



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MODERNÍ POVRCHOVÉ ÚPRAVY NÁSTROJŮ PRO OBRÁBĚNÍ

MODERN SURFACE COATING OF CUTTING TOOLS FOR MACHINING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vlastimil Tříletý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Vlastimil Tříletý**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Akademický rok: 2020/21

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

Moderní povrchové úpravy nástrojů pro obrábění

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Celkový přehled povrchové úprav nástrojů pro obrábění různými technologiemi, zejména povlakovacími procesy. Zaměření aplikací povlaků na odolnost vůči teplotnímu a tribologickému zatížení při soustružení ocelí.

Cíle bakalářské práce:

Teoretický rozbor namáhání řezných nástrojů.
Moderní trendy v povlakování řezných nástrojů, jejich přínosy.
Experimentální zkoušky a hodnocení řezivosti nástrojů.

Seznam doporučené literatury:

- BUNSHAH, R. F. Handbook of hard coatings. Noyes Publications / William Andrew Publishing, N. York. 2001, pp. 550. ISBN 0-8155-1437-7.
- HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástrojů. VŠ skriptum. Brno: CERM, 2006. s. 230. 1. vyd. ISBN 80-214-2374-9.
- ARGON, A. S., VEPREK-HEIJMAN, M. G. J., ZHANG, R. F., S. VEPREK and S. H. Sheng. Superhard nanocomposites: Origin of hardness enhancement, properties and applications. Surface & Coating Technology 204 (2010), pp. 1898-1906.

GALASSI, I., M. PISKA, VEPREK-HEIJMAN, M. G. J., HOLUBAR, P., VEPREK, S. and T. CSELLE. Applications of hard and superhard nanocomposite coatings on tools for machining, forming and stamping – A Guide for SMEs. Vyšlo pod hlavičkou VINF (The Virtual Institute of Nano Films) Network of Excellence EXCELL, Rámcový program EC; 3/2011. [21.11.2013]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.yumpu.com/en/document/view/9282201/virtual-institute-of-nano-films-applications-of-shm-cz>

TÖNSHOFF, H. K., KARPUSCHEWSKI, B., MOHLFELD, A., SEEGER, H. Influence of Subsurface Properties on the Adhesion Strength of Sputtered Hard Coatings. Surface and Coatings Technology, 1999, Vol. 116-119, pp. 524-529.

JONES, M. I., McCOLL, I. R., GRANDT, D. M. Effect of Substrate Preparation and Deposition Conditions on the Preferred Orientation of TiN Coatings Deposited by RF Reactive Sputtering. Surface and Coatings Technology, 2000, Vol. 132, pp. 143-151.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tuto bakalářskou práci tvoří dvě hlavní části. V teoretické části jsou obecně rozděleny metody povlakování řezných nástrojů, mechanismy opotřebení řezných nástrojů a je popsáno experimentální hodnocení vlastností povlaků a hodnocení trvanlivosti nástrojů. Praktická část je zaměřena na vyhodnocení trvanlivosti VBD na základě pozorování vývoje opotřebení za pomoci elektronového rastrovacího mikroskopu.

Klíčová slova

PVD, CVD, HIPIMS, VBD, povlakování, opotřebení

ABSTRACT

This bachelor thesis consists of two main parts. The theoretical part generally describes methods for coating cutting tools, wear mechanisms of cutting tools and experimental evaluation of coating properties and evaluation of tool life. The practical part is focused on the evaluation of tool life based on the observation of the development of wear using a scanning electron microscope.

Key words

PVD, CVD, HIPIMS, cutting insert, coating, wear

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TŘÍLETÝ, Vlastimil. *Moderní povrchové úpravy nástrojů pro obrábění* [online]. Brno, 2021[cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132842>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Moderní povrchové úpravy nástrojů pro obrábění** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

17.05.2021

Datum

Vlastimil Tříletý

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné rady a připomínky při vypracování této bakalářské práce a Ing. Petře Sliwkové, Ph.D. za cenné rady s formální stránkou zpracování práce.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za veškerou podporu při mém studiu.

OBSAH

ÚVOD.....	8
1 METODY POVLAKOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ.....	9
1.1 Metoda povlakování PVD.....	9
1.1.1 Naprašování.....	9
1.1.2 Naprašování doutnavým výbojem rovinné diody.....	9
1.1.3 Magnetronové naprašování.....	10
1.1.4 HIMIPS – vysokovýkonné pulzní magnetronové naprašování.....	11
1.1.5 Radiofrekvenční naprašování – RF.....	13
1.1.6 Naprašování iontovým paprskem – IBS.....	13
1.1.7 Napařování.....	14
1.1.8 Odporové napařování.....	14
1.1.9 Napařování elektronovým svazkem.....	15
1.1.10 Obloukové napařování.....	16
1.1.11 Napařování laserem (pulzní laserová depozice).....	17
1.2 Metoda povlakování CVD.....	18
1.2.1 Metoda PECVD.....	20
1.2.2 Metoda LPCVD.....	20
1.2.3 Metoda MTCVD.....	20
1.3 Aplikace metod.....	21
1.4 PŘÍNOSY POVLAKŮ DEPONOVANÝCH HIPIMS.....	22
1.4.1 Povlaky CrN, CrAlN a CrAlSiN.....	22
1.4.2 Povlak TiAlSiN.....	22
1.4.3 Povlaky TiAlN/VN, TiAlCN/VCN a TiAlYN/VN.....	22
1.4.4 Povlak CrAlYN/CrN, CrAlYN/CrN + Al ₂ O ₃	23
1.4.5 Povlak CrN/NbN.....	23
2 TEORETICKÝ ROZBOR NAMÁHÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ.....	24
2.1 Silové působení při soustružení.....	24
2.2 Mechanismy opotřebení řezných nástrojů.....	25
2.2.1 Mechanismy opotřebení – fyzikálně-mechanické.....	25
2.2.2 Mechanismy opotřebení – chemické.....	28
2.3 Vliv povlaků na parametry řezného procesu.....	29
3 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY A HODNOCENÍ ŘEZIVOSTI NÁSTROJŮ.....	30
3.1 Zkoušky adhezně-kohezní.....	30
3.1.1 Vrypová zkouška – scratch test.....	30

3.1.2	Vtisková zkouška – Mercedes test.....	31
3.2	Měření tloušťky vrstvy.....	31
3.3	Měření mikrotvrdosti	32
3.3.1	Hanemannův mikrotvrdoměr.....	32
3.3.2	Instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti	32
3.4	Tribologické zkoušky – metody „pin-on-disc“ a „ball-on-disc“.....	33
3.5	Analýzy chemického složení.....	34
3.5.1	GD-OES.....	34
3.5.2	Analýzy založené na rentgenovém záření	34
3.6	Analýza mikrostruktury a chemického složení pomocí SEM.....	35
3.7	Hodnocení řezivosti nástroje.....	35
4	PRAKTICKÁ ČÁST	37
4.1	Materiálová charakteristika zkušebního disku	37
4.2	Parametry řezného procesu	38
4.3	Vývoj opotřebení VBD v čase	38
4.3.1	Analýza opotřebení VBD od výrobce 1 pro $v_c = 550$ m/min	42
4.3.2	Analýza opotřebení VBD od výrobce 1 pro $v_c = 650$ m/min	43
4.3.3	Analýza opotřebení VBD od výrobce 2 pro $v_c = 550$ m/min	47
4.3.4	Analýza opotřebení VBD od výrobce 2 pro $v_c = 650$ m/min	47
4.4	Vyhodnocení řezivosti	47
4.5	Měření geometrie břitu.....	49
4.6	Měření geometrie čela.....	50
4.7	Chemické složení povlaku	52
4.7.1	VBD od výrobce 1	52
4.7.2	VBD od výrobce 2	53
	ZÁVĚR.....	54
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	55
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	61

ÚVOD

Na trhu se první povlakované destičky objevily koncem 60. let 20. století. Jednalo se o destičky s CVD povlakem TiC o tloušťce 4–5 μm (patentovaný již v roce 1959) od firmy Sandvik Coromant. Dalšími vyvinutými povlaky byly TiN, TiCN a Al_2O_3 . Postupně vznikaly i vícevrstvé povlaky, neboť např. povlak Al_2O_3 vyžadoval mezivrstvu povlaku TiC pro lepší adhezi k podkladovému substrátu. Již v 80. letech se na trhu objevily destičky s PVD povlaky, nejužívanější byl povlak TiN deponovaný metodou reaktivní iontové implantace. Původně stačilo pár typů povlaků, které byly konkurencí tehdejšími nástrojovými materiály. V dnešní době se vzhledem ke stále rostoucím požadavkům používá kombinace několika vrstev povlaků pro docílení požadovaných vlastností (kombinace povlaků s dobrou adhezí k podkladovému substrátu s tvrdými povlaky s dobrou odolností proti opotřebením a oxidaci za vysokých teplot). Taktéž proběhl velký vývoj v povlakovacích metodách a v oblasti přípravy substrátu [1].

Vývoj v oblasti povlakování vyměnitelných břitových destiček a výzkum jejich využití je velmi důležitý, neboť technologie obrábění patří mezi nejpoužívanější metody strojní technologie. Používá se totiž jak pro výrobu hotových výrobků, tak i pro výrobu nástrojů pro ostatní výrobní technologie [2].

Hlavní problematikou dnešní doby není vývoj nových materiálů povlaků, ale především optimalizace jejich výroby a lepší využití již známých materiálů pro konkrétní požadavky [3]. Vzhledem ke stále vyšším požadavkům na proces obrábění je volba vhodného povlaku destičky velmi důležitá, neboť při špatném výběru destičky mohou nastat značné ekonomické ztráty ve výrobě.

Další významnou oblastí vývoje je geometrie nástroje. Firmy v dnešní době nabízejí celou řadu geometrií vyměnitelných břitových destiček. A to jak různé poloměry zaoblení břitu, nástrojové úhly, tak i celou škálu různých tvarů utvařečů třísek, které hrají významnou roli v obráběcím procesu.

1 METODY POVLAČOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Metody povlakování lze obecně rozdělit na fyzikální povlakování PVD (Physical Vapour Deposition) a chemické povlakování CVD (Chemical Vapour Deposition) [1].

1.1 Metoda povlakování PVD

Povlakování metodou PVD probíhá za sníženého tlaku (0,1 – 1,0 Pa) za pomoci fyzikálních metod, většinou bez chemických reakcí a za teplot nižších než 500 °C. Tvorba povlaku lze shrnout do třech základních kroků [1; 4; 5]:

- vytvoření páry ze zdrojového materiálu,
- přenesení páry od zdrojového materiálu na substrát,
- kondenzace páry na povrchu substrátu (vytvoření povlaku).

Fyzikální povlakování je možné rozdělit do třech základních skupin [1]:

- naprašování,
- napařování,
- iontová implantace.

1.1.1 Naprašování

Naprašování je metoda, u které je povlakovací materiál odprašován z terče (zdroj povlakovacího materiálu). K odprašování dochází pomocí bombardování terče kladně nabitými ionty. Většinou se jedná o ionty argonu tvořící plazmu, která je udržována nad terčem. Ionty jsou elektrickým polem nasměrovány a urychleny směrem k záporně nabitě katodě, jež představuje terč. Atomy základního materiálu jsou díky vysoké pohybové energii iontů z terče vyráženy. Odprašené atomy následně dopadají a kondenzují na podkladovém substrátu [1; 6].

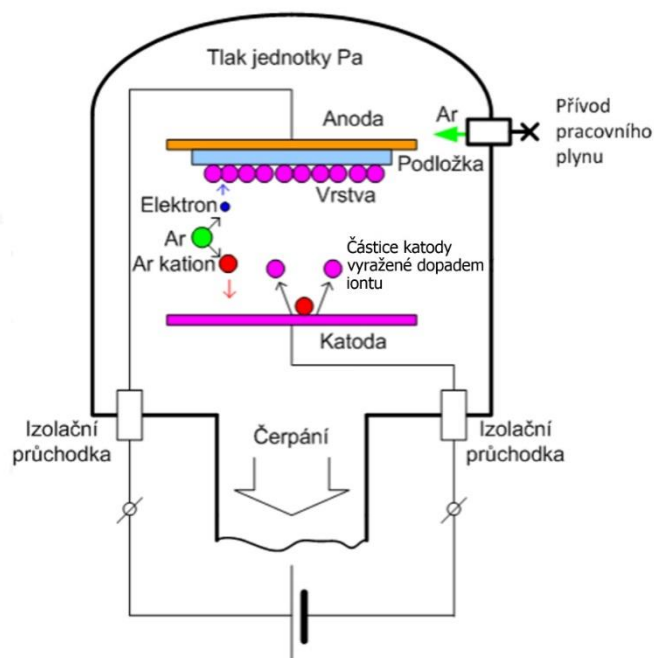
Vztah vyjadřující rychlost eroze (odprašování) terče (1) podle [1]:

$$R = 62,3 \cdot \frac{J \cdot S \cdot m_t}{\rho} \quad (1)$$

1.1.2 Naprašování doutnavým výbojem rovinné diody

Naprašování doutnavým výbojem rovinné diody je základní a nejjednodušší systém PVD povlakování pomocí naprašování. Záporně nabitá katoda (terč) a anoda (substrát) se nachází přímo proti sobě, obvykle 5–10 cm vzdálené od sebe. Rychlost růstu vrstvy je ovlivněna vzdáleností anody a katody, zdrojovým materiálem, velikostí odprašované vrstvy a tlakem pracovního plynu (na něm také závisí hustota výkonu na povrchu terče). Tato metoda má řadu nedostatků, které jsou z části způsobené jednoduchostí konstrukce (např.

nižší rychlost depozice či malá účinnost ionizace). Účinnost ionizace lze zvýšit využitím magnetového pole [1; 4]. Schéma zařízení pro napařování je na obrázku 1.



Obrázek 1. Schéma standardního napařování podle [7].

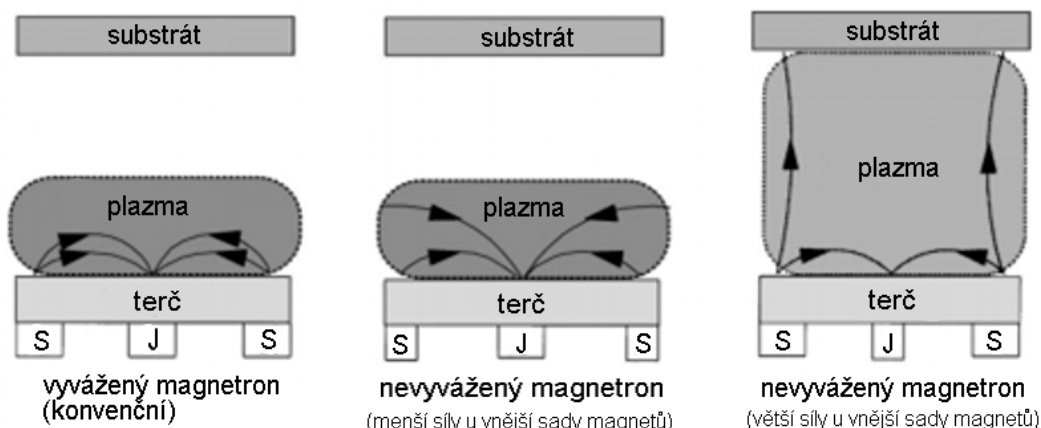
1.1.3 Magnetronové napařování

Oproti diodovému napařování u magnetronového napařování působí kromě elektrického pole také pole magnetické. Díky působení magnetického pole dochází k zakřivení dráhy nabitých částic, tím také k jejímu prodloužení a zvyšuje se pravděpodobnost ionizace. Z toho plyne výhoda magnetronového systému napařování oproti klasickému diodovému systému, neboť při větší ionizaci dochází ke zvýšení intenzity bombardování terče ionty, a to vede k vyšší rychlosti depozice. Díky vysoké účinnosti ionizace můžeme výboj udržet i při nižších tlacích, tlak se pohybuje kolem 10^{-1} Pa, při nízkém napětí (500 V) [4; 8]. Další výhodou je lepší adheze. Částice dopadají na substrát s energií od 1 do 10 eV, kdežto při obvyklém napařování s energií 0,1 až 0,3 eV. Právě tato vysoká energie zajišťuje výrazně lepší adhezi napařovaných vrstev k substrátu [8].

Podle typu magnetronu můžeme tento typ napařování rozdělit na dva druhy [1]:

- s vyváženým magnetronem,
- s nevyváženým magnetronem.

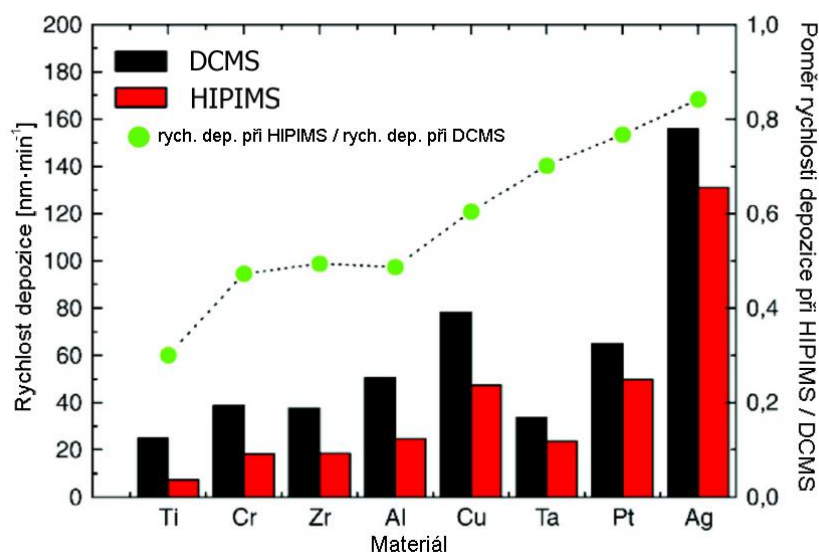
O vyvážený magnetron se jedná, pokud jsou velikosti síly vnitřních a vnějších magnetů shodné, pokud síly stejné nejsou, jedná se o magnetron nevyvážený. Většinou jsou větší síly u vnější sady magnetů [1]. Srovnání typu magnetronů je na obrázku 2.



Obrázek 2. Schematické znázornění plazmy u konvenčních a nevyvážených magnetronů podle [9].

1.1.4 HIMIPS – vysokovýkonné pulzní magnetronové naprašování

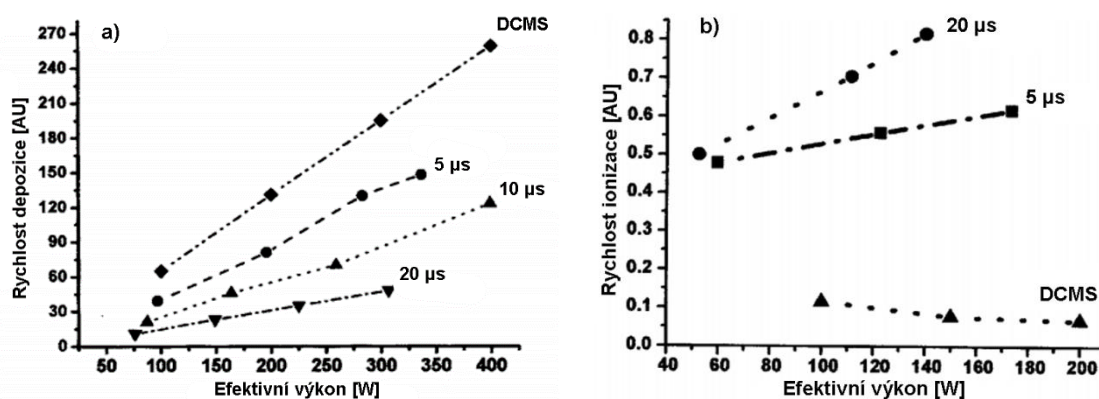
HIMIPS pracuje na stejném principu jako konvenční magnetronové naprašování DCMS (stejnoseměrné magnetronové naprašování) s tím rozdílem, že pro odprašování materiálu je využíváno krátkých vysokonapěťových impulzů. Díky tomuto cílenému impulzu dochází ke vzniku plazmy o vysoké hustotě a následně vysoké ionizaci povlakovacího materiálu. Vzhledem k tomu, že vysokonapěťové impulzy trvají krátkou dobu (řádově desítky až stovky μs), nedochází k přehřátí terče ani ostatních částí systému. Z vysoké ionizace povlakovacího materiálu vyplývají výhody naneseného povlaku, především vysoká hustota, vyšší tvrdost, lepší adheze k substrátu a povrch s nižší drsností. Nevýhodou oproti konvenčnímu DCMS je, že pro stejné rychlosti depozice je třeba vyšší energie, resp. při využití stejného výkonu je rychlost depozice u HIPIMS nižší než u DCMS. Rychlost depozice u HIPIMS je v porovnání s DCMS v rozmezí mezi 30-85 % podle deponovaného materiálu, jak je patrné z obrázku 3 [10; 11].



Obrázek 3. Porovnání rychlosti depozice u metody HIPIMS a DCMS podle [11].

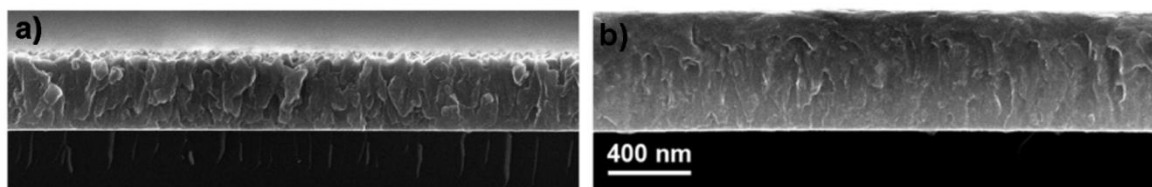
Rychlost depozice lze tedy ovlivnit změnou efektivního výkonu, tlaku, ale také změnou délky pulzů. Z výsledků měření dle [12] a tedy i z obrázku 4 a) vyplývá, že při změně délky pulzu z 20 μs na 5 μs dojde ke zvýšení rychlosti depozice povlaku z původních 20 % rychlosti depozice konvenčním magnetonovým naprašováním na 70 % (měření bylo prováděno při nanášení titanu při výkonu 300 W, tlaku 0,267 Pa). Pro různé materiály je změna rychlosti odlišná, ale má stejnou tendenci. Rychlejší depozice při zkrácení impulzů je důsledkem nedostatečně ustáleného procesu samonaprašování, což je proces, při kterém ionizované atomy naprašovaného materiálu vyráží další atomy. Díky tomu dochází k difuzi významné části ionizovaných atomů směrem k podkladovému substrátu a rychlost depozice je tedy vyšší [12].

Na délce pulzu též závisí rychlost ionizace (viz obrázek 4 b)), kdy s rostoucí délkou pulzu dochází k ustanovení samonaprašování a rychlost ionizace naopak roste. Je proto nutné vzhledem k požadovaným vlastnostem povlaku volit kompromis mezi rychlostí depozice a hustotou plazmy [12].



Obrázek 4. Vliv délky pulzu a efektivního výkonu na a) rychlost depozice b) rychlost ionizace podle [12].

Jak bylo zmíněno, u povlaků deponovaných HIPIMS je sice nižší rychlost depozice nebo je třeba vyšší energie pro stejnou rychlost, ale dochází ke zlepšení vlastností povlaku. Mezi DCMS a HIPIMS je nárůst hustoty povlaku o 5–15 %, záleží na materiálu (s výjimkou mědi a zirkonia, u nich jsou hodnoty velmi podobné). Na obrázku 5 je porovnání SEM snímků titanového povlaku deponovaného DCMS a HIPIMS. Na obrázku 5 b) lze vidět vyšší hustotu mikrostruktury povlaku a nižší drsnost u HIPIMS povlaku [13].



