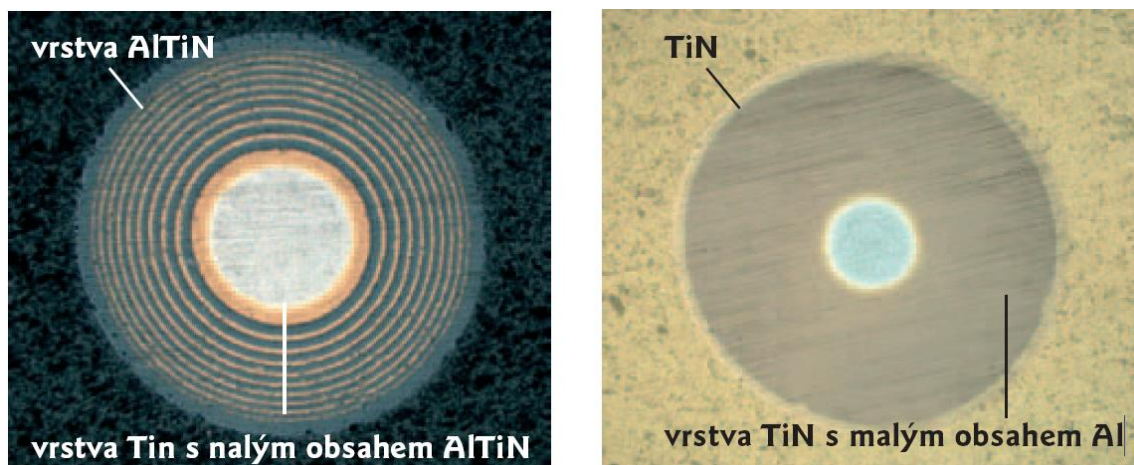
Obr. 3.3 Monovrstva TiAlN²



Obr. 3.4 Struktura vrstvy³

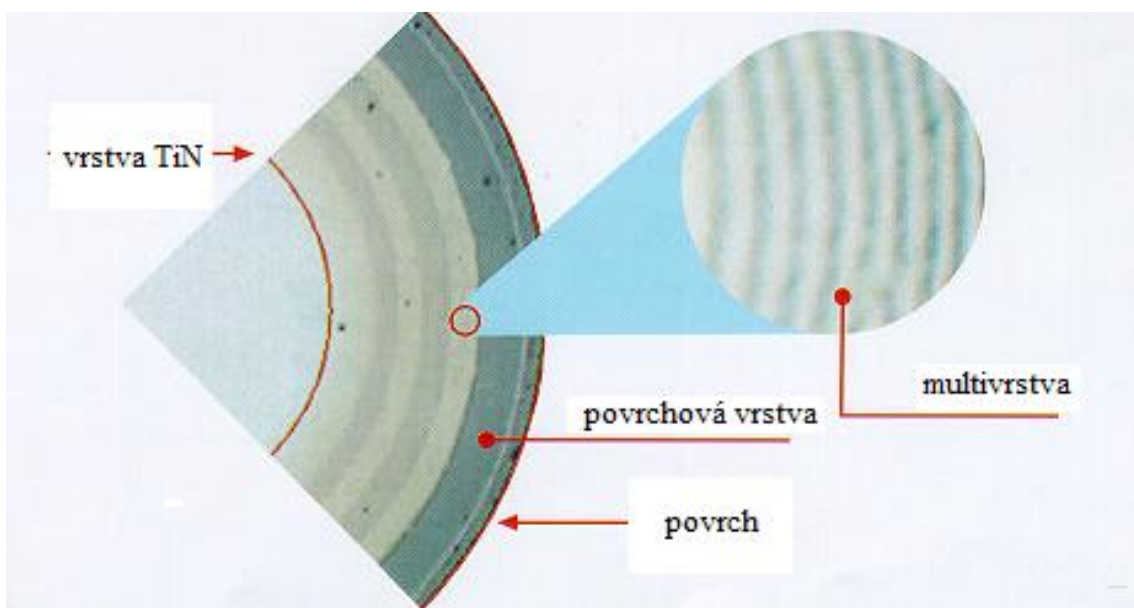
3.1 Strukturované vrstvy

Co se týče tepelné a chemické stability velmi tvrdých vrstev, pak běžné vrstvy nevyhovují. Proto se musely vyvinout vrstvy např. na bázi TiAlN v různých strukturalizovaných modifikacích jako je multivrstvy, gradientní vrstvy a nanostrukturované vrstvy, kam patří i zvláštní skupina nanokompozitní vrstvy. Tímto způsobem se dosáhlo zlepšení jejich fyzikálních, tak i chemických vlastností.

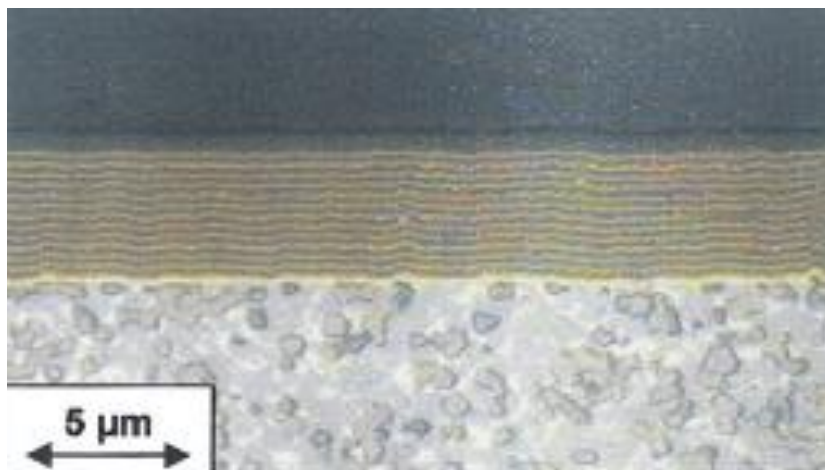
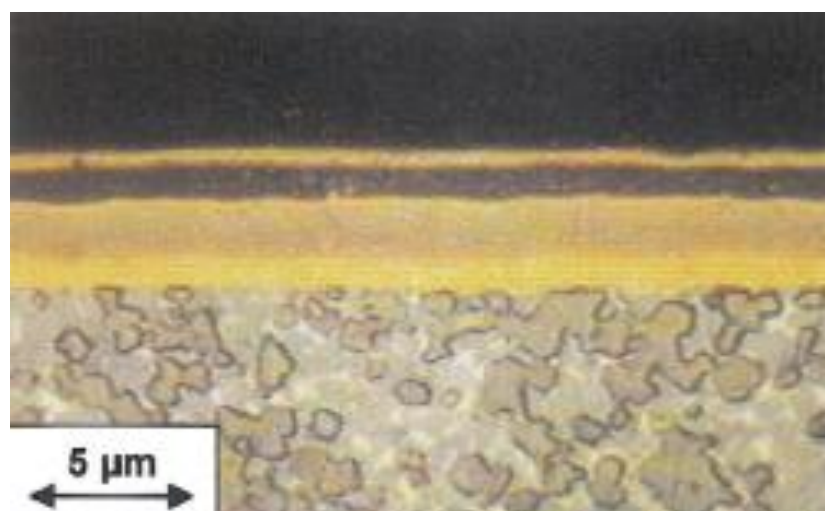
Obr. 3.5 Makrostruktura - multivrstva a monovstva²

3.2 Multivrstvy

Tímto způsobem je dosaženo dalšího zlepšení vlastností v oblasti tvrdých PVD keramických povlaků. Tento systém tvořený střídavě na sobě uložených tenkých vrstvičkách tvoří povlak mnohovrstvých keramických povlaků.

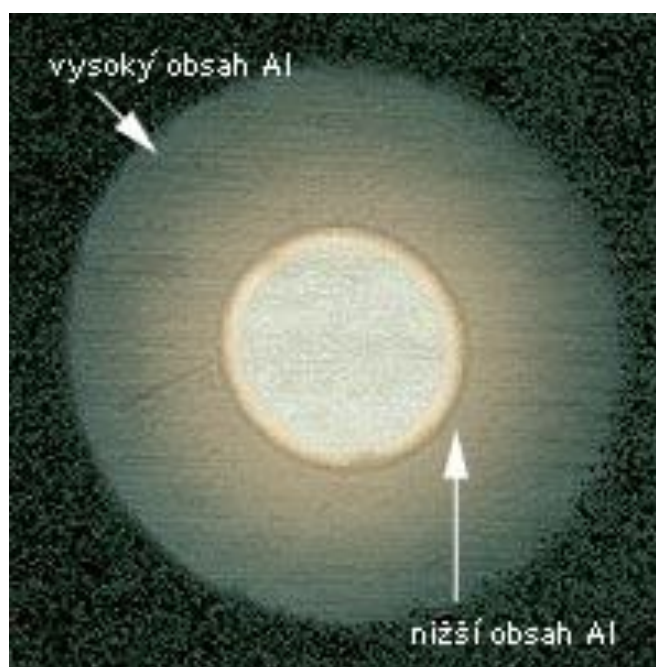
Obr. 3.6 Popis vrstvy³

Tyto vrstvy můžou zlepšit jak tvrdost, odolnost proti opotřebení, odolnost proti korozi, oxidační odolnost, odolnost proti šíření poruch, stejně jako i tuhost ve srovnání s jednotlivými vrstvami ze stejných materiálů.

Obr. 3.7 Multivrstva TiAlN ²Obr. 3.8 Multivrstva TiN/TiCN/TiAlN ²

3.3 Gradientní vrstvy

Nanogradientní vrstvy jsou na principu průběžně proměnným složením vrstvy např. TiAlN a to tak, že k povrchu vrstvy se zvyšuje obsah Al. Tento systém se používá z důvodů zabezpečení vysoké oxidační odolnosti při zachování tvrdosti vrstvy.

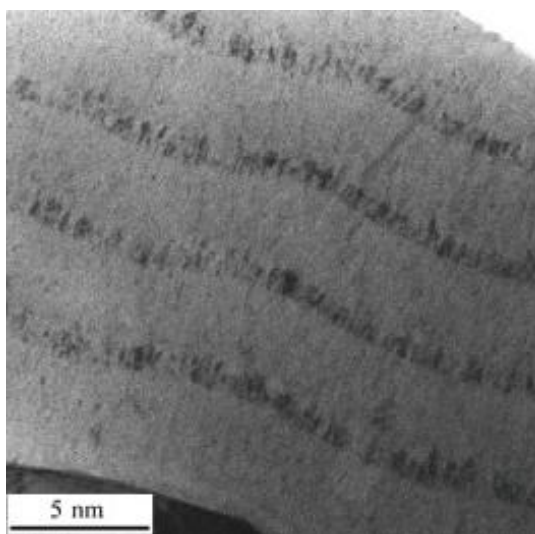


Obr. 3.9 Nanovrstevný gradientní systém TiAlN tvořený vrstvou s plynulou změnou stechiometrie ⁶

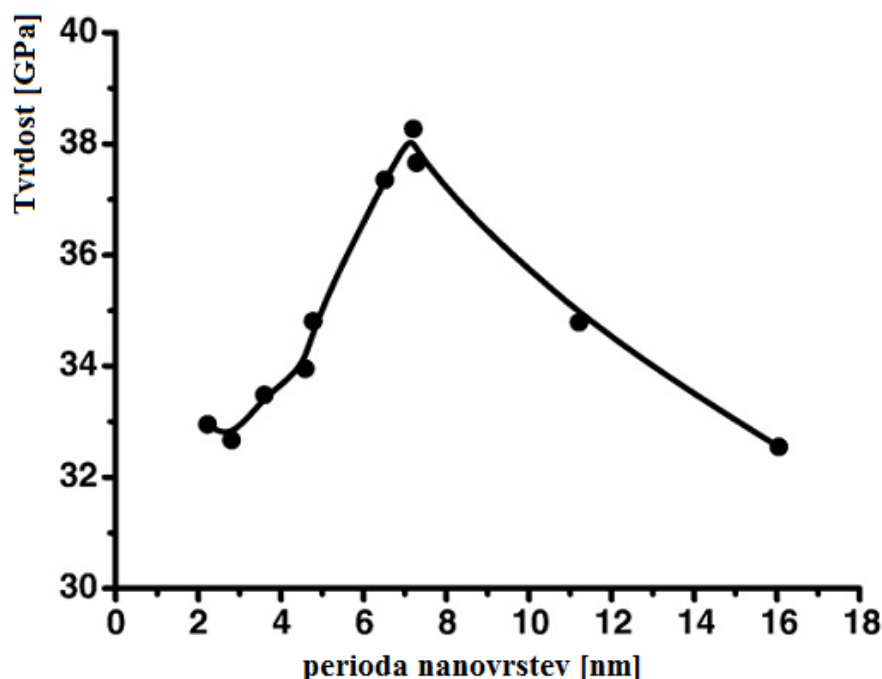
3.4 Nanostrukturované vrstvy

Nanovrstvy nebo supermřížky jsou tvořeny soustavou střídajících se velmi tenkých vrstev s různými vlastnostmi. Přitom tloušťka jednotlivých vrstviček je rozhodující pro výslednou vlastnost vrstvy a její optimum se pohybuje v rozsahu 3 až 10 nm podle prvkového složení vrstvy. Výsledkem jsou vrstvy s velmi vysokou tvrdostí a odolností vůči šíření mikrotrhlin.

Pokud je rozhraní (složení) mezi jednotlivými vrstvičkami s různými fyzikálními vlastnostmi dostatečně ostrá, pak lze najít optimální periodu, při které je tvrdost výchozí (celé) vrstvy výrazně zvýšena viz graf 3.1.



Obr. 3.10 Nanovrstva ⁵

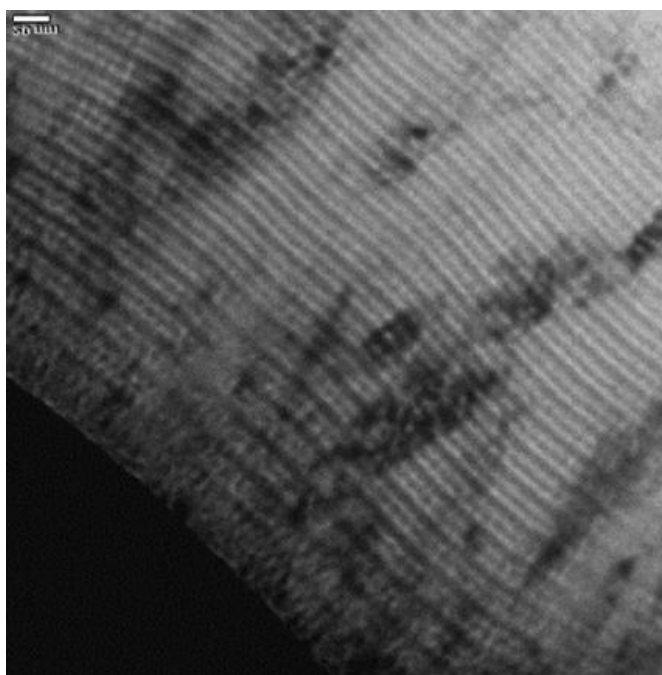


Graf 3.1 Maximalizace tvrdosti nanokompozitu $(\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}/\text{a-Si}_3\text{N}_4$ optimalizováním periody vrstev⁹

3.5 Nanokompozitní vrstvy

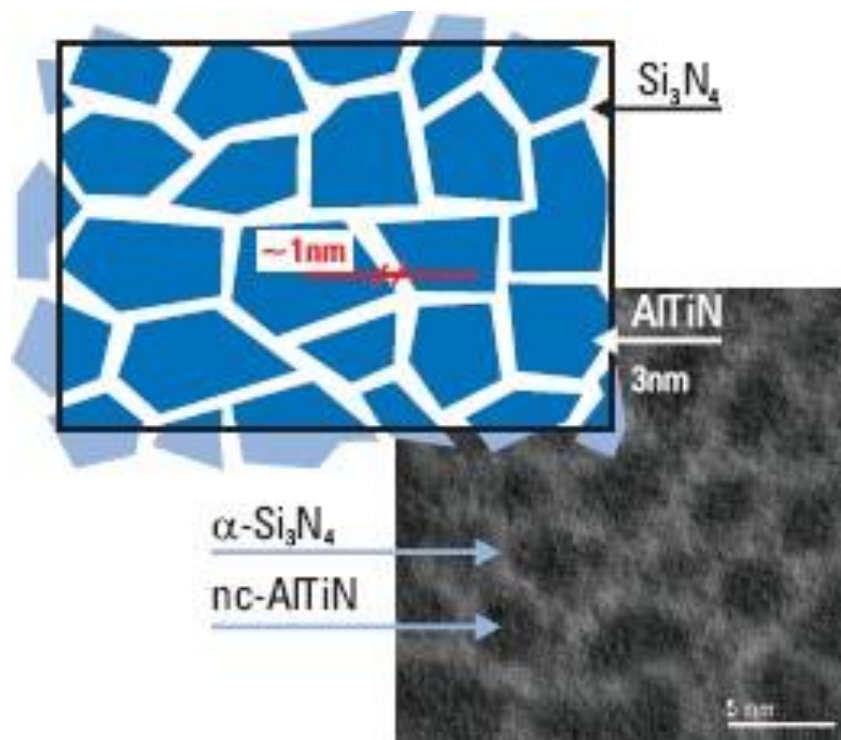
Nanokompozitní vrstvy dnes reprezentují novou generaci velmi tvrdých PVD vrstev s typickou charakteristikou jejich struktury – malé krystality o velikosti několika nanometrů jsou uloženy v amorfni matrici, přičemž obě fáze jsou nemísitelné.¹⁸

Nanokompozitní povlak se skládá z nejméně dvou fází a to: nanokrystalická fáze a amorfni fáze, nebo dvou nanokrystalických fází. Základní myšlenkou pro navrhování nanokompozitů je založen na termodynamicky poháněné segregaci v binárním (ternárním, kvartérním) systému. Segregace vede k samo-organizaci stabilní struktury v měřítku nanometrů. Tento obecný pojem nedávno vedl k rozvoji nanokompozitních PVD keramických povlaků. Různých materiálů, jako je krystalický titan, chrom, hliníkové nitridy jsou nanášeny společně s amorfni materiálem jako Nitrid křemíku. Tyto dva materiály nepřicházejí do styku úplně a tak vznikly 2 fáze. Jedná se o termodynamicky stabilní materiály a to i z hlediska zrnitosti. Nedochází tedy k růstu zrnitosti ani za vyšších teplot. Hranice zrn slouží jako efektivní bariéra proti šíření poruch. Tyto keramické PVD povlaky mají nanometrickou velikost zrn a vykazují zvýšenou pevnost, tvrdost, tepelnou stabilitu, houževnatost a odolnost vůči oxidaci.



Obr. 3.12 Nanokompozit povlakovaný s vysokou tvrdostí a vysokou odolností proti křehkému lomu⁹

Typickým představitelem nanokompozitních vrstev na trhu jsou vrstvy nc-Ti_{1-x}Al_xN/a-Si₃N₄. Zde představují krystalickou složku krystaly TiAlN a amorfní složku Si₃N₄. Tvrdosti HV těchto vrstev přesahují hodnotu 40 GPa. S těmito hodnotami tvrdosti se nanokompozity řadí k nejtvrdějším PVD vrstvám.

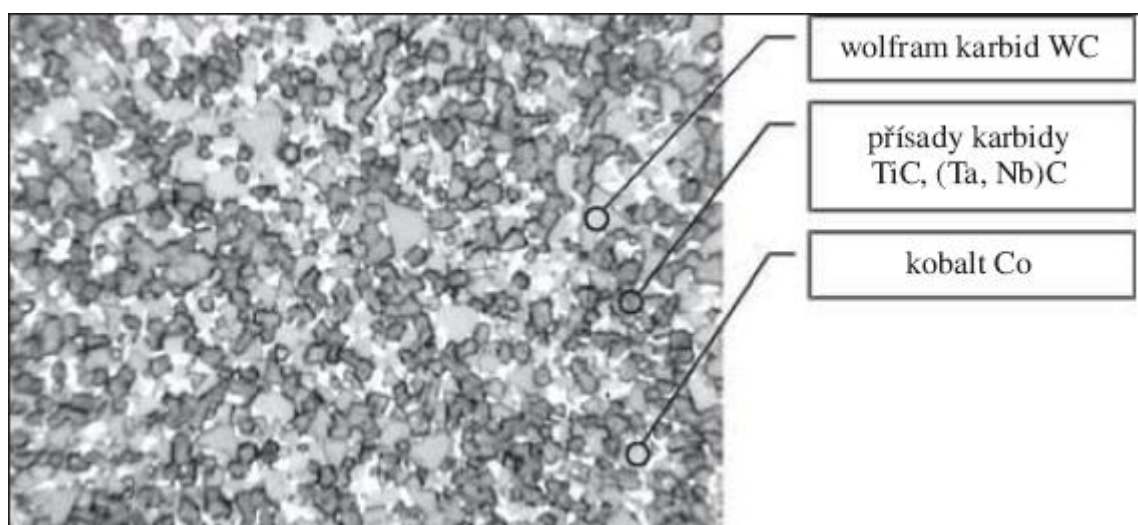


Obr. 3.13 Nanokrystaly AlTiN jsou „vsazeny“ do matrice Si₃N₄⁵

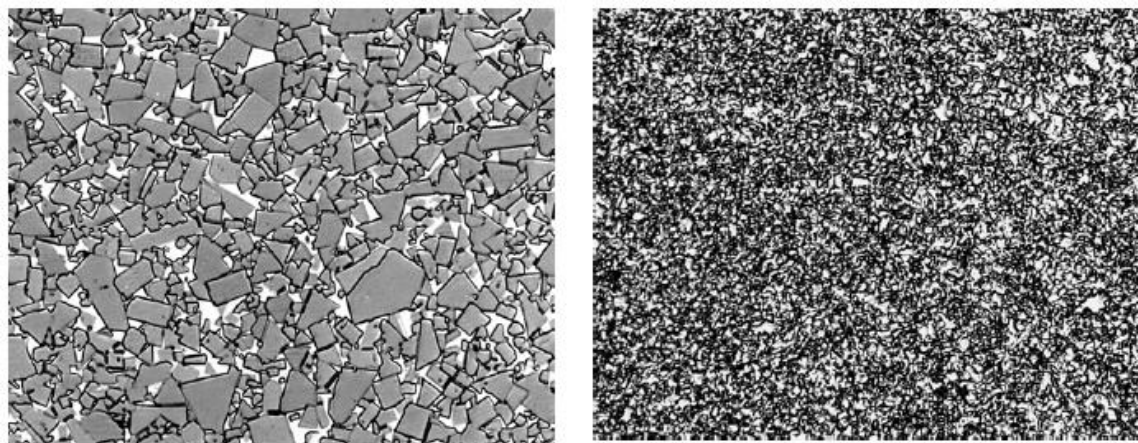
3.6 Struktura slinutého karbidu

Strukturu nástrojů ze slinutého karbidu, který je vedle rychlořezných a práškových ocelí nejrozšířenějším materiálem pro výrobu povlakovaných řezných nástrojů. Skládají se z jednoho nebo více karbidů vysokotavitelných kovů (např. karbid wolframu) a pojícího fáze (Co) nebo kovu (nebo slitiny) ze skupiny železa (např. kobalt, nikl). Pro další modifikaci základních vlastností se používají příměsi např. titan, tantal nebo niob karbidů (TiC, TaC, NbC).

Zjednodušeně řečeno: Zrna wolframu karbidu poskytují slinutému karbidu tvrdost a ořezuvzdornost, kobaltová fáze zajišťuje jeho houževnatost.



