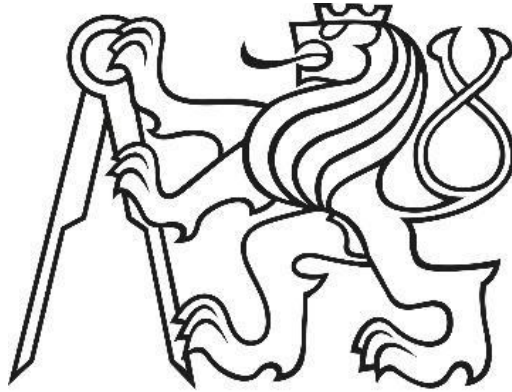


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta strojní
Ústav materiálového inženýrství**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vliv parametrů depozice na drsnost povlaků nanesených
metodou PVD**

**Effect of deposition parameters on roughness of coating
prepared by PVD method**

Autor: Sarah Duníková

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Krum, Ph.D.

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Duníková** Jméno: **Sarah** Osobní číslo: **438626**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv parametrů depozice na drsnost povlaků nanesených metodou PVD

Název bakalářské práce anglicky:

Effect of deposition parameters on roughness of coating prepared by PVD method

Pokyny pro vypracování:

Cíl: Analýza a vyhodnocení vlivu depozičních parametrů na drsnost povlaků na bázi AlCr

Postup:

- 1) Literární rešerše povlaků AlCr, metod jejich přípravy a metod měření parametrů drsnosti
- 2) Příprava vzorků pro experimentální část
- 3) Experiment - měření vybraných drsnostních parametrů, pozorování pomocí SEM
- 4) Vyhodnocení a porovnání výsledků provedených experimentů

Seznam doporučené literatury:

[1] Jaffee H.W, Lawrence K.Y, An investigation of the effect of surface roughness and coating thickness on the friction and wear behaviour of a commercial MoS₂-metal coating on AISI 400C steel, Wear Volume 237, Issue 2, February 2000, Pages 283-287

[2] Lindholm P., Björklund S., Svahn F., Method and surface roughness aspects for the design of DLC coatings, Wear Volume 261, Issue 1, 20 July 2006, Pages 107-111

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Stanislav Krum, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

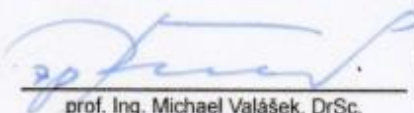
Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

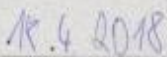

Ing. Stanislav Krum, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

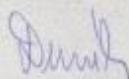

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valásek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.


Datum převzetí zadání


Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, a že veškerá použitá odborná literatura je uvedena v seznamu, který je součástí této práce.

V Praze dne:

.....

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Stanislavu Krumovi, Ph.D. za odborné vedení, připomínky a rady při vypracování této bakalářské práce, za jeho trpělivost a čas, který mi byl ochoten věnovat při konzultacích a provádění experimentu.

Dále bych chtěla poděkovat Ing. Janu Krčilovi za pomoc a odborné rady při přípravě vzorků.

Abstrakt

Bakalářská práce se věnuje vlivu vybraných depozičních parametrů metody PVD na drsnost a morfologii CrAl povlaku. Pro experiment byla použita metoda nevyváženého magnetronového naprašování, při kterém se zvyšovala hodnota záporného předpětí, tzv. biasu. Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část. V teoretické části jsou uvedeny a přiblíženy metody fyzikální depozice PVD a popsány některé základní vlastnosti povlaků a způsoby jejich měření. Druhá část této práce je zaměřena na experiment, ve kterém je hodnocen vliv záporného předpětí depozice na drsnost, morfologii a tloušťku deponovaného povlaku. Z výsledků je patrný vliv tohoto parametru na drsnost, se kterou bias vykazuje nelineární závislost. Dále byl prokázán značný vliv záporného předpětí na vzniklé krystaly povlaku a jeho tloušťku, která se s rostoucí hodnotou biasu snižuje.

Klíčová slova

PVD, nevyvážené magnetronové naprašování, bias, drsnost

Abstract

The bachelor thesis deals with the effect of selected deposition parameters of PVD method on roughness and morphology of CrAl coating. In the experiment, coatings were prepared using an unbalanced magnetron sputtering method with different values of bias voltage. The thesis is divided into theoretical part and experimental part. The theoretical part describes different methods of physical vapor deposition and basic properties of coatings and methods of their measurement. Second part of this work is focused on an experiment in which the effect of different bias voltage of the deposition on roughness, morphology and thickness of the deposited coating is evaluated. The results show the effect of this parameter on the roughness, with which the bias has non-linear dependence, and also significant influence of bias on the crystals of the coating and its thickness, which decreases with the increasing bias.

Key words

PVD, unbalanced magnetron sputtering, bias, roughness

Obsah

1	Úvod	7
2	Teoretická část.....	8
2.1	PVD (Physical Vapor Deposition)	8
2.1.1	Naprašování	9
2.1.2	Napařování	13
2.2	Vlastnosti povlaků	14
2.2.1	Adheze	14
2.2.2	Tvrdost	15
2.2.3	Tloušťka	16
2.2.4	Chemická a teplotní odolnost	16
2.2.5	Drsnost.....	17
3	Experimentální část.....	23
3.1	Hodnocení drsnosti	24
3.2	Morfologie povrchu.....	26
	Závěr	31
	Seznam symbolů a zkratk.....	32
	Seznam obrázků.....	33
	Seznam tabulek	33
	Bibliografie.....	34

1 Úvod

V průběhu několika posledních let se povlaky staly neodmyslitelnou součástí mnoha průmyslových odvětví. Ve strojírenského průmyslu mluvíme zejména o výrobních operacích jako je soustružení, vrtání, řezání závitů apod. Povlaky jsou tenké vrstvy (zpravidla několik mikrometrů) velmi tvrdých a otěruvzdorných materiálů a poskytují účinnou ochranu nástroje před nepříznivými vlivy obrábění, kterými jsou například vysoké teploty, tlaky a napětí. Zajišťují tak několikanásobně větší životnost břitů nástroje a povlakování se tedy stalo významným ekonomickým přínosem výrobních procesů. Jejich využití sahá například i do lékařského prostředí, ať už pro lékařské nástroje, tak pro různé implantáty či kloubní náhrady. Povlaky ale zdaleka neplní jen funkci ochrannou, jejich dekorativní využití je rovněž velmi rozšířené.

S rostoucím využíváním povlaků rostou i požadavky na jejich kvalitu a užité vlastnosti. Možností k dosažení požadovaných vlastností existuje celá řada. Nabízí se obrovské možnosti kombinací základních materiálů a povlaků, stejně tak nepřeberné množství materiálového složení povlaků a jejich možné vrstvení. V neposlední řadě má na výsledné vlastnosti vliv i druh depozice či konkrétně jeho parametry.

Cílem této bakalářské práce je vyhodnocení morfologie povrchu a drsnosti povlaku deponovaného nevyváženým magnetronovým naprašováním při různých hodnotách záporného předpětí depozice, tzv. biasu.

2 Teoretická část

V této části jsou popsány základní metody fyzikálního povlakování. Podrobněji je popsána metoda magnetronového naprašování, která byla využita pro experiment. Dále se tato kapitola zabývá některými vlastnostmi povlaků a způsoby jejich měření.

2.1 PVD (Physical Vapor Deposition)

Pojem PVD byl poprvé použit v roce 1966 v knize Vapor Deposition, jejímiž autory byli C.F. Powell, J.H.Oxley a M. Blocher Jr., pojem použili, aby rozlišili dva typy depozice podle zdroje – tedy PVD (Physical vapor deposition) a CVD (Chemical vapor deposition). Hlavním rozdílem je mechanismus tvorby povlaku, kde základem tvorby povlaku metodou CVD jsou chemické reakce, zatímco základem pro metody PVD jsou fyzikální procesy jako přenos pohybové energie a tepelná energie [1, 2].

Fyzikální depozice probíhá za poměrně nízkých pracovních teplot – obvykle okolo 250 °C – 450 °C. Tyto teploty však v závislosti na druhu povlakovaného materiálu a druhu povlaku mohou být podstatně nižší (až 30 °C) a zároveň o něco vyšší (600 °C). Nízká teplota zaručuje, že nedojde k tepelnému ovlivnění nástroje. Další charakteristickou vlastností jsou nízké tlaky ve vakuové komoře (0,1 – 1 Pa), ve které depozice probíhá [1, 3].

Při fyzikální depozici vrstev je nanášený materiál přítomen ve vakuové komoře v tekutém nebo pevném stavu a převádí se do stavu plynného. Jednotlivé metody PVD povlakování se pak liší ve způsobu získávání kovových iontů, a to buď odprašováním nebo odpařováním [3].

2.1.1 Naprašování

Při klasickém naprašování je ve vakuové komoře umístěn terč, na který je přiveden vysoký záporný potenciál. Do komory se vpouští pracovní plyn, zpravidla inertní argon, jehož částice jsou štěpeny na elektrony a ionty při kolizích s elektrony v procesu známém jako ionizace. Tím je vytvořeno plazma, které je plynnou směsí elektricky neutrálních atomů a nabitých iontů. Kladně nabitě ionty pracovního plynu jsou urychleny pomocí negativního předpětí na kovový terč (katodu), který slouží jako zdroj povlakovaného materiálu a zároveň jako zdroj sekundárních elektronů. Tyto těžké kladně nabitě ionty argonu narážejí do povrchu targetu, svým dopadem rozprašují terč a vyrážejí z něj atomy kovu, které se později stanou součástí povlaku. Čím více iontů argonu při vyšší energii narazí do povrchu targetu, tím více je uvolněno kovových prvků z jeho povrchu [4, 5].