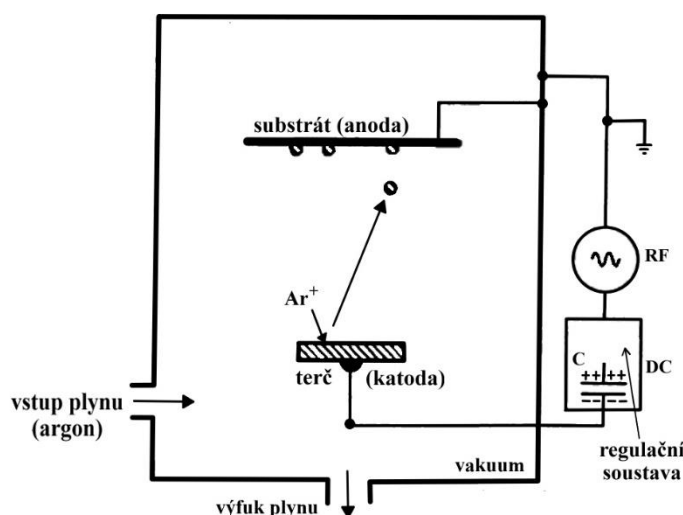
Obrázek 5. SEM snímky vrstvy Ti deponované a) DCMS b) HIPIMS [13].

Další pozorovanou vlastností povlaku je jeho tvrdost, která je u povlaků deponovaných HIPIMS opět vyšší než u DCMS. Tento nárůst tvrdosti u této metody je především důsledkem menší velikosti zrn u HIPIMS. Dalším faktorem je, že u DCMS povlaků se v mikrostruktuře objevují mikrotrhliny. S velikostí zrn zároveň souvisí i drsnost povrchu povlaku. S tím, jak se u HIPIMS tvoří menší zrna, rovněž tedy klesá i drsnost [14].

1.1.5 Radiofrekvenční naprašování – RF

RF naprašování umožňuje nanášení povlaků z materiálů, které nejsou možné nanášet pomocí metod, kde k erozi terče dochází pomocí stejnosměrného napětí. Při použití stejnosměrného napětí by došlo k dobití nevodivé katody dopadajícími kladnými ionty. Katoda by získala kladný náboj, došlo by k odpuzování dopadajících iontů a následně k zastavení odprašování atomů základního materiálu. Jedná se například o oxidy, nitridy či keramiku. Zmíněné materiály mají vysokou stejnosměrnou impedanci a k udržení plazmy je potřeba velmi vysoké napětí. Impedance těchto materiálů lze snížit zvýšením frekvence střídavého napětí. Obvykle se používá frekvence 13,56 MHz [7; 15].

Během tohoto procesu se v každé púlperiodě střídavého napětí mění polarita elektrod (střídání katody s anodou). Z principu naprašování vyplývá, že materiál, který je připojen na katodě, je bombardován kladně nabitými ionty, je odprašován. Pokud tedy při použití střídavého zdroje dochází ke změně polarity elektrod, docházelo by v momentě, kdy je katoda na substrátu, k odprašování právě naprašované vrstvy. Tomuto jevu je třeba zabránit. Jednou z možností je sériové zapojení kondenzátoru a střídavého zdroje (viz obrázek 6). Kondenzátor se nabije a následně vytváří automatické předpětí [7].



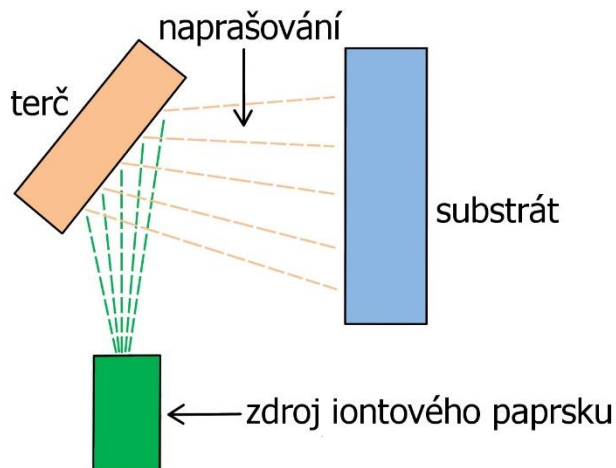
Obrázek 6. Schéma radiofrekvenčního naprašování podle [16].

V porovnání se stejnosměrným naprašováním má RF naprašování nižší rychlost depozice povlaku a náklady na výrobu touto metodou jsou vyšší. Z tohoto důvodu se spíše používá pro povlakování menších substrátů [17].

1.1.6 Naprašování iontovým paprskem – IBS

IBS metoda je založena na odprašování základního materiálu pomocí vysokoenergetického iontového paprsku. Ionty s vysokou pohybovou energií bombardují terč, z kterého jsou uvolňovány atomy základního materiálu a následně deponují na substrát. Celý proces probíhá za nízkého tlaku (kolem 10^{-2} Pa) v povlakovací komoře. Díky nízkému tlaku v komoře v kombinaci s vysokou energií iontového paprsku je zajištěna vysoká čistota povlaku, vynikající adheze a stejnoměrnost vrstvy [1; 18]. Vzhledem k možnosti

přesného řízení procesu má velmi nízký rozptyl a absorpci atomů. Povlaky jsou vyráběny s vysokou přesností, ale náklady na povlakování jsou vyšší vzhledem k nižší rychlosti depozice a delšímu cyklu [18]. Schéma procesu je zobrazeno na obrázku 7.



Obrázek 7. Schéma naprašování iontovým paprskem podle [19].

1.1.7 Napařování

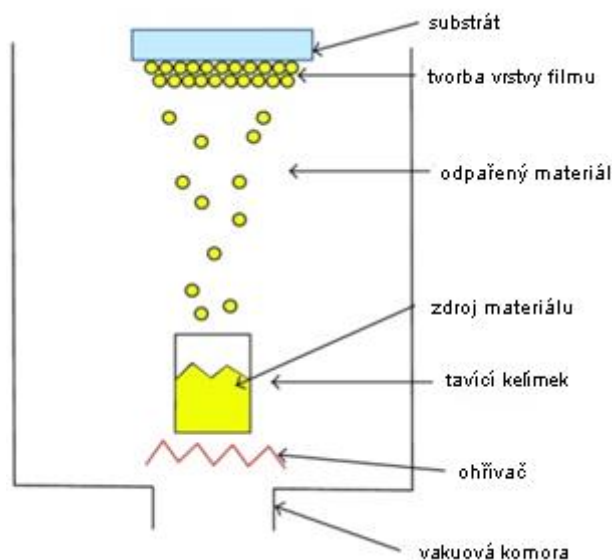
U metody napařování probíhá proces povlakování ve vakuu za sníženého tlaku (10^{-3} až 10^{-8} Pa). Zdrojový materiál je odpařován z terče a následně kondenzuje na substrátu. Do vakuové komory je navíc přiváděn argon pod vyšším tlakem (0,7 až 26,7 Pa). Argon v komoře slouží ke zmenšení střední volné dráhy (tj. průměrná vzdálenost uražená částicí mezi dvěma srážkami), neboť v důsledku nízkého tlaku v komoře je střední volná dráha velká v porovnání se vzdáleností mezi terčem a substrátem. Díky tomu je tloušťka naneseného povrchu rovnoměrnější (jinak by docházelo k nanesení větší vrstvy v oblasti přímo nad terčem) [1; 20].

Obvykle se tato metoda dělí podle technologie ohřevu vypařovaného materiálu [1]:

- průchodem proudu odporovým členem,
- indukci,
- elektronovým svazkem,
- elektrickým obloukem (pulzní a nízko-napětový),
- laserem.

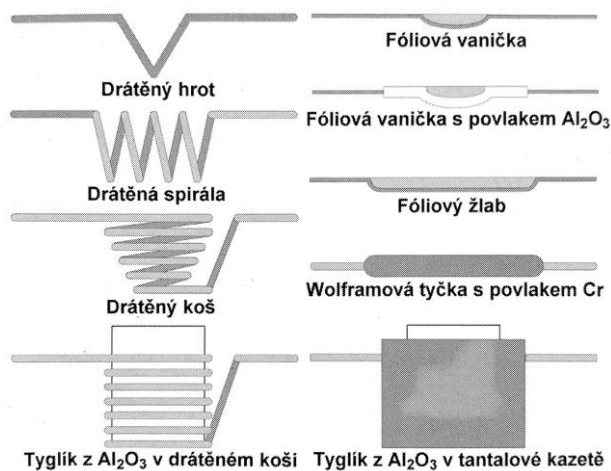
1.1.8 Odporové napařování

U metody odporového napařování jsou k ohřevu terče využívány vyhřívané dráty či kovové fólie. Požadavkem na materiál drátků a fólií je především vysoká teplota tavení a nízký tlak par, aby nedocházelo ke kontaminaci nanášeného povlaku. Tento předpoklad splňují žáruvzdorné kovy jako je např. wolfram, molybden a tantal. Pro teploty ohřevu nižší než $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ je možná i výroba z materiálů s nižší teplotou tavení jako je např. železo, platina či nikl [1]. Schéma zařízení je uvedeno na obrázku 8.



Obrázek 8. Schéma odporového napařování podle [21].

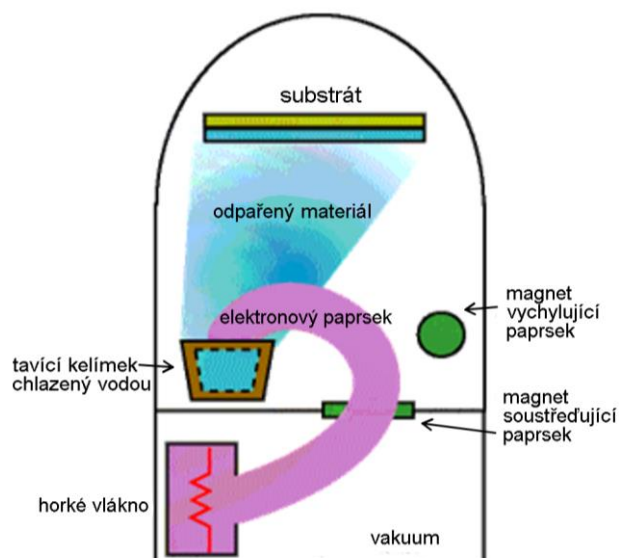
Vyhřívané dráty a kovové fólie jsou vyráběny nejen z různých materiálů, ale také v různých tvarových variantách [1]. Některé z těchto variant jsou k vidění na obrázku 9.



Obrázek 9. Odporově ohříváné odpařovací zdroje [1].

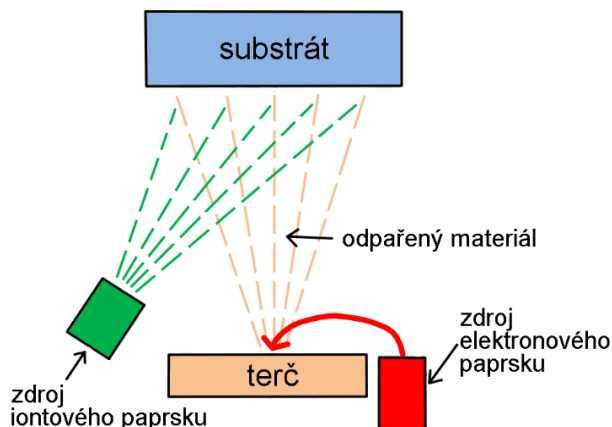
1.1.9 Napařování elektronovým svazkem

K odpařování zdrojového materiálu z terče dochází u metody napařování elektronovým svazkem pomocí vysokovýkonných elektronových paprsků. Elektronový paprsek je vybuzen pomocí zahřívání wolframového vlákna až do stavu, při kterém dochází k vytvoření toku elektronů. Vlákno je ohříváno průchodem velkého elektrického proudu. Tento ohřívací proces probíhá mimo oblast depozice povlaku (k omezení znečištění povlaku), což je možno vidět i na obrázku 10. Pomocí systému magnetů jsou elektrony soustředěny do svazku a zacíleny na zdrojový materiál. Díky dopadu elektronů s vysokou pohybovou energií dochází k ohřátí materiálu a k jeho vypařování. Důležité je, aby byl tyglík (tavící kelímek) chlazen vodou, neboť by mohlo dojít k jeho tavení [22].



Obrázek 10. Schéma napařování pomocí elektronového paprsku podle [22].

Tato metoda může být navíc opatřena iontovým paprskem (tzv. IAD metoda), jako je tomu na obrázku 11. Aplikace iontového paprsku přináší řadu výhod. Především díky němu vzniká povlak s vyšší hustotou (s vyšší mechanickou odolností). Také dochází oproti klasickému elektronovému odpařování k mnohem menšímu rozptylu a vzhledem k možnosti změny intenzity iontového paprsku je IAD metoda mnohem flexibilnější [18].



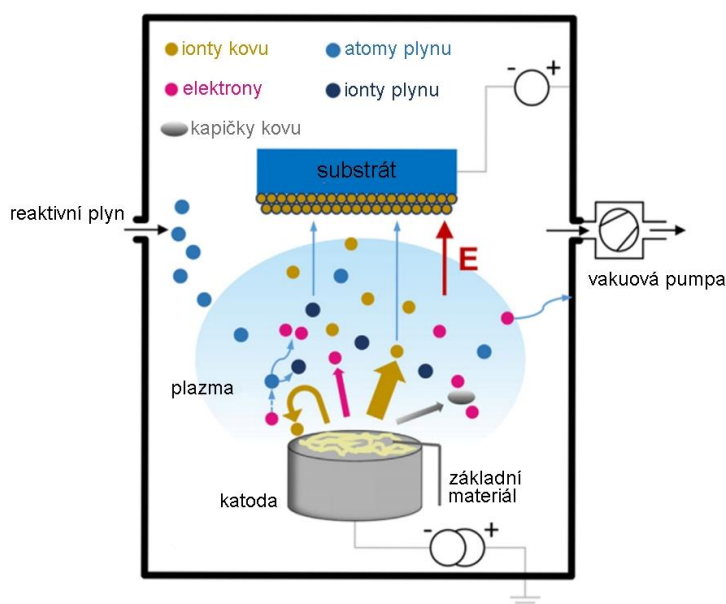
Obrázek 11. Schéma napařování elektronovým svazkem s pomocí iontového paprsku podle [19].

Ostřelování povrchu substrátu pomocí iontového paprsku lze využít i u ostatních metod povlakování, jak u napařování, tak i u napařování. Vlivem iontů dopadajících na povrch substrátu dochází k částečnému odprašení již vzniklé vrstvy, tudíž dochází ke zpomalení procesu povlakování, ale naopak roste kvalita povlaku [1].

1.1.10 Obloukové napařování

U metody obloukového napařování se využívá odpařování materiálu z terče pomocí pohybující se katodové skvrny. Jedná se o bodové hoření, díky němuž může být teplota skvrny 10000–20000 °C. Většina odpařeného materiálu je díky vysokému proudu ionizo-

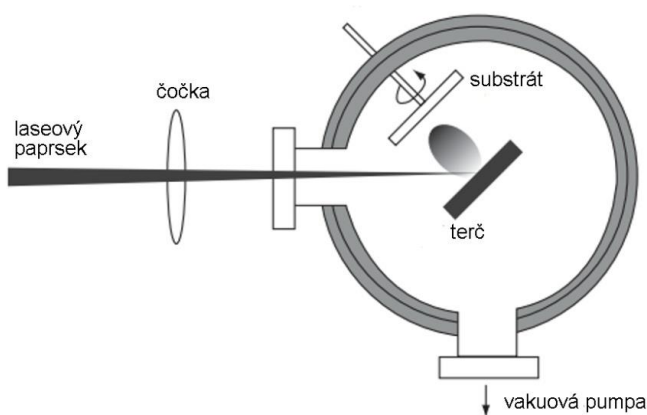
vána a vytváří plazmu, což vede ke zlepšení adheze povlaku k podkladovému substrátu. Pro zvýšení kvality povlaku a lepší využitelnosti terče se využívá řízení elektrického obvodu pomocí magnetického pole. I přesto povlak obsahuje mikroskopické kapičky kovu (makročástice), které mají negativní vliv na kvalitu povrchu povlaku (vyšší drsnost, vyšší součinitel tření či zhoršená odolnost vůči korozi). Tento nedostatek lze omezit využitím elektromagnetického filtru makročástic nebo méně účinnými způsoby jako mechanickým odstíněním či pomocí pulzního předpětí. Vzhledem k principu metody (odpařování materiálu pomocí elektrického proudu) lze tato metoda využít pouze pro povlakování elektricky vodivých materiálů [1; 23]. Schéma zařízení pro obloukové odpařování je na obrázku 12.



Obrázek 12. Schéma obloukového napařování podle [23].

1.1.11 Napařování laserem (pulzní laserová depozice)

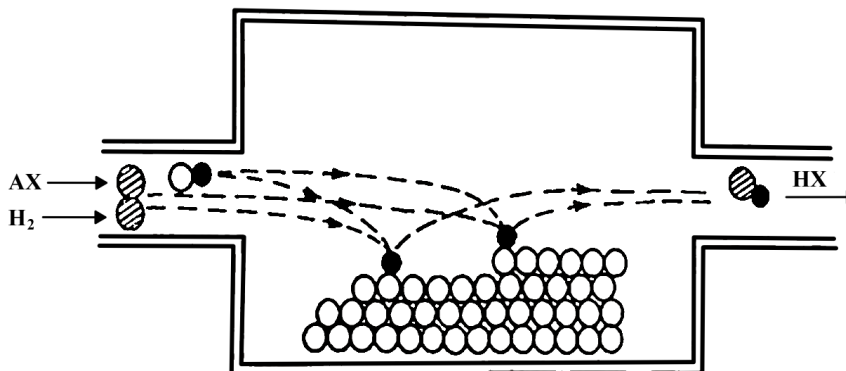
Metoda napařování laserem využívá odpařování materiálu pomocí laserového paprsku (viz obrázek 13). Díky vysoké energii odpařovaného materiálu vzniká povlak s vyšší kvalitou a lepší adhezí. Nevýhodou tohoto systému je komplikovanost přenosu laserového paprsku od zdroje do vakuové komory a malá velikost povlakované plochy vzhledem k malé ploše, ze které je schopen laserový paprsek materiál odpařovat [1].



Obrázek 13. Schéma pulzní laserové depozice podle [24].

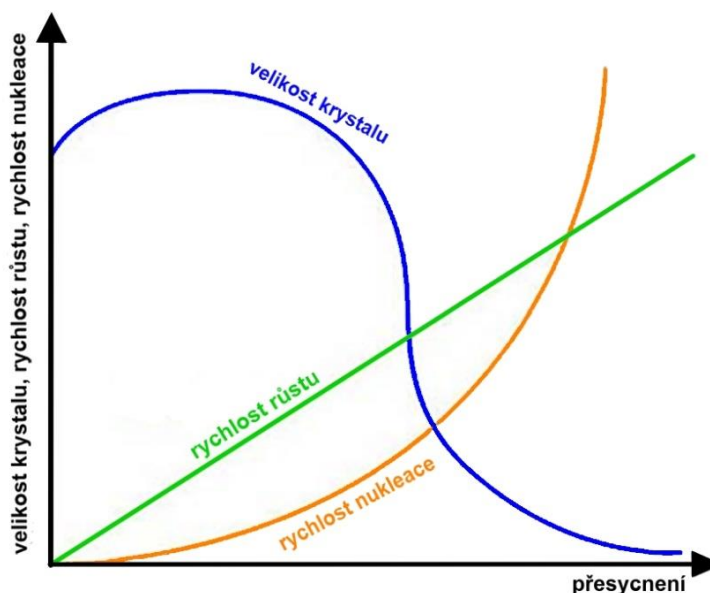
1.2 Metoda povlakování CVD

CVD je proces povlakování, při kterém se reaktanty (těkavé sloučeniny materiálu) přivádí do zahřáté reakční komory. V komoře dochází k reakci a vzniká netěkavá pevná látka, která se ukládá na substrát a dochází k vytvoření tenké vrstvy povlaku (viz obrázek 14). Celý proces probíhá za vysokých pracovních teplot (až 1500 °C) [4; 5].



Obrázek 14. Schéma CVD procesu [4].

Vlastnosti povlaku lze ovlivnit teplotou daného substrátu a mírou přesycení páry. Míra přesycení páry ovlivňuje především rychlost nukleace vrstvy, velikost krystalů, ale má vliv i na rychlost růstu (viz obrázek 15). Teplota substrátu pak ovlivňuje rychlost růstu vrstvy. Monokrystalické vrstvy pak vznikají při nízkém přesycení páry a za vysoké teploty substrátu. Naopak polykrystalické a nanokrystalické vrstvy vznikají při vysokém přesycení páry a nízké teplotě substrátu, neboť rychlost nukleace převyšuje rychlost růstu a dochází k tvorbě krystalů s menšími rozměry [5].



Obrázek 15. Vliv přesycení na velikost krystalů, rychlost růstu a rychlost nukleace podle [25].

Rozsah použití CVD limituje vysoká pracovní teplota. Z tohoto důvodu se používá spíše pro povlakování slinitých karbidů či cermetů, neboť při povlakování nástrojových ocelí dojde k ovlivnění podkladového substrátu. Teplotu procesu lze snížit využitím někte-

ré z nekonvenčních CVD metod, které probíhají při nižších pracovních teplotách díky jinému typu aktivace reakce. Vzhledem ke složitosti změny složení nanášené vrstvy nelze vytvářet povlaky, které kombinují více typů kovů (např. (TiAl)N, (AlTi)N). V důsledku výskytu zbytkových tahových napětí ve vrstvě povlaku nelze povlakovat ostré hrany [1].

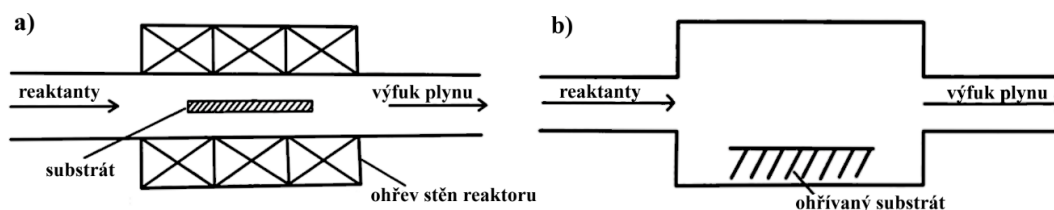
Reaktory

Typické jsou dva druhy reaktorů [1]:

- s horkou stěnou,
- se studenou stěnou.

U reaktoru s horkou stěnou dochází k ohřevu nádoby reaktoru, díky čemuž je zajištěna stejná teplota jak stěny reaktoru, tak samotného substrátu (viz obrázek 16 a)). Problémem tohoto řešení je, že následně dochází k usazování částic nejen na povrch substrátu, ale také na povrchu stěny reaktoru. Navíc může dojít k reakci par s vyhřátou stěnou reaktoru, a tedy i ke kontaminaci vrstvy povlaku na samotném substrátu. Toto řešení je tedy více vhodné pro povlakování, u kterého dochází k exotermické reakci, neboť díky ohřevu stěny na vysokou teplotu je pak zabráněno nežádoucí depozici částic na stěnu reaktoru [4].

Naproti tomu reaktor se studenou stěnou (viz obrázek 16 b)) je využíván pro povlakování, kde dochází k endotermické reakci. U tohoto řešení je ohříván pouze substrát s podložkou, na které je umístěn. Částice se usazují především na ohřátý substrát, nikoliv na stěnu reaktoru, která je chlazená, aby se předešlo depozici částic na stěnu a reakci par se stěnou reaktoru [4].



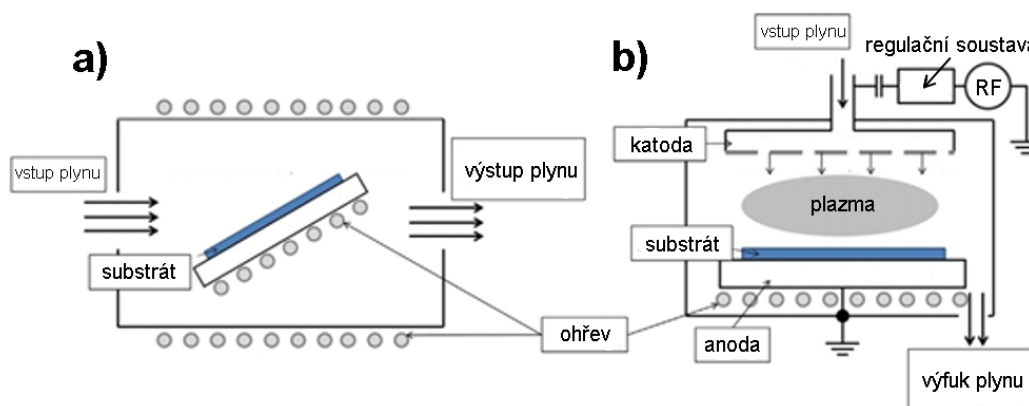
Obrázek 16. Schéma reaktoru a) se studenou stěnou a b) s horkou stěnou podle [4].