Obr. 3.14 Struktura slinutého karbidu ¹²



Obr. 3.15 Struktura slinutého karbidu ¹²

Jemnozrnnost, chemické složení a vhodnost k depozici jsou hlavními vlastnostmi, které musí být splněny pro následné povlakování.

4 DRUHY VRSTEV A JEJICH VLASTNOSTI

4.1 Vrstvy TiN , $TiCN$, $TiAlN$ a $TiAlCN$

4.1.1 Vrstva TiN

Mezi prvními vyvinutými a historicky nejstarší vrstvy patří **TiN** , které dosahují tvrdosti HV do 23 GPa a jejich max. pracovní teplota je 600 °C (tato hodnota se liší u různých výrobců od 500 do 650 °C).



Obr. 4.1 Vrstva na bázi TiN ⁵

4.1.2 Vrstva $TiCN$

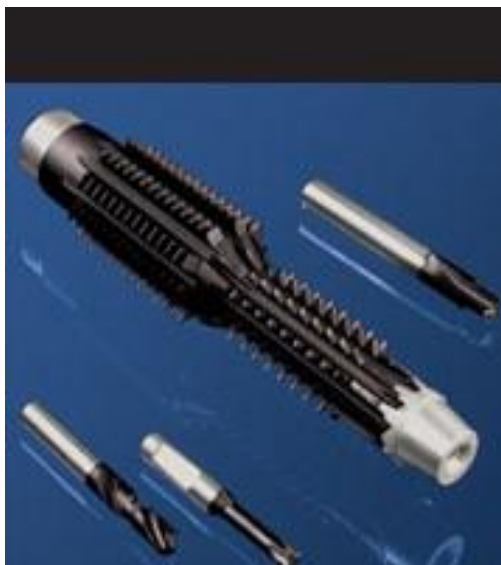
Vrstvy **$TiCN$** , které se vyvíjely kvůli velmi vysoké abrazivní odolnosti s tvrdostí až 35 GPa, dobré frikční vlastnosti, ale s malou pracovní teplotou do 450 °C. Ale i přesto mají svou oblast aplikací.



Obr. 4.2 Vrstva na bázi $TiCN$ ⁵

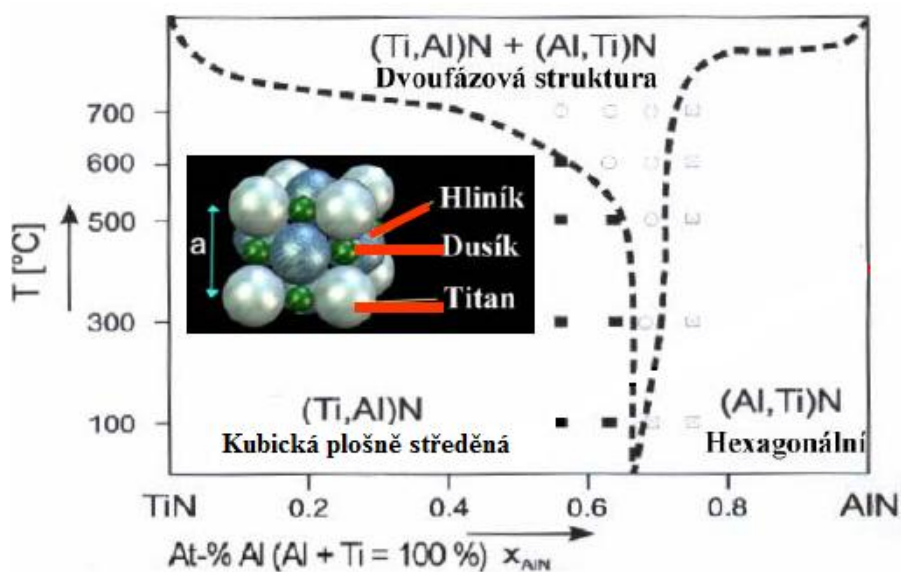
4.1.3 Vrstva TiAlN

Další vývojovou skupinou vrstev jsou vrstvy na bázi **TiAlN**, které dosahují vysokou tvrdost HV až 33 GPa a mají vysokou max. pracovní teplotu přesahující někdy 900 °C. Vysoká abrazivní pevnost a tepelná odolnost (chemická stabilita) při vysokých teplotách.

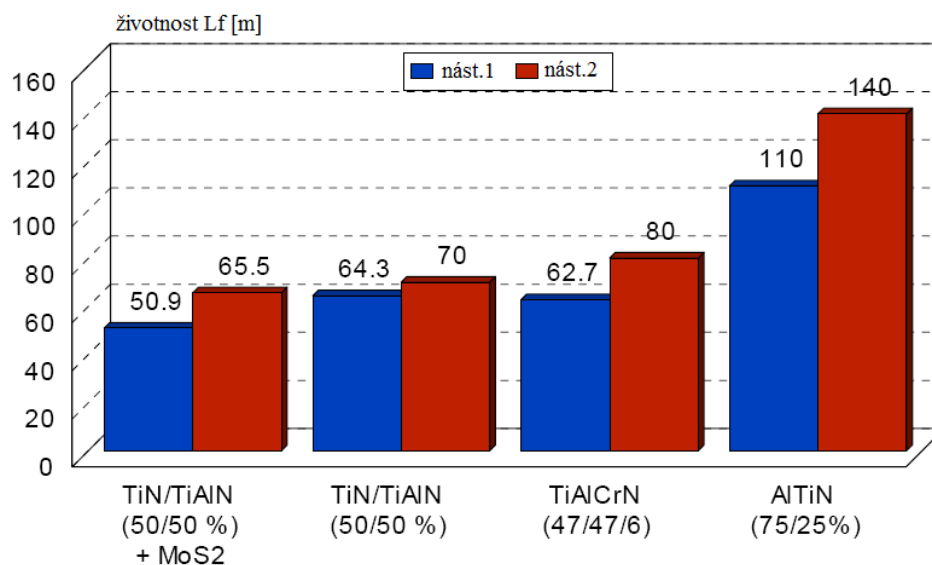


Obr. 4.3 Vrstva na bázi AlTiN⁵

Typy těchto vrstev jsou monovrstvy, multivrstvy, gradientní a jinak strukturované vrstvy TiAlN s vysokou tvrdostí a tepelnou odolností. V kombinaci s přísadami Hf, Cr, Nb, Si atd. se dosahují velmi jemnozrnné a stabilní struktury. Různý poměr Ti:Al ve vrstvách je využíván pro konkrétní aplikace. Např. zvýšený obsah Al (kolem 60 %) přináší vrstvy s vyšší odolností vůči oxidaci. Nad obsah 65% vzniká pouze hcp krystalografická mřížka, což vede k zhoršení tepelné odolnosti. Při teplotním zatížení se zlepšují mechanické vlastnosti.



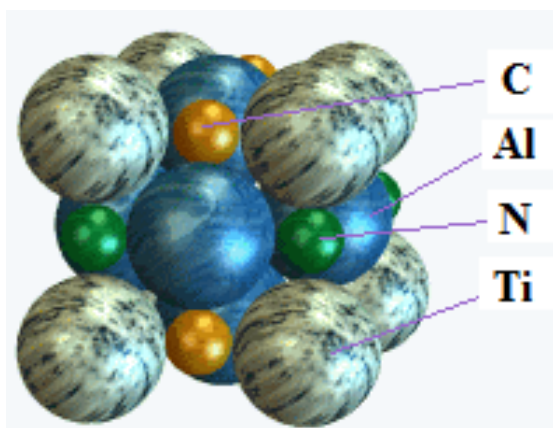
Graf 4.1 Vliv množství hliníku na vznik hexagonální strukturní mřížky¹⁰



Graf 4.2 Životnost nástroje při vrtání povlakovaných s odlišným obsahem Al
materiál 42CrMo4V – $R_m=1000 \text{ N/mm}^2$, vrták $d=6,8\text{mm}$, $vc=110\text{m/min}$, $f=\text{mm/ot}$, $a_p=34 \text{ mm}$, emulze 8l/min ⁷

4.1.4 Vrstva AlTiCN

Představuje další generaci povlaků. Tento povlak disponuje všemi výhodami jako varianta povlaku AlTiN, přičemž má ještě další významnou vlastnost a tím je nízký koeficient tření. Za mokra nebo sucha bude tento povlak vykazovat vysoké výkony. Tyto vlastnosti tohoto povlaku předurčují pro všestranné použití pro nástroje na obrábění, tváření, tažení apod.



Obr. 4.4 Atomární složení AlTiCN ²²



Obr. 4.5 Vrstva na bázi AlTiCN ⁵

4.2 Difuzní mechanismy při oxidaci vrstev TiAlN

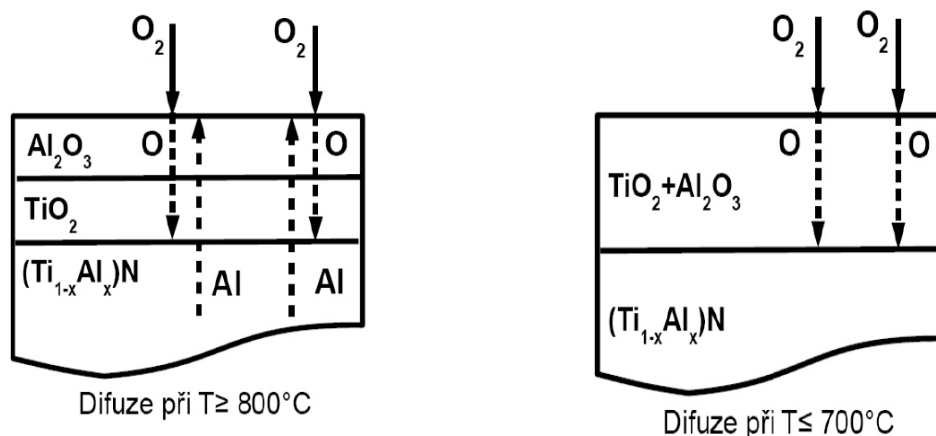
Na povrchu nástroje tvoří při vyšší řezné rychlosti tenkou vrstvu Al_2O_3 . Vzniklá vrstva chrání břit před další oxidací a snižuje tření na břitu. „Dochází k sekundární fázové transformaci – vytváří se příznivá nanokompozitní struktura, která je tvořena dominantní koherentní nanofází c-AlN v matrici – koherentnost, což je zachování tvrdosti i při vysokých teplotách.“¹⁵ Při vysokých teplotách vzniká oxidický film Al_2O_3 .

Složení oxidického filmu je především závislé na:

- složení vrstvy, což je poměr Al/Ti
- teplotě oxidace – do 600°C vzniká směs oxidu složených z Al_2O_3 a TiO_2

Difuze Al je hybnou silou oxidace vrstev $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$.

Rychlost difuze Al v Al_2O_3 filmu je nejrychlejší za teplot $700 - 1000^\circ\text{C}$.¹⁵



Obr. 4.6 Difuzní mechanismy¹⁵



Obr. 4.7 Oxidický film + TiAlN³

Všechny tyto typy vrstev postupně vytlačují klasické TiN vrstvy. Další skupinou vrstev jsou tzv. samomazné vrstvy. Jedná se většinou o kombinace TiAlN a MoS₂, resp. WC/C, případně vrstvy DLC (Diamond Like Carbon). Tyto vrstvy se objevují také v podobě kompozitů, kde je samomazná fáze rozptýlena uvnitř tvrdé vrstvy. Tato skupina je určena pro oblast suchého obrábění, obrábění měkkých "lepivých" materiálů a pro kluzné aplikace.

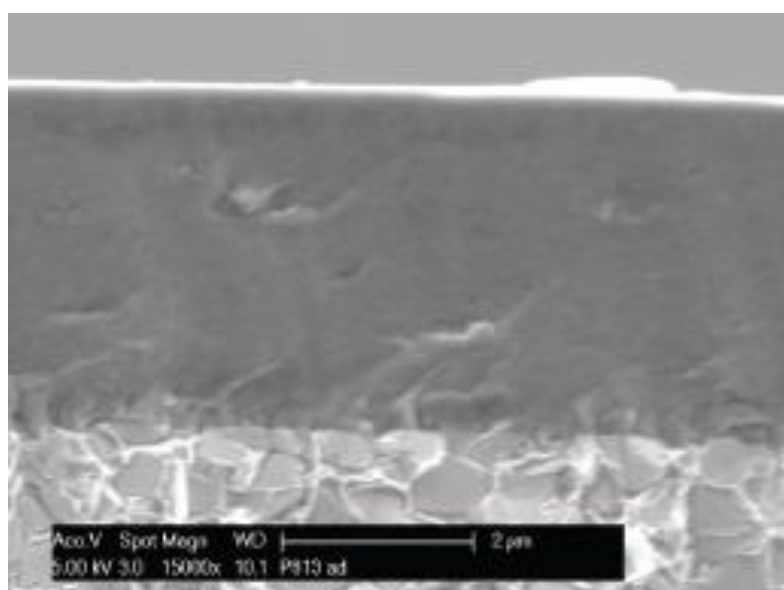
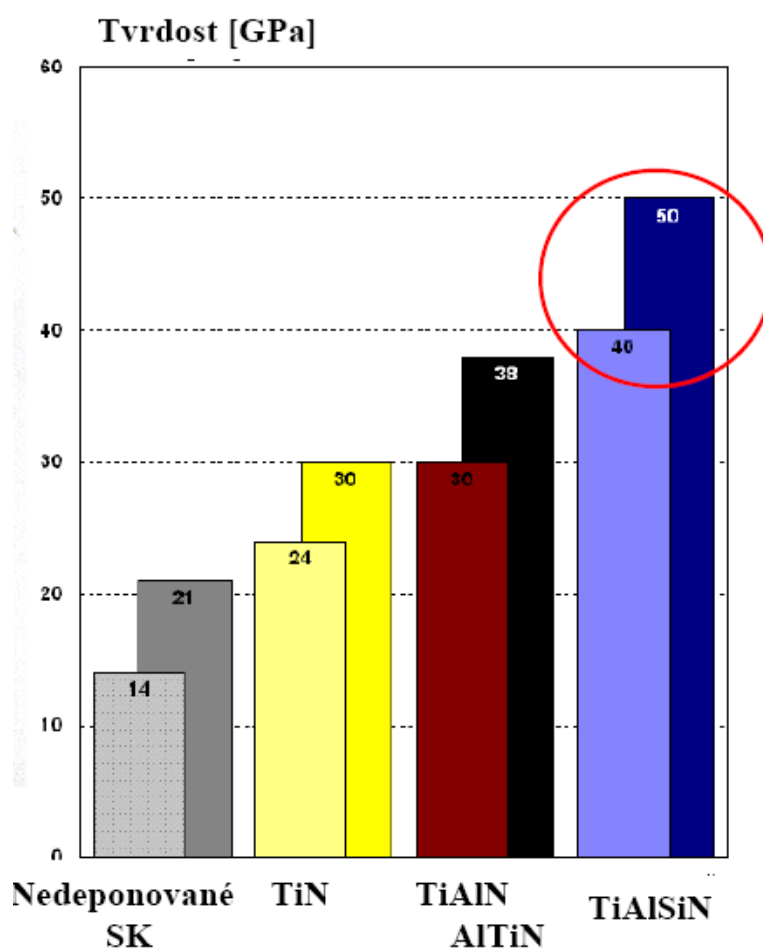
4.3 Nanokompozitní struktura nc- (Ti_{1-x}Al_x)/a-Si₃N₄

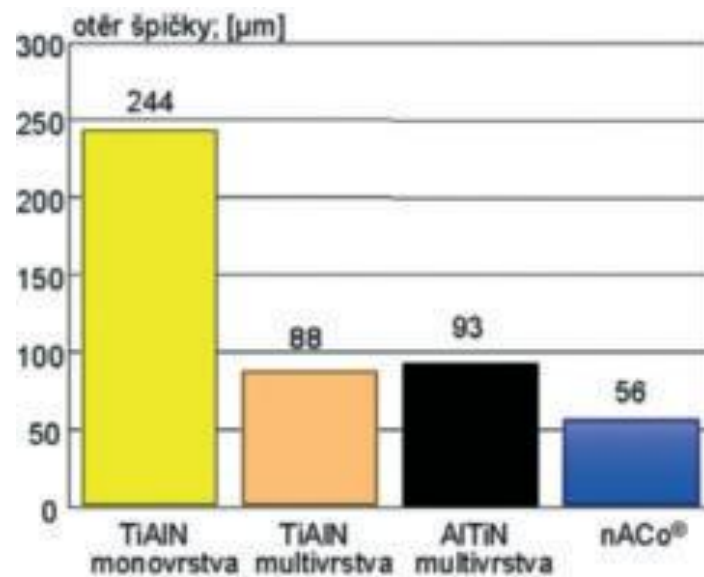
Tato skupina tvrdých a supertvrdých vrstev s vysokou termodynamickou stabilitou struktury, která tak zajišťuje stabilitu vlastností, je skupina tzv. nanokrystalických kompozitních vrstev. Nanokrystalický kompozit je materiál tvořený dvěma nebo více složkami, které jsou vzájemně nerozpustné, přitom alespoň jedna složka musí být krystalická. Malá zrnitost má příznivý vliv na tvrdost. Jedná se o termodynamicky stabilní materiály, a to i z hlediska zrnitosti - nedochází k růstu zrn až do teplot nad úrovní 1000 °C. Hranice zrn slouží jako efektivní bariéra proti šíření poruch - tím je dána vysoká tvrdost těchto materiálů.⁵



Obr. 4.8 Nástroje povlakované AlTiSiN⁶

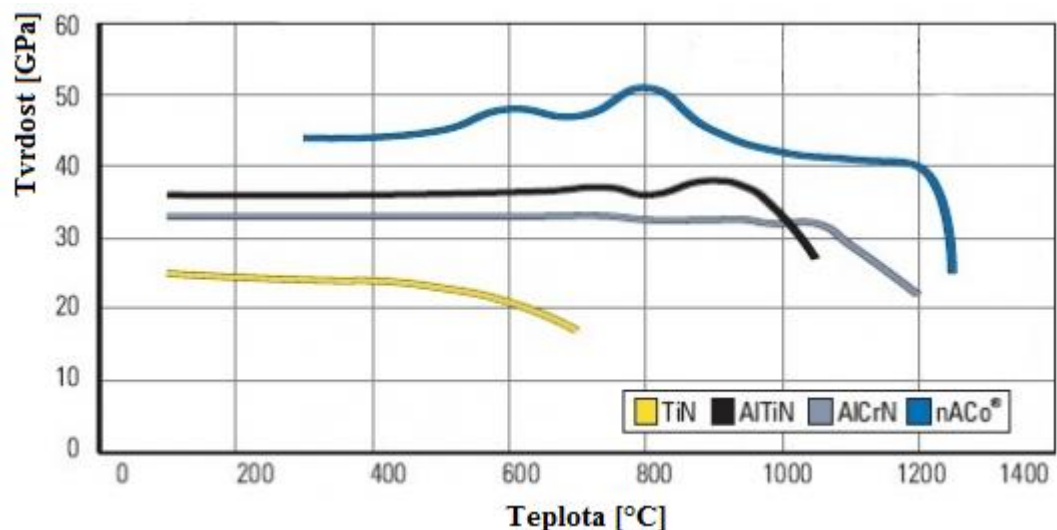
Typickým představitelem nanokompozitních vrstev na trhu jsou vrstvy nc-(Ti_{1-x}Al_x)N/a-Si₃N₄. Zde představují krystalickou složku krystaly TiAlN a amorfni složku Si₃N₄. Tvrdosti HV těchto vrstev přesahují hodnotu 40 GPa.

Obr. 4.9 Vrstva AlTiSiN s vysokým obsahem Si ⁵Graf 4.3 Zvýšení mikrotvrdosti aplikací progresivních tenkých vrstev TiAlSiN ¹¹



nACo ...nanokompozit založený na bázi nc-AlTiN / α-Si₃N₄

Graf 4.4 Vrtání kalené oceli – porovnání otěru špičky po odvrtání 150 m; materiál obrobku 42CrMo4; nástroj HM vrták průměru 12 mm; $a_p = 5 \times d$, $v_c = 120 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = 0,35 \text{ mm/zub}$; vnitřní chlazení: tlak $p = 40 \text{ bar}$, emulze 5%¹³



nACo ...nanokompozit založený na bázi nc-AlTiN / α-Si₃N₄

Graf 4.5 Porovnání tvrdostí povlaků v závislosti na teplotě⁵

4.4 Nanokompozitní vrstva na bázi Al-Cr-Si-N

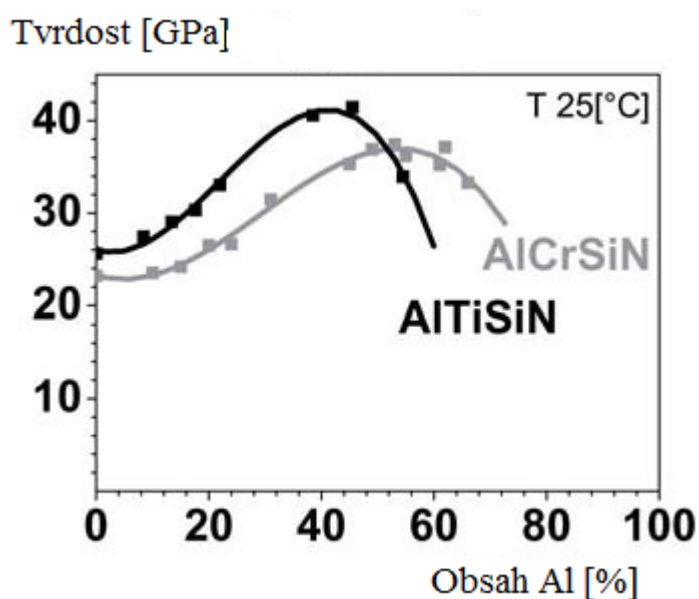
Alternativou k vrstvám TiAlN jsou vrstvy na bázi CrAlN, kde Ti je nahrazeno prvkem Cr. Tyto typy vrstev se objevují již od roku 1990 v odborných publikacích. V roce 1994 byly připraveny vrstvy CrAlN technologií odpařování pomocí oblouku. V posledních letech byly publikovány různé testy vrstev zaměřené na oxidační odolnost a elektrické vlastnosti. Výhodou vrstev CrAlN je

jejich vysoká chemická stabilita za vysokých teplot a adheze k substrátu i za zvýšených teplot.



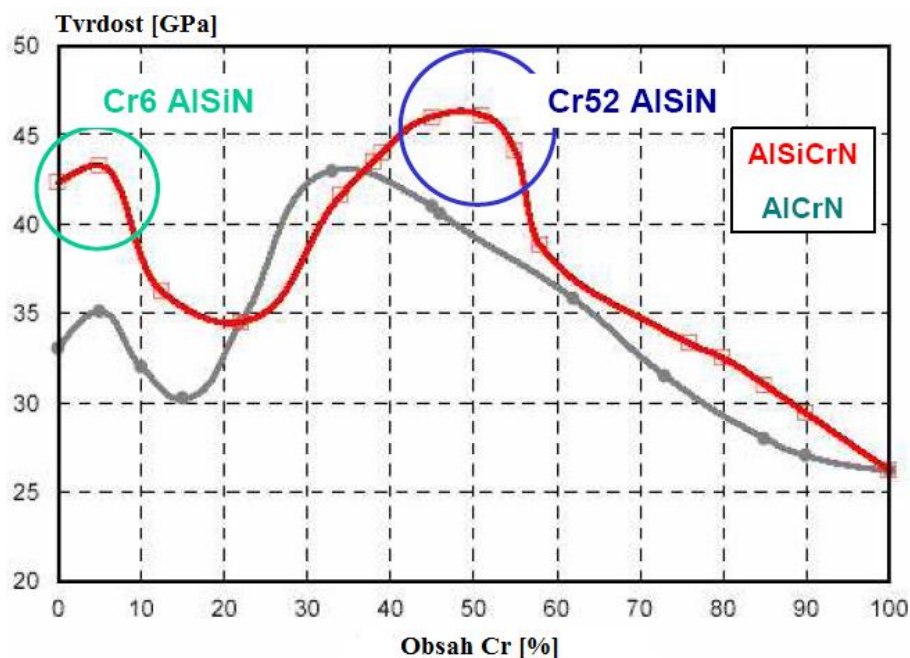
Obr. 4.11 Vrstva na bázi AlTiCrN ⁵

Tvrdost patří k jednomu z nejdůležitějších vlastností otěruvzdorných vrstev. Na grafu 4.6 je provedeno porovnání tvrdosti v závislosti na obsahu Al pro dva typy nanokompozitních vrstev – AlTiSiN a AlCrSiN . Z grafu je patrné, že tvrdost vrstvy AlCrSiN je dosaženo při vyšších obsazích Al. Avšak tvrdost je poněkud nižší než u vrstev AlTiSiN .



