Mikrotvrdost vrstev povlakovaných řezných nástrojů

Andrea Audyová

Bakalářská práce
2023

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Andrea Audyová**
Osobní číslo:	**T22783**
Studijní program:	**B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor:	**Technologická zařízení**
Forma studia:	**Kombinovaná**
Téma práce:	**Mikrotvrdost vrstev povlakovaných řezných nástrojů**

Zásady pro vypracování

- Literární rešerše na téma tvorby povlaků a jejich testování
- Příprava zkušebních vzorků a měření mikrotvrdosti vrstev
- Vyhodnocení mikrotvrdosti v závislosti na hloubce

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008, 235 s. ISBN 9788025422502.
MATTOX, D. M. *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. 2nd ed. Norwich, N.Y.: William Andrew, c2010, 1 online zdroj. ISBN 9780815520382. Dostupné také z: https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHPVDPV04
JONES, Anthony C. a Michael L. HITCHMAN. *Chemical vapour deposition: precursors, processes and applications*. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, c2009, 1 online zdroj (xv, 582 p.). ISBN 9781847558794. Dostupné také z: https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpCVDPPA04
Příslušné technické normy

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2023**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 22. února 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA
BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Hlavním tématem bakalářské práce je výzkum mikrotvrdosti povlakovaných vrstev řezných nástrojů. Pro lepší orientaci v dané problematice je vypracována literární rešerše na téma tvorby povlaků a hodnocení mechanických vlastností povlakovaných vrstev včetně charakteristik materiálů řezných nástrojů a jejich vlastností. V experimentální části jsou prezentovány výsledky testů mikrotvrdosti a modulu pružnosti vrstev TiCN a AlTiN získaných metodou PVD a vícevrstvého povlaku TiCN + TiC + Al_2O_3 metodou MT-CVD na řezných nástrojích ze slinutého karbidu. Testy byly provedeny instrumentovanou zkouškou tvrdosti DSI (Depth Sensing Indentation), při které byl do zkoumaných vzorků vtlačován Vickersův čtyřstěnný indentor. Měřené vlastnosti byly analyzovány metodou podle Olivera a Pharra z údajů zatěžovacích a odlehčovacích křivek bez přímého měření projekční plochy vtisku. Nejlepší výsledky mikrotvrdosti i modulu pružnosti byly pozorovány u vrstvy TiCN.

Klíčová slova: mikrotvrdost, mechanické vlastnosti, instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI, řezné nástroje, povlaky, metoda PVD, metoda CVD.

ABSTRACT

The main theme of the bachelor project is the research of microhardness of cutting tool coating layers. To improve knowledge of the issues, a literary research has been made, which covers the topic of coat creation and evaluation of coating layer mechanical properties as well as characteristics of cutting tool materials and their properties. In the experimental part, results of the tests are presented. They include microhardness tests and modulus of elasticity tests of the layers of TiCN and AlTiN gained by the PVD method and multilayer coating of TiCN+TiC+Al_2O_3 by the MT-CVD method on cutting tools from sintered carbide. These tests were made by the instrumental hardness test DSI (Depth Sensing Indentation), in which the Vickers tetrahedral indenter was pressed into tested samples. Measured properties were analysed method according to Oliver and Pharr from loading and unloading curves data without direct measuring of projection imprint screen. The best results of microhardness and modulus of elasticity were observed in layer of TiCN.

Keywords: microhardness, mechanical properties, Instrumental hardness test DSI, cutting tools, coatings, PVD method, CVD method.

Chtěla bych touto cestou poděkovat zejména panu doc. Ing Ondřeji Bílkovi PhD. za vedení bakalářské práce, pomoc, cenné rady, připomínky a především za trpělivost a čas, který mi věnoval. Dále děkuji panu doc. Ing. Martinu Ovsíkovi PhD. za zpracování experimentální části a čas, který věnoval přípravě a měření vzorků.

Moto:

„Najít správný směr, mezi opatrností a odvahou, je největší umění.“
Tomáš Baťa

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD **10**
I TEORETICKÁ ČÁST **12**
1 ŘEZNÉ NÁSTROJE **13**
1.1 PRINCIP ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ 14
1.2 GEOMETRIE ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ 15
2 MATERIÁLY ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ **16**
2.1 RYCHLOŘEZNÉ OCELI 17
2.1.1 Vliv legujících prvků 18
2.1.2 Rychlořezné oceli vyráběné práškovou metalurgií 18
2.1.3 Povlakované rychlořezné oceli 18
2.2 SLINUTÉ KARBIDY 19
2.2.1 Nepovlakované slinuté karbidy 21
2.2.2 Povlakované slinuté karbidy 23
2.3 CERMETY 27
2.4 ŘEZNÁ KERAMIKA 28
2.5 SUPERTVRDÉ ŘEZNÉ MATERIÁLY 30
2.5.1 Polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB) 31
2.5.2 Polykrystalický diamant (PD) 32
3 TECHNOLOGIE POVLAKOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ **33**
3.1 TECHNOLOGIE PVD (PHYSICAL VAPOUR DEPOSITION) 34
3.1.1 Depozice odpařováním 35
3.1.2 Depozice elektrickým obloukem 35
3.1.3 Depozice naprašováním 36
3.1.4 Magnetronové naprašování 37
3.1.5 HiPIMS 38
3.1.6 Hybridní technologie 39
3.1.7 Iontové plátování 40
3.2 TECHNOLOGIE CVD (CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION) 42
3.2.1 PCVD 43
3.2.2 MO-CVD 45
3.2.3 MT-CVD 46
3.2.4 ALD 46
4 ANALÝZA VLASTNOSTÍ TENKÝCH VRSTEV **48**
4.1 MORFOLOGIE VRSTEV 48
4.1.1 Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM) 48
4.1.2 Mikroskopie atomárních sil (AFM) 48
4.2 TLOUŠŤKA A HUSTOTA VRSTEV 49
4.2.1 Metoda kalotest 50

4.3 ADHEZE 51
4.3.1 Scratch test – vrypová zkouška 51
4.3.2 Mercedes test – indentační (vnikací) zkouška 52
4.4 TŘENÍ 53
4.4.1 PIN (BALL)-on-DISC 53
4.5 SLOŽENÍ A ČISTOTA VRSTEV 54
4.5.1 Rentgenová fotoelektronová spektroskopie (XPS) 54
4.5.2 Hmotnostní spektrometrie sekundárních iontů (SIMS) 55
5 MIKROTVRDOST VRSTEV POVLAKU 56
5.1 INDENTAČNÍ ZKOUŠKY TVRDOSTI 56
5.2 VICKERSOVA METODA 57
5.3 KNOOPOVA METODA 59
5.4 BERKOVICHOVA METODA 60
5.5 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI (DSI) 61
5.5.1 Vtisková vrdost H_{IT} 62
5.5.2 Vtiskový modul pružnosti E_{IT} 65
5.5.3 Deformační práce 66
5.5.4 Vtiskové tečení C_{IT} 66
5.5.5 Vtisková relaxace R_{IT} 67
6 ZÁVĚREČNÉ SHRNUTÍ TEORETICKÉ REŠERŠE 68
II PRAKTICKÁ ČÁST 72
7 HLAVNÍ CÍLE EXPERIMENTU 73
8 SPECIFIKACE A PŘÍPRAVA VZORKŮ 74
8.1 TESTOVANÉ MATERIÁLY 74
8.1.1 Břitová destička Korloy 74
8.1.2 Břitová destička Kyocera 75
8.1.3 Stopková fréza YG-1 75
8.2 VLASTNOSTI NANESENÝCH VRSTEV 76
8.2.1 TiN 76
8.2.2 TiC 76
8.2.3 TiCN 77
8.2.4 AlTiN 77
8.2.5 Al_2O_3 77
8.2.6 Multivrstva TiCN+TiC+Al_2O_3 77
8.3 PŘÍPRAVA VZORKŮ 77
8.3.1 Řezání 78
8.3.2 Lisování 79
8.3.3 Leštění 80
9 ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ METODOUT DSI 82
10 VÝSLEDKY MĚŘENÍ 84

10.1 ANALÝZA VTISKOVÉ TVRDOSTI H_{IT} 84
10.1.1 Analýza závislosti vtiskové tvrdosti H_{IT} na vzdálenosti vtisku hm 85
10.2 ANALÝZA VICKERSOVY MIKROTVRDOSTI HV_{IT} 87
10.2.1 Analýza závislosti Vickersovy tvrdosti HV_{IT} na vzdálenosti vtisku hm 89
10.3 ANALÝZA VTISKOVÉHO MODULU PRUŽNOSTI E_{IT} 91
10.3.1 Analýza závislosti vtiskového modulu E_{IT} na vzdálenosti vtisku hm 92
10.4 PREDIKCE OPOTŘEBENÍ A PLASTICKÉ DEFORMACE POMĚRY H/E A H^3/E^2 94
11 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ 97
11.1 EKVIVALENTNÍ VICKERSOVA TVRDOST $HV_{IT\ EKVIVALENT}$ 98
11.2 VTISKOVÁ TVRDOST H_{IT} 99
11.3 VICKERSOVA TVRDOST HV_{IT} 99
11.4 VTISKOVÝ MODUL E_{IT} 100
11.5 POMĚRY H/E A H^3/E^2 101
12 DISKUZE 103
ZÁVĚR 104
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 110
SEZNAM OBRÁZKŮ 115
SEZNAM TABULEK 118
SEZNAM PŘÍLOH 119

ÚVOD

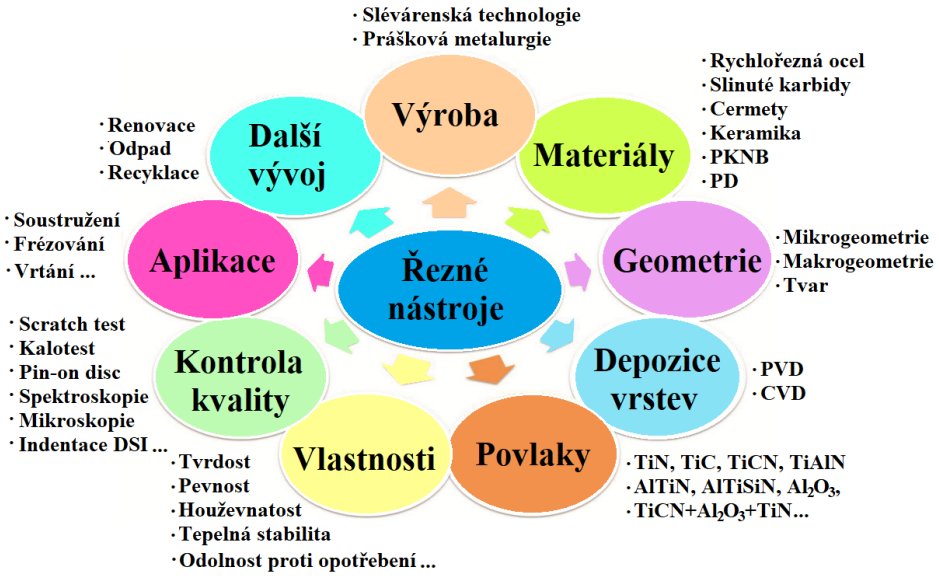
Přestože vývoj pokročilých technologií přinesl nové možnosti výroby dílů a strojních součástí zůstávají procesy třískového obrábění dominantní a nezastupitelnou technologií ve stále složitějších situacích obrábění kovů. V tomto směru se technologický pokrok také nezastavil a vyvinul CNC technologie vysokorychlostního obrábění, které umožnily zkrácení doby cyklu vysokými rychlostmi odebíraného materiálu. Zároveň se zvýšily nároky na přesnost, rychlost a opakovatelnost procesu, obrábění bez chladících emulzí či opracování těžce obrobitelných materiálů nebo tvarově složitých dílů. Současný trend prudce vzrůstajících cen komodit o to více apeluje na ekonomičnost procesů a zajištění konkurenceschopnosti. A právě tyto náročné požadavky jsou rozhodujícím faktorem při výběru řezného nástroje, jehož funkčnost je kombinací jednotlivých cyklů od počátku výroby po koncovou spotřebu (obr. 1). Proto je nutné při jeho výběru zohlednit jak typ podkladu řezného nástroje a jeho povlaku, tak geometrické parametry nástroje včetně geometrie řezné hrany a doporučené řezné podmínky. Vhodně zvolená geometrie ovlivňuje celkový výkon nástroje z hlediska řezné síly, tvorby třísek a toku materiálu nebo schopnosti efektivně odvádět teplotu vznikající během procesu třískového obrábění. Aplikace tvrdých vrstev povlaků umožnila modifikaci povrchu řezných nástrojů žádoucí změnou jejich vlastností, jako je zvýšení tvrdosti a trvanlivosti nástroje, snížení tření, zvýšení odolnosti vůči opotřebení nebo zlepšení kvality povrchu obráběného materiálu. Podstatnou výhodou je opakovatelnost procesu povlakování řezných nástrojů. Z praxe mohu potvrdit, že při dodržení stanovených postupů platí, že řezný nástroj lze povlakovat tolikrát, kolikrát lze nástroj přebrousit. To omezí nákup nových řezných nástrojů, což z dlouhodobého hlediska výrazně šetří náklady. Ovšem zajistit funkčnost nástroje vyžaduje kombinace správně přebroušeného nástroje s úpravou geometrie ostří a předdepozičních postupů, jako je mytí a odstranění staré vrstvy povlaku. V procesech třískového obrábění se využívá mnoho typů materiálů řezných nástrojů od rychlořezné oceli, slinutých karbidů, přes keramiku, až po polykrystalický diamant. Ale díky svým jedinečným vlastnostem jsou jednoznačně nejrozšířenější slinuté karbidy. Z pohledu nanášených materiálů nahradily jednovrstvé povlaky TiN, TiC a TiCN složitější struktury, například TiAlN, AlTiN, AlTiSiN nebo vícevrstvé povlaky jako TiC+Al_2O_3+TiN. Základní metody povlakování PVD (Physical Vapour Deposition) a CVD (Chemical Vapour Deposition) byly postupně rozšířeny o různé varianty, které představují obrovskou multifunkčnost z pohledu nanášení vrstev na různé materiály ve všech oblastech průmyslu. Protože existuje široké spektrum

nanášených materiálů a různých způsobů depozic je důležité zkoumat nanesené vrstvy i materiály řezných nástrojů a jejich vzájemné interakce. Pro tyto účely byly vyvinuty různé laboratorní techniky zkoumající fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti vrstev.

Tato práce se přímo zabývá měřením mechanických vlastností tenkých otěruvzdorných vrstev aplikovaných na řezných nástrojích ze slinutého karbidu. Bakalářská práce je rozdělena do dvou základních úseků, a to na teoretickou a praktickou část.

Teoretická část velmi obecně popisuje podstatu řezných nástrojů a jejich geometrii. Dále se věnuje podrobnější charakteristice materiálů řezných nástrojů, materiálů deponovaných vrstev a způsobům depozice. Mimo jiné jsou stručně představeny laboratorní techniky měření některých vlastností tenkých vrstev. S ohledem na provedený experiment se poslední kapitola zabývá technikami měření tvrdosti a mikrotvrdosti tenkých vrstev povlaku včetně matematických a geometrických charakteristik pro nejčastěji používané indentory.

V praktické části jsou prezentovány testované materiály a způsoby přípravy vzorků včetně přístrojového vybavení. Dále byla provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti metodou DSI (Depth Sensing Indentation) na přístroji CSM – Micro Combi Tester. Měření byla aplikována pro každý vzorek zvlášť za použití Vickersova čtyřbokého indentoru, jehož strany svírají úhel 136°, a následně vyhodnocena metodou podle Olivera a Pharra. Závěrem experimentální části jsou představeny, porovnány a diskutovány výsledky laboratorních testů mikrotvrdosti.



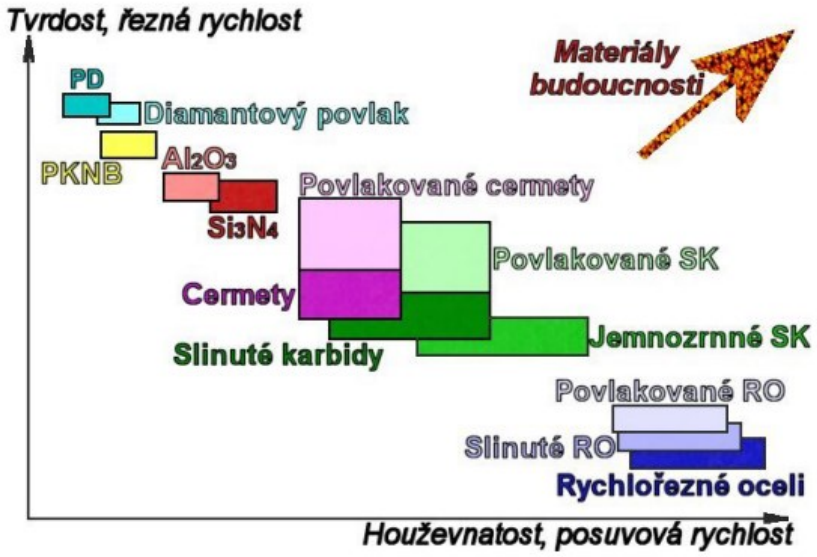
Obr. 1 Popis charakteristik a cyklu řezných nástrojů [vlastní]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ŘEZNÉ NÁSTROJE

Na trhu existuje nepřeberné množství řezných nástrojů konstruovaných tak, aby vyhovovaly nejrůznějším požadavkům a potřebám v procesech obrábění. Jsou vyráběny z různých materiálů, odlišných tvarů a geometrií, které spolu s řeznými podmínkami umožňují optimalizovat výrobní proces s cílem zajistit vyšší životnost nástroje, efektivitu a hospodárnost výroby. Materiál řezného nástroje musí být vždy tvrdší než materiál obrobku minimálně o 5 až 6 HRC a musí být schopen odolat tepelnému zatížení vznikajícímu při obrábění. Řezné nástroje bývají také vystaveny zvýšenému mechanickému a často i dynamickému namáhání v průběhu řezného procesu, proto musí vykazovat určité adekvátní vlastnosti. Ideální řezný nástroj musí tedy poskytovat vyváženou kombinaci vysoké tvrdosti a zároveň výborné houževnatosti, ohybovou pevnost, dobrou tepelnou a chemickou stabilitu. Nástroje, které dokonale kombinují tyto vlastnosti, nejsou v současné době objeveny. Přesto se v každém obráběcím procesu najde nástroj, který bude nejlepší volbou pro konkrétní operaci. [1]

Obr. 2 ukazuje, že tvrdost a houževnatost jsou dvě diametrálně odlišné vlastnosti nástrojových materiálů. Optimální rovnováha mezi tvrdostí a houževnatostí je viditelná u slinutých karbidů a cermetů. V dokončovacích operacích, které odebírají typicky malý průřez třísky, jsou aplikovány tvrdé materiály umožňující vysoké rychlosti řezu. Naopak při hrubovacích cyklech odebírajících velký objem třísek jsou aplikovány vyšší rychlosti posuvu. Proto je nutné zvolit nástroje s vysokou houževnatostí. [2]



Obr. 2 Vliv vlastností materiálu na řezné podmínky [3]

1.1 Princip řezných nástrojů

Řezné nástroje mají tvar klínu, který vstupuje do materiálu obrobku a silovým působením postupně odebírá přebytečný materiál formou třísky. Kontaktní plocha na čele nástroje způsobuje velké tření, tím vzrůstá teplota a dochází k plastickým deformacím v okolí řezu. Všechny nežádoucí deformace a teplotní účinky lze optimalizovat vhodným výběrem geometrie nástroje, řeznou a posuvovou rychlostí, úhlem řezu a řezným prostředím. Řezný nástroj se obecně skládá z řezné a nosné části. Řeznou část tvoří řezný klín, který je průsečíkem čela a hřbetu nástroje. Jeho funkční část se nazývá ostří (břit). Nosná část představuje stopku, či upínací část nástroje, a slouží k upnutí do obráběcího stroje. Řezný nástroj může obsahovat jednu nebo více řezných klínů v závislosti na typu obráběcího procesu. [1]

Jednobřité řezné nástroje jsou charakteristické pouze jednou řeznou hranou, neboli břitem. Aplikují se zejména v oblasti soustružení jako celistvé soustružnické nože nebo nejčastěji s vyměnitelnými břitovými destičkami. Břitové destičky jsou vyráběny v široké škále tvarů, velikostí i materiálů určené pro konkrétní obráběcí operace. Vhodný výběr břitové destičky úzce souvisí také s mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu. Patří mezi levnější produkty pro jednoduchost a menší časovou náročnost výroby. Nevýhodou těchto nástrojů zůstává velká míra opotřebení v důsledku nepřetržitého kontaktu s materiálem, čímž výrazně klesá jeho životnost.

Do kategorie dvoubřitých nástrojů patří vrták, výhrubník nebo dvoubřitá stopková fréza. V této kategorii se vyskytují také vyměnitelné vrtákové břity, které se v případě výměny nasazují na stávající těleso vrtáku.

Vícebřité nástroje se uplatňují především v procesech frézování, ale také při vystružování, protahování, broušení nebo honování. Mezi vícebřité frézovací nástroje se řadí stopkové, tvarové, nástrčné i odvalovací frézy nebo frézy s vyměnitelnými destičkami. V důsledku rovnoměrného zatížení všech řezných hran se snižuje síla působící na každý břit. Protože žádná řezná hrana není v trvalém kontaktu s materiálem obrobku, snižuje se množství tepla působící na nástroj, a tím se snižuje jeho opotřebení a zvyšuje se životnost. Naopak z důvodu přerušovaného řezu jsou jednotlivé řezné hrany vystaveny proměnlivému zatížení, což způsobuje větší hluk a vibrace. Konstrukce a výroba frézovacích nástrojů je poměrně náročná a tomu odpovídá vyšší pořizovací cena. [4]

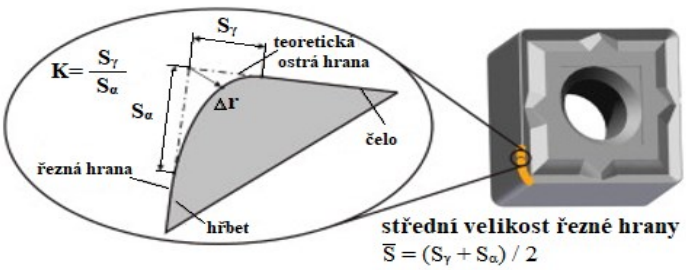
1.2 Geometrie řezných nástrojů

Geometrie řezných nástrojů hraje důležitou roli ve všech obráběcích aplikacích. Má významný vliv na velikost a průběh řezné síly, na tvorbu třísky a její odchod z místa řezu, na jakost a integritu povrchu obrobené plochy. Vhodně zvolená geometrie snižuje opotřebení, prodlužuje životnost nástroje a spolehlivost procesu. Geometrie je určena soustavou nástrojových úhlů vzhledem k nástrojovým rovinám. Příslušné geometrické parametry jsou přizpůsobeny konkrétním obráběcím operacím. Nezbytná znalost konstrukce a geometrie řezného nástroje je prvořadým požadavkem při výrobě i ostření nástrojů a zejména při modelování obráběcí operace. Geometrii řezných nástrojů lze rozdělit na makrogeometrii a mikrogeometrii. [5]

Makrogeometrie specifikuje základní geometrické parametry nástroje. Představuje samotný tvar řezné části nástroje, velikost nástrojových úhlů, řezných hran i zaoblení břitu.

Mikrogeometrie je charakterizována poloměrem řezné hrany, která představuje přechod mezi čelem a hřbetem řezného klínu. V důsledku broušení vznikají na břitu řezného nástroje defekty v podobě nerovností způsobené brousícím nástrojem. Tato poškození lze specifikovat jako útvary velikosti několika mikrometrů, které negativně ovlivňují kvalitu břitu a zabraňují dokonalé adhezi vrstev povlaku na substrát řezného nástroje. Na úpravu drsnosti povrchu a řezné hrany jsou zavedeny různé technologické operace, jako tryskání, kartáčování, omílání, pískování a jiné. Výsledkem těchto procesů je odstranění defektů, zaoblení řezných hran a získání požadované drsnosti. Úprava mikrogeometrie řezné hrany významně ovlivňuje kvalitu řezného procesu, vede ke zvýšení výkonnosti a trvanlivosti řezného nástroje. Současně přispívá k adhezi vrstvy k substrátu, co má za následek kvalitní soudržnost povrchové vrstvy povlaku. [5] [6]

Analýza mikrogeometrie řezného nástroje a jeho vliv na výkon se stanovuje faktorem symetrie a asymetrie ostří K, znázorněném na obr. 3. [7]



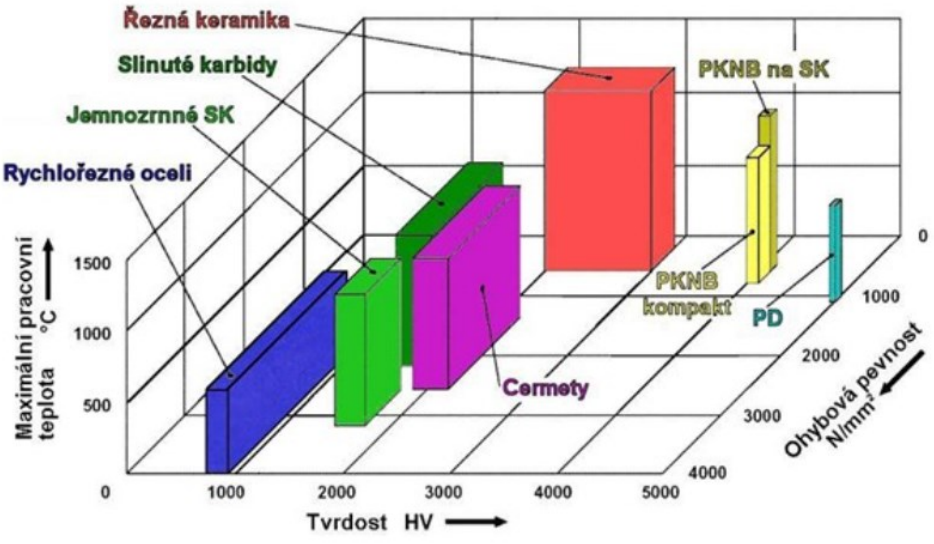
Obr. 3 Mikrogeometrie řezné hrany [7]

2 MATERIÁLY ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Snaha optimalizovat výrobní proces vedla k vývoji nástrojových materiálů schopných efektivně obrábět široké spektrum materiálů. V současnosti to jsou zejména těžce obrobitelné oceli, slitiny hliníku a titanu nebo kompozity a polymerní materiály aplikované v mnoha odvětvích průmyslu. Podstatou nástrojových materiálů je převaha fyzikálně mechanických vlastností řezného nástroje nad vlastnostmi obráběného materiálu.

Řezné nástroje jsou vyráběny z různých materiálů od nástrojové oceli po keramiku a diamanty. Protože řezné nástroje pracují v extrémních podmínkách, je důležité, aby nástrojové materiály byly dostatečně tvrdé, houževnaté, chemicky a tepelně stabilní, aby odolávaly opotřebení, rázům a podobně. Nástrojové materiály představují kombinaci těchto vlastností a jejich výběr ovlivňuje konečnou kvalitu řezného nástroje. Znalost nástroje z hlediska fyzikálních a mechanických vlastností je základem pro stanovení optimálních podmínek a užití v konkrétních aplikacích. [2]

Obr. 4 prezentuje současné třídy nástrojových materiálů a jejich vzájemnou závislost z pohledu fyzikálních, chemických a mechanických vlastností. [2]



Obr. 4 Vlastnosti nástrojových materiálů [3]

2.1 Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli se označují zkratkou HSS odvozenou z anglického názvu High Speed Steel. Původně patřily mezi nejtvrdší nástroje, které byly schopny pracovat při vysokých řezných rychlostech. Dnes jsou tyto řezné rychlosti nedostačující, ale přesto si svou pozici udržely v mnoha aplikacích jako je vrtání, vystružování nebo závitování. Řadí se do samostatné skupiny vysokolegovaných nástrojových ocelí. Výkonnost rychlořezné oceli je zásadně ovlivněna prokalitelností a správným tepelným zpracováním. Vlastnosti konkrétního nástroje jsou určeny procentuálním podílem uhlíku a legujících prvků nástrojového materiálu. [8]

Rychlořezné oceli jsou legovány karbidy tvořícími prvky wolframu (W) nebo molybdenu (Mo) spolu s určitými procenty chromu (Cr), vanadu (V) a nekarbidotvorného kobaltu (Co). Vysoký obsah legujících prvků zajišťuje hlubokou prokalitelnost, zatímco pevnost a tvrdost se zvyšuje s rostoucím obsahem uhlíku. Uhlík je nejdůležitější přirozenou složkou rychlořezné oceli, který spolu s legujícími prvky vytváří vysoce tvrdé a stabilní karbidy. Obsah uhlíku je přísně kontrolován v určitých tolerančních mezích, aby nedocházelo k výrazným změnám mechanických vlastností a řezné schopnosti. Wolfram a molybden definují strukturu rychlořezné oceli a vykazují podobné vlastnosti. Oceli na bázi wolframu poskytují obecně vyšší tvrdost za tepla, kdežto molybdenové oceli mají vyšší houževnatost. Rychlořezné oceli obsahují i další přísadové prvky, jmenovitě křemík (Si), mangan (Mn), fosfor (P), síru (S) a dusík (N), které jsou udržovány v poměrně malých koncentracích. Tyto prvky nemají žádný vliv na mechanické vlastnosti, ale mohou zlepšit kalitelnost nebo proces popouštění. Z důvodu nízké pevnosti a omezené tepelné stabilitě jsou rychlořezné oceli oproti jiným nástrojovým materiálům limitovány na nižší řezné rychlosti. [8]

Výroba rychlořezné oceli se provádí dvěma způsoby, a to slévárenskou technologií nebo práškovou metalurgií. Slévárenská technologie založená na tavení oceli s postupným ochlazováním a následným tepelným zpracováním se také označuje jako konvenční metalurgie. Metoda práškové metalurgie zahrnuje proces výroby prášku a jeho tvarování do kompaktního produktu. Užitné vlastností vedoucí ke zvýšení trvanlivosti nástroje z rychlořezné oceli lze povýšit nanesením ochranných vrstev. [9]

2.1.1 Vliv legujících prvků

Wolfram – základní karbidotvorný prvek, definuje strukturu rychlořezné oceli. Zvyšuje tvrdost, zejména při vysokých řezných teplotách, pevnost a odolnost vůči opotřebení.

Molybden – základní karbidotvorný prvek, kterým lze nahradit wolfram v poměru jednoho hmotnostního procenta molybdenu za dvě hmotnostní procenta wolframu. Definuje strukturu rychlořezné oceli a vykazuje lepší houževnatost.

Chrom – obecně se koncentrace pohybuje v rozmezí 3 – 5 %. Dobrým kompromisem mezi tvrdostí a houževnatostí se ukázal přídavek 4 %. Zodpovídá za kalitelnost, zvyšuje pevnost a zabraňuje oxidaci.

Vanad – podporuje výrobu tvrdých a stabilních karbidů a zabraňuje růstu zrn během tepelného zpracování. Minimalizace růstu zrna se projevuje zvýšením pevnosti, houževnatosti a odolnosti proti oděru.

Kobalt – netvoří karbidy, zajišťuje tepelnou odolnost, přidáním 5 – 8 % kobaltu se zvyšuje pevnost a odolnost vůči opotřebení (vrtáky). [8]

2.1.2 Rychlořezné oceli vyráběné práškovou metalurgií

Princip výroby spočívá v tryskovém rozprašování tekuté taveniny neboli atomizace. Rozprašovací tryska vytvoří drobné kapičky oceli, které tuhnou důsledkem rychlého ochlazování. Připravené prášky se lisují při velmi vysokém tlaku do požadovaného tvaru. Na rozdíl od konvenčně vyráběných ocelí lze v případě prášků zvýšit koncentrace legujících prvků. Nástroje vyrobené práškovou metalurgií obsahují jemnozrnnou, homogenní strukturu s rovnoměrně rozloženými karbidy. Tím se dosahuje lepší houževnatosti a odolnosti vůči opotřebení. [10]

2.1.3 Povlakované rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli jsou všeobecně vynikající substráty pro různé ochranné povlaky. Nanášení ochranných povlaků prodlužuje životnost nástrojů a zvyšuje výkon řezného procesu. Přestože jsou povlaky ekonomicky náročnější, poskytují povlakované nástroje vyšší produktivitu a kvalitu výroby. Pro aplikaci otěruvzdorných vrstev na rychlořezné oceli se využívá metoda fyzikální depozice par (PVD). Nejběžnějším typem povlaku je nitrid titanu (TiN), který vytvoří zlatý povrch na nástroji. [11]

2.2 Slinuté karbidy

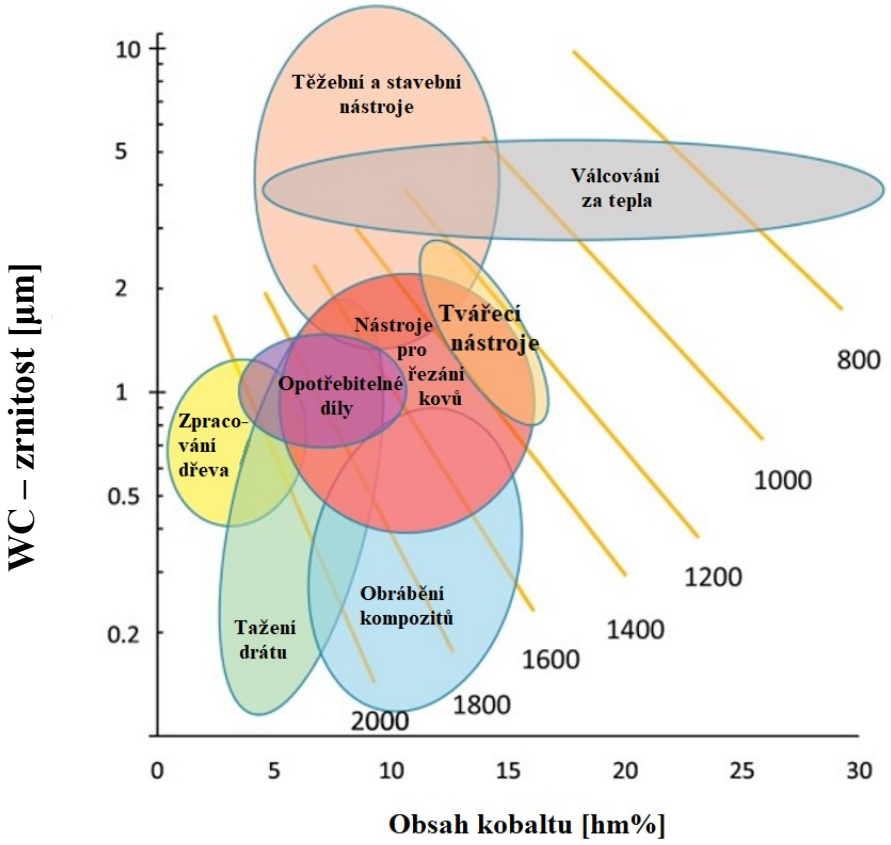
Slinuté karbidy zaujímají dominantní postavení na trhu s řeznými nástroji. Výroba slinutých karbidů má téměř stoletou tradici. V roce 1926 představila německá zbrojařská firma Krupp první nástroj ze slinutého karbidu s názvem WIDIA, (zkratka WIe DIAmant = jako diamant, vyjadřovala objev řezného nástroje tvrdého jako diamant) vyrobený technologií práškové metalurgie. Přestože výroba byla na tehdejší dobu velmi nákladná, nezabránila rozšíření do strojírenské výroby. V počátku vývoje obsahoval pouze karbid wolframu s malým poměrem kobaltu. Dlouholetým výzkumem vzešly další typy karbidů, jako karbid titanu (TiC), karbid tantalu (TaC) či karbid niobu (NbC). [2]

Výroba slinutých karbidů se výhradně provádí procesem práškové metalurgie. Představuje náročný proces všech po sobě jdoucích zpracovatelských operací. Nastane-li změna v některém výrobním procesu, dojde k negativnímu ovlivnění následných operací a tím celého výsledného produktu. Výrobní proces zahrnuje operace výroby práškových karbidů a pojiv, míchání práškových směsí, formování směsí do požadovaného tvaru, předslinování a konečné slinování. Předslinování se provádí za účelem odstranění plastifikátorů, tedy přídavných látek, které usnadňují formování směsi. Teplota předslinování se pohybuje v rozmezí od 700 – 850 °C, při níž nedochází ke změnám tvaru ani chemickému složení zpracovaného materiálu. Při výrobě slinutých karbidů hraje klíčovou roli proces slinování. Má zásadní vliv na konečnou strukturu řezného materiálu a jeho mechanické, chemické i fyzikální vlastnosti. Provádí se za teplot od 1350 – 1650 °C, které jsou obecně nižší než teplota tání karbidových složek. Posledním zásadním krokem výroby je broušení pro úpravu tvaru, geometrie a tolerance řezného nástroje. [2] [12]

Slinuté karbidy jsou bezesporu nejrozšířenější nástrojové materiály současnosti. Základním materiálem na výrobu slinutých karbidů jsou tvrdé karbidy vysokotavitelných kovů uložených v kovové matrici, zvané pojivo. Největší zastoupení mají slinuté karbidy vyrobené kombinací složek karbidu wolframu (WC) s kobaltovým pojivem (Co). Spojení tvrdé a křehké fáze karbidu wolframu s měkkým a tvárným kobaltovým pojivem poskytuje dokonalý poměr mezi tvrdostí a houževnatostí nástrojového materiálu. Obohacením složek WC-Co dalšími karbidovými prvky, jako karbid titanu (TiC), karbid tantalu (TaC) a karbid niobu (NbC) přineslo zlepšení mechanických a tribologických vlastností. Přídavek karbidu titanu (TiC), stejně jako karbidu tantalu (TaC) a karbidu niobu (NbC), zlepšuje tvrdost při vysokých teplotách a brání vzniku plastických deformací. Obohacením výchozí práškové

směsi stopovým množstvím přísad kovů (V, Nb, Ta, Ti, Hf) nebo karbidů (VC, NbC, TaC, Zr/HfC) zabraňuje růstu zrna WC a výsledkem bude jemnozrnný slinutý karbid s vyšší tvrdostí a pevností. Významný pokrok vedoucí ke zvýšení výkonu a potažmo i životnosti nástrojů nastal aplikací tvrdých otěruvzdorných vrstev na povrch řezného nástroje. Tím se podstatně zvýšila řezná a posuvová rychlost, která souvisí s větším úběrem materiálu a snížením výrobních časů. [2]

Vlastnosti slinutých karbidů jsou podstatně ovlivněny složením karbidů a výslednou strukturou materiálu. Nejlepší technologické vlastnosti vykazuje jemnozrnná struktura, kterou je nutné zajistit již v počátku výroby. Kombinací velikostí zrna WC a množství kobaltu lze dosáhnout nespočet variací tvrdosti a houževnatosti pro široké aplikace v rozsáhlém technologickém průmyslu, jak ukazuje obr. 5. Čáry označují hodnotu tvrdosti podle Vickerse. [12]



Obr. 5 Oblast použití slinutých karbidů [12]

Základní rozdělení slinutých karbidů spočívá v přítomnosti nebo absenci tvrdých otěruvzdorných vrstev. Na základě zmíněné skutečnosti rozdělujeme slinuté karbidy na nepovlakované a povlakované.

Tabulka 1 Rozdělení slinutých karbidů podle mezinárodní normy ČSN ISO 513:2015 [13]

Identifikační značka	Materiálová skupina
HW	Nepovlakovaný slinutý karbid s obsahem primárního karbidu wolframu (WC), s velikostí zrna ≥ 1μm
HT	Nepovlakovaný slinutý karbid s obsahem primárního karbidu wolframu (WC), s velikostí zrna < 1μm
HF	Nepovlakované cermety s hlavním obsahem karbidu titanu (TiC) nebo nitridu titanu (TiN) nebo obojí
HC	Karbidy výše uvedené ale povlakované

2.2.1 Nepovlakované slinuté karbidy

Vlivem postupné diverzifikace obráběných materiálů bylo podstatné usnadnit výběr pro jejich opracování. K tomu značně přispělo zavedení normalizovaných standardů. Materiály řezných nástrojů klasifikuje mezinárodní norma ČSN ISO 513:2015. [13]

Tato norma řadí slinuté karbidy do šesti základních skupin P, M, K, N, S, H a poskytuje tak informaci o schopnosti obrobit daný materiál. Identifikačními znaky jsou velká písmena s příslušným barevným značením. Aplikační skupiny P, M, a K rozlišují slinuté karbidy na základě složení karbidových prvků. Ve skupinách N, S a H se kromě slinutých karbidů mohou vyskytovat i jiné tvrdé nástrojové materiály. [2]

Slinuté karbidy ISO P se skládají z krystalů karbidu wolframu, karbidu titanu vyplněné kobaltovým pojivem v obvyklém složení WC (30 ÷ 80) % + TiC (8 ÷ 64) % + Co (5 ÷ 17) % + (Tac.NbC). Vyšší podíl karbidů tantalu a titanu eliminuje vznik výmolů na čele nástroje. Uplatňují se při obrábění materiálů vytvářejících dlouhou třísku, tedy u většiny ocelí. [2]

Slinuté karbidy ISO M tvoří soustavu více karbidových složek s kobaltovým pojivem v běžném procentním složení WC (79 ÷ 84) % + TiC (5 ÷ 10) % + TaC.NbC (4 ÷ 7) % + Co (6 ÷ 15) %. Umožňují obrábět různorodé ocelové materiály produkující střední až dlouhou třísku, například korozivzdorná nebo litá ocel. Typ ISO M je označován jako univerzální slinutý karbid, který zahrnuje širší spektrum použití. [2]

Slinuté karbidy ISO K se skládají z karbidu jednoho prvku a kobaltového pojiva WC (87 ÷ 92) % + Co (4 ÷ 12) % + (Tac.NbC). Základní soustava může obsahovat nepatrné množství karbidu tantalu a karbidu niobu, jejichž úkolem je především zabránit růstu zrna a tím získat jemnější strukturu řezného materiálu. Používají se pro obrábění litin, vytvářejících krátkou a drobivou třísku. [2]

Slinuté karbidy ISO N se označují jako neželezné. Z toho vyplývá jejich použití pro obrábění nekovových skupin materiálů a jejich slitin, zejména hliníku a slitin hliníku.