V dnešní době jsou nejvíce zavedené CVD metody podle [1; 4; 5]:

- nízkotlaká CVD metoda (LPCVD),
- plazmatem podporované CVD metody (PACVD, PECVD),
- CVD metoda se žhavicím vláknem (HFCVD),
- laserem podporovaná CVD metoda (LCVD),
- metal-organická CVD metoda (MOCVD),
- CVD metoda v přítomnosti aerosolu (AACVD),
- středně-teplotní CVD metoda (MTCVD).

1.2.1 Metoda PECVD

U metody PECVD může povlakování probíhat za výrazně nižších teplot (méně než 300 °C) než u konvenční metody CVD (až 1500 °C). V reaktoru je prostor mezi elektrodami vyplněn reaktivními plyny a je zde vytvořena plazma (viz obrázek 17). Díky tomu jsou molekuly plynu aktivovány energií, která je transformována při srážce s elektrony, namísto tepelné energie. Právě proto může proces probíhat za nižších teplot. Nižší teplota procesu umožňuje větší variabilitu výběru podkladového substrátu, neboť nedochází k tak výraznému teplotnímu ovlivnění jako u konvenčního CVD povlakování [4; 5].



Obrázek 17. Srovnání a) horizontálního CVD reaktoru a b) paralelního PECVD reaktoru podle [5].

1.2.2 Metoda LPCVD

Povlakování metodou LPCVD probíhá v trubkovém reaktoru s horkou stěnou za nízkého tlaku, které nahradily atmosférické reaktory se studenou stěnou využívané dříve. LPCVD metoda umožňuje zpracovat větší počet destiček a má rovnoměrnější tloušťku povlaku [26].

1.2.3 Metoda MTCVD

Povlakování metodou MTCVD probíhá za snížených teplot. Oproti konvenční metodě CVD, u které je teplota až 1500 °C, se teplota u MTCVD pohybuje mezi 700 až 900 °C. Právě díky nižší reakční teplotě zůstává podkladový slinutý karbid houževnatý a neztrácí odolnost vůči mechanickým rázům [27]. Dosažení snížené teploty lze za pomoci nahrazení reakčního plynu. Namísto methanu (CH₄), jako je tomu u konvenční CVD metody, je u MTCVD používán acetonitril (CH₃CN). Depoziční plyn u MTCVD metody kromě CH₃CN obsahuje také chlorid titaničitý (TiCl₄) a molekulární vodík H₂ [28]. Např. reakce při tvorbě povlaku TiCN je popsána následující rovnicí (2) podle [1]:



U konvenční metody CVD obsahuje depoziční plyn CH₄, TiCl₄ a molekulární dusík N₂, reakce je pak popsána rovnicí (3) podle [1]:



Oproti metodě PVD má nižší rychlost depozice povlaku. Z toho vyplývá jistá nevýhoda této metody, neboť s nižší rychlostí depozice souvisí pomalejší výroba. Přesto je ale rychlost depozice vyšší než u konvenční CVD metody. Další nevýhodou je, že v závislosti na umístění substrátu v reakční komoře roste, resp. klesá tloušťka povlaku. Povlaky na substrátech umístěných dále od vstupu plynu bývají tenčí než ty, které jsou blíže ke vstupu plynu [28].

Metoda povlakování MTCVD je v dnešní době často využívána pro výrobu vícevrstevných povlaků určených k soustružení ocelí (při vysokých řezných rychlostech a dlouhé době v záběru). MTCVD povlaky (jako je např. TiCN – Al₂O₃ – TiN) totiž vykazují velmi dobrou odolnost vůči teplotnímu a tribologickému zatížení [28].

1.3 Aplikace metod

Užití metod povlakování CVD je vhodné pro výrobu VBD určených pro hrubovací operace při obrábění ocelí. Vytváří hustší povlak a zajišťuje tedy lepší tepelnou odolnost povlaku, která je výhodná [29]. Především se využívají metody probíhající při nižších reakčních teplotách jako je MTCVD či PACVD, neboť během procesu nedochází k výraznému ovlivnění podkladového substrátu, což je vzhledem k funkčnosti destičky důležité (např. funkčně gradientní substrát). Díky zachování houževnatosti substrátu mají tyto destičky vyšší odolnost vůči mechanickým rázům. Je proto možné vyrábět i destičky s ostřejšími úhly břitů, tudíž povlaky vyráběné metodou MTCVD mají širší variabilitu uplatnění [27].

PVD jsou pak více vhodné pro výrobu VBD na dokončovací operace. Tyto povlaky mají nižší součinitel tření, eliminují se otřepy a tak vzniká kvalitnější povrch obrobku. Nižší součinitel tření má také vliv na sníženou generaci tepla během obrábění a efektivnější odvod třísky z místa řezu, díky tomu je životnost ostří vyšší. Dalším faktorem je možnost povlakovat ostré hrany na rozdíl od CVD, což je u dokončovacích metod výhodné [29; 30]. Při výběru konkrétní metody PVD se musí zohlednit několik kritérií, které ovlivňují volbu způsobu povlakování. Musí se zohlednit materiál povlaku, neboť ne všechny metody jsou vhodné pro všechny materiály (např. metodou obloukového odpařování můžeme nanášet pouze povlaky z elektricky vodivých materiálů). Pro vyšší kvalitu povlaku volíme spíše napařovací metody, které jsou ale složitější, pomalejší a tím pádem také dražší na výrobu. Proto se často užívají v automatizované výrobě pro nanášení tenkých filmů, u kterých deponování netrvá tak dlouho. Napařování je využíváno při nanášení povlaků s větší tloušťkou, vzhledem k vyšší rychlosti deponování [1; 31].

1.4 PŘÍNOSY POVLAČKŮ DEPONOVANÝCH HIPIMS

Díky možnosti povlakovat složitěji tvarované destičky a tvorbě hladšího povrchu jsou HIPIMS povlaky vhodnější pro obrábění houževnatějších slitin se sklonem k adhezi (slitiny na bázi Niklu či hliníku). Dochází k lepšímu odvodu třísek a nedochází k tak výrazné tvorbě nárůstku na břitu, což má vliv nejen na životnost nástroje, ale i na přesnost a kvalitu obrobku [32].

Dalším přínosem je vyšší adheze povlaku k substrátu. V kombinaci s výhodně zvolenou adhezní mezivrstvou je adheze ještě vyšší. O výhodně zvolenou vrstvu se jedná, za předpokladu, že je vhodně zvolená tloušťka mezivrstvy vzhledem k drsnosti substrátu. Nejen příliš tenká, ale i příliš silná adhezní mezivrstva nevede k tíženému výsledku. Vhodně zvolená mezivrstva pak vede k zvýšení životnosti nástroje [33].

Pro vyšší hustotu, tvrdost povlaku a především odolnosti vůči oxidaci při vyšších teplotách mají vyšší využití při vysokorychlostním obrábění při zvýšených teplotách než povlaky deponované konvenčním magnetronovým naprašováním [34].

1.4.1 Povlaky CrN, CrAlN a CrAlSiN

Předností CrN povlaku je jeho dobrá adheze k substrátu. Povlak také vykazuje nízká vnitřní pnutí a tedy možnost nanášet povlaky o větší tloušťce, vysokou odolnost vůči korozi. Pracovní teplota je omezena teplotou přibližně 650 °C, tedy teplotou omezující oxidační odolnost povlaku [35].

Ke zvýšení tvrdosti a oxidační stability přispívají další prvky, jako např. Al a Si. CrAlN vykazuje oxidační odolnost až do teplot přibližně 900 °C. Oproti CrN má také vyšší tvrdost. Míra zvýšení tvrdosti zaleží na poměru Cr a Al jak vyplývá ze studie [36]. U nanokompozitního povlaku CrAlSiN dochází oproti CrAlN k dalšímu nárůstu tvrdosti. Vlastnosti těchto povlaků v kombinaci s výhodami, která přináší HIPIMS (vysoká hustota, rovnoměrná tloušťka), předurčují tyto povlaky pro aplikaci při vysokoteplotním zatížení nástroje [35; 36].

1.4.2 Povlak TiAlSiN

TiAlSiN je velmi tvrdý nanokompozitní povlak, u kterého je krystalická fáze TiAlN zakotvená v amorfni fázi Si_3N_4 . Právě nanokompozitní struktura určuje dobré mechanické a termální vlastnosti (vysoká tvrdost, dobrá adheze, nízký koeficient tření či odolnost vůči oxidaci při vysokých teplotách až okolo 1000 °C). Tento povlak nachází uplatnění při povlakování vysokorychlostních rezných nástrojů a je běžně komerčně používán [37].

1.4.3 Povlaky TiAlN/VN, TiAlCN/VCN a TiAlYN/VN

TiAlN/VNZ je povlak, který vykazuje vysokou tvrdost, hladký povrch, nízký koeficient tření a nízkou afinitu k obráběnému materiálu. Je tedy vhodný pro obrábění relativně měkkých slitin, které mají tendenci ulpívat na materiálu (slitiny na bázi Al, Ti, Ni) a to díky tvorbě oxidu vanadičného V_2O_5 s dobrými lubrikačními vlastnostmi, který zajišťuje nízký koeficient tření. Také se využívá pro obrábění kompozit s kovovou maticí, kde je povlak vystaven nejen měkkému kovu matrice, ale i abrazivní výztuži. Odolnost vůči oxidaci se pohybuje okolo teploty 800 °C [34].

U TiAlCN/VCN dochází vlivem přidáním uhlíku ke snížení odolnosti vůči oxidaci na teplotu okolo 750 °C, ale zároveň dojde ke snížení koeficientu tření a drsnosti povrchu [38]. Přidáním yttria, tedy TiAlYN/VN, je naopak teplota odolnosti povlaku vůči oxidaci navýšena k teplotě okolo 900 °C, ale dochází k nárůstu koeficientu tření a drsnosti povrchu. Zvýšení koeficientu tření vlivem přidání yttria může být vysvětleno tím, že yttrium brání oxidaci VN během opotřebení. Tento povlak je dobrou volbou při vysokorychlostním obrábění tvrdých kalených ocelí za sucha [34; 38; 39].

1.4.4 Povlak CrAlYN/CrN, CrAlYN/CrN + Al₂O₃

S odolností vůči oxidaci u teplot okolo 850 °C je povlak CrAlYN/CrN dobrým ekvivalentem k povlaku TiAlYN/VN pro vysokorychlostní obrábění ocelí za sucha. Dalším využitím tohoto povlaku může být aplikace pro válcování za tepla nebo tvářecí nástroje díky jeho vysoké stabilitě za tepla [38].

Vzhledem k vysoké oxidační odolnosti samotného povlaku CrAlYN/CrN již vrchní vrstva oxidu hlinitého výrazněji nezvyšuje odolnost vůči oxidaci, ale může zlepšit tribologické vlastnosti povlaku a tedy i odolnost proti opotřebení nástroje [40].

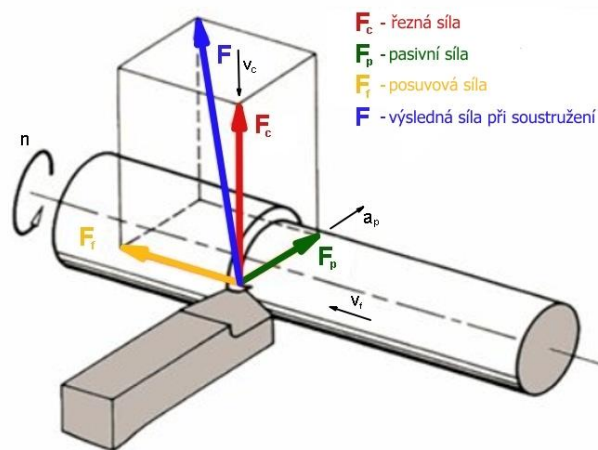
1.4.5 Povlak CrN/NbN

Pro jeho dobrou adhezi k substrátu se využívá pro aplikace na tvářecích nástrojích, kde je důležité, aby povlak odolával velkým vnitřním napětím na rozhraní povlaku a substrátu, které při tváření v povlaku vznikají. Využití pro obrábění je omezeno nižší teplotou odolnosti vůči oxidaci [41]. Dalším významným využitím může být aplikace u lékařských implantátů. Díky zvýšené odolnosti vůči korozi je aplikovatelný i pro pacienty se zvýšenou citlivostí na kovové ionty [42].

2 TEORETICKÝ ROZBOR NAMÁHÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

2.1 Silové působení při soustružení

Řezné síly jsou důležitým faktorem ovlivňující proces obrábění. Zkoumání těchto silových vlivů je nutné pro řešení celé řady parametrů řezného procesu. Mají velký vliv na ekonomický výsledek obráběcího procesu, neboť ovlivňují tepelné procesy v průběhu obrábění. S tím souvisí především životnost nástroje. Dále tyto silové účinky mají vliv na volbu příkonu stroje nebo na realizaci celé technologické soustavy (z hlediska tuhosti, pevnosti i dynamické stability řezného procesu) [43].



Obrázek 18. Silové schéma při soustružení podle [44].

Sílu F , kterou je nástroj vtlačován do obráběného materiálu lze rozložit do tří složek (viz obrázek 18). Řezná síla a axiální (posuvová) síla jsou aktivními složkami řezání, naopak radiální síla je složkou pasivní [43].

Výpočet sil při soustružení pomocí empirických vztahů (4; 5; 6) podle [2]:

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \quad (4)$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} \quad (5)$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \quad (6)$$

C_{F_c} , C_{F_p} , C_{F_f} jsou materiálové konstanty, x_{F_c} , x_{F_p} , x_{F_f} exponenty vlivu šířky a_p a y_{F_c} , y_{F_p} , y_{F_f} exponenty vlivu posuvu f . Jedná se o empiricky stanovené hodnoty pro konkrétní podmínky řezného procesu [2].

Výsledná síla při soustružení je pak dána vztahem (7) podle [2]:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (7)$$

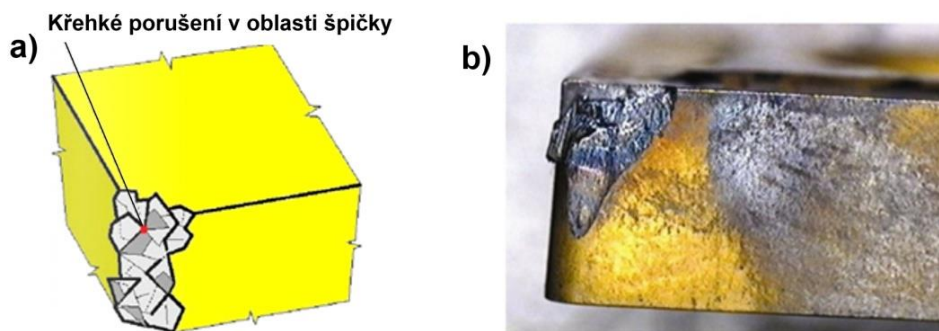
2.2 Mechanismy opotřebení řezných nástrojů

K opotřebení nástroje dochází důsledkem kontaktu nástroje s obrobkem a odváděné třísky s čelem nástroje. Opotřebení nástroje je pak závislé na mnoha různých faktorech. Závisí samozřejmě na druhu obráběného materiálu, konkrétním způsobu obráběcí metody, druhu řezu (plynulý či přerušovaný), řezných podmínkách, geometrii a materiálu samotného nástroje. Mechanismy opotřebení nástroje lze rozdělit na mechanismy fyzikálně-mechanické, mechanismy chemické a jejich kombinace [2].

2.2.1 Mechanismy opotřebení – fyzikálně-mechanické

Křehký lom břitu

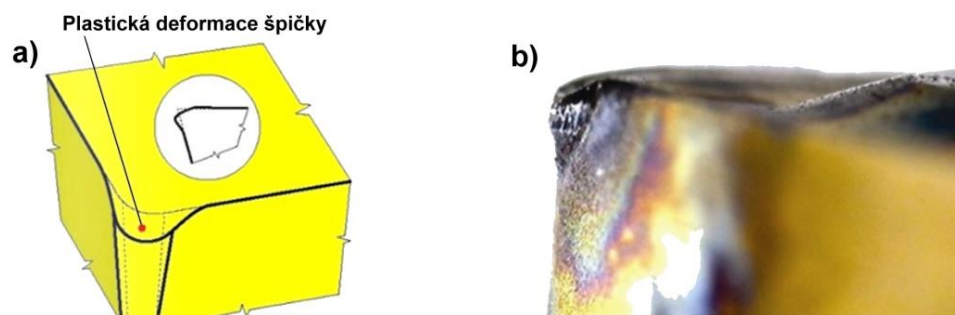
Ke křehkému lomu břitu dochází v důsledku vysokého mechanického zatížení nebo krátkodobého přetížení břitu, které může být způsobeno rázem v místě břitu (náraz břitu na vměstky či nehomogenní tvrdou fázi v obráběném materiálu, přerušovaný řez nebo náhlá změna průřezu třísky). Jedná se o mechanismus vedoucí k okamžitému ukončení činnosti nástroje (viz obrázek 19) [2; 45].



Obrázek 19. a) Schéma křehkého lomu [45] a b) snímek lomu destičky [46].

Plastická deformace břitu

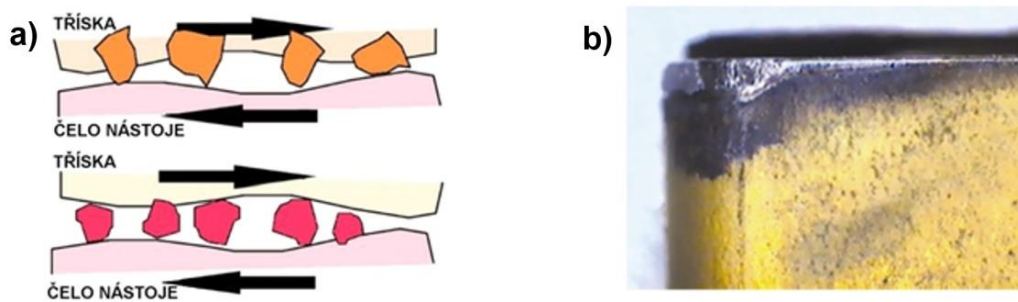
Plastická deformace břitu vzniká v důsledku kombinace vysokých teplot v místě řezu a velkých tlaků na břit. Vlivem těchto zatížení dochází k měknutí pojiva. Projevuje se deformací ostří (viz obrázek 20) a vzniká u operací probíhajících za vysokých teplot, s dlouhou dobou nástroje v záběru, při vysoké řezné rychlosti a s vysokými posuvy [46; 47].



Obrázek 20. a) Schéma plastické deformace [45] a snímek plastické deformace [46].

Abraze břitu

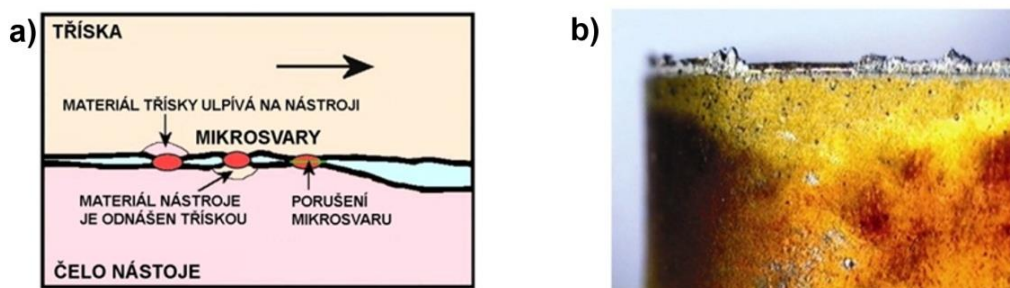
Abraze je relativně souměrný brusný ořez vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročásticemi nástroje. Vlivem abraze dochází k ořezu na hřbetu i čele nástroje (viz obrázek 21). Jedná se o žádoucí opotřebení, jelikož je dobře předvídatelné a kontrolovatelné [2].



Obrázek 21. a) Schéma abrazivního opotřebení [45] a b) snímek abrazivního ořezu na hřbetu [46].

Adheze břitu

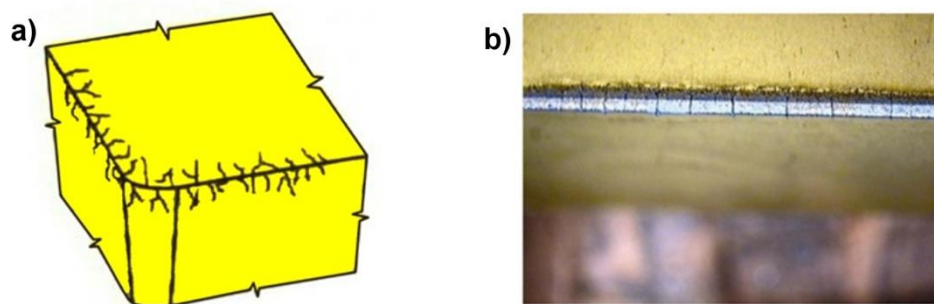
Mechanismus adheze funguje na principu tvorby a okamžitém porušování mikrosvarových spojů na styku nerovností čela a třísky a následné tvorbě nárůstku na břitu (viz obrázek 22). K tvorbě mikrosvarů dochází díky blízké chemické afinitě materiálů (schopnost materiálu reagovat s jiným materiálem), což lze ošetřit použitím povlakované destičky. Další parametry přispívající k tvorbě adhezivního mechanismu jsou vysoká teplota a tlak v místě řezu [2; 46].



Obrázek 22. a) Schéma adhezivního opotřebení [45] a b) snímek tvorby nárůstku na břitu [46].

Teplotní hřebenové trhliny na břitu

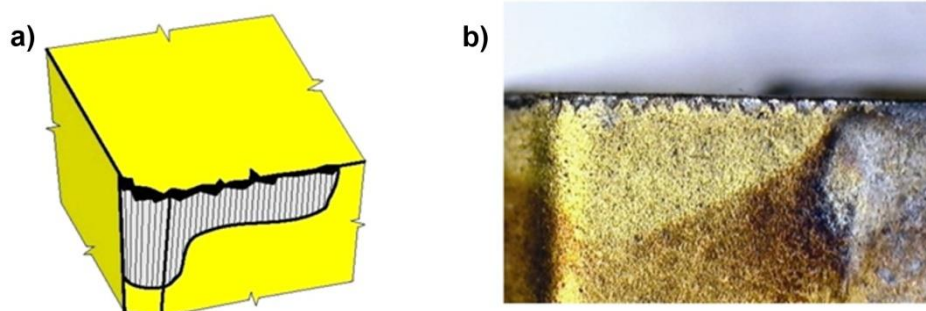
Teplotní hřebenové trhliny se tvoří kolmo na břit. Vznikají vlivem rychlého střídání vysoké a nízké teploty ostří, resp. vlivem rychlého ochlazení. Tento princip se objevuje především u přerušovaného řezu (např. frézování či přerušovaném soustružení) nebo při nepravidelném přívodu chlazení. Tyto vícenásobné trhliny se objevují jak na hřbetu, tak i na čele a po celé délce břitu (viz obrázek 23). V důsledku vzniku trhlin může následně docházet k hydrolování břitu [46].



Obrázek 23. a) Schéma hřebenových trhlin [47] a b) snímek hřebenových trhlin [46].

Mikrovylamování břitu

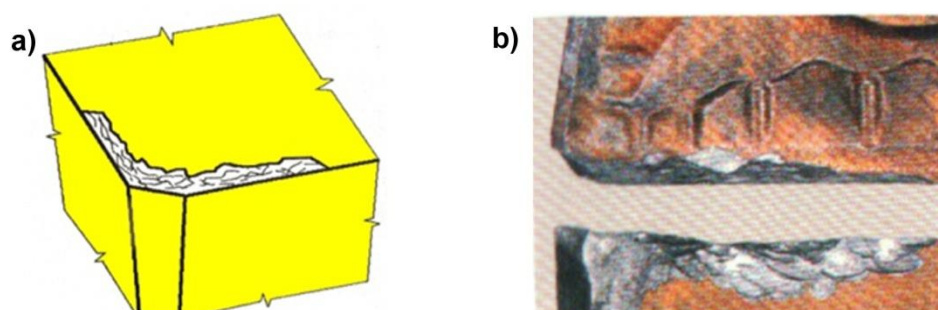
Mikrovylamování břitu je způsobeno vibracemi a chvěním obrobku, nástroje i obráběcího stroje. K vylamování malých částí břitů (viz obrázek 24) dochází v důsledku lokální koncentrace napětí v břitu po kontaktu břitu s tvrdými vměstky na povrchu obráběného materiálu [46].