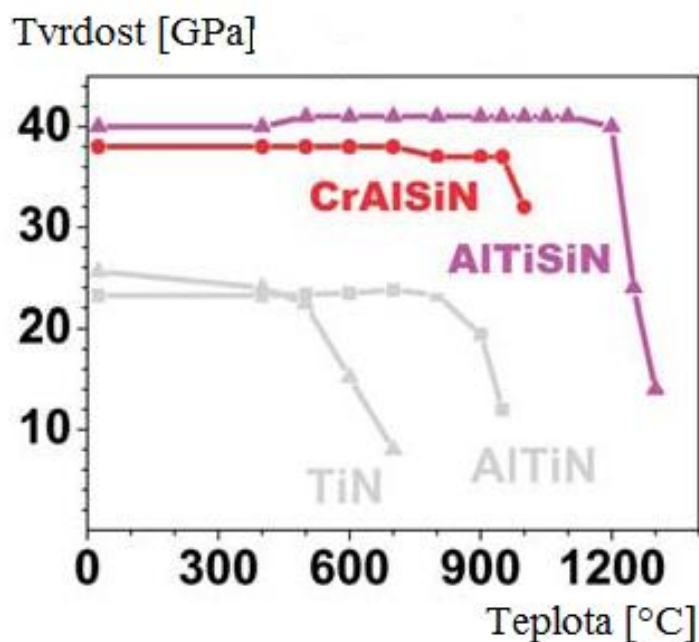
Graf 4.6 Závislost obsahu Al na tvrdosti u povlaků AlTiSiN a AlCrSiN ⁸

Existují dvě oblasti složení vrstev s maximem. S nízkým obsahem Cr kolem 6% a 52%, při 6% složení Cr dosahuje vrstva velmi vysokých hodnot tepelné odolnosti. To znamená, že i při vysokých pracovních teplotách nebude docházet k oxidaci vrstvy.



Obr. 4.12 Vliv obsahu Cr na tvrdosti ²⁴

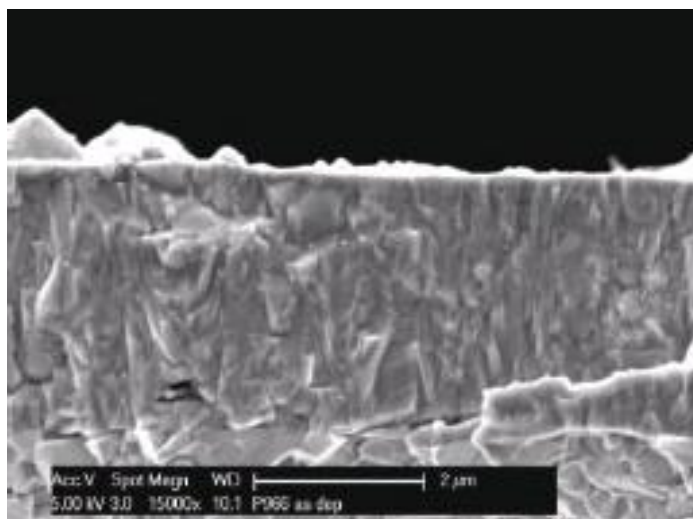
Tepelná stabilita vrstvy AISiCrN je vyšší než 1 000 °C. Do těchto teplot si vrstva udržuje svoji tvrdost. Porovnání s příklady ostatních vrstev je zřejmé v grafu 4.7. Vysoká tepelná a chemická stabilita je pro nanokompozitní vrstvy typická.



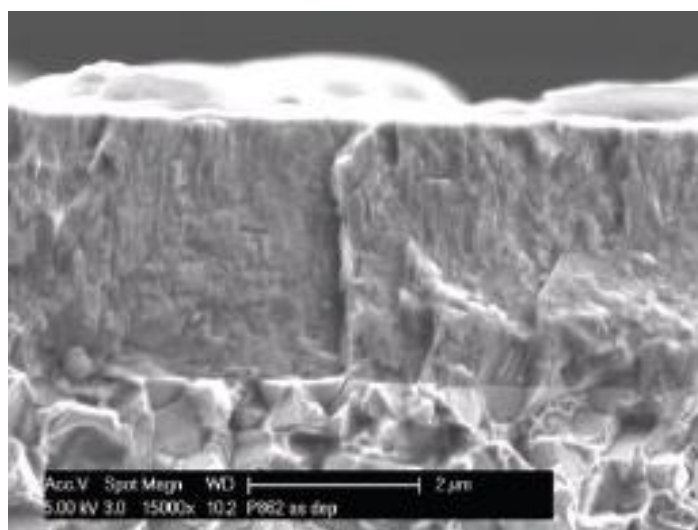
Graf 4.7 Tepelná stabilita pro různé druhy vrstev ⁸

4.4.1 Složení a struktura

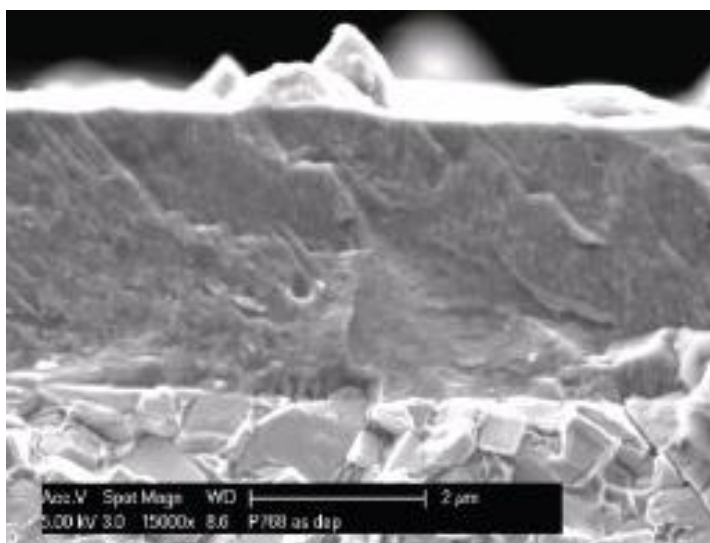
Maximální poměr obou metalických složek při zachování kubické struktury je $\text{Cr} : \text{Al} \gg 30 : 70$. To je značná výhoda proti systému TiAlN . Další zvyšování podílu Al ale vede k vytváření nových fází AlN, které zhoršují fyzikálně-chemické vlastnosti vrstev. Přitom vysoký podíl Al má příznivý vliv na oxidační odolnost vrstev – vytváří oxidickou ochrannou vrstvu Al-Cr-O, která brání další difúzi kyslíku do vrstvy. Proto i u vrstev Cr-Al-N lze hovořit o limitech jejich složení a možnosti jít do vyšších hodnot oxidační odolnosti. Maximální teploty kdy dochází k masivní oxidaci vrstev CrAlN se podle faktických měření pohybují kolem 700 až 800 °C. Díky vytvářené oxidační ochranné bariéře Al-Cr-O se však maximální pracovní teploty vrstev CrAlN mohou pohybovat výše. Jedna z cest, jak se dostat se systémy CrAlN do vyšších oxidačních odolností, je opět příprava multivrstevných systémů případně nanokompozitních vrstev.¹²



Obr. 4.13 Vrstva AlCrN bez Si⁵



Obr. 4.14 Vrstva AlCrN s malým obsahem Si⁵



Obr. 4.15 Vrstva AlCrN s vysokým obsahem Si ⁵

Přípravou multivrstvených systémů CrAlN popřípadě nano-kompozitních vrstev lze dosáhnout vyšších oxidačních odolností. Multivrstvené varianty pak umožňují i zlepšení adheze k substrátu a snížení vnitřního napětí ve vrstvách. Vrstvy CrAlN respektive CrAlSiN lze připravit ve vyšších tloušťkách až do 10 μm . Tvrdost u vrstev CrAlSiN převyšuje 35 GPa tedy úroveň vrstev TiAlN. Tyto vrstvy doplňují vrstvy TiAlN v některých aplikacích s vysokou tepelnou stabilitou a chemickou odolností.

4.4.2 Chrom místo Titanu

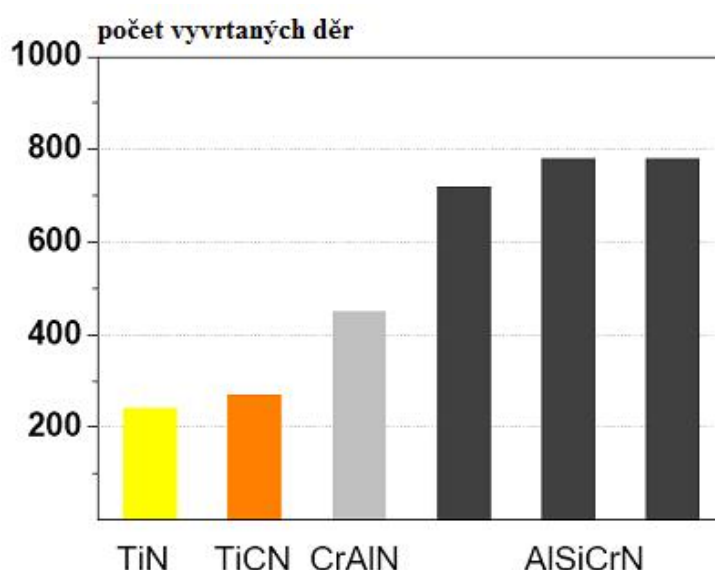
Náhrada titanu chromem je zajímavá z těchto důvodů.

- Lze připravit vrstvu s vyšším obsahem hliníku bez rizika vzniku nevýhodné hexagonální modifikace. Mez obsahu hliníku v systémech může významně ovlivňovat řezný výkon nástrojů. Tento fakt souvisí s tepelnou stabilitou vrstvy v oxidačním prostředí při obrábění (tedy i na vzduchu), kdy s rostoucím obsahem hliníku tepelná stabilita vrstvy vzrůstá.
- Dalším hlediskem je snížené vnitřní zbytkové napětí vrstvy při použití Cr. AlTiSiN vrstvy, v závislosti na složení a procesních parametrech vykazují zbytkové vnitřní napětí v intervalu -2 až -8 GPa. Hodnoty vrstvy AlSiCrN jsou téměř poloviční. Výsledkem je kvalitnější povlak na velmi ostrých geometriích nebo možnost připravit vrstvu ve větší tloušťce bez rizika adhezních problémů (např. pro odvalovací frézy). ⁸
- Posledním hlediskem je změna afinity povlaku vůči obráběnému materiálu. Je obecně známo, že povlaky s vysokým obsahem hliníku, jako např. AlTiN (66 % Al 34 % Ti), mohou vykazovat díky své afinitě k některým ocelím zhoršené řezné výkony při nízkointenzivních podmínkách při obrábění, např. ocelí třídy 10 a 11. Za těchto podmínek může docházet na vysokohliníkové

povrchové vrstvě k nalepování obráběného materiálu, vedoucí až k destrukci bříty. Vrstvy na bázi chromu jsou i vůči těmto materiálům běžně mnohem vstřícnější.⁸

4.4.3 Aplikace

V grafu je provedeno porovnání počtu vyvrtaných děr při vrtání jednotlivými HM vrtáky bez použití chladicí kapaliny. Zvýšení životnosti použitím povlaku Al-Si-Cr-N je nezanedbatelné.



materiál: X155CrVMo12-1(DIN 1.2379)

nástroj: d=5, ap=15mm, vc=70m/min, f=0,16mm/ot

Graf 4.8 Trvanlivost při zkoušce vrtáním⁴

Vrstva AISiCrN představuje technologii nových systémů vrstev namísto několika desítek let používání titanových systému v otěruvzdorných vrstvách.

4.4.4 Tepelná stabilita

Odolnost vůči abrazivnímu otěru je jedním z nejpodstatnějších přínosů tenkých vrstev. Jedním z úzce souvisejících kritérií je tepelná stabilita vrstvy vyjádřená poklesem její tvrdosti při vzrůstající teplotě. Průměrné hodnoty vrstvy TiN jsou okolo 400-500°C, TiCN přibližně 400°C a pro AlTiN téměř 900°C.

Vrstva Al-Si-Cr-N je typická vysokou tepelnou stabilitou přesahující 1000°C, která naznačuje mimořádnou použitelnost vrstvy pro třískové obrábění i při vysokých teplotách (intenzivní řezné podmínky bez použití chladicích kapalin).⁴

4.5 Kluzné vrstvy

Dalším druhem vrstev jsou vrstvy kluzné, které mají nižší tvrdost oproti otěruvzdorným vrstvám. Tyto vrstvy mají za úkol vytvářet kluzný povrch, který snižuje podstatně tření a tím vede k prodloužení životnosti nástroje. Do této kategorie spadají „měkké“ vrstvy, které s kombinací s tvrdými vrstvami na bázi TiN, TiAlN či TiCN a vrstvy DLC vznikají vynikající kluzné vlastnosti společně s dobrou tvrdostí. Tyto vrstvy jsou kombinací uhlíkových vrstev „podobných diamantu“, mají společný nízký koeficient tření, sníženou tepelnou odolnost a tvrdost okolo 20 GPa. Doplnují tvrdou podkladovou vrstvu v řezných aplikacích. Nejrozšířenější typy „měkkých“ vrstev s výrazně nižší tvrdostí jsou MoS₂ a WC/C. Snahou je vytvoření vhodné kombinace tvrdé a měkké složky, která je optimálně abrazivně odolná s nízkým koeficientem frikce.

4.5.1 Kluzné vrstvy na bázi oxidů a uhlíku

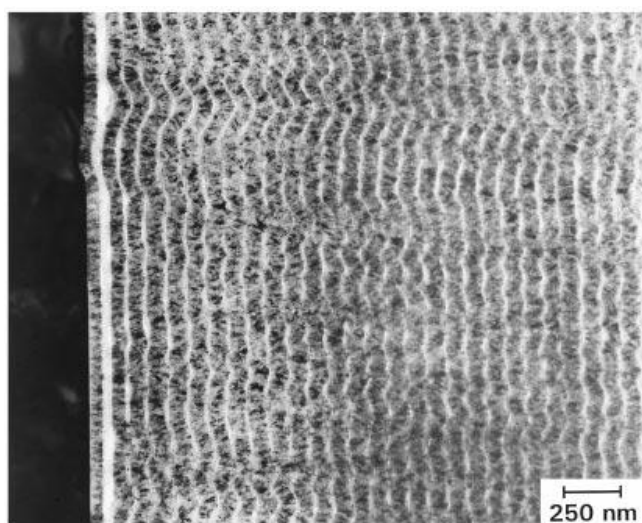
Kluzné vrstvy jsou nedílnou součástí průmyslových povrchových úprav nástrojů. Jejich technický význam je následující:

- zlepšení kluzných vlastností
- výrazné snížení „přilnavosti“ mezi vrstvou a obrobkem
- rovnoměrnější zaběhnutí nástroje
- snížení řezných sil a jejich plynulejší průběh
- omezení tvorby nárůstků, zejména při obrábění neželezných kovů

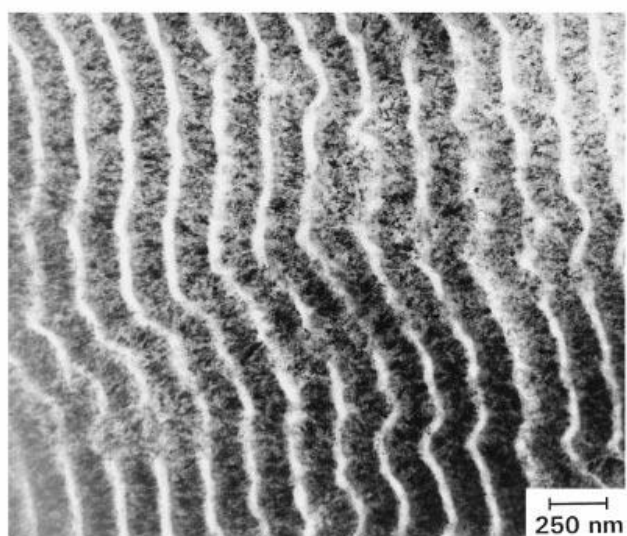
Depozice standardních kluzných vrstev je však doprovázena některými technologickými komplikacemi - znečištění komory, kontaminace elektrod, nutnost dodatečných procesů, výměny targetů, apod.⁴

4.5.2 Popis a vlastnosti vrstvy

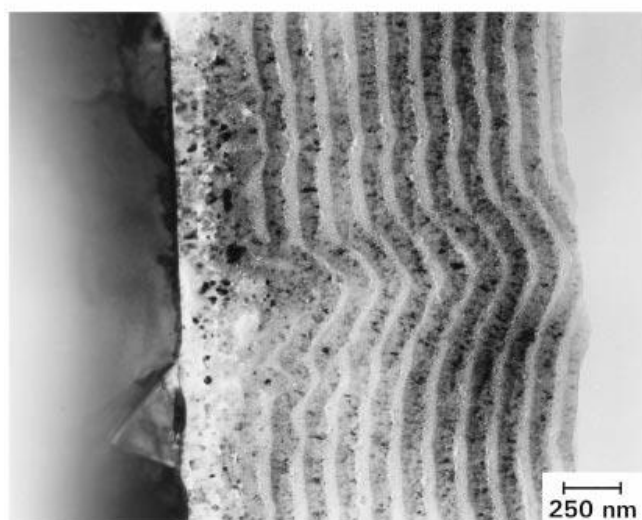
Depozice Al₂O₃ vrstev je výjimečná tepelná a chemická stabilita doprovázená výbornými mechanickými vlastnostmi. Dosažené dílčí výsledky Al₂O₃ se staly technickým podnětem pro depozici popisovaných kluzných vrstev. Výsledkem je systém, který je tvořen převážně oxidy hliníku a titanu s přídavkem izotropně rozděleného uhlíku. Přitom obsah uhlíku je optimalizován právě pro kluzné aplikace.



(a)



(b)



(c)

Obr. 4.16 TiN-Al₂O₃ nano-multivrstvy (a) vrstva 75 nm TiN + 20 nm Al₂O₃, (b) 160 nm TiN + 40 nm Al₂O₃, (c) 80 nm TiN + 50 nm Al₂O₃ ¹⁴

Tvrдост

Tvrдост je nezávislá na obsahu Al a je srovnatelná s jinými typy kluzných vrstev.¹²

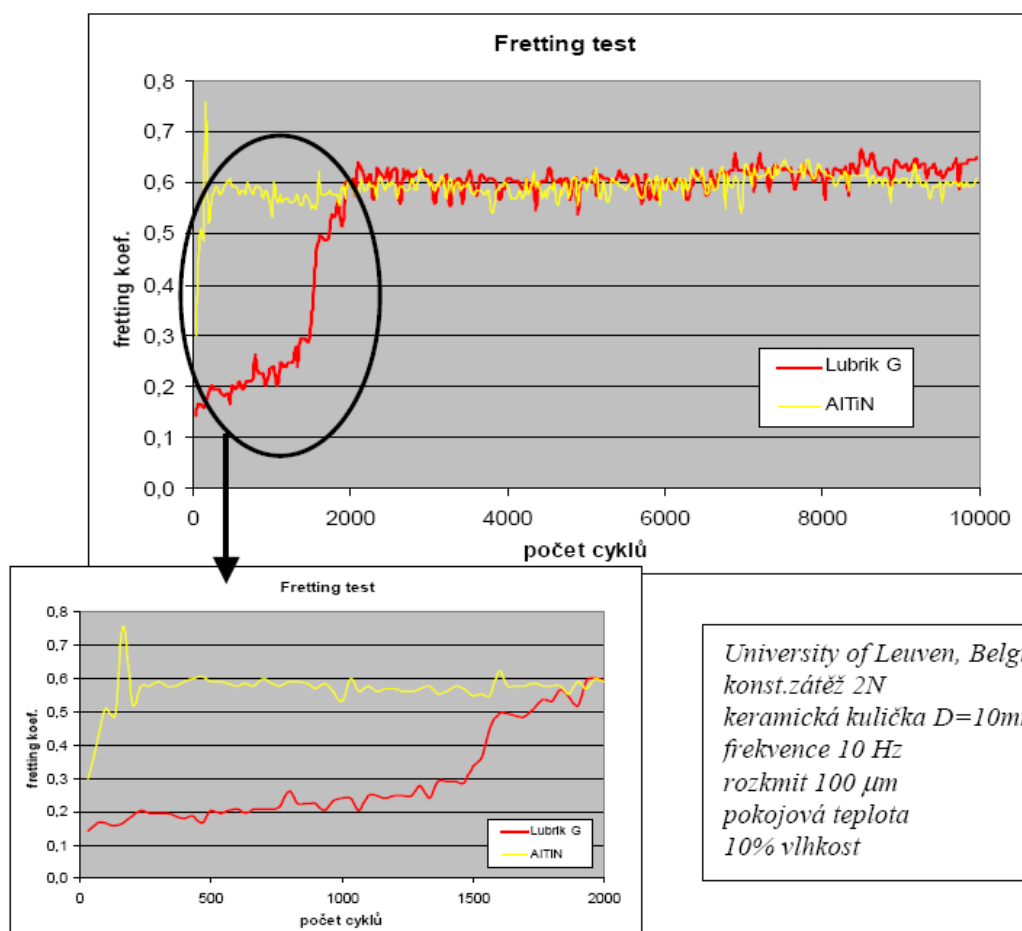
Frikční vlastnosti

Frikční vlastnosti byly ověřovány tzv. fretting metodou. V grafu 3.6 je provedeno porovnání standardního AlTiN povlaku a téhož povlaku doplněného na povrchu vrstvou TiAlN a zakončená kluznou vrstvou s obsahem oxidů a uhlíku (povlak Lubrik G).