- Radiofrekvenční naprašování

Radiofrekvenční metoda naprašování umožňuje depozici povlaků z nevodivých terčů, ze kterých nelze získávat materiál připojením stejnosměrného proudu. Metoda probíhá při výrazně nižších tlacích (elektrony kmitající s vysokou frekvencí získávají dostatečnou energii pro vznik ionizujících srážek). Touto metodou lze vytvářet různé druhy nevodivých, vodivých i polovodivých povlaků. Lze ji využít i pro magnetronové naprašování [1].

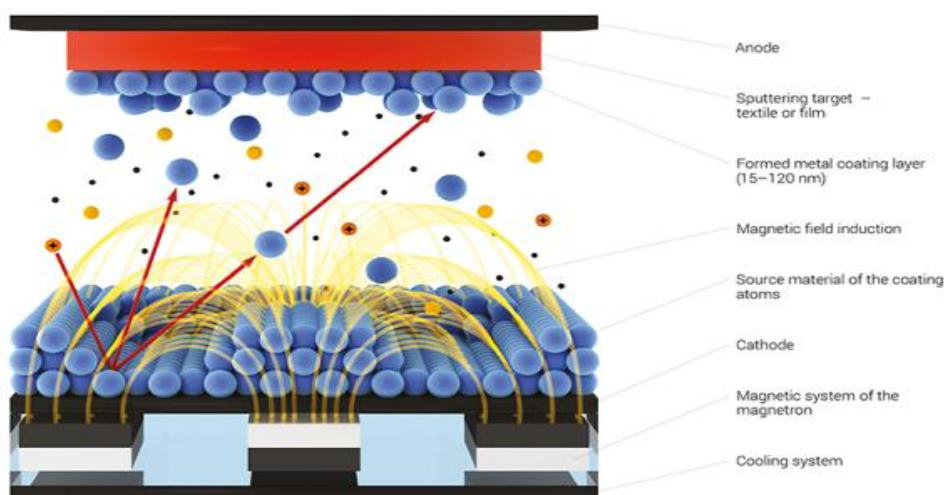
- Naprašování iontovým paprskem

Iontový paprsek o vysoké energii (stovky až tisíce eV), tvořený z inertního nebo reaktivního plynu, je využíván ve dvou konfiguracích. První variantou je odprašování iontovým paprskem, kde jsou ionty ze zdroje nasměrovány na terč a odprášený materiál se ukládá na základní materiál. Ve druhém případě jsou ionty ze zdroje nasměrovány na povlakovaný materiál, který je povlakován materiálem generovaným nezávislým způsobem (depozice s asistencí iontového paprsku). Rychlost depozice je nižší než u konvenčního naprašování [1].

- Magnetronové naprašování

Účinnost ionizace lze zvýšit využitím magnetického pole před terčem vytvořeného permanentním magnetem nebo elektromagnetem (Obr.1) [1].

Magnety jsou běžně umístěny podél vnějšího okraje a uprostřed katody. Elektronky, které při klasickém naprašování unikají z prostoru před terčem, se v tomto případě v důsledku Lorentzovy síly musí pohybovat po šroubovici podél siločar. Prodlouží se tedy jejich dráha v blízkosti terče a zvýší doba jejich setrvání v oblasti výboje. Tak se zvyšuje pravděpodobnost kolize a zároveň tedy ionizace dalších atomů pracovního plynu. To umožňuje udržet výboj při nižším tlaku (řádově desetiny pascalu) i při nižším napětí (řádově stovky voltů). Zároveň pak roste i účinnost a rychlost povlakování [1, 4, 5].



Obr. 1 Princip magnetronového naprašování [6]

Rozlišujeme dva typy magnetronu – vyvážený a nevyvážený [1].

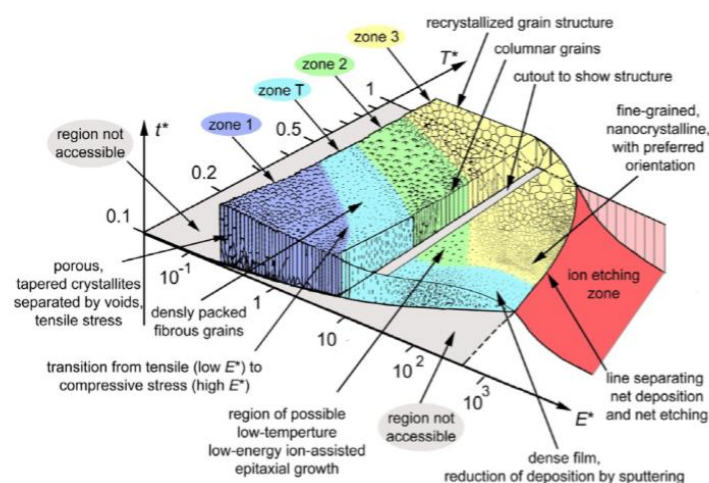
Pokud je síla vnitřních a vnějších magnetů přibližně stejná, jde o vyvážené magnetrony, které vytvářejí symetrické magnetické pole, jehož primární siločáry zůstávají těsně u terče, řídí plazmu v této oblasti, zachytávají sekundární elektrony a ionty a brání jim v dopadu na povrch terče, který je tak chráněn před poškozením a nadměrným ohřevem [1].

Když jsou tyto sekundární elektrony uvolněné z terče bombardováním iontů argonu udržovány blízko terče, zvyšuje se pravděpodobnost jejich podílu na ionizaci a zvyšuje se tedy intenzita plazmového výboje [1].

Pokud je jeden z magnetů silnější (obvykle vnější sada) než druhý, jedná se o nevyvážený magnetron. Nevyvážené magnetrony vytvářejí otevřenější magnetické pole, ve kterém se siločáry rozbíhají do prostoru komory. Nevyvážené magnetické pole vytváří past pro rychlé sekundární elektrony, které jsou emitovány z povrchu terče. Tyto elektrony prodělávají ionizující srážky s neutrálními atomy plynu ve větší vzdálenosti od povrchu targetu a vzniká větší počet iontů, další elektrony v oblasti základního materiálu výrazně zvyšují jeho bombardování ionty a vzniká sekundární plazma [1].

Touto metodou je možno v závislosti na konfiguraci zdroje odprašovat téměř libovolný materiál včetně slitin a nevodičů. Lze také snadno nanášet povlaky tvořené více vrstvami různého chemického složení (multivrstvy). Další výhodou magnetronového naprašování je pak možnost variabilního uspořádání, kde katoda může být v libovolné poloze a může mít různý tvar [1].

Depoziční rychlost a charakter naneseného povlaku jsou řízeny řadou procesních parametrů: depoziční teplota, teplota základního materiálu, výkon na katodách, čas, tlak v komoře a bias, jehož vlivu na drsnost povlaku se tato práce věnuje, a s tím související kinetická energie dopadajících částic.



Obr. 2 Diagram struktury povlaku v závislosti na vybraných depozičních parametrech [7]

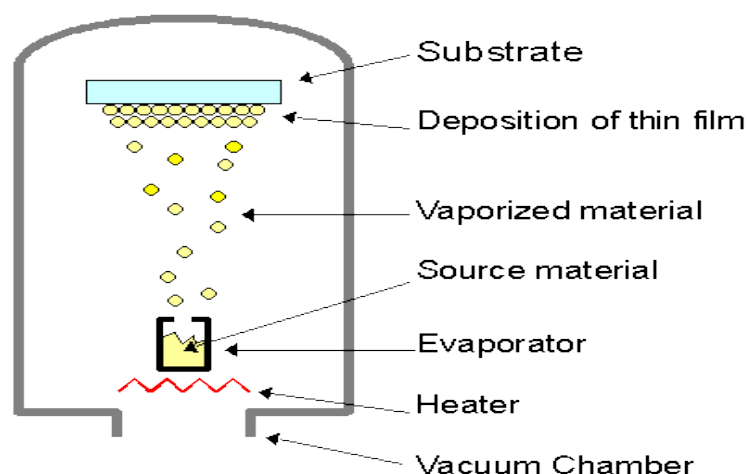
A. Anders ve své knize *Thin Solid Film* uvedl model, který sumarizuje závislost morfologie povlaku na teplotě základního materiálu, kinetické energii iontů a rychlosti depozice. Odlišuje zde čtyři zóny s typickým chováním růstu krystalů (Obr. 2) [7].

Záporné předpětí přivedené na základní materiál dodává iontům, které jsou přitahovány k rostoucímu povlaku, kinetickou energii. Dostatečná energie iontů způsobuje „zhutňování“ povlaku. Pokud je ale hodnota záporného předpětí velká, je i energie iontů přílišně vysoká a dochází k odprašování částic z již vytvořeného povlaku, k tzv. re-sputteringu [8].

V průběhu depozice dochází ke dvěma protikladným jevům, a to sice k vyhlazování povrchu a jeho zdrsňování. To, který jev se uplatní při depozici, je dáno hodnotou biasu. Použití záporného předpětí vede k dodání energie bombardujících iontů, které pak zvyšují mobilitu částic rostoucího povlaku a vytváří se jednotná struktura povrchu bez větších pórů. S rostoucí hodnotou biasu a tím i zvyšování energie iontů bombardujících povlak pak dochází k degradaci rostoucího povlaku, který je těmito ionty deformován. Tento jev ovlivňuje i tloušťku povlaku, která k rostoucím hodnotám biasu vykazuje inverzní charakter. Se snižováním tloušťky souvisí i výše zmíněný re-sputtering, který se při depozici s biasem uplatňuje [8].