Slinuté karbidy ISO S umožňují opracovat vysokolegované a žáruvzdorné materiály na bázi železa-niklu (Fe-Ni), niklu (Ni) a kobaltu (Co), které se často označují pojmem superslitiny. Dále jsou určeny pro obrábění titanu a titanových slitin. [2]

Slinuté karbidy ISO H poskytují nejvhodnější kombinaci vlastností pro obrábění vysokopevnostních tvrdých materiálů, jako jsou zušlechtěné a kalené oceli nebo tvrzené litiny. [2]

Dále se každá ze základních skupin rozděluje na podskupiny, které číselnou formou vyjadřují příslušnou pevnost a opotřebení, například P01, K10, H30. S rostoucí hodnotou se zvyšuje ohybová pevnost i houževnatost a současně klesá tvrdost a otěruvzdornost nástrojového materiálu. Je to dáno vyšším obsahem pojící kovové fáze. Norma ISO 513:2015 také rozděluje přímo nepovlakované slinuté karbidy podle velikosti zrna do skupiny HW (zrnitost ≥ 1μm) a HF (zrnitost < 1μm). Nepovlakované slinuté karbidy tvoří malou skupinu řezných nástrojů určených pro specifické aplikace, které apelují na maximální ostrost řezných hran a nízké řezné síly. [2] [13]

Tabulka 2 Oblast použití slinutých karbidů [13]

Hlavní aplikační skupiny			**Aplikační podskupiny**			
Identif. písmeno	**Identifikační barva**	**Obráběné materiály**	**Tvrdé řezné materiály**		—	
P	modrá	**Ocel:** Všechny druhy oceli a ocelolitiny kromě korozivzdorných ocelí s austenitickou strukturou	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	↑a	↓b

Hlavní aplikační skupiny			Aplikační podskupiny			
Identif. písmeno	Identifikační barva	Obráběné materiály	Tvrdé řezné materiály		—	
M	žlutá	**Korozivzdorná ocel:** Korozivzdorná austenitická a austeniticko – feritická ocel a ocelolitina	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	↑a	↓b
K	červená	**Litina:** Šedá litina, tvárná litina, temperovaná litina	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	↑a	↓b
N	zelená	**Neželezné kovy:** Hliník a ostatní neželezné kovy, nekovové materiály	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	↑a	↓b
S	hnědá	**Superslitiny a titan:** Žáruvzdorné speciální slitiny na bázi železa, niklu a kobaltu, titan a slitiny titanu	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25	↑a	↓b
H	šedá	**Tvrdé materiály:** Zušlechtěné a kalené oceli s vysokou pevností, tvrzené litiny	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	↑a	↓b
a Zvyšování rychlosti, zvyšování otěruvzdornosti řezného materiálu b Zvyšování posuvu, zvyšování houževnatosti řezného materiálu						

2.2.2 Povlakované slinuté karbidy

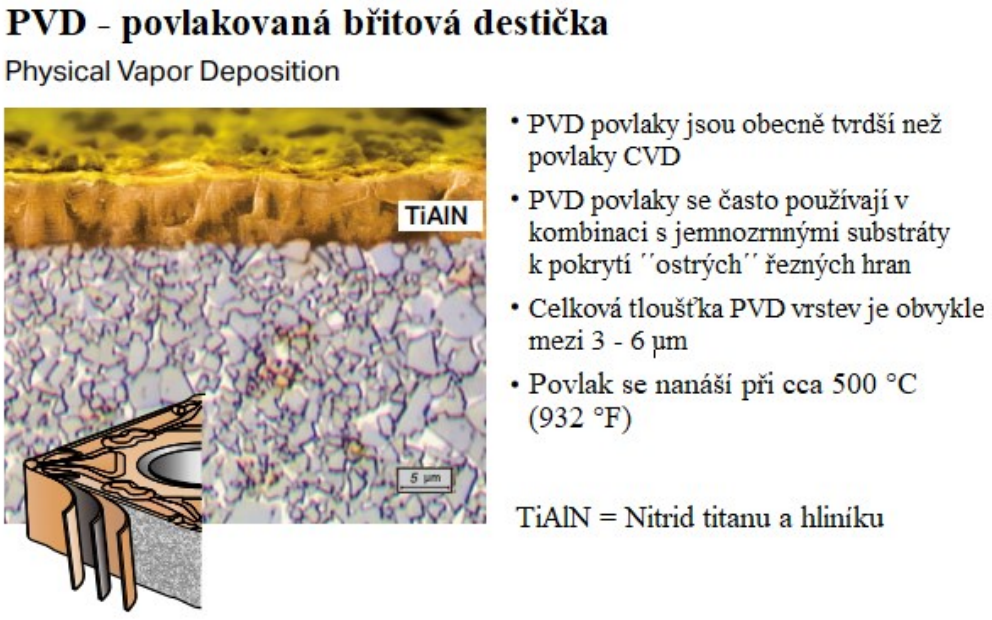
Kombinace tvrdosti a houževnatosti slinutých karbidů představuje spolehlivou volbu v mnoha obráběcích procesech. Depozice tenkých vrstev přinesla výrazné zlepšení mechanických vlastností slinutých karbidů. Nanesením velmi tvrdých, tenkých, otěruvzdorných vrstev získá původní slinutý karbid větší tvrdost a vyšší odolnost vůči opotřebení, při zachování houževnatého jádra.

Přestože výzkumy v oblasti povlakování probíhaly již ve dvacátých letech minulého století, úspěch se dostavil až v roce 1952. Tehdy německý podnik Metallgesllschaft AG aplikoval na slinutý karbid povlak na bázi karbidu titanu (TiC), jež si nechal patentovat až v roce 1959. O deset let později v roce 1969 vstoupila na trh první povlakovaná břitová destička ze slinutého karbidu od společnosti Sandvik Coromant. Otěruvzdorná vrstva TiC byla aplikována v tloušťce 4 ÷ 5 μm na materiál GC125 technologií CVD (Chemical Vapour Deposition). Vzápětí následovaly další povlaky typu nitridu titanu (TiN) a

karbonitridu titanu (TiCN), později pak oxid hlinitý (Al_2O_3). V počátku se vytvářely pouze jednovrstvé povlaky karbidu, nitridu nebo karbonitridu titanu a postupným vývojem se dosáhlo vícevrstvých povlaků. Až do osmdesátých let byla technologie CVD jedinou metodou pro aplikaci ochranných vrstev řezných nástrojů. Následovala metoda PVD (Physical Vapour Deposition), která byla vyvinuta za účelem nanášení ochranných vrstev na rychlořezné oceli. [2]

Pestrá nabídka povlaků přináší různorodé vlastnosti využitelné v nejnáročnějších aplikacích. Řezné nástroje opatřené ochrannými povlaky na bázi karbidů, nitridů, oxidů a boridů jsou schopny pracovat v náročných provozních podmínkách. Proto jsou hojně uplatňovány v procesech vysokorychlostního obrábění. Aplikace ochranných vrstev zásadně zvýšila trvanlivost řezného nástroje. Delší trvanlivosti dosahují řezné nástroje s vícevrstvými povlaky v porovnání s nástroji nepovlakovanými nebo s jednovrstvým povlakem. [2]

Obr. 6 a obr. 7 znázorňují pohled v řezu na břitovou destičku od společnosti Sandvik Coromant. Břitové destičky jsou opatřeny dvěma rozdílnými technikami depozice povlaku a různým složením otěruvzdorné vrstvy. [14]



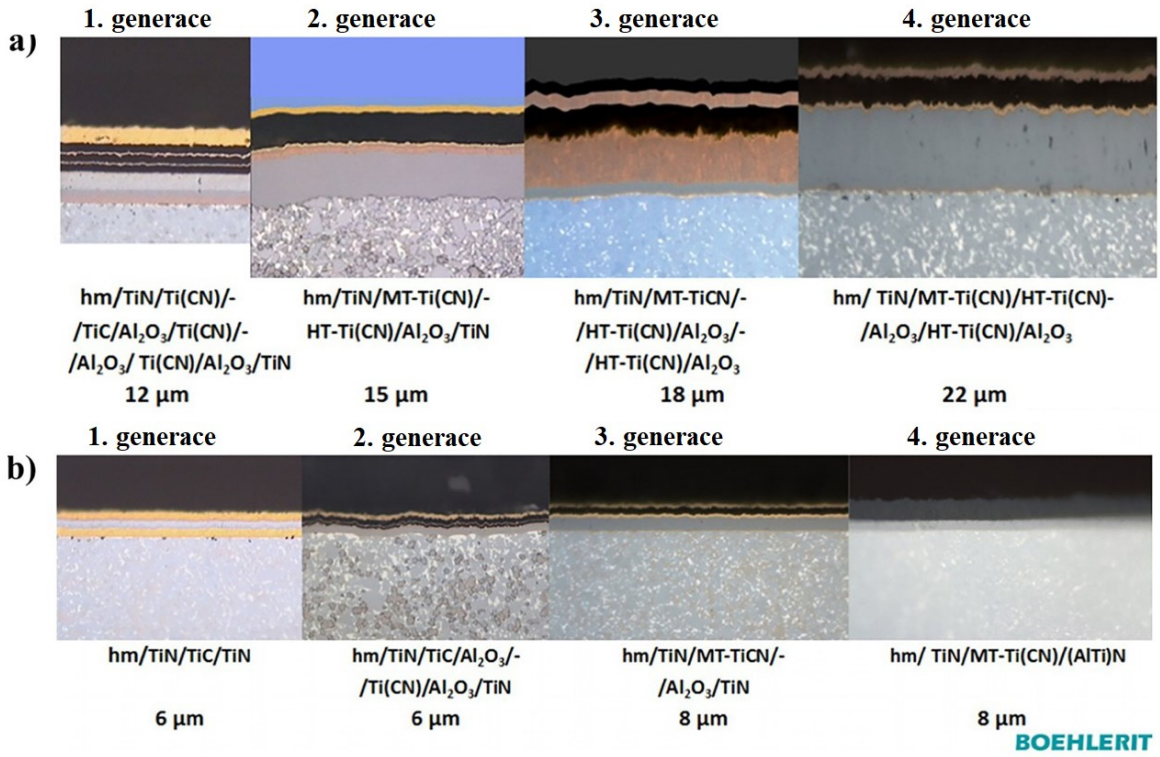
Obr. 6 Povlakovaná břitová destička metodou PVD [14]

Obr. 7 Povlakovaná břitová destička metodou CVD [14]

Každý povlakovaný slinutý karbid prošel fází vývoje, který literatura označuje pojmem generace, jehož grafická podoba je znázorněna na obr. 8. Poslední vývoj přinesl již čtvrtou generaci povlaků. [2]

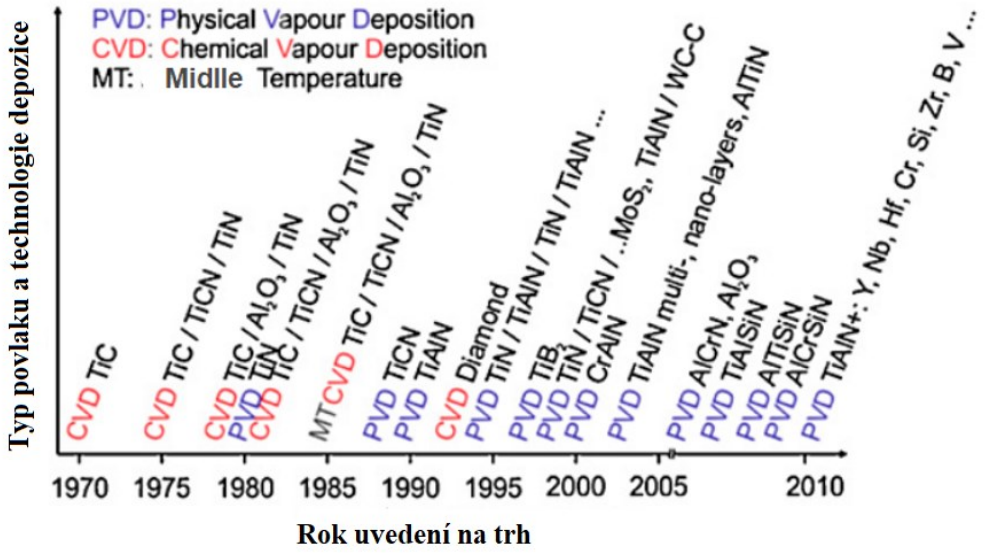
- **1. generace** – jednovrstvý povlak vytvořený vrstvou TiC s tloušťkou kolem 6 µm. Mezi substrátem a vrstvou docházelo k tvorbě *eta* – karbidu, který zamezil dobré přilnavosti povlaku na substrát. Proto docházelo k odlupování povlaku při obráběcích cyklech.
- **2. generace** – jednovrstvý povlak na bázi TiC, TiCN nebo TiN, kdy se mezi vrstvou a substrátem již nevytvářel *eta* – karbid. Tloušťka vrstvy povlaku vzrostla na 7 – 10 µm. Díky absenci *eta* – karbidu došlo k dokonalé soudržnosti povlaku se substrátem.
- **3. generace** – vícevrstvý povlak, který je od substrátu po horní vrstvu nejčastěji řazen v následujícím pořadí TiC-Al_2O_3, TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC-Al_2O_3-TiN. Jednotlivé přechody mezi vrstvami jsou zřetelně ohraničeny. První vrstva povlaku musí zajistit zejména dobrou přilnavost k substrátu. Ostatní vrstvy musí být schopny přilnout navzájem a poskytnout nástroji žádané mechanické vlastnosti.

- **4. generace** – speciální vícevrstvé povlaky. Často se skládají z více než deseti vrstev a mezivrstev. Přechody mezi jednotlivými vrstvami mohou nebo nemusí být ostře ohraničeny. Povlaky tohoto typu jsou nanášeny speciální technologií cíleného řízení atmosféry v povlakovacím zařízení. Materiály povlaků jsou shodné s předchozí 3. generací.



Obr. 8 Nedávný vývoj vícevrstvých CVD povlaků uložených na substrátech ze slinutých karbidů pro aplikace: a.) řezání oceli a b.) frézování oceli [15]

Slinuté karbidy nejsou zcela jediným nástrojovým materiálem, který lze opatřit ochrannou vrstvou povlaku. Ve značné míře se aplikují také na nástrojové materiály z rychlořezných ocelích, cermetů, řezné keramiky a velmi výjimečně na kubický nitrid boru. Sortiment jednotlivých vrstev se postupně rozšířil o nové materiály například AlTiN, TiAlN, TiAlSiN, CrAlSiN, Al_2O_3 + ZrO_2, TiC + TiB_2, TiZrN, HfC, HfN, B_4C, SiO_2, CrN, CrC, TiO_2, Ti_2N, ZrC, ZrN, z nichž některé jsou ve fázi zkoumání a zatím nedochází k jejich praktickému užití. Kombinací jednotlivých složek dosahuje řezný nástroj jedinečných vlastností jako tvrdost, pevnost, odolnost vůči oxidaci, odolnost proti abrazivnímu i celkovému opotřebení, otěruvzdornost nebo snížení koeficientu tření. Kvalita povlakovaného řezného nástroje je ovlivněna materiálem substrátu, typem povlaku, technologií depozice až po strukturu jednotlivých vrstev. [2]

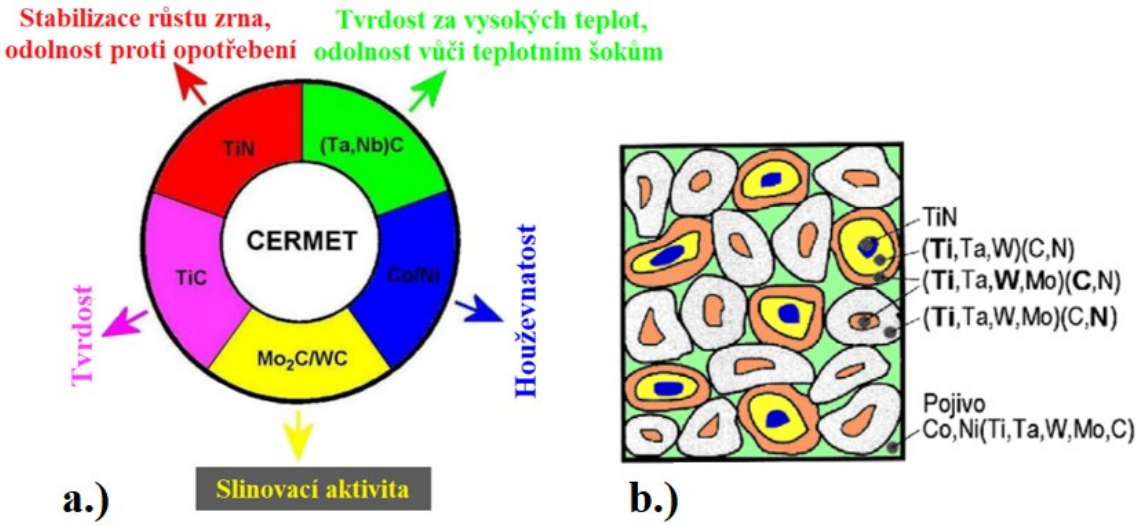


Obr. 9 Vývoj povlakovaných materiálů řezných nástrojů [16]

2.3 Cermety

Svůj název získal cermet spojením slov keramika (CER) a kov (MET). Jedná se o kompozitní materiál, jehož hlavní složku tvoří tvrdé částice TiCN nebo směs TiC-TiN a fáze kovového pojiva na bázi niklu (Ni), kobaltu (Co) nebo molybdenu (Mo) a jejich kombinace. Pro zajištění lepších výsledků slinování nebo dosažení vyšší tepelné odolnosti a chemické stálosti se základní kompozice cermetu obohacuje o složky karbidů, například karbidy molybdenu (Mo_2C), wolframu (WC), vanadu (VC), niobu (NbC), tantalu (TaC), zirkonu (ZrC), (Zr_3C_2). Mechanické vlastnosti cermetů závisí na mikrostruktuře a chemickém složení. Cermetové řezné nástroje na bázi karbonitridu titanu vykazují velkou tvrdost za vysokých teplot, vyšší ohybovou pevnost a odolnost vůči oděru. Cermety umožňují obrábět nepřeberné množství materiálů včetně uhlíkových ocelí, litin a korozivzdorných ocelí. Zásadní výhodou cermetů je aplikace v procesu vysokorychlostního obrábění při mnohem vyšších řezných rychlostech, než lze použít u slinutých karbidů. Výstupem je dosažení mnohem lepší toleranční přesnosti a integrity povrchu obráběného materiálu. Mechanické vlastnosti lze dále vylepšit nanesením tenkých, tvrdých vrstev povlaku. [2]

Obr. 10a charakterizuje, jakým způsobem se jednotlivé přísadové materiály podílí na zlepšení chemických, fyzikálních a zejména mechanických vlastností cermetových řezných nástrojů.



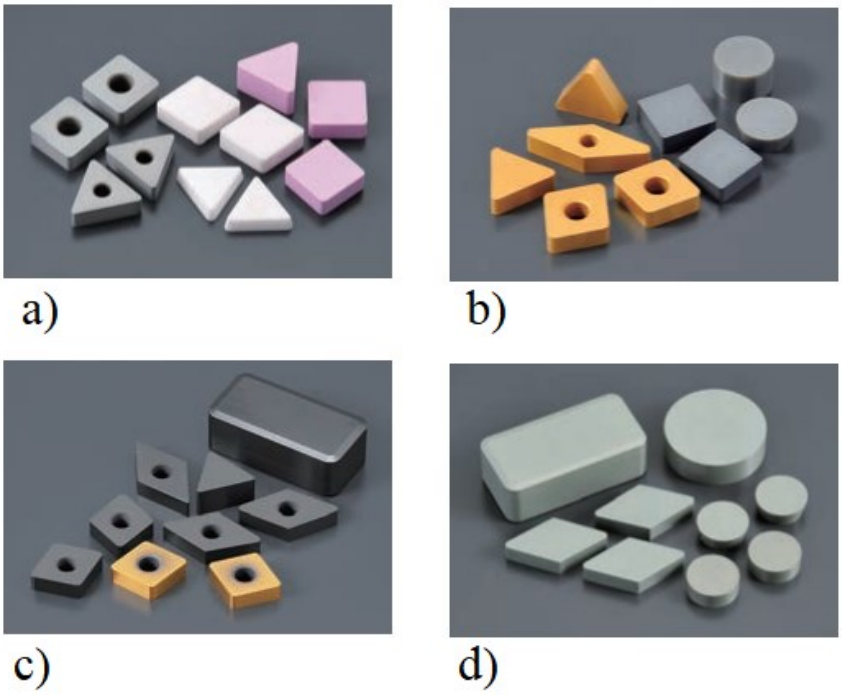
Obr. 10 a.) Závislost přísad na vlastnosti cermetů b.) Struktura cermetů [11]

Mikrostruktura cermetů na bázi Ti(C,N) je podstatně složitější než mikrostruktura slinutých karbidů typu WC-Co. Složení prášků, slinovací atmosféra, velikost a rozmístění zrn se významně podílí na mikrostruktuře a zásadně ovlivňuje konečné mechanické vlastnosti. Mikrostruktura cermetu znázorněná na obr. 10b sestává z jader Ti(C,N), které jsou obklopeny pláštěm složitých karbonitridů (Ti, Ta, W, Mo, Nb…) (C,N) spojených v kovovém pojivu. [2]

2.4 Řezná keramika

Zájem o keramické řezné materiály neustále roste pro jejich vysokou tvrdost, odolnost vůči vysokým teplotám a zejména příznivé dostupnosti surovin pro jejich výrobu. Řezná keramika je obecně vyráběna z nekovových anorganických látek spojených částečně iontovými a částečně kovalentními vazbami. Výroba zahrnuje podobné postupy jako u slinutých karbidů. Zásadní rozdíl spočívá v nepřítomnosti tvrdých fází a kovového pojiva. Svůj konečný tvar dosahuje řezná keramika v průběhu slinování ve speciálních pecích, kde dochází ke smrštění výlisku do pevného tělesa. Vzhledem k výborným mechanickým vlastnostem je řezná keramika vhodným materiálem v oblasti vysokorychlostního obrábění. Významná je především vysoká tvrdost, která zůstává zachována při extrémně vysokých teplotách obrábění, vysoká trvanlivost, odolnost vůči opotřebení, odolnost vůči korozi, chemická stálost. Problémem je naopak křehkost, nízká houževnatost a omezená schopnost odolávat teplotním šokům. Dnešní nástroje z řezné keramiky prakticky neomezují oblast použití v řezném procesu. Jsou aplikovány v oblasti soustružení i

frézování v hrubovacích i dokončovacích operacích různých druhů materiálů, navíc bez použití řezné kapaliny. [2]



Obr. 11 Typy keramických řezných materiálů [17]

a) čistá keramika na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3), b) směsná keramika oxidu hlinitého s přídavky karbidu titanu (Al_2O_3 + TiC, Al_2O_3 + TiC TiN), c) keramika na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4, SiAlON), d) řezná keramika na bázi oxidu hlinitého vyztužená karbido-křemíkovými vlákny (Al_2O_3 + SiC) [17]

Široká nabídka současných keramických nástrojových materiálů mnoha velikostí a tvarů je výsledkem požadavků na zvýšení efektivity výrobních procesů. Každý druh řezné keramiky uvedených na obr. 11 má své jedinečné vlastnosti zajišťující efektivní obrábění různých materiálů. [17]

Podle mezinárodní normy ČSN ISO 513:2015 se řezná keramika rozděluje do pěti skupin. Obecněji lze řeznou keramiku rozdělit podle jejích hlavních složek do dvou kategorií, na oxidovou a nitridovou keramiku. [2]

- Oxidová keramika – čistá (99,5 % Al_2O_3).

  – polosměsná (Al_2O_3+ZrO_2), (Al_2O_3+ZrO_2 CoO).

  – směsná (Al_2O_3+TiC), (Al_2O_3+TiCN), (Al_2O_3+ZrO_2+TiC),

(Al_2O_3+TiC TiN).

- Nitridová keramika – (Si_3N_4), (Si_3N_4+Y_2O_3), (Si_3N_4+TiN), (Si_3N_4+Al_2O_3),

Známým a rozšířeným nástrojovým keramickým materiálem na bázi nitridu je SiAlON (oxinitrid křemíku a hliníku) využívaný pro obrábění superslitin, ale také šedé litiny. Mechanické vlastnosti řezné keramiky lze podstatně zvýšit vyztužením karbido-křemíkových (SiC) vláken nazývaných whiskery. Řezné keramické nástroje jsou často opatřovány vrstvou povlaku, který poskytuje lepší ochranu z hlediska tepelně-mechanického namáhání a zvyšuje trvanlivost břitu nástroje. [2]

Tabulka 3 Rozdělení řezné keramiky podle ČSN ISO 513:2015 [13]

Identifikační značka	Materiálová skupina
CA	Keramika s obsahem primárního Al_2O_3
CR	Keramika s hlavním obsahem Al_2O_3, vyztužená
CM	Smíšená keramika s hlavním obsahem Al_2O_3 plus složky jiné než oxidy
CN	Keramika nitridu křemíku s hlavním obsahem Si_3N_4
CC	Keramiky výše uvedené, ale povlakované

2.5 Supertvrdé řezné materiály

Nacházejí své uplatnění v široké škále průmyslových aplikací v podobě řezných nástrojů, emulzí, past, brusiv nebo povlaků. Jsou právem považovány za nejtvrdší nástrojové materiály současnosti, schopné produkovat výrobky s vysokou přesností a výbornou kvalitou povrchu. Vlastnosti supertvrdých materiálů jsou dále spojeny s vysokou odolností vůči opotřebení, ohybovou pevností nebo tepelnou vodivostí, jež odhalil potenciál nových materiálů nejen pro řezné nástroje. Mezi syntetické supertvrdé řezné materiály se řadí polykrystalický diamant (PD) a kubický nitrid boru (PKNB). Přesto, že každý z těchto materiálů vykazuje určité nedostatky v podobě menší tvrdosti u nitridu boru a nižší tepelné stability u diamantu, prokázaly oba materiály mnohonásobně vyšší převahu ve výkonu, trvanlivosti a zvýšení produktivity oproti nástrojům ze slinutého karbidu. [2]

Tabulka 4 Rozdělení tvrdých řezných materiálů dle ISO ČSN 513:2015 [13] [18]

Identifikační značka	Materiálová skupina
BL	Kubický krystalický nitrid boru s nízkým obsahem kubického nitridu boru (40 % - 65 %)
BH	Kubický krystalický nitrid boru s vysokým obsahem kubického nitridu boru (70 % - 95 %)
BC	Kubické krystalické nitridy boru výše uvedené, ale povlakované
DM	Monokrystalický diamant
DP	Polykrystalický diamant s pojivem
PD	Polykrystalický diamant bez pojiva (CVD diamant)

2.5.1 Polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB)

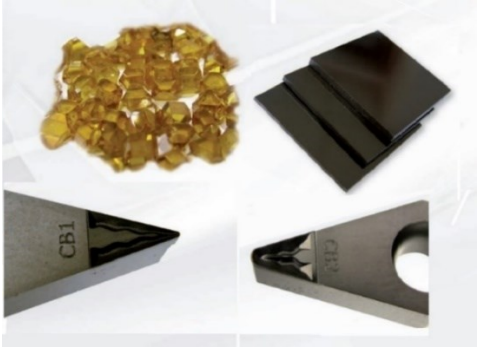
Jako druhý nejtvrdší materiál s vynikající tepelnou stabilitou a chemickou reaktivitou ke kovům se stal PKNB klíčovým prostředkem pro opracování všech materiálů, jejichž základ tvoří železo, které diamantem nelze obrobit. Díky svým jedinečným vlastnostem jsou nástroje z PKNB vhodné při obrábění a finálním dokončování tvrzených litin, vysokolegovaných a kalených ocelí s minimální tvrdostí 45 HRC, dále slinutých karbidů, keramik a mnoha dalších obtížně obrobitelných materiálů. U ocelí s menší tvrdostí se z ekonomického hlediska volí nižší řady nástrojových materiálů. Tepelná odolnost a vodivost činí nástroje z PKNB vhodnými v procesech vysokorychlostního obrábění. Vyměnitelné břitové destičky z PKNB jsou v současnosti velmi populární. Až na výjimky nejsou vyráběny jako kompaktní nástroje, ale materiál PKNB ve formě roubíku je připájen na špičku karbidové břitové destičky (obr. 12). [2]

Obr. 12 Vyměnitelné břitové destičky s PKNB pájeným roubíkem [19]

2.5.2 Polykrystalický diamant (PD)

Diamanty, ať v přírodní nebo syntetizované formě, jsou nejtvrdšími nástrojovými materiály na planetě. Zásadní nevýhodou diamantu je nízká chemická a tepelná stabilita v prostředí vysokých teplot obrábění, přesahujících 700 °C. V té chvíli dochází k nežádoucím difuzním reakcím mezi diamantovým materiálem a kovy tvořící karbid. Diamant při kontaktu s takovým materiálem ztrácí tvrdost, degraduje a mění se zpět na grafitovou strukturu. Z toho důvodu nelze diamantem obrábět materiály na bázi železa, jako oceli nebo litiny. Důležité uplatnění nachází v oblasti obrábění neželezných kovů, zejména hliníku, mědi, hořčíku a jejich slitin, protože mají nižší teplotu tavení méně než 700 °C a nedochází k difuzní reakci. Diamantové nástroje se dále používají při obrábění abrazivních materiálů, jako jsou kompozity vyztužené skleněnými, uhlíkovými, aramidovými a jinými vlákny, keramiky, titanu a jeho slitin, grafitu, křemíku a tvrdých přírodních materiálů, například žuly, mramoru a podobně. Přestože jsou nástroje z polykrystalického diamantu cenově náročnější a pro optimální výkon vyžadují výborné strojní podmínky z hlediska tuhosti stroje, ukázaly se být nepostradatelnými nástrojovými materiály právě při obrábění hliníkových slitin. Brousící kotouče z polykrystalického diamantu se například používají při výrobě nebo ostření řezných nástrojů ze slinutých karbidů. [2]

Obr. 13 představuje vývoj vyměnitelné břitové destičky s pájeným segmentem z polykrystalického CVD diamantu. Zpracováním diamantů prostřednictvím chemické depozice z plynné fáze (CVD-D) se vytváří téměř stoprocentní diamantový substrát (destička) bez kovového pojiva. CVD diamantová destička s tloušťkou v rozmezí 0,8 – 1,8 mm je laserem nařezána na jednotlivé požadované segmenty. Tyto segmenty se následně vakuově napájí na břitovou destičku ze slinutého karbidu. Konečná úprava řezné hrany, či utvářeče třísek, je následně obrobena laserem. [18]

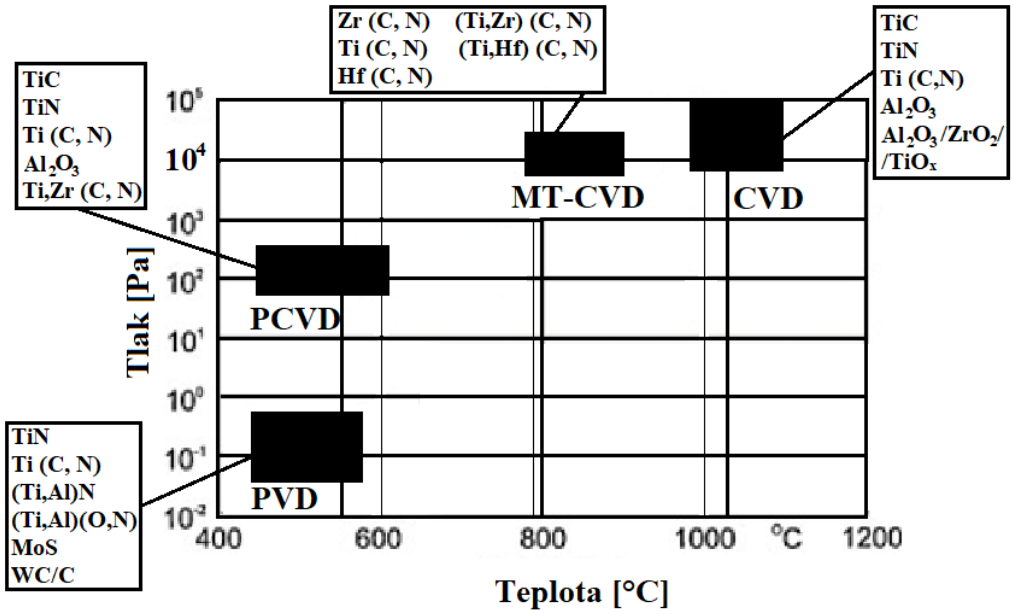


Obr. 13 Od diamantu po diamantovou břitovou destičku [18]

3 TECHNOLOGIE POVLAKOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Vzhledem ke zvyšujícím se nárokům na kvalitu výroby a opracování těžce obrobitelných materiálů je v posledních desetiletích věnována pozornost technologii povlakování řezných nástrojů. Uspokojit požadavky na efektivitu výrobního procesu spojenou s moderními technologiemi vysokorychlostního obrábění s možnou eliminací procesních kapalin je cílem mnoha povrchových inženýrů. Úkolem povrchového inženýrství je žádoucím způsobem modifikovat povrchy řezných nástrojů změnou jejich vlastností. Tvrdé povlaky hrají v těchto procesech důležitou roli, umožňují řezným nástrojům pracovat v podmínkách, ve kterých běžné konvenční nástroje selhávají. Povlakované nástroje výrazně prodloužily životnost nástroje, zvýšily efektivitu a přesnost obrábění. Současně lze vhodnou kombinací povlakové vrstvy a nástrojového materiálu omezit použití řezných kapalin, což odpovídá ekologickým požadavkům. Široký výběr v současnosti dostupných povlaků a způsobů jejich nanášení je odrazem vývoje inovativních výrobních technologií. [20]

Zvýšení flexibility řezných nástrojů aplikací ochranných povlaků je v současnosti dobře známo. Pro jejich nanášení existují dvě základní metody, a to fyzikální depozice par PVD (Physical Vapour Deposition) a chemická depozice par CVD (Chemical Vapour Depisition) a jejich variace.



Obr. 14 Rozsah teplot a tlaků základních depozičních technik [2]

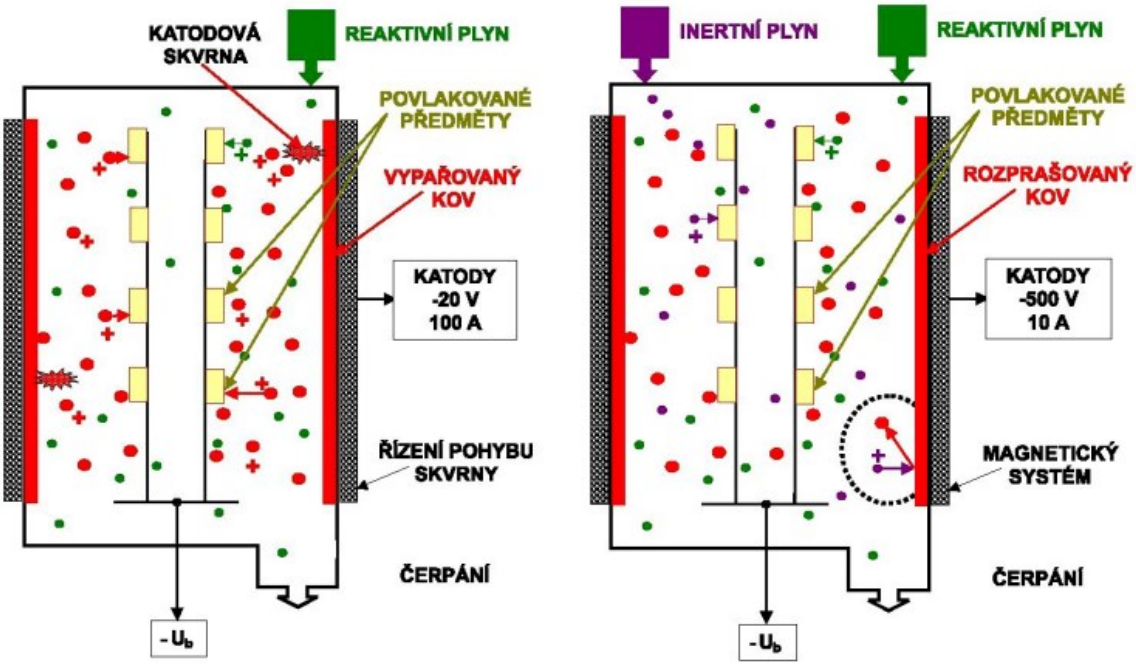
Z hlediska výběru materiálů otěruvzdorných vrstev se rozlišují čtyři skupiny. Nejstarší a nejoblíbenější materiály jsou karbidy, nitridy a karbonitridy titanu TiN, TiC a Ti (C,N). Pro zlepšení mechanických a užitných vlastností bývají obohaceny například o složky hliníku, jako TiAlN, křemíku TiAlSiN nebo chromu CrN. Druhou skupinu tvoří keramické povlaky na bázi oxidu hliníku Al_2O_3. Třetí skupina představuje supertvrdé diamantové povlaky CVD-diamant. Čtvrtou skupinou jsou povlaky typu amorfní kov-uhlík MeC:H charakterizovány jako pevné mazací povlaky. Na povrch tvrdé otěruvzdorné vrstvy je uložena měkká vrstva povlaku. Uložení měkké vrstvy na povrch tvrdého povlaku představuje moderní způsob snížení koeficientu tření a opotřebení. Významným povlakem v této oblasti je molybden disulfid (MoS) nebo čistý grafit. [21]

3.1 Technologie PVD (Physical Vapour Deposition)

Metoda PVD (Physical Vapor Deposition) označuje způsob fyzikální depozice z plynné fáze. PVD je skupina procesů atomické depozice, při kterých je nanášený materiál ukládán atom po atomu na povrch substrátu. Prostřednictvím fyzikální reakce dochází k přeměně atomů a molekul pevných částic na páru, která poté vstupuje do prostředí nízkého tlaku, vakua nebo plazmy, kde dochází k ionizaci částic a jejich následnému kondenzování na povrch substrátu řezného nástroje. Tyto ionizované částice jsou na povrch substrátu přitahovány záporným předpětím a materiál kondenzuje do kompaktní tenké vrstvy povlaku. Úspěšnost procesu souvisí s vytvořením kontrolované atmosféry, proto je nutné současně přivádět do procesní komory inertní a reaktivní plyny, jako je argon (Ar) a čistý dusík (N_2). Zdroje pevných částic určených k depozici se označují pojmem terče nebo targety. Substrátem se rozumí materiál, na jehož povrch je aplikována tenká vrstva povlaku. Typická tloušťka nanesených vrstev se pohybuje v rozmezí několika nanometrů do tisícin nanometrů a rychlost depozice činí 1 až 10 nanometrů za sekundu. Metodou PVD lze také nanášet povlaky na substráty složitých geometrií nebo vícevrstvé a silné povlaky. [2] [20]

Proces PVD probíhá za relativně nízkých teplot nepřesahující 500 °C a sníženém tlaku v intervalu od 0,1 do 1,0 Pa. Proto jsou využívané pro materiály s nižší teplotou tavení jako v případě nástrojové oceli. Depozicí PVD jsou na řezných nástrojích nejčastěji aplikovány povlaky z titanu Ti(C,N), nitridu hliníku a titanu (Al,Ti)N, nitridu chromu (CrN) nebo nitridu zirkonia (ZrN)a diamantový povlak typu DLC. Technologie PVD rozlišuje tři

hlavní způsoby aplikace, jmenovitě odpařování, naprašování a iontové pokovování. Složitý vakuový systém a nutnost pohybu substrátu činí metodu PVD nevýhodnou. [2] [20]



Obr. 15 Schéma odpařování (vlevo) a naprašování (vpravo) [3]

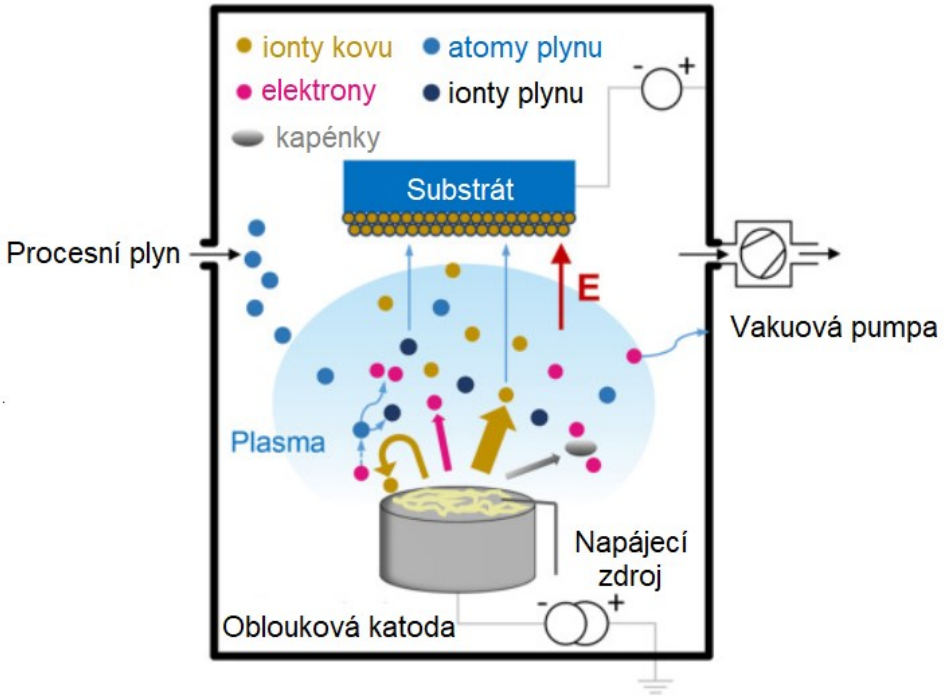
3.1.1 Depozice odpařováním

Materiál povlaku se z pevného stavu mění na páru, která vstupuje za vysokého vakua na povrch substrátu, kde kondenzuje a ukládá se do podoby tenké otěruvzdorné vrstvy (obr. 15 vlevo). Proces vakuové depozice využívá vysokého vakua v rozmezí 10^{-3} – 10^{-8} Pa. Proto takřka nedochází ke kolizi odpařených atomů při transportu na substrát. Zdroj, na kterém je materiál povlaku umístěn, je zahříván pomocí cívky s wolframovým drátem, zářením, laserovým paprskem nebo e-paprskem. Metodou odpařování se vytváří zrcadlové i dekorativní povlaky, ochranné povlaky na obalových materiálech, elektricky vodivé povlaky, ale také povlaky odolné vůči opotřebení nebo korozi. Zařízení, při kterém dochází k odpařování pomocí vysoce výkonného elektronového paprsku, se označuje jako metoda EB-PVD (Electron Beam Physical Vapor Deposition). Tato metoda umožňuje nanášet multivrstvé povlaky kombinací různých složek z nitridů, karbidů nebo oxidů. [2] [20]

3.1.2 Depozice elektrickým obloukem

Proces depozice se uskutečňuje prostřednictvím elektrického oblouku, který mezi terčem (katodou) a vakuovou komorou (anodou) generuje výboj zajišťující odpařování částic

materiálu (obr. 16). Vysokoproudý, nízkonapěťový elektrický oblouk materiál nejen natavuje, ale zároveň jednotlivé atomy ionizuje. Ionty jsou urychlovány na povrch substrátu v důsledku vysoké kinetické energie, která dosahuje velikosti 50 – 150 eV pro jednotlivě nabité ionty. Ionizované částice poté dopadají kolmo na substrát a vytváří se souvislá vrstva povlaku. Oblouková depozice je široce používána k nanášení tvrdých, otěruvzdorných a dekorativních povlaků s tloušťkou několika mikronů. Pro tvrdé povlaky se na řezných nástrojích nebo vstřikovacích formách aplikují vrstvy TiN, TiC, TiCN, TiAlN, TiAlSiN, ZrN, CrN i uhlíkový diamant DLC. [20]



Obr. 16 Schéma PVD obloukové metody [22]

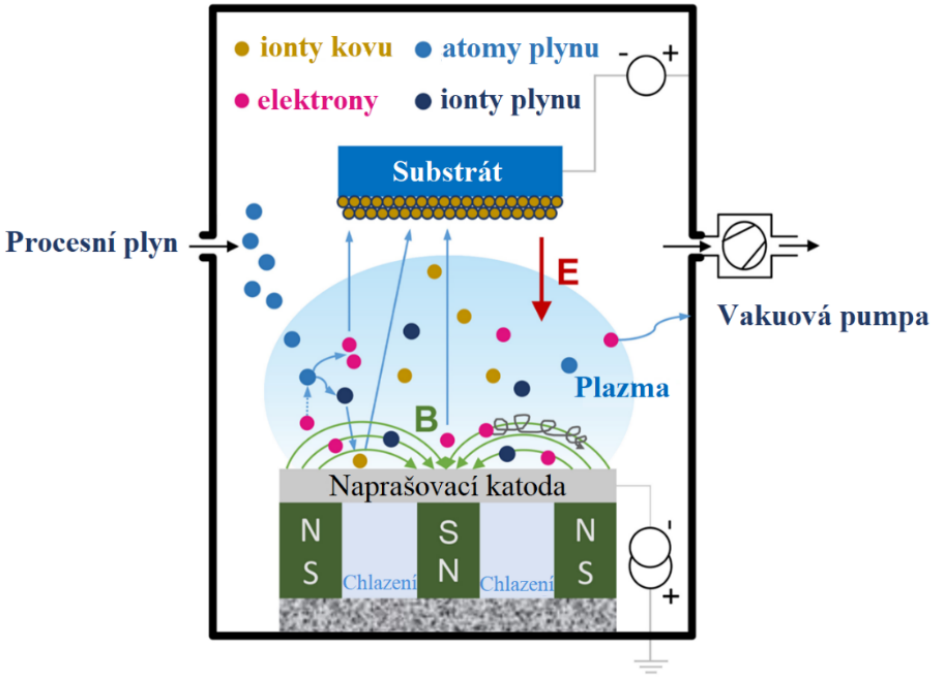
3.1.3 Depozice naprašováním

Depozice naprašováním se provádí ve vakuové komoře prostřednictvím inertního plynu, nejčastěji argonu (Ar). Materiál povlaku v podobě rozprašovacího terče je naprašován na substrát řezného materiálu prostřednictvím kinetické energie vznikající v elektromagnetickém poli (obr. 15 vpravo). Proces naprašování může být proveden pomocí iontové pistole, v nízkotlakém plazmatu (< 0,7 Pa), nebo při vyšším tlaku plazmy (0,7 ÷ 2,0 Pa). Jako rozprašované materiály lze použít prvek, slitinu, sloučeninu nebo směs, které mohou být nanášeny jako reflexní, dekorativní, magnetické povlaky nebo mazací povlaky, stejně jako tvrdé povlaky technických dílů. Tento proces nevyužívá tepelnou energii, proto lze vytvářet tenké otěruvzdorné vrstvy z těžkotavitelných kovů.