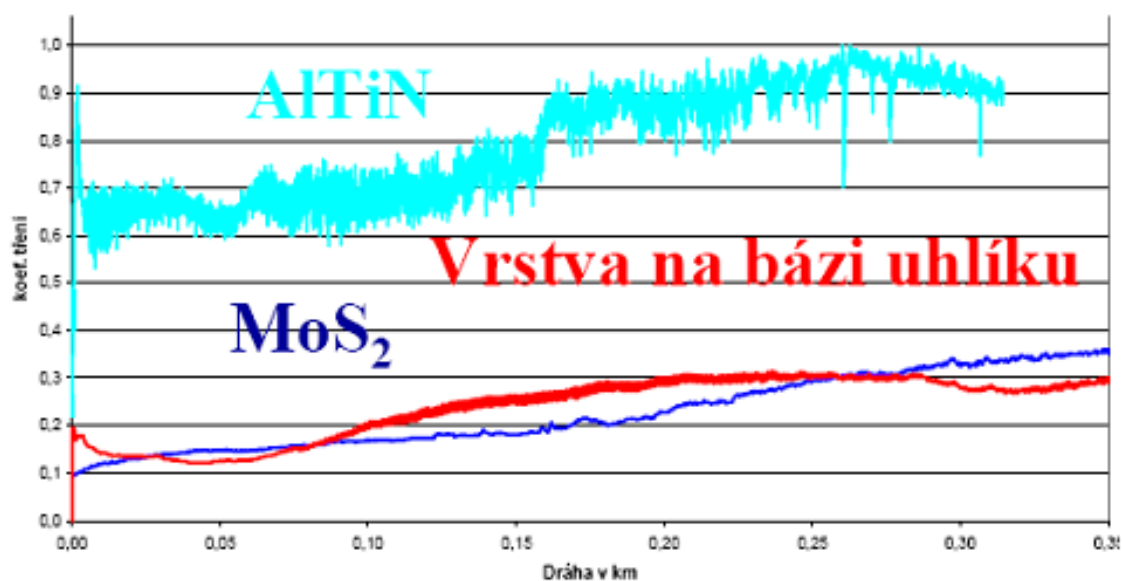


Obr. 4.17 Povlak tvořený gradientní vrstvou TiAlN a zakončená kluznou vrstvou s obsahem oxidů a uhlíku⁶

Vliv kluzného povlaku, především v počátečních fázích zabíhání, je nepřehlédnutelný. Přibližně po 2000 cyklech dochází k opotřebení relativně tenké a měkké kluzné vrstvy a nadále je frikce již definována vlastnostmi povlaku AlTiN.⁴



Graf 4.9 Průběh fretting koeficientu a detail fáze zabíhání nástroje ⁴



Graf 4.10 Porovnání kluzných vrstev s vrstvou AlTiN 3

4.6 Univerzální vrstva?

Z předchozího přehledu moderních vrstev je zřejmé, že kvalitní výrobci PVD povlaků jsou schopni připravit „na míru šitou“ vrstvu pro jakékoliv aplikace. Každá optimalizace průmyslové operace je komplexem optimalizovaných parametrů. V případě povlakovaných nástrojů to je kromě vhodné vrstvy také geometrie nástroje, materiál substrátu a konečně parametry operace, např. řezné podmínky u obrábění. Pokud vzniká požadavek na optimalizaci procesů v sériové výrobě, je možné pomocí PVD vrstev „šitých na míru“ dosáhnout podstatného zvýšení produktivity, kvality či ekonomiky. Přesto je zde velmi početná skupina uživatelů, kteří nevyužívají sériovou výrobu a jejichž nástroje musí pracovat ve velmi rozdílných podmínkách. Pro tyto uživatele je důležitější nabídka „univerzální“ vrstvy. Existuje vůbec taková vrstva? Z uvedeného přehledu moderních vrstev je možné za takovou univerzální vrstvu považovat povlaky z oblasti nanokompozitních vrstev Ti-Al-Si-N resp. některých vrstev Ti-Al-N, které pokrývají širokou oblast řezných aplikací s nadprůměrnými přínosy pro produktivitu, ekonomiku a kvalitu obrábění.¹²

4.7 Vlastnosti vybraných vrstev

TiN - Nitrid titanu - nejrozšířenější použití. Jedná se o optimální povlak pro HSS (rychlořezné oceli) a HSS + Co, při běžném použití. Dosahovaná mikrotvrdost až 28 GPa. Použití zvláště na řezných a střížných nástrojích, kde dochází až k trojnásobnému prodloužení životnosti. Nízký koeficient tření a zvýšená odolnost proti opotřebení je výhodná také pro: vrtáky, frézy, destičky ze SK, závitníky, střížníky atd.

TiCN - vhodný pro nástroje z HSS (rychlořezná ocel). Velice výhodný pro tvářecí a střížné nástroje (dosahuje až desetinásobného prodloužení životnosti). Vyšší odolnost při mechanickém namáhání břitů. Při frézování se používá na legovanou a korozivzdornou ocel, šedou litinu a měď.

TiAlN - Lépe odolává vysokým teplotám. Tvrdost je vyšší, než je u TiN. Nízká tepelná vodivost, odolnost proti oxidaci a zvýšená tvrdost za tepla předurčuje použití tohoto povlaku pro obrábění při vysokých rychlostech a bez použití chlazení. Vrstva vhodná pro tepelně zatěžované břity.

AlTiN - Tvrdost větší než TiAlN.

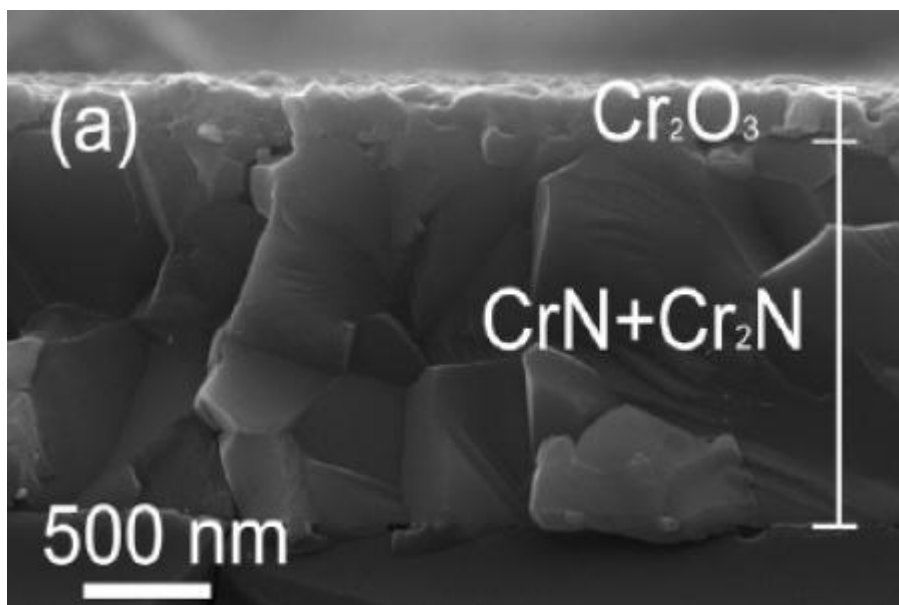
AlTiCN – Snížený koeficient tření oproti vrstvám na bázi TiAlN a to na hodnotu cca 0,3.

AlTiSiN - Nanokompozitní systém AlTiSiN tvořený základní vrstvou s vysokou tvrdostí a povrchovou vrstvou s vysokou tepelnou i chemickou stabilitou. Univerzální povlak s širokou škálou aplikací jak pro oblasti obrábění, tak i pro stříhání, lisování.

Při nasazení nástrojů s těmito povlaky volíme střední až vysoké řezné rychlosti, nasazujeme pro přerušovaný i nepřerušovaný řez. Vhodné pro obrábění běžných i nerez ocelí (i kalených), litin, atd.

CrN - Nitrid chromu - Oxiduje za tvorby oxidu Cr_2O_3 (náhradou dusíku kyslíkem) za současného uvolňování N do prostředí. Oxidický film Cr_2O_3 si uchovává značné elastické vlastnosti i za vysokých teplot, vytváří celistvou ox.vrstvu na povrchu vrstvy. Vlivem teplot je vrstva náchylná k rekrytalizačním procesům, což vede ke zhoršení mechanických vlastností.

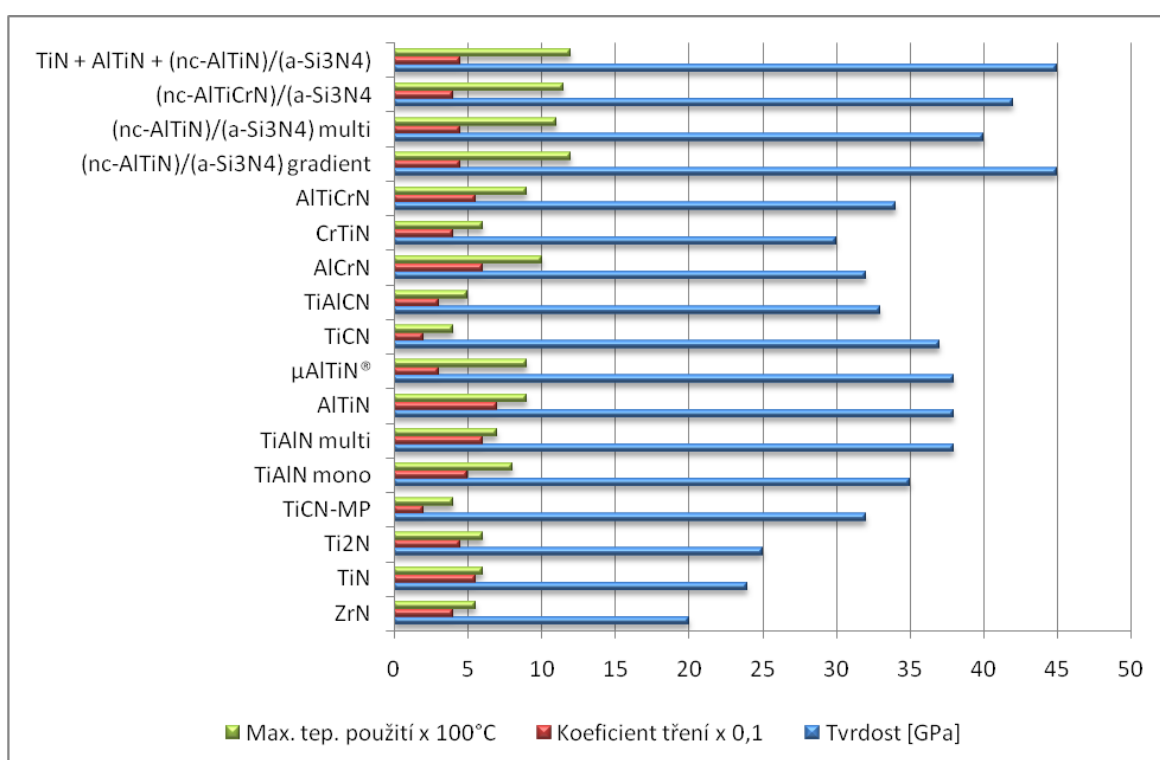
Použití na střížné a tvářecí nástroje z méně kvalitních ocelí, nejvýhodnější použití při teplotách v rozmezí 190 až 220°C. Povlak se vyznačuje zvláště svojí nižší tvrdostí kolem 18 GPa. Jeho výhodou je schopnost odolávat ulpívání obráběného materiálu (adhezní ulpívání). Vrstva vhodná pro obrábění mědi a hliníku.



Obr. 4.18 Mikrostruktura z příčného výbrusu vrstvy CrN zahřáté na 800°C ¹⁵

Ti₂N - Vrstva vhodná pro dokončovací operace, určená pro obrábění korozivzdorných ocelí. Použití je možné nejen při soustružení, frézování atd., ale i stříhání, tváření za studena atd. Řezné podmínky je nutné nastavovat s přihlédnutím ke složení obráběného materiálu.

MoS₂ - Vyznačuje se velice nízkou tvrdostí. Její použití je zejména v kombinaci s vrstvou PLATIT, která má naopak vysokou tvrdost. Tuto kombinaci je možno doporučit pro obrábění hliníku, titanu, niklu, ušlechtilých kovů a mědi. Použití vrstvy je vhodné pro obrábění za studena nebo při minimálním chlazení. Vyznačuje se dále odolností proti přilnutí částecek na povrch nástroje a proto je vhodná všude tam, kde hrozí vznik studeného sváru.



Graf 4.11 Teplota použití, tvrdost a koeficient tření různých typů povlaků

Tab. 4.1 Teplota použití, tvrdost a koeficient tření různých typů povlaků

Typ vrstvy	Tvrдость [GPa]	Koeficient tření	Max. tep. použití
ZrN	20	0,4	550
TiN	24	0,55	600
Ti2N	25	0,45	600
TiCN-MP	32	0,2	400
TiAlN mono	35	0,5	800
TiAlN multi	38	0,6	700
AlTiN	38	0,7	900
μAlTiN®	38	0,3	900
TiCN	37	0,2	400
TiAlCN	33	0,3	500
AlCrN	32	0,6	1000
CrTiN	30	0,4	600
AlTiCrN	34	0,55	900
(nc-AlTiN)/(a-Si3N4) gradient	45	0,45	1200
(nc-AlTiN)/(a-Si3N4) multi	40	0,45	1100
(nc-AlTiCrN)/(a-Si3N4)	42	0,4	1150
TiN + AlTiN + (nc-AlTiN)/(a-Si3N4)	45	0,45	1200

Tab. 4.2 Doporučené užití vrstev firmy Czech Coating a jejich vlastnosti ²¹

Doporučované užití vrstev							
Materiál	Soustružení	Frézování	Vrtání	Vystružování	Závitování	Stříhání	Tváření
Ocel nelegovaná							
Ocel<1000N/mm ²	AITIN	AITIN, TiCN	AITIN, TiAlN	AITIN	TiN	TiCN, AITIN+PLC	TiCN
Ocel>1000N/mm ²							
Ocel 45-65 HRC	AITIN, TiCN	AITIN	AITIN, TiAlN	AITIN	TiCN	AITIN(+PLC)	AITIN(+PLC), TiCN
Nerezová ocel	AITIN (+PLC)	AITIN (+PLC)	AITIN	AITIN (+PLC)	TiCN, AITIN+PLC	AITIN+PLC	AITIN+PLC
Litina GG, GGG	AITIN	AITIN	AITIN	AITIN	AITIN, TiCN	AITIN(+PLC)	
Al, Al slitiny	AITIN+PLC, CrN	AITIN+PLC, CrN	AITIN+PLC	AITIN+PLC	TiCN, AITIN, (+PLC)	AITIN(+PLC)	AITIN+PLC
Ti, Ti slitiny	AITIN	AITIN, TiCN	AITIN	AITIN			
Cu, Cu slitiny	CrN	CrN	CrN	CrN	CrN	CrN	CrN
Nabízené druhy vrstev a jejich parametry							
Vrstva	Struktura	Barva	Tloušťka (um)	Mikrotvrdost (0,05 HV) /1	Koeficient tření proti oceli	Teplota při depozici	Max.teplota použití
TiN	monovrstva	zlatá	1-5 um	2300	0,4	<500	600
TiN	monovrstva	zlatá	1-2 um	2000	0,4	150/250	600
TiCN	gradientní	šedá	1-4 um	3000	0,4	<500	400
TiAlN	multivrstva	fialová	1-4 um	3000	0,4	<500	800
AITIN	monovrstva	černá	1-4 um	3300	0,4	<500	900
CrN	monovrstva	kovová	1-4 um	1750	0,4	<500	700
PLC	gradientní	šedá	<1 um	1200-2000	0,15-0,2	<500	300

Tab. 4.3 Vlastností a doporučených použití povlaků firmy Czech Coating ²¹

Materiál	Soustružení	Frézování	Vrtání	Vystružování
Ocel<1000N/mm ²	AITIN, TiAlN	AITIN, TiAlN	AITIN, TiAlN	AITIN
Ocel>1000N/mm ²		AlCrN *		
Ocel 45-65 HRC	AITIN	AITIN, AlCrN*	AITIN, TiAlN	AITIN
Nerezová ocel	AITIN (+PLC)	AITIN (+PLC)	AITIN	AITIN (+PLC)
Litina GG, GGG	AITIN	AITIN	AITIN	AITIN
Al, Al slitiny	AITIN+PLC, CrN	AITIN+PLC, CrN	AITIN+PLC	AITIN+PLC
Ti, Ti slitiny	AITIN	AITIN, TiCN	AITIN	AITIN
Cu, Cu slitiny	CrN, CrC	CrN, CrC	CrN, CrC	CrN, CrC

Materiál	Závitování	Stříhání	Tváření
Ocel<1000N/mm ²	TiN	TiCN, TiN	TiN, TiCN
Ocel>1000N/mm ²			
Ocel 45-65 HRC	TiCN	TiCN	TiCN
Nerezová ocel	TiCN, AITIN+PLC	AITIN+PLC	AITIN+PLC
Litina GG, GGG	AITIN, TiCN	AITIN (+PLC)	
Al, Al slitiny	TiN, TiCN, PLC	AITIN (PLC), CrN	AITIN+PLC, CrN
Ti, Ti slitiny			
Cu, Cu slitiny	CrN, CrC	CrN, CrC	CrN, CrC **

*HSC-frézování bez intenzivního chlazení ** CrC - za tepla

Tab. 4.4 Vlastnosti povlaků Oerlikon Blazers¹⁷

	Coating Material	Microhardness* (HV 0.05)	Friction coefficient* against steel (dry)	Max. service temperature (°C)	Coating colour
BALINIT® A	TiN	2,300	0.4	600	gold-yellow
BALINIT® ALCRONA	AlCrN	3,200	0.35	1,100	blue-grey
BALINIT® ALDURA	TiAlN + AlCrN-based	3,300	0.35 - 0.40	> 1,100	blue-grey
BALINIT® B	TiCN	3,000	0.4	400	blue-grey
BALINIT® C	WC/C (a-C:H:W)	1,500 / 1,000	0.1 - 0.2	300	anthracite
BALINIT® C STAR	CrN + a-C:H:W	1,000 / 1,500	0.1 - 0.2	300	anthracite
BALINIT® CNI	CrN	1,750	0.5	700	silver-grey
BALINIT® CROVEGA	CrN	1,750	0.5	700	silver-grey
BALINIT® D	CrN	1,750	0.5	700	silver-grey
BALINIT® DIAMOND CLASSIC	Crystalline diamond	10,000	---	600	grey
BALINIT® DIAMOND PLUS	Nanocrystalline diamond	10,000	---	600	grey
BALINIT® DLC	a-C:H	> 2,000	0.1 - 0.2	350	black
BALINIT® DLC STAR	CrN + a-C:H	> 2,000	0.1 - 0.2	350	black
BALINIT® FUTURA NANO	TiAlN	3,300	0.30 - 0.35	900	violet-grey
BALINIT® FUTURA TOP	TiAlN	3,300	0.25	900	violet-grey
BALINIT® HARDLUBE	TiAlN + WC/C (a-C:H:W)	3,000	0.15 - 0.20	800	dark grey
BALINIT® HELICA	AlCrN-based	3,000	0.25	1,100	copper
BALINIT® LUMENA	TiAlN	3,400	0.30 - 0.35	900	violet-grey
BALINIT® MICRAN	TiAlN	3,300	0.30 - 0.35	900	violet-grey
BALINIT® TRITON	a-C:H	2,500	0.10 - 0.20	350	black
BALINIT® X.CEED	AlTiN	3,300	0.4	900	blue-grey
BALINIT® X.CELL	TiCrN	2,100	0.5	700	dark grey

5 VLASTNOSTI POVLAKŮ NA NÁSTROJÍCH A JEJICH MĚŘENÍ

PVD vrstvy jsou dnes nedílnou součástí ve strojírenství. Tyto vrstvy díky požadavkům nových technologií, náročnosti výroby a požadavkům trhu neustále rozzrůstá. Volba správného povlaku je nedílnou součástí celého procesu, která je velmi důležitá a neodmyslitelná. Správně zvolená PVD vrstva zvyšuje užité vlastnosti nástroje. Mezi základní fyzikální vlastnosti vrstev patří tvrdost, tloušťka, drsnost, adheze a kluzné vlastnosti. Nejdůležitějšími chemickými vlastnostmi jsou odolnost vůči oxidaci, chemická a tepelná stabilita.

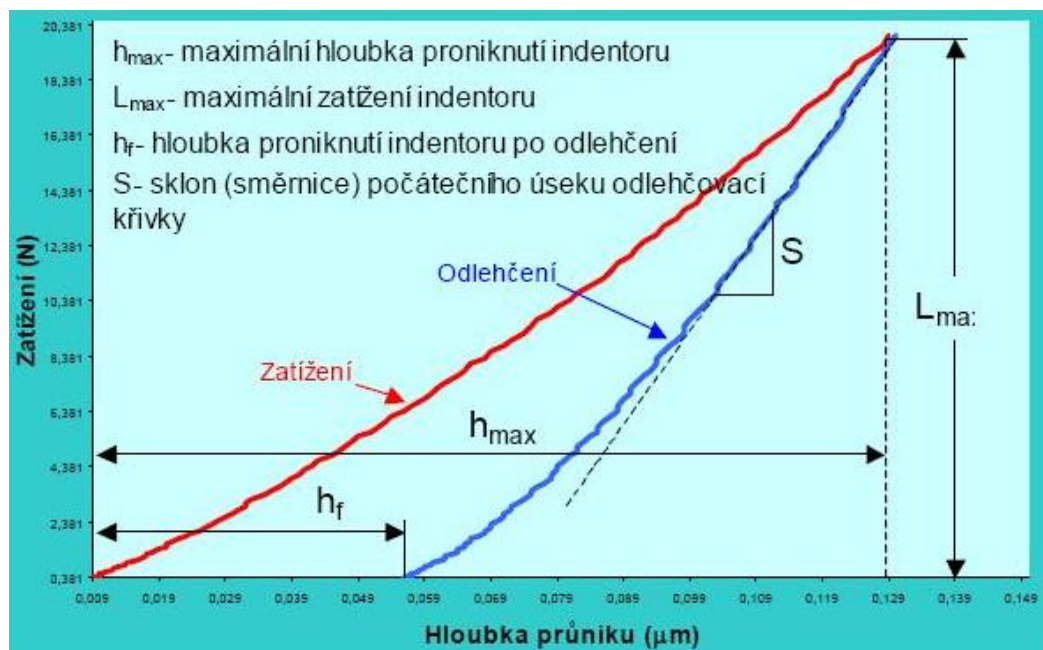
5.1 Tvrdost

Tvrdost je jedna ze základních hodnot charakterizující mechanické vlastnosti systému. Tvrdost je odpor materiálu proti lokální plastické deformaci nebo-li 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.

Tab. 4.1 Tvrdost běžných vrstev

Vrstva	Tvrdost [GPa]
TiN	24
TiCN	37
CrN	18
AlTiN	38
AlTiCrN	34
AlTiSiN	45

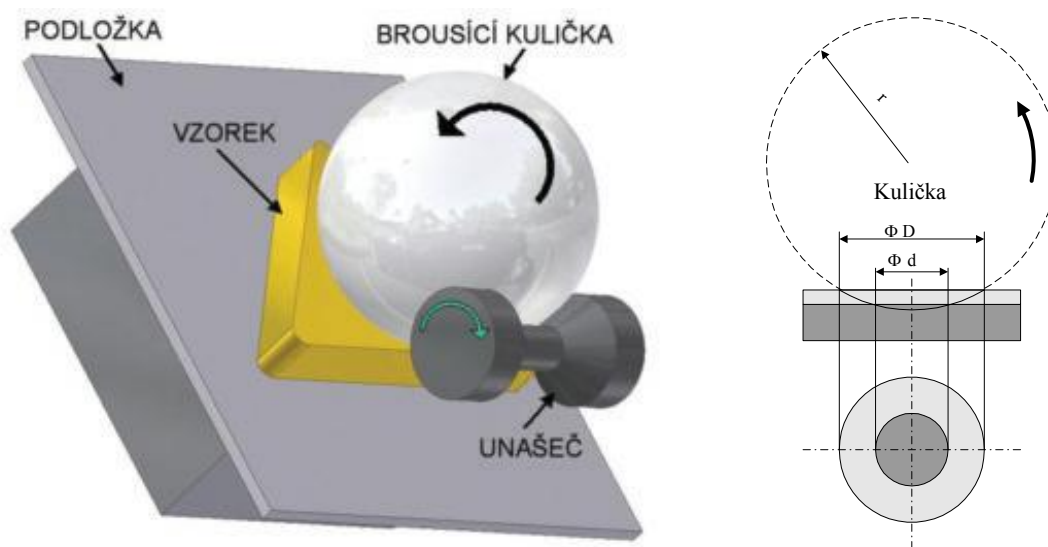
Při měření mikrotvrdosti je důležité zajistit, aby měřící hrot (obvykle Vickers) proniknul do hloubky vrstvy maximálně 1/8 vrstvy. Velikost zatížení se obvykle volí v řádech mN a tím vzniká hloubka při takové zátěži pod 0,5 μm , aby hodnoty nebyly ovlivněny substrátem. Výsledky jsou téměř nemožné vyhodnocovat běžnými mikroskopy, proto se využívají speciální přístroje - mikrotvrdoměry na měření mikrotvrdosti. Stanovuje se hloubka průniku indentoru a zachycují tzv. zatěžovací a odlehčovací křivku viz obrázek 4.1.