Obrázek 24. a) Schéma vylamování v místě záběru [45] a b) snímek vylamování břitu [46].

Únavový lom břitu

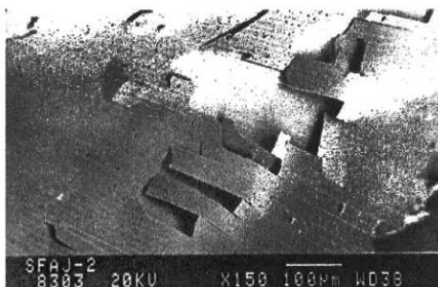
Únavový lom vzniká následkem cyklického zatížení, které není dostatečně velké, aby došlo přímo ke křehkému lomu (viz obrázek 25) [47].



Obrázek 25. a) Schéma únavových trhlin [2] a b) snímek únavových trhlin podél hřbetu [47].

Delaminace vrstev CVD a PVD

K delaminaci povlaku dochází v důsledku vysoké zbytkové napjatosti (viz obrázek 26), která mohla vzniknout špatně zvolenou metodou povlakování či technologií výbrusu. Dalšími aspekty může být kontaminace mezifázového rozhraní, či nevhodně zvolený režim čištění substrátu před nanášením povlaku [2].

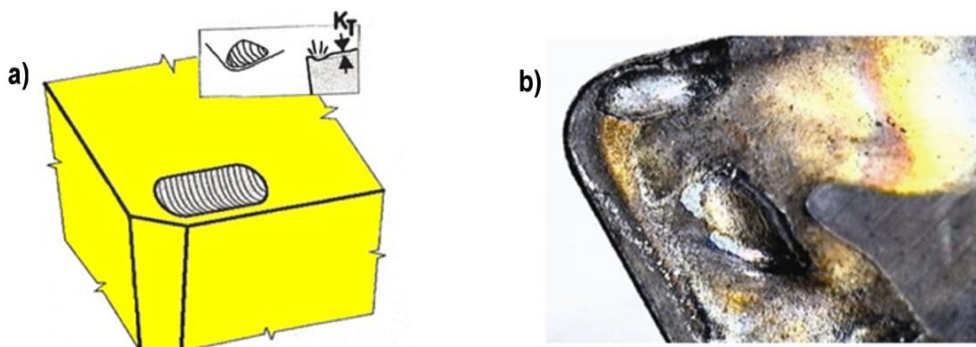


Obrázek 26. Snímek delaminace PVD povlaku z čelní plochy nástroje [2].

2.2.2 Mechanismy opotřebení – chemické

Difuze

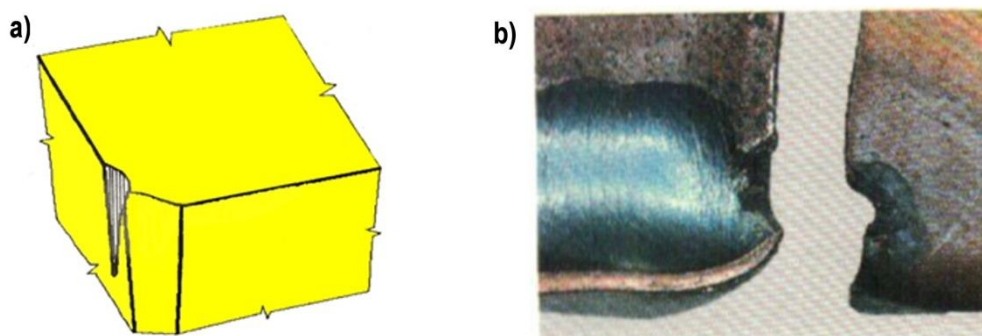
U procesu difuze dochází k migraci atomů mezi materiálem nástroje a obráběným materiálem. Vlivem vysoké teploty během řezu dochází k uvolnění karbidů ze základní struktury, uhlík difunduje do materiálu odcházející třísky a v důsledku tohoto procesu se na čele nástroje vytváří žlábek (viz obrázek 27). K tvorbě žlábků navíc přispívá i abrazivní opotřebení čela. Omezení difuze lze dosáhnout snížením teploty v místě řezu (chlazení, snížení řezné rychlosti, menší posuv, zvolení lepší geometrie nástroje) [2; 46].



Obrázek 27. a) Schéma žlábků na čele [2] a b) snímek žlábků na [46].

Oxidace

Během oxidace dochází k poškození nástroje vlivem tvorby chemických sloučenin na povrchu. V jejím důsledku dochází ke vzniku oxidační rýhy v místě kontaktu vedlejšího břitu s obroubenou plochou (viz obrázek 28) a dochází ke zvýšení drsnosti obrobku [47].



Obrázek 28. a) Schéma sekundární oxidační rýhy [2] a b) snímek sekundární oxidační rýhy [47].

Interkrystalické zeslabování pojivových vazeb

K zeslabování pojivových vazeb dochází vlivem odleptávání pojiva či korozi mezifázového rozhraní [2].

Termo-elektrické opotřebení

Jedná se o odstraňování elektricky vodivého materiálu z funkčních povrchů nástroje (např. obrábění elektrotechnické čisté mědi) [2].

Všechny typy opotřebení se významně podílí na ekonomice obráběcího procesu. Májí výrazný vliv na trvanlivost resp. životnost řezného nástroje. Proto je důležitá správná volba řezného nástroje (geometrie břitu, řezný materiál), parametrů řezného procesu (řezná rychlost, posuvová rychlost, šířka záběru, chlazení), či celých nástrojových soustav. Na rychlosti opotřebení nástroje totiž závisí výnosnost procesu obrábění [48].

2.3 Vliv povlaků na parametry řezného procesu

Díky povlakům dochází ke snížení tření mezi nástrojem a odváděnou třískou. To má pozitivní vliv na snížení teploty nástroje a tedy i vyšší životnost nástroje. Snížení tření má také za následek snížení pasivní síly, zatímco nedochází k výraznému snížení hlavní řezné síly. Snížení třecí síly je ukazatelem toho, že k překonání tření a ke stříhu je potřeba méně energie [49; 50].

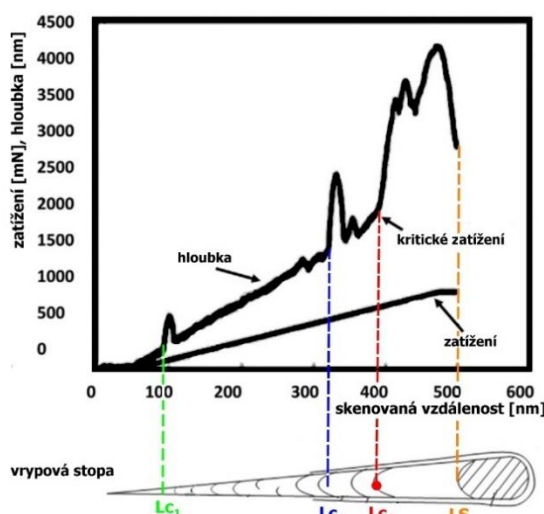
Nízké tření neovlivňuje pouze nástroj, ale také kvalitu povrchu obrobku. Vzhledem k nižšímu tření má pak povrch obrobku nižší drsnost. Povlaky také mají vyšší odolnost vůči opotřebení, dochází tedy ke zvýšení životnosti nástroje [49]. Dále vlivem povlaku dochází ke zkrácení délky kontaktu odváděné třísky s nástrojem [50].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY A HODNOCENÍ ŘEZIVOSTI NÁSTROJŮ

3.1 Zkoušky adhezně-kohezní

3.1.1 Vrypová zkouška – scratch test

K využití všech přednostních vlastností povlaku je třeba jeho dobrá adheze k nástroji. Měření adheze na rozhraní povlaku a substrátu je možné provádět pomocí tzv. scratch testu, což je vrypová zkouška, při které se diamantový Rockwellův kužel pohybuje rovnoběžně s rozhraním povlak – substrát. Na povlak působí postupně se zvyšující síla, kužel postupně proniká do povrchu povlaku a na rozhraní povlak – substrát vzniká pnutí. Při překročení kritické hodnoty zatížení dochází k odtržení vrstvy povlaku od substrátu. Pro běžné aplikace je dostačující velikost kritické zatěžující síly v rozmezí mezi 50 – 70N [51; 52]. Při vyhodnocování zkoušky se zaměřuje především na čtyři oblasti stopy, které charakterizují kritické poškození vrstvy. Jedná se o oblasti zatížení Lc_1 – první porušení povlaku (vznik mikrotrhlin), Lc_2 – porušení povlaku většího rozsahu, Lc_3 – první adhezivní porušení povlaku (odhalení substrátu) a LS – úplné odhalení substrátu (viz obrázek 29). Právě Lc_3 označujeme jako kritické zatížení, které je mírou adheze soustavy povlak – substrát [53]. Pro použití této zkoušky s dobrou přesností je třeba, aby drsnost povrchu byla menší než $Ra = 0,2$. Pro povrchy s vyšší drsností jsou výsledné hodnoty kritického zatížení vyšší než pro povrchy leštěné [54].



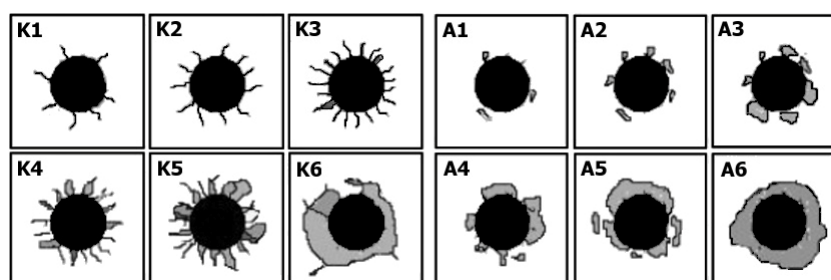
Obrázek 29. Závislost hloubky vrypu na velikosti zatížení a skenované vzdálenosti podle [55].

Je několik způsobů vyhodnocení této vrypové zkoušky jako např. měření závislosti tečné a zatěžující síly působící na indentor a změny součinitele dynamického tření, za kritické zatížení se bere hodnota zatěžující síly v okamžiku, kdy dochází k náhlému nárůstu tečné síly v důsledku protržení vrstvy. Dalším způsobem je měření intenzity signálu akustické emise, kritické zatížení je pak hodnota zatěžující síly v okamžiku rychlého nárůstu intenzity akustické emise. Zkoušku lze vyhodnotit i optickou metodou, konkrétně zvětšením stopy vrypu pod mikroskopem. Za kritickou hodnotu zatížení lze považovat hodnotu, při které došlo k odtržení vrstvy povlaku od substrátu [56].

Z experimentálních měření dle [55] vyplývá, že velikost kritické zatěžující síly roste s tloušťkou povlaku. Dále závisí na typu povlaku, podkladovém substrátu a jeho očištění před povlakováním [55].

3.1.2 Vtisková zkouška – Mercedes test

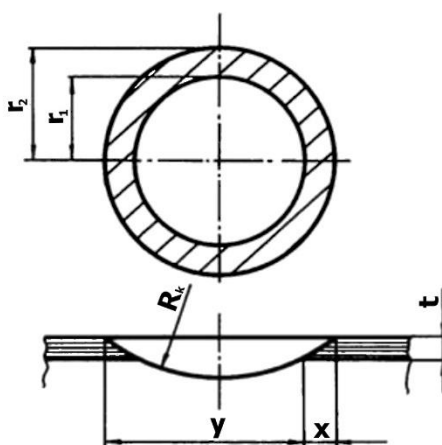
Během vtiskové zkoušky je do povlaku vtlačován indentor (např. diamantový Rockwellův kužel při zatížení 1500 N). Zkouška je vyhodnocovaná opticky pomocí mikroskopu na základě zkoumání trhlin, které vznikly v důsledku pnutí po vtisku indentoru. Podle velikosti a charakteru trhlin či odlupování vrstvy se vtisky přiřazují do jednotlivých tříd. Na základě míry poškození je jim přiřazeno kohezní (K) a adhezní (A) číslo dle obrázku 30. O adhezní porušení se jedná pokud dojde k defektu na rozhraní povlak – substrát, kdežto o porušení kohezní se jedná pokud dojde k defektu přímo v substrátu či vrstvě [57]. Výhodou vtiskové zkoušky je její rychlost a nízké nároky na měřicí zařízení, ale je tomu tak na úkor nižší přesnosti. Na rozdíl od vrypové zkoušky nejsou výsledky významně ovlivněny vlivem drsnosti povrchu, proto lze provádět i přímo na řezných nástrojích a ne pouze na předem připravených vzorcích [1; 54].



Obrázek 30. Třídy porušení okolí vtisku vytvořeného Rockwellovým kuželem podle [57].

3.2 Měření tloušťky vrstvy

Pro zjištění tloušťky povlaku se používá měřicí metoda označovaná jako kalotest. Jedná se o principiálně jednoduchou zkoušku s dobrou přesností. Do měřeného povlaku se pomocí brousící ocelové kuličky, na kterou je nanášena diamantová pasta, vybrousí kulový vrchlík (viz obrázek 31). V průmětu vrchlíku vznikne mezikruží, které představuje měřenou vrstvu povlaku [1].



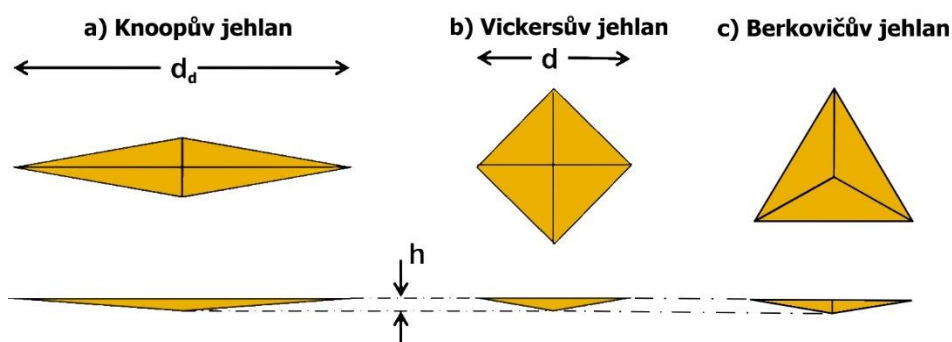
Obrázek 31. Měřené parametry pro výpočet tloušťky povlaku podle [1].

K vyhodnocení měření je třeba mikroskop pro získání jednotlivých parametrů (viz obrázek 31), které slouží k vypočítání tloušťky vrstvy dle vztahu (8) podle [1]:

$$t = (R_k^2 - r_1^2)^{1/2} - (R_k^2 - r_2^2)^{1/2} \quad (8)$$

3.3 Měření mikrotvrdomosti

Mikrotvrdomost povlaku se obvykle měří pomocí metody dle Vickerse, Knoop a Berkoviče. Všechny tyto metody mají společný princip zkoušky. Indentor vniká do zkušebního tělesa, pod vlivem zkušebního zatížení, které je v případě měření mikrotvrdomosti tenkých vrstev řádově desítky až stovky mN. Metody se liší ve tvaru indentoru, a tedy i vyhodnocování tvrdosti. U metody dle Vickerse se jedná o čtyřboký jehlan s čtvercovou základnou (úhel mezi osami protilehlých stěn je 136°) a pro výpočet tvrdosti jsou měřeny úhlopříčky vtisku d (viz obrázek 32 b)), u metody dle Knoop je indentor také čtyřboký jehlan, ale s kosočtvercovou základnou (úhly mezi protilehlými stěnami jsou $172,5^\circ$ a 130°) a je pak měřena dlouhá úhlopříčka vtisku d_d (viz obrázek 32 a)), u metody dle Berkoviče se jedná o třístěnný jehlan (úhel mezi bočními stěnami a výškou jehlanu je $65,3^\circ$) a měřena je hloubka vtisku h (viz obrázek 32). K vyhodnocení je tedy vždy zapotřebí mikroskopu [58].



Obrázek 32. Srovnání vtisků od indentorů dle a) Knoop, b) Vickerse, c) Berkoviče podle [59].

3.3.1 Hanemannův mikrotvrdoměr

Pro měření mikrotvrdomosti může být použit Hanemannův mikrotvrdoměr, který jako indentor využívá výše zmíněný Vickersův jehlan. Jehlan je umístěn ve speciálním objektivu, který je součástí metalografického mikroskopu. Pomocí něj jsou po odlehčení následně měřeny úhlopříčky vtisku [60].

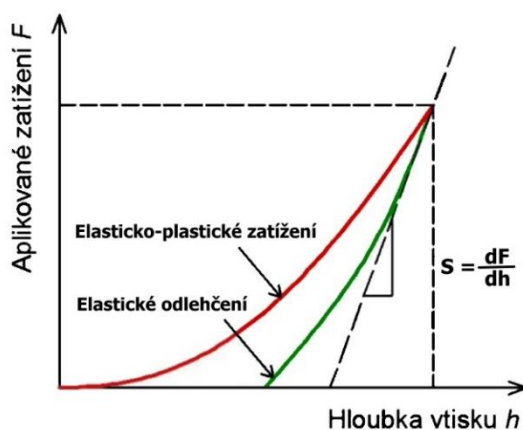
Mikrotvrdomost povlaku je pak vypočítána dle vztahu (9) podle [60]:

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F_z}{d^2} \quad (9)$$

3.3.2 Instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti

Instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti je též označována jako metoda DSI. Její výhodou je, že kromě hodnoty mikrotvrdomosti povlaku lze pomocí této metody zjistit i jiné materiálové parametry, jako např. modul pružnosti či pružně-plastickou tvrdost. Tato metoda není založena na optickém vyhodnocování parametrů vtisku, jejím principem je snímání posunu indentoru v závislosti na změně zatížení po celou dobu zkoušky. Snímání této závislosti probíhá jak během zatěžování, tak i při odlehčování indentoru. Výstupem tohoto měření je pak tzv. indentační křivka (viz obrázek 33), z které je pak možné určit i další materiálové parametry povlaku. Kromě těchto materiálových parametrů lze z indentační křivky zjistit např. i fázové transformace, trhliny nebo delaminace vrstev. Tyto nehomoge-

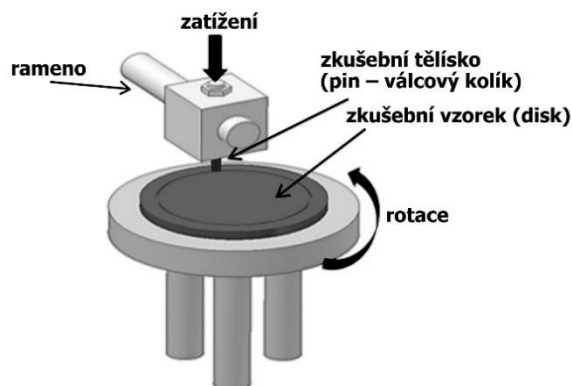
nity se na indentační křivce projeví náhodným nespojitým průběhem [58]. DSI má samozřejmě i negativní stránky. První z nich je určování nulové polohy vtisku, které se provádí nejmenší možnou zatěžovací silou. I tento drobný vtisk může ovlivnit výsledky zkoušky. Další ovlivnění zkoušky může být v důsledku nečistot na hrotu, zahřátí hrotu během zkoušky či dokonce nepřesná geometrie samotného hrotu. Chyby zkoušky též může způsobit vysoká drsnost povrchu vzorku, neboť by mohla být zkreslena již zmíněná nulová poloha. V neposlední řadě má též na výsledky vliv tenká vrstva na povrchu s odlišnou tvrdostí (např. tvrdá vrstva vzniklá oxidací), která může mít u zatížení < 5 N nezanedbatelný vliv na výsledek [56].



Obrázek 33. Indentační křivka podle [58].

3.4 Tribologické zkoušky – metody „pin-on-disc“ a „ball-on-disc“

Tribologické zkoušky jsou určené ke stanovení koeficientu tření a provádí se pomocí tribometru. Zkušební tělísko (kulička nebo kolík) je pevně upevněno v rameni, na které je působeno zatížením. Toto tělísko je vtačováno do zkušebního vzorku (disku), který je upevněn ve sklíčidle a otáčí se předem danou rychlostí (viz obrázek 34). Mezi zkušebním tělískem a zkušebním vzorkem dochází ke tření. Koeficient tření mezi nimi je stanoven z měření odchylky ramene během celé zkoušky. Rozdíl mezi metodou „pin-on-disc“ a „ball-on-disc“ je pouze ve tvaru zkušebního tělíska. U první zmíněné je tělískem válcový kolík, kdežto u druhé je tělísko ve tvaru kuličky. K přesnému vyhodnocení zkoušky je třeba docílit toho, aby oblast měření nebyla příliš ovlivněna podmínkami okolního prostředí, proto je tato oblast v ochranném krytu, kde je měřena např. teplota a vlhkost vzduchu [57].



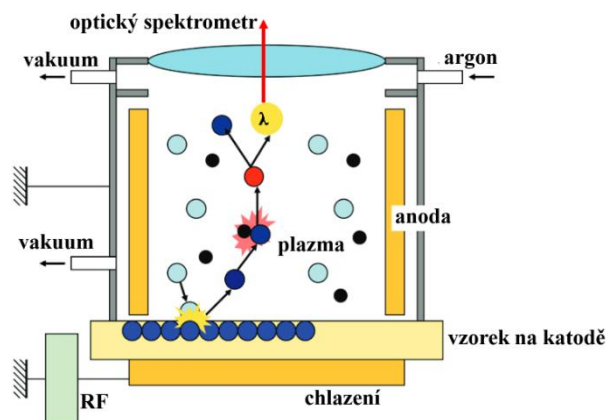
Obrázek 34. Schéma zkoušky „pin-on-disc“ podle [61].

Během zkoušky samozřejmě dochází k opotřebení zkušebního tělíska vlivem kontaktu se zkušebním vzorkem. Během zkoušky dochází k nárůstu drsnosti povrchu a ke snižování výšky kolíku. Z výsledků experimentů dle [61] vyplývá, že po určitou dobu zůstává výška kolíku neměnná a následně dochází k téměř lineárnímu poklesu výšky [61].

3.5 Analýzy chemického složení

3.5.1 GD-OES

Optická emisní spektroskopie s doutnavým výbojem reprezentuje technologii vhodnou ke kvalitativní i kvantitativní analýze elementárního složení struktury povlaku. Vyhodnocení složení povlaku je založeno na analýze vlnové délky záření optickým spektrometrem. Toto záření vzniká excitací odprašených atomů povlaku v plazmě. Každý prvek má jinou vlnovou délku záření, a proto je možná analýza složení. K odprašování dochází tak, že vzorek je umístěn na katodě a anodu tvoří měděná trubice okolo (viz obrázek 35). Pracovní prostor (dutina anody) je plněn argonem. Přivedením napětí dojde k zažehnutí doutnavého elektrického výboje a díky srážkám atomů argonu s urychlenými elektrony se následně v okolí katody vytvoří plazma. Povrch vzorku je tedy ostřešován kladně nabitými ionty argonu a dochází ke zmíněnému odprašování atomů povlaku. Výhodou této metody je, že vzorek před analýzou nepotřebuje žádné speciální úpravy [1; 62].



Obrázek 35. Schéma optická emisní spektroskopie s doutnavým výbojem podle [62].

3.5.2 Analýzy založené na rentgenovém záření

XRD – rentgenová difrakční analýza

Metoda XRP je založena na principu difrakce (ohybu) rentgenového záření a umožňuje kromě identifikace struktury povlaku také přístup k dalším vlastnostem (např. velikost a orientace zrn či deformace mřížky) [62].