Rozprašovací terče poskytují zdroj s dlouhou životností a mohou být umístěny tak, aby se materiál rozprašoval v libovolném směru. Metodou naprašováním jsou vytvářeny jednovrstvé, vícevrstvé, složené, bariérové, elektricky vodivé, dekorativní, ochranné, mazací a jiné typy povlaků. Typickými povlaky nástrojových materiálů získané metodou naprašování jsou TiC, TiCN, TiAlN, TiN, Al_2O_3, TiB_2, MoS_2. CrN, HfN. [2] [20]

3.1.4 Magnetronové naprašování

Princip procesu magnetronového naprašování (Magnetron Sputter Deposition) spočívá ve vytváření magnetického pole v blízkosti materiálu terče. Koncentrace elektronů pohybujících se napříč magnetickým polem v blízkosti terče způsobuje větší počet srážek s molekulami plynu. Díky tomu dochází ke zvýšení účinku ionizace. Proto může být proces depozice uskutečňován při nízkém tlaku kolem 10^{-1} Pa s vyšší proudovou hustotou elektronů a iontů, při čemž dochází ke zvýšení rychlost naprašování a růstu vrstev. Výhodou magnetronové naprašování je možnost nanášení různých materiálů jako slitin, kovů, keramiky, a dokonce nevodivých materiálů. [2] [20]

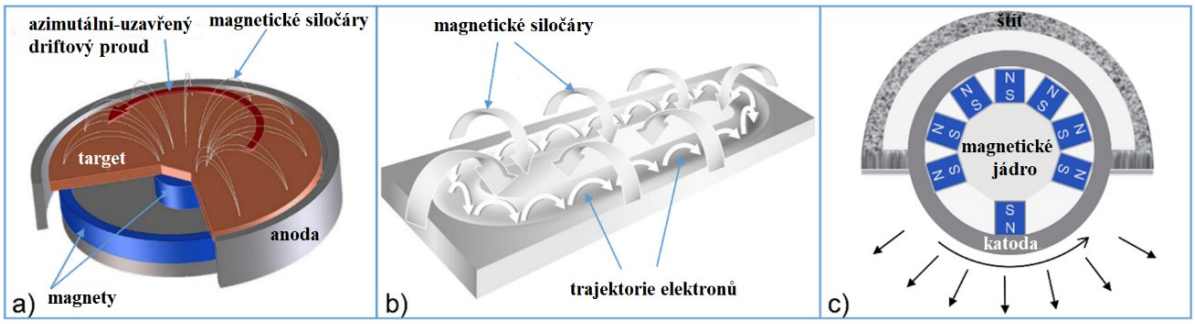


Obr. 17 Schéma PVD metody magnetronového naprašování [22]

Při depozici naprašování jsou nevodivé materiály extrahovány z nevodivých terčů a celý proces je generován střídavým proudem využívajícím vysokofrekvenční radiový signál (Radio Frequency Sputter Deposition). Rozsah frekvence se pohybuje v rozmezí od 5 do 30 MHz, nejčastěji však 13,56 MHz. Radiofrekvenční vlnění zajistí dostatečný pohyb

elektronů vedoucí ke srážkám s molekulami plynu. Depozice se uskutečňuje při nižším tlaku v intervalu od 0,7 do 2,0 Pa. Metoda je vhodná také pro nanášení povlaků z vodivých nebo polovodivých materiálů. [2]

Rovnoměrné složení, tloušťku a mikrostrukturu povlaku podporuje vhodné uspořádání substrátu, naprašovacího terče a magnetického pole v plazmovém prostředí. Rozmístění standardních rozprašovacích terčů v magnetickém poli je znázorněno na obr. 18. Do kategorie standardních rozprašovacích terčů se řadí rovinný a válcový terč, s dostatečnou plochou způsobilou nanášet povlaky s homogenní tloušťkou a konstrukčně jednoduchý kruhový rovinný terč. [22]

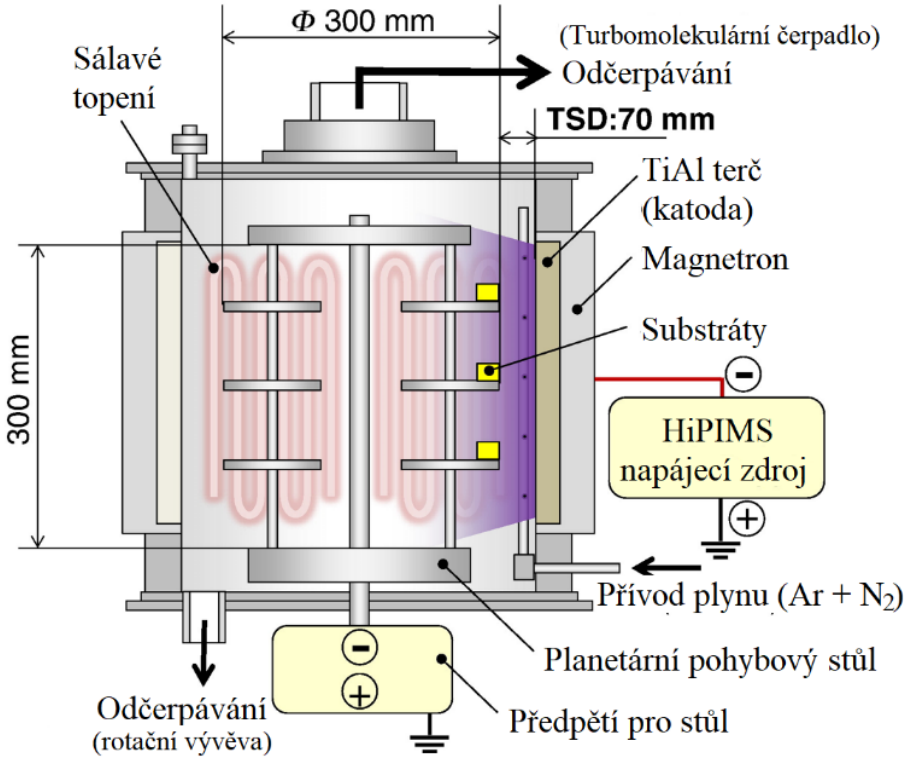


Obr. 18 Konfigurace magnetronů pro běžné rozprašovací terče:
a) Kruhový rovinný terč; b) pravoúhlý rovinný terč; c) válcový rotující terč [22]

3.1.5 HiPIMS

Poměrně nová technologie patentována roku 1999 V. Kouzněcovem. Metoda HIPIMS kombinuje technologie konvenčního magnetronového naprašování a vysoce intenzivního elektrického oblouku. Zkratka HiPIMS (High Power Impulze Magnetron Sputtering) označuje způsob depozice vysokovýkonným pulzním magnetronovým naprašováním. Zdroj vysokého napětí (500 – 3000 V) generuje krátkodobý a velmi vysoký pulzní výboj (až 3000 W/cm^2) zaměřený na terč deponovaného materiálu. V porovnání s konvenční technologií magnetronového naprašování je intenzita výboje o 2 až 3 řády vyšší. Špičkový pulzní výboj s extrémně krátkou dobou zátěže (méně než 10 %) zvyšuje hustotu plazmatu, čímž dochází k vysoké ionizaci (až 90 %) kovů nanášeného materiálu. To znamená, že velké množství materiálu se na povrch substrátu deponuje ve velmi krátkém čase. Výsledkem depozice jsou rovnoměrně uložené vrstvy povlaku s vysokou hustotou, dokonale hladkým povrchem a výbornou přilnavostí. Předností technologie HiPIMS je

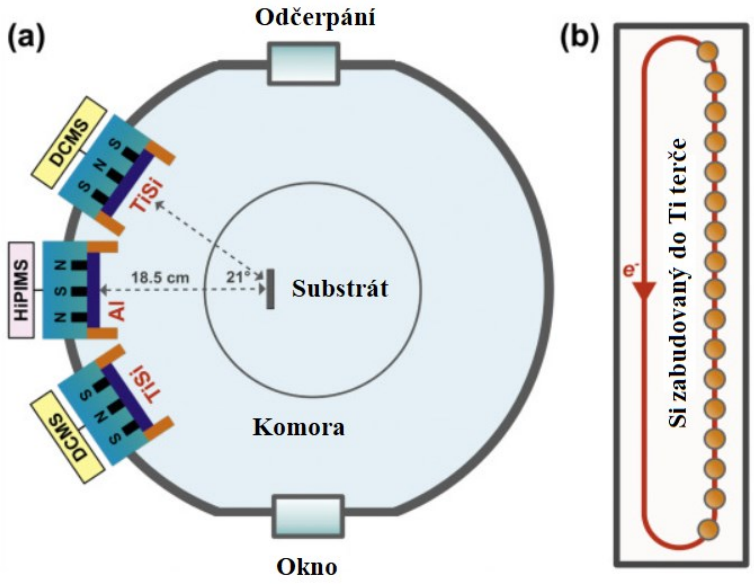
možnost předúpravy povrchů substrátů za účelem odstranění nečistot v důsledku přirozené oxidace před samotným povlakováním. [20] [22]



Obr. 19 Schéma zařízení Domino-mini technologie HiPIMS [23]

3.1.6 Hybridní technologie

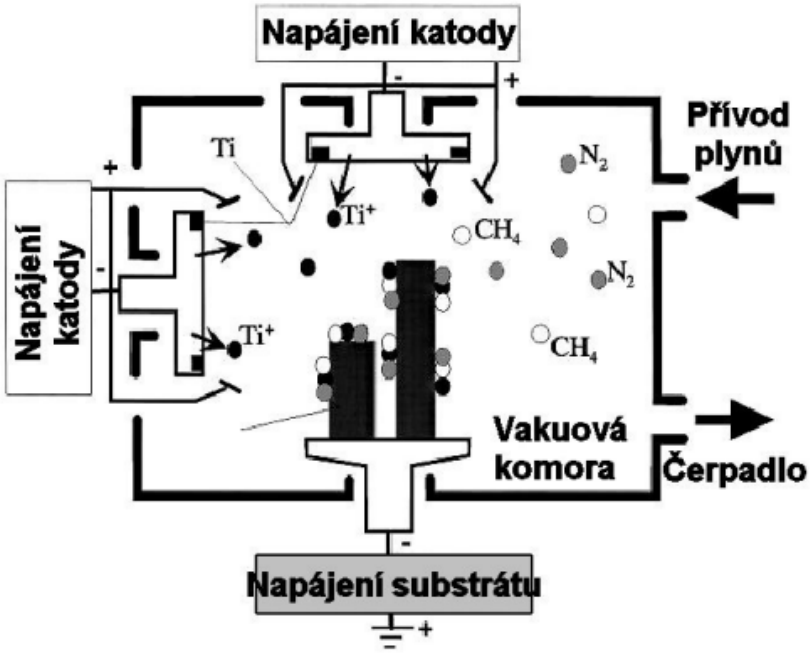
Technologie HiPIMS prošla od svého vzniku vývojem ve snaze optimalizovat výkony rozprašování. To řadí metodu HiPIMS do nové kategorie, tak zvané hybridní technologie, jejíž průkopníky byla německá společnost CemeCon AG působící v oblasti depozice tenkých vrstev pro nástrojové materiály, která zkombinovala stávající technologii se stejnosměrným (DC) magnetronovým naprašováním. Kombinace HiPIMS a DCMS dosahuje vyšší rychlosti depozice spojené se zvýšenou ionizací kovových a plynných elementů procesem předionizace. Proces hybridní technologie poskytuje větší flexibilitu, která pozitivně ovlivnila mechanické vlastnosti řízením struktury povlaku, nanesené vrstvy tak vykazovaly vyšší tvrdost a nižší drsnost povrchu. Tato technologie umožňuje vytvářet kombinaci různých povlaků jako AlTiN, TiAlSiN, AlTiN + TiAlCN, TiB_2 a další. Mezitím se zkoumalo další propojení technologie HiPIMS s vysokofrekvenčním (RF), středněfrekvenčním (MF) magnetronovým rozprašovacím systémem nebo jejich kombinací například DC + MF. [22]



Obr. 20 Schéma dispozice a.) hybridního systému HiPIMS/DCMS b.) TiSi terče v povlakovací jednotce CC800/9 společnosti CemeCon AG pro vrstvy TiAlSiN [24]

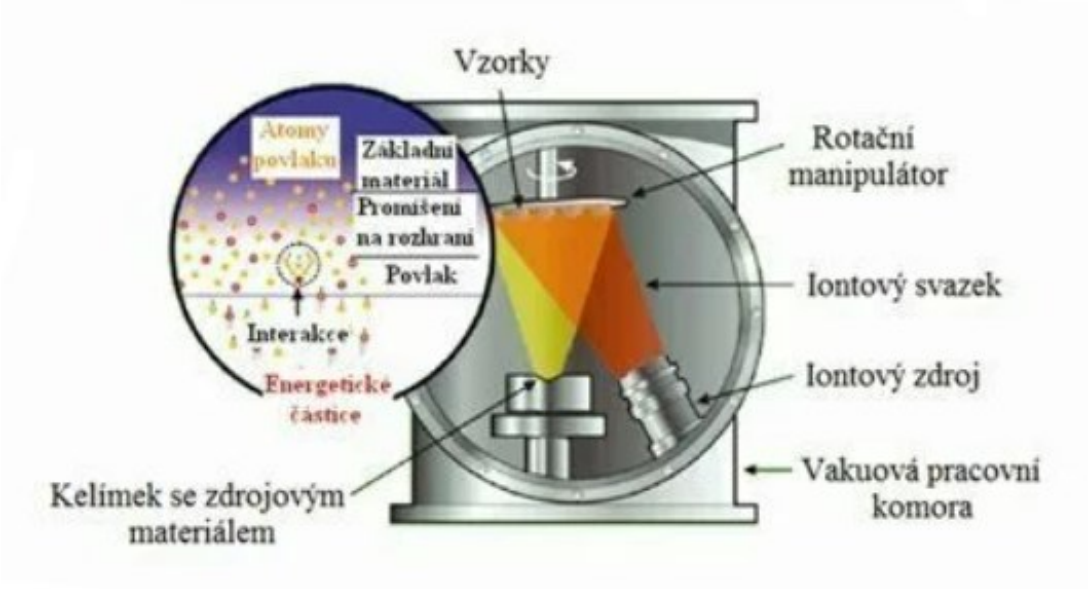
3.1.7 Iontové plátování

Procesy iontového pokovování bývají také označovány jako ionty podporovaná depozice (IAD) nebo iontová depozice párou (IVD), které umožňují přesněji řídit a kontrolovat vlastnosti vytvářeného povlaku. Iontové plátování kombinuje metody odpařování a naprašování probíhající obvykle v prostředí vysokého vakua v komoře reaktoru. Inertní nebo reaktivní plyn nejdříve jednotlivé atomy ionizuje a prostřednictvím vysokoenergetického toku jsou částice atomové velikosti rozptýleny na substrát. Technologií iontového pokovování jsou nanášeny povlakované vrstvy pro různé účely a aplikace, jako jsou vrstvy korozivzdorné, otěruvzdorné, elektricky vodivé, ochranné nebo izolační vrstvy. Deponované materiály jsou nejčastěji kovy (Al, Ag, Au, Be), nitridy kovů (TiN, AlN, ZrN, Si_3N_4, HfN), karbidy (TiC), oxidy kovů (Al_2O_3, SiO_2, ZrO_2) a diamantové povlaky (DLC). [20]



Obr. 21 Schéma iontového plátování [3]

Další možnosti depozice lze provádět v prostředí plazmy nebo pomocí iontového svazku zvaného IBAD – Ion Beam Assisted Deposition. Rozmanité kombinace prostředí a plynů umožňují vytvářet vícevrstvé, složené a silné povlaky, které snadno nachází uplatnění v mnoha aplikacích. [20]



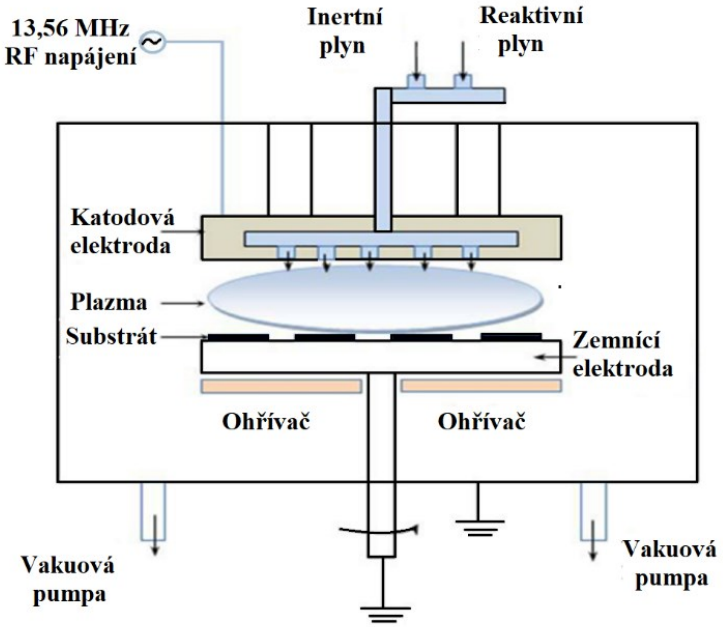
Obr. 22 Princip a zařízení metody IBAD s využitím elektronového děla [25]

3.2 Technologie CVD (Chemical Vapour Deposition)

Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition) je soubor procesů chemické depozice pevných látek z plynné fáze v širokém intervalu teplot. Například výchozí metoda tepelného CVD probíhá při teplotě 1000 až 1200 °C. Hlavním předpokladem tvorby povlaků na substrátovém materiálu je chemická reakce transportovaných plynných prekurzorů (reaktivních plynů). Reakce je iniciována v komoře reaktoru v těsné blízkosti nad horkým substrátem a vznikající produkty postupně migrují na povrch substrátu. Substráty jsou předem zahřáty na několik stovek °C. Reakce mohou být podpořeny vysokofrekvenčním zářením (fotoasistované CVD), plazmou (PCVD) nebo vyvolány teplem (konvenční CVD). Materiály prekurzorů se obecně dělí do několika skupin na anorganické (halogenidy, karbonyly a hydridy), organické (alkoxidy) a organokovové (alkyly). U metody CVD jsou vstupními prekurzory například kovové halogenidy jako chlorid titaničitý ($TiCl_4$), chlorid zirkoničitý ($ZrCl_4$) nebo chlorid hlinitý ($AlCl_3$). Ke vzniku chemické reakce musí být do reakční komory přivedeny také nekovové reaktivní plyny (hydridy), například dusík (N_2), amoniak (NH_4) nebo metan (CH_4). Dalším typem přiváděných plynů jsou nosné plyny, jako argon (Ar) nebo dusík (H2), který zajišťuje řízení celého procesu depozice a transport plynných směsí do prostoru reakční komory. Stejně tak výrazně ovlivňuje rychlost deponované vrstvy a může zabránit vzniku nežádoucích sekundárních reakcí a vzniku nečistot. V závislosti na směsi plynů vznikají různé typy sloučenin, z nichž zůstávají vrstvy TiN, Ti(C,N), AlTiN, TiAlN a Al_2O_3 nejpoužívanějšími povlaky v oblasti řezných nástrojů. Protože depozice metodou CVD probíhá při vysokých teplotách, je potřeba vždy zvážit všechna kritéria aplikace, spojené s možnými riziky deformace, ztráty tvrdosti a pevnosti základního materiálu. Moderní metody povlakování kombinují přednosti technik PVD a CVD. Příkladem jsou chemické depozice PA-CVD a PE-CVD využívající plazmu k rozkladu či zesílení reakce nebo procesy odpařování a naprašování typické pro metodu PVD, které jsou aplikovány v chemickém prostředí. Metody využívající plazmu se odlišují hlavně způsobem, jakým je plazma generována. Například metoda MW-CVD využívá k tvorbě plazmatu mikrovlnné záření. Metoda CVD je zásadní technologií pro ukládání tvrdých vrstev povlaků na řezné nástroje z keramiky, cermetu, a především ze slinutých karbidů. Depozice metodami CVD nabízí rozmanité možnosti, schopné uspokojit konkrétní požadavek. [2] [26]

3.2.1 PCVD

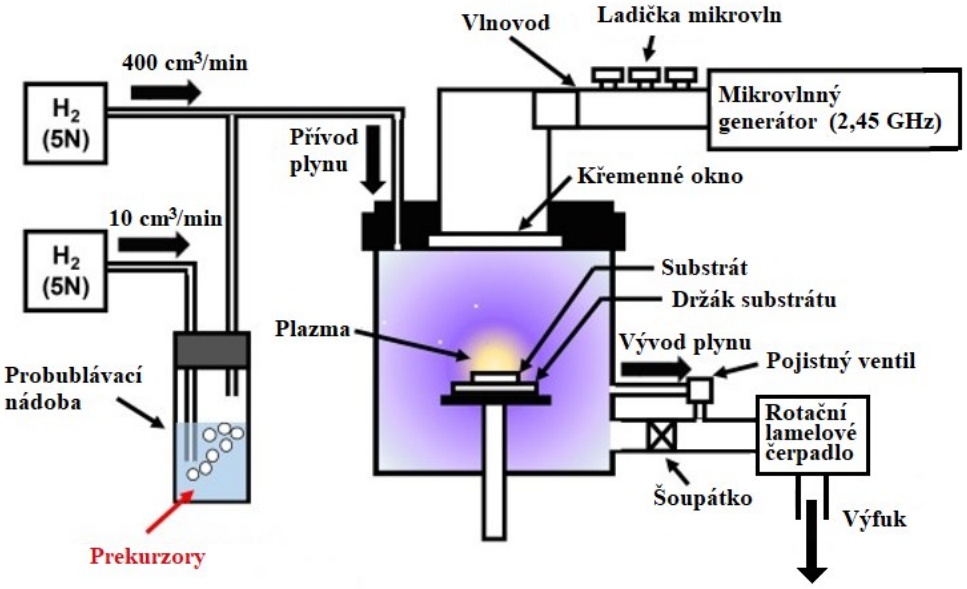
Termín **PCVD** (Plasma Chemical Vapour Deposition) nese také označení **PA-CVD** (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition) plazmou podporovaná nebo **PE-CVD** (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition), tedy plazmou zesílená CVD (obr. 23). Vyjadřuje souhrn metod chemické depozice par, při které je aktivační energie pro vznik chemické reakce dosažena působením plazmatu vytvořeném v elektrickém poli. Prekurzory materiálu vstupují skrz elektrody do vakuové komory, kde dochází k ionizaci procesního plynu a aktivaci chemické reakce plazmatickým doutnavým výbojem při tlaku 100 ÷ 300 MPa. Důsledkem chemické reakce dochází k přeměně ionizovaného plynu na pevné látky, které se ukládají na substrát v podobě tenké otěruvzdorné vrstvy. Generování plazmy se uskutečňuje vnějšími napájecími zdroji střídavého napětí s vysokou nebo nízkou frekvencí nebo stejnosměrným pulzním napětím. Plazmu je možné také aktivovat reaktivním plynem, například amoniakem (NH_3). Aktivace plazmou jako zdroje energie snížila vysoké depoziční teploty z 1200 °C na hodnoty v rozmezí 400 – 600 °C, přičemž podle některých firemních zdrojů jsou teploty depozic nižší než 300 °C. Tato skutečnost umožňuje nanášet tenké otěruvzdorné vrstvy na nízkoteplotní substráty. Jsou to například hliník, organické polymery, kovy a slitiny kovů, kde dochází při vysokých teplotách k roztavení, degradaci nebo změně struktury materiálu. Zároveň poskytuje možnosti předúpravy povlaků pomocí plazmové nitridace nebo ionizační čistění před samotnou depozicí. [2] [20]



Obr. 23 Schéma procesu PE-CVD [27]

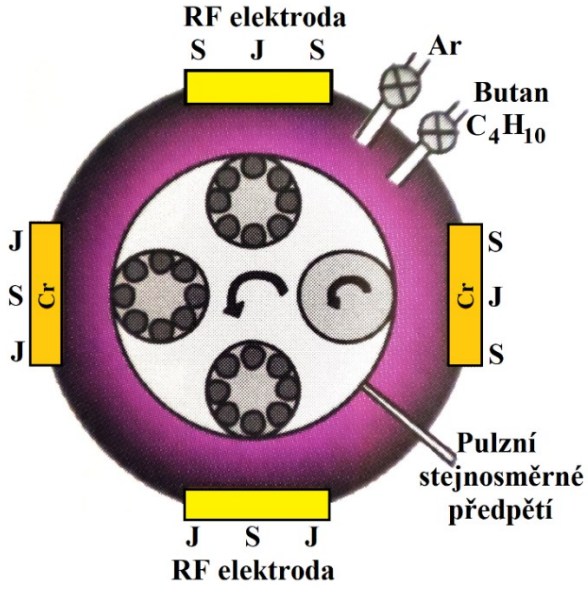
Plazmou deponovaná CVD je považována za hlavní metodu v oblasti povlakování slinutých karbidů vrstvami TiN nebo TiCN. Vrstvy mohou být na slinutých karbidech naneseny samostatně nebo v kombinaci TiN, TiCN a Al_2O_3. Další výhody plazmové depozice spočívají v možnosti nanášení vícevrstvých a multivrstvých povlaků. Mikrovlnná depozice také umožňuje povlakování slinutých karbidů polykrystalickým diamantem nebo amorfním uhlíkovým diamantem DLC (Diamond Like Carbon). Moderní metody depozice plazmou jsou modifikací konvenční metody CVD, která využívá k nanesení ochranných vrstev pouze tepelnou energii. Možnosti tvorby plazmatu a rozkladu procesních plynů rozlišuje jednotlivé metody plazmové depozice. [2] [20]

Metoda **MW-CVD** (Microwave Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition) generuje plazmu prostřednictvím mikrovlnného výboje s vysokou frekvencí 2,45 GHz a poměrně malým tlakem. Produkce mikrovlnné plazmy může být provedena prostřednictvím elektronové cyklotronové rezonance (ECR), při níž je důležitá dokonalá kombinace elektrického a magnetického pole. Tomu odpovídá spojení standardní mikrovlnné frekvence 2,45 GHz a magnetického pole velikosti 875 Gaussů. Při podmínkách vysokofrekvenčního mikrovlnného výboje, kde energie rozptylu částic dosahuje až 100 eV, snižuje metoda ECR rizika poškození substrátu díky nižší teplotě a tlaku depozice. Vysokofrekvenční mikrovlnné výboje vytváří vyšší hustotu plazmatu, čímž dochází k vyšší koncentraci atomů. [2]



Obr. 24 Schéma MW-CVD depozice [28]

RF-CVD (Radio-Frequency Chemical Vapour Deposition) je metoda využívající vysokofrekvenční radiové vlnění 13,56 MHz. Aplikace metodou RF-CVD má široké uplatnění v oblasti výroby polovodičů, které bývají opatřeny vrstvami nitridu křemíku (Si_3N_4) a oxidu křemičitého (SiO_2). [29]



Obr. 25 Příčný řez reaktoru PE-CVD při nanášení povlaku DLC [2]

Arc-CVD označuje způsob tvorby plazmatu pomocí oblouku, který oproti jiným metodám doutnavého výboje využívá nižší frekvenci. Obloukové plazma pracuje na frekvenci 1 MHz a při poměrně vysokém tlaku v rozmezí od 13 322 Pa až po 1 atmosféru (101 325 Pa). Zásadní nevýhodou této metody je extrémní teplota oblouku a velké množství energie. Proto je aplikována pouze v oblasti diamantových povlaků. [29]

3.2.2 MO-CVD

Metoda MO-CVD (Metal Organic Chemical Vapour Deposition) je speciální typ depozice založená na principu rozkladu kov-organických prekurzorů. Typické kov-organické prekurzory obsahují přímou vazbu na kov-uhlík (alkyly, karbonyly), kov-kyslík (alkoxidy), kov-dusík (alkylamidy) nebo hydridy (trimethylamin alan). Kovové organické sloučeniny musí splňovat podmínky stability při pokojové teplotě a podmínky snadného rozkladu pod teplotou 500 °C. Depozice probíhá při teplotách od 300 – 800 °C a tlaku menším než 133 Pa až po atmosférický tlak. Metoda MO-CVD je klíčovou záležitostí pro výrobu LED diod a polovodičů. V oblasti řezných nástrojů jsou metodou MO-CVD nanášeny vrstvy z karbidu titanu TiC, nitridu titanu TiN a oxidu hlinitého Al_2O_3. Přesto, že

jsou chemikálie a zařízení používané v procesu MO-CVD komerčně dostupné, jejich cena je vysoká, proto nachází uplatnění v aplikacích, kde je vyžadována vysoká kvalita. Výhodou kov-organických látek je jejich těkavost, která umožňuje přesné elektronické řízení průtoku procesního plynu a tlaku. [26] [29]

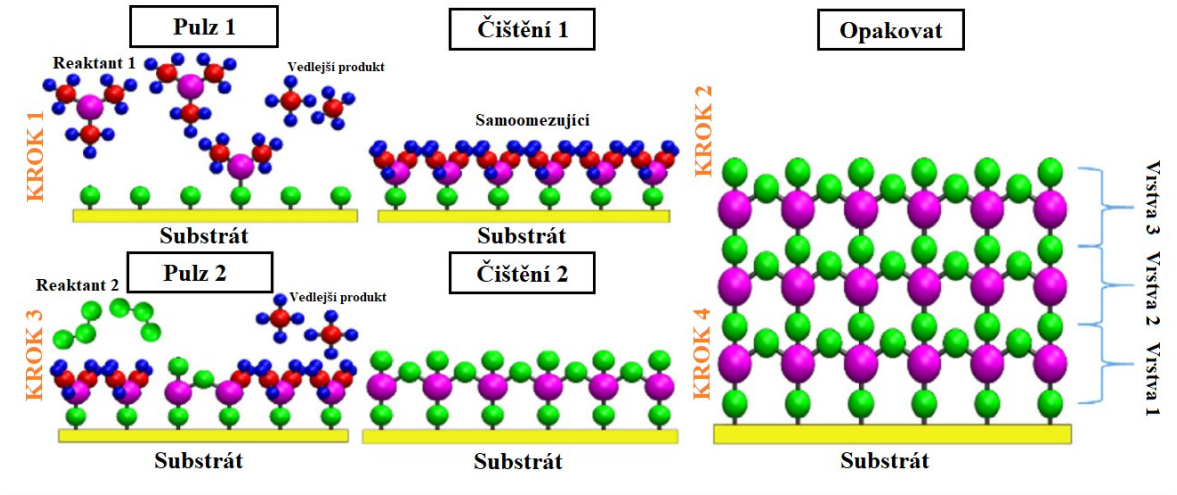
Základní metoda MO-CVD se také nazývá OMCVD jako organokovové CVD. Další pojmy vychází z principu ukládání epitaxních (monokrystalických) vrstev v parní fázi VPE (Vapour Phase Epitaxe) například MOVPE (kov-organické VPE), OMVPE (organokovová VPE) a MAVPE (kov-alkylová VPE). Stejně jako u metody MO-CVD jsou v epitaxi v parní fázi aplikovány kov-organické prekurzory. [26]

3.2.3 MT-CVD

U metody MT-CVD (Middle Temperature Chemical Vapour Deposition) probíhá depozice mezi teplotami plazmového a konvenčního procesu CVD. Použití acetonitrilu (CH_3CN) jako zdroje uhlíku a dusíku, snížilo teplotu depozice na 700 ÷ 900 °C. Zdrojem titanu jako prekurzorového materiálu zůstává chlorid titaničitý ($TiCl_4$), stejně jako v případě konvenčního CVD. Nižší teplota depozice a vyšší rychlost tvorby vrstev TiCN v zásadě nezpůsobuje oduhličení základního substrátu slinutého karbidu. Tím se výrazně zlepšily mechanické vlastnosti, především houževnatost a odolnost vůči teplotnímu namáhání. Proto je možné nahradit povlakování všech řezných nástrojů vytvořených konvenční metodou CVD za technologii MT-CVD při snížené teplotě depozice. Řezné nástroje opatřené kombinací vrstev TiCN a Al_2O_3 metodou MT-CVD jsou běžně užívány v procesech soustružení i frézování. [2] [30]

3.2.4 ALD

Depozice atomové vrstvy ALD (Atomic Layer Deposition) je speciální typ chemické depozice z plynné fáze, pří níž dochází k chemické reakci a depozici filmu přímo na povrchu substrátu. Plynné prekurzory jsou střídavě transportovány do reakční komory a mezi jednotlivými pulzy je reakční komora proplachována inertním plynem (obr. 26). Tím se odstraní veškeré škodlivé vedlejší produkty a zabrání se nežádoucí reakci v plynné fázi mezi prekurzory. Protože depozice probíhá cyklicky, je výhodou metody ALD přesné řízení tloušťky vrstev jednoduše změnou počtu cyklů bez řízeného dávkování prekurzorů. Výsledkem jsou vysoce kvalitní čisté povlaky v širokém rozmezí teplot depozice. ALD depozice je modifikací procesu CVD často označována jako epitaxe atomové vrstvy (ALE), alternativně pulzní CVD nebo chemická depozice atomové vrstvy (ALCVD). [26]



Obr. 26 Schéma procesu metody ALD [27]

Obr. 26 znázorňuje obecný čtyřfázový cyklus ALD depozice tenkých vrstev. Jeden cyklus zahrnuje čtyři kroky a po skončení cyklu je nanesena pouze jedna ultratenká vrstva. Pro dosažení požadované tloušťky vrstvy lze cyklus opakovat několikrát, třeba i tisíckrát. [27]

Krok 1: Substrát je vystaven reaktantu (nebo prekurzoru), který na povrchu substrátu způsobí chemisorpci. Mezi funkční skupinou substrátu a reaktantem dochází k vzájemné povrchové interakci, dokud nejsou všechny funkční skupiny na substrátu spotřebovány. Interakce substrátu s reaktantem vypouští také vedlejší produkty, které jsou následně odstraněny.

Krok 2: Čištění – vedlejší produkty spolu s nezreagovaným reaktantem jsou odstraněny.

Krok 3: Chemisorbovaný reaktant a koreaktant spouští na povrchu sustrátu samonasycující povrchové reakce.

Krok 4: V druhé fázi čistění jsou z reakční komory odstraněny vedlejší produkty i nezreagované koreaktanty.