Obr. 4.1 Zatěžovací a odlehčovací křivka¹⁶

Přístroje využívající jiné principy měření jsou zatíženy velkou chybou způsobenou rozdílem mezi maximální hloubkou vtisku a skutečně zjištěnou velikostí zbytkového vtisku. Tvrdosti vrstev se udávají v GPa nebo zastarale v kg/mm^2 .

5.2 Tloušťka

Z hlediska praktické aplikace je volba tloušťky povlaku na břitech řezných nástrojů jednou z nejdůležitějších charakteristik. Ta může v konečném důsledku ovlivňovat jak trvanlivost nástroje, tak i řezné síly během obrábění. Zjednodušeně řečeno – tloušťka povlaku musí být opravdu „ušita na míru“ předpokládanému použití obráběcího nástroje. Např. optimální vrstva na závitnících se pohybuje kolem 1 až 2 μm a je výrazně nižší než u odvalovacích fréz, kde tloušťka vrstvy na břitu nástroje může být i 8 μm . Tloušťka vrstvy na břitu nástroje se výrazně liší od tloušťky vrstvy na rovných nebo válcových plochách. Současně je ovlivňována průměrem nástroje a způsobem naložení svlakovací komory. V současnosti neexistuje pro vyhodnocení přesná, jednoduchá a zároveň nedestruktivní metoda. Pro měření rovinných částí nástrojů se využívá tzv. kalotester. Princip měření je jednoduchý. Z průměru kuličky a mikroskopem změřených kulových vrchlíků je možné výpočtem stanovit tloušťku nanesené vrstvy. Toto měření je z důvodů vyšší přesnosti vhodné provádět na vyleštěných etalonech. Pro stanovení tloušťky na břitech se používá klasická metalografie založená na leštění vybrané části substrátu.¹



Obr. 4.1 Pomocí rotující kuličky s diamantovou pastou dochází k proleštění nanesené vrstvy a části povrchu substrátu¹



Obr. 4.2 Vrstva povlaku proleštěná kalotestem¹

5.3 Drsnost

Výsledná drsnost je ovlivněna způsobem nanesení, povlakem kvalitou opracování nástroje před a někdy i po povlakování.

Při měření drsnosti se neuvažují vady povrchu, tj. náhodné, ojediněle se vyskytující a nepravidelné nerovnosti (rysky, trhlinky, důlky apod.), které vznikají v důsledku vad materiálu, poškození aj.

Drsnost vrstev je zvýšena díky ulpívajícím makročástic na povrchu, které vznikají během povlakovacího procesu. Tyto děje zvyšují řezné síly a, tudíž dochází k mechanickému a tepelnému namáhání břitu nástroje. Tento negativní jev lze řešit dodatečnou úpravou nástroje po povlakování.

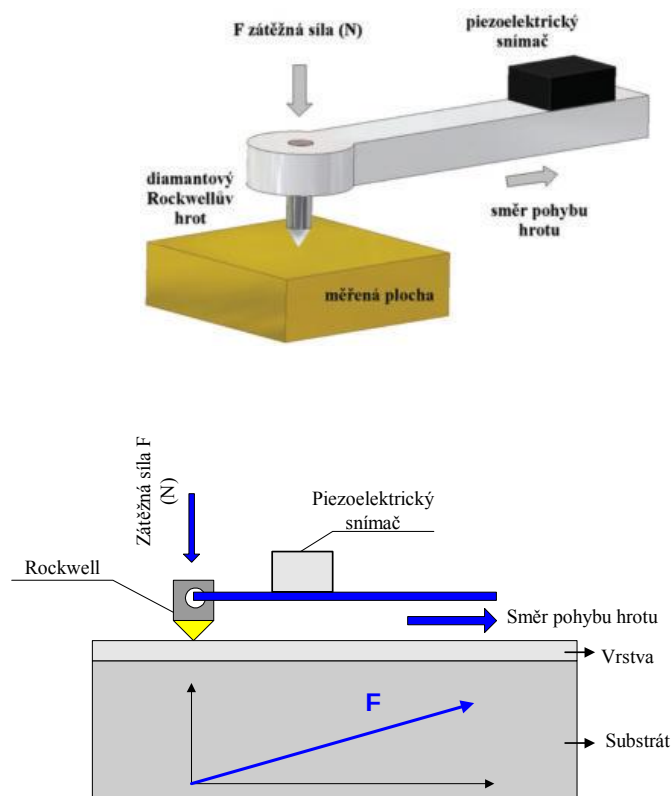
5.3.1 Drsnost vrstev a řezné zkoušky

Funkcí tvrdých otěruvzdorných vrstev je mimo jiné zlepšit kluzné vlastnosti nástroje a tím snížit např. řezný odpor. Parametrem, který ovlivňuje významně i následné "zklidnění" chodu řezného nástroje, je drsnost povrchu vrstvy. Běžně připravované PVD vrstvy TiN a TiAlN dosahují hodnot $R_a = 0,20 - 0,30 \mu\text{m}$. To platí především pro technologie založené na obloukovém odpařování materiálu. Zlepšení hodnot R_a může přinést velmi výrazný efekt u některých aplikací - např. závitování a vrtání, a proto se řeší na celém světě problém tzv. filtrace mikročástic nebo jejich úplné potlačení. Tato technologie umožňuje zlepšit výslednou drsnost vrstvy TiN z původních $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ na $0,05 \mu\text{m}$.¹

5.4 Adheze

Nejlepší funkčnost otěruvzdorné vrstvy dojde pouze v případě zajištění perfektní adheze k nástroji. To znamená, že bez dokonalé přípravy nástroje před povlakováním nelze dosáhnout kvalitního povlaku.

Standardní metodou pro vyhodnocování přilnavosti povlaků je tzv. scratch-test. Pro měření se využívá principu postupně se zvyšující zátěžné síly na diamantový Rockwellův hrot při současném posouvání špičky hrotu po měřené vrstvě. S ohledem na běžné hodnoty adheze se používá zátěžná síla v rozsahu 20 – 120 N. Při měření vrstvy je možné detekovat akustickou emisi na hrotu. Dosažením kritické hodnoty zátěžné síly dojde k odtržení vrstvy od substrátu. To je doprovázeno skokovým zvýšením hodnoty akustické emise.¹

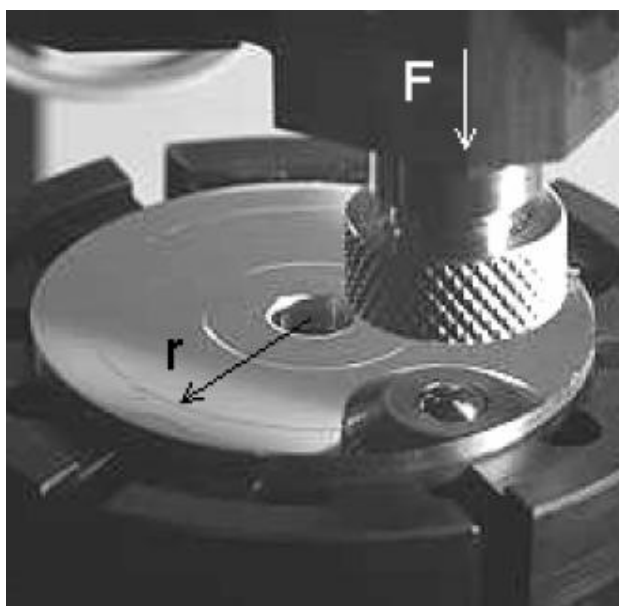
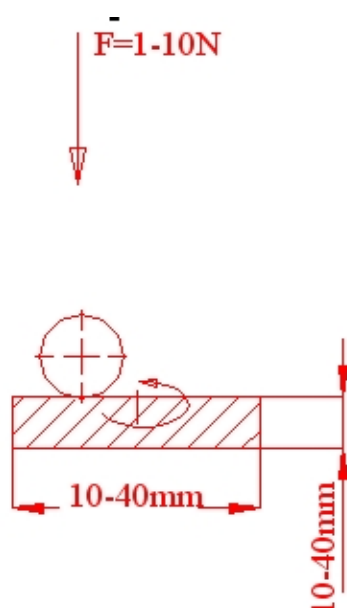


Obr. 4.41 Princip scratch-testeru (1)

Hodnota adheze větší než 60 N zajišťuje, že při běžných aplikacích nedojde ke stržení či odloupení vrstvy. Adheze povlaku závisí mimo jiné i na jeho celkové tloušťce a podkladovém materiálu.¹

5.5 Kluzné vlastnosti

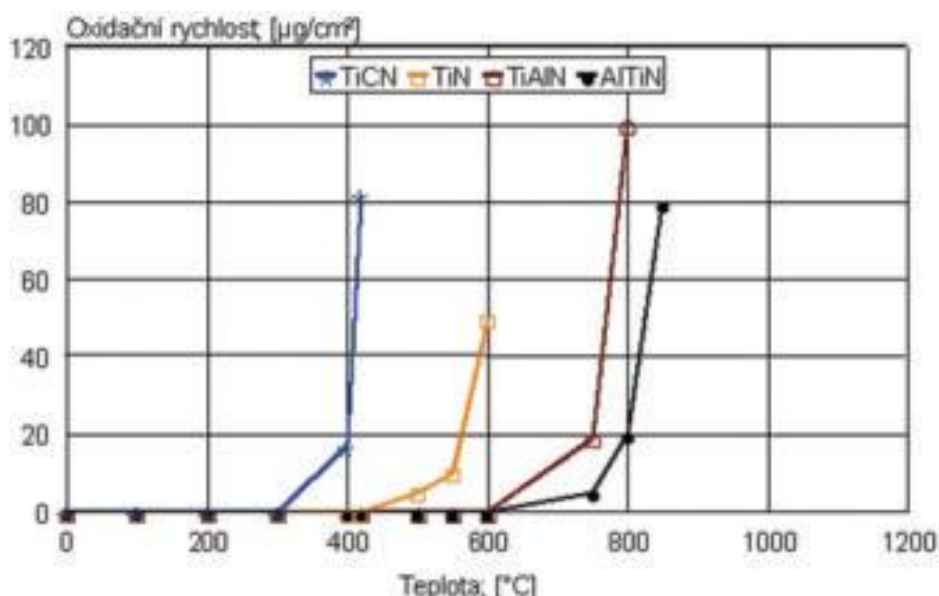
Během obrábění dochází se stoupající teplotou ke zhoršování fyzikálně-chemických vlastností podkladového materiálu. Snížením frikčních sil, vlivem povlaku, se výrazně omezuje tepelné zatížení nástroje. Pro změření kluzných vlastností je používaným standardem v laboratoři tzv. pin-on-disk, resp. ball-on-disk. Testovaná vrstva je nanесena na zkušební vyleštěný vzorek a následně umístěna na otočný stolek. Hrot, resp. kulička definovanou silou tlačí na rotující vzorek s testovaným povlakem. Měří se otěr kuličky, frikční koeficient (0,1-0,5 pro běžné povlaky), otěr vrstvy, profil otěru apod. Při měření pin-on-diskem se používá zátěžné síly v řádu jednotek N, zatímco při řezných zkouškách jsou řezné síly o dva řády vyšší. Navíc teplota generovaná při běžných řezných podmínkách je o několik set stupňů vyšší než při testech pomocí pin-on-disku. 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.¹



Obr. 4.3 Test pin-on-disk²⁰

5.6 Odolnost vůči 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 provázána poklesem tvrdosti vrstvy, neboť se vytvářejí jiné typy mřížových vazeb.¹



Graf 4.1 Závislosti oxidační odolnosti běžných vrstev na teplotě ¹

Každá PVD vrstva je charakterizována maximální teplotou použití, jejíž mez je dána právě odolností proti 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. Podmínkou ovšem je, že testovaný vzorek musí být celoplošně pokryt zkoumanou vrstvou. ¹

5.7 Chemická stabilita

Odolnost vrstvy vůči chemické reakci s obráběným materiálem, zejména za vyšších teplot vznikajících během obrábění. Chemická stabilita vrstvy se může měnit s druhem obráběného materiálu a s řeznými podmínkami.

Klasickým případem je diamantová vrstva, jejíž chemická stabilita je naprosto nevyhovující při opracování ocelí a vynikající při obrábění neželezných materiálů. ¹

5.8 Tepelná stabilita

Povlak se vytváří za intenzivního iontového bombardování a je termodynamicky nestabilní. Při zvýšení teploty vlivem obrábění může docházet ke změně vnitřní struktury, např. nárůstem krystalitů, přechodem k jinému krystalickému uspořádání, změnou vnitřního napětí apod. Tyto charakteristiky, které se navenek projevují změnou mechanických vlastností, se vyhodnocují spolehlivě pomocí TEM (transmisní elektronová mikroskopie) či XRD (rentgenová difrakce). Takové analýzy jsou náročné na přístrojové vybavení a je možné je provádět jen na specializovaných pracovištích. Nejvyšší tepelnou stabilitu mají v současnosti nanokrystalické nanokompozity. ¹

Uvedené vlastnosti povlaků a jejich měření v této kapitole přispívají ke zvýšení jejich vlastností a z výsledků pak lze optimalizovat řezné podmínky a pro konkrétní danou řeznou aplikaci nastavit optimální vlastnosti povlaků.

6 TECHNOLOGIE ÚPRAV NÁSTROJŮ

Proces povlakování obsahuje mnoho aspektů, které jsou nedílnou součástí postupu, jako je:

- Příprava nástrojů před a po povlakování
- Druh povlaku (charakterizace, vlastnosti)
- Aplikace (nanášení)

6.1 *Příprava nástrojů před a po povlakování*

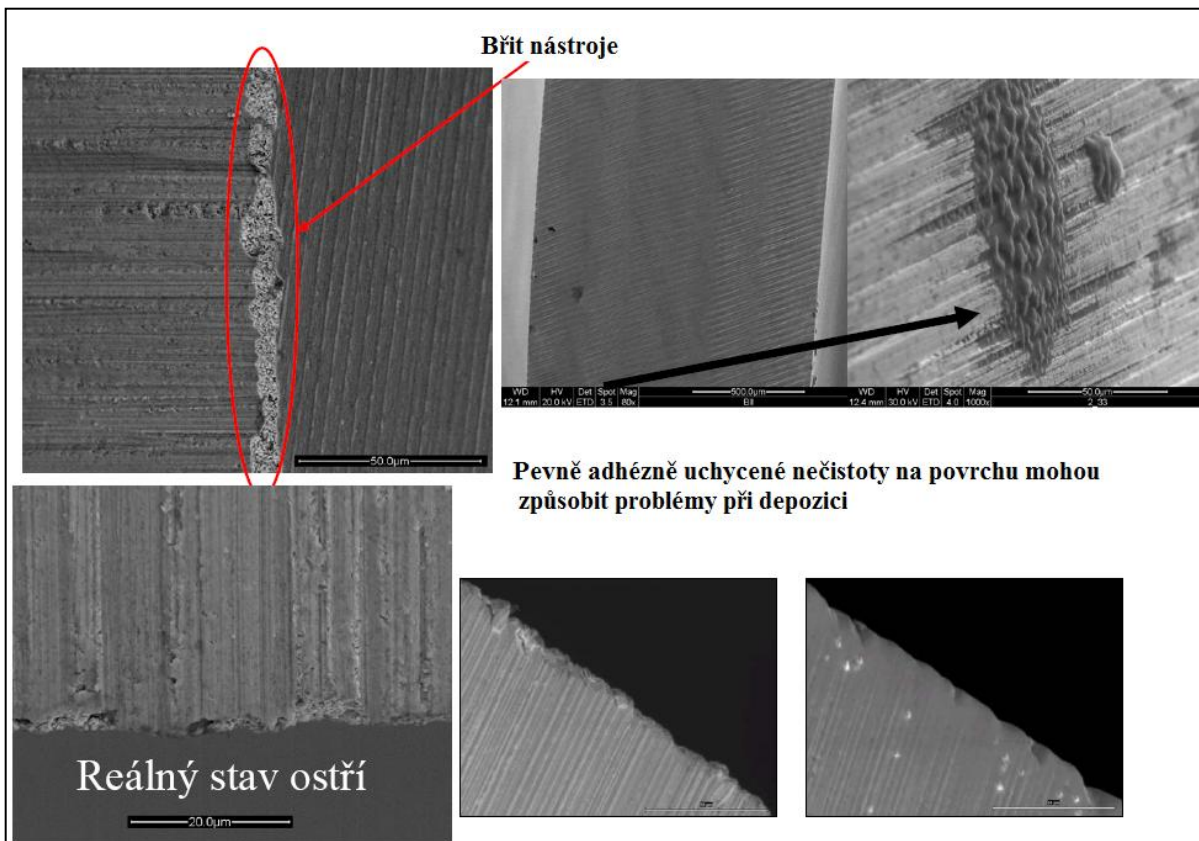
Zásadní vlivy na úspěch povlakovaného nástroje jako je funkčnost, vlastnosti, životnost atd. jsou mezioperační úpravy, které zahrnují jak výběr vhodného povlakovaného materiálu, tak i vybroušení nástroje a úpravou před povlakováním.

6.2 *Výběr materiálu*

Podstatný rozdíl ve volbě materiálu hraje roli pro úpravy před povlakováním, jaká technologie PVD se zvolí. Mezi materiálem HSS a slinutým karbidem jsou rozdíly v odolnosti vůči teplotě, chemickým procesům a abrazivnímu otěru. Povlakovací teploty pro HSS jsou do 450 °C, u slinutých karbidů do 600 °C. Materiálů ze slinutých karbidů je celá řada, tomuto se pochopitelně musí přizpůsobit chemické úpravy před povlakováním a popřípadě i iontové čištění v průběhu povlakování.

6.3 *Broušení nástroje*

Vybroušení jako takové ovlivňuje následnou operaci povlakování, ale i nástrojové vlastnosti bez povlaku. Zde hrají roli důležité aspekty, jako jsou historie nástroje, kvalita broušených ploch a veškeré povrchové vlivy během výroby. Kvalita břitu a broušených ploch je z pohledu povlakování velmi důležitá pro dobrou adhezi vrstvy. Pokud má břit či povrch ostré nerovnosti, dochází na nich k odlupování vrstev. Obsahem standardního čištění některých HM nástrojů je i pískování nebo jiná mechanická úprava, která má za cíl odstranění nečistot, nikoliv úpravu břitů. Tyto standardní postupy mají za úkol zvýšit adhezi povlaků na nástrojích. V některých případech se volí i následná mechanická úprava po povlakování, která má za cíl snížit drsnost povrchu.

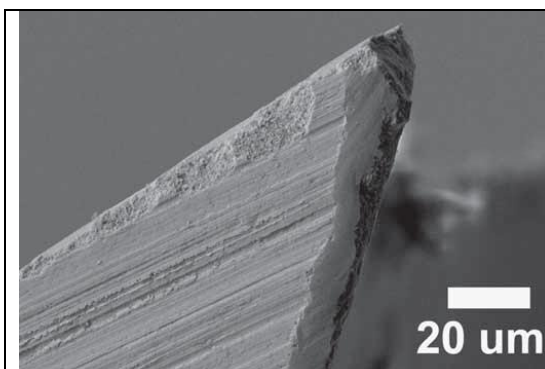
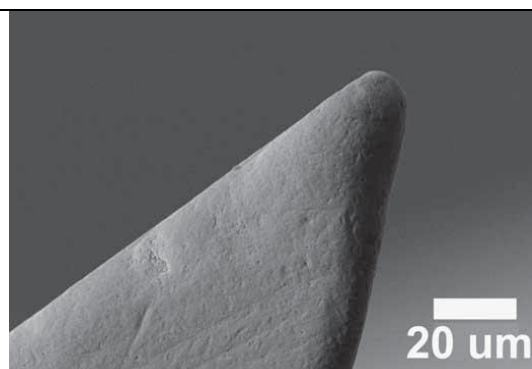
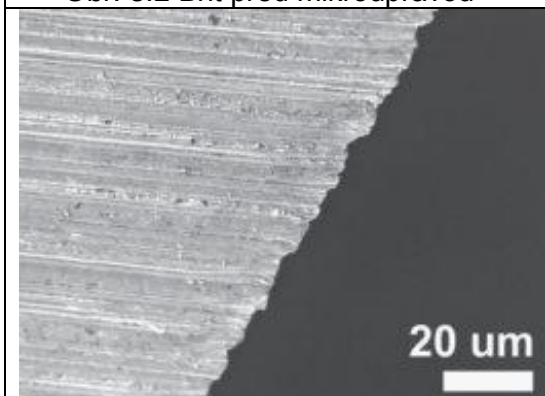
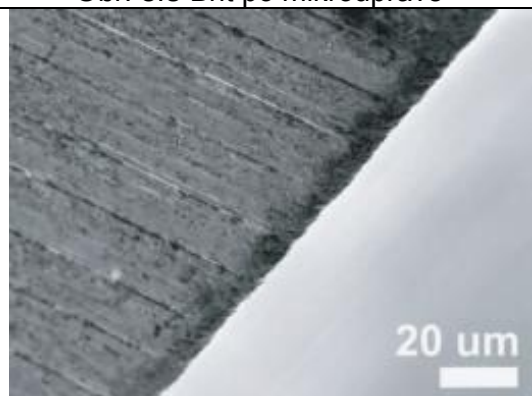
Obr. 5.1 Stav povrchu a ostří³

Další úpravou před povlakováním je i běžné mokré čištění někdy pískováním a etapy fyzikálního iontového čištění. Tyto metody mají za úkol odstranění nečistot ne úpravu břitu! A někdy se volí i mechanická úprava za účelem snížení drsnosti.

6.4 Úpravy nástrojů před povlakováním

6.4.1 Omílání v granulátech

Mikrogeometrie břitů nástrojů má zásadní vliv jak na životnost nástroje, tak i na způsob otěru a řezné síly vznikající při obrábění. K odlupování na ostrých přerušovaných hranách velmi účinně zabráni právě omílání v různě koncipovaných omílacích zařízeních s vhodně voleným granulátem a abrasivem. Jako granulát může být použita široká řada materiálů, a to od granulátů na bázi oxidů některých kovů přes keramická tělíska až po drcené skořápky ořechů. Po vybroušení HM nástrojů jsou břity většinou nerovnoměrné, přibližně v měřítku použitých brusných zrn. Omílací zařízení s planetovým pohybem jsou vhodná pro axiální nástroje. Výsledný efekt se projeví jak v dobré adhezi PVD vrstvy na břitech nástroje, tak i ve výsledném výkonu či životnosti nástroje. Metoda mikroúpravy břitů se může provádět i po aplikaci PVD vrstvy.