2.1.2 Napařování

Jedná se o metodu povlakování, kdy vrstva vzniká odpařením a kondenzací materiálu po ohřevu targetu ve vakuové komoře při tlacích 10^{-3} až 10^{-8} Pa. Odpařené atomy poté kondenzují na základním materiálu a vytváří povlak (Obr. 3). Způsobů ohřevu pro přeměnu z tuhého nebo kapalného stavu do parní fáze existuje několik, mezi několika základních patří ohřev paprskem elektronů, odporový, indukční, oblouk a laser [1].



Obr. 3 Princip vakuového napařování [9]

- Obloukové napařování

Metodou obloukového napařování je materiál terče odpařován pomocí nízkonapěťového elektrického oblouku. Anoda je tvořena vakuovým zařízením komory a hoří na ní oblouk po celé ploše. Katodu tvoří target. Oblouk se zde soustředí do malého bodu a tvoří vysoce energeticky vybuzenou oblast – katodovou skvrnu. Teplota je zde okolo 15 000 °C a zapříčiňuje velmi vysokou rychlost pohybu této skvrny, která za sebou zanechává kráter. Katodová skvrna je aktivní pouze v krátkém časovém úseku. Sama se zhasíná a opětovně zapaluje na novém místě, které je vždy blízko předchozího kráteru. Její pohyb po povrchu terče je zcela náhodný. Použitím magnetického pole lze ovšem pohyb skvrny řídit a zajistit tak řízené odpařování [10, 11].

Výhodou této obloukové depozice je poměrně velká úroveň ionizovaných atomů v plazmatu [11].

- Odporové odpařování

Zdroje tohoto typu odpařování jsou obvykle vyráběny z kovů, které mají vysokou teplotu tavení (W, Mo, Ta) a nízký tlak par. Jedná se o vyhřívané dráty a kovové fólie různého typu, které musí být smáčeny odpařovaným materiálem. Výhodou tohoto typu povlakování je relativně nízká cena těchto zdrojů [11].

- Napařování elektronovým paprskem

Využívá elektronové paprsky vysokého výkonu generované elektronovými děly pro tavení a odpařování materiálu z kovových ingotů, i pro předeřev základního materiálu. Lze vytvářet povlaky se střídáním různých vrstev a odpařovat i prvky s nízkým tlakem par [1, 12].

- Laserové odpařování

Při laserovém odpařování je materiál z povrchu targetu odpařován pomocí laserového paprsku. Velkou výhodou této metody je produkce částic s vysokou energií, které zlepšují kvalitu výsledného povlaku. Má však několik omezení, mezi které patří složitost zařízení, malá povlakovaná plocha a ne vždy lze najít vlnovou délku odpovídající absorpčním vlastnostem odpařovaného materiálu [1].

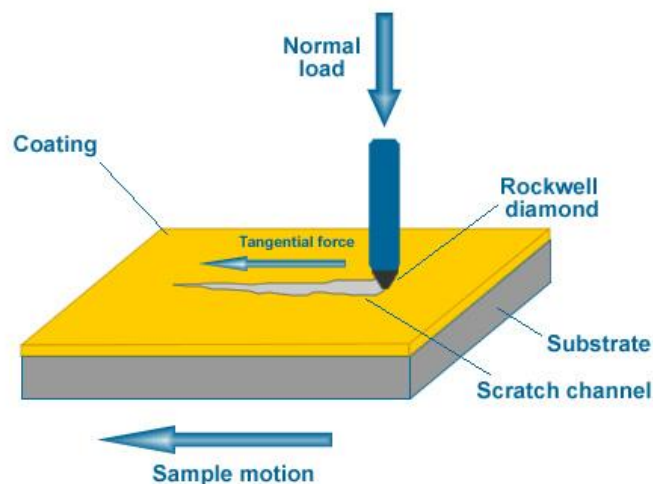
2.2 Vlastnosti povlaků

S vývojem nových technologií a rostoucím požadavkem trhu je nutnost stále vyvíjet povlaky nejrůznějších vlastností. Použití a způsob opotřebování nástroje pak ovlivňuje výběr povlaku s vhodnými vlastnostmi. Povlaky lze charakterizovat pomocí různých fyzikálních, chemických či mechanických vlastností. Mezi nejdůležitější lze zařadit adhezi, tvrdost, tloušťku, chemickou a tepelnou odolnost a také drsnost [13].

2.2.1 Adheze

Jedním z klíčových faktorů pro zajištění vzniku kvalitního povlaku je jeho přilnavost k povrchu. Pro zajištění vysoké adheze je důležité povrch nástroje před povlakováním důkladně připravit (očistit). Dalšími vlivy ovlivňujícími přilnavost jsou potom i tloušťka povlaku a materiál nástroje [13, 14].

K vyhodnocení adheze povlaku se používá vrypová zkouška tzv. scratch – test (Obr. 4) využívající konstantní posuv špičky diamantového Rockwellova hrotu po měřené vrstvě za současného postupného zvyšování zatěžující síly působící na hrot. Dosažením kritické hodnoty síly dojde k odtržení vrstvy od podkladového materiálu (kritické zatížení L_c). Toto kritické zatížení lze detekovat několika způsoby: pomocí připojeného optického mikroskopu, popř. pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu doplněného o zpracování zaznamenaných závislostí koeficientu tření a signálu akustické emise na normálovém zatížení. Vyhodnocujeme několik hodnot kritického zatížení podle různých kritérií. Zatížení v místě, kde došlo k prvnímu porušení vrstvy – trhliny (L_{c1}), první adhezivní porušení vrstvy – odloupenutí (L_{c2}), první adhezivní porušení vrstvy většího rozsahu (L_{c3}) a totální odhalení základního materiálu (LAE) [15, 16].

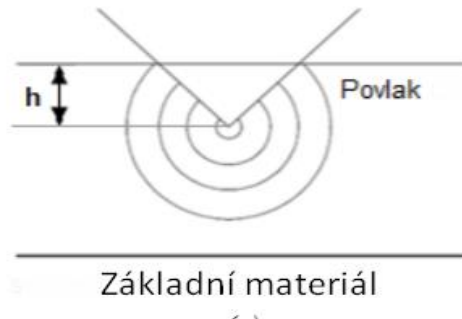


Obr. 4 Schéma principu Scratch testu [17]

2.2.2 Tvrdost

Běžná tloušťka PVD vrstev se pohybuje v řádech několik mikrometrů, při volbě velikosti zátěže na hrot se tedy pohybujeme v řádech několika desetin gramů (až 0,01g) a hloubka vtisku se pohybuje v desetinách mikronů. Měření tvrdosti povlaků při takto nízkých hodnotách zatížení pak nazýváme měřením nanotvrdosti. Obvykle se využívá Vickersův hrot, který nesmí proniknout do více než 1/10 tloušťky vrstvy, aby měření nebylo ovlivněno vlastnostmi základního materiálu (Obr. 5) [18, 19].

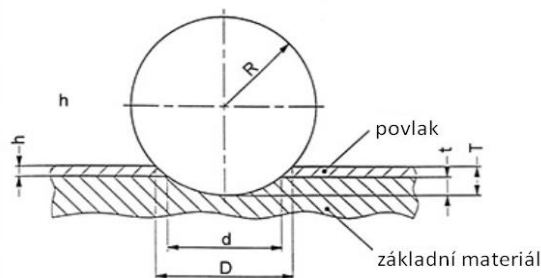
Pro vyhodnocení využíváme nanotvrdoměry, které umožňují provádět měření při velmi nízkých zatíženích a v průběhu zatěžování měřit hloubku vtisku. Mimo hodnoty tvrdosti pak lze určit i podíl elastické a plastické deformace během zatěžování [18, 19].



Obr. 5 Schéma měření nanotvrdosti [18]

2.2.3 Tloušťka

V závislosti na požadovaných vlastnostech povlakovaného nástroje je potřeba určit vhodnou tloušťku povlaku, která úzce souvisí s adhezí. Pro měření tloušťky využíváme kalotest. Kalotest spočívá v rotaci kuličky na které je nanesena brousící pasta, pomocí které poté dojde k proleštění vrstvy a části podkladového materiálu. Z měření vzniklých kulových vrchlíků pomocí mikroskopu a průměru kuličky (Obr. 6) lze početně stanovit tloušťku vrstvy [14, 15].



Obr. 6 Schéma kalotestu [20]

2.2.4 Chemická a teplotní odolnost

Odolnost povlaku proti chemické reakci a stabilita při vysokých teplotách je zvláště významná u povlakovaných nástrojů, které se používají při obrábění. Chemická stabilita může být různá v závislosti na typu obráběného materiálu a parametrů charakterizujících daný výrobní proces, tedy řezných podmínkách daného výrobního procesu [15].

Důležitá je zejména chemická stabilita za vyšších teplot, kde může docházet ke změnám vnitřní struktury (vnitřní pnutí, změna krystalického uspořádání apod.), které se projevují změnami mechanických vlastností. Měřit je lze pomocí elektronové mikroskopie či rentgenové difrakce [15].

K opotřebení vrstvy může dojít i oxidací. Vrstva pak ztrácí svoji tvrdost v závislosti na vzniku jiných vazeb. Vrstvy proto mají danou maximální teplotu použití, která je dána právě odolností proti oxidaci. K měření se využívá měření hmotnosti vrstvy, která se mění v závislosti na teplotě účinkem vzdušného kyslíku. Jedná se o tzv. gravimetrickou metodu [15].