XPS – rentgenová fotoelektronová spektroskopie

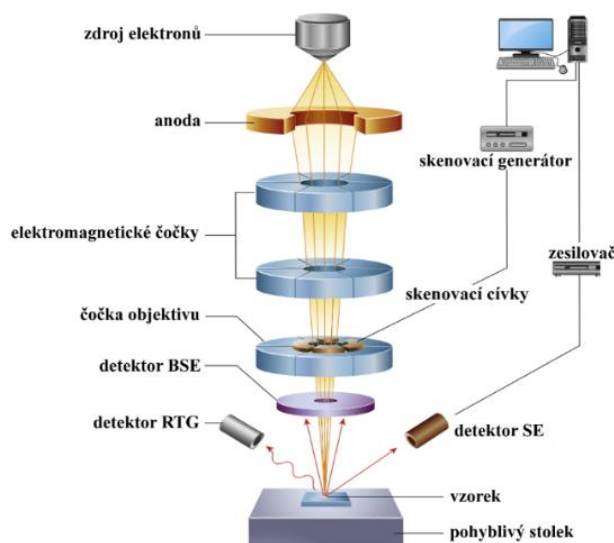
U rentgenové fotoelektronové spektroskopie je vzorek ozařován rentgenovým paprskem. V důsledku ozáření atomy vzorku ionizují a dochází k emisi fotoelektronů. Následně je měřena kinetická energie těchto fotoelektronů. Vzhledem k principu analýzy je možné získávat informace pouze o povrchu materiálu (přibližně do 10 nm) [62].

EDS – energiově disperzní spektroskopie

U metody EDS je vzorek bombardován elektronovým paprskem, čímž dochází ke vzniku rentgenového záření. Pomocí polovodičových čipů je energie rentgenového záření převáděna na ekvivalentně velký elektrický signál. Na základě četnosti jednotlivých signálů o různých velikostech (různé energie rentgenového záření pro různé prvky) je následně možné vyhodnotit chemické složení povlaku [63].

3.6 Analýza mikrostruktury a chemického složení pomocí SEM

U analýzy pomocí skenovacího elektronového mikroskopu je na zkoumaný vzorek pomocí elektromagnetických cívek zaostřen svazek elektronového paprsku (viz obrázek 36). V důsledku interakce elektronů (primárních) s povrchem dochází k vyrážení sekundárních elektronů z atomů na povrchu. Tyto sekundární elektrony jsou postupně snímány pomocí detektoru SE. Signál detektoru je synchronizován s aktuální polohou paprsku na vzorku. Pomocí řídicího počítače je signál zpracován a je sestaven výsledný obraz mikrostruktury. Dále jsou detekovány zpětně rozptýlené elektrony pomocí detektoru BSE. Díky tomu je možné rozlišit různé fáze povlaku. V důsledku bombardování vzorku elektrony vzniká též rentgenové záření, které je vyhodnocováno na základě energiově disperzní spektroskopii (viz kapitola 3.5.2). Pomocí EDS je pak možné stanovit chemické složení materiálů. Celý proces probíhá ve vysokém vakuu, aby se odstínil vlivy atmosféry na elektrony [63; 64].



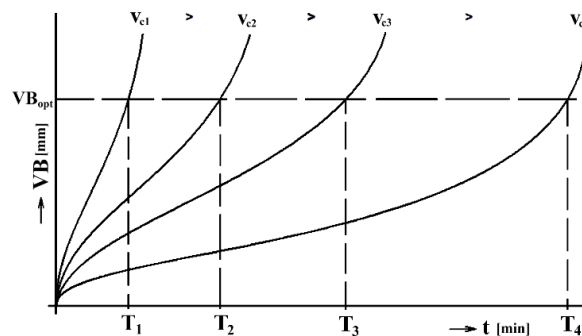
Obrázek 36. Schéma SEM mikroskopu podle [63].

3.7 Hodnocení řezivosti nástroje

Základním kritériem hodnocení řezivosti nástroje je závislost $T-v_c$ (Taylorův vztah). Obecně se dá říct, že lepší řezivost vykazuje nástroj s nižší hodnotou exponentu m a vyšší hodnotou konstanty c_v (viz obrázek 38 b)). Řezivost nástroje je vždy určena pro obrábění konkrétního materiálu a nelze ji tedy generalizovat [65].

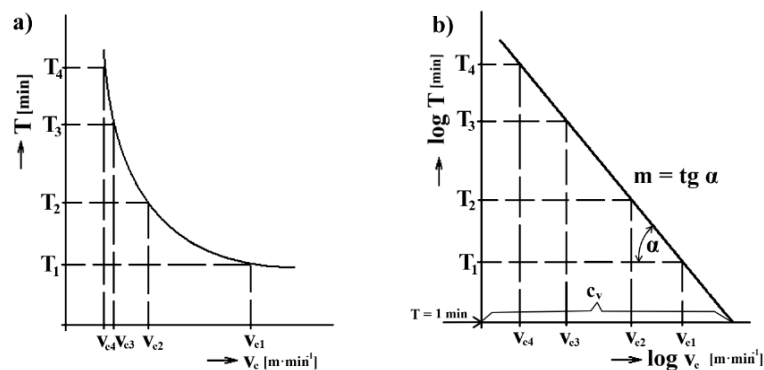
Pro stanovení $T-v_c$ závislosti se nejprve určuje závislost opotřebení na čase obrábění. Pro její určení je daný materiál obráběn nejméně čtyřmi různými řeznými rychlostmi při ostatních konstantních řezných podmínkách. Je měřen časový průběh opotřebení hřbetu nástroje VB_B (VB – šířka fazetky opotřebení na hřbetě), mohou být ale použity i jiné pa-

rametry opotřebení. Křivky opotřebení jsou následně vyneseny do diagramu (viz obrázek 37) [45; 65; 66].



Obrázek 37. Závislost opotřebení na čase při různých řezných rychlostech [66].

Pro předem zvolenou hodnotu kritéria opotřebení VB_{opt} se ze závislosti opotřebení odečtou odpovídající hodnoty trvanlivostí pro dané řezné rychlosti (viz obrázek 38 a)). Následně jsou tyto hodnoty vyneseny do diagramu závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti s logaritmickými souřadnicemi (viz obrázek 38 b)) [65].



Obrázek 38. a) Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti na základě kritéria opotřebení
b) závislost trvanlivosti na řezné rychlosti podle [65; 66].

Taylorův vztah je pak dán vztahem (10) podle [65]:

$$v_c = \frac{c_v}{T^{\frac{1}{m}}} \quad (10)$$

Trvanlivost řezného nástroje T

Trvanlivost nástroje udává celkový součet čistých časů řezání (v minutách), což je celková doba, po kterou nástroj pracuje před opotřebením břitu nástroje na hodnotu kritéria opotřebení. Toto kritérium zajišťuje, že vyráběné obrobky budou mít po celou dobu trvanlivosti nástroje požadované parametry (kvalita povrchu, tvarovou a rozměrovou přesnost) [2].

Životnost nástroje Z

Životnost pak udává součet všech trvanlivostí nástroje. Jedná se o celkovou dobu, kdy je nástroj v provozu, tedy od začátku jeho použití až do úplného vyřazení. U VBD se jedná o dobu, po které jsou opotřebený všechny její břity [2].

4 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části práce je cíleno na analýzu opotřebení břitových destiček od dvou různých výrobců při soustružení pružinové oceli 51CrV4 (ČSN 15 260). Opotřebení bylo sledováno při různých řezných rychlostech. Na základě měření byla následně sestrojena závislost délky řezné dráhy na řezné rychlosti.

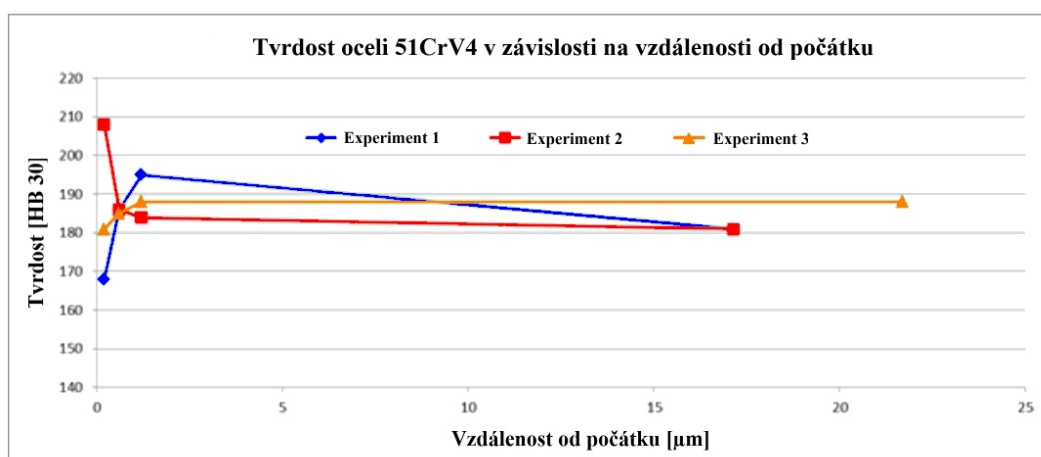
4.1 Materiálová charakteristika zkušebního disku

Chemické složení oceli bylo zjištěno pomocí chemického rozpouštění třisek dle normy ČSN EN ISO 14284 [67; 68].

Tabulka 1. Chemické složení pružinové oceli 51CrV4 podle [67].

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Fe
naměřené složení [%]	0,536	0,271	0,990	0,009	<0,001	1,090	0,210	0,350	0,039	0,019	96,486
minimální složení dle normy [%]	0,470	0,000	0,700	0,000	0,000	0,900					
maximální složení dle normy [%]	0,550	0,400	1,100	0,025	0,025	1,200					

Tvrdość oceli byla měřena zkouškou tvrdosti dle Brinella v šikmém řezu k povrchu pod úhlem 5°.

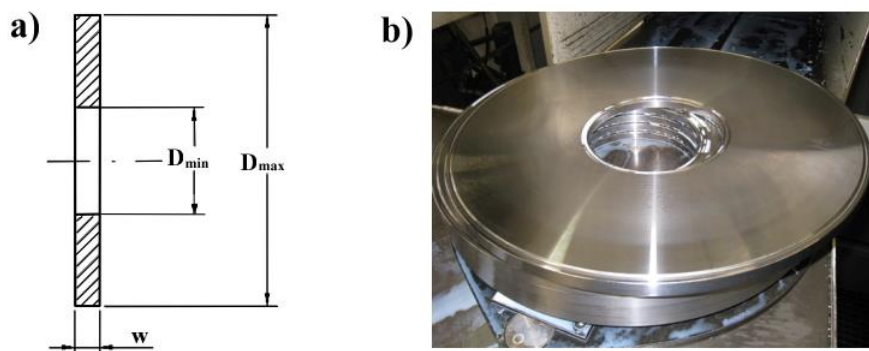


Obrázek 39. Tvrdość oceli 51CrV4 v závislosti na vzdálenosti od počátku podle [67].

4.2 Parametry řezného procesu

Soustružení bylo prováděno pomocí vertikálním soustružnickém centru HESSAPP VDM T 550 na speciálních discích (viz obrázek 40 a)) při parametrech řezného procesu:

- posuv na otáčku $f_n = 0,35$ mm,
- šířka záběru ostří $a_p = 1,5$ mm,
- výkon soustružnického centra $P = 80$ kW,
- krouticí moment $M_k = 1150$ N·m,
- vnější vysokotlaké chlazení 120 barů, 3 trysky ϕ 1,0 mm, 6% emulze,
- průměr nožového držáku $D = 50$ mm,
- rozměry disku $D_{max} = 484$ mm, $D_{min} = 160$ mm, $w = 12$ mm (viz obrázek 40 a)).



Obrázek 40. a) Schéma zkušebního disku a b) zkušební disky z oceli 51CrV4 [67].

Na základě snímání břitové destičky vždy po obrobení jedné řezné dráhy, která je ze vztahu (11) určena na 468,22 m, lze vyhodnotit její opotřebení v průběhu procesu a následně vyhodnotit její trvanlivost.

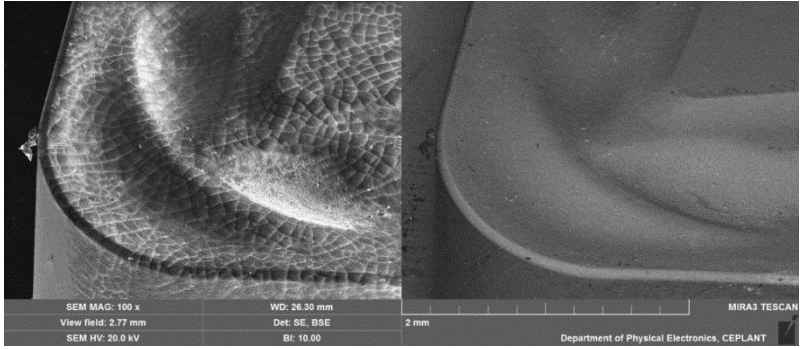
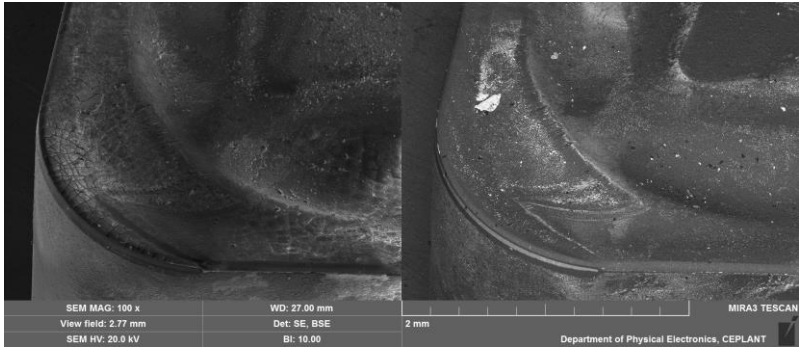
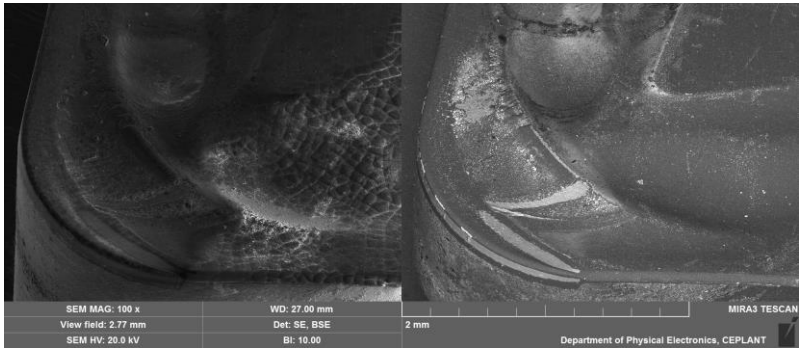
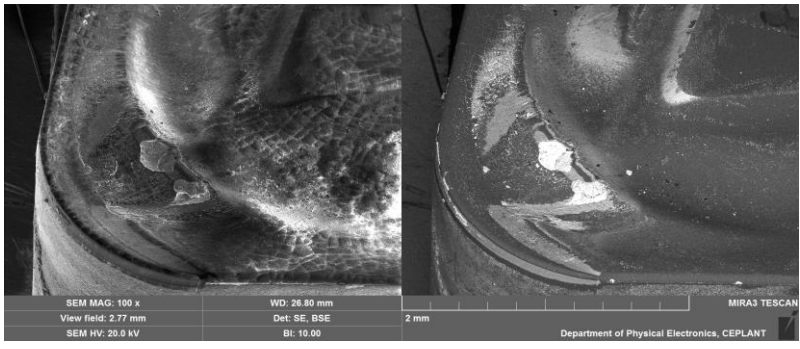
$$l_c = \frac{\pi \cdot (D_{max}^2 - D_{min}^2)}{4 \cdot f \cdot 1000} = \frac{\pi \cdot (484^2 - 160^2)}{4 \cdot 0,35 \cdot 1000} = 468,22 \text{ m} \quad (11)$$

4.3 Vývoj opotřebení VBD v čase

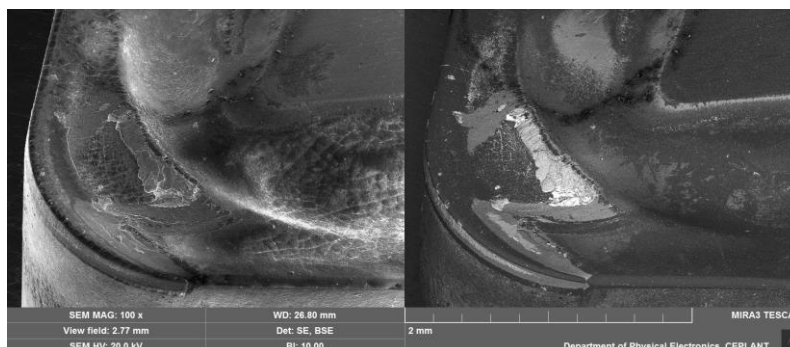
Analýza opotřebení břitové destičky byla prováděna pomocí elektronového mikroskopu TESCAN MIRA3. Pomocí něj byly získány detailní snímky opotřebení, snímky z režimu sekundárních elektronů – SE jsou vždy v levé části obrázku a snímky z režimu zpětně rozptýlených elektronů – BSE v pravé části. Bylo též využito mapování jednotlivých prvků obsažených v povlaku (viz obrázek 83 a obrázek 84).

Snímky přiložené v tabulce 1 a tabulce 2, tedy snímky označené A0–A7 a B1–B4, patří k destičce od výrobce 1. Snímky v tabulce 3 a tabulce 4, tedy snímky označené C0–C7 a D1–D4 pak patří k destičce od výrobce 2.

Tabulka 2. Opatření břitové destičky výrobce 1 pro $v_c = 550$ m/min.

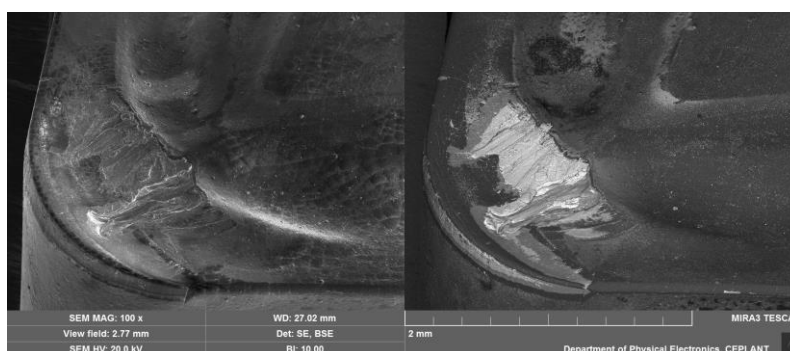
A0	 <p>SEM MAG: 100 x View field: 2.77 mm SEM HV: 20.0 kV</p> <p>WD: 26.30 mm Det: SE, BSE Bl: 10.00</p> <p>MIRA3 TESCAN 2 mm Department of Physical Electronics, CEPLANT</p> <p>Obrázek 41. Nová neopotřeбенá břitová destička, síť mikrotrhlin [67].</p>
A1	 <p>SEM MAG: 100 x View field: 2.77 mm SEM HV: 20.0 kV</p> <p>WD: 27.00 mm Det: SE, BSE Bl: 10.00</p> <p>MIRA3 TESCAN 2 mm Department of Physical Electronics, CEPLANT</p> <p>Obrázek 42. Břitová destička bez náznaku opotřeбенí větší významnosti ($t = 0,85$ min) [67].</p>
A2	 <p>SEM MAG: 100 x View field: 2.77 mm SEM HV: 20.0 kV</p> <p>WD: 27.00 mm Det: SE, BSE Bl: 10.00</p> <p>MIRA3 TESCAN 2 mm Department of Physical Electronics, CEPLANT</p> <p>Obrázek 43. Abrazivní opotřeбенí ($t = 1,70$ min) [67].</p>
A3	 <p>SEM MAG: 100 x View field: 2.77 mm SEM HV: 20.0 kV</p> <p>WD: 26.80 mm Det: SE, BSE Bl: 10.00</p> <p>MIRA3 TESCAN 2 mm Department of Physical Electronics, CEPLANT</p> <p>Obrázek 44. Abrazivní opotřeбенí a částečná delaminace vrstvy povlaku ($t = 2,55$ min) [67].</p>

A4



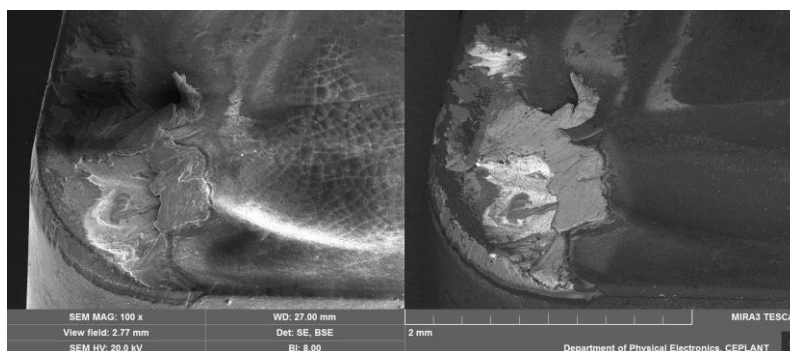
Obrázek 45. Abrazivní opotřebení a částečná delaminace vrstvy povlaku (t = 3,40 min) [67].

A5



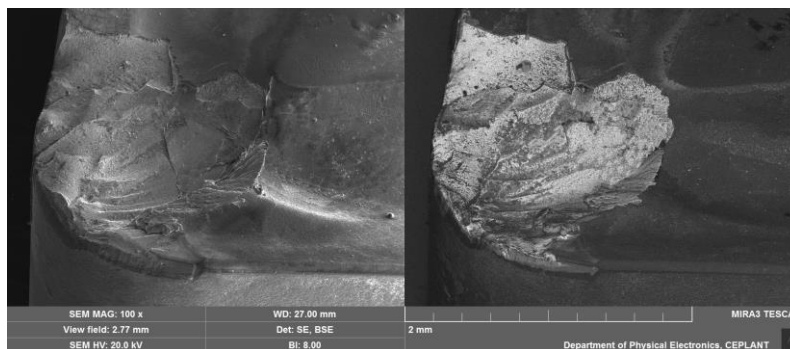
Obrázek 46. Abrazivní opotřebení, částečná delaminace vrstvy povlaku a mikrovylamování (t = 4,25 min) [67].

A6



Obrázek 47. Abrazivní opotřebení, částečná delaminace vrstvy povlaku a mikrovylamování (t = 5,10 min) [67].

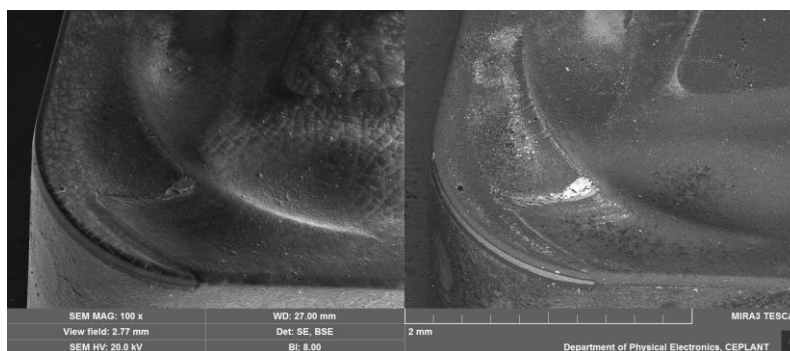
A7



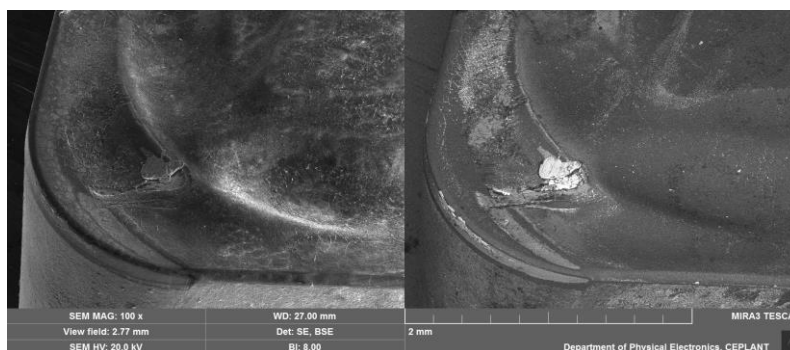
Obrázek 48. Makroskopické oddělení povlaku hřbetu (t = 5,95 min) [67].