Obr. 5.2 Břit před mikroúpravou²Obr. 5.3 Břit po mikroúpravě²Obr. 5.4 Břit běžného SK nástroje bez úpravy²Obr. 5.5 Břit SK nástroje po mikroúpravě omíláním²

6.4.2 Odmaštění

Odstranění konzervačních a jiných mastných látek z povrchů nástrojů.

6.4.3 Mokrý čištění

Oplachy, tlakové oplachy, ultrazvuk, elektrochemické metody, vakuové sušení (vyhřátí resp. odpaření těkavých kapalin).

6.4.4 Pískování

Pískováním lze odstranit pevně ulpívající nečistoty na povrchu případně i nečistoty uchycené v mírně pórovitém povrchu.

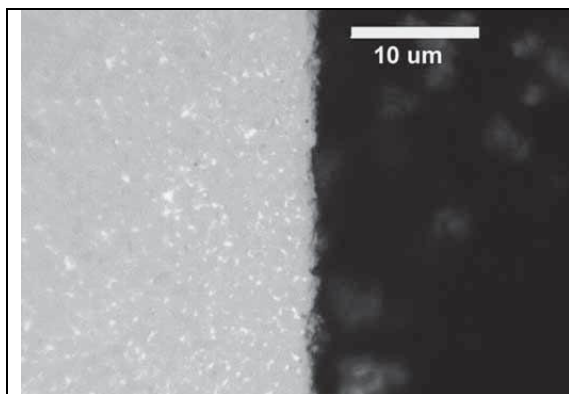
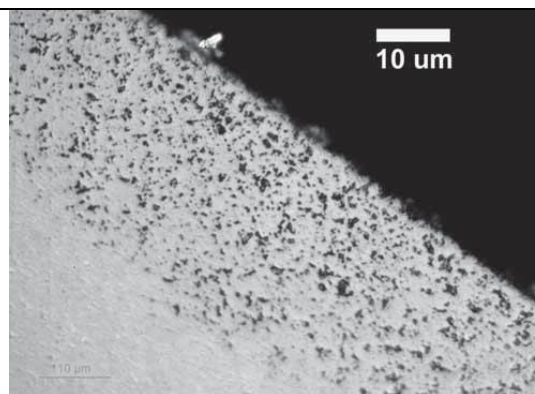
6.4.5 Odjehlení

Používá se kartáčování nebo ruční odjehlení. Nevhodné jsou např. kartáče s plastovým vlasem (nosičem abraziva), případně některé mosazné kartáče. Místo odjehlení je také možnost použít technologii omílání.

6.4.6 Stripping

Odstraňování starých povlaku. Stripping je prováděn chemickou a elektrochemickou cestou a využívá oxidačních činidel (nejčastěji peroxidu vodíku, vody a tetranatriumdifosfátu) za pokojové teploty, popř. účinku elektrického proudu. Nevhodně volená technologie může způsobit narušení struktury materiálu vyleptáním kobaltu ze struktury. To je také nejzásadnějším

problémem této technologie. Kobalt, jehož obsah v SK se běžně pohybuje mezi 6 – 12 %, reaguje velmi citlivě na kyselé či zásadité prostředí. Naleptání kobaltu do hloubky 5 μm způsobí vážné problémy při následném povlakování i použití nástrojů.

Obr. 5.6 Kvalitní stripping²Obr. 5.7 nekvalitní stripping²

6.5 Čištění nástrojů v průběhu PVD procesů

Účelem tohoto čištění je zajištění dokonalé adheze povlaku k nástroji. První fází je základní odplynění nástrojů předehřevem ve vakuu. V případě obloukových technologií následuje doutnavý výboj v argonu a iontové čištění pomocí urychlených iontů kovu (bombardování) (Ti, Cr,...). Po jejich aplikaci je povrch nástroje očištěn na atomární úrovni.

6.6 Leštění po povlakování

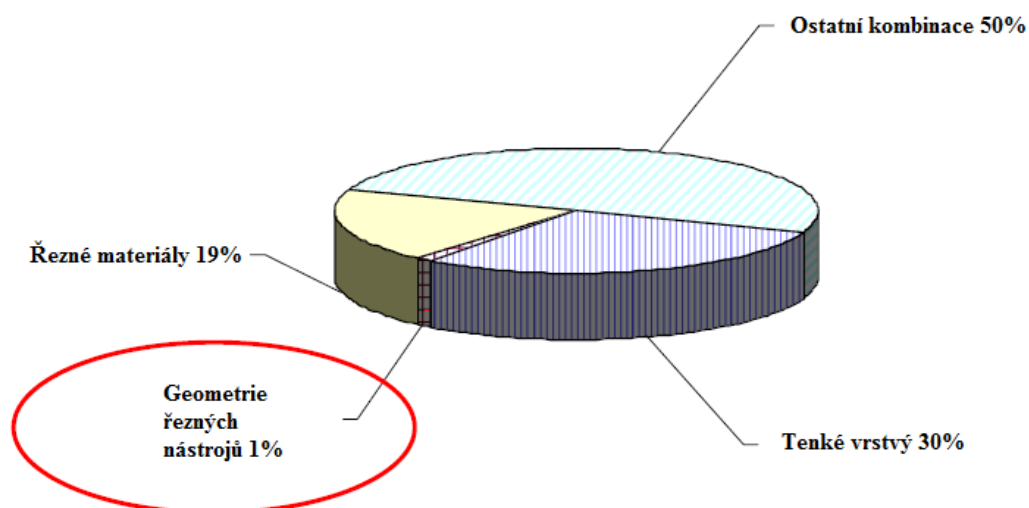
Lešticí technologie zajišťují snížení drsnosti vzniklé povlakováním, což vede ke snížení řezných a tvářecích sil tudíž k možnosti zabránění nalepování kontaktního materiálu. Dále dochází ke snížení teploty řezu a tím prodloužení životnosti řezných nástrojů a větší odvádění tepla pomocí třísek. Na rozdíl od přípravy břitů před povlakováním, nesmí dojít k narušení povlaku (odtržení nebo odření vrstvy).

Vedle leštění pomocí tkanin s abrazivem je používané i leštění v granulátech. V takovém případě se většinou používají nižší koncentrace abraziva, tak aby docházelo k dolešťování povrchu nikoliv k zaoblování. Jako další metody dolešťování je možné uvést kartáčování a to jak syntetickými kartáči obsahujícími brusivo přímo ve vláknech, tak i kartáči přírodními. Ve druhém případě se brusivo přidává ve formě lešticí pasty. Tento způsob úpravy břitů je poměrně rozšířen, na druhé straně jej lze jen s obtížemi aplikovat na velmi ostré nástroje jako např. závitníky.

Další metody jsou mikropískování a to ve dvou rozšířených formách – jako suché pískování či jako mokré. Jsou vhodné zejména pro leštění šroubovic nástrojů a pro odstraňování makročástic.

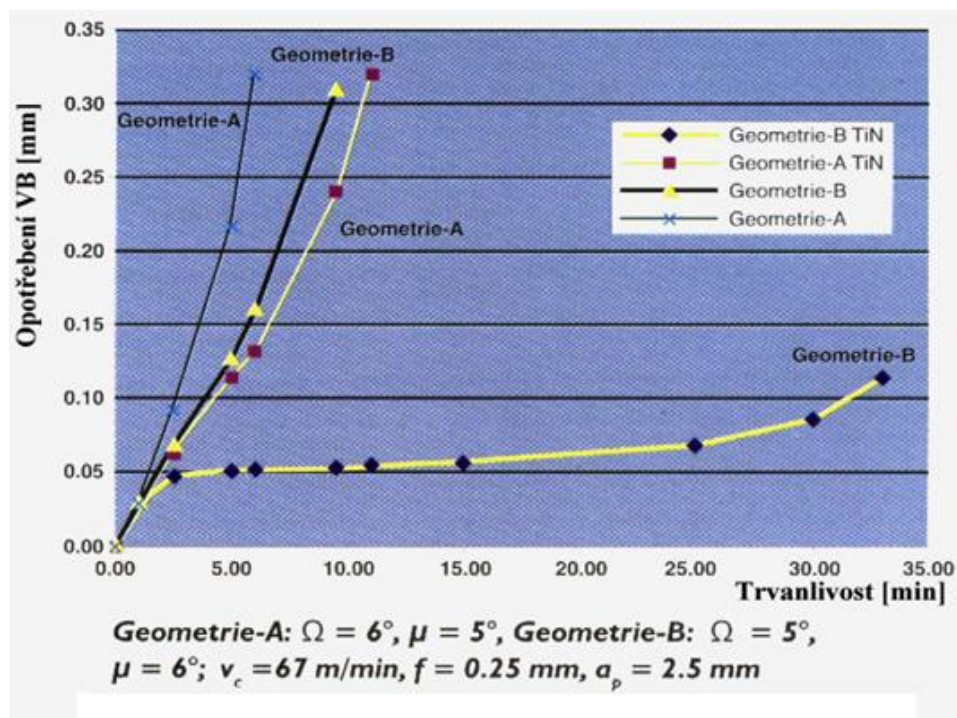
7 GEOMETRIE NÁSTROJE

Geometrie nástroje hraje také podstatnou roli a je často opomíjený faktor. Obrázek 6.1 ukazuje rozdělení hlavních nároků, které jsou kladeny na řezné nástroje.



Obr. 6.1 Rozdělení hlavních nároků patentových přihlášek v oboru řezných nástrojů v Německu. r. 2002 ³

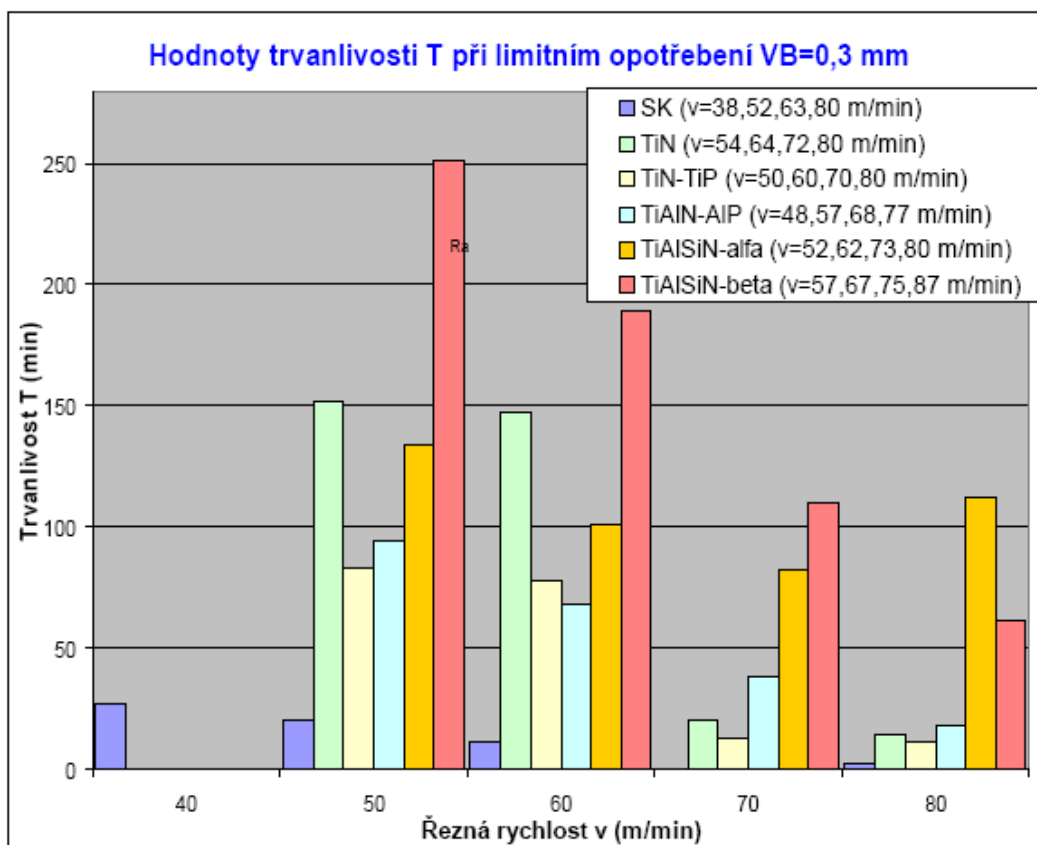
Změna geometrie nástroje způsobila výrazné zlepšení trvanlivosti.



Graf 6.1 Vliv geometrie nástroje na trvanlivost v průběhu obrábění ¹⁰

8 EKONOMICKÝ POHLED

V minulosti bylo privilegium ekonomika obrábění, pochopitelně je ekonomická stránka samozřejmostí, ale i kvalita, snadná obrobitelnost materiálů při dnešních nárocích a především ekologický dopad.



Graf 7.1 Trvanlivost nástrojů v závislosti na řezné rychlosti ³

Trendy vývoje, které jsou na moderní nástroje s progresivními vrstvami kladené:

- Větší trvanlivost nástroje (jako je využití v hromadné výrobě, automaty atd.)
- Obrobený povrch s vyšší kvalitou (lepší povrch při zachování ceny – vyšší kvalita)
- Obrábění s minimálním množstvím procesní kapaliny (ekologie, recyklace, skladování a cena)
- Odstranění „starých“ vrstev z nástrojů SK bez nutnosti následného přestřžení

8.1 Faktory ovlivňující proces obrábění

Mezi nejdůležitější faktory ovlivňující splnění úkolu je možno zařadit:
Zvýšené požadavky na obráběcí stroje:

- vysoká dynamická tuhost (soustavy stroj-nástroj-obrobek)
- vysoké otáčky vřetene
- vysoké posuvové rychlosti
- plynulá změna otáček a posuvů
- vysoká geometrická a pracovní přesnost

Požadavky na nástroj a obrobek:

druh povlaku (jeho vhodnost pro obrábění konkrétního materiálu atd.)

- vysoká tvrdost za tepla
- odolnost proti difuznímu opotřebení
- pevnost v tlaku a ohybu
- houževnatost
- zvolená geometrie nástroje
- druh nástroje
- použité chlazení

(zda je chlazení použito, druh chladicí kapaliny, její množství...)

- vlastnosti obráběného materiálu (obrobitelnost)

Technologická charakteristika obráběcího procesu

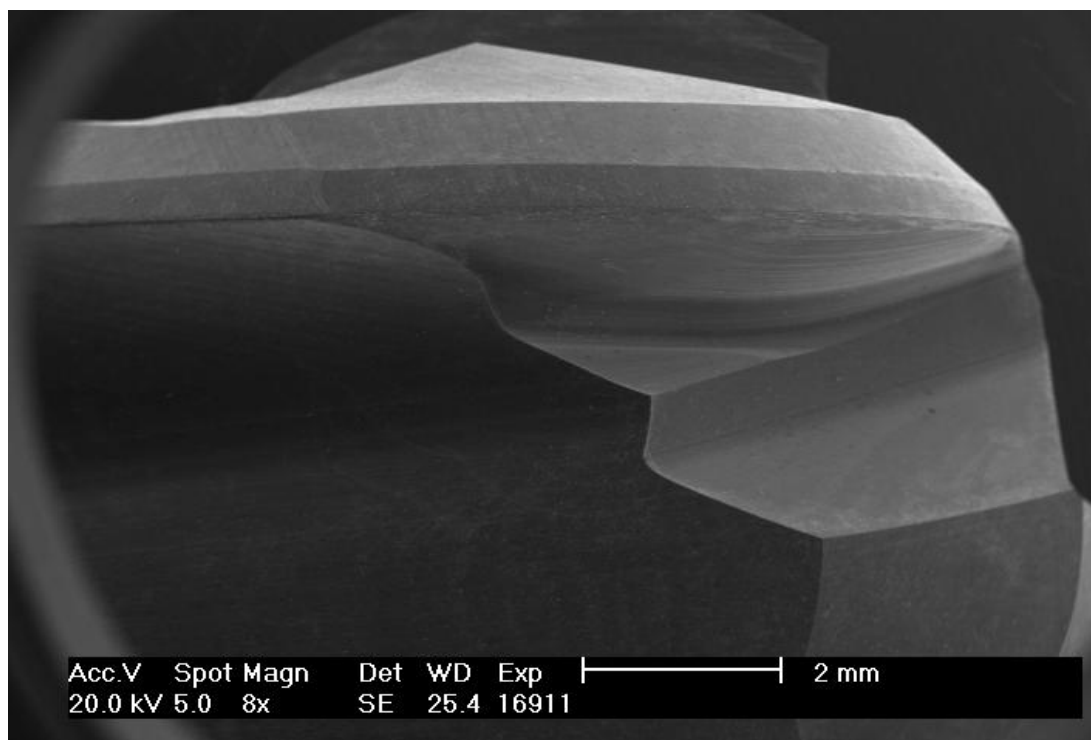
- vysoké teploty řezání
- vysoké tlaky v oblasti ostří nástroje
- vysoká rázová zatížení při přerušovaném řezu
- zvolená technologie obrábění (vrtání, soustružení, frézování atd.)
- zvolené řezné podmínky (velikost posuvu, otáčky atd.)

Vzhledem k takto velkému množství ovlivňujících faktorů je zřejmé, že povlakování je sice velice vhodná, ale zdaleka ne jediná podmínka k dosažení kvalitního, ekonomicky výhodného způsobu obrábění.

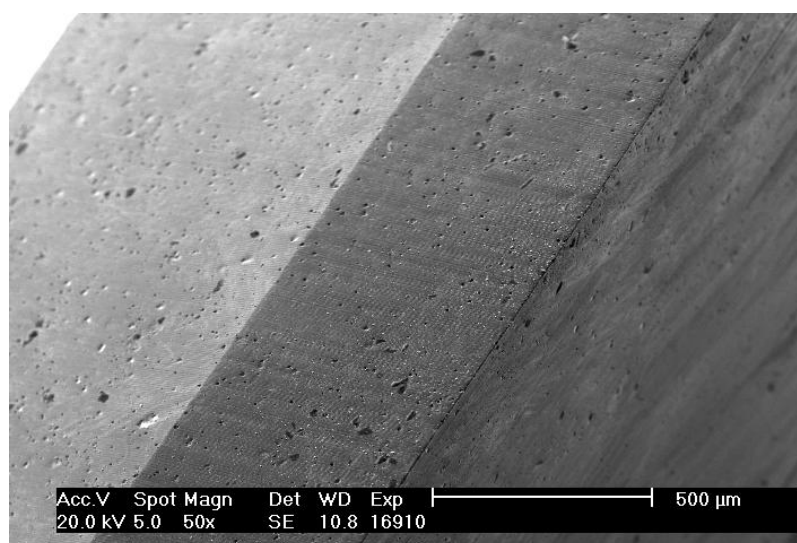
9 ANALÝZA ŘEZIVOSTI POVLAKOVANÝCH CELOKARBIDOVÝCH FRÉZ

9.1 Úvod

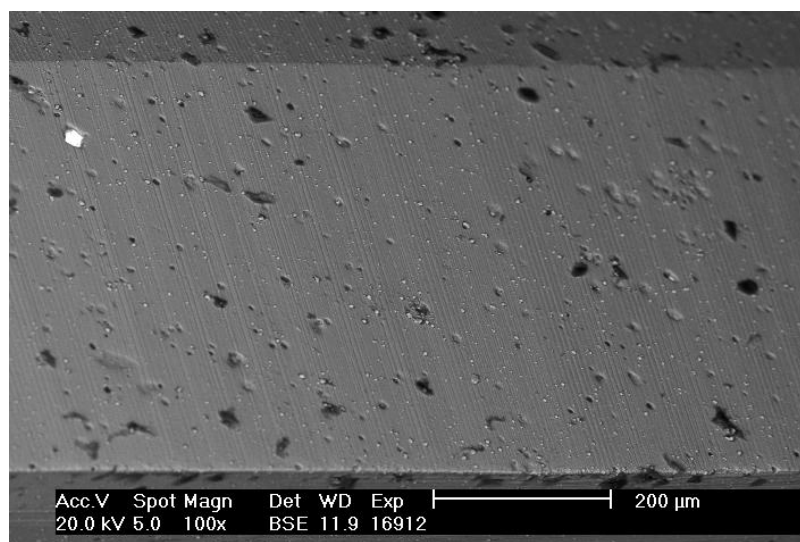
Hlavním motivujícím požadavkem výrobců nebo uživatelů nástrojů je zvýšení produktivity obrábění. Zvyšování životnosti nástrojů je samozřejmě také důležité, ale z ekonomického hlediska je prioritní zvyšovat produktivitu obrábění a snižovat náklady na chlazení včetně likvidace použitých řezných kapalin. Následující příklad frézování charakterizuje, jaké mohou být skutečné přínosy více sofistikovaných vrstev v náročnějších podmínkách. Rozdíly ve výkonnosti nástrojů s různými PVD povlaky se značně prohlubují v případě intenzivnějších řezných parametrů, které mají vliv na produktivitu obrábění. Z příkladu je patrné, že role vrstev s vysokou tepelnou a chemickou stabilitou roste se zvyšujícím se zatížením nástroje.