Oxidační procesy mohou být ovšem i žádoucím přínosem, jedná-li se o oxidaci povrchovou, kdy dochází k pasivaci povrchu, která zabraňuje další – hloubkové oxidaci [15].

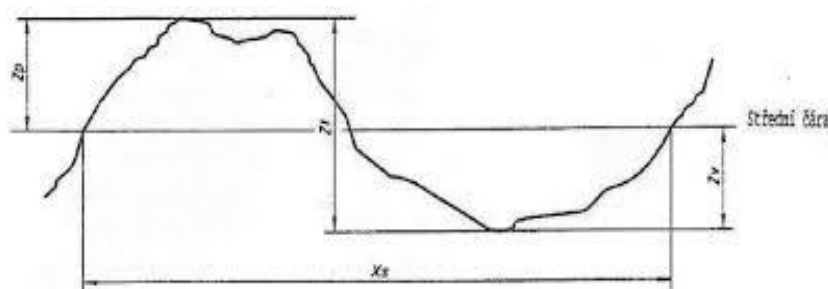
2.2.5 Drsnost

Drsnost je jednou z charakteristických vlastností struktury povrchu. Profil povrchu vzniká jako průsečnice skutečného povrchu a roviny kolmé k rovině rovnoběžné se skutečným povrchem. Profil drsnosti je poté odvozen ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu λc . Definice stanovuje, že drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Profil drsnosti je definován pomocí parametrů, které se nazývají R - parametry. Můžeme je dále rozdělovat, a to sice na [21]:

- výškové parametry (výstupky a prohlubně): R_z , R_p , R_v , R_c , R_t
- výškové parametry (průměrné hodnoty pořadnic): R_a , R_q , R_{sk} , R_{ku}
- délkové parametry: R_{Sm}
- tvarové parametry: $R_{\Delta q}$
- křivky a jiné a parametry: $R_{mr}(c)$, $R_{\delta c}$, R_{mr}

K bližšímu popsání těchto parametrů drsnosti je nejprve nutné uvést několik základních pojmů [21], pomocí kterých lze přesněji dané parametry vymezit:

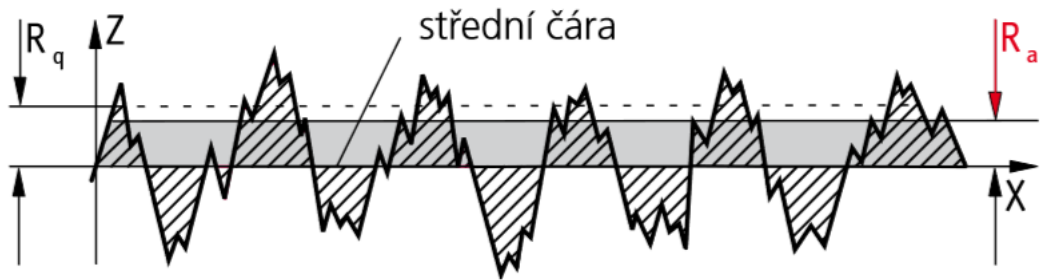
- střední čára profilu drsnosti - čára odpovídající dlouhovlnné složce potlačené filtrem profilu λ_c
- základní délka (l_r) – délka ve směru osy x , použitá pro rozpoznávání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil
- vyhodnocovaná délka (l_n) – délka ve směru osy x , použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu
- prvek profilu – výstupku profilu a přilehlá prohlubeň (Obr. 7)
- výška výstupku profilu (Z_p) – vzdálenost mezi osou x a nejvyšším bodem výstupku prvku profilu
- hloubka prohlubně profilu (Z_v) – vzdálenost mezi osou x a nejnižším bodem prohlubně prvku profilu
- výška prvku profilu (Z_t) – součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu
- hodnota pořadnice ($Z(x)$) – výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x
- šířka prvku profilu (X_s) – délka úseku osy x protínající prvek profilu
- materiálová délka profilu na úrovni c , ($Ml(c)$) – součet délek úseků získaných protnutím prvku profilu čarou rovnoběžnou s osou x v dané úrovni c



Obr. 7 Prvek profilu [21]

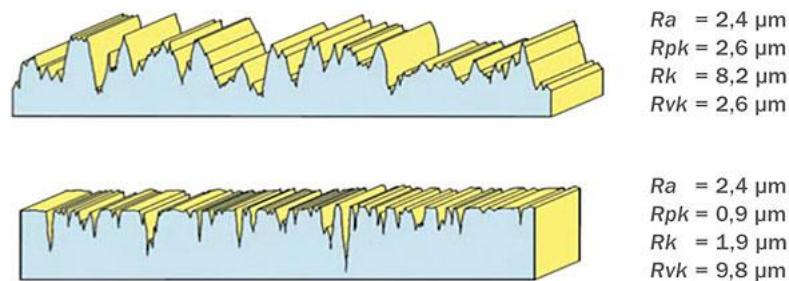
Mezi nejběžnější parametr popisující drsnost povrchu patří R_a – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti.

Parametr R_a je výškový parametr, určený aritmetickým průměrem absolutních pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky (Obr. 8) [21].



Obr.8 Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a [23]

Jedná se ale pouze o statistickou hodnotu, která nemusí být vždy efektivní při hodnocení drsnosti povrchu. Je to způsobeno tím, že parametr R_a nerozlišuje mezi výstupky a prohlubněmi a samotná hodnota R_a tedy nepředstavuje přesné popsání povrchu. Například dva povrchy se stejnou hodnotou R_a mohou mít zcela odlišný tvar profilu povrchu (Obr. 9) a tím pádem mohou mít i rozdílné vlastnosti a jejich chování z určitých hledisek nemusí být totožné [22].



Obr. 9 Různé profily povrchu se stejnou hodnotou R_a [22]

Dalším výškovým parametrem vycházejícím z průměrné hodnoty pořadnic je průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu (R_q/RMS), která je definována jako kvadratická střední hodnota pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky [21].

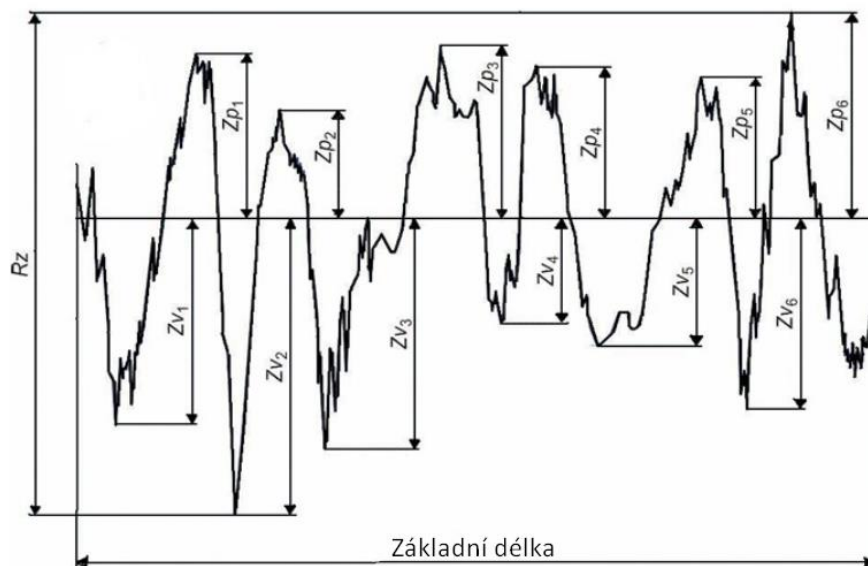
Šikmost posuzovaného profilu drsnosti (R_{sk}) je dána podílem průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty R_q na základní délce [21].

Parametrem popisujícím špičatost profilu je R_{ku} , tedy podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty R_q v rozsahu základní délky [21].

Jinými slovy lze říci, že hodnota šikmosti posuzovaného profilu Rsk je hodnota asymetrie hustoty amplitudové křivky a strmost profilu drsnosti Rku je strmost hustoty amplitudové křivky. Oba tyto parametry jsou ovlivněny jednotlivými špičkami a rýhami, proto je jejich praktický význam redukován [23].

Největší výška výstupku profilu (Rp) je výška Zp největšího výstupku profilu v rozsahu základní délky a podobně hloubka největší prohlubně profilu (Rv) je hloubka Zv nejhlubší prohlubně profilu v rozsahu základní délky [21].

Největší výška profilu (Rz) je součet výšky největšího výstupku profilu Zp a hloubky největší prohlubně profilu drsnosti Zv na základní délce (Obr. 10) [21].



Obr. 10 Největší výška profilu Rz [24]

Poslední výškovým parametrem je průměrná výška prvků profilu (Rc), která je dána průměrnou hodnotou výšek Zt prvků profilů na základní délce [21].

Délkový parametr Rsm určuje průměrnou šířku prvků profilu. Tento parametr je definován jako střední hodnota šířek Xs prvků profilu v rozsahu základní délky [21].

Tvarový parametr střední kvadratický sklon profilu ($R\Delta q$) je pak střední kvadratická hodnota jednotlivých sklonů pořadnic $dZ(x)/dX$ uvnitř základní délky [21].

Křivky a odpovídající parametry se definují spíše na vyhodnocované délce než na délce základní, protože poskytuje stabilnější křivky a parametry. Patří sem parametry $Rmr(c)$, $R\delta c$ a Rmr [21].