Tabulka 3. Opatření břitové destičky výrobce 1 pro $v_c = 650$ m/min.

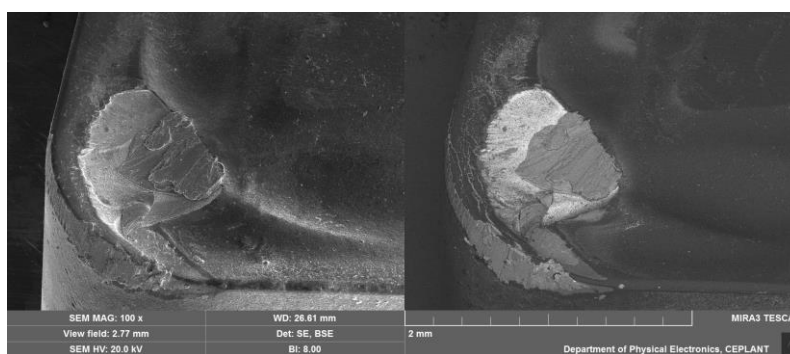
B1

Obrázek 49. Břitová destička bez náznaku opotřebení větší významnosti ($t = 0,72$ min) [67].

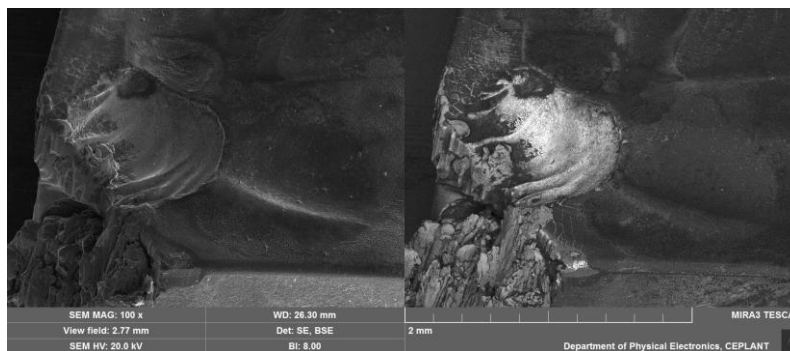
B2

Obrázek 50. Iniciační vzniku žlábků (kráterů) na čele ($t = 1,43$ min) [67].

B3

Obrázek 51. Šíření opotřebení ve tvaru žlábků a opotřebení hřbetu ($t = 2,15$ min) [67].

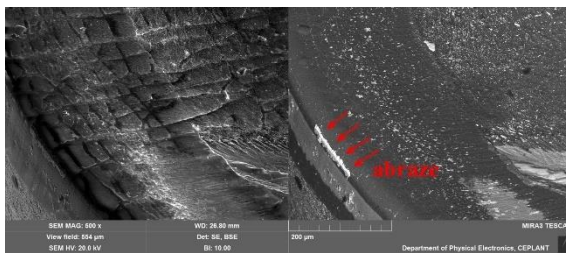
B4

Obrázek 52. Ulomení špičky ($t = 2,87$ min) [67].

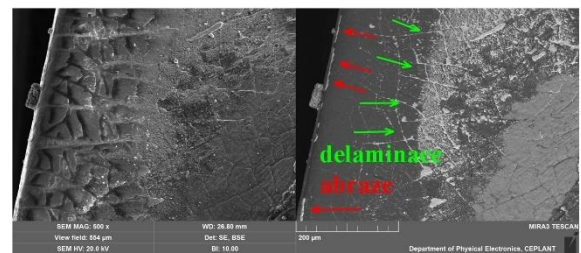
4.3.1 Analýza opotřebení VBD od výrobce 1 pro $v_c = 550$ m/min

Na obrázku 41 (vzorek A0) lze vidět sít mikrotrhlin vzniklých při povlakování pomocí MTCVD, které ale nepředstavují žádný závažný problém pro práci nástroje. První opotřebení větší významnosti je vidět na snímku A2. Jedná se o abrazivní opotřebení bříty, detailní snímek tohoto opotřebení je pak zachycen na obrázku 53. V průběhu dalšího obrábění, tedy obrázek 44 a obrázek 45 (vzorky A3 a A4), dochází k nárůstu abrazivního opotřebení bříty a navíc dochází k částečné delaminaci vrstvy povlaku (viz obrázek 54), což může být způsobeno zbytkovým tahovým napětím v MTCVD povlaku. Na obrázku 46 (vzorek A5) je již patrné rozsáhlejší abrazivní opotřebení čela a navíc lze již pozorovat i mikrovylamování bříty (viz obrázek 55). Na obrázku 47 (vzorek A6) lze pozorovat další rozvoj těchto opotřebení. K úplné delaminaci čelní plochy došlo v čase $t = 5,95$ min po obrobení řezné dráhy 3277,5 m.

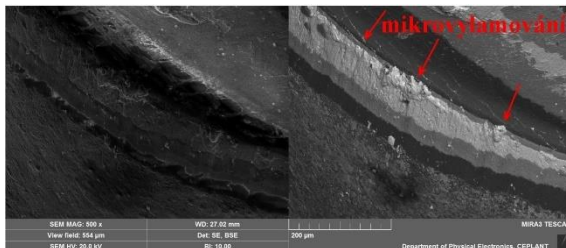
Jak je patrné z obrázku 56, při dosažení hřbetního kritéria přibližně $VB_B = 0,2$ mm došlo k delaminaci čelní plochy, ale nedošlo ke zničení bříty, což je výhodné vzhledem k tomu, že je u bříty zachována schopnost obrábět bez výraznější ztráty kvality opracování a destička může být bez komplikací vyměněna.



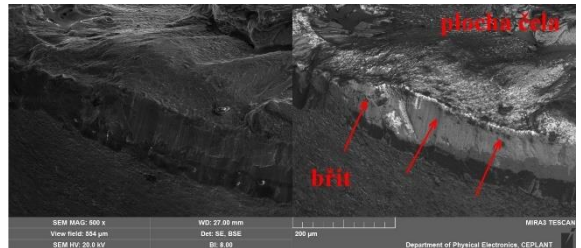
Obrázek 53. Detail A2 podle [67].



Obrázek 54. Detail A3 podle [67].



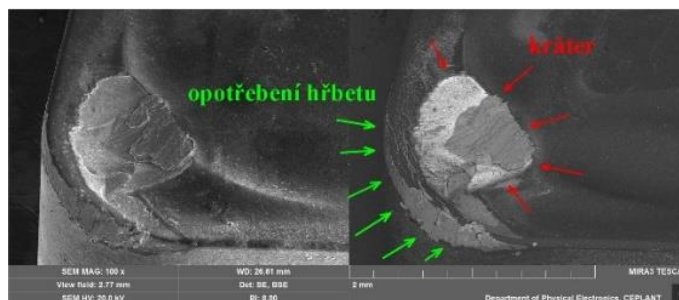
Obrázek 55. Detail A5 podle [67].



Obrázek 56. Detail A6 podle [67].

4.3.2 Analýza opotřebení VBD od výrobce 1 pro $v_c = 650$ m/min

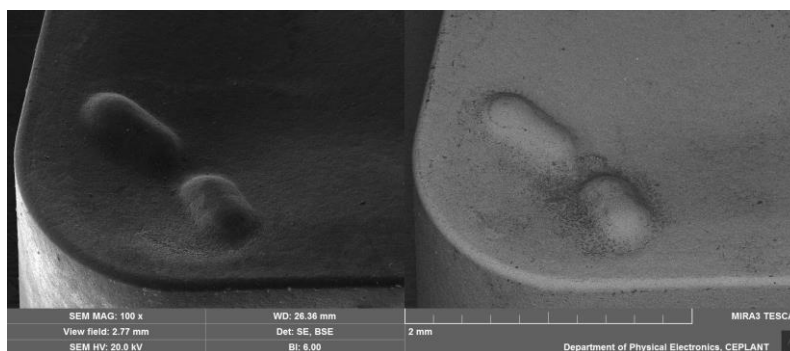
Po obrobení délky jedné řezné dráhy, tedy obrázek 49 (vzorek B1), lze na ploše čela rozeznat abrazivní opotřebení v malém rozsahu. Na obrázku 50 (vzorek B2) lze už pozorovat zřejmou iniciaci vzniku opotřebení ve tvaru žlábků (kráterů) na čele. V průběhu dalšího obrábění dochází v důsledku vysoké řezné rychlosti k rychlému rozvoji kráteru a navíc lze pozorovat i opotřebení hřbetu (viz obrázek 57). V čase $t = 2,87$ min po obrobení délky 4 řezných drah (1873 m) dochází v důsledku výše zmíněných opotřebení k ulomení špičky nástroje viz obrázek 52 (vzorek B4).



Obrázek 57. Detail B3 podle [67].

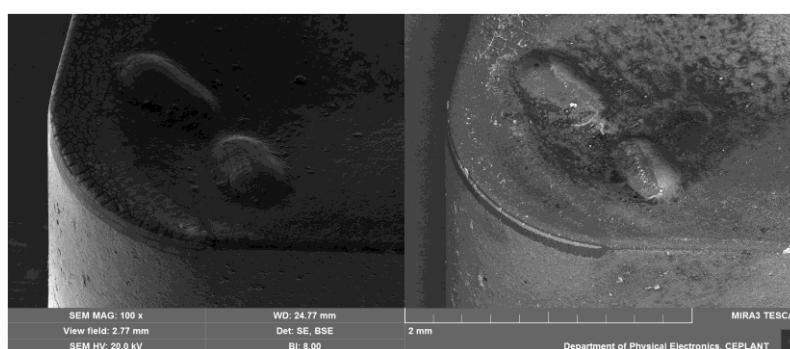
Tabulka 4. Opatření břitové destičky výrobce 2 pro $v_c = 550$ m/min.

C0

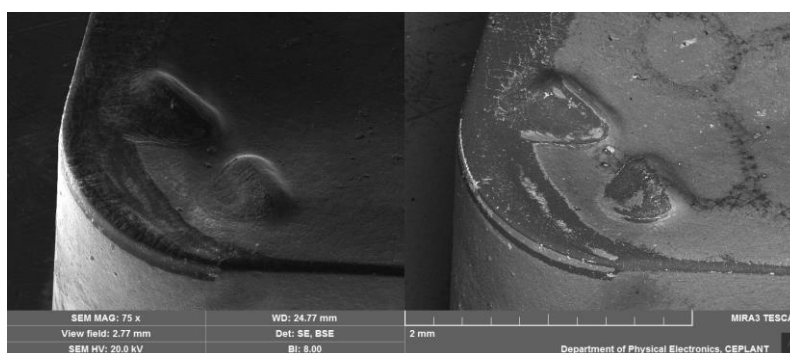


Obrázek 58. Nová neopotřebovaná břitová destička [67].

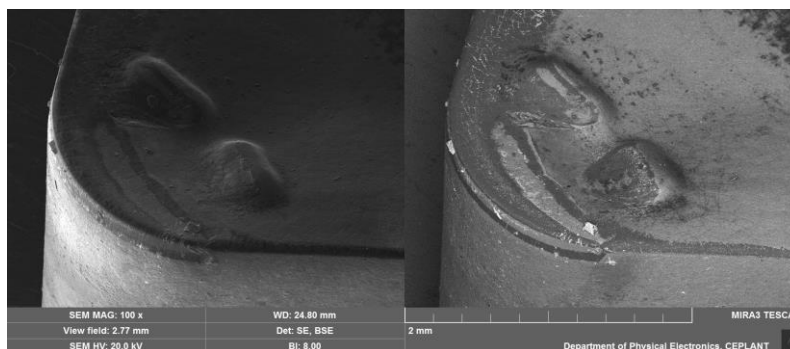
C1

Obrázek 59. Břitová destička bez náznaku opotřebení větší významnosti ($t = 0,85$ min) [67].

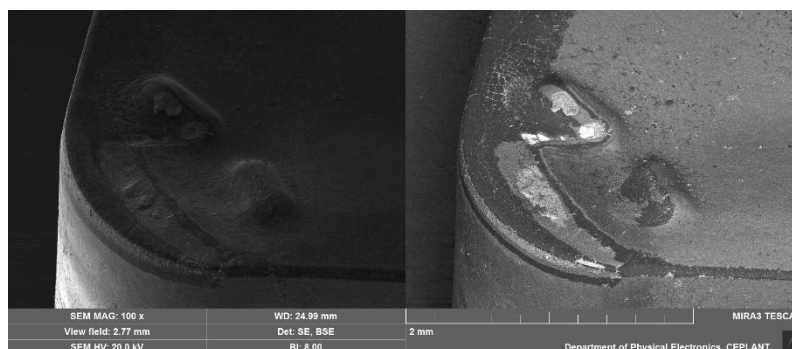
C2

Obrázek 60. Abrasivní opotřebení ($t = 1,70$ min) [67].

C3

Obrázek 61. Abrasivní opotřebení ($t = 2,55$ min) [67].

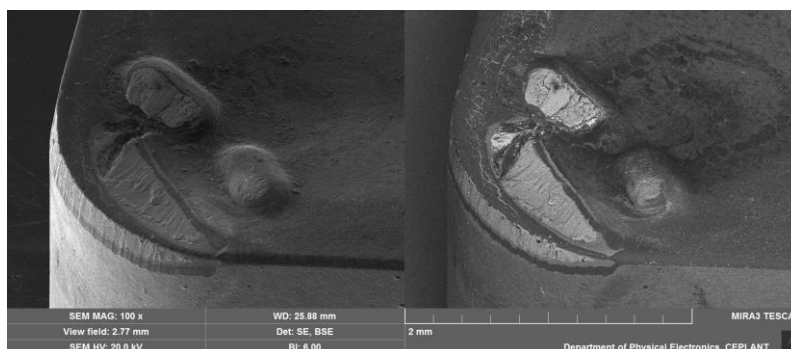
C4

Obrázek 62. Nepravidelné opotřebení utvařečů třísek ($t = 3,40$ min) [67].

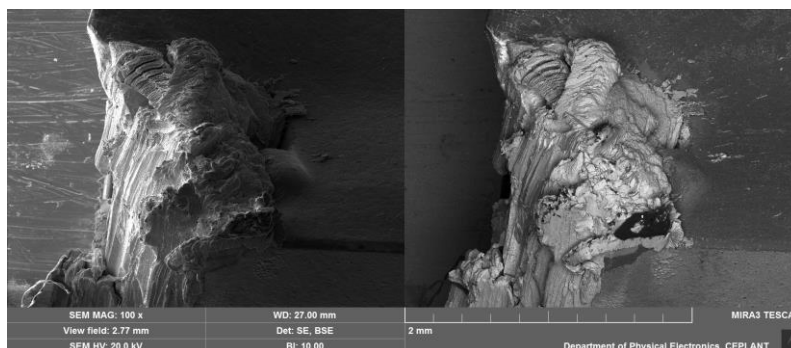
C5

Obrázek 63. Nepravidelné opotřebení utvařečů třísek ($t = 4,25$ min) [67].

C6

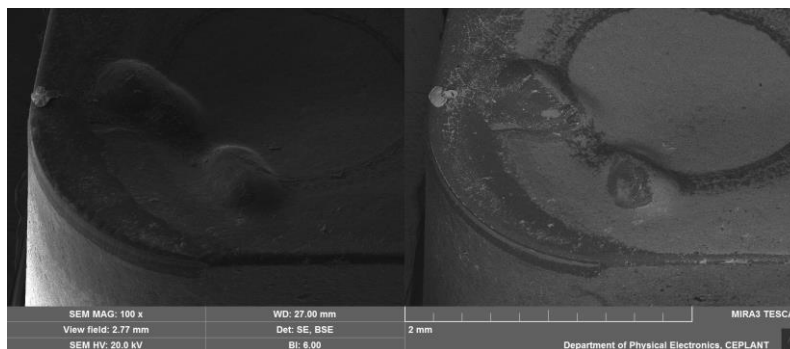
Obrázek 64. Nepravidelné opotřebení utvařečů třísek a čela ($t = 5,10$ min) [67].

C7

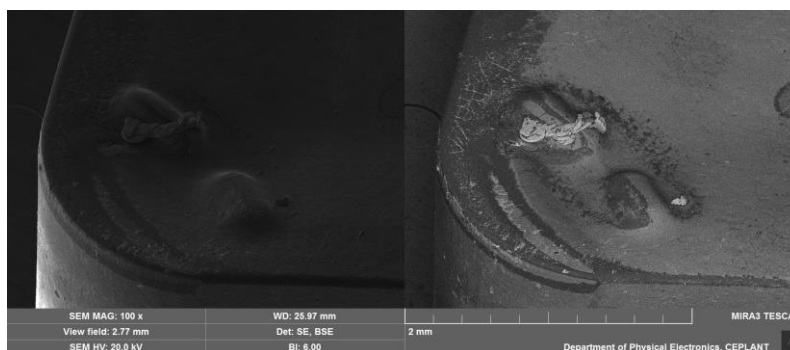
Obrázek 65. Katastrofický lom břitu ($t = 5,95$ min) [67].

Tabulka 5. Opatření břitové destičky výrobce 2 pro $v_c = 650$ m/min.

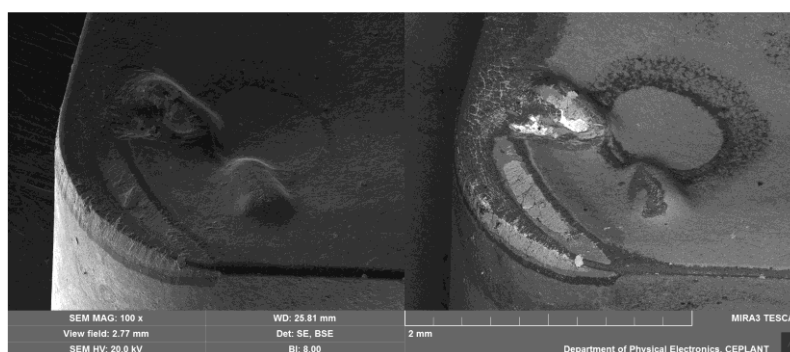
D1

Obrázek 66. Břitová destička bez náznaku opotřebení větší významnosti ($t = 0,72$ min) [67].

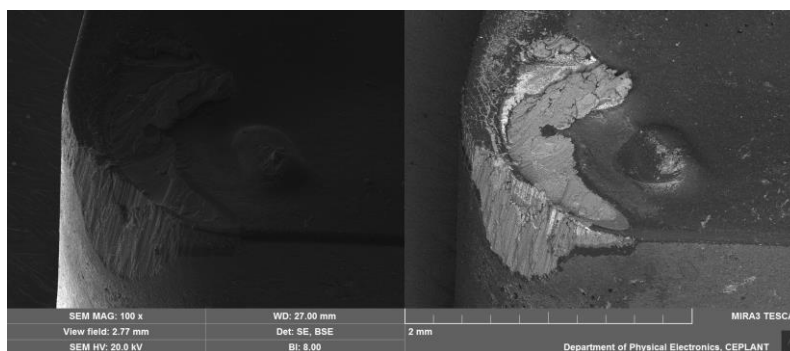
D2

Obrázek 67. Ztráta významné části utvařeče třísek ($t = 1,43$ min) [67].

D3

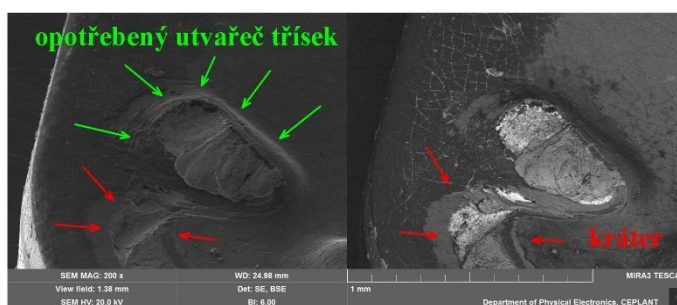
Obrázek 68. Abrazivní opotřebení, delaminace vrstev povlaku a tvorba teplotních trhlin ($t = 2,15$ min) [67].

D4

Obrázek 69. Ulomení špičky a opotřebení čela nástroje ($t = 2,87$ min) [67].

4.3.3 Analýza opotřebení VBD od výrobce 2 pro $v_c = 550$ m/min

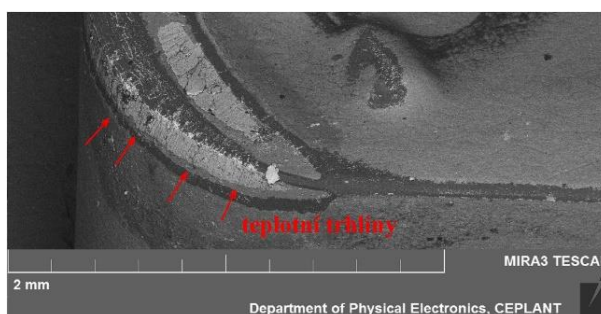
První známky významnějšího opotřebení jsou rozeznatelné na obrázku 60 (vzorek C2), konkrétně se jedná o abrazivní opotřebení. Jeho rozvoj je pak patrný i na dalších snímcích. Na obrázku 62 (vzorek C4) je rozeznatelné nepravidelné opotřebení utvařečů třísek a na obrázku 63 a obrázku 64 (vzorky C5 a C6) dochází ke stále většímu opotřebení utvařečů třísek (viz obrázek 70), navíc dochází ke stále většímu opotřebení čela i hřbetu ($VB_C = 0,5$ mm). Selháním utvařeče pak destička ztrácí schopnost dobrého odvodu třísek, dochází k většímu tepelnému zatížení destičky, dochází k difuzi uhlíku z nástroje do třísky a následné tvorbě žlábků na čele, který je na snímcích též patrný. Na základě těchto jevů dochází ke katastrofickému lomu břitu viz obrázek 65 (vzorek C7) po obrobení řezné dráhy 3277,5 m.



Obrázek 70. Detail C5 podle [67].

4.3.4 Analýza opotřebení VBD od výrobce 2 pro $v_c = 650$ m/min

U destičky od výrobce 2 dochází při použití řezné rychlosti $v_c = 650$ m/min ke ztrátě významné části utvařeče třísek již po obrobení dvou řezných drah, tedy snímek D2. V další fázi obrábění dochází k rozvoji opotřebení utvařeče, navíc dochází k delaminaci povlaku a abrazivnímu opotřebení. Vlivem ztráty utvařeče dochází k většímu tepelnému zatížení destičky a k tvorbě teplotní trhliny na břitu (viz obrázek 71). Na snímku C4 už je patrné opotřebení neslučitelné s dalším provozem.



Obrázek 71. Detail D3 podle [67].

4.4 Vyhodnocení řezivosti

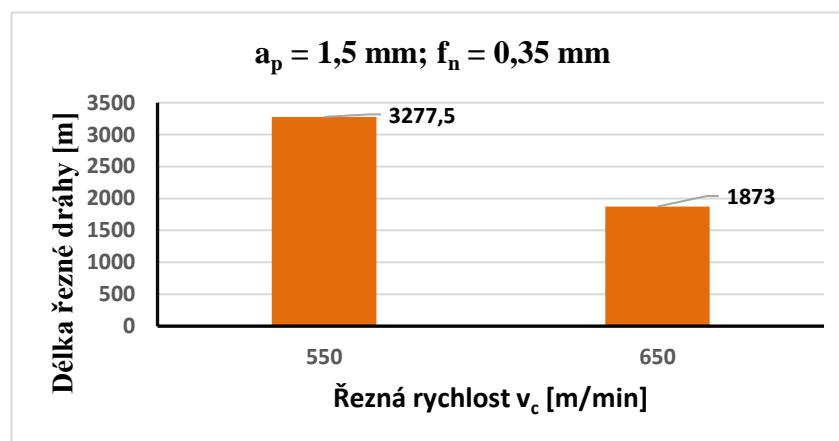
Na základně obrázku 74 a obrázku 75 se jako nejvhodnější varianta jeví vyměnitelná destička od výrobce 1 při použití řezné rychlosti $v_c = 550$ m/min. Oproti soustružení stejnou destičkou při řezné rychlosti $v_c = 650$ m/min dosahuje vyšší hodnoty délky řezné dráhy, konkrétně 3277,5 m oproti 1873 m u řezné rychlosti $v_c = 650$ m/min. U destičky od výrobce 2 dochází k významnému opotřebení utvařečů třísek, a to jak pro $v_c = 550$ m/min, tak pro $v_c = 650$ m/min. Na základě toho pak dochází i ke zničení břitu nástroje. Pro řeznou

rychlost $v_c = 550$ m/min dojde ke zničení břítu přibližně po řezné dráze 3277,5 m, což je stejná vzdálenost jako u destičky od výrobce 1, ale dojde ke zničení břítu. Naproti tomu u destičky od výrobce 1 není důvodem vyřazení destičky z provozu zničení břítu, ale delaminace vrstvy povlaku na čele. Tento typ opotřebení se dá dobře identifikovat a na jeho základě vyřadit destičku z provozu. Při delaminaci povlaku na čele nedochází ke zničení břítu nástroje, břit tedy neztrácí schopnost obrábění, což je její výhoda.