Opakováním těchto cyklů lze na povrch substrátu nanášet povlaky vrstvu po vrstvě, jak lze vidět na pravé straně obr. 26. ALD se osvědčila jako výkonná metoda v mnoha aplikacích, schopná vytvářet vysoce komfortní rovnoměrné povlaky s požadovanou tloušťkou na povrchu substrátu. [27]

4 ANALÝZA VLASTNOSTÍ TENKÝCH VRSTEV

Je známo, že aplikace tenkých otěruvzdorných vrstev chrání řezné nástroje před mechanickým poškozením během procesu obrábění. Za tímto účelem je nezbytné provádět měření a analýzu deponovaných vrstev. Z hlediska fyzikálních vlastností se diagnostikuje mikrostruktura, morfologie, tloušťka, hustota a tvrdost deponovaných vrstev a adheze vrstev na substrát. Mezi analýzu chemických vlastností patří složení a čistota deponovaných vrstev. [26]

4.1 Morfologie vrstev

Morfologie vrstev určuje fyzikální vlastnosti a užitečnost nanesených vrstev povlaku, které souvisí s difúzními a nukleačními procesy během depozice. To výrazně ovlivňuje typ povlakovacího procesu a použité procesními parametry. K analýze morfologie vrstev se používají různé analytické techniky, jako rastrovací elektronová mikroskopie (SEM), mikroskopie atomárních sil (AFM) nebo rentgenová difrakce (XRD). Zatímco metody SEM a AFM přináší poznatky o krystalinitě na úrovni sub-mikronů, metoda XRD určuje krystalovou orientaci zrna a umožňuje pozorování přechodu amorfních vrstev. [26]

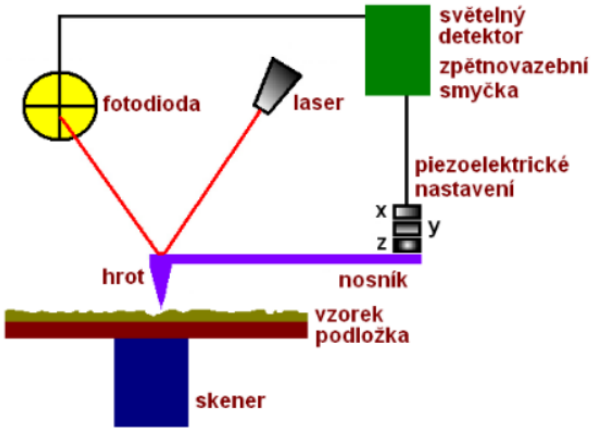
4.1.1 Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM)

Při zkoumání morfologie povrchu hraje rastrovací elektronová mikroskopie (SEM – Scanning Electron Microscopy) primární roli. Metoda SEM dosahuje vysokého rozlišení (obvykle až 40 Å) a hloubku ostrosti. Princip snímání je v základním režimu uskutečňován vysokoenergetickým svazkem elektronů (5 – 100 keV) směřujících na povrch vzorku. Důsledkem interakce mezi vzorkem a elektronem dochází k emisi nízkoenergetických sekundárních elektronů z atomů na povrchu a jejich následné analýze. Vzorky z nevodivých materiálů je nutné před procesem testování opatřit tenkou vrstvu (< 200 Å) kovového materiálu (např. zlato), aby se zabránilo vzniku elektrického náboje. [31]

4.1.2 Mikroskopie atomárních sil (AFM)

Mikroskopie atomárních sil (AFM – Atomic Force Microscopy) je diagnostická metoda postavená na základech mikroskopie s rastrující sondou. Je založená na principu mapování polohy malé sondy, která se pravidelně pohybuje v určitém rastru v těsné vzdálenosti od povrchu vzorku. Pohyb sondy je opatřen mechanismem detekce síly hrotu působící na povrch vzorku a její poloha je udržována zpětnovazební smyčkou. Rastrování povrchu lze

uskutečnit v několika režimech podle typu působící síly. Tyto síly mohou být buď přitažlivé, nebo odpudivé, a souvisí se vzájemnou vzdáleností mezi hrotem a povrchem vzorku. Informace o topografii vzorku je získána měřením lokální výšky během pohybu hrotu sondy. Metoda AFM je vhodná ke zjištění mechanických vlastností povrchu, měření tvrdosti nebo adheze materiálů. Současně má široké využití v mnoha oborech, například v oblasti nanotechnologie, biologie, při studiu pevných látek i katalytických procesů. [32]



Obr. 27 Schéma AFM mikroskopu [32]

4.2 Tloušťka a hustota vrstev

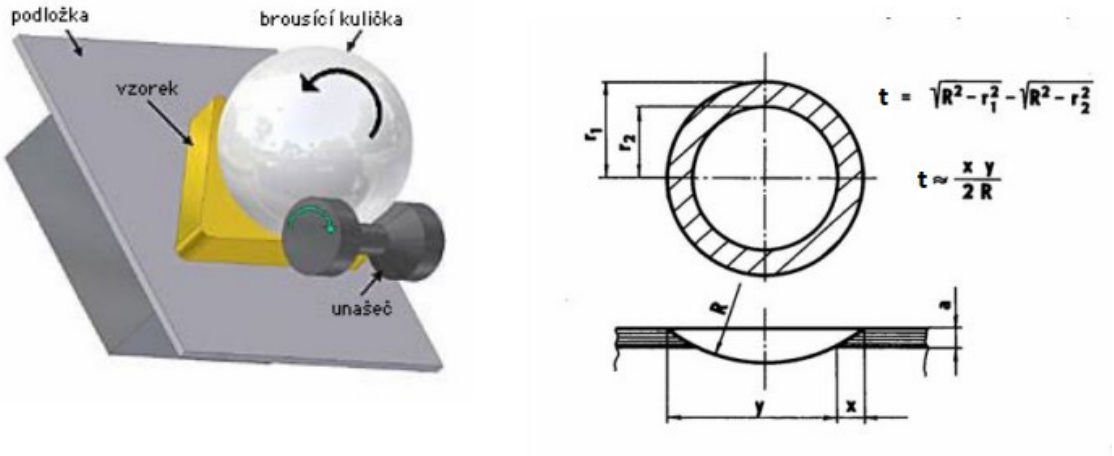
Tloušťka nanesených vrstev se může lišit řádově od jednotlivých atomových vrstev přes několik nanometrů až po stovky nanometrů. Její velikost závisí na procesních parametrech a typu depozice. V mnohých procesech CVD a PE-CVD jsou získávány tlusté vrstvy povlaku. Důvodem je vysoká rychlost růstu v důsledku vysokých depozičních teplot a tlaků. Naopak při metodách depozice atomové vrstvy (ALD) spočívající v přesném řízení vrstev s nízkou rychlostí růstu jsou výsledkem tenké povlakové vrstvy. [26]

Hustota povlaku je měřítkem kvality a potencionální funkčnosti nanesených vrstev Obecně platí, že hustota se zvyšuje se zvyšující se teplotou růstu přičemž index lomu povlaku je ukazatelem míry hustoty povlakované vrstvy. Husté vrstvy povlaku mají tedy vysoký index lomu. [26]

Měření tloušťky vrstev povlaku lze provádět optickými technikami, jako jsou interferometrie a elipsometrie, rozptylovými technikami, například Rutherfordovým rozptylem nebo zpětným rozptylem, elektromechanickou profilometrií nebo mikroskopií za použití optického mikroskopu nebo rastrovacího elektronového mikroskopu. Nejčastěji se tloušťka vrstvy měří poměrně jednoduchou a rychlou metodou zvanou „kalotest“. [26] [33]

4.2.1 Metoda kalotest

Je destruktivní metoda založená na odstranění materiálu z povrchu vzorku rotující kuličkou (kalotou). Vlivem rotace kaloty je na povrchu testovaného povlakovaného vzorku vybroušen kulový vrchlík. V průmětu zkoumaného vzorku je pak jasně viditelný tvar mezikruží. Ocelová kulička má obvykle velikost 25 mm a před aplikací je opatřena lapovací diamantovou pastou. Pro mikrostrukturní vyhodnocení otisku kaloty musí mít povlakovaná vrstva drsnost povrchu $R_a < 0{,}4$ μm. Výhodou této metody je poměrně široká oblast použití od 1 – 100 μm a možnost aplikace u vícevrstvých povlaků, kde lze měřit jednotlivé vrstvy. [33]



Obr. 28 Metoda kalotest

vlevo) schéma zařízení, vpravo stanovení tloušťky z průmětné plochy [33]

Stanovení tloušťky povlaku *t* [μm] vychází z jednoduchých matematických vztahů odvozených z otisku kaloty jako: [2]

$$t = \sqrt{R^2 - r_1^2} - \sqrt{R^2 - r_2^2}\ [\mu m] \tag{1}$$

kde: *R* – poloměr kuličky [μm]

r_1 – poloměr kružnice ohraničující povlak ze strany substrátu [μm]

r_2 – vnější poloměr kulového vrchlíku [μm]

Z obr. 28 je patrné, že tloušťka *t* je téměř rovna:

$$t \approx \frac{x \cdot y}{2 \cdot R} \tag{2}$$

kde: *R* – poloměr kuličky [μm]

x [μm], y [μm] – parametry z obrázku

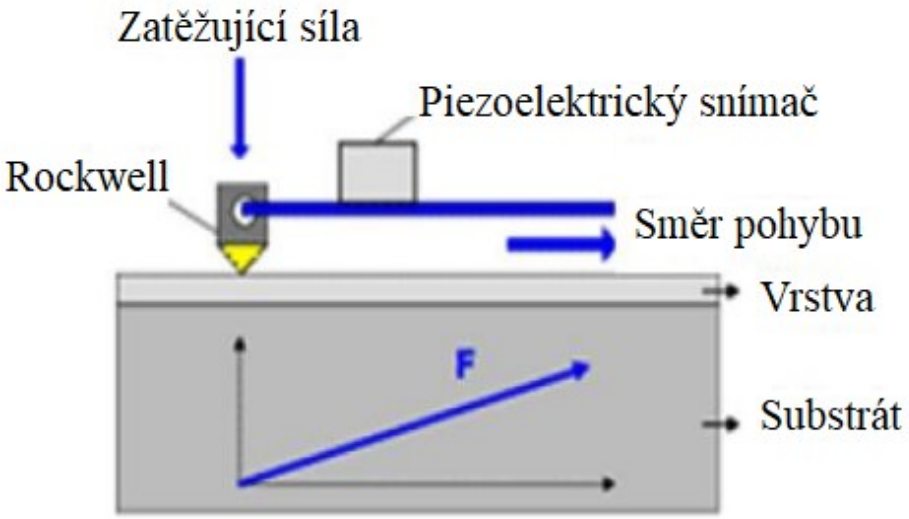
4.3 Adheze

Adheze vrstvy na substrát je základním požadavkem funkčnosti povlaku. Má-li povlak dobře přilnout, je důležité, aby byl substrát před samotnou depozicí důkladně očištěn. Nečistoty na povrchu substrátu mohou bránit v ukládání povlaku a výrazně ovlivnit způsob a množství nukleace deponovaného materiálu. Měření adheze je prováděno poměrně nenáročnými a rozšířenými mechanickými metodami, jako scratch test nebo Mercedes test. Principem těchto testů adheze je rozhodující vynaložená energie nutná k porušení vazeb na rozhraní vrstva – substrát. Hodnotí se velikost síly nutné pro odtržení vrstvy vztažené na jednotku plochy nebo velikost práce s tím spojené. Dále se posuzuje vzniklé porušení systému vrstva – substrát. Pokud dojde k porušení pouze ve vrstvě nebo substrátu, jedná se o kohezní porušení. Adhezní porušení vzniká jen při odtržení vrstvy od substrátu. [26] [33]

4.3.1 Scratch test – vrypová zkouška

Vrypová zkouška (Scratch test) je velmi rozšířenou efektivní metodou testování soudržnosti v systému tenká vrstva – substrát (obr. 29). Tato metoda má zastoupení v mnoha průmyslových a vědeckých odvětvích stejně tak se uplatňuje při vývoji nových depozičních technik v oblastech výzkumu tribologie, letectví, optiky a elektroniky. Výhodou scratch testu je testování neomezených materiálů vrstev nebo substrátů, například organické, anorganické, magnetické, pasivační, třecí i ochranné vrstvy. Dále substráty ze skla, polovodičů, kovu, slitin, minerálů a anorganických materiálů. Do ochranných vrstev řezných nástrojů patří: karbidy, nitridy, oxidy, diamantové, DLC povlaky atd. [33]

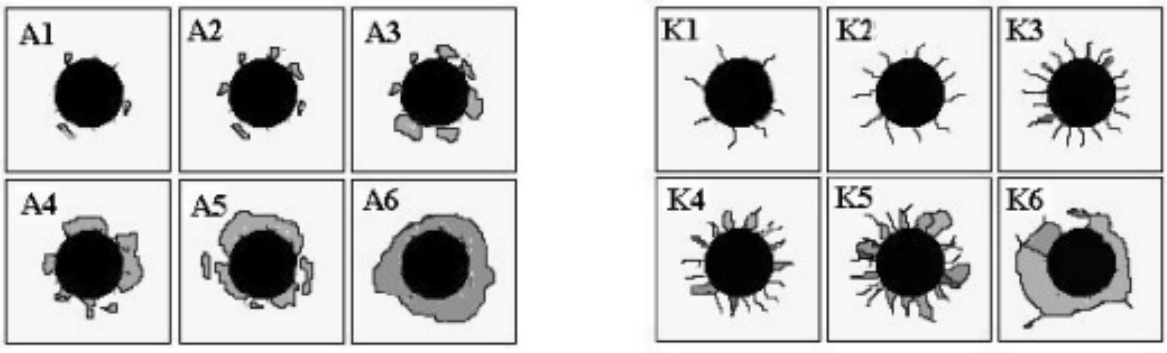
Zkouška probíhá postupným zatěžováním indentoru, na povrch povlakovaného vzorku, který se pohybuje stálou rychlostí dokud se nevytvoří vryp. Indentorem je Rockwelův kužel s vrcholovým úhlem 120° a poloměrem zaoblení hrotu 0,2 mm. Sila působící na indentor je buď konstantní nebo se plynule zvyšuje od 0 do 200 N. Měří se kritické zatížení *Lc* jehož hodnota vyjadřuje zatížení při kterém došlo k poškození vrstvy a je prezentována jako míra adheze dané vrstvy povlaku. Dále se sleduje rychlost posuvu vzorku *dx/dt* při plynulém i zvyšujícím se zatížení a rychlost jejího zatěžování *dL/dt.* [2] [33]



Obr. 29 Scratch test [34]

4.3.2 Mercedes test – indentační (vnikací) zkouška

Pro posouzení kvality spojení deponované vrstvy se substrátem patří vnikací zkoušky mezi rozšířené metody měření. Principem metody je statické vtlačování indentoru do povrchu povlakovaného vzorku. Při vtlačování vzniká na rozhraní tenké vrstvy se subrátem napětí, které způsobuje šíření trhlin směrem k povrchu. Vtisky charakterizující poškození vrstvy jsou rozděleny do jednotlivých kategorií s adhezním číslem. Dále lze sledovat povahu a rozměry vzniklých trhlin nebo vzájemnou interakci mezi zatížením a rozvojem trhlin. [33]



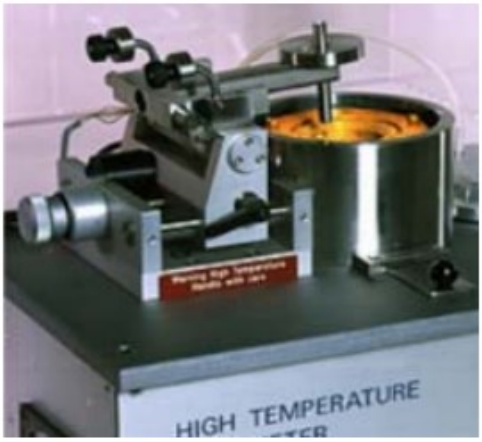
Obr. 30 Hodnocení vtisku vzniklé Rockwelovým indentorem při zatížení 1500 N [33]

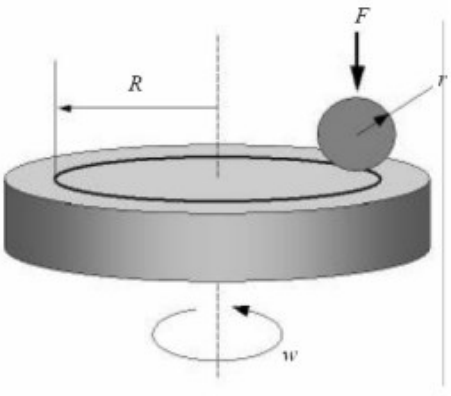
4.4 Tření

Tření vzniká v místech kontaktu dvou vzájemně se pohybujících těles zatížených silou. Interakce mezi materiály také způsobuje opotřebení. Snížit tření a zvýšit odolnost vůči opotřebení lze aplikací tvrdých otěruvzdorných vrstev povlaku. Jejich zkoumání se v laboratorních podmínkách označuje termínem tribologické zkoušky. Výsledky testů mohou být ovlivněny mnoha faktory, jako jsou materiály a vlastnosti obou těles, zatěžující síla, rychlost pohybu a doba skluzu, drsnost povrchu styčných ploch, teplota atd. Cílem zkoušek je stanovit součinitel tření mezi vzorkem a zkušebním tělesem a posoudit jeho změnu v průběhu zkoušky. Zkušební těleso je vyrobeno z oceli, slinutého karbidu, popřípadě z keramiky na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3) nebo nitridu křemíku (Si_3N_4). Zkušební tělesa tak mají definované vlastnosti a geometrii za daných podmínek a prostředí. V závislosti na tvaru zkušebního tělesa se třecí zkoušky provádí metodou Pin-on-Disc (válcový kolík) nebo Ball-on-Disc (kulička). Princip zkoušky je u obou metod totožný. [2]

4.4.1 PIN (BALL)-on-DISC

Měření probíhá vtlačováním zkušebního tělesa do testovaného vzorku ve tvaru disku. Síla působící na těleso v rozmezí od 1 – 10 N, rychlost rotace disku od 10 do 500 otáček za minutu a počet cyklů jsou předem stanoveny. Zkušební těleso je pevně uchyceno na rameni přístroje v adekvátní vzdálenosti od středu vzorku (obr. 31). Aby nedocházelo k nepřesnostem měřených výsledků opotřebení, je tato vzdálenost volena s ohledem na vznikající tepelné pole v okolí stopy. Velikost opotřebení a koeficientu tření je stanovena z počtu cyklů, případně ujeté dráhy. Kromě toho lze zjistit velikost vytvořené stopy pozorovaného vzorku nebo velikost a typ opotřebení zkušebního tělesa. [33]





Obr. 31 Princip měření PIN (BALL)-on-DISC [33]

4.5 Složení a čistota vrstev

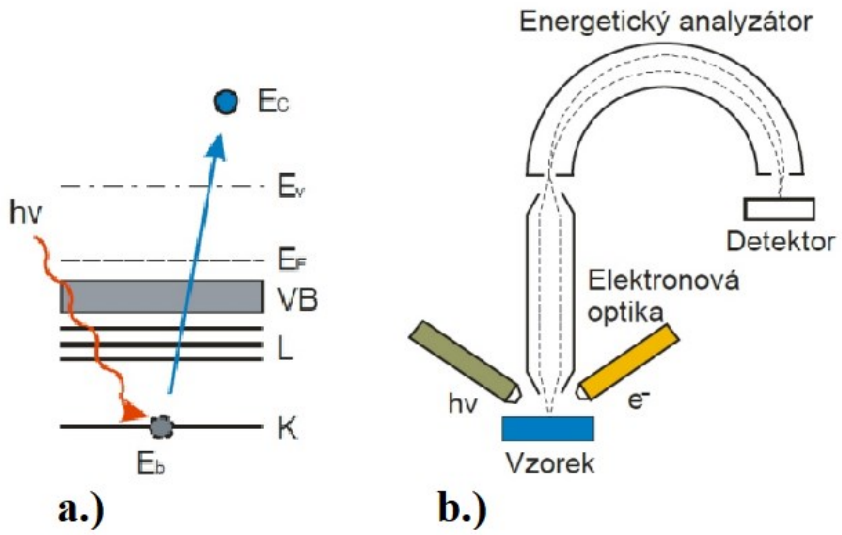
Složení a čistota vrstvy jsou parametry určující funkčnost vrstvy povlaku. Souvisí s chemickým a fázovým složením jednotlivých prvků, chemických sloučenin a jejich koncentracemi. K detekování složení vrstev bylo vyvinuto mnoho technik, jako například Augerova elektronová spektroskopie (AES), rentgenová fotoelektronová spektroskopie (XPS), Rutherfordův zpětný rozptyl (RBS), energiově disperzní rentgenová analýza (EDX) nebo sekundární iontová hmotnostní spektrometrie (SIMS) a jiné. Poněkud sofistikovanější metodou je rozptyl iontů střední energie (MEIS) s distribucí energie přibližně 200 keV. Tato metoda je určena k charakterizaci tloušťky, složení a krystalinity tenkých vrstev, přičemž distribuce energie poskytuje efektivní hloubkový profil cílových atomů. Mimo to metoda MEIS také poskytuje informace o rozsahu interakce mezi vrstvou a substrátem. [2] [26]

4.5.1 Rentgenová fotoelektronová spektroskopie (XPS)

V současnosti nejrozšířenější metodou ke studiu pevných látek a velmi tenkých vrstev je rentgenová fotoelektronová spektroskopie (XPS – X-ray Photoelectron Spectroscopy) označovaná také jako elektronová spektroskopie pro chemickou analýzu (ESCA – Electron Spectroscopy for Chemical Analysis). Dokáže detekovat širokou škálu kvantitativních informací o složení, vazbách atomů ke svému okolí, tloušťku velmi tenkých vrstev a pomocí úhlově závislých měření také rozložení sledovaných atomů v závislosti na hloubce pod povrchem vzorku. [35]

Rentgenové záření vyvolané zdrojem dopadá na zkoumaný vzorek, kde vyzářené fotony absorbují pod povrch do hloubky několika mikrometrů tohoto vzorku a atomy, které se na celém povrchu nachází mohou fotony pohlcovat. Poté absorbovaný foton předá energii vnitřnímu elektronu, a ten je následně emitován z atomu kinetickou energií. Takto vzniklé fotoelektrony mohou vzorek opustit a být identifikovány. Velikost vazebné energie fotoelektronů E^V_B vzhledem k hladině vakua je rovna rozdílu mezi energií vyzářených fotonů h_v a kinetickou energií emitovaných fotoelektronů E_K. Zjednodušený model výpočtu vazebných energií je tedy popsán rovnicí: [35]

$$E_B^V = hv - E_K \tag{3}$$

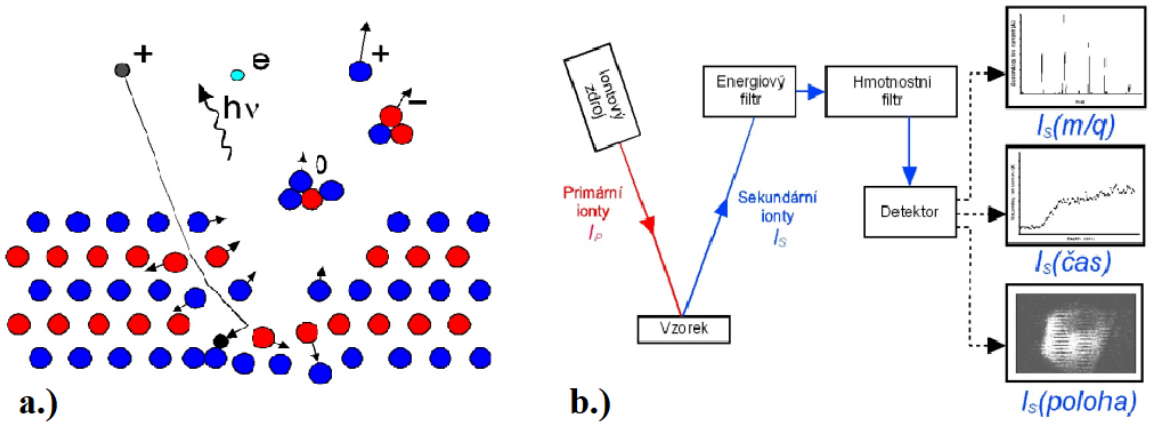


Obr. 32 Metoda XPS

a.) Proces fotoelektronové emise b.) Obecné schéma metody XPS (AES) [36]

4.5.2 Hmotnostní spektrometrie sekundárních iontů (SIMS)

Nároky na měření stopových prvků s vysokou citlivostí směřoval k vývoji metody hmotnostní spektrometrie sekundárních iontů (SIMS – Secondary Ion Mass Spektrometry), Metoda SIMS je také schopna analyzovat například organické sloučeniny nebo nanostruktury. Princip metody spočívá v rozprašování povrchu testovaného vzorku energetickým svazkem částic (0,2 keV – 20 keV). V důsledku rozprašování primárními ionty dochází na povrchu vzorku k emisi elektronů, fotonů a odprašování povrchových částic do všech směrů. Pouze část odprášených částic se ionizuje a zbytek zůstává neutrální. Ionizované částice, tzv. sekundární ionty, jsou zdrojem informací o povrchu zkoumaného vzorku, ale jen zlomek těchto iontů lze analyzovat pomocí hmotnostního spektrometru. Nevýhodou metody je vysoká cena špičkových zařízení SIMS. [36]



Obr. 33 Metoda SIMS a.) Fyzikální princip metody SIMS b.) Schéma zařízení SIMS [36]

5 MIKROTVRDOST VRSTEV POVLAKU

Mechanické vlastnosti povlakovaných řezných nástrojů jsou rozhodujícím kritériem provozuschopnosti. Správné vyhodnocení kvality povlaku je nezbytné pro zlepšení jejich návrhu. Mikrotvrdost je jednou ze základních měřených charakteristik, kterou lze definovat jako míru odporu vůči pronikání cizího tělesa nazvaného indentor. Obecně platí, že čím větší je tvrdost materiálu, tím větší bude jeho odolnost vůči deformaci. Totéž platí v případě tenkých vrstev povlaku. Zkoušku tvrdosti lze z hlediska použitého rozsahu zatížení aplikovat v makro, mikro a nano měřítku. Všechny zkoušky tvrdosti se označují zkratkou H (z anglického výrazu Hardness) s příslušným indexem.

Hodnocení tvrdosti povlaku se nejčastěji provádí vnikací (indentační) metodou, která se podle normy ČSN ISO 14577-1 dělí do tří aplikačních skupin v závislosti na rozsahu zatížení a hloubky vtisku:

- zkoušky makrotvrdosti – $2\ \mathrm{N} \leq F \leq 30000\ \mathrm{N}$
- zkoušky mikrotvrdosti – $2\ \mathrm{N} > F$, $h > 200\ \mathrm{nm}$
- zkoušky nanotvrdosti – $0{,}1\ \mathrm{N} > F$, $h < 200\ \mathrm{nm}$,

kde F je síla zatížení a h označuje hloubku vtisku. [37] [38]

5.1 Indentační zkoušky tvrdosti

Metodika zkoušky je založena na postupném pronikání diamantového tvarového indentoru do testovaného vzorku. Před samotným cyklem jsou stanoveny parametry zatěžující síly a doba rychlosti cyklu. V místě dotyku se vytvoří vtisk, který zůstává zachován i po odlehčení. Hodnota mikrotvrdosti je určena podílem zatěžující síly [N] a plochy vtisku vyplývajícího z geometrie indentoru [mm^2]. Tloušťka povlakovaných vrstev vzhledem k substrátu je relativně malá, maximálně několik mikrometrů, proto se zatížení indentoru volí s ohledem na možné proniknutí do vrstvy substrátu, které by způsobilo zkreslení výsledků tvrdosti. Proto se hloubka proniknutí stanovuje na 5 – 10 % tloušťky povlaku a tento interval je výsledkem mnoha studií zabývajících se měřením tvrdosti tenkých vrstev. Výsledky měření mikrotvrdosti mohou být také ovlivněny mnoha dalšími činiteli, jako je tvar a vlastnosti indentoru, zkušební cyklus a zatížení, nevhodná volba přístroje, vnější a vnitřní vibrace přístroje, nedostatečná předpříprava povrchu měřeného vzorku a jiné. [39]

Existuje několik variant testování tvrdosti, které se liší pouze geometrií aplikovaného indentoru, zatěžující silou a způsobem vyhodnocení rozsahu deformace. Běžně používané vnikací metody jsou Vickersova, Knoopova a Berkovichova, při nichž lze kromě tvrdosti získat také hodnoty mechanických vlastností, například pevnost, houževnatost a vnitřní úroveň zbytkových napětí. Flexibilnější způsob poskytuje měření indentační metodou DSI (Depth Sensing Indentation), známá jako instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti. Instrumentovaná zkouška je počítačem řízený přístroj, který zaznamenává okamžité změny během celého procesu měření. Tato metoda je zvláště vhodná pro měření tenkých vrstev povlaku. [38] [39]

5.2 Vickersova metoda

Vickerovu metodu specifikuje mezinárodní norma ČSN EN ISO 6507, která z hlediska rozsahu zkušebního zatížení rozděluje měření do tří kategorií.

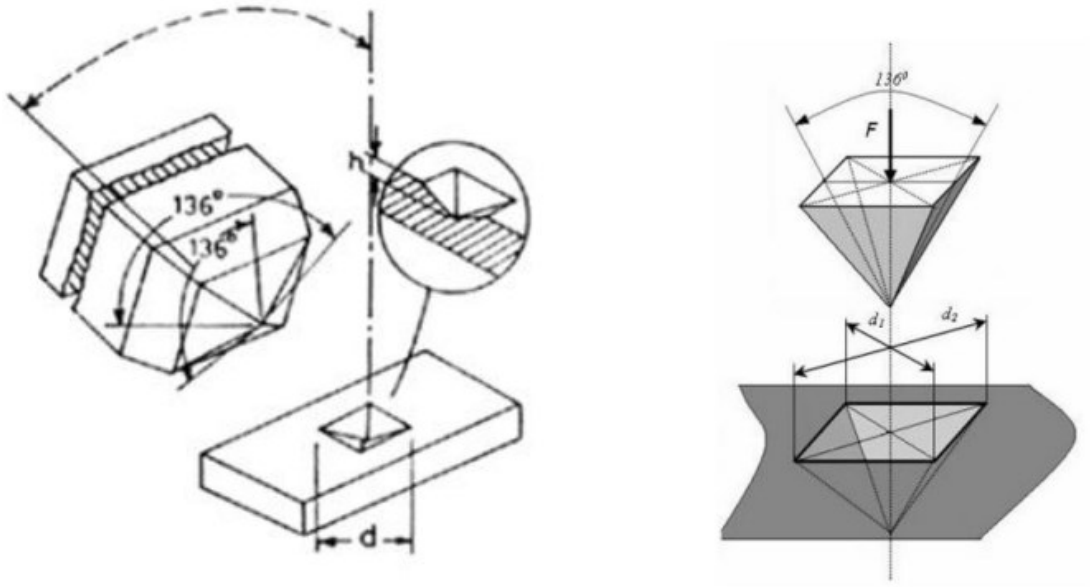
Tabulka 5 Rozdělení zkoušek dle ČSN EN ISO 6507-1 [40]

Rozsahy zkušebního zatížení, F [N]	**Značka tvrdosti**	**Význam**
$F \geq 49{,}03$	≥ HV 5	Zkouška tvrdosti podle Vickerse
$1{,}961 \leq F < 49{,}03$	HV 0,2 až < HV 5	Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení
$0{,}009\,807 \leq F \leq 1{,}961$	HV 0,01 až < HV 0,2	Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse

Vickersův diamantový indentor je typický svým tvarem čtyřbokého pravidelného jehlanu, jehož protilehlé strany svírající úhel 136° (obr. 34). Během zatěžovacího cyklu vniká indentor kolmo do testovaného materiálu, kde vytvoří tvarový otisk. Z geometrie indentoru je patrné, že po odlehčení zůstává na měřeném materiálu vtisk ve tvaru čtverce a hloubka vtisku h odpovídá přibližně jedné sedmině délky uhlopříčky d. Hloubka h je vyjádřena vztahem: [39] [41]

$$h = \frac{1}{4}\sqrt{2} \cdot d \cdot tg22\% \cong \frac{d}{7} \tag{4}$$

Vickersova metoda vyžaduje, aby tloušťka zkoumaného materiálu byla nejméně 1,5 násobek délky vtisku uhlopříčky. Vzdálenost středů každého vtisku od okraje musí být minimálně 2,5 násobek průměrné hodnoty uhlopříček vtisku. [38]



Obr. 34 Geometrie Vickerova jehlanu [42]

Míra tvrdosti podle Vickerse se obecně vypočítá ze vztahu: [42]

$$HV = K \cdot \frac{F}{S} \tag{5}$$

kde: *HV* – tvrdost podle Vickerse [N · mm^{-2}]

K – konstanta, $K = \frac{1}{g_n} = \frac{1}{9{,}80665} = 0{,}102 \left[\frac{1}{\frac{m}{s^2}}\right]$

g_n – vyjadřuje gravitační zrychlení [m^{-1} · s^2]

F – aplikované zatížení působící na tvarový indentor [N]

S – průmětná plocha výsledného vtisku [mm^2]

Podle geometrie Vickersova jehlanu je mikrotvrdost vyjádřena rovnicí: [42]

$$HV = 0{,}102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin\left(\frac{136°}{2}\right)}{d^2} \tag{6}$$

kde, *d* je aritmetický průměr vtisku stran uhlopříček d_1 a d_2, $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

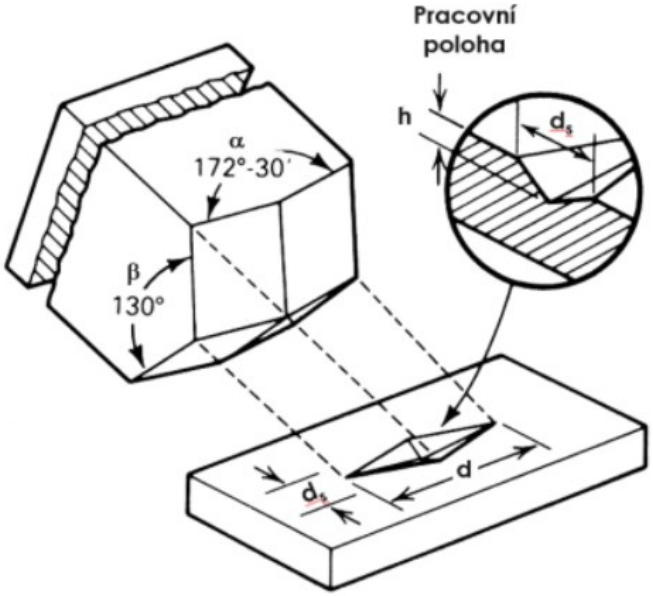
Součinem konstanty a dvounásobku sinu poloviční úhlu lze vztah upravit na: [40]

$$HV = 0{,}1891 \cdot \frac{F}{d^2} \tag{7}$$

Výsledek měření se zapisuje v příslušném formátu například 640 HV 30/20 a vyjadřuje:
640 – tvrdost podle Vickerse
HV – Vickersova metoda měření [N·mm^{-2} = MPa]
30 – velikost zkušebního zatížení, v tomto případě 30 kgf = 294,2 N
20 – doba působení zatěžující síly (20 sekund). [40]

5.3 Knoopova metoda

Knoopova vnikací metoda byla vyvinuta jako alternativa metody Vickersovy s tím rozdílem, že hrot indentoru nemá stejnou délku hran. Protilehlé plochy Knoopova indentoru svírají úhly 172,5° na delší straně uhlopříčky, zatímco kratší strana svírá úhel 130°. Knoopův čtyřboký diamantový jehlan vytvoří v materiálu stopu ve tvaru kosočtverce (obr. 35) s poměrem délek vedlejší a hlavní uhlopříčky 1:7,11. Poměr hloubky vtisku k délce hlavní uhlopříčky je 1:30. Pro výpočet Knoopovy tvrdosti se měří pouze delší strana uhlopříčky. Knoopova metoda je upravena normou ČSN EN ISO 4545 a byla vyvinuta speciálně pro zkoušky s velmi nízkým zatížením. Aplikované zatížení stanovené normou se pohybuje v rozmezí od 0,009 807 (0,01gf) do 19,613 N (2 kgf). [38] [43]



Obr. 35 Geometrie Knoppova indentoru [43]

Knoopova tvrdost je definována jako podíl aplikovaného zatížení a průmětné plochy vtisku vyjádřena rovnicí: [44]

$$HK = \frac{1}{g_n} \cdot \frac{F}{S} = \frac{1}{g_n} \cdot \frac{F}{c \cdot d^2} \tag{8}$$

kde, *HK* – tvrdost podle Knoppa

g_n – tíhové zrychlení, $g_n = 9{,}806\ 65\ [m \cdot s^{-2}]$

F – zkušební zatížení [N]

S – průmětná plocha vtisku [mm^2]

c – konstanta indentoru [-]

d – velikost delší uhlopříčky [mm]

Do výpočtu je navíc zavedena konstanta C, která se stanovuje jako: [44]

$$c = \frac{tg\left(\frac{\beta}{2}\right)}{2 \cdot tg\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{tg\left(\frac{130°}{2}\right)}{2 \cdot tg\left(\frac{172°30´}{2}\right)} = 0{,}07028 \tag{9}$$

Po úpravě rovnice se tvrdost stanoví podle vztahu: [44]

$$HK = 1{,}451 \cdot \frac{F}{d^2} \tag{10}$$

Výsledek měření tvrdosti podle Knoopa se zapisuje ve tvaru 640 HK 0,1/20,
kde jednotlivé pozice označují :
640 – naměřená hodnota tvrdosti podle Knoopa
HK – značka metody měření tvrdosti dle Knoopa
0,1 – přibližná velikost zkušebního zatížení v kgf (0,1 kgf = 0,980 7 N)
20 – doba zkušebního zatížení (20 s), uvádí se v případě, kdy zkušební doba zatížení neodpovídá předepsanému rozmezí 10 – 15 sekund. [44]

5.4 Berkovichova metoda

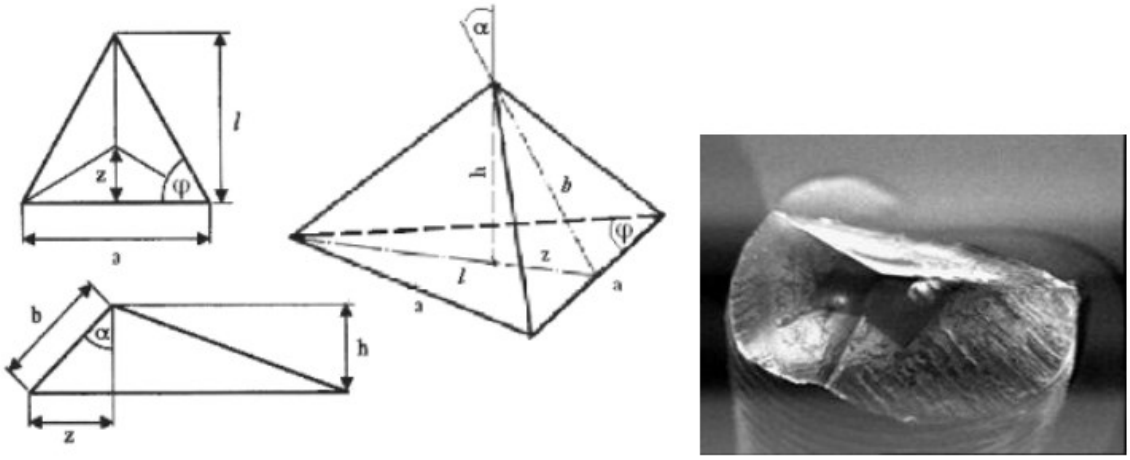
Zkouška tvrdosti podle Berkoviche vychází z Vickersovy metody. Berkovichův indentor má tvar nepravidelného trojbokého jehlanu s úhlem 65,27° mezi bočními stěnami a výškou jehlanu, který po odlehčení zanechá v materiálu otisk v podobě rovnostranného trojúhelníku. Princip měření je shodný s metodou podle Vickerse a Knoppa. Otisk indentoru má stejný poměr stran k hloubce vtisku jako Vickersův indentor. Berkovichův indentor je v současnosti oblíbeným nástrojem analýzy tvrdosti v nanoindentačních zkouškách. V Berkovichově metodě se tvrdost vyhodnocuje měřením délky jednotlivých

úhlopříček vtisku. Tvrdost podle Berkoviche *(H_{CH})* je vyjádřena jako poměr velikosti zatěžující síly a plochy (obr. 36): [38]

$$H_{CH} = 1570 \cdot \frac{F}{l^2} \tag{11}$$

kde: F – velikost zatěžující síla

l – výška trojúhelníku změřená na vtisku



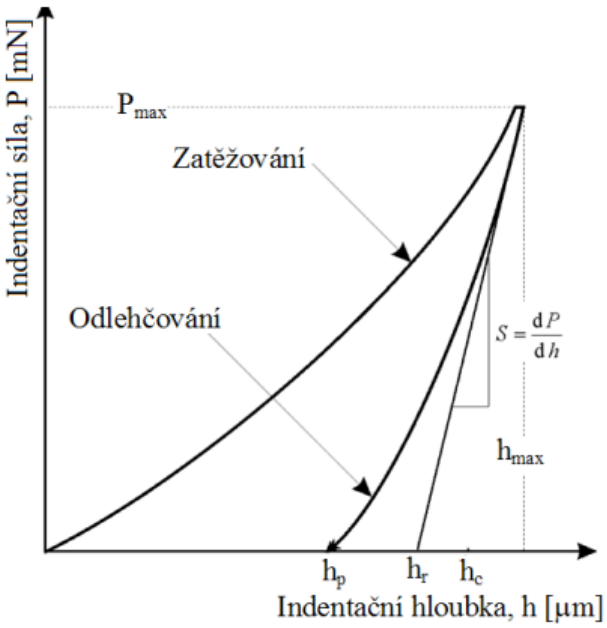
Obr. 36 Geometrie Berkovichova indentoru [38]

5.5 Instrumentovaná zkouška tvrdosti (DSI)

Instrumentovaná zkouška tvrdosti nahrazuje tzv. klasické zobrazovací metody na principu stanovení rozměrů zbylých vtisků. Byla vyvinuta ke zkoumání mechanických vlastností velmi elastických vrstev nebo velmi malých objemů materiálů jakými jsou například tenké vrstvy povlaku. Požadavek na charakteristiku těchto vlastností vedl k vývoji nové indentační techniky DSI (Depth Sensing Indentation), pro niž byl zvolen český ekvivalent instrumentovaná zkouška tvrdosti stanovená normou ČSN EN ISO 14577. Historie metody DSI sahá do sedmdesátých let dvacátého století, jejíž tvůrci byli Bulichev a Alekin, ale až na počátku osmdesátých let dosáhla metoda DSI významného zlepšení metodiky, analýzy a shromažďování dat, kterou učinili autoři Oliver a Pharr. [38]

Princip metody spočívá v plynulém vtlačování indentoru s přesně stanovenou geometrií hrotu na povrch testovaného materiálu. Současně přístroj zaznamenává okamžité změny hloubky průniku a velikost zatěžující síly během celého cyklu zatěžování a odlehčování,

které graficky zpracuje do tzv. indentační křivky (obr. 37). Zatěžováním indentoru dochází k plastické i elastické deformaci materiálu vyvolané napětím. [38]



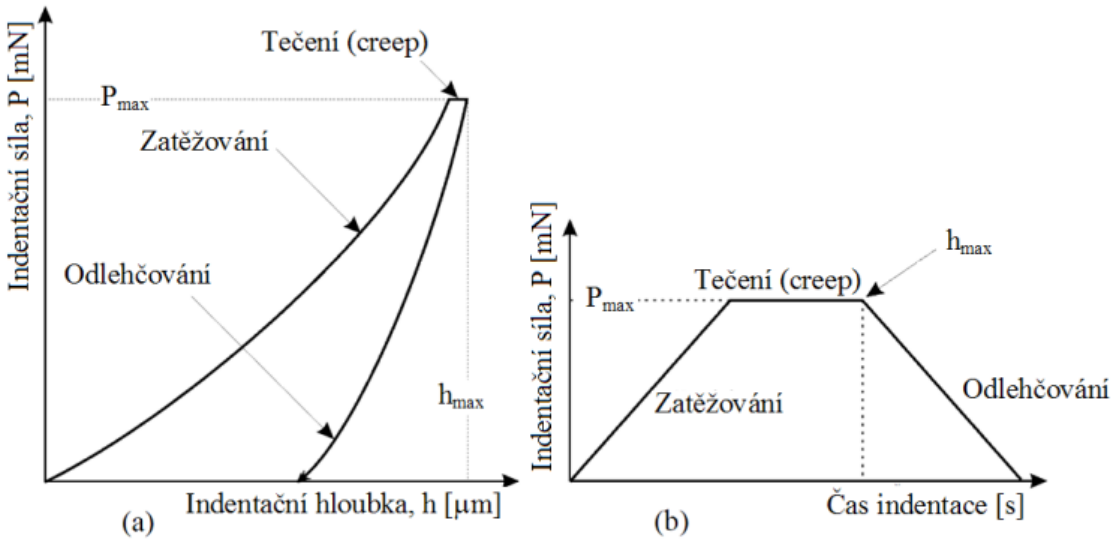
Obr. 37 Indentační křivka [38]