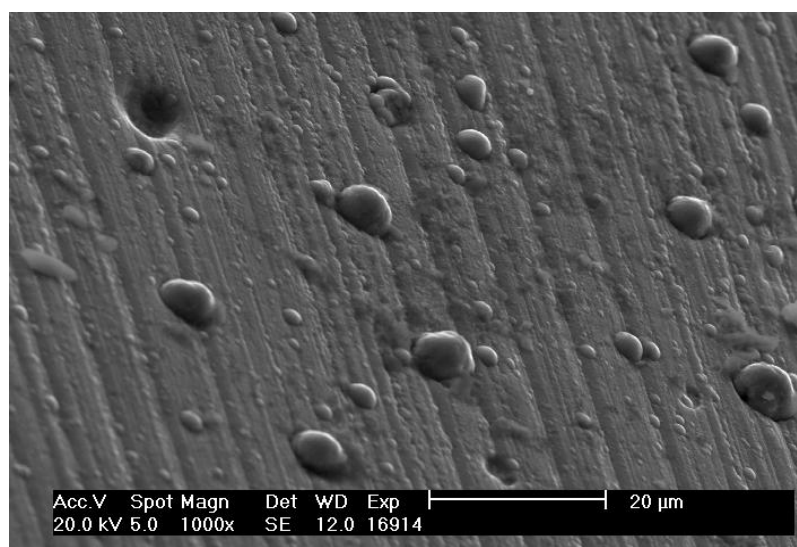
Obr. 8.1 Detail bříty čelní kulové frézy, zvětšení 8x



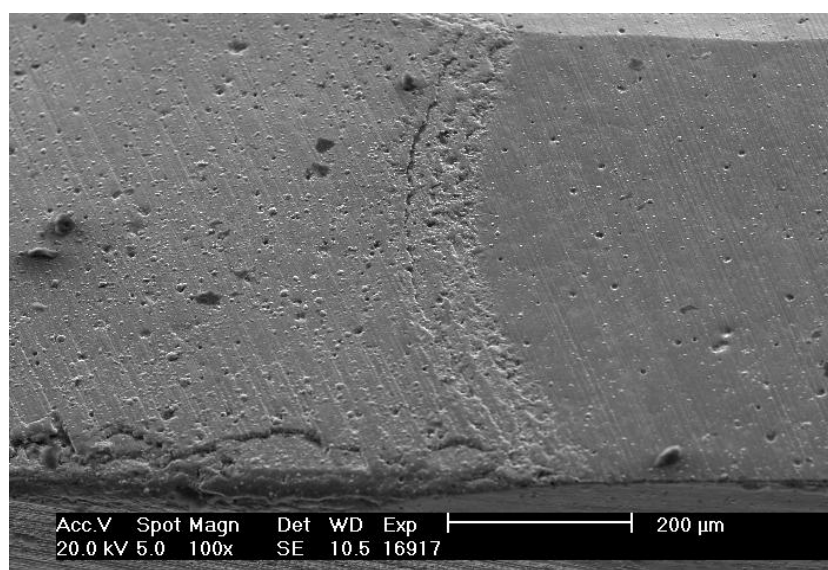
Obr. 8.2 Detail povrchu bříty, zvětšeno 50x



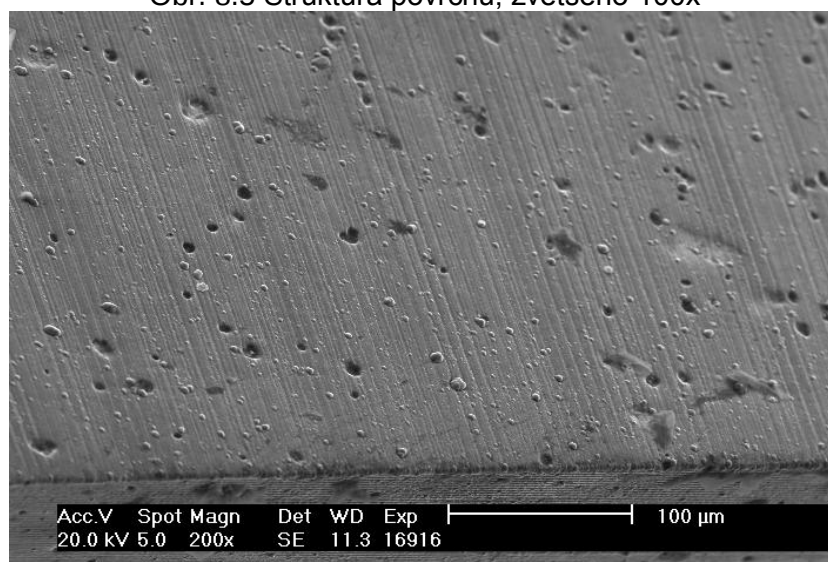
Obr. 8.3 Detail povrchu bříty, zvětšeno 100x



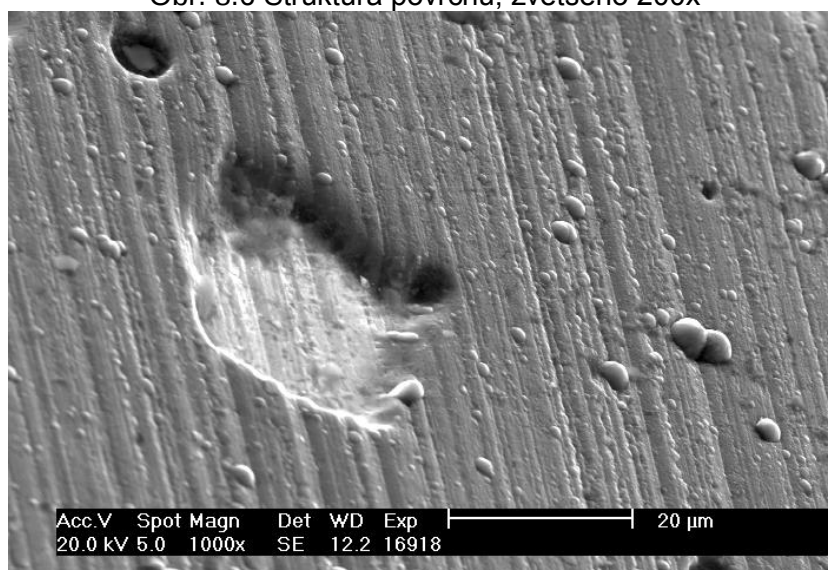
Obr. 8.4 Struktura povrchu, zvětšeno 1000x



Obr. 8.5 Struktura povrchu, zvětšeno 100x



Obr. 8.6 Struktura povrchu, zvětšeno 200x



Obr. 8.7 Struktura povrchu, zvětšeno 1000x

9.2 Cíl zkoušek

Cílem zkoušek bylo srovnání řezivostních vlastností kulových fréz čelních FW412.16.100.10, čtyřbřítých (2 břity ke středu), průměr Ø16, s poloměrem R8, celkové délky 100 mm a celokarbidových ve dvojím provedení:



Obr. 8.8 Čelní kulová fréza čtyřbřítá

a) celokarbidová fréza (referenční)

b) kulová fréza s:

1. nc-gradientním povlakem (omílání v granulátech s brusnou pastou)
2. nc-monovrstva (omílání v granulátech s brusnou pastou)
3. nc-multivrstva (omílání v granulátech s brusnou pastou)
4. nc-monovrstva (standartní úprava břitu)

9.3 Obecný popis testů, metodiky měření a analýzy měřených hodnot

9.3.1 Materiál obrobku

Pro testování byl použit jeden druh materiálu a to ocelolitina GGG70 (ČSN 422307, tvárná litina s kuličkovým grafitem), dodaná v před obrobeném polotovaru o rozměrech cca 90x80-300 mm. Povrch nebyl zcela prost licí kůry, inkluzí a dalších povrchových vad.

9.3.2 Upnutí řezných nástrojů

Čelní frézy byly vsunuty s minimálním vyložením do hydraulického upínače RÖHM 40x16, DIN 69871Fr a dotaženy pomocí šestihranného klíče. Takto sestavené nástroje byly pneumaticky upnuty ve vřeteníku stroje. Během všech experimentů nebylo pozorováno povolení upnutí nástrojů.

9.3.3 Obráběcí stroj

Ke zkouškám byla použita konzolová nová vertikální frézka FV 25 CNC, s řídicím systémem Heidenhain 315 TNC, výrobce O.S.O., spol. s r.o., Olomouc.

9.3.4 Řezné podmínky

Řezné podmínky byly stanoveny odhadem podle předběžných zkušeností, které vyhovovaly s ohledem na druh obrábění, daný materiál a daný stroj, nicméně bylo nutno tyto podmínky korigovat.

S výjimkou čelní zkoušky byl použit k čelnímu frézování řádkovací cyklus, umožňující střídavé obrábění nesousledné a sousledné (cyklus 230).

Tab. 8.1 Použité řezné podmínky v daných testech

Řezné podmínka	Jednotka	Rozsah hodnot
řezná rychlost v_c	[m/min]	250 m/min (na obvodě)
otáčky n	[1/min]	4980
posuvová rychlost v_f	[mm/min]	400
posuv na zub f_z	[mm]	0,02
šířka (hloubka) řezu a_p	[mm]	8
šířka řezu a_e	[mm]	0,5
druh chlazení/mazání	-	-
druh frézování		nesousledné/sousledné (řádkovací cyklus 230)
kriterium opotřebení		výskyt jevu (neschopnost odebírat třísky, nadměrné chvění a vibrace, nepříznivá barva třísky, jiskření)

Aby bylo eliminováno rozdílné namáhání frézy při najíždění na plnou hloubku v materiálu (a podobně při vyjíždění z materiálu), byly pro operace úpravy povrchů použity dva další speciální nástroje, tzn. veškeré testování u všech nástrojů probíhalo při stejných nastavených podmínkách namáhání.

9.3.5 Způsob snímání zatížení nástroje, metodika měření a analýza naměřených hodnot

Pro měření axiální síly, radiální a tangenciální síly byl použit piezoelektrický křemíkový dynamometr KISTLER 9257B vybavený nábojovými zesilovači KISTLER 9011A, plně řízenými PC. Vzorkovací frekvence byla přibližně 50 Hz, na zesilovačích byla nastavena dlouhá časová vybijecí konstanta a dolnoproustný filtr na hladině 50 Hz.

Pomocí této aparatury bylo možno získat základní zdrojové signály silového zatížení ve všech souřadnicových osách stroje. Na základě předběžných testů bylo podobně zjištěno, že osově zatížení fréz (ve směru osy vřetene) bylo poměrně nízké (cca 5-10%) ve srovnání se silami působících v ostatních dvou kolmých osách (rovnoběžně a kolmo s posuvovou složkou v_f). Proto bylo základní měření soustředěno na snímání těchto významnějších složek, působících ve směru os stroje x a y - F_{xm} a F_{ym} , ale kontrolní měření osově zatížení bylo taktéž pravidelně prováděno.

Základní zdrojové hodnoty měřených sil však bylo nutno dále filtrovat s ohledem na maximální průřez třísky, vyvíjený frézami se zuby ve šroubovici při určitém natočení zubu frézy v záběru. K tomuto účelu byl použit speciální filtrovací program, vyhledávající maximální velikost výslednice sil pro dílčí měřené silové složky. Aby nebyla indexace sil příliš komplikovaná, v dalších tabulkách a obrázcích bylo v práci pro zjednodušení použito označení F_{x1m} a F_{y1m} , odpovídající takovému natočení břitu frézy, při kterém břit frézy dosahoval lokálně maximální průřez třísky i maximální velikost celkové řezné síly F_1 , působící na 1 břit. Problémem byl reálný průřez třísky odebíraný jednotlivými břitmi hrubovací frézy, který se měnil podél hlavních ostří. Z tohoto důvodu byly jednotlivé nástroje vyhodnocovány výhradně pomocí celkové řezné síly F_1 . Každá fréza a každý test obsahuje tuto analýzu ve dvou základních způsobech frézování - sousledném a nesousledném, aby byly postihnuty oba základní způsoby jejich možné využití ve výrobní praxi.

Velkou výhodou průběžného měření řezných sil po celou dobu testování nástroje bylo právě nepřímé sledování časového rozvoje opotřebení v důsledku změn řezných sil, které odrážely způsob a intenzitu rozvoje dílčích forem opotřebení frézy, bez potřeby přerušování obrábění za účelem měření, demontáže frézy, jejího vychladnutí, nutného odstranění případných nárůstků za účelem měření s dalším možným aditivním poškozením, vlivu opětovného ustavování nástroje, atd.

9.4 Dosažené výsledky

9.4.1 Předběžné testy

Předběžné testy probíhaly metodou axiálního záběru frézy, ale vzhledem ke zvýšenému namáhání oblasti jádra frézy a nižšímu namáhání obvodu frézy bylo od této metody upuštěno ve prospěch radiálního rozjíždění. (V obou testech bylo použito čelního frézování sousledného a nesousledného).

9.4.2 Vlastní srovnávací testy

Dosažené výsledky a integrované výsledky měření pro jednotlivé nástroje jsou uvedeny v tab. 8.2 a 8.3. Na grafech 8.1 – 8.4 jsou znázorněny výběrové okamžité hodnoty výsledných řezných sil (zahrnujících majoritní složky F_{x1m} a F_{y1m}). Na obr. 8.5 jsou znázorněny průběhy průměrných hodnot celkových řezných sil,

Oba druhy matematického zpracování jednoznačně potvrdily prakticky stejné závěry pro hodnocení jednotlivých druhů fréz. PVD povlaky s označením č. 1,2 a 3 překonaly stávající parametry nástroje referenčního typu, povlak č. 4 dosáhl výsledků horších.

Tab. 8.2 Dosažené hodnoty celkových řezných sil pro nesousledné frézování

Čas frézování [min]	DRUH FRÉZY									
	MARWIN -vz. A	MARWIN -vz. B	SHM č.1 -vz. A	SHM č.1 -vz. B	SHM č.2 -vz. A	SHM č.2 -vz. B	SHM č.3 -vz. A	SHM č.3 -vz. B	SHM č.4 -vz. A	SHM č.4 -vz. B
0.75	123.1	152.9	108.2	109.1	97.5	97.5	123.1	134.0	125.2	137.6
6.75	201.6	160.8	118.2	109.8	121.4	103.4	163.3	137.1	130.2	156.3
12.75	226.9	173.5	120.5	126.2	139.1	110.8	172.5	159.3	133.8	176.3
18.75	245.3	206.2	134.4	134.4	149.9	116.2	183.8	167.3	155.9	193.6
24.75	253.8	219.3	126.1	132.7	170.4	125.9	200.6	180.6	196.3	205.9
30.75	272.3	227.0	145.2	147.1	161.4	143.7	219.5	181.9	215.1	247.4
36.75	280.2	244.4	160.7	152.5	164.1	159.2	222.2	206.1	266.6	271.0
42.75	298.7	255.5	156.9	165.7	180.2	165.7	234.8	207.8	302.1	317.4
48.75	308.9	274.0	179.6	169.2	204.4	181.4	237.3	226.5	330.5	375.1
54.75	348.6	325.1	175.1	177.2	207.5	177.4	259.5	243.9	364.6	
60.75	360.2	336.0	202.7	178.9	227.5	203.7	271.4	257.7		
66.75	371.6		215.8	197.5	228.7	220.7	292.2	281.4		
72.75			218.1	205.3	241.5	226.6	299.6	296.6		
78.75			220.8	209.6	267.1	244.3				
84.75			234.2	236.0	281.7	252.4				
90.75			246.1	242.0	292.7	274.3				
96.75			247.9	263.6	305.6	291.4				
102.75			273.6	257.7	328.4	310.4				
108.75			277.9	284.4		316.1				
114.75			293.5	284.2		321.4				
120.75						354.7				

Obráběný materiál: ocelolitina GGG 700Obráběcí stroj: frézka vertikální FV 25 CNC/Heidenhain TNC 310.

Řezný nástroj: ϕ 16x40-100/R8 FW412.16.100.16.

Řezné podmínky: $v_c=250$ m/min, $a_p=8,0$ mm, $a_e=0,5$ mm, frézování za sucha, bez chlazení.

Tab. 8.3 Dosažené hodnoty celkových řezných sil pro sousledné frézování

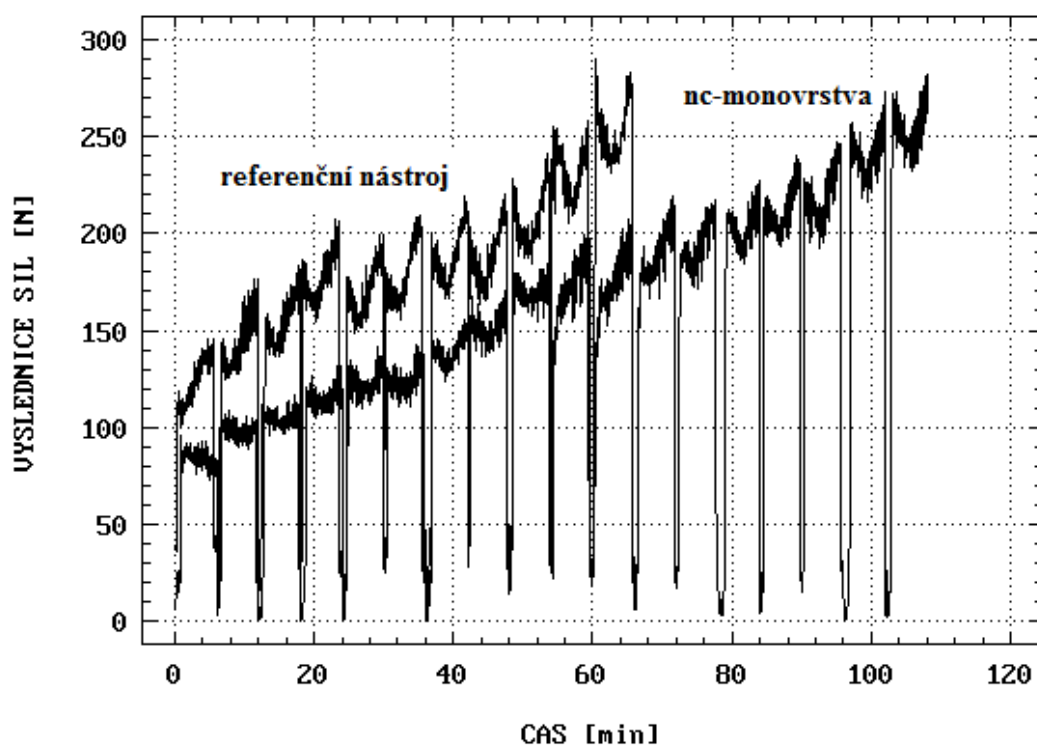
Čas frézování [min]	DRUH FRÉZY									
	MARWIN -vz. A	MARWIN -vz. B	SHM č.1 -vz. A	SHM č.1 -vz. B	SHM č.2 -vz. A	SHM č.2 -vz. B	SHM č.3 -vz. A	SHM č.3 -vz. B	SHM č.4 -vz. A	SHM č.4 -vz. B
0.75	123.1	152.9	108.2	109.1	97.5	97.5	123.1	134.0	125.2	137.6
6.75	201.6	160.8	118.2	109.8	121.4	103.4	163.3	137.1	130.2	156.3
12.75	226.9	173.5	120.5	126.2	139.1	110.8	172.5	159.3	133.8	176.3
18.75	245.3	206.2	134.4	134.4	149.9	116.2	183.8	167.3	155.9	193.6
24.75	253.8	219.3	126.1	132.7	170.4	125.9	200.6	180.6	196.3	205.9
30.75	272.3	227.0	145.2	147.1	161.4	143.7	219.5	181.9	215.1	247.4
36.75	280.2	244.4	160.7	152.5	164.1	159.2	222.2	206.1	266.6	271.0
42.75	298.7	255.5	156.9	165.7	180.2	165.7	234.8	207.8	302.1	317.4
48.75	308.9	274.0	179.6	169.2	204.4	181.4	237.3	226.5	330.5	375.1
54.75	348.6	325.1	175.1	177.2	207.5	177.4	259.5	243.9	364.6	
60.75	360.2	336.0	202.7	178.9	227.5	203.7	271.4	257.7		
66.75	371.6		215.8	197.5	228.7	220.7	292.2	281.4		
72.75			218.1	205.3	241.5	226.6	299.6	296.6		
78.75			220.8	209.6	267.1	244.3				
84.75			234.2	236.0	281.7	252.4				
90.75			246.1	242.0	292.7	274.3				
96.75			247.9	263.6	305.6	291.4				
102.75			273.6	257.7	328.4	310.4				
108.75			277.9	284.4		316.1				
114.75			293.5	284.2		321.4				
120.75						354.7				

Obráběný materiál: ocelolitina GGG 700Obráběcí stroj: frézka vertikální FV 25 CNC/Heidenhain TNC 310.

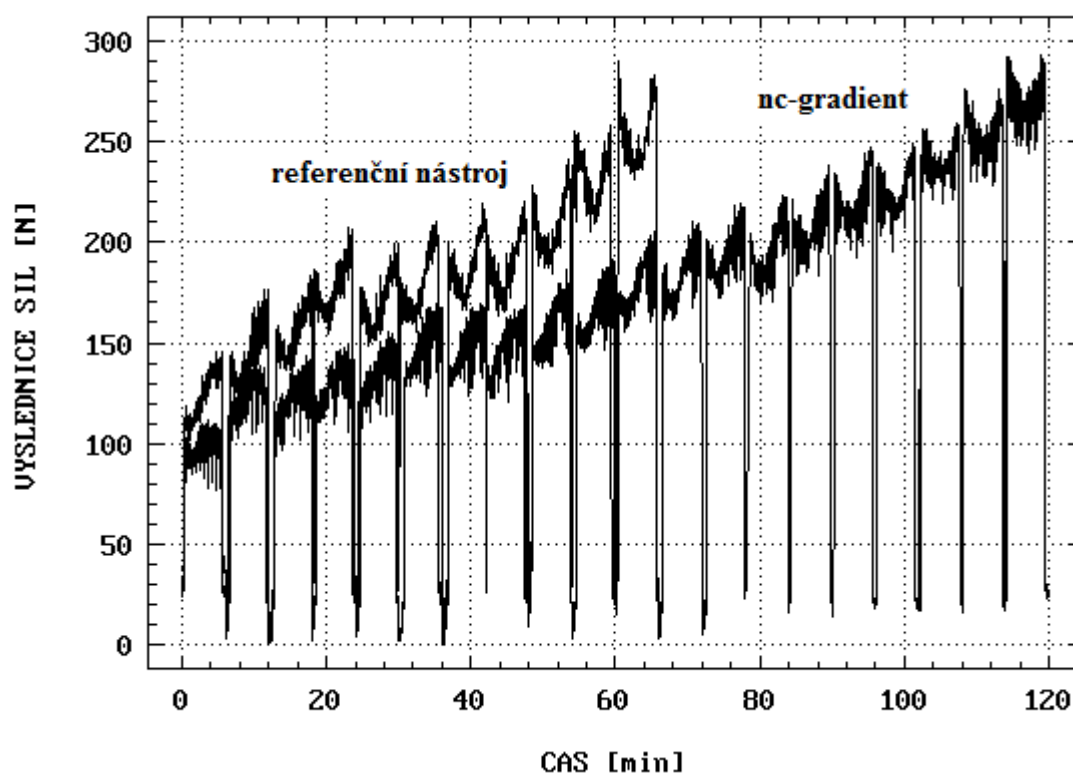
Řezný nástroj: ϕ 16x40-100/R8 FW412.16.100.16.

Řezné podmínky: $v_c=250$ m/min, $a_p=8,0$ mm, $a_e=0,5$ mm, frézování za sucha, bez chlazení.