Jako kritérium hodnocení trvanlivosti břítu byla tedy volena ztráta schopnosti kontrolovaného odvodu třísky či lom břítu destičky, nikoliv některé z kritérií založených na měření velikosti některého z opotřebení. Kritérium bylo takto voleno vzhledem k maximálnímu využití potenciálu destičky. Dalším důvodem je to, že pro každou ze zmíněných destiček je příčinou její vyřazení z provozu jiný typ opotřebení. Vzhledem k tomu, že se opotřebení vyvíjí ve větším rozsahu, je tato volba dle [3] přípustná. Za předpokladu, že by se jednalo o obrábění s menším rozvojem opotřebení, bylo by k hodnocení trvanlivosti spíše lepší volit některé z kritérií založených na měření rozsahu opotřebení (např. VB – šířka opotřebené plochy na hřbetu, KB – šířka žlábků na čele, KT – hloubka žlábků na čele, VR – radiální otupení) [3].

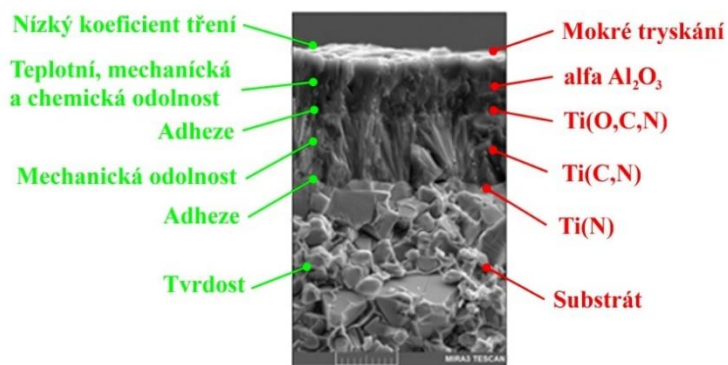
Mechanismy opotřebení, které bylo možno při obrábění oceli 51CrV4 zvolenými řeznými rychlostmi rozpoznat mají oporu i v kapitole 2.2 sepsané na základě odborné literatury. Opotřebení na čele ve tvaru žlábků vznikající vlivem difúze je totiž i dle [2] typickým opotřebením projevujícím se při obrábění oceli, kdy je vysoká teplota v místě řezu. Dalším významným opotřebením, které bylo možno na snímcích rozpoznat byla delaminace povlaku. K té dochází dle [2] vlivem vysoké zbytkové napjatosti, která se v povlacích nanášených z plynné fáze může vyskytovat. I během těchto náročných řezných podmínek zapříčiněných vysokou řeznou rychlostí vykazovaly VBD s povlakem na bázi MTCVD dobrou odolnost vůči opotřebení, což se slučuje s předpoklady pro MTCVD povlaky dle kapitoly 1.2.3.

Na základě poznatků z kapitoly 4.4 jsou v grafu uvedeny závislosti délky řezné dráhy na řezné rychlosti (viz obrázek 72) namísto závislosti $T-v_c$.



Obrázek 72. Závislost délky řezné dráhy na řezné rychlosti.

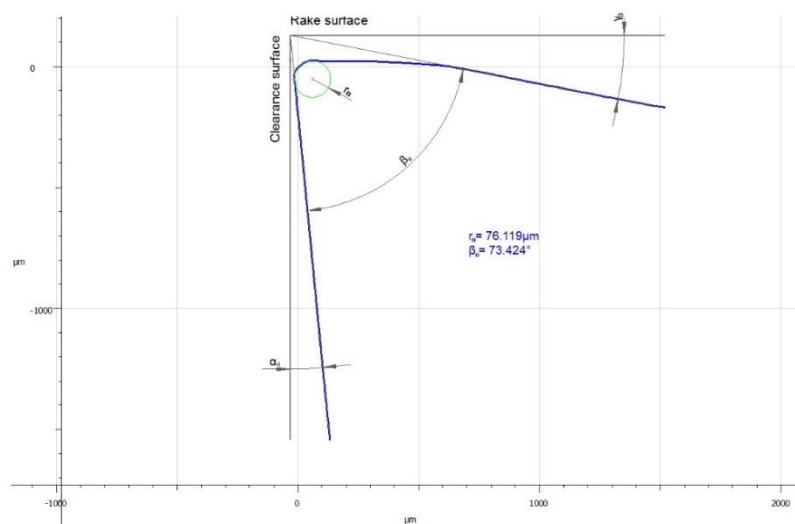
U destičky od výrobce 1 je použita kombinace funkčně gradientního substrátu a MTCVD povlaku (viz obrázek 73).



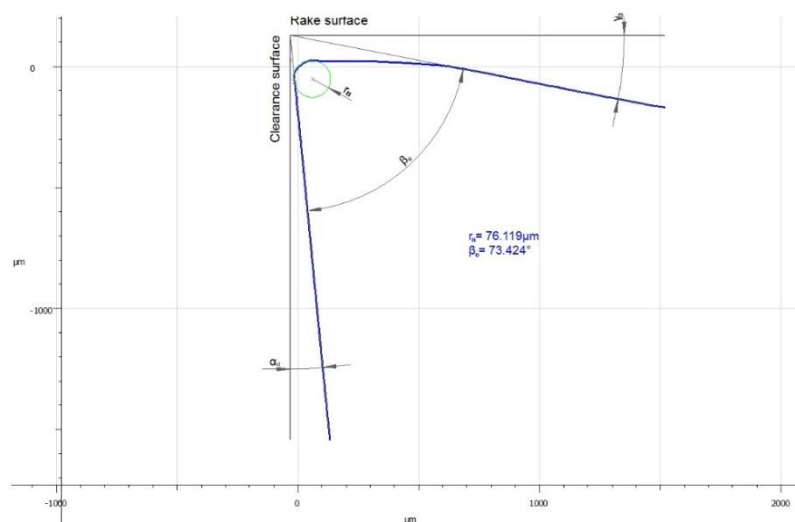
Obrázek 73. Vrstvy povlaku od výrobce 1 a jejich funkce podle [67].

4.5 Měření geometrie bříty

Měření geometrie bylo bříty provedeno na přístroji Alicona Infinite Focus G5.



Obrázek 74. Geometrie bříty destičky od výrobce 1 [67].

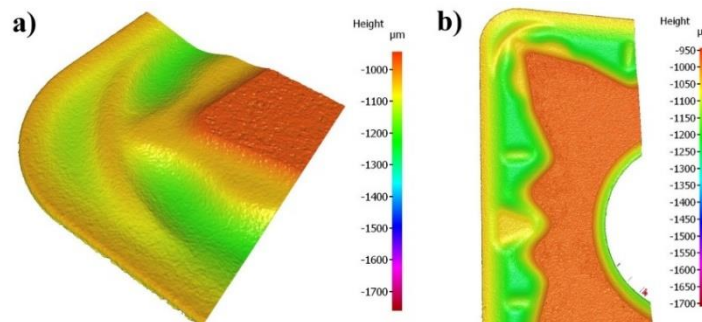


Obrázek 75. Geometrie bříty destičky od výrobce 1 [67]

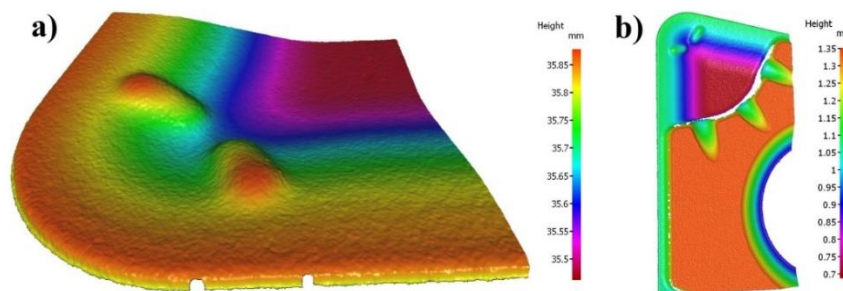
Na základě obrázku 74 a obrázku 75 lze vyhodnotit geometrii břitu. U destičky od výrobce 1 je poloměr zaoblení ostří $r_n = 53,550 \mu\text{m}$ a ortogonální úhel břitu $\beta_o = 75^\circ$. U destičky od výrobce 2 je poloměr zaoblení ostří $r_n = 76,119 \mu\text{m}$ a ortogonální úhel břitu $\beta_o = 73,4^\circ$. Pro obě destičky tedy platí $\beta_o < 90^\circ$, z čehož vyplývá, že se jedná o pozitivní geometrii řezné destičky. U destičky od výrobce 2 byl naměřen větší poloměr zaoblení špičky, z čehož by měla vyplývat vyšší tuhost břitu.

4.6 Měření geometrie čela

Měření geometrie čela bylo provedeno na přístroji Alicona Infinite Focus G5.



Obrázek 76. Snímky geometrie čela destičky od výrobce 1 [67].



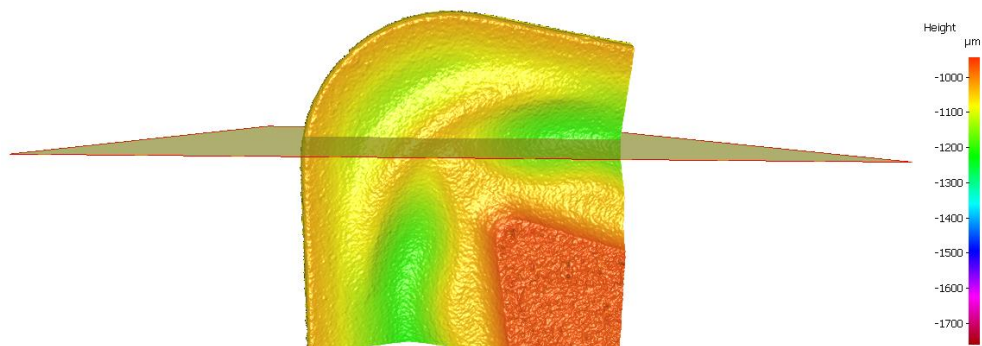
Obrázek 77. Snímky geometrie čela destičky od výrobce 2 [67].

Na obrázku 76 a obrázku 77 je zobrazena geometrie čela VBD. Lze vidět, že destičky mají úplně jiný tvar utvařeče třísek. Z výsledků pozorování opotřebení bylo patrné, že právě u VBD od výrobce 2 dochází k výraznému opotřebení utvařeče. Vyplývá z toho tedy, že utvařeč třísky u VBD od výrobce 1 plní lépe svoji funkci. Při výrazném opotřebení utvařeče není tříška správně utvářena a tvoří se dlouhá tříška, která se zamotává (viz obrázek 78).

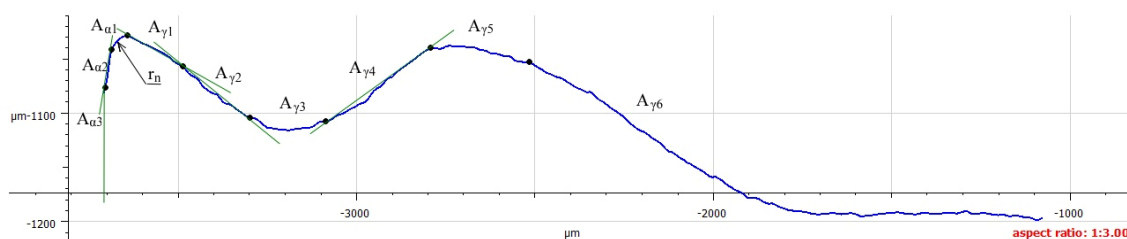


Obrázek 78. Snímek špatně utvářené třísky [67].

Čelo A_γ je souhrnem ploch, po kterých odchází tříška [2]. Na obrázku 80 lze vidět geometrii břítu v uvažovaném bodu ostří viz obrázek 79 (hodnoty na osách jsou v měřítku 1:3, geometrie je tedy zkreslená).

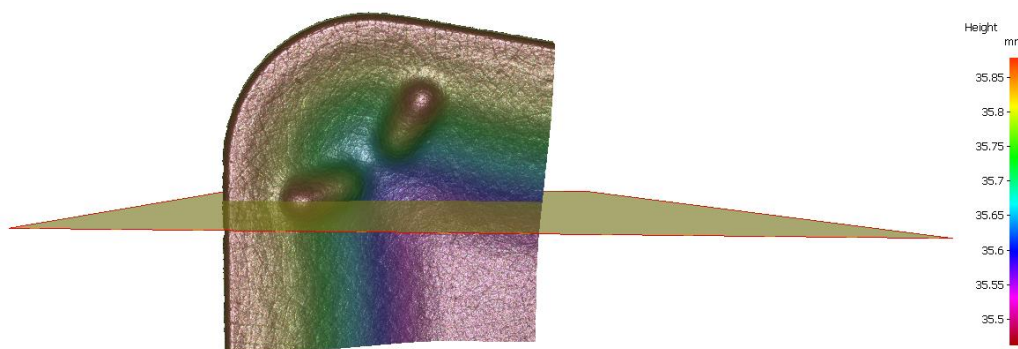


Obrázek 79. Snímek čela destičky výrobce 1 s rovinou řezu v uvažovaném bodu ostří [67].

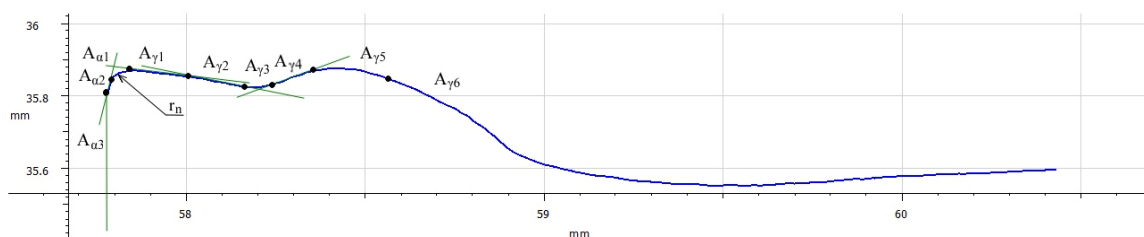


Obrázek 80. Topografie a geometrie břítu v uvažovaném bodu ostří podle [67].

Na obrázku 82 lze vidět geometrii břítu v uvažovaném bodu ostří viz obrázek 81 (hodnoty na osách jsou v měřítku 1:1, geometrie tedy odpovídá realitě).



Obrázek 81. Snímek čela destičky výrobce 2 s rovinou řezu v uvažovaném bodu ostří [67].

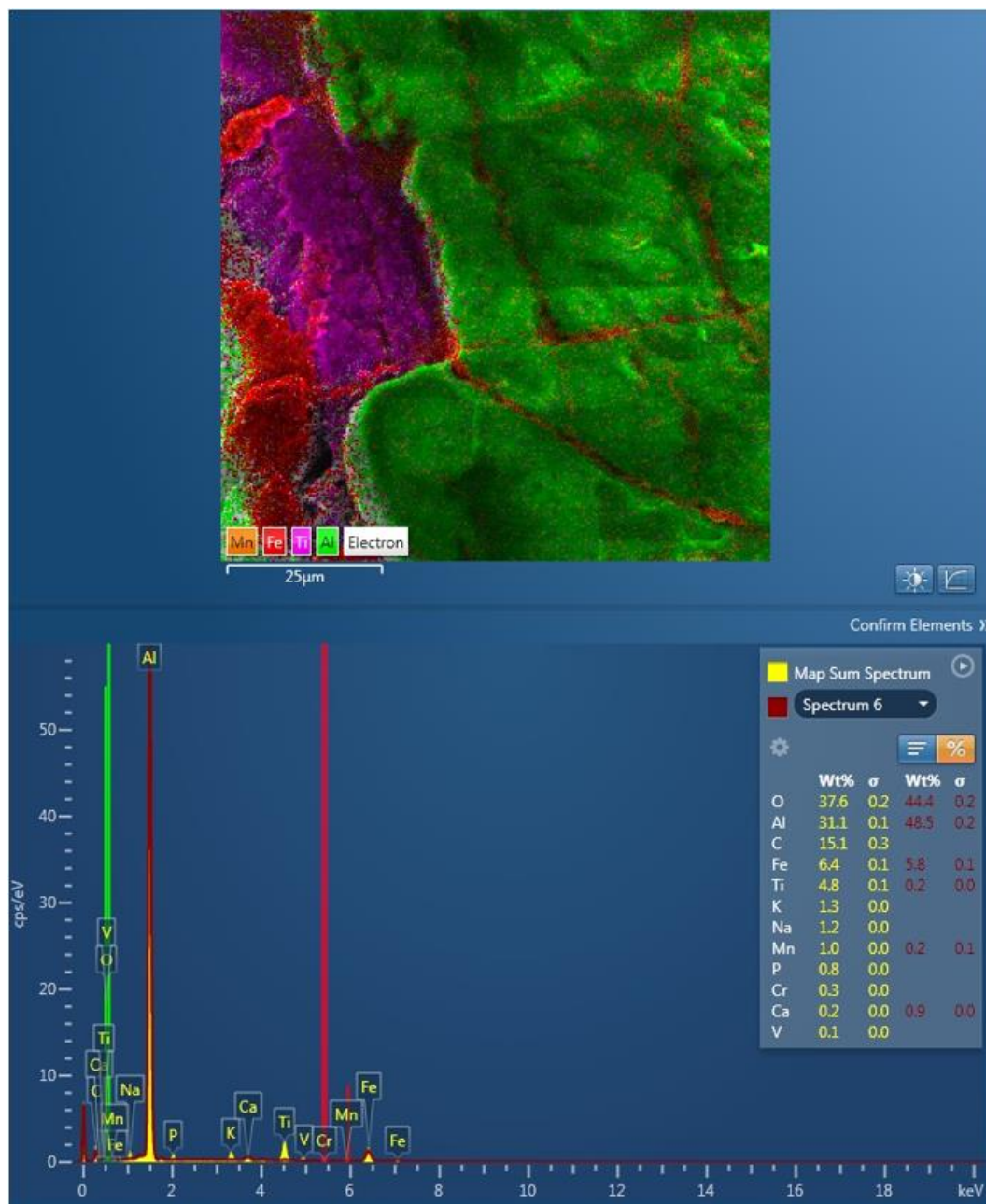


Obrázek 82. Topografie a geometrie břítu v uvažovaném bodu ostří podle [67].

4.7 Chemické složení povlaku

4.7.1 VBD od výrobce 1

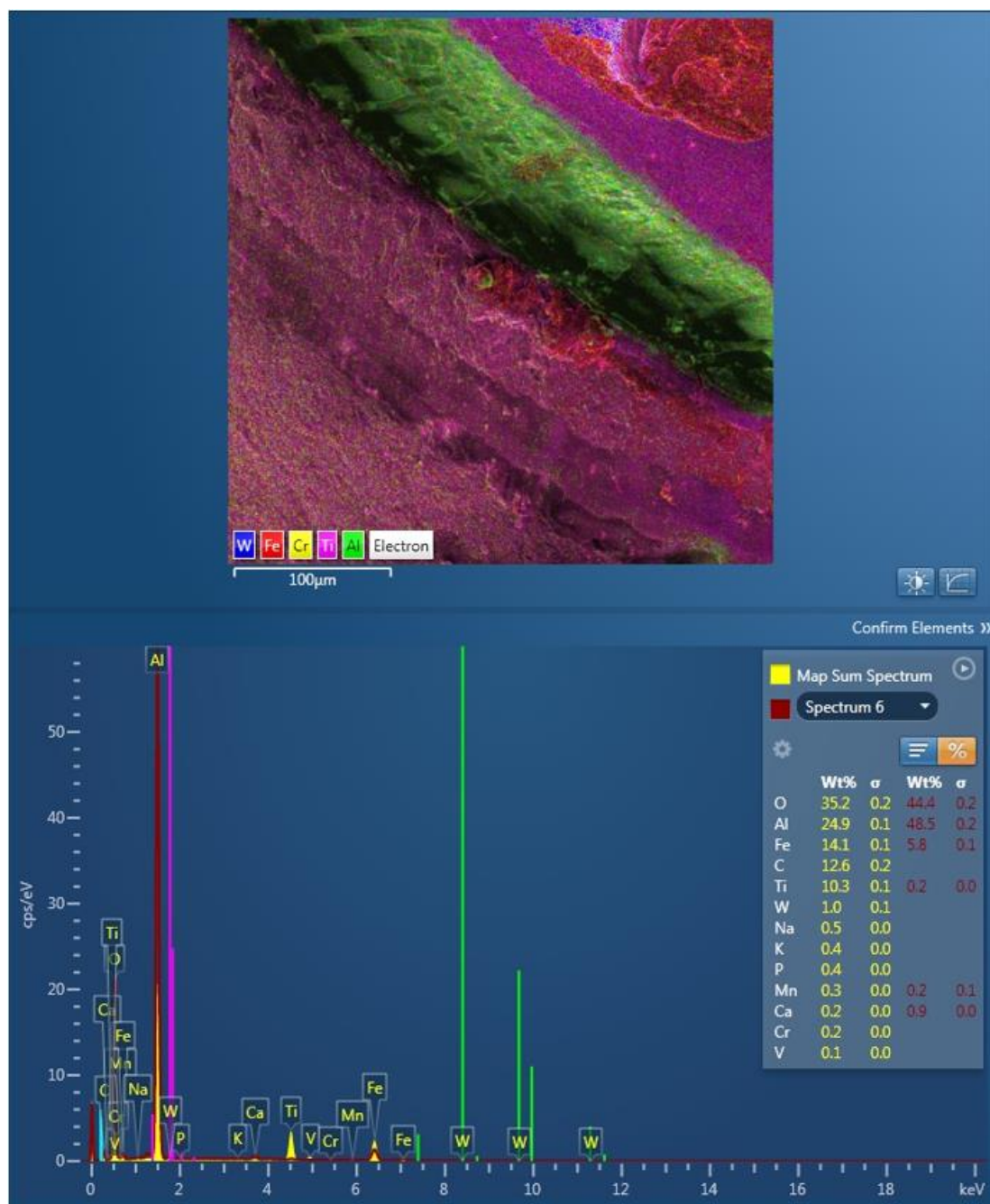
Chemické složení je měřeno pomocí elektronového mikroskopu. Je možné ho zjistit z pořízených snímků lomu pomocí EDS. Ve spodní polovině obrázku 83 je zobrazen obsah jednotlivých prvků (v hmotnostních procentech) na snímku lomu (obrázek 47).



Obrázek 83. Snímek mapování prvků u VBD od výrobce 1 ($v_c = 550$ m/min, $t = 5,1$ min) [67].

4.7.2 VBD od výrobce 2

Ve spodní polovině obrázku 84 je zobrazen obsah jednotlivých prvků (v hmotnostních procentech) na snímku lomu (obrázek 64).



Obrázek 84. Snímek mapování prvků u VBD od výrobce 2 ($v_c = 550$ m/min, $t = 5,1$ min) [67].

Hmotnostní procenta, která ze snímku vyplývají, neodpovídají skutečnému celkovému složení povlaku, neboť výsledky jsou výrazně ovlivněny rozsahem lomu v měřeném okamžiku a nesplňují podmínky pro daný způsob měření (rovinná plocha s danou velikostí atd.). Tato data nám ale mohou posloužit k pozorování rozsahu lomu v daných vrstvách povlaku.

ZÁVĚR

V teoretické části byly rozebrány metody povlakování, mechanismy opotřebení řezných nástrojů při obrábění a též byly v práci rozebrány experimentální smluvní zkoušky povlaků a hodnocení řezivosti nástrojů, které byly předmětem praktické části práce.