Indentační křivka je charakteristická pro daný materiál a popisuje závislost hloubky vtisku indentoru na velikosti zatížení. Indentační křivka také popisuje průběh zatěžování a odlehčování. Pokud se mezi cykly zatěžování a odlehčování vloží prodleva, kdy je vzorek vystaven maximálnímu aplikovanému zatížení, lze zkoumat tečení materiálu (creep) (obr. 38). [38]

Kromě hodnot tvrdosti a modulu pružnosti lze z křivek zatížení a odlehčení stanovit elastický modul, tečení materiálu (creep), lomovou houževnatost, deformační práci, fázové transformace, trhliny a delaminaci vrstvy atd. [38]

5.5.1 Vtisková vrdost H_{IT}

Tvrdost vyznačuje míru odporu proti pronikání cizího tělesa při čemž dochází k trvalému poškození a deformaci. Pro vyhodnocení naměřených dat se nejčastěji aplikuje metoda Olivera a Pharra. Tato metoda vyhodnocuje tvrdost z maximální aplikované síly $P_{max,}$, maximální hloubky vtisku h_{max} a kontaktní tuhosti S. Kontaktní tuhost S se vyjadřuje jako směrnice tečny počáteční části odlehčovací křivky (obr. 37). [38]



Obr. 38 Grafické znázornění indentační zkoušky

a,) Indentační křivka, b.) časový průběh zkoušky [38]

Analytický model pro výpočet kontaktní plochy z hloubky vtisku při maximálním zatížení je stanoven z Oliverovy a Pharrovy metody jako: (obr. 39) [38] [39]

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \cdot (h_{max} - h_{r)} \tag{12}$$

$$h_r = h_{max} - \frac{P_{max}}{S} \tag{13}$$

kde, h_{max} – maximální hloubka kontaktní plochy při zatížení silou P_{max}

h_r – hloubka průsečíku tečny s osou hloubky vtisku

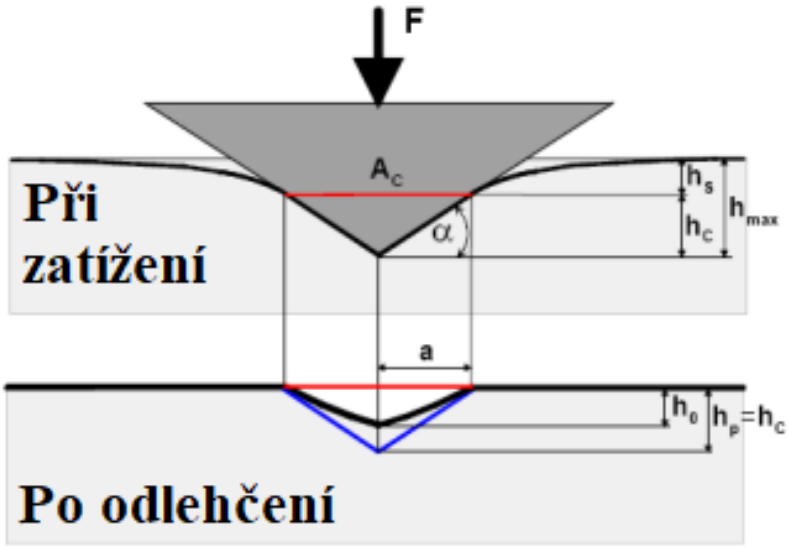
ε – konstanta vycházející z geometrie indentoru

P_{max} – maximální aplikované zatížení

S – kontaktní tuhost

Kontaktní tuhost je dána vztahem: [38]

$$S = \left(\frac{dP}{dh}\right)_m \tag{14}$$



Obr. 39 Schéma vtisku v příčném řezu [39]

Vtisková tvrdost H_{IT} je při nanoindentační metodě definována jako podíl maximálního zatížení P a průmětné plochy vtisku A_p stanovena rovnicí: [38]

$$H_{IT} = \frac{P_{max}}{A_p} \tag{15}$$

kde, H_{IT} – značka tvrdosti zjištěná metodou indentace

P_{max} – maximální zkušební zatížení indentoru

A_p – průmět kontaktní plochy indentoru

Výpočet projekční plochy A_p závisí na tvaru použitého indentoru při zkouškách tvrdosti a jsou stanoveny následujícími rovnicemi pro jednotlivé metody podle: [45]

- Vickersova indentoru

$$A_p = 4h_p^2 \cdot tg^2\,(68°) = 24{,}504\; h_p^2 \tag{16}$$

- Berkovichova indentoru

$$A_p = 3\sqrt{3}\; h_p^2 \cdot tg^2\,(65{,}27°) \approx 24{,}5\; h_p^2 \tag{17}$$

- Knoppova indentoru

$$A_p = 2h_p^2 \cdot tg\,(86{,}25°) \cdot tg\,(65°) \tag{18}$$

Výpočet tvrdosti podle Martense je určena pro všechny materiály. Vychází z poměru zatěžující síly P a plochy povrchu indentoru $A_s\ (h)$ ve vzdálenosti h od hrotu. Velikost tvrdosti podle Martense se označuje v N/mm^2 a je vyjádřena vztahem: [38]

$$HM = \frac{P}{A_s\ (h)} \tag{19}$$

Například pro výpočet tvrdosti podle Vickerse bude mít rovnice tvar: [38]

$$HV = \frac{P_{max}}{9{,}81\ \cdot\ A_c\ (h_c)} \tag{20}$$

5.5.2 Vtiskový modul pružnosti E_{IT}

Metodou DSI lze získat několik specifických parametrů materiálu jako vtiskový (indentační), redukovaný nebo komplexní modul pružnosti. Indentační modul pružnosti je stanoven ze vztahu: [38]

$$E_{IT} = E^*\ \cdot (1 - \nu_s^2) \tag{21}$$

kde, E^* - komplexní modul

ν_s – Poissonův poměr testovaného vzorku, pro kovové materiály se volí hodnoty 0,2 až 0,4, pro polymerní materiály 0,3 až 0,4.

Komplexní modul pružnosti vyjadřuje rovnice: [38]

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - (\nu_i)^2}{E_i}} \tag{22}$$

kde, E_r je redukovaný modul pružnosti vyjádřen z: [38]

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\ \cdot C\ \cdot \sqrt{A_p}} \tag{23}$$

kde: A_p – průmětná kontaktní plocha

C – kontaktní poddajnost

ν_s – Poissonovo číslo testovaného materiálu

ν_i – Poissonovo číslo vnikacího indentoru (u diamantu 0,07)

E_r – redukovaný modul pružnosti testovaného vzorku

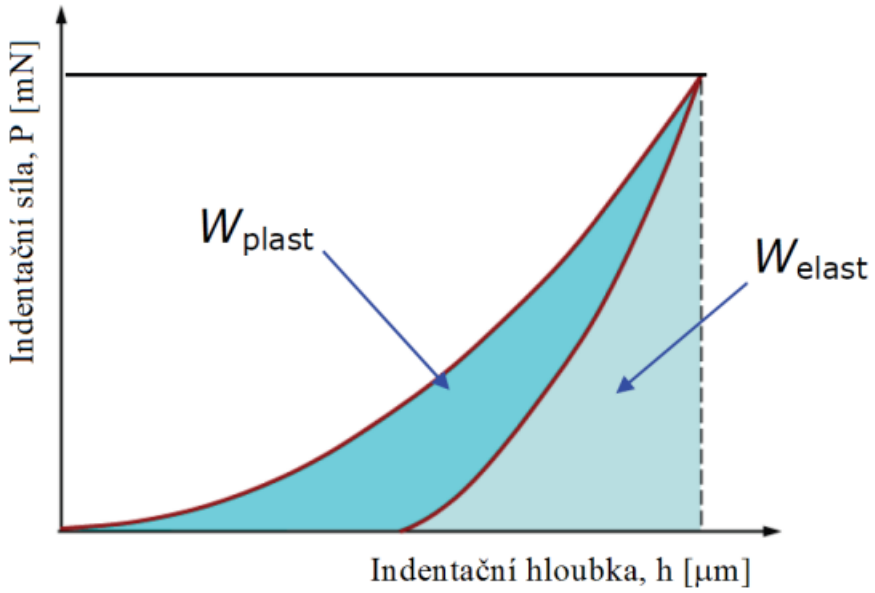
E_i – redukovaný modul indentoru

5.5.3 Deformační práce

Vyjadřuje velikost celkové práce dosažené během cyklu intendančního měření. Je součtem nevratné plastické práce W_{plast} a vratné elastické práce W_{elast} (obr. 40). Podíl elastické a celkové práce vyjadřuje koeficient zpětné relaxace η_{IT}. Jsou získány z indentační křivky následujícími rovnicemi: [38]

$$W_{total} = W_{plast} + W_{elast} \tag{24}$$

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{total}} \cdot 100 \tag{25}$$



Obr. 40 Indentační křivka deformační práce [38]

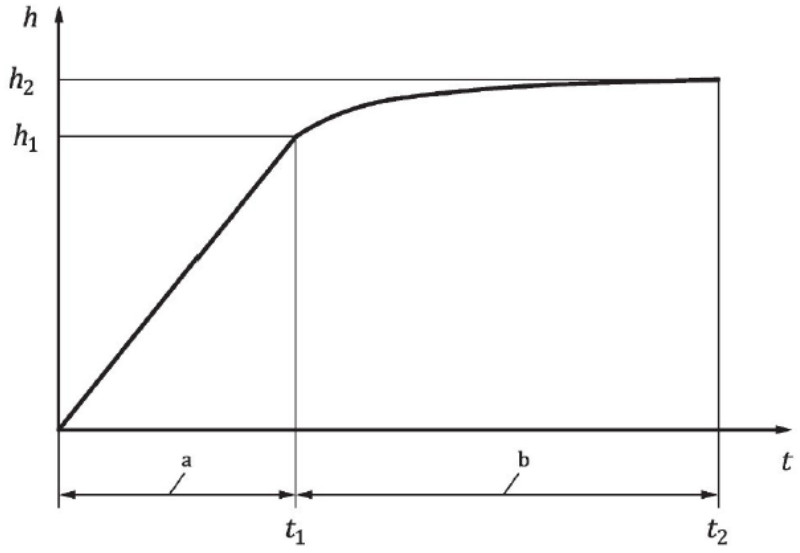
5.5.4 Vtiskové tečení C_{IT}

Jestliže se při konstantním zatížení měří změna hloubky vtisku, může se vypočítat relativní změna hloubky vtisku (obr. 41), jedná se o hodnotu tečení materiálu (creep). Rovnice pro výpočet vtiskového tečení C_{IT} má tvar: [37]

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \tag{26}$$

kde: h_1 – hloubka vtisku v čase t_1 při dosažení zkušebního zatížení udržovaného na konstantní úrovni

h_2 – hloubka vtisku v čase t_2 dosažena výdrží na konstantní úrovni



Obr. 41 Vyjádření vtiskového tečení [37]

Křivka vtiskového tečení (obr. 41) vyjadřuje v zóně a.) aplikaci zkušebního zatížení do hloubky h_1. Zatížení se postupně zvyšuje a své maximum dosahuje v čase t_1. V zóně b.) je udržováno maximální konstantní zatížení v čase od t_1 do t_2. Prodleva na tomto zatížení způsobí změnu hloubky vtisku z h_1 na h_2. [37]

5.5.5 Vtisková relaxace R_{IT}

Jestliže se při konstantní hloubce vtisku měří změna zkušebního zatížení, může se vypočítat relativní změna zkušebního zatížení, která uvádí hodnotu relaxace materiálu. Velikost vtiskové relaxace R_{IT} se vypočítá ze vztahu: [37]

$$R_{IT} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \cdot 100 \qquad (27)$$

kde: P_1 – zatížení při dosažení hloubky vtisku, která je udržována na konstantní úrovni

P_2 – zatížení po čase, kdy byla hloubka vtisku udržovaná na konstantní úrovni.

6 ZÁVĚREČNÉ SHRNUTÍ TEORETICKÉ REŠERŠE

Procesy vysokorychlostního třískového obrábění představují nejslibnější činnost v oblasti pokročilých technologií obrábění kovů. Jsou spojeny s vysokou rychlostí úběru materiálu a schopností obrobit jakýkoliv materiál. Základním předpokladem ke zvládání řezných situací je přizpůsobení požadavků řezného nástroje. Materiáloví a povrchoví inženýři se již dlouhodobě snaží vyvíjet materiály, které by obstály v nejtěžších obráběcích situacích s cílem zlepšení kvality procesu a snižování nákladů. Povlakování se ukázala jako perspektivní cesta přispívající ke zvýšení tvrdosti a životnosti základního nástrojového materiálu a posunula tak hranice využitelnosti. Konvenční metody PVD a CVD byly modifikovány ve snaze zvýšit aktivace reakčních procesů k ukládání rovnoměrných a hustých vrstev. Dalším benefitem byla depozice kov-organických materiálů nebo dosažení přesně řízených struktur v atomových vrstvách. U nanášených materiálů byl zaznamenán pozvolný přechod od jednoduchých vrstev k vícevrstvým a multivrstvým povlakům. Atraktivita vrstev TiAlN nebo AlTiN na řezných nástrojích byla již dávno potvrzena. Větší flexibilitu v posledních letech představují vícevrstvé povlaky nebo povlaky současné čtvrté generace. Ty zahrnují multivrstvé povlaky složené i z více než deseti vrstev, supertvrdé diamantové povlaky DLC nebo pevné mazací povlaky, například molybden disulfid (MoS) s velmi nízkým koeficientem tření. Ovšem mnohé povlaky poslední čtvrté generace jsou stále ve stádiu bádání. Každý stupeň vývoje apeloval na optimalizaci mechanických a tribologických vlastností vrstev v obráběcích aplikacích. Kombinace způsobů depozice a stavby nanášených materiálů určuje konečné vlastnosti řezných nástrojů a potenciál využití. Vlastnosti řezných nástrojů jsou silně závislé na jejich mikrostruktuře a potřebná odolnost proti opotřebení a degradaci se zvyšuje s rostoucí mikrotvrdostí. Metodiky výzkumu poskytují cenné informace o povaze vrstev a nástrojových materiálů s cílem analyzovat mechanické a tribologické vlastnosti, na jejichž základě lze navrhnout postupy zlepšení. Poptávka po spolehlivých řezných nástrojích neustále roste a budoucí vývoj směřuje k nalezení dokonalého nástroje.

Teoretická část bakalářské práce byla v podstatě rozdělena do tří částí. V první části jsou popsány principy a geometrie řezných nástrojů na které navazují dostupné řezné materiály, jejich vlastnosti a možnosti aplikace. Současně jsou uvedeny vývojové fáze povlaků označované pojmem generace. K pochopení podstaty tvorby povlakovaných vrstev jsou v druhé části představeny metody a způsoby depozice. Třetí část charakterizuje mechanické

vlastnosti vrstev povlaku a prezentuje postupy měření a analýzy těchto vlastností. Jednotlivé kapitoly lze stručně shrnout do následujících poznatků.

- Rychlořezné oceli jsou vysokolegované uhlíkové oceli, jejichž vlastnosti přímo ovlivňuje procentní podíl uhlíku a legujících prvků. V zásadě dokonalá houževnatost a pevnost v ohybu je vykoupena nižší tvrdostí a tepelnou stabilitou. Z tohoto důvodu jsou aplikovány pouze v konvenčních systémech obrábění. Za nejžádanější materiály řezných nástrojů jsou dlouhodobě považovány slinuté karbidy. Změnou velikosti zrna a vzájemným poměrem karbidu wolframu (WC) s kobaltovým (Co) pojivem získá řezný nástroj jedinečné vlastnosti, které prakticky neomezují oblast jejich aplikace. Zlepšení mechanických a tribologických vlastností bylo dále dosaženo přidáním karbidových prvků typu karbid titanu (TiC), karbid tantalu (TaC) a karbid niobu (NbC) do základní směsi WC-Co. Aplikace tvrdých vrstev povlaku umožnila slinutým karbidům i ostatním nástrojovým materiálům zkrátit výrobní časy obrábění zvýšením rychlosti řezu a posuvu. Novějším produktem práškové metalurgie, založené na kombinaci složek (Ti (C,N)) s pojivy na bázi niklu, kobaltu, nebo molybdenu jsou cermety. Díky kombinovaným vlastnostem, včetně vysoké tvrdosti jsou cermetové materiály aplikovány v procesech vysokorychlostního obrábění, určené ke zpracování různých materiálů i těch obtížně obrobitelných. Keramické řezné materiály jsou typické absencí tvrdých fází a kovového pojiva. Základním rysem keramických nástrojů je vysoká tvrdost, která zůstává zachována při extrémně vysokých teplotách obrábění, proto jsou aplikovány zejména pro opracování žáruvzdorných slitin a těžkoobrobitelných materiálů. Mechanické vlastnosti řezných keramik hrají důležitou roli v technologiích vysokorychlostního obrábění, navíc bez nutnosti chlazení, které způsobuje degradaci keramiky vystavené tepelným šokům. Keramické nástrojové materiály nabízí bezpočet variací typů, složení a specifických vlastností. Kubický nitrid boru (PKNB) a polykrystalický diamant (PD) jsou charakterizovány jako supertvrdé nástrojové materiály používané jak pro řezné nástroje, tak ve formě emulzí, past nebo povlaků. Ve skutečnosti jsou oba materiály jedinečné svou mimořádnou tvrdostí a zároveň rozdílné v oblastech aplikace. Pro opracování tvrdých ocelí, slitin a kalených materiálů, které diamantovým (PD) nástrojem nelze uskutečnit, byly vyvinuty nástrojové materiály z PKNB. Naopak polykrystalický diamant s největší známou tvrdostí má výrazné technologické omezení. Tato omezení souvisí s nízkou stabilitou při teplotě nad 700 °C, kdy dochází k nežádoucí difuzní reakci s materiály obsahující podíl železa. PD se prokázal jako vysoce účinný nástroj v oblasti obrábění

neželezných materiálů, zejména hliníku, mědi, hořčíku a jejich slitin, včetně slinutých karbidů a abrazivních materiálů. Rozmanitá nabídka nástrojových materiálů poskytuje nekonečné variace vlastností, které splňují požadavky na obrobitelnost jakéhokoliv materiálu.

- Technologie povlakování rozlišuje dvě základní metody aplikace vrstev a to fyzikální depozice z plynné fáze (PVD) a chemická depozice z plynné fáze (CVD), které jsou na průmyslové úrovni dobře zavedené. Každý proces má své výhody, nevýhody a aplikace. Zásadní rozdíl je nejenom v typu reakce, ale také v podstatně rozdílných teplotách depozice.

U metody PVD je nanášený materiál extrahován přímo z cíle (targetu) ve formě páry, která prochází vakuem, nebo jiným plynným prostředím, a reaguje na povrch substrátu. Fyzicky lze materiál ze zdroje uvolnit odpařováním nebo naprašováním. Proces PVD se uskutečňuje při teplotách pod 500 °C, kdy nedochází k ovlivnění nízkoteplotních povlakovaných materiálů. Při depozici odpařováním se materiál v plynné fázi difunduje vakuem k substrátu. U metody elektrickým obloukem zajišťuje odpařování částic vznikající elektrický výboj. Při depozici naprašováním je materiál z cíle vymrštěn energií iontů a vzniklé atomy poté prostupují plazmatem na substrát. Další způsob depozice je iontové plátování, které kombinuje metodu odpařování a naprašování.

Charakterem CVD procesů je chemická reakce prekurzorů v komoře reaktoru, kde dochází k postupnému ukládání vzniklých produktů na povrch ohřátého substrátu. Transport prekurzorů do reakční komory zajišťují nosné plyny, které současně řídí celý proces depozice. Konvenční metody CVD prošly značnými úpravami, jež dovolily snížit teploty povlakování z 1200 °C až na teploty kolem 300 °C. CVD metody se liší způsobem podpory reakce, generováním plazmy nebo použitých prekurzorových a nosných plynů.
U konvenční CVD je reakce vyvolána vysokou teplotou, fotoasistované CVD podporuje reakci vysokofrekvenčním zářením a metody PCVD dosahují reakce působením plazmatu vytvořeném v elektromagnetickém poli. Generování plazmy lze uskutečnit mikrovlnným výbojem (MW-CVD), vysokofrekvenčním radiovým vlněním (RF-CVD), nebo pomocí oblouku (Arc-CVD). Metoda MO-CVD dovoluje rozklad kov-organických prekurzorů. Speciální metodou je depozice atomové vrstvy (ALD), při které dochází k chemické reakci a depozici vrstvy přímo na substrátu. Vhodnost každé depoziční metody závisí na typu substrátu a mechanických vlastnostech povlaku, který má být získán.

- Kvalita povlakovaných vrstev je ovlivněna mnoha faktory, jako mikrotvrdost, tloušťka, přilnavost, mikrostruktura, složení vrstev atd. K jejich zkoumání byly vytvořeny analytické techniky a postupy včetně matematických modelů. Mikrotvrdost vyjadřuje odpor vůči plastické deformaci a měření se provádí buď vnikací metodou s následnou analýzou vtisku tvarového indentoru, nebo pokročilou technikou instrumentované zkoušky vyšetřující závislost aplikovaného zatížení na hloubce průniku. Tloušťka povlaku ovlivňuje odolnost vůči opotřebení a její velikost je zkoumána především metodou kalotest. Přilnavost, neboli adheze, zajišťuje vzájemné spojení vrstvy se substrátem. Zkoušku adheze lze uskutečnit vnikací metodou (Mercedes test) nebo vrypovou zkouškou (Scratch test). Detekování mikrostruktury, morfologie a složení vrstev je možné mnoha technikami, například SEM, AFM, XPS, SIMS atd. Studium mechanických vlastností řezných nástrojů a jejich vliv na opotřebení během procesů obrábění vnímám jako výzvu budoucího výzkumu.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 HLAVNÍ CÍLE EXPERIMENTU

Cílem praktické části bakalářské práce byl výzkum mechanických vlastností řezných nástrojů blíže specifikovaný jako mikrotvrdost vrstev povlakovaných řezných nástrojů. Vzhledem k malým rozměrům tloušťky povlaku obvykle mezi 1 až 10 μm bylo nezbytné provést měření vtiskové tvrdosti instrumentovanou zkouškou. Předpokladem úspěchu bylo uvědomit si, že hloubka průniku indentoru musí být mnohonásobně menší něž tloušťka povlaku. Pro získání co nejpřesnějších výstupních hodnot bylo podstatné stanovit geometrii indentoru, zkušební zatížení, dobu rychlosti cyklu a minimální rozestupy mezi vtisky. Získaná data bylo dále nutné zpracovat, vyhodnotit a porovnat. Hodnoty mikrotvrdosti byly získány z indentační křivky Vickersovým indentorem a vyhodnoceny rovnicí podle Olivera a Pharra. Kromě mikrotvrdosti byly zjišťovány také hodnoty vtiskového modulu pružnosti. U každého vzorku bylo provedeno 30 měření v řadě. To znamená, že vzorky byly měřeny od vnějšího okraje, kde se vyskytuje ochranná vrstva povlaku do středu substrátu. Z tohoto důvodu lze předpokládat, že výsledky měření mohou být ovlivněny z velké části substrátem. Důležitým kritériem byl také výběr a postup přípravy testovaných vzorků na proces indentace metodou DSI. Měření byla aplikována na třech vzorcích, z nichž dva byly opatřeny jednovrstvým povlakem TiCN a AlTiN a jeden vícevrstvým povlakem TiCN+TiC+Al_2O3 uložené na slinutých karbidech.

Hlavní cíle praktické části bakalářské práce byly rozvrženy do šesti bodů:

- Specifikace a příprava vzorků
- Provedení experimentu
- Vyhodnocení výzkumu
- Porovnání výsledků měření
- Diskuze
- Závěr

8 SPECIFIKACE A PŘÍPRAVA VZORKŮ

8.1 Testované materiály

Jako testovací vzorky byly v této studii použity tři druhy povlakovaných řezných nástrojů ze slinutého karbidu. Všechny nástroje byly vyrobeny práškovou metalurgií s velmi jemnou strukturou zrna a opatřeny tenkou vrstvou povlaku. Každý z vybraných vzorků má své specifické vlastnosti, složení vrstvy a odlišné využití v obráběcích aplikacích.

8.1.1 Břitová destička Korloy

Prvním typem zkoumaného materiálu byla vyměnitelná břitová destička společnosti Korloy (obr. 42). Břitová destička je vyrobena ze slinutého karbidu s mikrozrnnou strukturou potaženou vícevrstvým povlakem, kterou udává jakost řezného materiálu s označením NC3120 (Příloha P I: 1). Vícevrstvý povlak TiCN+TiC+Al_2O_3 byl vytvořen technologií MT-CVD. Spodní vrstvu tvoří TiCN zejména pro svou výbornou přilnavost k substrátu. Současně vyniká vysokou odolností vůči opotřebení. Následuje mezivrstva TiC, která vykazuje nejvyšší tvrdost. Vrchní vrstva Al_2O_3 poskytuje tepelně stabilní bariéru. Výsledný povlak tedy kombinuje jak vlastnosti, tak tvrdost jednotlivých vrstev.
Geometrie břitové destičky nese označení WNMG080404 – HM, využívá se v procesech soustružení pro hrubé a střední opracování ocelových materiálů. Substrát ze slinutého karbidu patří do aplikační skupiny ISO – P25. Tvrdost prvků uvedených výrobcem jsou obsaženy v příloze (Příloha P I: 2).

Obr. 42 Vyměnitelné břitové destičky Korloy

8.1.2 Břitová destička Kyocera

Pro druhý proces měření byla použita vyměnitelná břitová destička výrobce Kyocera (obr. 43). Materiálem břitové destičky je slinutý karbid se superjemnou mikrostrukturou zrna. Na povrch substrátu byla nanesena tenká otěruvzdorná vrstva karbonitridu titanu (TiCN) aplikována metodou PVD. Tyto informace vyplývají z jakosti řezného materiálu specifikované jako PR930 (Příloha P II: 2). Geometrické parametry břitové destičky jsou označeny jako VBGT110304FN – Z. Jsou určeny pro dokončovací soustružnické operace materiálů s třídou obrobitelnosti ISO P20 a ISO M20, charakterizovány jako oceli a korozivzdorné oceli. Grafické znázornění v katalogu výrobce uvádí tvrdost této břitové destičky 30 GPa a tvrdost základního substrátu je charakterizována dokonce ve dvou hodnotách a to 16,7 GPa nebo 1700 HV (Příloha P II: 1, Příloha P II: 4).

Obr. 43 Vyměnitelné břitové destičky Kyocera

8.1.3 Stopková fréza YG-1

Posledním zkoumaným vzorkem byla stopková fréza V7 Plus od výrobce YG-1 (obr. 44). Materiál substrátu frézy je ultrajemný mikrostrukturální slinutý karbid. Povrch substrátu je opatřen tvrdou vrstvou PVD – AlTiN. Stopková fréza je určená pro frézování nízko až středně tvrdých materiálů, jejichž tvrdost nepřesahuje HRC 40 (Příloha P III: 2). Vhodnými obráběnými materiály jsou měkké a nerezové oceli nebo litiny, které označuje mezinárodní norma symboly ISO P, ISO M, ISO K. Tvrdost tohoto povlaku ani jednotlivých složek není v katalogovém listě výrobce uveden.

Obr. 44 Stopková válcová fréza YG-1

8.2 Vlastnosti nanesených vrstev

Povlaky na bázi TiC, TiN, TiCN nebo vícesložkové struktury jako TiAlN, AlTiN již prokázaly své mimořádné vlastnosti ochrany nástrojů. Větší flexibilitu v posledních letech přestavují vícevrstvé povlaky doslova ušité na míru.

8.2.1 TiN

Svého času byl nejčastěji ukládaným keramickým materiálem na řezných nástrojích. Poskytuje dobrou kombinaci tažnosti a tvrdosti, navíc s velmi dobrou odolností vůči opotřebení a korozi, což vede k prodloužení životnosti nástroje. Na řezné nástroje se nanáší buď samostatně (TiN), v kombinaci složek (AlTiN, TiAlN), nebo jako vícevrstvé povlaky (TiCN+Al_2O_3+TiN). Povlaky nitridu titanu lze jednoduše rozpoznat podle zlaté barvy povrchu. [15] [46]

8.2.2 TiC

Na rozdíl od TiN jsou mnohem tvrdší a odolnější vůči abrazivnímu opotřebení. Naopak tvrdost za tepla, chemická stabilita a odolnost proti oxidaci je mnohem nižší. Dnes je karbid titanu pouze součástí multivrstvých povlaků. [15] [46]

8.2.3 TiCN

Pro své vlastnosti je charakterizován jako univerzální povlak pro obrábění mnoha materiálů. Kombinace vlastností TiN a TiC přispívá k vyšší tvrdosti oproti vrstvě TiN. Současně prokazuje lepší adhezi k substrátu nežli vrstva TiC. Barevná škála vrstev TiCN od šedé, modrošedé, fialově šedé po měděnou odpovídá koncentraci prvků v povlaku. [15] [46]

8.2.4 AlTiN

Povrchová vrstva nitridu hliníku a titanu může obsahovat až 63 % hliníku v závislosti na aplikaci povlakování. S rostoucím obsahem hliníku se zvyšuje tvrdost vrstvy a odolnost proti oxidaci, které jsou mnohem vyšší než ve vrstvě TiN. Barevné odchylky vrstev opět korespondují se složením jednotlivých prvků v povlakované vrstvě AlTiN, které lze spatřit v odstínech tmavošedé, purpurově šedé, modročerné nebo černé. [15] [46]

8.2.5 Al_2O_3

Funkční vrstva oxidu hlinitého má řadu výhod. Podstatným benefitem je výborná tvrdost za tepla a nízká tepelná vodivost, chemická odolnost nebo odolnost proti oxidaci. Tyto vlastnosti zvyšují odolnost proti opotřebení při vysokých teplotách řezu. Oproti tomu je tvrdost při pokojových teplotách mnohem nižší. Složka Al_2O_3 může být součástí vícesložkových povlaků, jmenovitě AlTiN, TiAlN, TiAlSiN atd. Povlakovaná vrstva Al_2O_3 má typicky černou barvu. [15] [46]

8.2.6 Multivrstva TiCN+TiC+Al_2O_3

Metodou MT-CVD jsou vyráběny hladší vrstvy Al_2O_3. Kvůli nízké přilnavosti k substrátu je nanášen pouze s vrstvami pojiva. Většinou je pojivová vrstva TiCN, která stejně jako TiN a TiC poskytuje výbornou přilnavost k substrátu. TiCN a TiC zároveň zajišťují vysokou tvrdost pod křehkou vrstvou oxidu hlinitého. Vrstva Al_2O_3 se obvykle používá jako mezivrstva nebo horní vrstva Ti (C, N) ve vícevrstvých systémech povlaků. Jako mezivrstva se často vyskytuje v kombinaci s horní vrstvou TiN, která snadno odhalí opotřebení. [15] [46]

8.3 Příprava vzorků

Před zahájením instrumentované zkoušky byla provedena příprava povrchu vzorků. Vysoce hladký a čistý povrch je důležitým předpokladem k pečlivě provedené zkoušce.

Povrchy byly připraveny s ohledem na možnou změnu vlastností v důsledku nevhodných pracovních parametrů. Jednotlivé kroky přípravy byly rozděleny do tří kategorií: řezání, lisování a leštění. Takto připravené vzorky (obr. 45) byly podstoupeny k měření tvrdosti metodou DSI.

Obr. 45 Metalografické vzorky

8.3.1 Řezání

V prvním kroku přípravy bylo nutné vzorky uřezat na požadované rozměry a současně odstranit vrchní vrstvu povlakovaného nástroje. Byly použity šikmé řezy, které umožnily lépe pozorovat jednotlivé přechody mezi vrstvou povlaku a substrátem. Dělení materiálu bylo provedeno přesnou pilou Isomet 4000 společnosti Buehler s diamantovým řezným kotoučem. Optimální chlazení vzorků během procesu eliminoval vznik tepelného ovlivnění. Dělení materiálu probíhalo v následujícím režimu:

Otáčky diamantového kotouče – 1800 ot/min
Posuv kotouče – 16 mm/min

Obr. 46 Pila přesná Buhler/IsoMet 4000

8.3.2 Lisování

Lisováním bylo dosaženo zapouzdření vzorků do povrchu manipulačního materiálu. Zapouzdření usnadňuje manipulaci se vzorky, které jsou velmi malé a v následujícím kroku broušení a leštění umožní upnutí v kruhovém držáku brusky. Vzhledem k vysoké teplotě tání karbidových složek bylo použito lisování za tepla přístrojem SimpliMet 1000 výrobce Buehler. Postup přípravy zahrnoval umístění vzorku do lisovacího válce lisovacího zařízení, které bylo následně zaplněno granulátem fenolformaldehydové pryskyřice (PF). Teplota a tlak způsobil roztavení granulátu a zapouzdření vzorku. Po vychlazení byl vzorek připravený pro další operace broušení a leštění. Parametry procesu lisování byly zvoleny:

Materiál – fenolformaldehydová pryskyřice (PF)
Teplota polymerace – 150°C
Tlak – 290 bar
Doba cyklu – 1:30 min

Obr. 47 *Lisovací zařízení Buehler/SimpliMet 1000*

8.3.3 Leštění

Proces leštění je stejně důležitý jako samotné měření. Nízká kvalita povrchu negativně ovlivňuje výsledky zkoušek. Podstatou procesu bylo odstranění poškozené vrstvy materiálu následkem řezání. Jemné broušení i leštění bylo provedeno lehkým tlakem kotouče na povrch vzorku aby se zabránilo vytrhávání částic karbidů nebo zpevnění materiálu generovaným teplem. Nejdříve byly všechny vzorky usazeny do vícenásobného kruhového držáku a zajištěny pomocí nivelačního zařízení na stejnou výšku osazení. Tím se zajistilo rovnoměrné působení tlaku na povrch brousícího kotouče pro všechny vzorky současně. Případné deformace teplem byly potlačeny přívodem chladící kapaliny.

V prvních dvou krocích byl použit jemný brousící kotouč za asistence lapovací diamantové pasty, nejdříve se zrnitostí 9 μm a poté 3 μm. Následovalo konečné leštění

leštícím plátnem, přičemž už nedocházelo k úběru materiálu z povrchu vzorku. Každý proces leštění probíhal pod zatížením 25 N a rychlostí otáček kotouče 30 ot/min pro jemné broušení a 300 ot/min pro finální leštění. V konečné fázi bylo dosaženo vysoce hladkého povrchu bez defektů. Broušení bylo uskutečněno na brusce/leštičce AutoMet 250 od firmy Buehler. Poslední fáze přípravy byly prováděny v režimu:

Jemné broušení – brousící kotouč
Otáčky kotouče – 30 ot/min
Lapovací pasta – 9 µm, 3 µm
Přítlačná síla – 25 N
Leštění – leštící plátno
Otáčky plátna – 300 ot/min
Přítlačná síla – 25 N

Obr. 48 Leštička vzorků Buehler/AutoMet 250

9 ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ METODOUT DSI

Mikrotvrdost řezných nástrojů a vtiskový modul pružnosti byly hodnoceny pro každý vzorek zvlášť. Všechny nanoindentační testy byly provedeny metodou DSI na zařízení Micro – Combi Tester, švýcarské společnosti CSM Instruments podle ČSN EN ISO 14577. K měření mikrotvrdosti byl použit Vickersův čtyřstěnný diamantový indentor s vrcholovými úhly 136°. Měření všech vzorků bylo realizováno od vnějšího okraje ke středu vzorku v počtu třiceti opakování. Během měření byl přístroj připojen k počítači, který zaznamenával, ukládal a vyhodnocoval získaná data. Celá historie měření byla graficky zpracována do indentační křivky. Mikrotvrdost byla vyhodnocena metodou Olivera a Pharra, tedy z maximálního zatížení F_{max} a průmětné plochy vtisku A_p. Interval rozpětí naměřených hodnot byl stanoven ze souboru rovnic pro střední hodnotu, které odpovídají 95 % spolehlivosti za předpokladu, že jsou uvažovány pouze náhodné chyby. Aritmetický průměr, směrodatnou odchylku i rozpětí hodnot nejistoty měření interpretuje norma ČSN ISO 3534-1:2010. [47]

Aritmetický průměr naměřených hodnot byl odvozen ze vztahu:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{28}$$

Směrodatná odchylka byla určena z rovnice:

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \tag{29}$$

Výpočet nejistoty měření, jejíž hodnota určuje horní a dolní mez rozptylu aritmetického průměru byla realizována podle:

$$\sigma = \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{30}$$

kde: $\bar{x}$ – aritmetický průměr

n – počet pozorování

x_i – součet naměřených hodnot

s – směrodatná odchylka

σ – střední chyba nejistoty měření

Použité parametry pro zkoušky tvrdosti byly stanoveny:

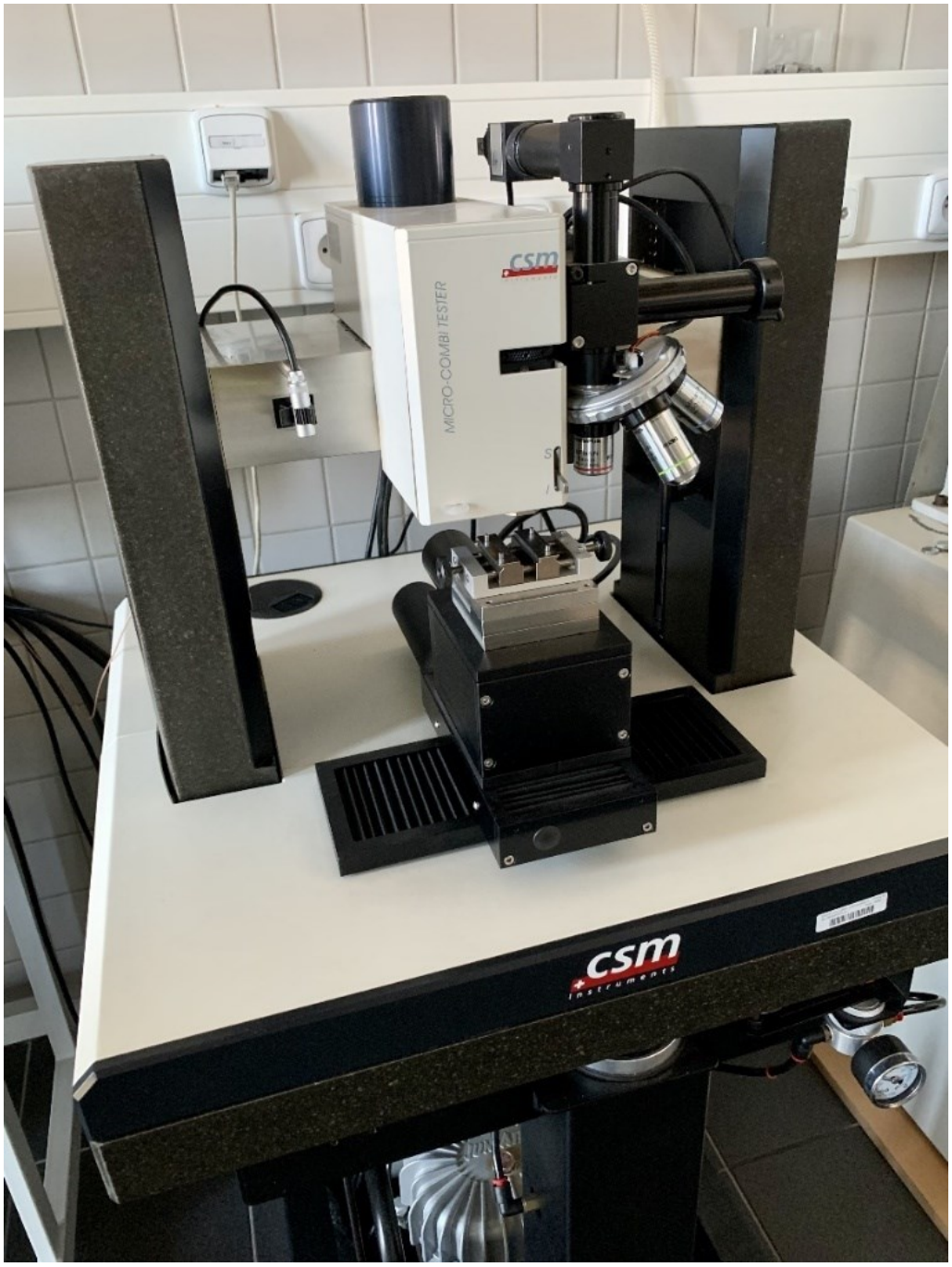
Počet měření – 30 opakování

Maximální zkušební zatížení – 0,5 N

Rychlost zatěžování – 1 N/min

Rychlost při odlehčení – 1 N/min

Doba cyklu – 12 s



Obr. 49 Zařízení Micro – Combi Tester

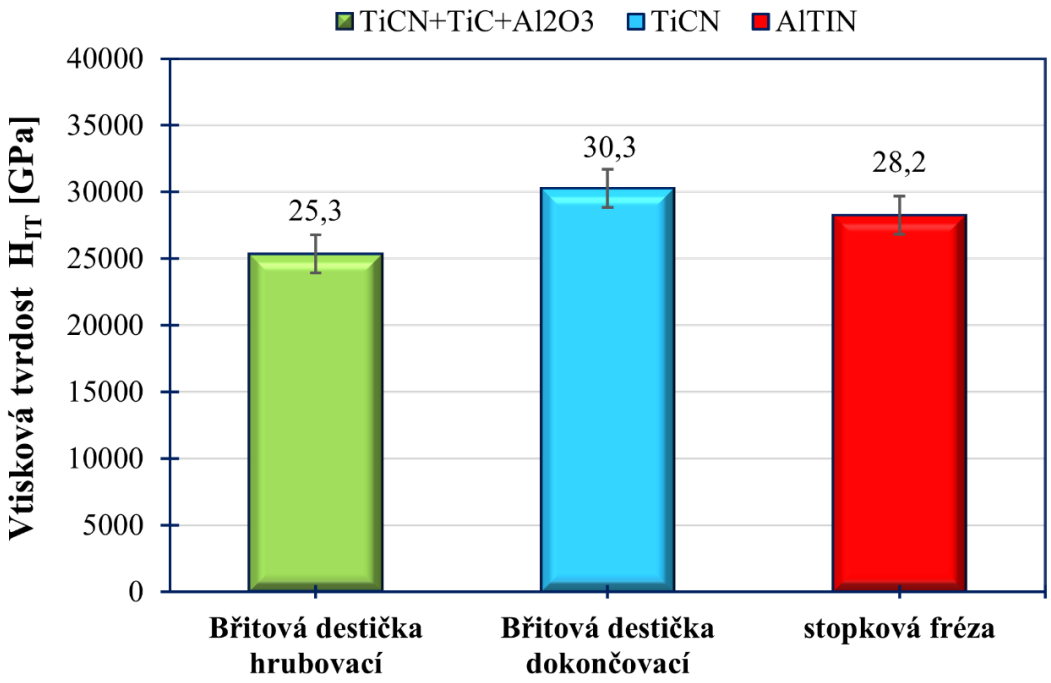
10 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Z počtu třiceti měřených vtisků byl vypočítán aritmetický průměr, jehož hodnota charakterizuje míru vtiskové tvrdosti H_{IT}, Vickersovy mikrotvrdosti HV_{IT} a vtiskového modulu pružnosti E_{IT} každého zkoumaného vzorku. Výsledky byly získány instrumentovanou zkouškou pro vrstvy TiCN, AlTiN a TiCN+TiC+Al_2O_3 uložené na substrátech ze slinutých karbidů. Výsledky měření mohou být negativně ovlivněny chybami, které jsou odrazem působení mnoha faktorů. Zahrnují vlivy způsobené měřícím přístrojem nebo vlastnostmi povrchu zkoumaných vzorků. U měřícího přístroje je ovlivnění dat způsobeno kolísáním teploty, stanovením bodu prvního vtisku, tuhostí přístroje nebo geometrií indentoru. Vlastnost povrchu testovaných vzorků výrazně ovlivňuje tvar vtisku, který souvisí s elasticko-plastickými deformacemi v okolí vtisku. Dalšími činiteli jsou vlivy velikosti vtisku zvané ISE (Indentation Size Effect), zbytková napětí a jakost připraveného povrchu testovaného materiálu nebo ovlivnění výsledků substrátem. Všechny tyto skutečnosti související s chybami měření jsou blíže specifikovány v literatuře [38]. Protože testování vzorků v této práci probíhalo od vnějšího okraje do středu lze očekávat, že výsledky mechanických vlastností tenkých vrstev budou ovlivněny především základním materiálem, neboli substrátem. Každá výsledná hodnota získaná průměrem z naměřených veličin je také zatížena rozptylem náhodných chyb, jejichž výsledek byl vygenerován pomocí rovnic v kapitole 9.