Materiálový podíl profilu drsnosti ($Rmr(c)$) je poměr délky materiálu elementů profilu $MI(c)$ na dané úrovni c k vyhodnocované délce [21].

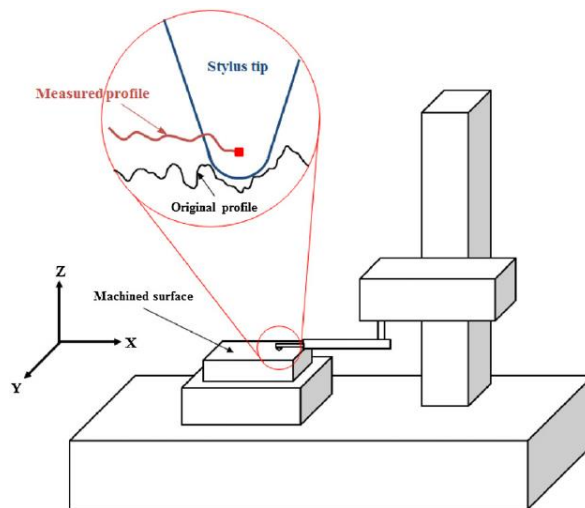
Rozdíl výšky úseku profilu ($R\delta c$) je svislá vzdálenost mezi úrovněmi dvou úseků daného materiálového poměru [21].

Vzájemný materiálový poměr (Rmr) je materiálový poměr určený na úrovni části profilu $R\delta c$ vztažený k úrovni $Rmr0$ [21].

Rozlišujeme několik metod měření drsnosti. Patří sem kvalitativní hodnocení, kdy se povrch hodnotí lidskými smysly, nepřímé kvantitativní měření a měření profilometry, které mohou být dotykové a bezdotykové [25].

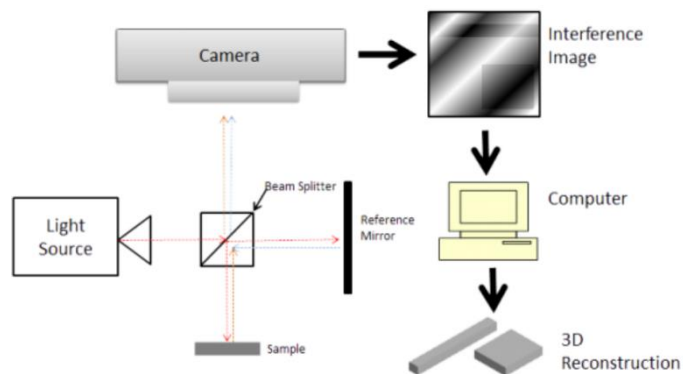
Při kvalitativním hodnocení se povrch porovnává se vzorovými plochami pomocí lidských smyslů, tj. zrakem, hmatem, popřípadě pomocí jednodušších optických pomůcek. Přesnost takového měření je dána rozlišovací schopností člověka či fyzikálními vlastnostmi použitých přístrojů. Hmatem lze rozlišit rozdíl až $Ra = 0,1 \mu m$, při použití světelného mikroskopu se pak tato hodnota blíží $Ra = 1 \mu m$ [24].

Dotykové profilometry jsou založeny na principu rovnoměrného posouvání snímacího hrotu po kontrolovaném povrchu, kde změny výšky tohoto hrotu způsobené nerovnostmi jsou následně zaznamenávány (Obr. 11). Tyto přístroje mohou být založeny na více principech, patří sem například profilometry s mechanickým převodem, mechanicko-optickým, mechanicko-pneumatickým či elektrickým převodem, dále také elektromagnetické, elektroindukční nebo piezoelektrické snímače [25].



Obr. 11 Dotykový profilometr [26]

Dalším typem profilometrů jsou bezdotykové profilometry. Zde hovoříme o fotoelektrických přístrojích s laserem, interferenční metodě a dalších optických metodách [25]. Schéma profilometru založeného na principu interference je na Obr. 12.



Obr. 12 Interferometrický profilometr [27]

Další možností je pak použití komparačních měřidel, kde se porovnává kontrolovaná plocha s plochou vzorovou (etalony) a výsledkem je rozdíl drsností porovnávaných drsností. Patří sem například mechanické komparátory, pneumatické komparátory či elektrické a fotoelektrické komparátory [25].

3 Experimentální část

Experimentální část se zabývá hodnocením morfologie povrchu a drsnosti deponovaného povlaku při různých hodnotách záporného předpětí (tzv. biasu). Základním materiálem, na kterém byla depozice provedena, je nástrojová ocel ledeburitického typu 1.2379 (19 573, X153CrMoV12) zakalená na tvrdost 62 HRC. Tato ocel se vyznačuje vysokou pevností v tlaku, dobrou houževnatostí, výbornou odolností proti opotřebení a velkou prokalitelností. Ocel je sekundárně vytvrditelná a je vhodná pro depozici povlaků metodami PVD i CVD. Chemické složení oceli 1.2379 dle ČSN EN ISO 4957 je uvedeno v Tab. 1.

Tab.1 Chemické složení oceli 1.2379 [hm %]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V
1,45 - 1,6	0,2 - 0,6	0,1 - 0,6	0,03 max	0,03 max	11 - 13	0,7 - 1	0,7 - 1

Deponovaným povlakem je materiál CrAl. Tato práce je součástí výzkumu týkající se hydrofobního chování kovových povlaků nanesených metodou PVD. CrAl povlak byl zvolen jako modelový materiál za účelem hodnocení vlivu drsnosti na smáčivost daného povrchu.

Před samotnou depozicí je nutno vzorky základního materiálu vhodně připravit. Povrch musí být dostatečně očištěn, aby došlo k odstranění povrchových nečistot a byla zajištěna adheze povlaku k povrchu základního materiálu. Všechny vzorky nejprve prošly procesem leštění s následným oplachem vodou a lihem a nakonec bylo třeba jejich důkladné vysušení. Tyto operace musí být prováděny rychle a bez větších časových prodlev, aby na vzorku nedocházelo ke korozi.

Těsně před vložením vzorků do depoziční komory pak byly vzorky ponořeny do nádoby s acetonem a umístěny do ultrazvukové pračky Novatec, kde došlo k jejich důkladnému dočištění. Opět následovalo opláchnutí vodou a lihem a jejich sušení.

K samotné depozici došlo na zařízení Hauzer Flexicoat 850. K dispozici bylo celkem osm vzorků, přičemž byly dány čtyři různé hodnoty záporného předpětí – 0 V, 50 V, 100 V a 200 V. Doba depozice byla nastavená vždy na stejnou hodnotu šesti hodin.

Depoziční parametry jsou uvedeny v Tab. 2. Pro každou hodnotu předpětí byly povlakovány vždy dva vzorky.

Tab. 2 Depoziční parametry

Teplota	Doba depozice	Průtok argonu	Výkon na katodě
250 °C	6 h	90 sccm	6 kW

Jedna sada vzorků byla použita ke zkoumání morfologie povrchu pomocí elektronového mikroskopu a druhá k měření drsnosti.

U povlaků byl rovněž hodnocen charakter struktury v příčném směru. Za tímto účelem byly vzorky určené k tomuto pozorování zlomeny za snížené teploty proto, aby vynikla mikrostruktura krystalů daného povlaku. Tohoto lze docílit, pokud dojde k porušení křehkým lomem. Vzorky byly ponořeny na zhruba 20 minut do lázně tekutého dusíku a poté následovalo jejich rozlomení. Opětovnou nutností pak bylo jejich opláchnutí a sušení.

3.1 Hodnocení drsnosti

Drsnost byla měřena pomocí laserového profilometru Zygo NewView 7200. Měřily se tři různé parametry, a to sice Ra – střední aritmetická úchylka profilu, Rz – největší výška profilu a RMS – průměrná kvadratická úchylka profilu. Tyto parametry byly zvoleny z důvodu možnosti srovnání naměřených hodnot s jinými pracemi. Změřené hodnoty těchto parametrů jsou uvedené v Tab. 3.

Jak lze z tabulky vypořadovat, dané parametry drsnosti mají s rostoucí hodnotou biasu nejprve rostoucí charakter a následně dochází k poklesu jejich hodnot.

Tab. 3 Změřené hodnoty zvolených parametrů drsnosti při daných hodnotách negativního předpětí

BIAS	Parametry drsnosti	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná hodnota
200 V	Ra [μm]	9,53	8,17	9,01	8,90
	Rz [μm]	58,81	54,11	44,03	52,32
	RMS [μm]	12,01	10,86	11,09	11,32
100 V	Ra [μm]	9,05	9,77	10,72	9,85
	Rz [μm]	58,37	51,22	56,53	55,37
	RMS [μm]	12,93	12,15	14,12	13,07
50 V	Ra [μm]	21,22	22,51	23,97	22,57
	Rz [μm]	98,94	115,41	112,08	108,81
	RMS [μm]	25,59	28,25	29,33	27,72
0 V	Ra [μm]	10,02	11,52	10,02	10,52
	Rz [μm]	56,15	66,54	51,35	58,01
	RMS [μm]	12,50	14,65	12,48	13,21

Oproti depozici bez biasu lze pozorovat prudký, přibližně dvojnásobný, nárůst všech měřených parametrů, pokud je bias roven 50 V. Parametry drsnosti při tomto použitém záporném předpětí jsou zároveň maximální. Dalším zvyšováním, při 100 V a 200 V, nastává opětovný pokles na hodnoty přibližně stejné jako bez přivedeného záporného předpětí. Nejnižších hodnot je dosaženo při zkoušeném předpětí 200 V.