Z dané práce vyplývají tyto dílčí závěry:

- použití obou řezných materiálů a řezných rychlostí $v_c = 550$ m/min a $v_c = 650$ m/min při soustružení pružinové oceli 51CrV4 bylo ve výrobních podmínkách realizovatelné, stroj byl vyhovující,
- testované povlaky na bázi MTCVD na daných VBD byly velmi odolné vůči danému typu soustružení,
- geometrie utvařeče třísek destiček od výrobce 1 byla při daných řezných podmínkách odolnější než geometrie utvařeče třísek destičky od výrobce 2 a vedla ke vzniku kratších třísek,
- na základě snímků rozvoje opotřebení se jako vhodnější prokázala destička od výrobce 1, u které se při řezné rychlosti $v_c = 550$ m/min dosahovalo delší trvanlivosti (přibližně 6 minut), což představovalo délku řezné dráhy přibližně 3300 m.
- výrazným mechanismem opotřebení obou VBD byla abraze a delaminace povlaku na čele i hřbetě břitových destiček,
- u destiček od výrobce 1 nedocházelo k náhlému lomu celého břitu, při kterém by destička okamžitě ztrácela schopnost obrábět, ale pouze povlakované vrstvy na rozhraní povlaků se substrátem VBD, k tomuto opotřebení docházelo přibližně při dosažení hřbetního kritéria opotřebení $VB_B = 0,2$ mm,
- konkurenční vyměnitelná břitová destička od výrobce 2 tyto řezivostní vlastnosti neměla, při vyčerpání její řezivosti za daných podmínek docházelo k jejímu makroskopickému lomu i poškození nožového držáku.

V návaznosti na tuto práci by dále bylo možné hodnocení řezivosti při dalších řezných rychlostech či jiných parametrech řezného procesu (posuv, šířka záběru ostří nebo vliv chlazení).

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978_80_254_2250_2.
- [2] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN isbn80-214-2374-9.
- [3] ČEP, Robert. *Zkoušky nástrojů z řezné keramiky při přerušovaném řezu* [online]. Ostrava, 2005 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/disertacni_prace.pdf. Disertační práce. VŠB-TU Ostrava. Vedoucí práce Vladimír Vrba.
- [4] *Handbook of hard coatings: deposition technologies, properties and applications*. Editor Rointan F. BUNSHAH. Park Ridge: Noyes Publications, 2001. Materials science and process technology series. ISBN isbn0-8155-1438-7.
- [5] BENELMEKKI, Maria a Andreas ERBE. Nanostructured thin films—background, preparation and relation to the technological revolution of the 21st century. *Nanostructured Thin Films* [online]. Elsevier, 2019, s. 1-34 [cit. 2020-11-15]. Frontiers of Nanoscience. ISBN 9780081025727. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-102572-7.00001-5
- [6] 2. Mechanism of the vacuum thin film coating system. *ShinMaywa Industries* [online]. ShinMaywa Industries, Ltd, 2020 [cit. 2020-10-26]. Dostupné z: https://www.shinmaywa.co.jp/vac/english/vacuum/vacuum_2.html
- [7] *Naprašování tenkých vrstev* [online]. [cit. 2020-11-05]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34506/mod_resource/content/1/Naprasovani.pdf
- [8] *Doutnavý výboj* [online]. [cit. 2020-10-10]. Dostupné z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/pm/lectures/pm_prednaska6.pdf
- [9] KELLY, P.J a R.D ARNELL. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum* [online]. 2000, **56**(3), 159-172 [cit. 2020-11-15]. ISSN 0042207X. Dostupné z: doi:10.1016/S0042-207X(99)00189-X
- [10] HUGHES, Matt. *What is HIPIMS? High Power Impulse Magnetron Sputtering* [online]. Semicore Equipment, Inc., 2016 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <http://www.semicore.com/news/93-what-is-hipims>
- [11] GUDMUNDSSON, J., N. BRENNING, D. LUNDIN a U. HELMERSSON. High power impulse magnetron sputtering discharge. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* [online]. 2012, **30**(3) [cit. 2021-02-28]. ISSN 0734-2101. Dostupné z: doi:10.1116/1.3691832
- [12] KONSTANTINIDIS, S., J. DAUCHOT, M. GANCIU, A. RICARD a M. HECQ. Influence of pulse duration on the plasma characteristics in high-power pulsed magnetron discharges. *Journal of Applied Physics* [online]. 2006, **99**(1) [cit. 2021-02-28]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.2159555
- [13] SAMUELSSON, Mattias, Daniel LUNDIN, Jens JENSEN, Michael RAADU, Jon GUDMUNDSSON a Ulf HELMERSSON. On the film density using high power impulse magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2010, **205**(2), 591-596 [cit. 2021-03-01]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2010.07.041

- [14] ENGWALL, A.M., S.J. SHIN, J. BAE a Y.M. WANG. Enhanced properties of tungsten films by high-power impulse magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2019, **363**, 191-197 [cit. 2021-03-02]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2019.02.055
- [15] RF sputtering. *Angstrom Engineering* [online]. Kitchener Ontario: Angstrom Engineering Inc., 2020 [cit. 2020-11-06]. Dostupné z: <https://angstromengineering.com/tech/magnetron-sputtering/rf-sputtering/>
- [16] RF-Sputtering principles. *CNRIFN* [online]. IFN Trento [cit. 2020-11-06]. Dostupné z: <http://www.tn.ifn.cnr.it/facilities/rf-sputtering-facility/rf-sputtering-principles>
- [17] DC Sputtering VS RF Sputtering. *AEM Deposition* [online]. China: Advanced Engineering Materials, 2019 [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: <https://www.aemdeposition.com/sputtering-targets-news/dc-sputtering-vs-rf-sputtering.html>
- [18] *Understanding Thin Film Process Technologies* [online]. Colorado: Research Electro-Optics, Inc., 2021 [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: <https://www.reoinc.com/technical-resources/cat/78/technical-tutorials/article/Coating-Process-Tutorial>
- [19] EXARHOS, Gregory, Vitaly GRUZDEV, Joseph MENAPACE et al. *Comparative STEREO-LID (Spatio-Temporally RESolved Optical Laser-Induced Damage) studies of critical defect distributions in IBS, ALD, and electron-beam coated dielectric films* [online]. In: . [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: doi:10.1117/12.2196548
- [20] *3. Srážky molekul, střední volná dráha* [online]. Přírodovědecká fakulta Univerzita Karlova [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: https://web.natur.cuni.cz/~zuskova/ktp_2_so.pdf
- [21] What is thermal evaporation. *ALB Materials* [online]. ALB Materials Inc [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.albmaterials.com/what-is-thermal-evaporation.html>
- [22] ELECTRON BEAM EVAPORATION. *Midwest Tungsten Service* [online]. Midwest Tungsten Service, 2020 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.tungsten.com/how-does-electron-beam-evaporation-work/>
- [23] DENG, Yang, Wanglin CHEN, Bingxin LI, Chengyong WANG, Tongchun KUANG a Yanqiu LI. Physical vapor deposition technology for coated cutting tools: A review. *Ceramics International* [online]. 2020, **46**(11), 18373-18390 [cit. 202-11-22]. ISSN 02728842. Dostupné z: doi:10.1016/j.ceramint.2020.04.168
- [24] LIU, Z. Laser Applied Coatings. *Shreir's Corrosion* [online]. Elsevier, 2010, s. 2622-2635 [cit. 2021-02-05]. ISBN 9780444527875. Dostupné z: doi:10.1016/B978-044452787-5.00141-4
- [25] EL KADI, Khadije a Isam JANAJREH. Desalination by Freeze Crystallization: An Overview. *International Journal of Thermal & Environmental Engineering (IJTEE)* [online]. 2017, **15**, 103-110 [cit. 2020-10-18]. Dostupné z: doi:10.5383/ijtee.15.02.004
- [26] JENSEN, K. a D. GRAVES. Modeling and Analysis of Low Pressure CVD Reactors. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 1983, **130**(9), 1950-1957 [cit. 2020-11-16]. ISSN 0013-4651. Dostupné z: doi:10.1149/1.2120129

- [27] Trendy v povlakování slinutých karbidů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001, **20017**, 43-44 [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>
- [28] E. UNDERCOFFER, Kenneth. *MT CVD process: 1999-03-02 2000-11-14*. 1999. United States. US6146697A. Uděleno 14.11.2000. Zapsáno 02.03.1999.
- [29] PVD vs CVD: How to Choose the Right Tool Coating. *Youtube* [online]. Copyright © 2021 Google LLC, 2018 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=CH3IsHP7IIM>
- [30] The Advantages Of PVD Coating For Cutting Tools. *PVD Target* [online]. Xianyang City: Haohai Metal Materials Co., Ltd., 2018 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <http://www.pvdtarget.com/info/the-advantages-of-pvd-coating-for-cutting-tool-23249873.html>
- [31] Weighing the Benefits of Sputtering vs. Evaporation. *Denton Vacuum* [online]. © 2021 Denton Vacuum. All Rights Reserved [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.dentonvacuum.com/weighing-the-benefits-of-sputtering-vs-evaporation/>
- [32] PAULITSCH, J., P.H. MAYRHOFER, W.-D. MÜNZ a M. SCHENKEL. Structure and mechanical properties of CrN/TiN multilayer coatings prepared by a combined HIPIMS/UBMS deposition technique. *Thin Solid Films* [online]. 2008, **517**(3), 1239-1244 [cit. 2021-03-02]. ISSN 00406090. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsf.2008.06.080
- [33] BOUZAKIS, K.-D., S. MAKRIMALLAKIS, G. KATIRTZOGLU et al. Adaption of graded Cr/CrN-interlayer thickness to cemented carbide substrates' roughness for improving the adhesion of HPPMS PVD films and the cutting performance. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2010, **205**(5), 1564-1570 [cit. 2021-03-02]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2010.09.010
- [34] HOVSEPIAN, P., A.P. EHIASARIAN, A. DEEMING a C. SCHIMPF. Novel TiAlCN/VCN nanoscale multilayer PVD coatings deposited by the combined high-power impulse magnetron sputtering/unbalanced magnetron sputtering (HIPIMS/UBM) technology. *Vacuum* [online]. 2008, **82**(11), 1312-1317 [cit. 2021-03-07]. ISSN 0042207X. Dostupné z: doi:10.1016/j.vacuum.2008.03.064
- [35] BARSHILIA, Harish, N. SELVAKUMAR, B. DEEPTHI a K.S. RAJAM. A comparative study of reactive direct current magnetron sputtered CrAlN and CrN coatings. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2006, **201**(6), 2193-2201 [cit. 2021-03-04]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2006.03.037
- [36] BOBZIN, K., N. BAGCIVAN, P. IMMICH, S. BOLZ, R. CREMER a T. LEYENDECKER. Mechanical properties and oxidation behaviour of (Al,Cr)N and (Al,Cr,Si)N coatings for cutting tools deposited by HPPMS. *Thin Solid Films* [online]. 2008, **517**(3), 1251-1256 [cit. 2021-03-04]. ISSN 00406090. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsf.2008.06.050
- [37] MA, Quansheng, Liuhe LI, Ye XU, Jiabin GU, Lei WANG a Yi XU. Effect of bias voltage on TiAlSiN nanocomposite coatings deposited by HiPIMS. *Applied Surface Science* [online]. 2017, **392**, 826-833 [cit. 2021-03-28]. ISSN 01694332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2016.09.028

- [38] HOVSEPIAN, Papken a Arutiun EHIASARIAN. Six strategies to produce application tailored nanoscale multilayer structured PVD coatings by conventional and High Power Impulse Magnetron Sputtering (HIPIMS). *Thin Solid Films* [online]. 2019, **688** [cit. 2021-03-07]. ISSN 00406090.
Dostupné z: doi:10.1016/j.tsf.2019.137409
- [39] MÜNZ, W.D., I.J. SMITH, C. SCHÖNJAHN, A.P. DEEMING a S. CLAPHAM. PVD Superlattice Structured Hard Coatings Designed for Dry High Speed Machining. *In II Int. Seminar on Improving Machining Tool Performance* [online]. 2000 [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <http://imtp.free.fr/imtp2/B2/Munz.pdf>
- [40] BRAUN, R., A. LANGE, P.Eh. HOVSEPIAN, A.P. EHIASARIAN, R. TIETEMA a C. LEYENS. Oxidation behaviour of TiAlYN/CrN and CrAlYN/CrN nanoscale multilayer coatings with Al₂O₃ topcoat deposited on γ -TiAl alloys. *Materials at High Temperatures* [online]. 2014, **28**(4), 324-335 [cit. 2021-03-14]. ISSN 0960-3409. Dostupné z: doi:10.3184/096034011X13189511864595
- [41] LEWIS, D.B., P.E. HOVSEPIAN, C. SCHÖNJAHN, A. EHIASARIAN a I.J. SMITH. Industrial scale manufactured superlattice hard PVD coatings. *Surface Engineering* [online]. 2013, **17**(1), 15-27 [cit. 2021-03-12]. ISSN 0267-0844.
Dostupné z: doi:10.1179/026708401101517557
- [42] HOVSEPIAN, Papken, Arutiun EHIASARIAN, Yashodhan PURANDARE, Arunprabhu SUGUMARAN, Tim MARRIOTT a Imran KHAN. Development of superlattice CrN/NbN coatings for joint replacements deposited by high power impulse magnetron sputtering. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* [online]. 2016, **27**(9) [cit. 2021-03-13]. ISSN 0957-4530.
Dostupné z: doi:10.1007/s10856-016-5751-0
- [43] ČEP, Robert. *Přednáška z předmětu Speciální a experimentální metody v obrábění: 8. MĚŘENÍ SLOŽEK SÍLY ŘEZÁNÍ* [online]. [cit. 2021-02-08].
Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_08.pdf
- [44] Příručka pro technology - Jak je to s reznými silami?. *MM Průmyslové spektrum* [online]. © 2001 - 2021 Copyright. MM Průmyslové spektrum, 2012 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami>
- [45] HUMÁR, Anton. *Technologie I.: Technologie obrábění - 1. část* [online]. 2003 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/xx/document/read/9282837/sylabus-humar-296mb-fsi-vut-vysoke-uceni-technicke-v-brne>
- [46] Příručka pro technology - Opotřebení se nevyhneme!. *MM Průmyslové spektrum* [online]. © 2001 - 2021 Copyright. MM Průmyslové spektrum, 2012 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html>
- [47] *Opotřebení nástroje* [online]. ELUC [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1203>
- [48] NÁSTROJE A PARAMETRY MAJÍ V ÚSPĚŠNÉM OBRÁBĚNÍ STÁLE KLÍČOVOU ÚLOHU. *Seco Tools* [online]. Seco Tools AB [cit. 2021-02-17].
Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/21472?language=cs>

- [49] ARMAREGO, E, S VEREZUB a P SAMARANAYAKE. The effect of coatings on the cutting process, friction, forces and predictive cutting models in machining operations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* [online]. 2002, **216**(3), 347-356 [cit. 2021-03-13]. ISSN 0954-4054. Dostupné z: doi:10.1243/0954405021520012
- [50] RECH, J. Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool–chip interface in orthogonal dry turning. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2006, **200**(16-17), 5132-5139 [cit. 2021-03-13]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2005.05.032
- [51] GALASSI, I., M. PISKA, M. VEPREK-HEIJMAN, S. VEPREK a T. CSELLE. *Applications of hard and superhard nanocomposite coatings on tools for machining, forming and stamping – A Guide for SMEs* [online]. Vyšlo pod hlavičkou VINP (The Virtual Institute of Nano Films) Network of Excellence EXCELL, Rámcový program EC, **32011** [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <http://www.yumpu.com/en/document/view/9282201/virtual-institute-of-nano-films-applications-of-shm-cz>
- [52] ŠÍMA, Michal, Mojmír JÍLEK, Pavel HOLUBÁŘ a Ondřej ZINDULKA. Měření vlastností povlaků na nástrojích. *MM Průmyslové spektrum* [online]. © 2001 - 2021 Copyright. MM Průmyslové spektrum, 2004 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-vlastnosti-povlaku-na-nastrojich>
- [53] ANISIMOV, Evgeniy, Pavlína HÁJKOVÁ a Jakub HORNÍK. *VYUŽITÍ PVD POVLAKŮ PRO FUNKČNĚ GRADOVANÉ MATERIÁLY* [online]. Ústav materiálového inženýrství, fakulta strojní ČVUT v Praze [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/48762/HornikJ_VyuzitiPVD_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [54] KŘÍŽ, Antonín. *HODNOCENÍ VLASTNOSTÍ SYSTÉMŮ TENKÁ VRSTVA-SUBSTRÁT* [online]. Katedra materiálů a strojírenské metalurgie, Fakulta strojní, ZČU, 2009 [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16435/1/Kriz.pdf>
- [55] HASSAN, M.A., A.R. BUSHROA a Reza MAHMOODIAN. Identification of critical load for scratch adhesion strength of nitride-based thin films using wavelet analysis and a proposed analytical model. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2015, **277**, 216-221 [cit. 2021-03-20]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2015.07.061
- [56] NOVOTNÝ, Tomáš. *Studium mechanických vlastností tenkých vrstev* [online]. Brno, 2012 [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/b2ea3/Novotny_Diplomova_prace.pdf. Diplomová práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Vilma Buršíková.
- [57] SOSNOVÁ, Martina a Antonín KŘÍŽ. *Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně-kohezivního a tribologického chování* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2009 [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/FRVS_zprava_dalsi_studium_sosnova.pdf

- [58] ŠŤASTNÝ, Patrik. *Měření mikrotvrdomosti modifikovaného polyamidu 11* [online]. Zlín, 2013 [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24587/%C5%A1%C5%A5astn%C3%BD_2013_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce David Maňas.
- [59] BROITMAN, Esteban. Indentation Hardness Measurements at Macro-, Micro-, and Nanoscale: A Critical Overview. *Tribology Letters* [online]. 2017, **65**(1) [cit. 2021-03-21]. ISSN 1023-8883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-016-0805-5
- [60] Zkoušky tvrdosti. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrdomosti.pdf
- [61] HWANG, So, Na LEE a Naksoo KIM. Experiment and Numerical Study of Wear in Cross Roller Thrust Bearings. *Lubricants* [online]. 2015, **3**(2), 447-458 [cit. 2021-03-23]. ISSN 2075-4442. Dostupné z: doi:10.3390/lubricants3020447
- [62] GHARBI, Oumaïma. In-situ investigation of elemental corrosion reactions during the surface treatment of Al-Cu and Al-Cu-Li alloys. *Chemical Physics [physics.chem-ph]* [online]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2016 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01535612/document>
- [63] INKSON, B.J. Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods* [online]. Elsevier, 2016, s. 17-43 [cit. 2021-03-31]. ISBN 9780081000403. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100040-3.00002-X
- [64] HÁJKOVÁ, Z., P. BAUEROVÁ, A. FEJFAR a M. ŠLOUF. ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP – KLÍČK ODHALENÍ TAJEMSTVÍ MIKRO – A NANOSVĚTA. *Chemické Listy* [online]. Laboratoř nanostruktur a nanomateriálů, Ústav makromolekulární chemie, 2018, **112**(128-134) [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/2995/2987>
- [65] ČEP, Robert. *Technologie II – 1. díl* [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf. Skriptum. VŠB Ostrava.
- [66] ČEP, Robert. *Přednáška z předmětu Speciální a experimentální metody v obrábění: 6. OBROBITELNOST MATERIÁLŮ* [online]. VŠB TU Ostrava [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_06.pdf
- [67] PÍŠKA, Miroslav. *Interní informace*. Brno.
- [68] ČSN EN ISO 14284 (420504). *ČSN EN ISO 14284 (420504). Ocel a železo - Vzorkování a příprava vzorků pro stanovení chemického složení*. 2003.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AACVD	Aerosol-Assisted Chemical Vapour Deposition
Al	hliník
AlCN	karbido-nitrid hliníku
AlN	nitrid hliníku
Al₂O₃	oxid hlinitý
BSE	Backscattered Electrons
Cr	chrom
CrN	nitrid chromu
CVD	Chemical Vapour Deposition
DCMS	Direct Current Magnetron Sputtering
DSI	Depth Sensing Indentation
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
HFCVD	Hot-Filament Chemical Vapour Deposition
HIPIMS	High-power Impulse Magnetron Sputtering
GD-OES	Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy
IAD	Ion Assisted Deposition
IBS	Ion Beam Sputtering
LCVD	Laser Induced Chemical Vapour Deposition
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapour Deposition
MOCVD	Metal-Organic Chemical Vapour Deposition
MTCVD	Moderate Temperature Chemical Vapour Deposition
Ni	nikl
NbN	nitrid niobu
PACVD	Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition
PVD	Physical Vapour Deposition
RF	Radio Frequency
RTG	Rentgenové záření
SEM	Scanning Electron Microscope
SiN	nitrid křemíku
Si₃N₄	nitrid křemičitý

SE	Secondary Electrons
SK	slinutý karbid
Ti	titan
TiN	nitrid titanu
TiCN	karbido-nitrid titanu
VBD	vyměnitelná břitová destička
VN	nitrid vanadu
V₂O₅	oxid vanadičný
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy
XRD	X-ray Diffraction
YN	nitrid yttria

Symbol	Jednotka	Popis
°C		stupeň celsia
C_{Fc}	[MPa]	materiálová konstanta
C_{Ff}	[MPa]	materiálová konstanta
C_{Fp}	[MPa]	materiálová konstanta
D_{max}	[mm]	největší průměr zkušebního disku
D_{min}	[mm]	nejmenší průměr zkušebního disku
F	[N]	výsledná síla při soustružení
F_c	[N]	řezná síla při soustružení
F_f	[N]	posuvová síla při soustružení
F_p	[N]	pasivní síla při soustružení
F_z	[N]	zkušební zatížení při zkoušce mikrotvrlosti
HV	[MPa]	tvrdost podle Vickerse
J	[mA·cm ⁻²]	proudová hustota iontů
KB	[mm]	šířka žlábků na čele
KT	[mm]	hloubka žlábků na čele
Lc1	[N]	zatížení, při kterém dochází k prvnímu porušení
Lc2	[N]	zatížení, při kterém dochází k porušení povlaku většího rozsahu

Lc3	[N]	zatížení, při kterém dochází k prvnímu adheznímu porušení povlaku
LS	[N]	Zatížení, při kterém dojde k úplnému odhalení substrátu
MHz		megahertz
N		newton
Pa		pascal
R	[Å·min ⁻¹]	rychlost eroze terče
R_a	[μm]	průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti
R_k	[μm]	poloměr kuličky
S	[atomy/iont]	výtěžnost naprašování
T	[min]	trvanlivost bříty
V		volt
VB	[mm]	šířka fazetky opotřebení na hřbetě
VB_{opt}	[mm]	šířka fazetky opotřebení na hřbetě
VR	[mm]	radiální otupení
a_p	[mm]	šířka záběru ostří
d	[mm]	průměrná hodnota uhlopříčky vtisku Vickersovým jehlanem
d_a	[mm]	dlouhá uhlopříčka vtisku Knoopovým jehlanem
c_v	[-]	konstanta
cm		centimetr
eV		elektronvolt
f_n	[mm]	posuv na otáčku
h	[mm]	hloubka vtisku při zkouškách mikrotvrlosti
i_o	[-]	index obrobitelnosti
m	[-]	směrnice přímky
m_t	[g]	atomová hmotnost
r₁	[μm]	poloměr vnitřní kružnice (hranice povlaku a substrátu)
r₂	[μm]	vnější poloměr kulového vrchlíku
r_n	[μm]	poloměr zaoblení bříty
v_c	[m·min ⁻¹]	řezná rychlost
w	[mm]	šířka zkušebního disku

x_{Fc}	[-]	exponent vlivu šířky záběru
x_{Ff}	[-]	exponent vlivu šířky záběru
x_{Fp}	[-]	exponent vlivu šířky záběru
y_{Fc}	[-]	exponent vlivu posuvu
y_{Ff}	[-]	exponent vlivu posuvu
y_{Fp}	[-]	exponent vlivu posuvu
α_0	[°]	nástrojový ortogonální úhel hřbetu
β_0	[°]	nástrojový ortogonální úhel břitu
γ_0	[°]	nástrojový ortogonální úhel čela
ρ	[g·cm ⁻³]	měrná hmotnost materiálu terče
°		úhlový stupeň