10.1 Analýza vtiskové tvrdosti H_{IT}

Vtisková tvrdost obecně vyjadřuje odolnost proti pronikání cizího tělesa, v tomto případě Vickersova indentoru do povrchu materiálu, jehož analýza poskytuje cenné informace o mechanických vlastnostech zkoumaných vzorků.

Obr. 50 graficky vyjadřuje průměrné hodnoty vtiskové tvrdosti H_{IT} vzorků získaných z testů nanoindentace při zatížení 0,5 N. Rychlost zatěžování a odlehčování byla stanovena na 1 N/min a celý cyklus trval 12 sekund.

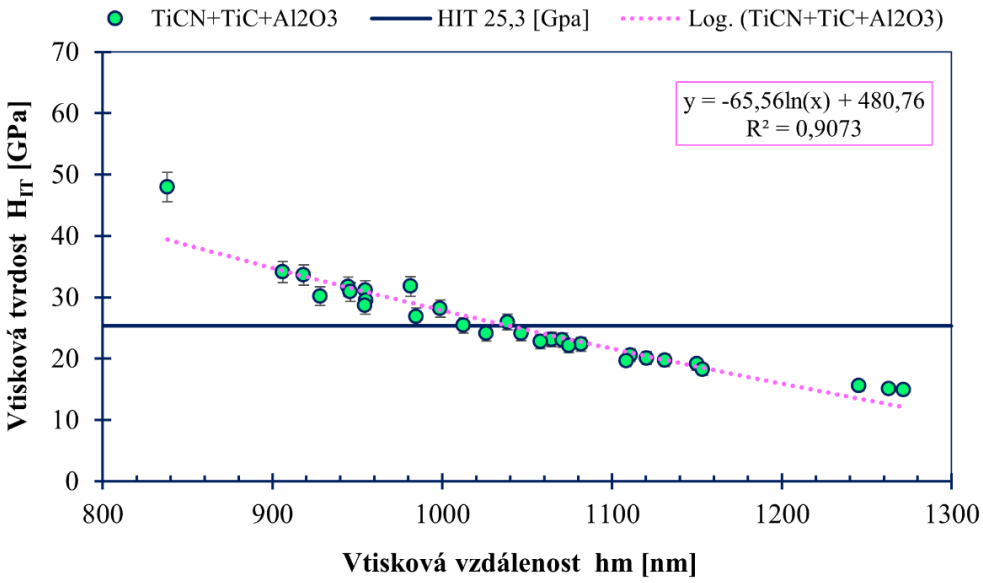


Obr. 50 Grafické znázornění vtiskové tvrdosti H_{IT} zkoumaných materiálů

Výsledky měření vtisku Vickersovým indentorem jasně ukazují převahu tvrdosti u břitové destičky Kyocera s povlakovanou vrstvou TiCN, přičemž její tvrdost dosahuje H_{IT} 0,5 = 30,3 ± 2,1 GPa. Druhým nejtvrdším nástrojem byla stopková fréza YG-1 s povlakem AlTiN a tvrdostí H_{IT} 0,5 = 28,2 ± 0,7 GPa. Nejmenší tvrdost H_{IT} 0,5 = 25,3 ± 1,3 GPa vykazuje břitová destička Korloy s vícevrstvým povlakem TiCN+TiC+Al_2O_3. Vícevrstvý povlak zaznamenal od nejtvrdší vrstvy TiCN největší pokles tvrdosti přibližně o 16,5 % a nástroj s povlakem AlTiN pouze o 6,9 %. Protože výrobce břitové destičky s povlakem TiCN uvádí tvrdost této vrstvy 30 GPa, lze konstatovat, že měření bylo provedeno bez vlivu substrátu. Stejně tak uvádí i tvrdost substrátu 16,7 GPa, z čehož vyplývá, že nanesením ochranné vrstvy TiCN se zvýšila tvrdost základního materiálu o 81,4 %. Absencemi informací nelze konstruktivně porovnat, jak se zjištěné hodnoty tvrdosti odlišují u zbylých dvou producentů řezných nástrojů.

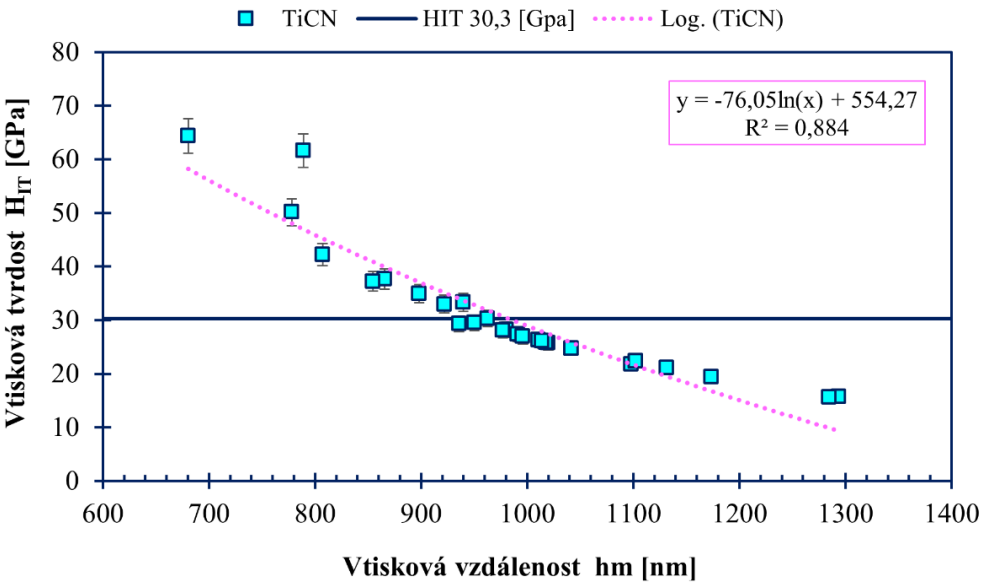
10.1.1 Analýza závislosti vtiskové tvrdosti H_{IT} na vzdálenosti vtisku hm

Bylo prokázáno, že tvrdost povlakovaných vrstev klesá s rostoucí hloubkou průniku. V našem případě se zkoumala mikrotvrdost vzorků z naměřených dat určených třiceti vtisky v různé vzdálenosti od okraje. Jak se výsledky tvrdosti pohybovaly kolem průměrných hodnot a v závislosti na délkových odstupech od krajního bodu, lze demonstrovat grafy vytvořenými níže.



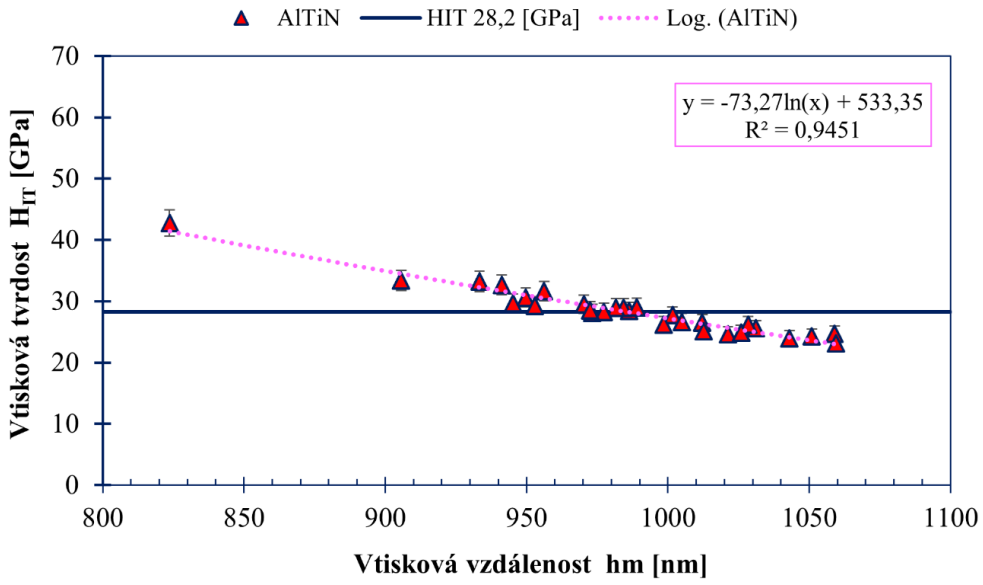
Obr. 51 Závislost vtiskové tvrdosti na vzdálenosti vtisku pro břitovou destičku Korloy

Křivky závislosti na obr. 51 vyznačují velikosti zjištěných vtiskových tvrdostí v průběhu měření a každý její bod je funkcí vzdálenosti vtisku. Je zřejmé, že největší hodnota tvrdosti byla zaznamenána při prvním vtisku a v nejkratší vzdálenosti od vnějšího okraje. Následně v dalším bodě tvrdost prudce klesá a poté tento klesající trend pozvolna pokračuje s rostoucí vzdáleností vtisku. Maximální naměřená tvrdost 48 GPa je ve vzdálenosti 838 nm. Nejmenší tvrdost 14,9 GPa byla změřena ve vzdálenosti 1272 nm. Plná čára ukazuje průměrnou hodnotu vtiskové tvrdosti H_{IT} 0,5 = 25,3 GPa, které se nejvíce přibližuje bod vzdálený 1013 nm od okraje. Míra spolehlivosti určená koeficientem determinace R^2 je přibližně 90,7 %



Obr. 52 Závislost vtiskové tvrdosti na vzdálenosti vtisku pro břitovou destičku Kyocera

Modré body v grafu na obr. 52 představují rozptyl naměřených tvrdostí okolo průměrné hodnoty vtiskové tvrdosti H_{IT} 0,5 = 30,3 GPa, vyznačené plnou lineární čarou. Opět, jako v předchozím případě, je dosažena největší tvrdost 64,3 GPa v prvním bodě vtisku vzdáleném 680 nm od okraje, který byl stanoven jako nejbližší výchozí bod. Nejmenší naměřená hodnota tvrdosti 15,7 GPa byla ve vzdálenosti 1294 nm. Vzhledem k velkému rozptylu okolo regresivní logaritmické křivky je chování vtiskové tvrdosti vysvětleno pouze z 88,4 %.



Obr. 53 Závislost vtiskové tvrdosti na vzdálenosti vtisku pro stopkovou frézu YG-1

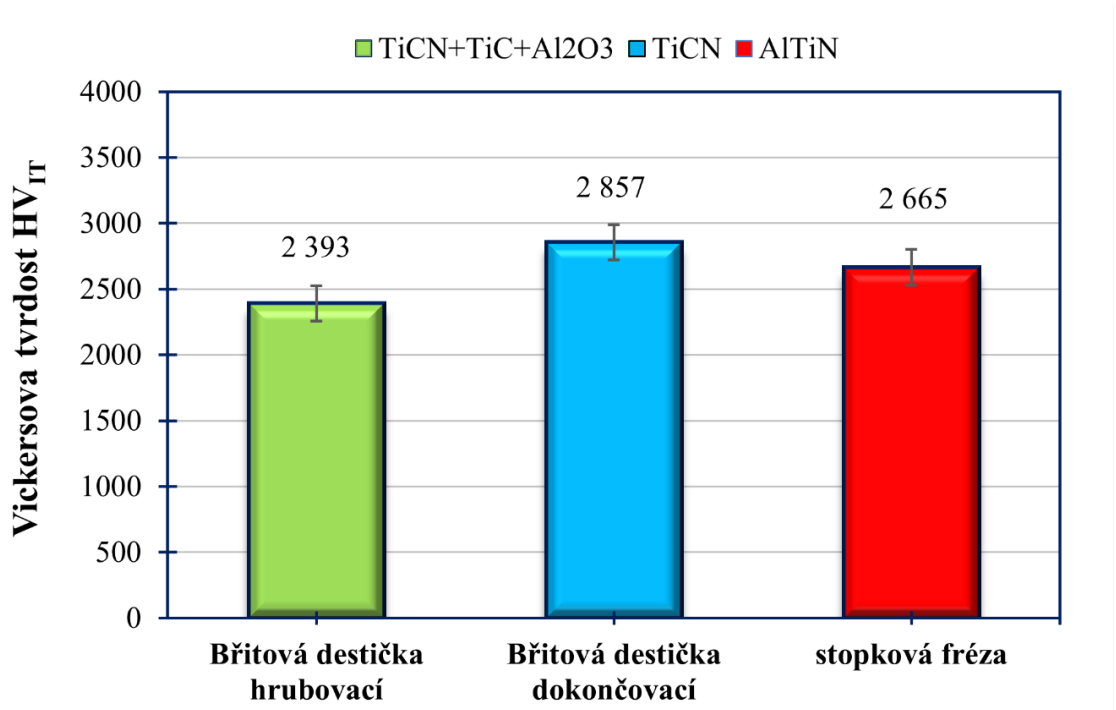
Na rozdíl od předchozích závislostí je u stopkové frézy (obr. 53) zaznamenána menší odezva tvrdosti kolem průměrné hodnoty i regresivní logaritmické křivky. Výsledky tak určují 94,5 % spolehlivost. Největší tvrdost 42,8 GPa je stejně jako v předchozích případech naměřena v nejkratší stanovené vzdálenosti, a to 824 nm. Poslední bod odpovídá nejmenší tvrdosti 23,1 GPa v maximální vzdálenosti 1059 nm a znamená pokles tvrdosti o 46 %. Nejblíže k průměrné vypočítané hodnotě vtiskové tvrdosti H_{IT} 0,5 = 28,2 GPa je bod vzdálený 977 nm.

10.2 Analýza Vickersovy mikrotvrdosti HV_{IT}

Testování mikrotvrdosti Vickersovým indentorem byl proveden stejně jako v případě vtiskové tvrdosti, tedy z maximálního zatížení a hloubky vtisku s přesnou geometrií indentoru, přičemž přístroj zaznamenával okamžitou změnu hloubky a zatížení. Proces měření byl uskutečněn při zatížení 0,5 N a při rychlosti zatěžování/odlehčování 1 N/min

s dobou cyklu 12 sekund. Použité zkušební zatížení 0,5 N odpovídá podle normy ČSN EN ISO 6507-1:2018 Vickersově stupnice $HV_{0,05}$.

Průměrné hodnoty Vickersovy mikrotvrdosti získané metodou DSI jsou prezentovány na obr. 54.



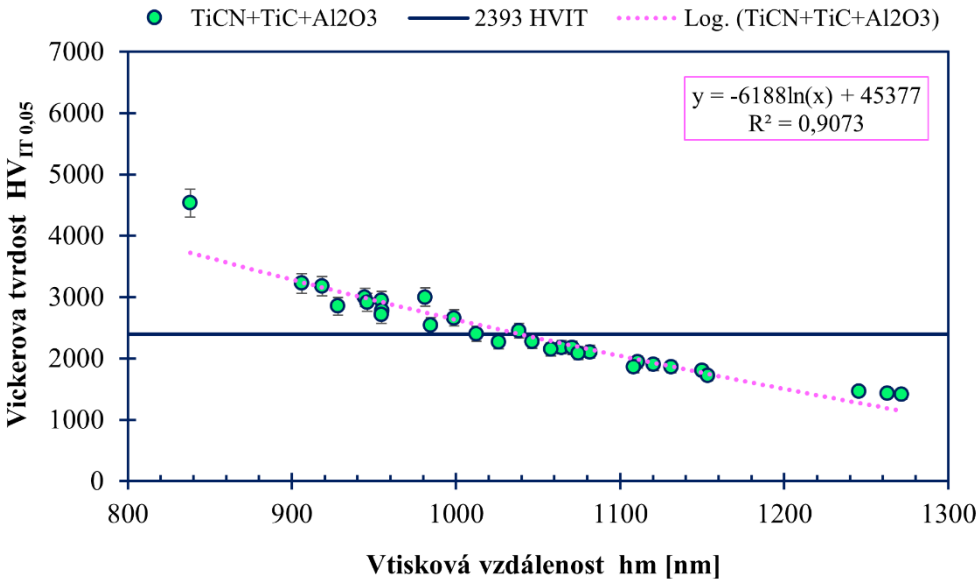
Obr. 54 Grafické znázornění Vickersovy mikrotvrdosti HV_{IT} zkoumaných materiálů

Největší tvrdost je opět pozorována u vrstvy TiCN deponované metodou PVD na povrch vyměnitelné břitové destičky Kyocera. Tvrdost této destičky dosahuje 2857 ± 199 $HV_{IT0,05}$. U stopkové frézy s PVD vrstvou AlTiN od výrobce YG-1 a tvrdostí 2665 ± 68 $HV_{IT\ 0,05}$ byl zaznamenán pokles tvrdosti o 6,7 % vůči TiCN. Vyměnitelná břitová destička Korloy s MT-CVD vícevrstvým povlakem TiCN+TiC+Al_2O_3 skončila na třetím místě s tvrdostí 2393 ± 121 $HV_{IT\ 0,05}$, a znamenala pokles dokonce o 9,9 %. V případě vrstvy TiCN je výrobcem stanovena tvrdost substrátu 1700 HV, proto lze potvrdit, že nanesením ochranné vrstvy se podařilo efektivně zvýšit tvrdost základního materiálu o 59,5 %. V případě vícevrstvého povlaku se katalogové hodnoty tvrdosti jednotlivých prvků dané výrobcem pohybují od 3000 HV pro prvek Al2O3 a 3200 HV prvku TiC. Způsob zjištění těchto hodnot ovšem není blíže specifikován jak z hlediska parametrů při měření (maximální zkušební zatížení), tak materiálu (sypká směs, povlak). Naměřená hodnota byla v našem případě o 22 % nižší. Výrobce břitové destičky s vrstvou AlTiN neposkytuje žádné informace k této vrstvě.

10.2.1 Analýza závislosti Vickersovy tvrdosti HV_{IT} na vzdálenosti vtisku hm

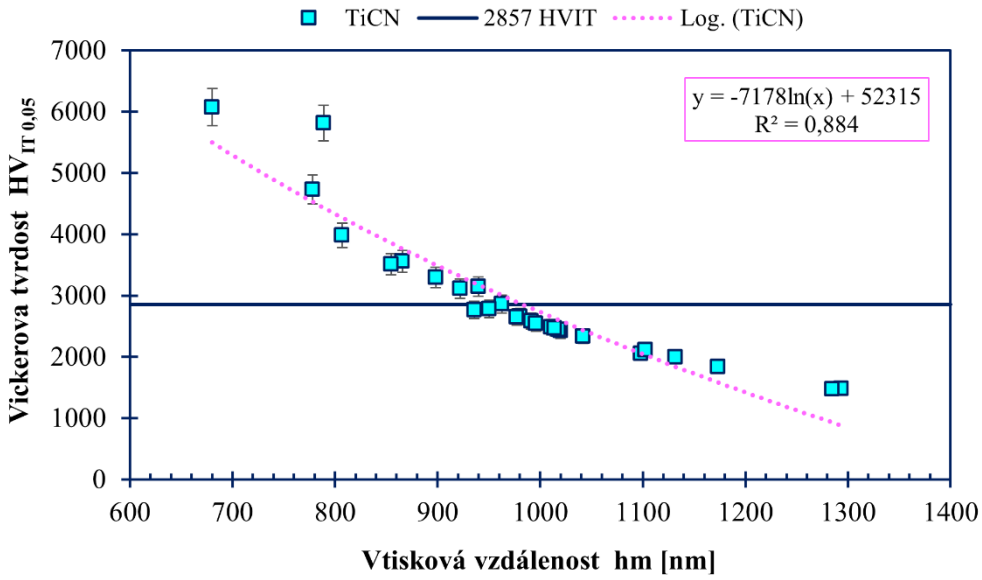
Modely vzájemné závislosti předkládány grafy níže jsou užitečným ukazatelem ztráty tvrdosti v průběhu měnícího se místa vtisku. Každý vtisk je v grafu vyznačen bod po bodu tvrdostí povlaku určující vzdálenost, při níž byla daná hodnota tvrdosti naměřena. V případě znalosti tloušťky vrstev povlaku by bylo možné přesně určit, ve kterém bodě již dochází k ovlivnění výsledků substrátem. Ve vícevrstvém systému by informace o tloušťkách vrstev navíc umožnily propojit vzdálenost bodu s typem vrstvy.

Obr. 55 znázorňuje vzájemnou závislost Vickersovy tvrdosti a vzdálenosti kolem střední průměrné hodnoty HV_{IT} v cyklu třiceti měření.



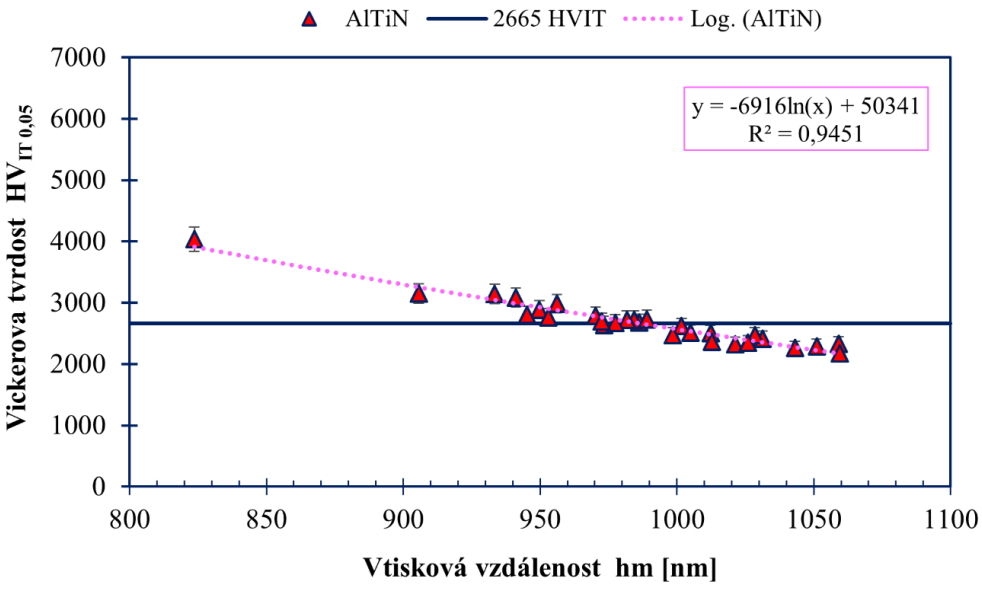
Obr. 55 Závislost Vickersovy tvrdosti na vzdálenosti vtisku pro břitovou destičku Korloy

Prvním vtiskem ve vzdálenosti 838 nm dosahovala tvrdost složené vrstvy TiCN+TiC+Al_2O_3 hodnotu 4529 $HV_{IT\ 0,05}$. Klesající tendence ztráty tvrdosti je přerušena v několika místech a taková situace chování může mít mnoho důvodů. Nejpravděpodobnější varianta je změna vrstvy povlaku ve vícevrstvém systému. Nejmenší hodnota tvrdosti 1410 $HV_{IT\ 0,05}$ byla naměřena v posledním bodě v nejdelším intervalu vzdálenosti vtisku 1272 nm. Průměrné střední hodnotě 2393 $HV_{IT\ 0,05}$ nejvíce odpovídá bod vzdálený od okraje 1013 nm. Míra spolehlivosti dosahuje přibližně 90,7 % jako v případě vtiskové tvrdosti H_{IT} stejného vzorku (obr. 51).



Obr. 56 Závislost Vickersovy tvrdosti na vzdálenosti pro břitovou destičku Kyocera

Největší tvrdost 6073 $HV_{IT\ 0,05}$ je opět zjištěna v prvním bodě dotyku s odstupem 680 nm od kraje (obr. 56). Průměrné střední hodnotě 2857 $HV_{IT\ 0,05}$ je nejblíže bod vzdálený 963 nm a v nejdelší vtiskové vzdálenosti 1294 nm byla naměřena tvrdost 1479 $HV_{IT\ 0,05}$. Chování tvrdosti stanovené regresivní křivkou je vysvětleno pouze z 88,4 %.



Obr. 57 Závislost Vickersovy tvrdosti na vzdálenosti pro stopkovou frézu YG-1

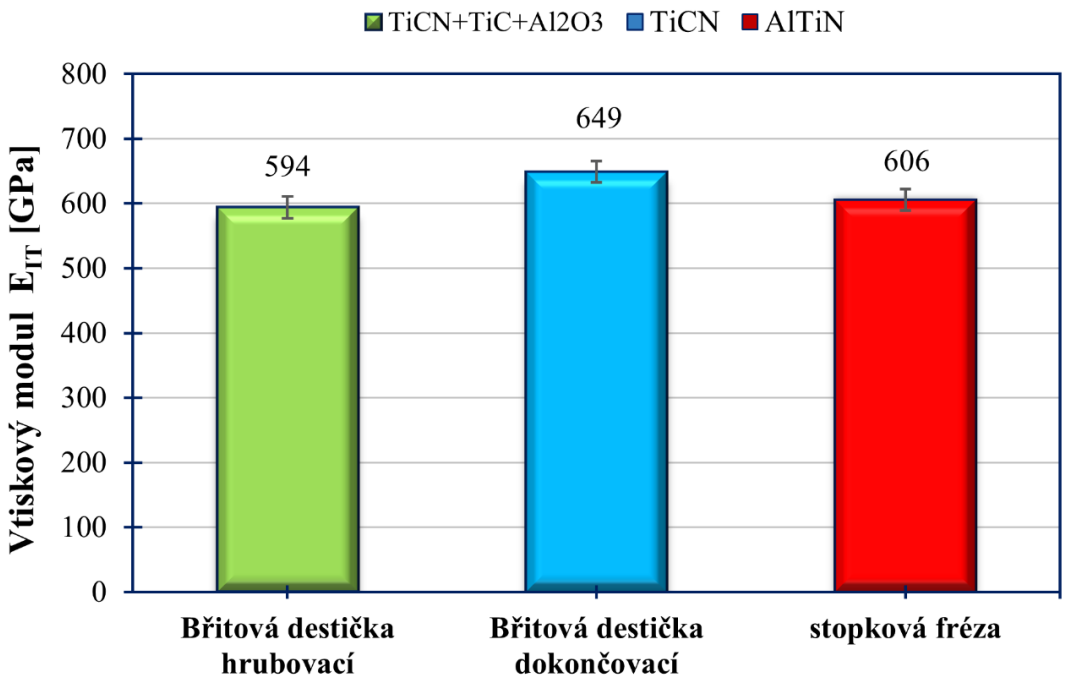
Rozpětí bodů Vickersovy tvrdosti stopkové frézy na obr. 57 se nachází nejblíže jeho průměrné střední hodnotě 2665 $HV_{0,05}$. V místě prvního dotyku 824 nm se opět nachází největší změřená hodnota Vickersovy tvrdosti o velikosti 4036 $HV_{0,05}$. V dalším bodě je pak pozorován prudký pokles o 897 $HV_{0,05}$ a poté již dochází k velmi pozvolnému poklesu

tvrdosti s rostoucí vzdáleností vtisku. Nejmenší hodnota Vickersovy tvrdosti 2179 $HV_{0,05}$ byla naměřena v posledním bodě, který odpovídá nejvzdálenějšímu místu vtisku 1059 nm. Míra spolehlivosti určená logaritmickou regresivní křivkou je 94,5 %

10.3 Analýza vtiskového modulu pružnosti E_{IT}

Při instrumentované zkoušce lze z křivek zatížení a odlehčení získat mnoho prospěšných dat, kterými lze analyzovat velké množství mechanických vlastností materiálů. Jednou z takových vlastností je i vtiskový modul E_{IT}, určený ze směrnice tečny vztažené k počáteční fázi odlehčovacího cyklu. Hodnoty vtiskového modulu E_{IT} sledují elastickou odezvu materiálu, tudíž souvisí s jeho pružnými vlastnostmi.

Na obr. 58 jsou zobrazeny průměrné hodnoty vtiskového modulu E_{IT} jednotlivých vzorků, získané za stejných podmínek jako při měření vtiskové tvrdosti H_{IT} a Vickersovy tvrdosti HV_{IT}. To znamená, že každý vzorek byl zatěžován třiceti vtisky silou 0,5 N ve 12 sekundovém cyklu s rychlostí zatěžování a odlehčování 1 N/min. Výsledky získané průměrem třiceti vtisků jsou uvedeny s odchylkou charakterizující horní a dolní mez náhodné chyby měření.



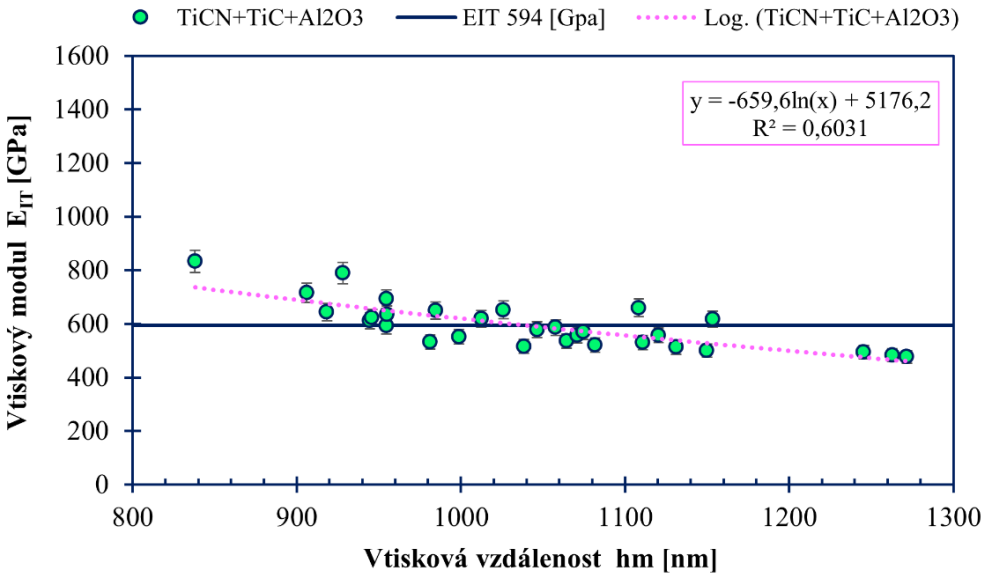
Obr. 58 Grafické znázornění vtiskového modulu E_{IT} zkoumaných vzorků

U břitové dokončovací destičky Kyocera s povlakem TiCN byla vypočítána nejvyšší hodnota vtiskového modulu, a to E_{IT} 0,5 = 649 ± 39. O 6,6 % menší výsledek vtiskového modulu byl zjištěn u povlakované stopkové frézy s vrstvou AlTiN, jejíž velikost byla E_{IT}

0,5 = 606 ± 11. Nejmenší vtiskový modul byl pozorován u břitové dokončovací destičky Korloy s vícevrstvým povlakem TiCN+TiC+Al_2O_3. Dosažená hodnota vtiskového modulu E_{IT} 0,5 = 594 ± 16 byla o 8,5 % nižší než u vrstvy TiCN.

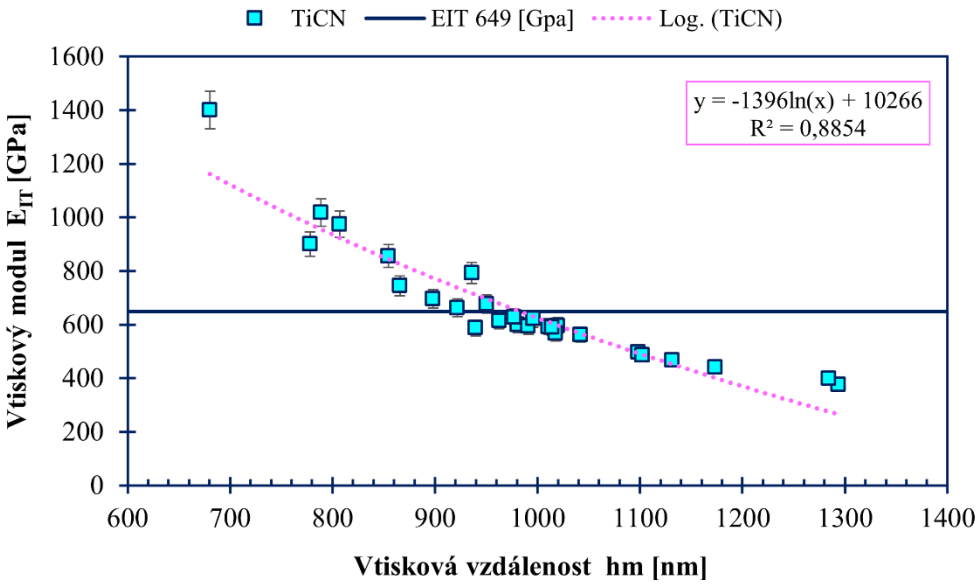
10.3.1 Analýza závislosti vtiskového modulu E_{IT} na vzdálenosti vtisku hm

Mapování závislosti vtiskového modulu v různých vzdálenostech od okraje vzorku ukazuje pružné chování materiálu v místě tohoto vtisku. Grafická znázornění vyobrazená níže obsahují barevně vyznačené body charakterizující typ vzorku analyzovaného vtiskového modulu. Grafy jsou dále proloženy regresivní logaritmickou křivkou, která stanovuje míru spolehlivosti predikovaných dat a lineární čarou charakterizující vypočítanou velikost vtiskového modulu E_{IT} pro zkoumaný typ nástroje.



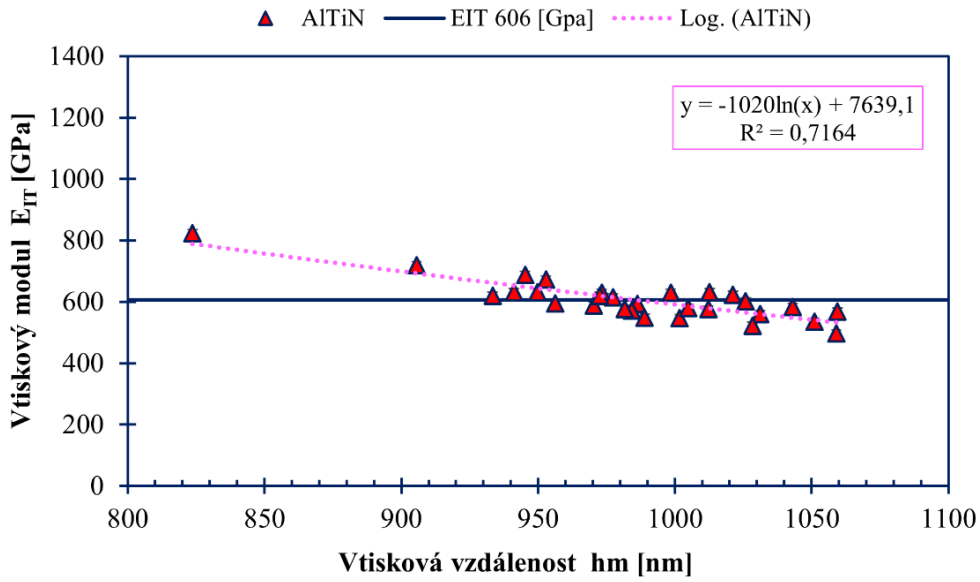
Obr. 59 Závislost vtiskového modulu na vzdálenostech vtisku pro břitovou destičku Korloy

V místě prvního dotyku (obr. 59) vzdáleného 838 nm od okraje je naměřen nejvyšší vtiskový modul E_{IT} o velikosti 832 GPa. Elastická odezva povlaku v průběhu zkoušky nepravidelně klesá k nejnižší změřené hodnotě 617 GPa vzdálené 1153 nm od okraje. Nepravidelnost je s největší pravděpodobností způsobena mikrostrukturou a hustotou jednotlivých vrstev. Dále musí být uvažováno, že výsledky byly na celém intervalu extrahovány z maximálního zatížení a hloubky průniku. A protože hloubka průniku není v této práci blíže specifikována je zřejmé, že výsledek každého vtisku je hloubkou přímo ovlivněn. Vtiskový modul během série měření vykazoval pokles o 355 GPa na intervalu 434 nm. Rozptyl kolem regresivní křivky určuje míru spolehlivosti pouze 60,3 %.



Obr. 60 Závislost vtiskového modulu na vzdálenosti vtisku pro břitovou destičku Kyocera

Obr. 60 popisuje chování vtiskového modulu jako funkce vzdálenosti u břitové destičky s povlakem TiCN. Největší vtiskový modul 1400 GPa byl zjištěn v prvním vtisku vzdáleném od okraje 680 nm. Nejvzdálenější bod 1294 nm vykazoval nejnižší modul pružnosti 377 GPa. Při rozdílu vtiskové vzdálenosti 613 nm došlo k celkovému poklesu modulu o 1023 GPa. Velký rozptyl bodů kolem střední hodnoty E_{IT} 0,05 = 649 GPa je popsán regresivní logaritmickou křivkou určující míru spolehlivosti predikovaných dat 88,5 %.



Obr. 61 Závislost vtiskového modulu na vzdálenosti vtisku pro frézu YG-1

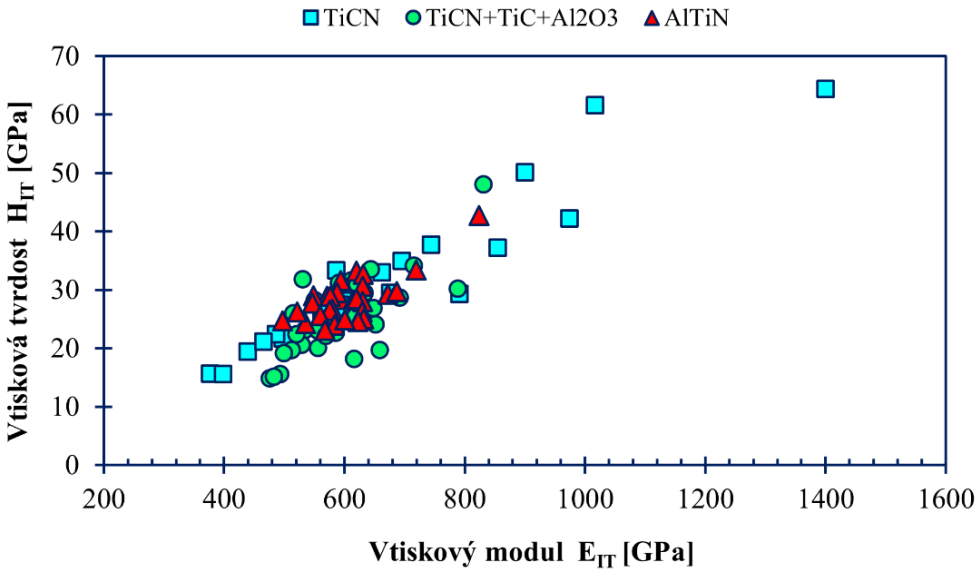
V prvním a posledním bodě vzdáleném 824 a 1059 nm byly zjištěny velikosti 824 a 497 GPa, charakterizující nejvyšší a nejnižší hodnoty vtiskového modulu. Typicky klesající

trend směrem do středu vzorku popisuje logaritmická křivka s mírou spolehlivosti 71,6 %. Rozptyl a nepravidelný pokles bodů kolem střední hodnoty E_{IT} 0,05 = 606 lze s největší pravděpodobností přičíst vlivům hloubky vtisku.