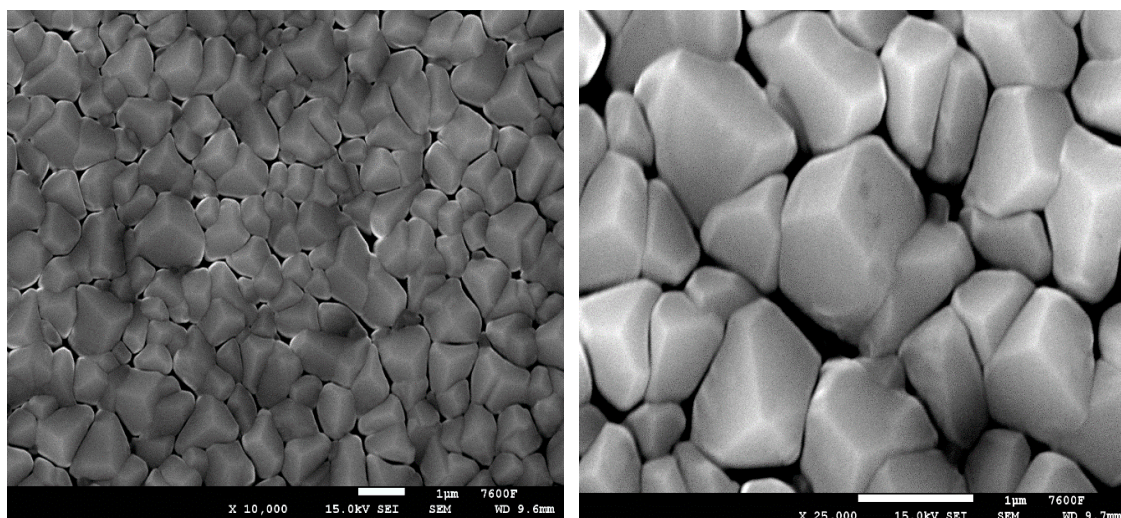
Hodnoty *Ra*, *Rz* a *RMS* tedy výrazně vzrostly při použití biasu 50 V oproti depozici bez použitého záporného předpětí. Povrch po přivedení tohoto předpětí vykazuje hrubší charakter.

Při dalším zvyšování použitého předpětí pak hodnoty parametrů drsnosti opět klesly. V tomto případě lze tedy říci, že s rostoucí hodnotou negativního předpětí dochází ke snižování všech měřených parametrů, tedy střední aritmetické hodnoty drsnosti, hloubky drsnosti i střední kvadratické úchylky profilu. Toto snížení značí menší výškové výchylky povrchu. Povrch má tedy v tomto případě tendenci být hladší s rostoucím předpětím počínaje od hodnoty 50 V.

3.2 Morfologie povrchu

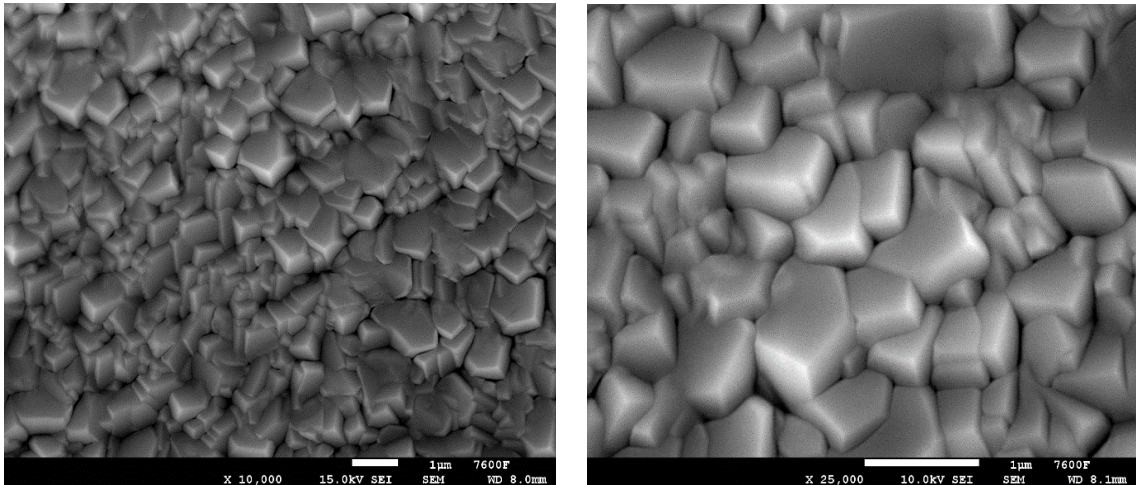
Morfologie povrchu deponovaných povlaků a závislost jejího charakteru na použitém biasu byla pozorována pomocí elektronového mikroskopu Jeol JSM 7600F.

Povrch povlaku, který vznikl při nulové hodnotě záporného předpětí, ukazuje Obr. 13. Povlak se skládá z polyedrických útvarů rozdílných velikostí, které jsou ale v přibližně stejném početním zastoupení. Jednoznačná je necelistvost tohoto povrchu, jež je dána nespojností vzniklých zrn a velkým množstvím pórů způsobených velmi nízkým biasem.

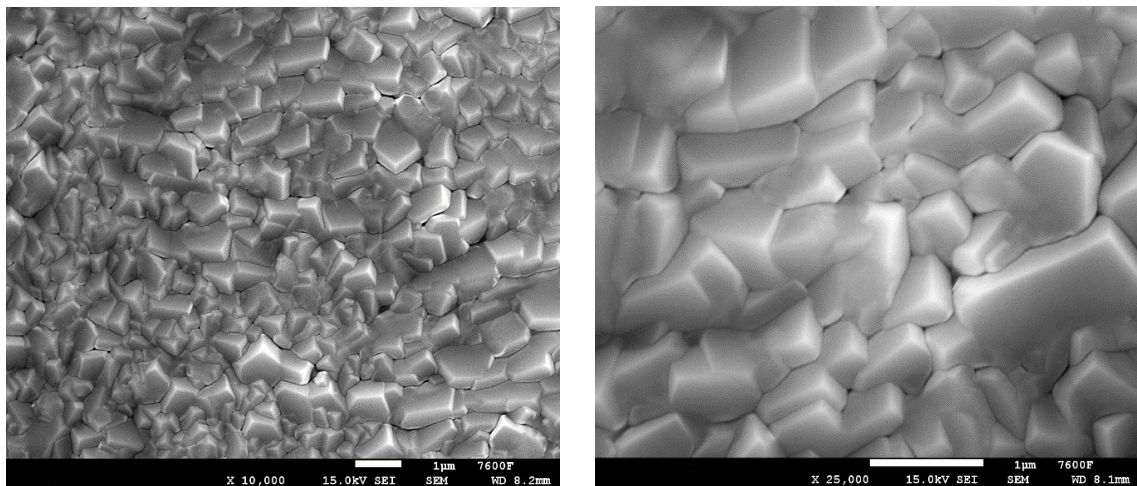


Obr. 13 Morfologie CrAl povlaku deponovaného při biasu 0 V (vpravo detail)

Celistvější povrch, ve kterém jsou vzniklé útvary v těsnějším uspořádání, lze pozorovat při nenulových hodnotách záporného předpětí. Dochází ke značné redukci pórů, která je s rostoucí hodnotou negativního předpětí vyšší. Toto je dáno rostoucí energií iontů Ar, které svým dopadem způsobují větší mobilitu částic povrchu. U hodnot 50 V a 100 V lze také pozorovat výraznou změnu tvaru krystalů oproti nulové hodnotě předpětí. Tvar těchto krystalů má částečně charakter destiček a mají výrazně ostřejší hrany (Obr. 14 a Obr. 15).



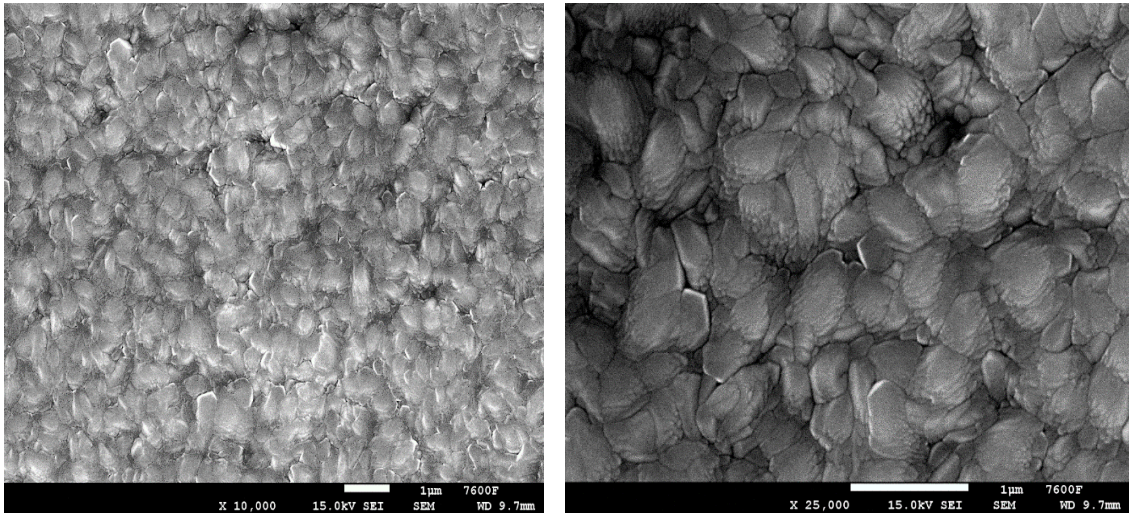
Obr. 14 Morfologie CrAl povlaku deponovaného při biasu 50 V (vpravo detail)