POROVNÁNÍ REZIVOSTI FREZ

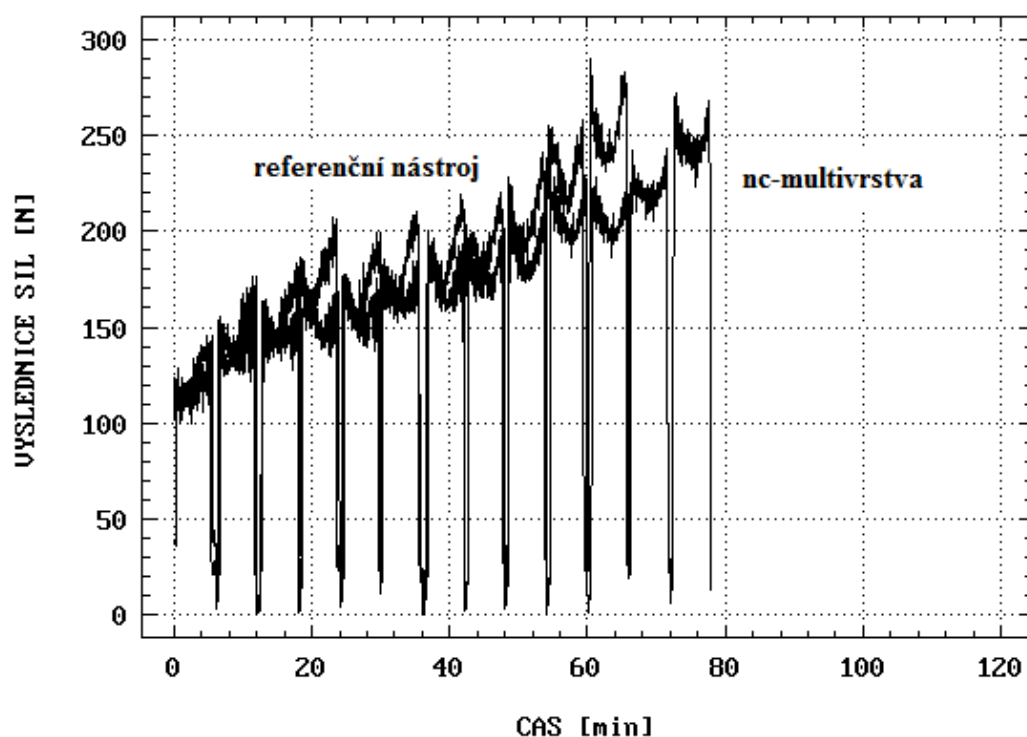


Graf 8.1 Referenční nástroj x nc-monovrstva



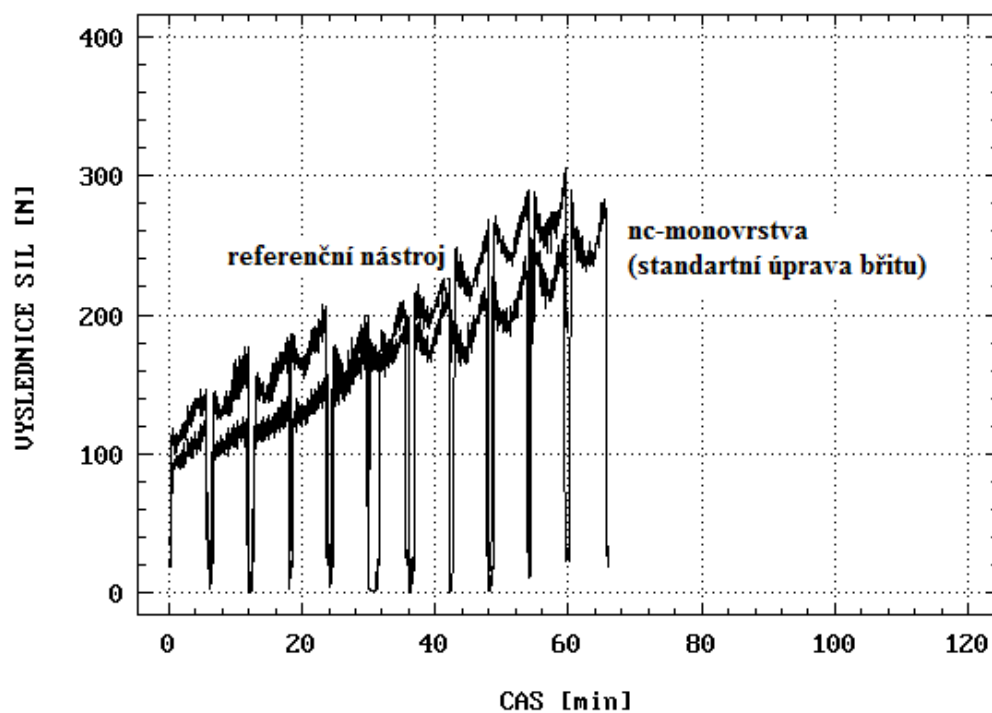
Graf 8.2 Referenční nástroj x nc-gradientní povlak

POROVNÁNÍ REZIVOSTI FREZ

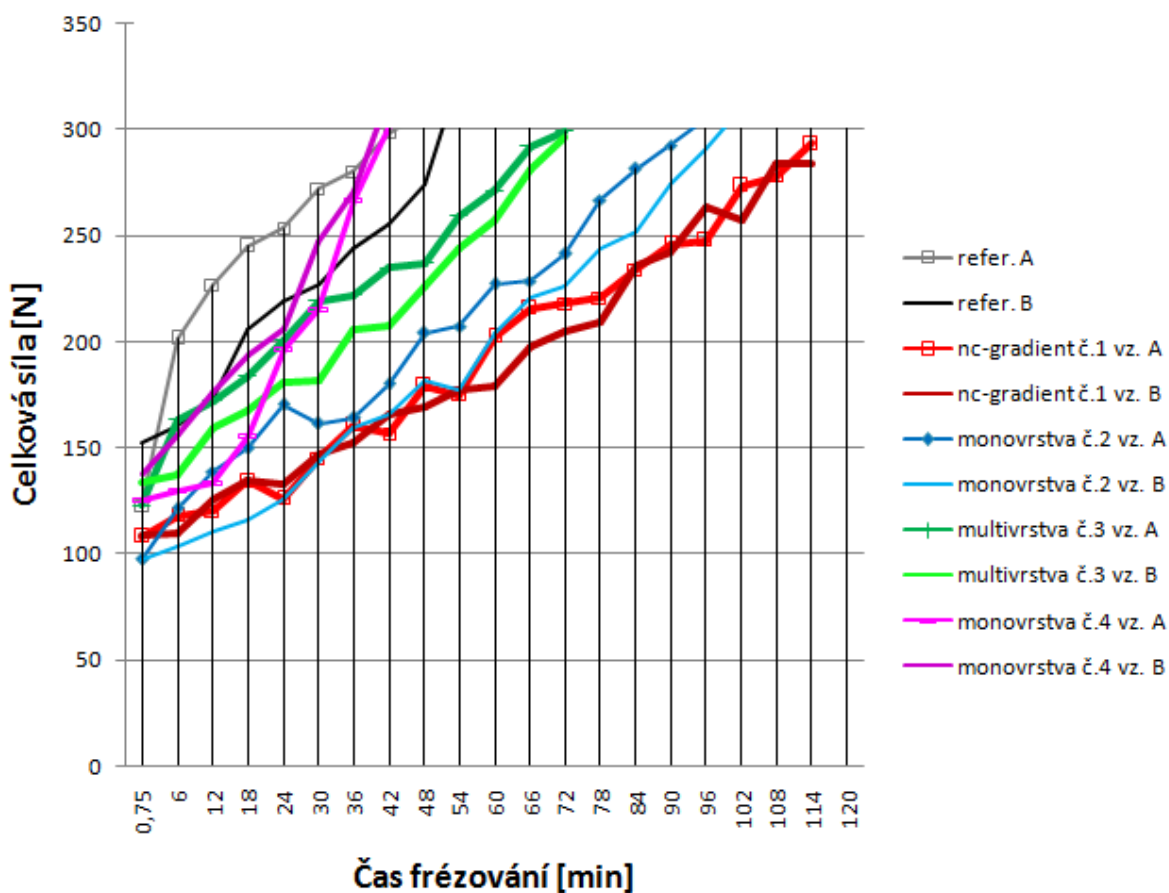


Graf 8.3 Referenční nástroj x nc- multivrstva

POROVNÁNÍ REZIVOSTI FREZ



Graf 8.4 Referenční nástroj x nc-monovrstva (standartní úprava bříty)



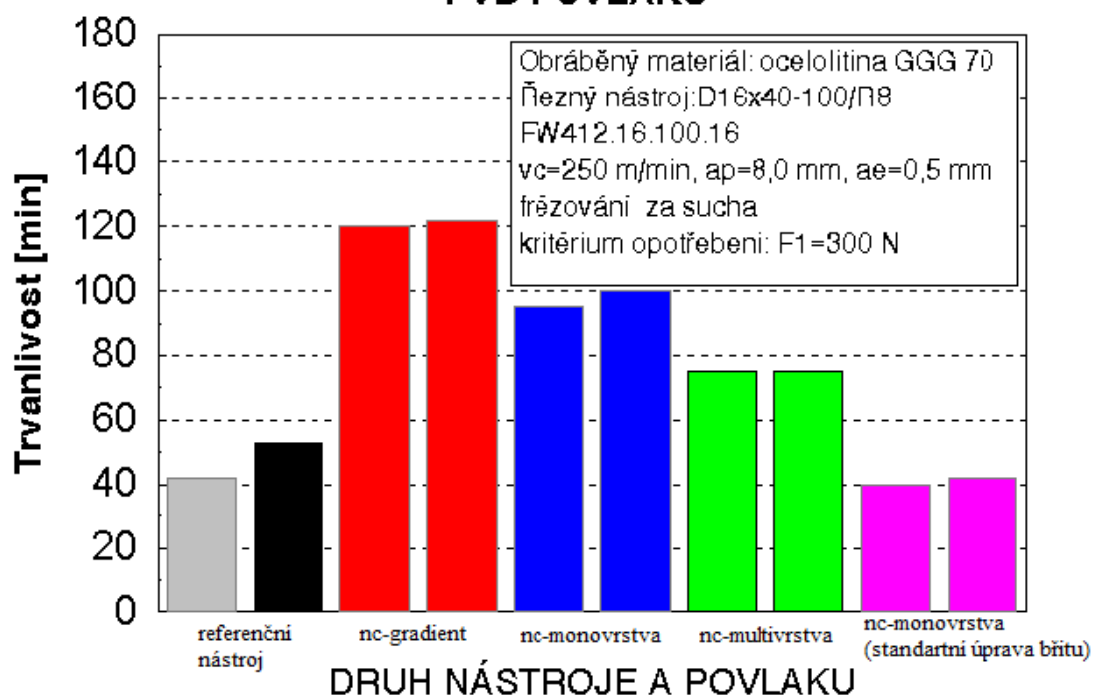
Graf 8.5 Průběhy průměrných hodnot celkových řezných sil

Tab. 8.4 Dosažené hodnoty trvanlivostí fréz

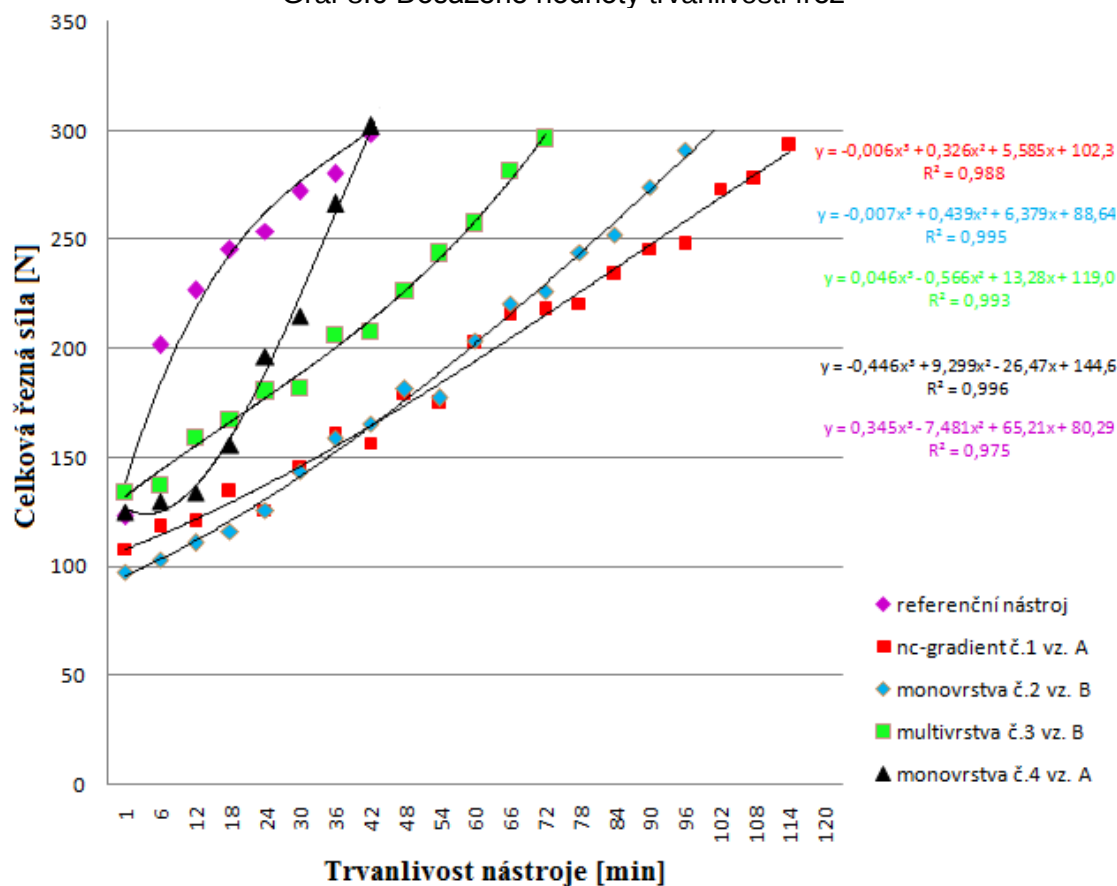
Vzorek č.	Trvanlivost frézy [min]				
	referenční vz.	1	2	3	4
A	42	120	95	75	40
B	53	122	100	75	42

Kritérium opotřebení: Celková síla působící na frézu o velikosti **300 N** a nastoupení průvodních jevů (jiskření frézy, rázy a chvění).

FRÉZOVACÍ VLASTNOSTI PVD POVLAKŮ



Graf 8.6 Dosažené hodnoty trvanlivosti fréz



Graf 8.7 Dosažené hodnoty celkových řezných sil

9.5 Závěr

Z provedené studie řezivosti uvedených typů fréz vyplývají tato shrnutí a závěry:

- bylo provedeno testování řezivosti vybraných druhů frézovacích nástrojů na tvárné litině s kuličkovým grafitem DIN GGG70 (ČSN 422307),
- použitá metodika dokázala přesně kvantifikovat průběh opotřebení fréz při obrábění;
- u všech vzorků byl pozorován velmi nízký rozptyl mezi jednotlivými nástroji, svědčící o dobře zvládnuté výrobě (ostření) nástroje, PVD povlakování, metodice kalibrace a měření řezných sil;
- podmínky testu byly náročnější, než se dá předpokládat ve výrobních podmínkách, tzn., existuje předpoklad pro další přínosy a úspory v reálné praxi;
- nejlepších výsledků obrábění bylo dosaženo pro frézu s povlakem gradientním č. 1, při kterém probíhalo velmi klidné obrábění, provázené nízkými, stabilizovanými hodnotami řezných sil, s převážně lineárním časovým rozvojem po celou dobu frézování;
- velmi vhodnými povlaky se ukázaly rovněž povlaky monovrstva č. 2 a multivrstva č. 3, jako nevhodný povlak byl pro tuto aplikaci povlak monovrstvy č. 4 (standartní úprava břitu) a referenční fréza;
- trvanlivost frézy s povlakem gradientním č. 1 přesáhla při stejných podmínkách obrábění (a stejném kritériu opotřebení) využitelnou trvanlivost frézy prakticky až o 200% (120 minut) vůči hodnotě naměřené pro referenční frézu, (42 minut pro povrch s licí kúrou, 53 minut bez licí kúry);
- vliv kúry byl odhadnut následovným aplikováním referenčního nástroje na stejný kus, přibližně v polovině výšky, ihned po ukončení testu s nástrojem č. 1, tzn. za velmi dobře srovnatelných podmínek řezu;
- z hlediska vedlejších průvodních jevů bylo u referenčních fréz pozorováno jiskření grafitu v nesousledném směru frézování již u 5. záběru frézy, zatímco u nástrojů č. 1,2,3 až mnohem později (50. řez a dále);
- jako pomocné kritérium kontroly opotřebení bylo možno pozorovat jiskření frézy v sousledném směru - pokud nastalo, bylo provázeno zvýšením řezných sil;
- výskyt prachových částic grafitu při obrábění byl nepříjemný pro obsluhu stroje a zasahoval i přes krytování stroje do okruhu cca 2-3 m od obráběcího stroje.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ŠÍMA, M., ZINDULKA, O., HOLUBAŘ, P. *Měření vlastností povlaků na nástrojích*. MM - Průmyslové spektrum, 6/2004. [online] Dostupné na [www](http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-vlastnosti-povlaku-na-nastrojich): <http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-vlastnosti-povlaku-na-nastrojich>
2. PRENGEL, H. G., JINDAL, P. C., WENDT, K. H., et. al. *A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools*. Surface and Coatings Technology. 139 (2001). pp. 25-34.
3. ZÁPADNÍ UNIVERZITA V PLZNI, Tenké vrstvy nitridů kovů [online]. Poslední revize 06. 2009. Dostupné na WWW: www.ateam.zcu.cz/download/PU_prednaska.pdf
4. CSELLE, T., HOLUBÁŘ, P., JÍLEK, M., et.al. *PVD technologie přípravy otěruvzdorných a kluzných vrstev v průmyslových podmínkách*, JMO 4/2006. Dostupné na WWW: <http://shm-cz.cz/cs/technicke-informace/literatura>
5. PLATIT AG. Advanced Coating Systems. Grenchen. Switzerland. [online]. Dostupné na [www](http://www.platit.com/nanostructures?page=0%2C0): <http://www.platit.com/nanostructures?page=0%2C0>
6. SHM. Svět tvrdých a supertvrdých materiálů. Šumperk. Česká rep. [online]. Dostupné na [www](http://shm-cz.cz/cs/): <http://shm-cz.cz/cs/>
7. Cselle, T., Morstein, M., Holubar, P. et. al. *Nanostructured coatings and processes on an industrial scale*. Gorham Conference. Atlanta. November 2002. [online]. Dostupné na [www](http://shm-cz.cz/cs/technicke-informace/literatura): <http://shm-cz.cz/cs/technicke-informace/literatura>
8. Růžička, M., Zindulka, O. *Alwin - nanokompozitní PVD vrstva AlSiCrN*. Strojárstvo. 4/2007. [online] Dostupné na [www](http://www.shm-cz.cz/files/literatura/42.pdf): <http://www.shm-cz.cz/files/literatura/42.pdf>
9. VEPŘEK, S., VEPŘEK-HEIJMAN, M. J. G. *Industrial applications of superhard nanocomposite coatings*. Surgace & Coatings Techology. Vol. 202. 5/2008. [online]. Dostupné na [www](http://shm-cz.cz/cs/technicke-informace/literatura): <http://shm-cz.cz/cs/technicke-informace/literatura>
10. CEME NOC. Kunden Magazin fur Beschichtungstechnologie. Tools. Nr. 17. September 2004. [online] Dostupné na [www](http://www.toolingonline.com/storefronts/cemecon.html): <http://www.toolingonline.com/storefronts/cemecon.html>

11. CSELLE, T., CEO, PLATIT AG, HOLUBAR, P., SHM, Novy, M. *Driving forces of today's manufacturing technology*. 3rd Conference for Milling. VUT, Brno. CZ.

12. Holubář, P., Jílek, M., Zindulka, O., et al. *Nové PVD vrstvy na bázi Cr-Al-Si-N a kluzné vrstvy na bázi oxidů a uhlíku*. Vrstvy a povlaky 2005. [online]. Dostupné na www:
<http://shm-cz.cz/cs/technicke-informace/literatura>

13. Holubář, P., Cselle, T. *Výkonnost nástrojů s moderními PVD povlaky*. MM - Průmyslové spektrum. 12/2004. [online]. Dostupné na www:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/vykonnost-nastroju-s-modernimi-pvd-povlaky>

14. BAUER, H. - D., ARNOLD, B., BARTSCH, K., et. al. *Manufacturing and structure investigation of TiN-Al₂O₃-multilayers*. Dresden. Germany. October, 1999. [online]. Dostupné na www:
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TXK-4096296-G&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=467262b06c3ef60f330e542f73a719b3

15. BENEŠ, P. *Tepelní degradace tenkých otěruvzdorných pvd vrstev*. Material research. Ateam. [online]. Dostupné na www:
<http://www.ateam.zcu.cz/download/rigo-benes.pdf>

16. KŘÍŽ, A. *Hodnocení vlastností tenkých vrstev nitridu kovu*. ZČU v Plzni. [online]. Dostupné na www:
http://www.ateam.zcu.cz/HODNOCENI_VLASTNOSTI_TENKYCH_VRSTEV_%20NITRIDU_KOVU.pdf

17. OERLIKON BALZERS. Hi-tech industrial group. Pfäffikon. Switzerland. [online]. Dostupné na www:
http://www.oerlikon.com/ecomaXL/index.php?site=BALZERS_EN_coating_technology

18. HOLUBÁŘ, P., JÍLEK, M., RŮŽIČKA, M., *Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření [online]*, MM - Průmyslové spektrum. 9/2004. Dostupné na www:
<http://shm-cz.cz/files/literatura/30.pdf>

19. ZHANG, S., ALI, N. Nanocomposite thin films and coatings. Processing, properties and performance. Imperial college press. October 2007. pp 628. ISBN 978-1-86094-784-1

20. KMM. Materiálový výzkum a provozní zkoušky nástrojů. [online] Dostupné na www.
<http://www.ateam.zcu.cz/profirmy.html>

21. CZECH COATING. PVD povlakování. [online]. Dostupné na [www: http://czechcoating.cz/index.php?p=kontakt](http://czechcoating.cz/index.php?p=kontakt)

22. PVD. Everything is coated. England. [online]. Dostupné na [www. http://www.pvd-coatings.co.uk](http://www.pvd-coatings.co.uk)

23. MATTOX, D. M. *The Foundations of vacuum coating technology*. Noyes / William publishing. New York, 2003. ISBN 0-8155-1495-6

24. HOLUBÁŘ, P., JÍLEK, M., ŠÍMA, M. *PVD vrstvy na bázi Cr-Al-Si-N, kluzné vrstvy Ti-Al-Si-O-C a tlusté vrstvy Ti-Cr-Ni-N*. [online]. Dostupné na [www. http://www.vakspol.cz/lsvt06/zindulka_lsvt06_2.pdf](http://www.vakspol.cz/lsvt06/zindulka_lsvt06_2.pdf)

60. HUMÁR, A. *Nové řezné materiály a nástroje*. Praha - MM publishing. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

označení	jednotka	popis proměnné
a_p	mm	axiální šířka záběru (hloubka řezu)
a_e	mm	radiální šířka záběru
n	ot/min	otáčky nástroje
v_c	m/min	řezná rychlost
v_f	mm/min	posuvová rychlost
e_c	J/mm ³	měrná energie obrábění
f	mm	posuv na zub
A_α		rovina hlavního hřbetu
A_γ		rovina čela
D	mm	průměr frézy
F	N	celková síla vyvolaná řeznou částí
F_1	N	celková síla vyvolaná řeznou částí jednoho břitu
F_3	N	celková síla vyvolaná řeznou částí jednoho břitu (kontrolní výpočet)
F_{h1}	N	horizontální síla působící na jeden břit v ortogonální rovině
F_{c1}	N	řezná síla působící na jeden břit
F_{cN1}	N	kolmá řezná síla působící na jeden břit
F_{p1}	N	pasivní síla působící na jeden břit
F_{sh1}	N	tangenciální síla v rovině stříhu působící na jeden břit
F_{shN1}	N	normálová síla v rovině stříhu působící na jeden břit
$F_{\gamma 1}$	N	tangenciální síla působící na čele nástroje (na jeden břit)
$F_{\gamma N1}$	N	normální síla působící na čele nástroje (na jeden břit)
F_{f1}	N	posuvová síla působící na jeden břit
F_{tr1}	N	transversální síla působící tangenciálně na čele nástroje
F_{v1}	N	vertikální síla působící ortogonální rovině na jeden břit v
F_{xm}	N	celková měřená síla působící v ose x stroje a snímače
F_{x1m}	N	síla působící v ose x stroje a snímače a na 1 břit frézy
F_{ym}	N	celková měřená síla působící v ose y stroje a snímače
F_{y1m}	N	síla působící v ose y stroje a snímače a na 1 břit
F_{zm}	N	celková měřená síla působící v ose z stroje a snímače
HSS	-	nástrojová rychlořezná ocel
k_c	MPa	měrná řezná síla, řezná síla na jednotku plochy řezu
P_c	W	řezný výkon

PVD	-	fyzikální metoda povlakování
P_{sh}		střižná rovina
α_o	0	ortogonální úhel čela
γ_o	0	ortogonální úhel čela
ϕ	-	úhel roviny stříhu
ϕ_1	-	počáteční úhel tvorby třísky
ϕ_2	-	koncový úhel tvorby třísky (s maximální tloušťkou třísky)
ϕ_s	-	úhel v zadní rovině, odpovídající poloze těžiště plochy nominálního průřezu třísky
λ_t	-	třecí úhel
σ_{red}	MPa	redukováné napětí
σ_x	MPa	normální napětí
$\sigma_{1,3}$	MPa	hlavní napětí
σ_ρ	MPa	normální napětí v rovině $\underline{\rho}$
τ_{xy}, τ_{xz}	MPa	smyková napětí v daných rovinách
τ_ρ	MPa	smykové napětí v rovině $\underline{\rho}$