10.4 Predikce opotřebení a plastické deformace poměry H/E a H^3/E^2

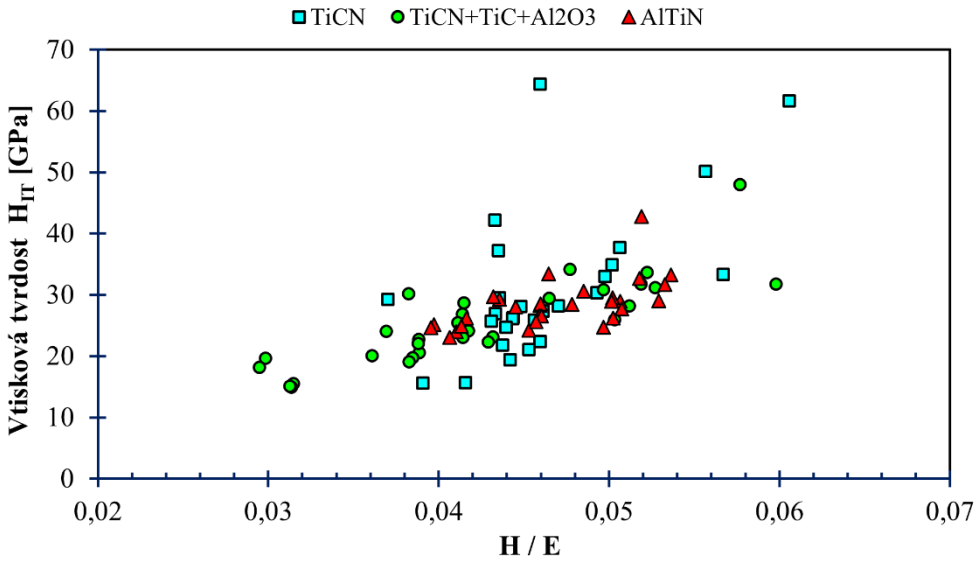
Poměr veličin H/E a H^3/E^2 je vnímán jako spolehlivý ukazatel odolnosti v tribologických operacích. Poměr H/E souvisí s elastickým chováním vrstev povlaku ve smyslu pružného namáhání vedoucímu k selhání. Parametr H^3/E^2 poskytuje informaci o odolnosti vůči plastické deformaci. Popis vlastností nanesených vrstev poměrem H vůči E vykazuje určitou hodnotu. Obecně platí, že s rostoucí tvrdostí se zvyšuje modul pružnosti. Vysoká hodnota H/E i H^3/E^2 s ohledem na vysokou tvrdost a nízký modul pružnosti poskytuje lepší schopnost odolnosti povlaku v obráběcích aplikacích. Proto je snaha vyvíjet povlaky s nízkým modulem pružnosti, který by se hodnotou přibližoval základnímu substrátu při zachování nebo zvýšení tvrdosti nanášených vrstev. Dále bylo prokázáno, že při H/E < 0,1 dochází k tvorbě trhlin, zatímco při H/E > 0,1 nikoliv. Výhodou modelů H/E a H^3/E^2 je snadnost získání těchto hodnot pomocí instrumentované zkoušky měřenými veličinami H a E. Přestože poměry H/E a H^3/E^2 mohou být u některých keramických povlaků dobrým odhadem houževnatosti, obecně ale nejsou jako zástupné hodnoty houževnatosti použitelné. [48] [49]

Na obr. 62 obr. 63 obr. 64 jsou prezentovány typické vztahy mezi tvrdostí H a modulem pružnosti E a poměry H/E a H3/E2.



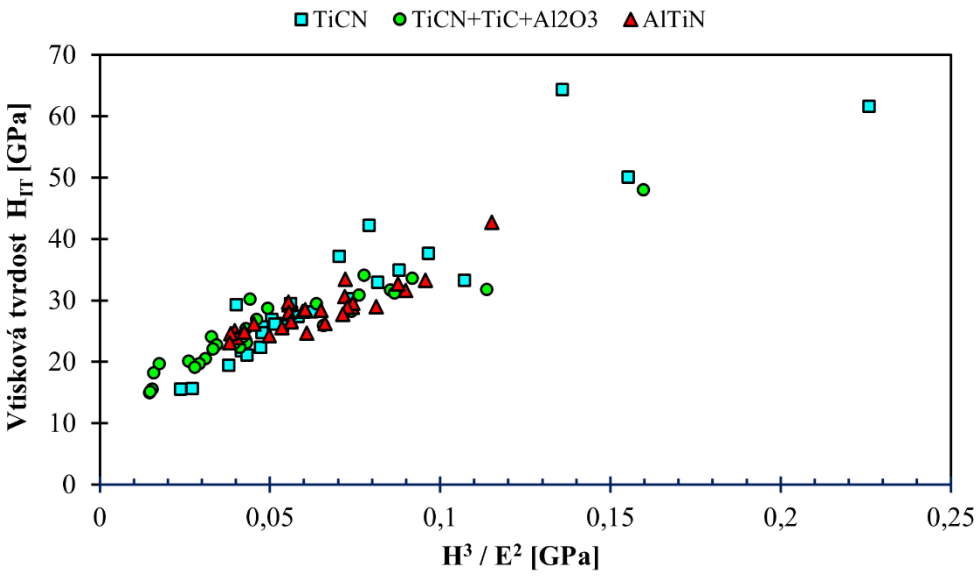
Obr. 62 Závislost vtiskové tvrdosti na vtiskovém modulu

Porovnání vtiskové tvrdosti jako funkce vtiskového modulu znázorněném na obr. 62 prokazuje typické chování vtiskového modulu, který se zvyšuje s rostoucí tvrdostí u všech zkoumaných vrstev.



Obr. 63 Závislost vtiskové tvrdosti na poměru H/E

Z naměřených veličin H a E byly jednoduchým výpočtem zjištěny hodnoty H/E na celém intervalu měření a následně zprůměrovány. Závislost vtiskové tvrdosti na parametru H/E je vyobrazen na obr. 63. Výsledky H/E by měly být ukazatelem elastické odolnosti při styku nástroje s povrchem. Průměrné hodnoty H/E o velikosti 0,042, 0,046 a 0,047 byly stanoveny u vrstev v tomto pořadí pro TiCN+TiC+Al2O3, TiCN a AlTiN. Z výsledků je zřejmé, že nejlépe skončily vrstvy AlTiN a TiCN, ale hodnoty se nijak výrazně neliší. To však nedokazuje zvýšenou odolnost proti poškození povlaku. Naopak podle studií zahrnutých v [49] bylo prokázáno, že hodnoty s poměrem H/E nižším než 0,1 vykazovaly praskání neboli tvorbu trhlin ve vrstvě povlaku.



Obr. 64 Závislost vtiskové tvrdosti na H^3/E^2

Obr. 64 ukazuje vzájemný vztah mezi tvrdostí a parametrem H^3/E^2 související s odolností proti plastické deformaci. Hodnoty H^3/E^2 byly získány průměrem na celém intervalu H a E a jejich velikost je pro vrstvy TiCN+TiC+Al2O3 = 0,054, TiCN = 0,068 a AlTiN = 0,063. Větší odolnost bude pozorována u vzorků s vyšším poměrem H^3/E^2, která je v tomto případě zjištěna u vrstvy TiCN.

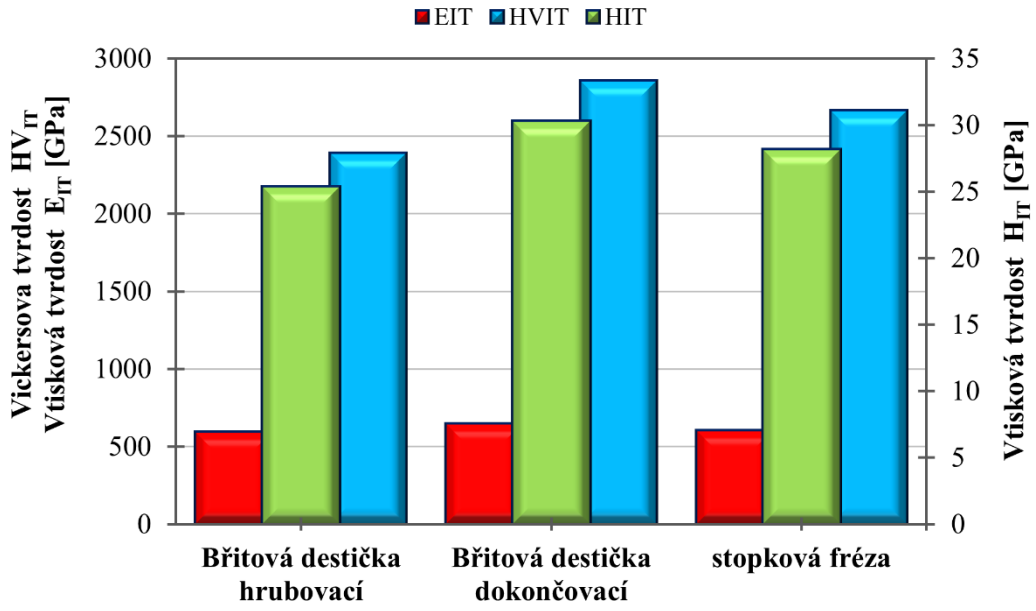
11 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Z analýzy mechanických vlastností tenkých vrstev byly stanoveny hodnoty pro vtiskovou tvrdost H_{IT}, Vickersovu tvrdost HV_{IT} a vtiskový modul pružnosti E_{IT}. Výsledky obsažené v (tabulka 6) charakterizují průměrnou střední hodnotu získanou z třiceti vtisků analyzovaných jako funkce vtiskové vzdálenosti. Pro každou střední hodnotu byla vypočítána směrodatná odchylka, která určuje přesnost naměřených hodnot.

Tabulka 6 Výsledné hodnoty zkoumaných vzorků

Vzorek	Vtisková tvrdost H_{IT} [GPa]	Vickersova tvrdost HV_{IT}	Vtiskový modul E_{IT} [GPa]	H/E [–]	H^3/E^2 [GPa]
CVD – TiCN +TiC+Al_2O_3	25,3 ± 1,3	2393 ± 121	594 ± 16	0,042	0,051
PVD – TiCN	30,3 ± 2,1	2857 ± 199	649 ± 39	0,046	0,068
PVD – AlTiN	28,2 ± 0,7	2665 ± 68	606 ± 11	0,047	0,063

Výsledky mechanických vlastností jasně ukazují převahu tvrdosti i vtiskového modulu u břitové destičky Korloy s PVD povlakem TiCN. Druhým nástrojem s nejlepšími výsledky byla stopková fréza YG-1 s povlakem PVD – AlTiN. Nejmenší tvrdost a vtiskový modul vykazuje břitová destička Kyocera s CVD vícevrstvým povlakem TiCN+TiC+Al_2O_3. Přesnost měření získaná ze zaznamenaných dat udává chybovou odchylku 1 až 7 %. Výsledky jsou znázorněny v grafu na obr. 65 pro všechny vzorky a zkoumané veličiny.



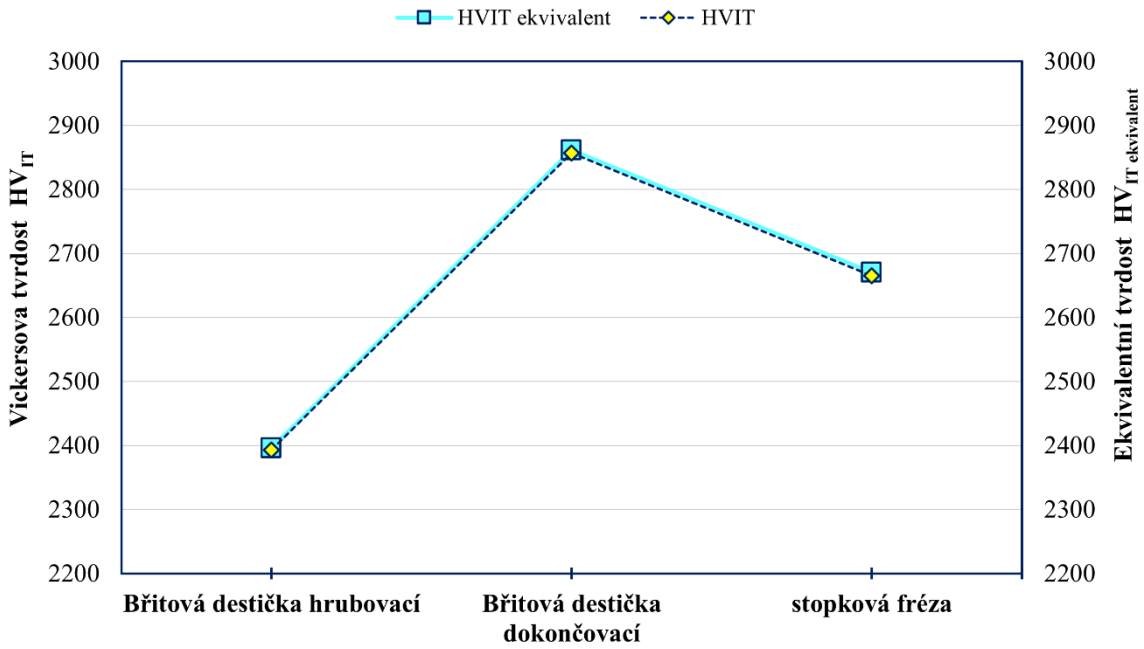
Obr. 65 Grafické porovnání výsledků mechanických zkoušek

11.1 Ekvivalentní Vickersova tvrdost $HV_{IT\ ekvivalent}$

Pro kontrolu výsledků byl použit vzorec pro přepočet vtiskové tvrdosti H_{IT} na ekvivalentní Vickersovu tvrdost $HV_{ITekvivalent}$ podle ČSN EN ISO 14577, který charakterizuje pouze informativní srovnání a nelze jím kompenzovat samotné měření. Ekvivalentní tvrdost HV_{IT} je prostřednictvím poměrného faktoru pro Vickersův indentor vyjádřena jako: [37]

$$HV = 94{,}53\ H_{IT} \tag{31}$$

Výpočtem z uvedené rovnice byla zjištěna ekvivalentní tvrdost 2396 $HV_{ITekvivalent}$ u CVD vícevrstvého povlaku. Pro vrstvy PVD – TiCN a AlTiN byly přepočtem získány hodnoty 2861 $HV_{ITekvivalent}$ a 2670 $HV_{ITekvivalent}$. Grafické srovnání Vickersovy a ekvivalentní tvrdosti je zaznamenáno na obr. 66. Body ekvivalentní tvrdosti jsou v grafu označeny modrými čtverci spojenými plnou čarou a body Vickersovy tvrdosti charakterizují žluté kosočtverce spojené přerušovanou čarou.

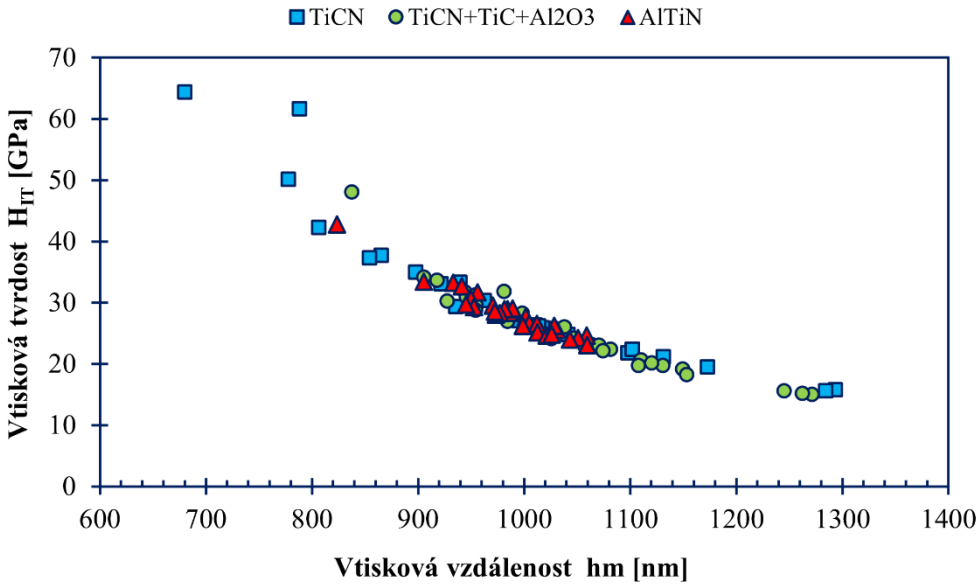


Obr. 66 Porovnání Vickersovy tvrdosti a převedené vtiskové tvrdosti na ekvivalentní

U převedené vtiskové tvrdosti $HV_{IT\ ekvivalent}$ je pozorován stejný trend jako u Vickersovy tvrdosti HV_{IT}. Ekvivalentní tvrdost je u všech vzorků nepatrně vyšší v rozmezí o 3 – 5 HV_{IT}. Přesnost převedených výsledků je spojena s dokonalou geometrií hrotu tvarového indentoru, která se ovšem při malých hloubkách vtisku prakticky nezachová. Proto jsou přepočtené hodnoty v určité míře odlišné.

11.2 Vtisková tvrdost H_{IT}

Výsledky vtiskové tvrdosti získané instrumentovanou zkouškou, jejichž velikosti řazené od nejvyšší po nejnižší hodnoty v následujícím pořadí byly u vrstvy TiCN – H_{IT} 0,5 = 30,3 ± 21 GPa, AlTiN – H_{IT} 0,5 = 28,2 ± 0,7 GPa a TiCN+TiC+Al_2O_3 – H_{IT} 0,5 = 25,3 ± 1,3 GPa. Rozptyl nejistoty měření vyjádřený v procentech byl v tomto pořadí 6,9 %, 2,5 % a 5,1 %. Grafickým vyjádřením na obr. 67 lze porovnat chování vtiskové tvrdosti jednotlivých vzorků v průběhu měnící se vzdálenosti.

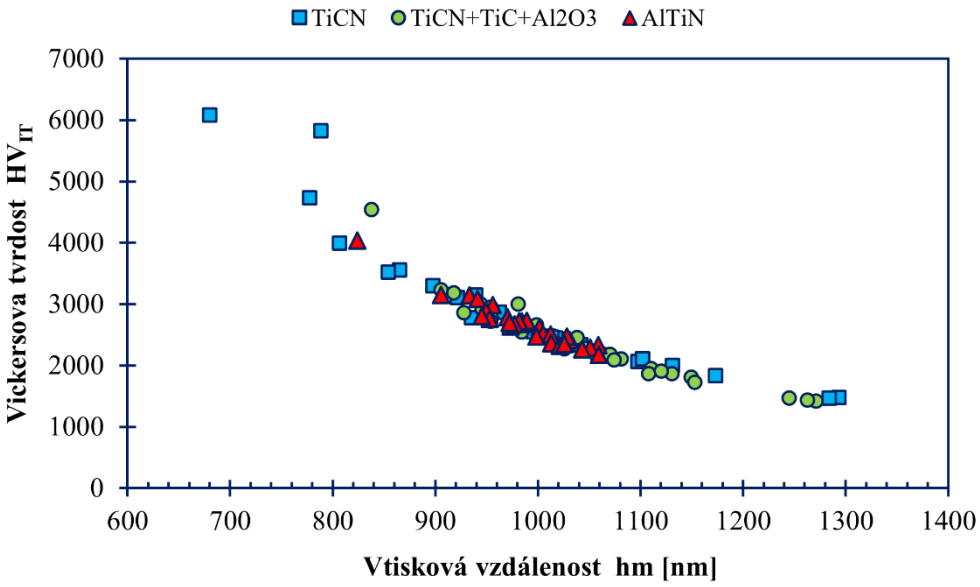


Obr. 67 Závislost vtiskové tvrdosti na vtiskové vzdálenosti

Závislost vtiskové tvrdosti jako funkce vzdálenosti vtisku je u všech testovaných vzorků velmi podobná. Vždy s prvním vtiskem je dosažena nejvyšší hodnota, která při následném vtisku prudce klesá a poté již klesající trend pozvolna pokračuje až na své měřené minimum. Z grafu na obr. 67 je viditelný intenzivní rozsah tvrdosti pro vrstvu TiCN, která je z hlediska rozpětí vtiskové vzdálenosti nejdelší.

11.3 Vickersova tvrdost HV_{IT}

Analýzou hodnot Vickersovy tvrdosti byly naměřeny hodnoty pro vrstvu TiCN – 2857 ± 199 $HV_{IT\ 0,05}$, AlTiN – 2665 ± 68 $HV_{IT\ 0,05}$ a vícevrstvý povlak 2393 ± 121 $HV_{IT\ 0,05}$. Nejistota měření charakterizovaná procentuálním podílem a vztažená k předkládaným vrstvám řazených za sebou má velikost 7 %, 2,6 % a 5,1 %. Chování zkomaných vzorků v průběhu zkoušky graficky popisuje obr. 68.

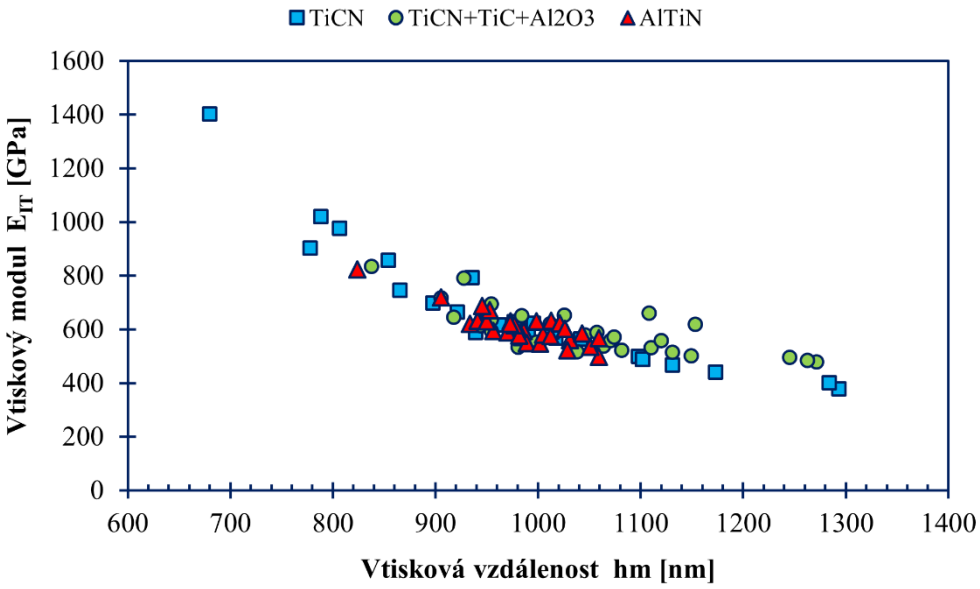


Obr. 68 Závislost Vickersovy tvrdosti na vtiskové vzdálenosti

Pro Vickersovu tvrdost (obr. 68) byla zjištěna totožná závislost na vtiskové vzdálenosti jako u vtiskové tvrdosti (obr. 67). Vrstva TiCN s největší rozlohou vtiskové vzdálenosti vykazuje výrazný objem ztráty tvrdosti během měření.

11.4 Vtiskový modul E_{IT}

Porovnáním výsledků vtiskového modulu (tabulka 6) lze potvrdit, že hodnoty E_{IT} korespondují s tvrdostí vrstvy. Proto je řazení výsledků od nejvyšší po nejnižší hodnotu stejné jako v případě H_{IT} a HV_{IT}. Nejvyšší hodnotu E_{IT} 0,5 = 649 ± 39 GPa vykazovala vrstva TiCN. Pro vrstvu AlTiN byla zjištěna velikost E_{IT} 0,5 = 606 ± 11 GPa. Nejmenší hodnotu tvrdosti a potažmo i modulu pružnosti E_{IT} 0,5 = 594 ± 16 GPa dosahoval vícevrstvý povlak TiCN+TiC+Al_2O_3. Všechny hodnoty E_{IT} byly také zatíženy rozptylem náhodných chyb vyjádřených v procentech 6 %, 1,8 % a 2,7 % pro vrstvy řazené podle E_{IT}. Grafickou povahu křivek závislosti vtiskového modulu na vzdálenosti vtisku interpretuje obr. 69.



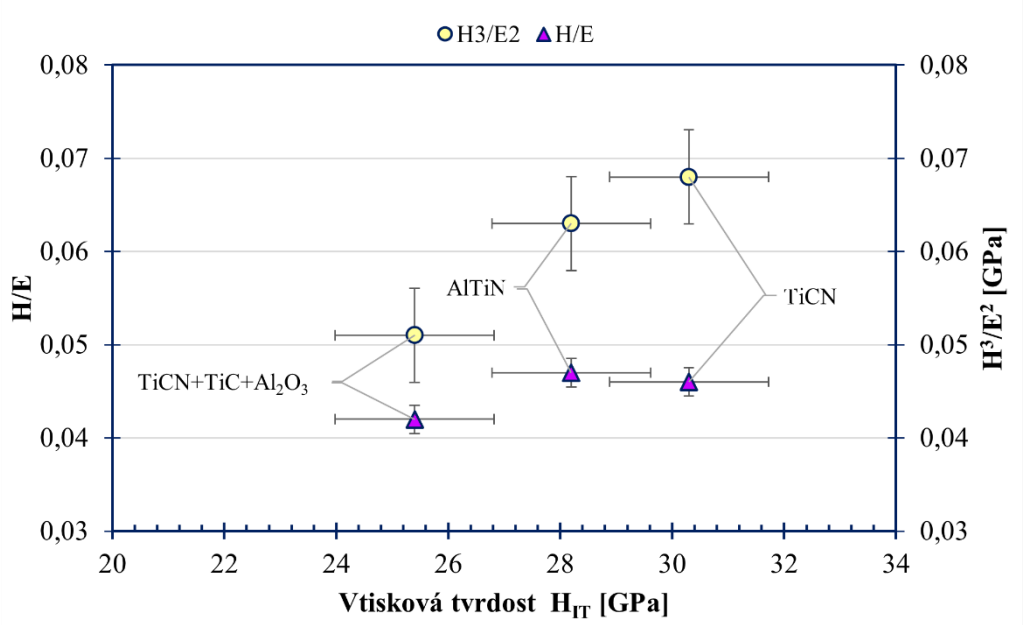
Obr. 69 Závislost vtiskového modulu na vtiskové vzdálenosti

Odezvy vtiskového modulu mají srovnatelné tendence ztráty hodnot s nárůstem vtiskové vzdálenosti. Oproti vrstvě TiCN s největším rozsahem vzdálenosti vykazuje vícevrstvý povlak TiCN+TiC+Al_2O_3 kolísavý klesající trend, který lze připsat přechodům přes jednotlivé vrstvy. U vrstvy AlTiN lze klesající nepravidelnost vysvětlit variabilitou mikrostruktury, která je spojena s koncentracemi konkrétních sloučenin v povlaku získané při ukládání ze zdrojových terčů v procesu fyzikální depozice par.

Porovnáním grafů závislosti z obr. 67, obr. 68 a obr. 69 lze pozorovat stejné chování, které charakterizuje počáteční vysokou tvrdost v místě prvního vtisku a výrazný pokles tvrdosti v druhém bodu vtiskové vzdálenosti. Při dalším zvyšování vtiskové vzdálenosti již docházelo k pozvolnému snižování tvrdosti na své měřené minimum. Z pozorovaných křivek lze také vyvodit, že všechny analyzované veličiny byly výrazně ovlivněny právě hodnotou prvního vtisku u všech zkoumaných vzorků.

11.5 Poměry H/E a H^3/E^2

Jak již bylo napsáno v kapitole 10.4, je žádoucí, aby se modul pružnosti snížil nejlépe na hodnotu základního materiálu při zachování tvrdosti. Tím by bylo dosaženo vysokých poměrů H/E a H^3/E^2 vedoucím ke zlepšení houževnatosti a zabránění vzniku trhlin. Grafické srovnání hodnot získaných výpočtem z tvrdosti *H* a vtiskového modulu *E* pro testované vzorky je prezentováno na obr. 70.



Obr. 70 Porovnání poměrů H/E a H^3/E^2 zkoumaných vzorků

U vzorků zkoumaných v této práci hodnoty H/E nepřesáhly 0,1, které jsou předpokladem přispívajícím k odolnosti vůči tvorbě trhlin. Pro poměry H/E byly naměřeny nejlepší hodnoty v následujícím pořadí. U vrstvy AlTiN činila velikost H/E = 0,047, u TiCN (H/E = 0,046) a u TiCN+TiC+Al_2O_3 (H/E = 0,042). Pro poměry H^3/E^2 charakterizující odolnost vůči plastické deformaci byla nejvyšší hodnota vypočtena u vrstvy TiCN (H^3/E^2 = 0,068 GPa), poté AlTiN (H^3/E^2 = 0,063 GPa) a nejméně pro vrstvu TiCN+TiC+Al_2O_3 (H^3/E^2 = 0,051 GPa). I když vypočítané parametry nepředstavují obzvláště vysoké hodnoty a nelze s určitostí potvrdit jejich význam z hlediska odolnosti v tribologických operacích, přesto jsou zkoumané nástroje vhodnými zástupci v oblasti obrábění daných materiálů.

12 DISKUZE

Vybrané mechanické vlastnosti třech zkoumaných vzorků byly v předchozích částech analyzovány a porovnány. Nejdříve byla vyšetřována vtisková tvrdost H_{IT}, poté Vickersova tvrdost HV_{IT} a vtiskový modul E_{IT}. Naměřené hodnoty H_{IT} a HV_{IT} byly mezi sebou porovnány prostřednictvím poměrného faktoru, který je charakterizován jako ekvivalentní tvrdost $HV_{IT\ ekvivalent}$. Korelace mezi převedenými hodnotami je vnímána jako orientační a v této práci se předkládá pouze pro předběžné srovnání. Studiem vzájemné závislosti zkoušek mikrotvrdosti a vtiskového modulu jako funkce vtiskové vzdálenosti potvrdil, že měřené hodnoty se během zvyšování vzdálenosti vtisku postupně snižovaly. Zároveň se podařilo prokázat, že velikost vtiskového modulu se zvyšoval s rostoucí tvrdostí.

Výsledek vtiskové tvrdosti u PVD vrstvy TiCN je v dobrém souladu s hodnotou uvedenou výrobcem. Její velikost je H_{IT} 0,5 = 30,3 ± 2,1 GPa a převodem na ekvivalentní Vickersovu tvrdost byla zjištěna hodnota 2861 $HV_{IT\ ekvivalent}$, která je jen o 4 jednotky vyšší než Vickersova tvrdost 2857 ± 199 $HV_{IT\ 0,05}$, vyšetřená pomocí instrumentované zkoušky. Z toho plyne, že naměřené hodnoty H_{IT} a HV_{IT} vykazují stejnou tvrdost. Dále bylo prokázáno, že aplikací ochranné vrstvy TiCN se podařilo zvýšit tvrdost základního substrátu ze slinutého karbidu o 81,4 %.

V případě vícevrstvého povlaku TiCN+TiC+Al_2O_3 deponovaného metodou MT-CVD byla vypočítána vtisková tvrdost H_{IT} 0,5 = 25,3 ± 1,3 GPa a Vickersova tvrdost 2393 ± 121 $HV_{IT\ 0,05}$. Přepočet na ekvivalentní tvrdost o velikosti 2396 $HV_{IT\ ekvivalent}$ dokazuje, že obě hodnoty tvrdosti H_{IT} a HV_{IT} jsou takřka totožné. Naměřené hodnoty podle Vickerse byly o 22 % nižší než průměrné hodnoty uvedené výrobcem. Je tedy obtížné určit, proč jsou hodnoty tvrdosti výrobce vyšší než výsledky zjištěné v této práci. S největší pravděpodobností je to způsobeno tím, že byly měřeny povlaky a ne dokonale husté, sypké materiály. Je také nezbytné vzít v úvahu vliv substrátu.

Při analýze stopkové frézy YG-1 s PVD vrstvou AlTiN byla zjištěna vtisková tvrdost H_{IT} 0,5 = 28,2 ± 0,7 GPa a tvrdost podle Vickerse 2665 ± 68 $HV_{IT\ 0,05}$. Protože chybí bližší údaje výrobce spojené s vrstvou AlTiN, lze pouze spekulovat, do jaké míry se naměřené hodnoty odlišují.

Co se týče poměrů H/E a H^3/E^2 nebyl v této práci prokázán jejich význam. Ovšem je to zjevně téma, které je potřebné dále studovat.

ZÁVĚR

Experiment byl realizován při pokojové teplotě na přístroji Micro – Combi Tester od CSM Instrument metodou DSI (Depth Sensing Indentation), která umožnila rychlou a přesnou analýzu vtisků. Přístroj byl vybaven Vickersovým diamantovým indentorem s vrcholovým úhlem 136 °, který byl během zkoušky zatěžován zkušební silou 0,5 N při rychlosti zatěžování a odlehčování 1 N/min v cyklu trvajícím 12 sekund. Všechny testy i analýzy byly provedeny v souladu s ČSN EN ISO 14577. Byly uskutečněny tři sady měření za účelem stanovení vtiskové tvrdosti H_{IT}, Vickersovy tvrdosti HV_{IT} a vtiskového modulu pružnosti E_{IT}. Veškeré hodnoty byly vyhodnoceny rovnicí podle Olivera a Pharra získané z indentačních křivek, které jsou funkcí maximálního zatížení a hloubky vtisku. Počáteční příprava vzorků složená z řezání, lisování a leštění zajistila požadovanou povrchovou úpravu apelující na nízkou drsnost povrchu bez vlivu zpevnění nebo deformace zkoumaného materiálu.

Uvedené vlastnosti byly analyzovány pro tři vzorky běžně dostupných povlakovaných slinutých karbidů. Dva vzorky byly opatřeny jednovrstvým povlakem TiCN a AlTiN nanesených metodou PVD a jeden s vícevrstvým povlakem TiCN+TiC+Al_2O_3 deponovaných metodou MT-CVD. Měření každého vzorku se uskutečnilo třiceti vtisky vedenými od okraje vzorku do středu substrátu a výsledné velikosti mikrotvrdosti a modulu pružnosti jsou průměrem hodnot získaných z třiceti vtisků. Pro každý měřený interval zatížení a posunutí byla vypočítána směrodatná odchylka, která byla použita pro výpočet statických chyb.

Bylo prokázáno, že nástroj s povlakem TiCN si vedl výrazně nejlépe ve všech zkoumaných veličinách charakterizujících vybrané mechanické vlastnosti. Pro vrstvu TiCN byla zjištěna nejvyšší hodnota tvrdosti H_{IT} 0,5 = 30,3 ± 2,1 GPa, která odpovídá hodnotě udávané výrobcem, dále 2857 ± 199 $HV_{IT\ 0,05}$ a vtiskového modulu E_{IT} 0,5 = 649 ± 39 GPa. Druhým nejtvrdším materiálem byla stopková fréza s vrstvou AlTiN, jejíž hodnoty byly pro H_{IT} 0,5 = 28,2 ± 0,7 GPa, E_{IT} 0,5 = 606 ± 11 GPa a 2665 ± 68 $HV_{IT\ 0,05}$. Nejméně tvrdým nástrojem byla břitová destička s vícevrstvým povlakem, u které bylo naměřeno H_{IT} 0,5 = 25,3 ± 1,3 GPa, E_{IT} 0,5 = 594 ± 16 GPa a 2393 ± 121 $HV_{IT\ 0,05}$. Přestože jsou hodnoty jednotlivých povlakovaných vrstev vůči sobě odlišné, lze konstatovat, že mechanické vlastnosti všech zkoumaných nástrojů jsou v souladu s materiálem, který má být obráběn. Dále bylo prokázáno, že depozicí povlaku byla zvýšena tvrdost slinutého karbidu o 81,4 %. Grafické analýzy z předchozích částí jasně

ukazují, že rostoucí vtisková vzdálenost výrazně ovlivnila měřené hodnoty, které se tímto snižovaly.

Dále byly představeny poměry H/E vs H^3/E^2 jako atraktivní zástupci predikce odolnosti řezných nástrojů v procesech obrábění. Ovšem nebylo prokázáno, že poměry H/E a H^3/E^2 pro námi zkoumané vzorky jsou spolehlivým indikátorem odolnosti v tribologických operacích, neboť jejich zkoumání je mimo rozsah tohoto experimentu. Proto by taková studie mohla být součástí mé budoucí práce. Jak již bylo zmíněno, budoucí práce si klade za cíl vliv mechanických vlastností na opotřebení a současně by výběr řezných nástrojů byl podmíněn jak vysokým, tak nízkým poměrem mezi H a E.

Závěrem lze podotknout, že by bylo vhodné provést další analýzu, která by dovolila kvantifikovat zkoumané vzorky z hlediska mikrostruktury, tloušťky vrstev povlaků nebo vlivu velikosti ISE. Tyto atributy by pomohly lépe diagnostikovat chování měřených mechanických vlastností v průběhu zkoušek.

13 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. *Výrobní inženýrství a technologie* [Kniha]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2014, s. 87-99 [cit. 2022-01-19].

[2] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje* [Kniha]. Praha: MM publishing, 2008, s. 9-182 [cit. 2022-01-01].

[3] HUMÁR, Anton. *Technologie I - Technologie obrábění – 1. část;* [online]. Studijní opory. Brno, 2003 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf

[4] SABHADIYA, J. *What Is Cutting Tool?- Name, Types, And Materials* [online]. [cit. 2022-01-08]. Dostupné z: https://www.engineeringchoice.com/cutting-tool/. Classification Of Cutting Tools.

[5] DENKENA, B a BIERMANN D. *Cutting edge geometries* [online]. 2nd.ed.: sv. 63: s. 631-653. CIRP Annals, Červen 2014, [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.009. S: 631-632.

[6] ZETEK, M, ZÍDKOVÁ H a ČESÁKOVÁ, I. *Vliv tvaru řezné hrany nástroje na průběh řezného procesu* [online]. Transfer inovácií, 2009 [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: https://www.mercel.cz/mercelcz_files/drsnost_povrchu.pdf. Článek: Hodnocení kvalitních parametrů nástroje.

[7] DENKENA, B a LUCASE, A. *Effects of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermo-mechanical load* [online]. CIRP Annals, Květen 2011, [cit. 22-04-17]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.098. s: 73-76.

[8] BAYER, A.M, BECHERER B.A a VASCO T. *High.Speed Tool Steels* [online]. Novelty, 1989, [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06022g_sample.pdf. s. 51-53.

[9] SOBOTOVÁ, Jana. *Perspektivní nástrojové oceli* [online]. Duben 2017 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2016-24-Sobotova.pdf. Habitační přednáška 2016, s. 14.

[10] SKOTNICOVÁ, K a KURSA M. *Prášková metalurgie: studijní opory : učební text, scénáře, testy* [online]. Září 2013 [cit. 2022-01-12]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/03_Materialov%C3%A9_inzenyrstvi/06_Praskova_metalurgie/Skotnicova_Praskova_metalurgie.pdf. s. 13.

[11] ČEP, R a PETRŮ J. *Technologie obrábění v příkladech* [online]. 2013 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: doi:CZ.1.07/2.2.00/15.0463 s. 8, 17-18,.

[12] GARCÍA, J a COLLADO, V. *Cemented carbide microstructures: a review* [online]. Salt Lake City: International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Duben 2019, [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.12.004. kap: 3.

[13] ČSN ISO 513:2015. *Klasifikace a použití tvrdých řezných materiálů k obrábění kovů s určenou řeznou hranou - Označování skupin a podskupin použití* [online]. 4. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2015, 12 s. [cit. 2022-02-19].

[14] SANDVIK, Coromant. *Training Handbook Metal Cutting Technology* [Příručka technologie řezání kovů]. Listopad 2017 [cit. 2022-01-14]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/search?q=Training%20handbook. Katalog, s. 349 (H 51).

[15] DERAKHSHANDEH, M.R, ESHRAGHI M.J a RAZAVI M. *Recent developments in the new generation of hard coatings applied on cemented carbide cutting tools* [online]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Únor 2023, [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.106077 (Obrázek).

[16] BOUZAKIS, K.D, MICHAILIDIS N, SKORDARIS, G, BIERMANN D a SAOUBI, R. *Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization* [online]. CIRP ANNALS, 2012 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.006. s. 703-723.

[17] NTK, Cutting. *Cutting Tools - General Catalog* [online]. Ratingen, 2019, [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://www.ntk-cuttingtools.com/media/katalogemehrsprachig/21496_NTK-Catalog_Vol6_EN_Small.pdf. Katalog řezných nástrojů, s. 89-90.

[18] DIA, PRAHA. *CBN-katalog_becker* [online]. 2011 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: https://www.diapraha.cz/uploads/assets/katalogy/pkd-katalog_becker_2011_cz.pdf. Produktový katalog s: 4, 5.

[19] SANDVIK, Coromant. *Automotive - Transmission machining solutions* [online]. In: . 2018 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/search?q=Automotive-Transmission%20Machining%20solution&generalRefiners=%7B%22TibpMetadataLanguage%22:%5B%22cs-cz%22,null%5D%7D. Brožura, s. 6.

[20] MATTOX, Donald,. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing* [online]. 2nd ed. Norwich, N. Y;: William Andrew, 2010 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpHPVDPV04/toc?b-q=Mattox&include_synonyms=no&q=Mattox&sort_on=default. Introduction, s: 1-6.

[21] KLOTZKE, F a KRIEG T. *Coated Tools for Metal Cutting – Features and Applications* [online]. 48:2. CIRP Annals, 1999, [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.098. S. 515-525.