Obr. 15 Morfologie CrAl povlaku deponovaného při biasu 100 V (vpravo detail)

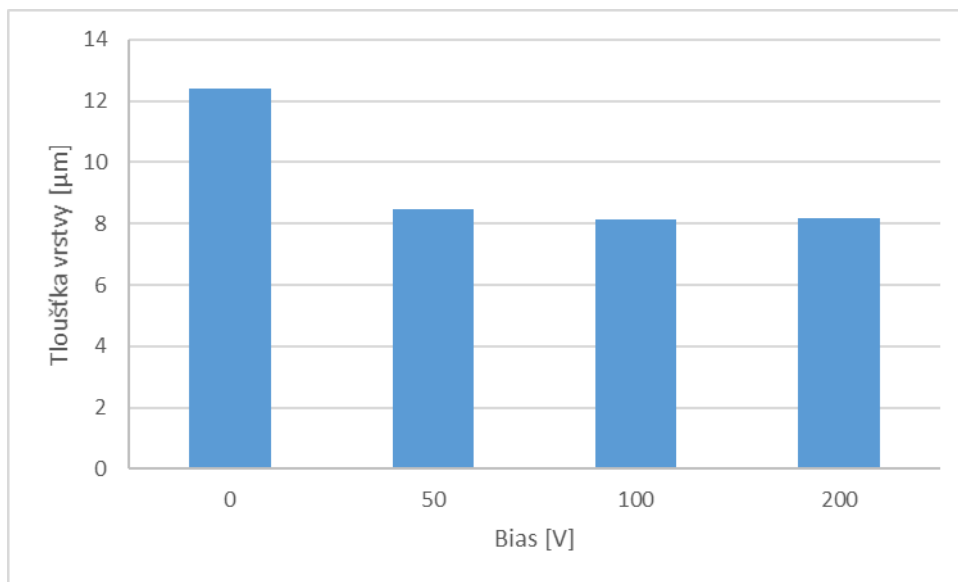
Jak je patrné z následujícího snímku (Obr. 16), při použití maximální hodnoty předpětí 200 V skoro nelze rozeznat hranice jednotlivých zrn. Zrna jsou oblá a jejich povrch je výrazně zvrásněn (lze pozorovat v detailnějším snímku s větším zvětšením). Celý povrch na první pohled vykazuje hladší charakter oproti předchozím povlakům, které byly deponovány při nižších hodnotách záporného předpětí.

Tento jev je způsoben vysokým předpětím, při kterém výrazně roste energie dopadajících částic materiálu povlaku a zároveň iontů Ar, jež rostoucí povlak bombardují a dochází tak k deformaci rostoucí struktury povlaku.



Obr. 16 Morfologie CrAl povlaku deponovaného při biasu 200 V (vpravo detail)

Z grafu (Obr. 17) lze porovnat výškové rozdíly povlaků. Při depozici s nulovou hodnotou biasu bylo dosaženo maximální tloušťky povlaku 12,42 μm . Při použití 50 V pak bylo dosaženo tloušťky - 8,48 μm . S rostoucím záporným předpětím pak tloušťka povlaku opět klesá (při 100 V je tloušťka 8,15 μm a při 200 V je povlak tlustý 8,18 μm).

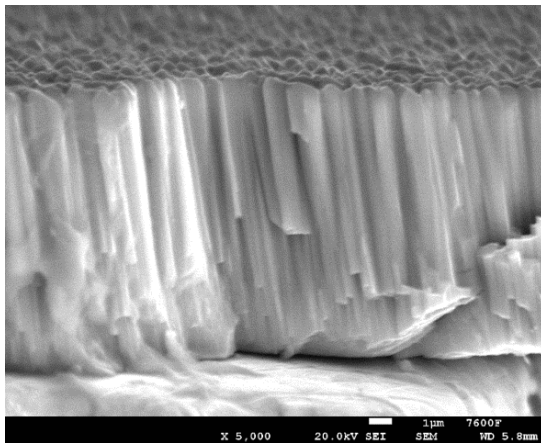


Obr. 17 Závislost tloušťky povlaku na biasu

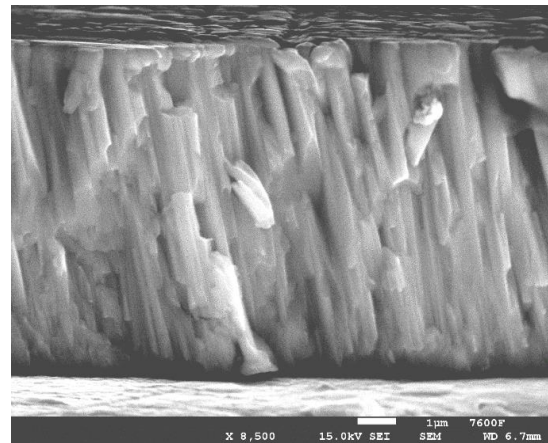
Klesání tloušťky může být vysvětleno rozprašováním povlaku, ke kterému může docházet při depozici s nenulovou hodnotou biasu, kdy vysoká energie dopadajících částic způsobuje rozprašování rostoucího povlaku, tzv. re-sputtering.

Vysoké hodnoty biasu zároveň zvyšují kinetickou energii dopadajících iontů, které působí proti růstu krystalů a rostoucí povlak je tak smáčknut. Nutno dodat, že na výslednou tloušťku má nezanedbatelný vliv i umístění vzorku v depoziční komoře a následný úhel dopadu částic.

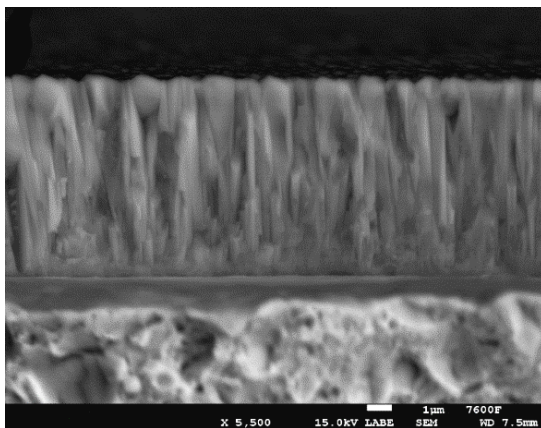
Struktura v příčném průřezu povlaků je vidět na Obr. 18. Krystaly vzniklé při depozici bez záporného předpětí (Obr.18 a) mají sloupcovitou strukturu s jasně definovatelnými hranicemi. Při maximální použité hodnotě biasu (Obr. 18 d) lze pozorovat strukturu, která má stále sloupcový charakter, nicméně mizí zde hranice jednotlivých krystalů a povlak je tak kompaktnější.



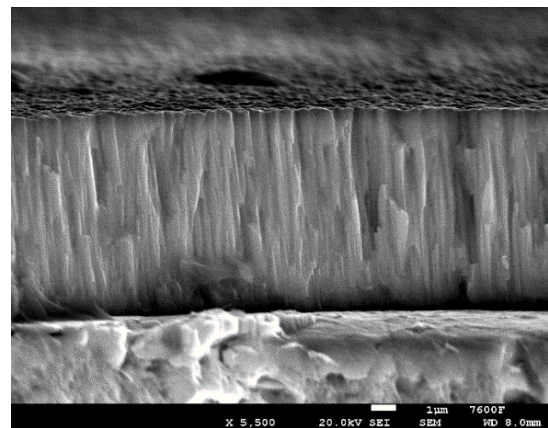
a)



b)



c)



d)

Obr. 18 Struktura povlaku v příčném průřezu při použití záporného předpětí a) 0 V, b) 50 V, c) 100 V, d) 200 V

Ze snímků je také zřejmé, že v blízkosti základního materiálu, tedy po krátké době depozice jsou krystaly povlaku drobné. Avšak s rostoucím depozičním časem některé krystaly rostou na úkor svých sousedů, hrubnou a zamezují tak jejich dalšímu růstu. Proto je povrchová část povlaku tvořena krystaly většími, než které se vyskytují v blízkosti základního materiálu. Tento jev je dobře patrný v případě povlaku připraveného za použití 100 V biasu (Obr. 18 c), zatímco ze snímku povlaku deponovaného při nulovém biasu (Obr. 18 a) lze říci, že krystaly si spíše zachovávají podobnou velikost po celém průřezu povlaku. Ze snímku povlaku připraveného za použití záporného předpětí 50 V není tento jev zcela průkazný. Lomová plocha povlaku deponovaného při 200 V (Obr. 18 d) pak vykazuje nižší členitost v porovnání s předchozími povlaky s tím, že je opět patrná vrstva malých krystalů na základním materiálu.

Závěr

Na základní materiál z nástrojové oceli 1.2379 byl deponován povlak CrAl metodou nevyváženého magnetronového naprašování s měnícím se parametrem záporného předpětí od 0 V do 200 V. Cílem bylo vyhodnotit drsnost, morfologii a tloušťku jednotlivých povlaků.