[22] DENG, Y., CHEN W., LI B., KUANG T. a LI J. *Physical vapor deposition technology for coated cutting tools: A review* [online]. 46:11:B. Ceramics International, 2020, , s. 18373-18390 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: https://proxy.k.utb.cz/login?url=https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884220311123

[23] SHIMIZU, T, KOMIJA H., WATANABE T., TERANISHI J., NAGASAKA H., MORIKAWA K. a YANG M. *HIPIMS deposition of TiAlN films on inner wall of micro-dies and its applicability in micro-sheet metal forming* [online]. 250. Surface and Coatings Technology, 2014, , 44-51 s. [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.02.008

[24] ZHENGTAO, W, WANG Q., PETROV I., GrEENE J.E., HURTMAN L. a GRECZYNSKI G. *Cubic-structure Al-rich TiAlSiN thin films grown by hybrid high-power impulse magnetron co-sputtering with synchronized Al+ irradiation* [online]. Sv. 385. Surface and Coatings Technology, Březen 2020, [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897220300335#s0060

[25] JECH, V., ŠEPITKA., J. et al. *Využití tenkých uhlíkových vrstev v medicíně* [článek z webu]. Listopad 2012 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/vyuziti-tenkych-uhlikovych-vrstev-v-medicine. Kód článku 121101.

[26] JONES, Anthony, C. a Michael, L. HITCHMAN. *Chemical Vapour Deposition Precursors, Processes and Applications* [online]. 1. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 2009, 570 s. [cit. 2022-11-10]. ISBN 978-0-85404-465-8. Dostupné z: https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpCVDPPA04

[27] OKE, A, a JEN, CH. T. *Atomic layer deposition and other thin film deposition techniques: from principles to film properties* [online]. Journal of Materials Research and Technology, Prosinec 2022, [cit. 2022-12-15]. ISSN 2238-7854. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.064. Přehledový článek.

[28] NARAGINO, H., SAITOH Y a HONDA K. *Electrochemical reduction of carbon dioxide in an aqueous solution using phosphorus-doped polycrystalline diamond electrodes* [online]. In: . Electrochemistry Communications, Leden 2022, [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107164

[29] PIERSON, H,O. *Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD) - Principles, Technology and Applications* [online]. Materials science and process technology series. 2.nd. ed. Norwich, N.Y.: Noyes Publications, 1999, , (xxiv 482 s.) [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHCVDCVD4/handbook_of_chemical_vapor_deposition_cvd__principles_technology_and_applications_2nd_edition

[30] PRENGEL, H., PFOUTS W.R a SANTHANAM A. T. *State of the art in hard coatings for carbide cutting tools* [online]. 3. Surface and Coatings Technology, Duben 1998, [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/S0257-8972(96)03061-7. s. 185-186.

[31] GRULICH, Ondřej. *Povrchové úpravy biomateriálů v plazmatu* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2015, 145 s. [cit. 2022-10-01]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/10563/31063. Dizertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav fyziky a mater. inženýrství. Vedoucí práce Ponížil, Petr. s. 29-30.

[32] HÝLOVÁ, Lenka. *Vliv beta záření na mikro-tvrdost polymerů* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019, 63 s. [cit. 2022-10-01]. ISBN 978-80-7454-868-0. Dostupné z: http://hdl.handle.net/10563/45872. Dizertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Staněk, Michal. s. 37-38.

[33] SOSNOVÁ, M a A KŘÍŽ. *Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně-kohezivního a tribologického chování.* [online]. 2006, 67 s. [cit. 2022-09-15]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/FRVS_zprava_dalsi_studium_sosnova.pdf. FRVŠ zpráva. Západočeská univerzita v Plzni. str: 45-52.

[34] SLEZIAK, T a E, SPIŠÁK. Vlastnosti PVD povlakov a metódy ich skúšania: Transfer inovácií 32/2015. In: *Transfer inovácií* [online]. Košice: Katedra strojárskych technológií a materiálov SjF TUKE, 2015, , s. 3 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/32-2015/pdf/209-211.pdf

[35] ČECHAL, J a ŠIKOLA T. *Metoda XPS v Laboratoři povrchů a tenkých vrstev ÚFI* [online]. [cit. 2022-08-18]. Dostupné z: https://docplayer.cz/84683849-Metoda-xps-v-laboratori-povrchu-a-tenkych-vrstev-ufi.html. s. 3, 5.

[36] MAŠEK, K a GÁBOR P. *Metody povrchové a tenkovrstvé analýzy prvkového složení (XPS, AES, SIMS), difrakce fotoelektronů* [online]. sv. 18(4). Praha: Materials Structure, 2011, , 7 s. [cit. 2022-10-01]. Dostupné z:

https://www.xray.cz/ms/bul2011-4/masek.pdf

[37] ČSN EN ISO 14577 - 1. *Kovové materiály - Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů.* [online]. Část 1: Zkušební metoda. Česká agentura pro standardizaci, 2015, 44 s. [cit. 2022-08-09].

[38] OVSÍK, Martin. *Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013, 179 s. [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/10563/25609. Dizertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Maňas, David.

[39] SAVKOVÁ, J. *Vlastnosti a mikrostruktura tenkých vrstvev TiAlSiN* [online]. 2014 [cit. 2022-07-15]. Dostupné z: Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/14958?mode=full. Disertační práce, s. 33-37.

[40] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse* [online]. Část 1: Zkušební metoda. Česká agentura pro standardizaci, 2018, 32 s. [cit. 2022-08-09].

[41] DVOŘÁK, JD. *Metoda Vickers* [online]. Praha, 2018 [cit. 2022-07-17]. Dostupné z: https://www.testsysteme.cz/metoda-vickers

[42] IŽDINSKÁ, Z. Skúšky tvrdostI. *Skúšky tvrdostI* [online]. 2006 [cit. 2022-07-16]. Dostupné z: http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=531. Strojnícka fakulta STU, Katedra materiálov a technológ.

[43] DVOŘÁK, JD. *Metoda Knoop* [online]. Praha: JD Dvořák s.r.o, 2018 [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: https://www.testsysteme.cz/metoda-knoop

[44] ČSN EN ISO 4545 - 1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Knoppa* [online]. Část 1: Zkušební metoda. Česká agentura pro standardizaci, 2018, 28 s. [cit. 2022-08-10].

[45] STOKLÁSEK, Pavel. *Vliv technologie dělení materiálů na jejich povrchové vlastnosti* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019, 50 s. [cit. 2022-07-18]. ISBN 978-80-7454-851-2. Dostupné z: http://hdl.handle.net/10563/45786. Dizertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. s. 45-47.

[46] BOBZIN, K. *High-performance coatings for cutting tools* [online]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2017, [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.11.004

[47] ČSN ISO 3534-1 (01 0216). *Statistika - Slovník a značky* [online]. Část 1: Obecné statistické termíny a termíny používané v pravděpodobnost. Druhé vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví : Česká agentura pro standardizaci, 2010, s.38 [cit. 2022-12-12]. Kap: 1:15 - 1:17; 1:24.

[48] LEYLAND, A a A MATTHEWS. *On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behaviour* [online]. 1-2: sv.246. Wear, Listopad 2000, [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00488-9

[49] CHEN, X, DU Y. a CHUNG Y. W. *Commentary on using H/E and H3/E2 as proxies for fracture toughness of hard coatings* [online]. Sv. 688. Thin Solid Films, Říjen 2019, [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.04.040

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ε	Konstanta geometrie indentoru
μm	Mikrometr
η_{IT}	Koeficient zpětné relaxace
ν_i	Poissonův poměr indentoru
ν_s	Poissonův poměr
A_p	Průmět kontaktní plochy indentoru
A_s	Plocha povrchu
A_s (h)	Plocha povrchu indentoru v hloubce kontaktu
AFM	Mikroskopie atomárních sil (Atomic Force Microscopy)
Ag	Stříbro
Al	Hliník
$AlCl_3$	Chlorid hlinitý
ALD	Depozice atomové vrstvy (Atomic Layer Deposition)
Al_2O_3	Oxid hlinitý
AlTiN	Nitrid hliníku a titanu
Ar	Argon
Au	Zlato
Arc-PVD	Fyzikální depozice katodickým obloukem
B_4C	Karbid boru
Be	Berylium
c	Konstanta indentoru
C	Kontaktní poddajnost
C_{IT}	Vtiskové tečení (creep)
Co	Kobalt
Cr	Chrom

CrAlSiN	Nitrid chromu hliníku a titanu
CrC	Karbid chromu
CrN	Nitrid chromu
CVD	Chemická depozice z plynné fáze (Chemical Vapor Deposition)
ČSN	Česká státní norma
d	Velikost uhlopříček
DCMS	Magnetronové naprašování stejnosměrným proudem (DC Magnetron Sputtering)
DLC	Diamantu podobný uhlík
DSI	Instrumentovaná zkouška tvrdosti (Depth Sensing Indentation)
E*	Komplexní modul pružnosti
E_B^V	Vazebná energie fotoelektronů k hladině vakua
E_i	Modul indentoru
E_{IT}	Indentační modul pružnosti
E_K	Kinetická energie emitovaných fotoelektronů
E_r	Redukovaný modul pružnosti
EB-PVD	Fyzikální depozice elektronovým paprskem (Electron Beam PVD)
ECR	Elektronová cyklotronová rezonance
EN	Evropská norma
eV	Elektronvolt
F	Zatěžující síla
g_n	Gravitační zrychlení
H	Tvrdost
h	Hloubka vtisku
H_2	Vodík
h_c	Hloubka indentace
H_{CH}	Tvrdost podle Berkoviche

H_{IT}	Vtisková tvrdost
h_p	Kontaktní hloubka vtisku
h_r	Hloubka vtisku po odlehčení
hν	Energie rentgenového záření
HfC	Karbid hafnia
HfN	Nitrid hafnia
HIPIMS	Vysokovýkonné pulzní magnetronové naprašování (High-power Impulse Magnetron Sputtering)
HK	Tvrdost podle Knoppa
HM	Martensova tvrdost
HV	Tvrdost podle Vickerse
HV_{IT}	Vickersova vtisková tvrdost
CH_4	Metan
CH_3CN	acetonitril
IBAD	Iontovým svazkem asistovaná depozice (Ion Beam Assisted Deposition)
ISO	Mezinárodní norma
L_C	Kritické zatížení
l	Výška vtisku trojúhelníku Berkovichova indentoru
MeC:H	Amorfní kov-uhlík
Mn	Mangan
Mo	Molybden
Mo_2C	Karbid molybdenu
MO-CVD	Kov-organická chemická depozice (Metalo Organic CVD)
MoS	Molybden disulfid
MT-CVD	Chemická depozice za středních teplot (Middle Temperature CVD)
MW-CVD	Mikrovlnná plazmová depozice (Microwave CVD)
N	Dusík

Nb	Niob
NbC	Karbid niobu
NH_4	Amoniak
P	Zatěžující síla
Pa	Pascal
PA-CVD	Plazmou asistovaná chemická depozice (Plasma Assisted CVD)
PCVD	Technologie plazmové chemické depozice
PD	Polykrystalický diamant
PE-CVD	Plazmou podporovaná chemická depozice (Plasma Enhanced CVD)
PKNB	Polykrystalický kubický nitrid bóru
PVD	Fyzikální depozice z plynné fáze (Physical Vapor Deposition)
RF-CVD	Radiofrekvenční proces chemické depozice (Radio Frequency CVD)
R_{IT}	Vtisková relaxace
S	Kontaktní tuhost
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie
SiAlON	Oxinitrid křemíku a hliníku
SiC	Karbid křemíku
SIMS	Hmotnostní spektrometrie sekundárních iontů (Secondary Ion Mass Spectrometry)
Si_3N_4	Nitrid křemičitý
SiO_2	Oxid křemičitý
TaC	Karbid tantalu
Ti	Titan
TiAlN	Nitrid titanu a hliníku
TiAlSiN	Nitrid titanu, hliníku a křemíku
TiB_2	Diborit titanu

TiC	Karbid titanu
$TiCl_4$	Chlorid titaničitý
TiCN	Karbonitrid titanu
TiN	Nitrid titanu
TiO_2	Oxid titaničitý
V	Vanad
W	Wolfram
W_{elast}	Elastická deformační práce indentačního cyklu
W_{plast}	Plastická deformační práce indentačního cyklu
W_{total}	Celková práce indentačního cyklu
WC	Karbid wolframu
XPS	Rentgenová fotoelektronová spektroskopie (X-ray Photoelectron Spectroscopy)
Y_2O_3	Oxid yttritý
ZrC	Karbid zirkonia
$ZrCl_4$	Chlorid titaničitý
ZrN	Nitrid zirkonu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Popis charakteristik a cyklu řezných nástrojů [vlastní] 11
Obr. 2 Vliv vlastností materiálu na řezné podmínky [3] 13
Obr. 3 Mikrogeometrie řezné hrany [7] 15
Obr. 4 Vlastnosti nástrojových materiálů [3] 16
Obr. 5 Oblast použití slinutých karbidů [12] 20
Obr. 6 Povlakovaná břitová destička metodou PVD [14] 24
Obr. 7 Povlakovaná břitová destička metodou CVD [14] 25
Obr. 8 Nedávný vývoj vícevrstvých CVD povlaků uložených na substrátech ze slinutých karbidů pro aplikace: a.) řezání oceli a b.) frézování oceli [15] 26
Obr. 9 Vývoj povlakovaných materiálů řezných nástrojů [16] 27
Obr. 10 a.) Závislost přísad na vlastnosti cermetů b.) Struktura cermetů [11] 28
Obr. 11 Typy keramických řezných materiálů [17] 29
Obr. 12 Vyměnitelné břitové destičky s PKNB pájeným roubíkem [19] 31
Obr. 13 Od diamantu po diamantovou břitovou destičku [18] 32
Obr. 14 Rozsah teplot a tlaků základních depozičních technik [2] 33
Obr. 15 Schéma odpařování (vlevo) a naprašování (vpravo) [3] 35
Obr. 16 Schéma PVD obloukové metody [22] 36
Obr. 17 Schéma PVD metody magnetronového naprašování [22] 37
Obr. 18 Konfigurace magnetronů pro běžné rozprašovací terče: 38
Obr. 19 Schéma zařízení Domino-mini technologie HiPIMS [23] 39
Obr. 20 Schéma dispozice a.) hybridního systému HiPIMS/DCMS b.) TiSi terče v povlakovací jednotce CC800/9 společnosti CemeCon AG pro vrstvy TiAlSiN [24] 40
Obr. 21 Schéma iontového plátování [3] 41
Obr. 22 Princip a zařízení metody IBAD s využitím elektronového děla [25] 41
Obr. 23 Schéma procesu PE-CVD [27] 43
Obr. 24 Schéma MW-CVD depozice [28] 44
Obr. 25 Příčný řez reaktoru PE-CVD při nanášení povlaku DLC [2] 45
Obr. 26 Schéma procesu metody ALD [27] 47
Obr. 27 Schéma AFM mikroskopu [32] 49
Obr. 28 Metoda kalotest 50
Obr. 29 Scratch test [34] 52
Obr. 30 Hodnocení vtisku vzniklé Rockwelovým indentorem při zatížení 1500 N [33] 52
Obr. 31 Princip měření PIN (BALL)-on-DISC [33] 53
Obr. 32 Metoda XPS 55

Obr. 33 Metoda SIMS a.) Fyzikální princip metody SIMS b.) Schéma zařízení SIMS [36] 55
Obr. 34 Geometrie Vickerova jehlanu [42] 58
Obr. 35 Geometrie Knoppova indentoru [43] 59
Obr. 36 Geometrie Berkovichova indentoru [38] 61
Obr. 37 Indentační křivka [38] 62
Obr. 38 Grafické znázornění indentační zkoušky 63
Obr. 39 Schéma vtisku v příčném řezu [39] 64
Obr. 40 Indentační křivka deformační práce [38] 66
Obr. 41 Vyjádření vtiskového tečení [37] 67
Obr. 42 Vyměnitelné břitové destičky Korloy 74
Obr. 43 Vyměnitelné břitové destičky Kyocera 75
Obr. 44 Stopková válcová fréza YG-1 76
Obr. 45 Metalografické vzorky 78
Obr. 46 Pila přesná Buhler/IsoMet 4000 79
Obr. 47 *Lisovací zařízení Buehler/SimpliMet 1000* 80
Obr. 48 Leštička vzorků Buehler/AutoMet 250 81
Obr. 49 Zařízení Micro – Combi Tester 83
Obr. 50 Grafické znázornění vtiskové tvrdosti H_{IT} zkoumaných materiálů 85
Obr. 51 Závislost vtiskové tvrdosti na vzdálenosti vtisku pro břitovou destičku Korloy 86
Obr. 52 Závislost vtiskové tvrdosti na vzdálenosti vtisku pro břitovou destičku Kyocera 86
Obr. 53 Závislost vtiskové tvrdosti na vzdálenosti vtisku pro stopkovou frézu YG-1 87
Obr. 54 Grafické znázornění Vickersovy mikrotvrdosti HV_{IT} zkoumaných materiálů 88
Obr. 55 Závislost Vickersovy tvrdosti na vzdálenosti vtisku pro břitovou destičku Korloy 89
Obr. 56 Závislost Vickersovy tvrdosti na vzdálenosti pro břitovou destičku Kyocera 90
Obr. 57 Závislost Vickersovy tvrdosti na vzdálenosti pro stopkovou frézu YG-1 90
Obr. 58 Grafické znázornění vtiskového modulu E_{IT} zkoumaných vzorků 91
Obr. 59 Závislost vtiskového modulu na vzdálenostech vtisku pro břitovou destičku Korloy 92
Obr. 60 Závislost vtiskového modulu na vzdálenosti vtisku pro břitovou destičku Kyocera 93
Obr. 61 Závislost vtiskového modulu na vzdálenosti vtisku pro frézu YG-1 93
Obr. 62 Závislost vtiskové tvrdosti na vtiskovém modulu 94
Obr. 63 Závislost vtiskové tvrdosti na poměru H/E 95
Obr. 64 Závislost vtiskové tvrdosti na H^3/E^2 96
Obr. 65 Grafické porovnání výsledků mechanických zkoušek 97
Obr. 66 Porovnání Vickersovy tvrdosti a převedené vtiskové tvrdosti na ekvivalentní 98

Obr. 67 Závislost vtiskové tvrdosti na vtiskové vzdálenosti.....99
Obr. 68 Závislost Vickersovy tvrdosti na vtiskové vzdálenosti.....100
Obr. 69 Závislost vtiskového modulu na vtiskové vzdálenosti.....101
Obr. 70 Porovnání poměrů H/E a H^3/E^2 zkoumaných vzorků.....102

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Rozdělení slinutých karbidů podle mezinárodní normy ČSN ISO 513:2015 [13] 21
Tabulka 2 Oblast použití slinutých karbidů [13] 22
Tabulka 3 Rozdělení řezné keramiky podle ČSN ISO 513:2015 [13].....30
Tabulka 4 Rozdělení tvrdých řezných materiálů dle ISO ČSN 513:2015 [13] [18] 31
Tabulka 5 Rozdělení zkoušek dle ČSN EN ISO 6507-1 [39].....57
Tabulka 6 Výsledné hodnoty zkoumaných vzorků.....97

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: DATA KORLOY …….. 120

Příloha P I: 1 Korloy – třída jakosti 120

Příloha P I: 2 Korloy – fyzikální vlastnosti prvků 120

Příloha P II. DATA KYOCERA ……...122

Příloha P II: 1 Kyocera – vlastnosti vrstvy povlaku 121

Příloha P II: 2 Kyocera – aplikace 121

Příloha P II: 3 Kyocera – třída jakosti 122

Příloha P II: 4 Kyocera – tvrdost vrstvy 122

Příloha P III: DATA YG-1 ……124

Příloha P III: 1 YG-1 – Třída jakosti 123

Příloha P III: 2 YG-1 – popis 123

PŘÍLOHA P I: DATA KORLOY

Příloha P I: 1 Korloy – třída jakosti

Vlastnosti jakostí soustružení CVD

Jakosti s povlakem CVD	ISO	Vlastnosti
NC3010	P05–P15	• Vysokorychlostní obrábění ocelí • Kombinace vynikající odolnosti substrátu proti opotřebení s odolností proti lomu a žáruvzdorností Al_2O_3; zvýšená stabilita • MT-TiCN + Al_2O_3 + TiN
NC3020	P15–P25	• Vysokorychlostní obrábění ocelí • Kombinace vynikající odolnosti substrátu proti opotřebení s odolností proti lomu a žáruvzdorností Al_2O_3; zvýšená stabilita • MT-TiCN + Al_2O_3 + TiN
NC3120	P15–P30	• Střední obrábění až hrubování ocelí • Kombinace vynikající odolnosti substrátu proti lomu s odolností proti vyštipování a žáruvzdorností Al_2O_3; zvýšená stabilita • MT-TiCN + TiC + Al_2O_3
NC3030	P25–P35	• Pro všeobecné obrábění, přerušovaný řezí a hrubování ocelí a korozivzdorných ocelí • Kombinace vynikající odolnosti substrátu proti lomu s odolností proti vyštipování a žáruvzdorností Al_2O_3; zvýšená stabilita v širokém rozsahu řezných podmínek • MT-TiCN + TiC + Al_2O_3 + TiN
NC5330	P30–P40 M25–M35 K15–K25 S15–S25	• Pro korozivzdorné oceli / obecné obrábění výkovků a zápustkových ocelí • MT-TiCN + Al_2O_3 + TiN
NC9025	M25–M35	• Pro korozivzdorné oceli • MT-TiCN + Al_2O_3 + TiN
NC500H	P25–P35	• Těžce přerušovaný řez u ocelí • Odolnost substrátu proti plastické deformaci a lomu s odolností proti ulamování a žáruvzdorností Al_2O_3; zvýšená stabilita v širokém rozsahu řezných podmínek • MT-TiCN + TiC + Al_2O_3 + TiN
NC6105	K01–K10	• Vysokorychlostní obrábění litiny • MT-TiCN + Al_2O_3
NC6110	K05–K15	• Všeobecné obrábění tvárné a šedé litiny • Houževnatý substrát a povlak Al_2O_3 se zvýšenou adhezí vykazují vysokou odolnost proti opotřebení • MT-TiCN + Al_2O_3
NC315K	K10–K20	• Přerušovaný řez a vysoce efektivní obrábění litiny • Houževnatý substrát a povlak Al_2O_3 se zvýšenou adhezí vykazují vysokou odolnost proti opotřebení • MT-TiCN + Al_2O_3 + TiN

KORLOY

Příloha P I: 2 Korloy – fyzikální vlastnosti prvků

Fyzikální vlastnosti prvků

Prvek	Hustota (g/cm^3)	Tvrdost (H_V)	Youngův modul ($\times 10^3$ kgf/mm^2)	Tepelná vodivost (cal/cm·s·°C)	Součinitel tepelné roztažnosti ($\times 10^{-6}$/°C)	Bod tání (°C)
WC	15,6	2 150	70	0,3	5,1	2 900
TiC	4,94	3 200	45	0,04	7,6	3 200
TaC	14,5	1 800	29	0,05	6,6	3 800
NbC	8,2	2 050	35	0,04	6,8	3 500
TiN	5,43	2 000	26	0,07	9,2	2 950
Al_2O_3	3,98	3 000	42	0,07	8,5	2 050
cBN	3,48	4 500	71	3,1	4,7	-
Diamant	3,52	9 000	99	5,0	3,1	-
Co	8,9	-	10–18	0,165	12,3	1 495
Ni	8,9	-	20	0,22	13,3	1 455

PŘÍLOHA P II: DATA KYOCERA

Příloha P II: 1 Kyocera – vlastnosti vrstvy povlaku

PVD Coated Carbide

Grade Name	Color	Coating / Main Component	Coating Layer	Density	Hardness of Substrate		Fracture Toughness ($MPam^{1/2}$)	Flexural Toughness (MPa)
					(HV)	(GPa)		
PR005S	Blackish Gray	MEGACOAT HARD	Thin Coating	15.0	1,750	17.2	8.0	2,000
PR015S	Blackish Gray	MEGACOAT HARD	Thin Coating	14.9	1,680	16.5	9.0	2,400
PR630	Gold	TiN	Thin Coating	12.5	1,500	14.7	11.0	2,160
PR660	Gold	TiN	Thin Coating	13.7	1,450	14.2	13.0	2,250
PR830	Gold	TiAlN+TiN	Thin Coating	13.7	1,450	14.2	13.0	2,250
PR905	Bluish Violet	TiAlN	Thin Coating	14.8	1,720	16.8	9.0	2,450
PR915	Bluish Violet	TiAlN	Thin Coating	14.1	1,700	16.7	11.0	4,140
PR930	Reddish Gray	TiCN	Thin Coating	14.1	1,700	16.7	11.0	4,140
PR1005	Reddish Gray	TiCN	Thin Coating	14.9	1,800	17.6	10.0	3,300
PR1025	Reddish Gray	TiCN	Thin Coating	14.5	1,600	15.8	13.0	3,400
PR1115	Purple red	TiAlN	Thin Coating	14.7	1,700	16.7	11.0	3,000
PR1125	Purple red	TiAlN	Thin Coating	14.5	1,600	15.8	13.0	3,400
PR1210	Blackish Red	MEGACOAT	Thin Coating	14.8	1,720	16.8	9.0	2,450
PR1215	Blackish Red	MEGACOAT	Thin Coating	14.7	1,700	16.7	11.0	3,000
PR1225	Blackish Red	MEGACOAT	Thin Coating	14.5	1,600	15.8	13.0	3,400
PR1230	Blackish Red	MEGACOAT	Thin Coating	13.7	1,450	14.2	13.0	2,250

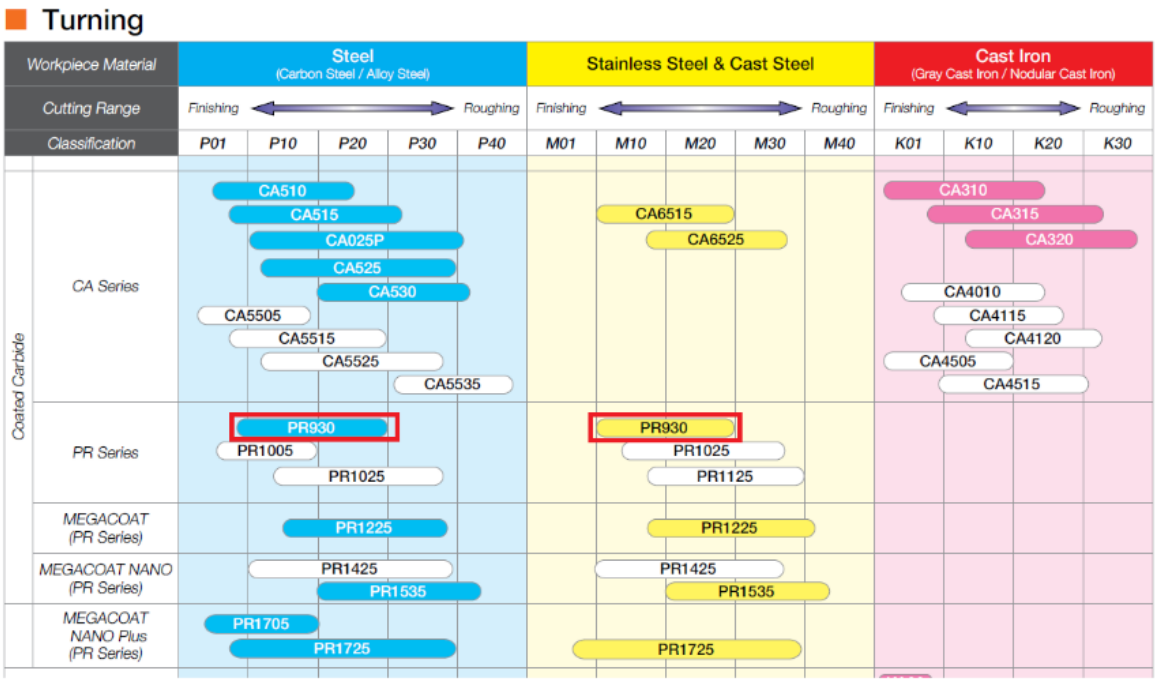
INSERT GRADES A
TURNING INSERTS B
CBN/PCD INSERTS C
TURNING HOLDERS D
SMALL TOOLS E
BORING F

Příloha P II: 2 Kyocera – aplikace

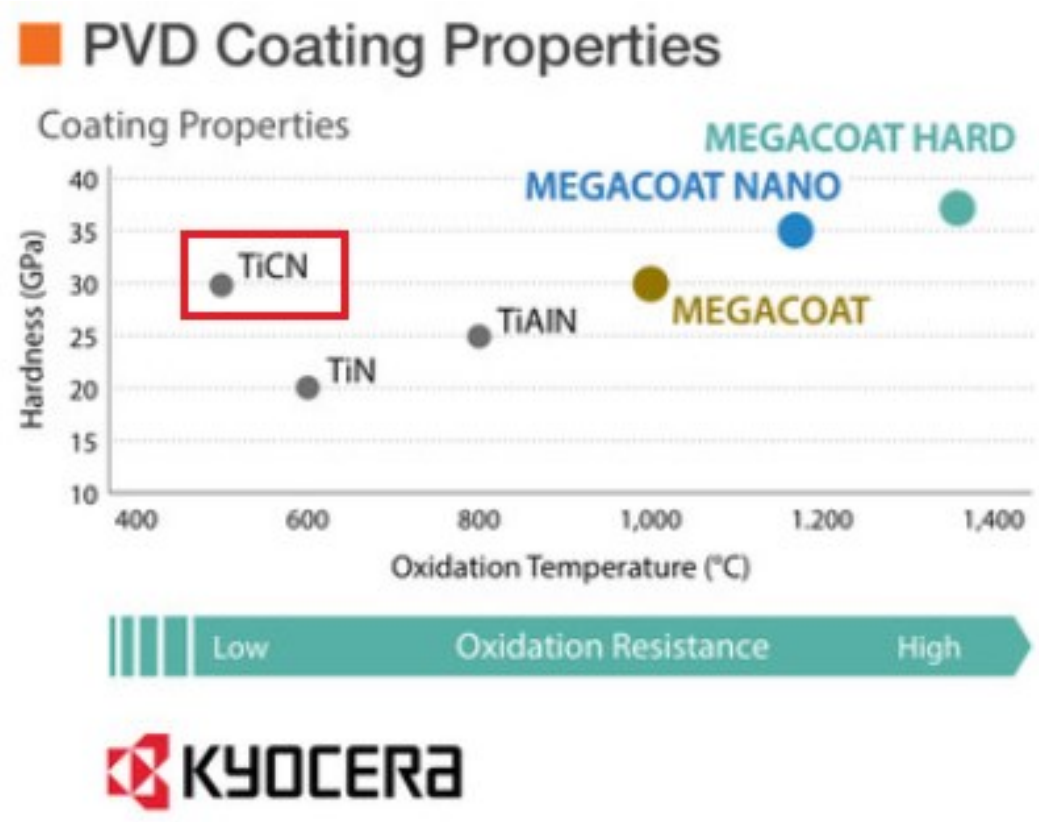
FEATURES OF PVD COATED CARBIDE FOR TURNING

Material	Description	Color	Main Component (Coating Composition)	Advantages
P Steel	PR915 (Super Micro-Grain)	Bluish Violet	TiAlN	· Application: Stable and reliable high precision machining of steel
	PR930 (Super Micro-Grain)	Reddish Gray	TiCN	· Application: Low machining speed, precise machining with sharp edge
	PR1005	Reddish Gray	TiCN	· TiCN base PVD coated hard micro-grain carbide · Application: Turning of free-cutting steel, longer tool life achieved through anti-adhesion performance
	PR1025	Reddish Gray	TiCN	· Application: General machining of steel and stainless steel, stable and longer tool life
	PR1115	Purple Red	TiAlN	· Superior oxidation resistance with well balanced wear resistance and toughness · Application: Machining of steel and stainless steel, for grooving, cut-off and threading
	PR1215	Blackish Red	MEGACOAT	· Superior wear and oxidation-resistant MEGACOAT on micro-grain carbide substrate · Application: Superior adhesion resistance and longer tool life for steel and stainless steel machining
	PR1425	Blackish Red	MEGACOAT NANO	· Nano thin multi-layer coating MEGACOAT NANO for superior wear resistance and high oxidation resistance · Application: Variety of steels, high speed machining of stainless steel with extended tool life
	PR1625	Blackish Red	MEGACOAT NANO	· Nano thin multi-layer coating MEGACOAT NANO for superior wear resistance and high oxidation resistance · Application: Stable machining and long tool life when grooving steel and stainless steel
	PR1705	Silver	MEGACOAT NANO PLUS	· Special MEGA COAT NANO PLUS nano-laminated coating for excellent wear resistance and welding resistance · Application: Excellent wear resistance and high-precision machining of free-cutting steel

Příloha P II: 3 Kyocera – třída jakosti

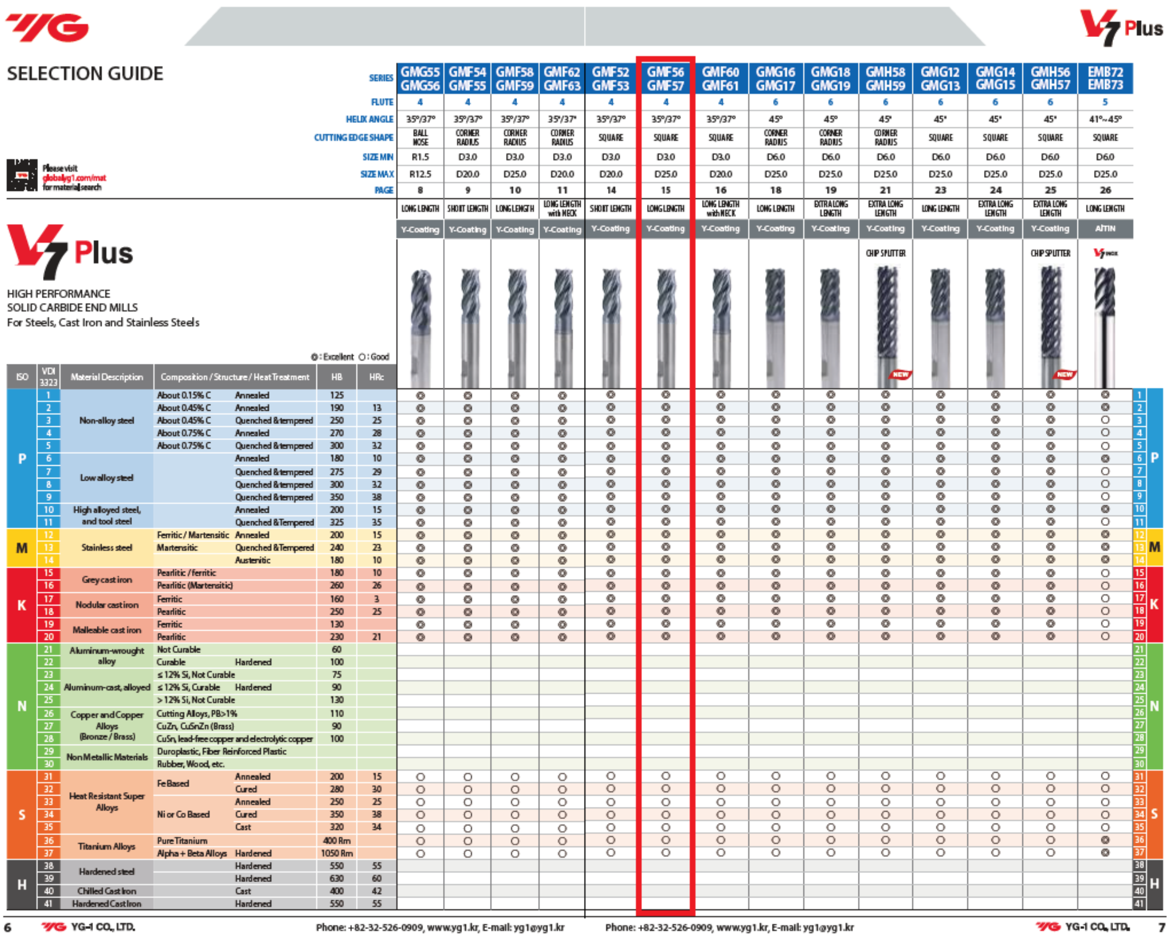


Příloha P II: 4 Kyocera – tvrdost vrstvy



PŘÍLOHA P III: YG-1 DATA

Příloha P III: 1 YG-1 – Třída jakosti



YG
SELECTION GUIDE
V7 Plus
Please visit globalyg1.com/mat for material search
HIGH PERFORMANCE SOLID CARBIDE END MILLS
For Steels, Cast Iron and Stainless Steels
◎: Excellent ○: Good

SERIES							GMG55 GMG56	GMF54 GMF55	GMF58 GMF59	GMF62 GMF63	GMF52 GMF53	GMF56 GMF57	GMF60 GMF61	GMG16 GMG17	GMG18 GMG19	GMH58 GMH59	GMG12 GMG13	GMG14 GMG15	GMH56 GMH57	EMB72 EMB73
FLUTE							4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	5
HELIX ANGLE							35°/37°	35°/37°	35°/37°	35°/37°	35°/37°	35°/37°	35°/37°	45°	45°	45°	45°	45°	45°	41°~45°
CUTTING EDGE SHAPE							BALL NOSE	CORNER RADIUS	CORNER RADIUS	CORNER RADIUS	SQUARE	SQUARE	SQUARE	CORNER RADIUS	CORNER RADIUS	CORNER RADIUS	SQUARE	SQUARE	SQUARE	SQUARE
SIZE MIN							R1.5	D3.0	D3.0	D3.0	D3.0	D3.0	D3.0	D6.0	D6.0	D6.0	D6.0	D6.0	D6.0	D6.0
SIZE MAX							R12.5	D20.0	D25.0	D20.0	D20.0	D25.0	D20.0	D25.0	D25.0	D25.0	D25.0	D25.0	D25.0	D25.0
PAGE							8	9	10	11	14	15	16	18	19	21	23	24	25	26
							LONG LENGTH	SHORT LENGTH	LONG LENGTH	LONG LENGTH with NECK	SHORT LENGTH	LONG LENGTH	LONG LENGTH with NECK	LONG LENGTH	EXTRA LONG LENGTH	EXTRA LONG LENGTH	LONG LENGTH	EXTRA LONG LENGTH	EXTRA LONG LENGTH	LONG LENGTH
							Y-Coating	Y-Coating	Y-Coating	Y-Coating	Y-Coating	Y-Coating	Y-Coating	Y-Coating	Y-Coating	Y-Coating	Y-Coating	Y-Coating	Y-Coating	AlTiN
																CHIP SPLITTER NEW			CHIP SPLITTER NEW	
ISO	VDI 3323	Material Description	Composition / Structure / Heat Treatment		HB	HRc														
P	1	Non-alloy steel	About 0.15% C	Annealed	125		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
P	2	Non-alloy steel	About 0.45% C	Annealed	190	13	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
P	3	Non-alloy steel	About 0.45% C	Quenched & tempered	250	25	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
P	4	Non-alloy steel	About 0.75% C	Annealed	270	28	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
P	5	Non-alloy steel	About 0.75% C	Quenched & tempered	300	32	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
P	6	Low alloy steel		Annealed	180	10	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
P	7	Low alloy steel		Quenched & tempered	275	29	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
P	8	Low alloy steel		Quenched & tempered	300	32	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
P	9	Low alloy steel		Quenched & tempered	350	38	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
P	10	High alloyed steel, and tool steel		Annealed	200	15	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
P	11	High alloyed steel, and tool steel		Quenched & Tempered	325	35	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
M	12	Stainless steel	Ferritic / Martensitic	Annealed	200	15	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
M	13	Stainless steel	Martensitic	Quenched & Tempered	240	23	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
M	14	Stainless steel		Austenitic	180	10	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
K	15	Grey cast iron	Pearlitic / ferritic		180	10	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
K	16	Grey cast iron	Pearlitic (Martensitic)		260	26	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
K	17	Nodular cast iron	Ferritic		160	3	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
K	18	Nodular cast iron	Pearlitic		250	25	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
K	19	Malleable cast iron	Ferritic		130		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
K	20	Malleable cast iron	Pearlitic		230	21	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
N	21	Aluminum-wrought alloy	Not Curable		60															
N	22	Aluminum-wrought alloy	Curable	Hardened	100															
N	23	Aluminum-cast, alloyed	≤ 12% Si, Not Curable		75															
N	24	Aluminum-cast, alloyed	≤ 12% Si, Curable	Hardened	90															
N	25	Aluminum-cast, alloyed	> 12% Si, Not Curable		130															
N	26	Copper and Copper Alloys (Bronze / Brass)	Cutting Alloys, PB>1%		110															
N	27	Copper and Copper Alloys (Bronze / Brass)	CuZn, CuSnZn (Brass)		90															
N	28	Copper and Copper Alloys (Bronze / Brass)	CuSn, lead-free copper and electrolytic copper		100															
N	29	Non Metallic Materials	Duroplastic, Fiber Reinforced Plastic																	
N	30	Non Metallic Materials	Rubber, Wood, etc.																	
S	31	Heat Resistant Super Alloys	Fe Based	Annealed	200	15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
S	32	Heat Resistant Super Alloys	Fe Based	Cured	280	30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
S	33	Heat Resistant Super Alloys	Ni or Co Based	Annealed	250	25	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
S	34	Heat Resistant Super Alloys	Ni or Co Based	Cured	350	38	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
S	35	Heat Resistant Super Alloys	Ni or Co Based	Cast	320	34	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
S	36	Titanium Alloys	Pure Titanium		400 Rm		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◎
S	37	Titanium Alloys	Alpha + Beta Alloys	Hardened	1050 Rm		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◎
H	38	Hardened steel		Hardened	550	55														
H	39	Hardened steel		Hardened	630	60														
H	40	Chilled Cast Iron		Cast	400	42														
H	41	Hardened Cast Iron		Hardened	550	55														

6 YG YG-1 CO., LTD. Phone: +82-32-526-0909, www.yg1.kr, E-mail: yg1@yg1.kr

Phone: +82-32-526-0909, www.yg1.kr, E-mail: yg1@yg1.kr YG YG-1 CO., LTD. 7

Příloha P III: 2 YG-1 – popis

Tvrdokovové frézy V7 a V7 plus

- tvrdokovové stopkové frézy s proměnlivým úhlem šroubovice pro frézování korozivzdorných ocelí, slitin titanu, Inconelu a ocelí do 40 HRC a nově i nerezových ocelí
- nanozrnný SK slinutý karbid, AlTiN povlak, 4 a 5 břité, od ø 3 do ø 25 mm
- násobně vyšší produktivita a životnost, zvýšená odolnost proti vibracím