Experiment ukázal, že závislost parametrů drsnosti Ra, RMS a Rz na měnícím se biasu je nelineární. Oproti depozici bez biasu jsou při biasu 50 V oba parametry drsnosti přibližně dvojnásobně větší. Od 50 V pak s rostoucím biasem dochází ke snižování těchto parametrů. Nejdrsnější povrch byl změřen u vzorku deponovaného při přivedeném záporném předpětí 50 V, kde Ra = 22,57 μm , RMS = 27,72 μm a Rz = 108,81 μm . Při maximálním použitím záporném předpětí 200 V bylo dosaženo nejmenší drsnosti povrchu Ra = 8,90 μm , RMS = 11,32 μm a Rz = 52,32 μm .

Skenovací elektronová mikroskopie pak ukázala značnou odlišnost morfologie jednotlivých povlaků. Zatímco povlak deponovaný bez záporného předpětí vykazuje velmi pórovitou strukturu, povlaky deponované s nenulovou hodnotou biasu téměř žádnou pórovitost nemají a jejich krystaly jsou uspořádány kompaktně. Krystaly povlaků deponovaných při hodnotách záporného předpětí 50 V a 100 V jsou velmi podobné a mají tendenci formovat se do destičkovitých útvarů, které se překrývají. Při použití 200 V jsou pak krystaly značně zdeformovány, jejich hranice již nelze dobře rozeznat a povrch se jeví jako nejhladší. Snižování pórovitostí, tedy kompaktnější struktura, může být vysvětlena bombardováním ionty s vyšší kinetickou energií. Tyto výsledky dobře korespondují s naměřenými hodnotami drsnosti.

Tloušťky jednotlivých povlaků mají s hodnotami záporného předpětí inverzní závislost. Největší tloušťka 12,42 μm byla změřena u povlaku s nulovou hodnotou biasu a naopak nejmenších tlouštěk 8,15 μm a 8,18 μm bylo dosaženo při 100 V a 200 V. S rostoucí hodnotou záporného předpětí se v průběhu depozice může na povlaku uplatňovat tzv. re-sputtering a tloušťku povlaku snižovat. Toto snížení tloušťky zároveň mohou způsobovat i ionty, které na povrch rostoucího povlaku se zvyšováním hodnot biasu dopadají s větší kinetickou energií a způsobují tak jeho smáčknutí.

Seznam symbolů a zkratek

CVD	-	Chemical vapor deposition
PVD	-	Physical vapor deposition
Lc	[N]	Kritické zatížení
lr	[mm]	Základní délka
ln	[mm]	Vyhodnocovaná délka
MI(c)	[μm]	Materiálová délka profilu na úrovni c
Ra	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu
Rku	[μm]	Špičatost posuzovaného profilu
Rmr	[%]	Vzájemný materiálový poměr
Rmr(c)	[%]	Materiálový podíl profilu
Rp	[μm]	Největší výška výstupku profilu
Rq	[μm]	Průměrná kvadratická úchylka profilu
Rsk	[μm]	Šikmost posuzovaného profilu
RSm	[mm]	Průměrná šířka prvků profilu
Rt	[μm]	Celková výška profilu
Rv	[μm]	Největší hloubka prohlubně profilu
Rz	[μm]	Největší výška profilu
R Δ q	[μm]	Průměrný kvadratický sklon profilu
R δ c	[μm]	Rozdíl výšky úseků profilu
Xs	[μm]	Šířka prvku profilu
Zp	[μm]	Výška výstupků profilu
Zv	[μm]	Hloubka prohlubně profilu
Zt	[μm]	Výška prvků profilu
Z(x)	[μm]	Výška pořadnice
λ c	[mm]	Filtr určující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti

Seznam obrázků

Obr. 1 Princip magnetronového napařování [6]	10
Obr. 2 Diagram struktury povlaku v závislosti na vybraných depozičních parametrech [7]	11
Obr. 3 Princip vakuového napařování [9]	13
Obr. 4 Schéma principu Scratch testu [17]	15
Obr. 5 Schéma měření nanotvrdosti [18]	16
Obr. 6 Schéma kalotestu [20]	16
Obr. 7 Prvek profilu [21]	18
Obr. 8 Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra [23]	19
Obr. 9 Různé profily povrchu se stejnou hodnotou Ra [22]	19
Obr. 10 Největší výška profilu Rz [24]	20
Obr. 11 Dotykový profilometr [26]	22
Obr. 12 Interferometrický profilometr [27]	22
Obr. 13 Morfologie CrAl povlaku deponovaného při biasu 0 V (vpravo detail)	26
Obr. 14 Morfologie CrAl povlaku deponovaného při biasu 50 V (vpravo detail)	27
Obr. 15 Morfologie CrAl povlaku deponovaného při biasu 100 V (vpravo detail)	27
Obr. 16 Morfologie CrAl povlaku deponovaného při biasu 200 V (vpravo detail)	28
Obr. 17 Závislost tloušťky povlaku na biasu	28
Obr. 18 Struktura povlaku v příčném průřezu při použití záporného předpětí a) 0 V, b) 50 V, c) 100 V, d) 200 V	29

Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení oceli 1.2379 [hm %]	23
Tab. 2 Depoziční parametry	24
Tab. 3 Změřené hodnoty zvolených parametrů drsnosti při daných hodnotách negativního předpětí	25

Bibliografie

- [1] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje* [online]. Brno, 2006 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf
- [2] MATTOX, D. M. *The foundations of vacuum coating technology*. Norwich, N.Y.: Noyes Publications/William Andrew Pub., c2003. ISBN 0815514956.
- [3] Současnost a trendy povlakování technologií PVD. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001(7) [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologie-pvd.html>
- [4] Naprašování tenkých vrstev. *Elektro* [online]. 2003(7) [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/naprasovani-tenkych-vrstev--14441>
- [5] Sputtering v oblasti moderního PVD povlakování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2014(5) [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/sputtering-v-oblasti-moderniho-pvd-povlakovani.html>
- [6] Magnetron sputtering technology. Visual Science [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.visual-science.com/projects/magnetron-sputtering/technical-illustration>
- [7] NB FILMS: SUBSTRATES, NUCLEATION & CRYSTAL GROWTH* [online]. 2011 Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News, VA, U.S.A. [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/SRF2011/papers/tuio06.pdf>
- [8] OBROSOV, Aleksei. Chemical and Morphological Characterization of Magnetron Sputtered at Different Bias Voltages Cr-Al-C Coatings [online]. 2017 [cit. 2018-07-22]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5459136/#B53-materials-10-00156>
- [9] USUI, Hiroaki a Kuniaki TANAKA. Organic Film Formation by Deposition Technique. In: Usui Lab. [online]. 2008 [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <http://web.tuat.ac.jp/~usuilab/English/depo.html>
- [10] MATTOX, D.M. Vacuum Deposition Processes. *Product Finishing Online*. [online]. [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <http://www.pfonline.com/articles/069901.html>

- [11] DRAŠNAR, Petr.
[Http://povrchari.cz/kestazeni/200802_povrchari.pdf](http://povrchari.cz/kestazeni/200802_povrchari.pdf). *Povrcháři* [online]. 2008, (2.) [cit. 2018-07-06]. Dostupné z:
http://povrchari.cz/kestazeni/200802_povrchari.pdf
- [12] DARLING, R.B. EE-527: MicroFabrication - Physical Vapor Deposition. University of Washington. Department of Electrical Engineering. Seattle, Washington, USA. [online]. [cit. 2018-07-06]. Dostupné z:
http://www.ee.washington.edu/research/microtech/cam/PROCESSES/PDF%20FILES/P_hysicalVaporDeposition.pdf
- [13] ŠÍMA, Michal a Ondřej ZINDULKA. Trendy měření. *MMSpektrum* [online]. [cit. 2018-07-15]. Dostupné z:
<http://www.kom.tul.cz/to/sdilene/merenipovlaku.pdf>
- [14] Lindholm P., Bjorklund S., Svanh F., Method and surface roughness aspects for the design of DLC coatings, *Wear* Volume 261, Issue 1, 20 July 2006, pages 107-111
- [15] Měření vlastností povlaků na nástrojích. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004(6) [cit. 2017-12-12]. Dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-vlastnosti-povlaku-na-nastrojich.html>
- [16] Metody měření a hodnocení adhezivně kohezivního chování systémů tenká vrstva – substrát. *ATeam Materiálový výzkum* [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <https://www.opi.zcu.cz/adheze.html>
- [17] Scratch tester. *PVD Coatings* [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <https://www.pvd-coatings.co.uk/pvd-coating-technology/testing-equipment/scratch-tester/>
- [18] RUND, Martin. *PVD povlaky pro nástrojové oceli* [online]. [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/15193050-Pvd-povlaky-pro-nastrojove-oceli.html>
- [19] *Zkoušky tvrdosti* [online]. [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf
- [20] *Kalottenschleifverfahren* [online]. [cit. 2018-07-15]. Dostupné z: <https://www.fem-online.de/de/content/schichtdickenmessung>
- [21] ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Český normalizační institut, 1999

- [22] A Different Slice of Surface Finish. *Quality Magazine* [online]. 2014 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/92095-a-different-slice-of-surface-finish>
- [23] *Parametry drsnosti* [online]. [cit. 2017-12-19]. Dostupné z: <http://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910230/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>
- [24] Měření drsnosti. *M & B Calibr* [online]. [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <http://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [25] NEZDAŘILÍKOVÁ, Martina. *Metrologická konfirmace měřidla*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [26] DONG-HYEOK, Lee. *Assessment of surface profile data acquired by a stylus profilomete* [online]. October 2012 [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/254499195_Assessment_of_surface_profile_data_acquired_by_a_stylus_profilometer
- [27] *How a Profilometer Works* [online]. [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/technology/optical-profiler-technology/how-profilometer-works>