



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# MODERNÍ METODY POVLAKOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ A JEJICH APLIKACE

MODERN METHODS OF COATING OF CUTTING TOOLS AND THEIR APPLICATION

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Kolenič

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2019

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Michal Kolenič**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.**  
Akademický rok: 2018/19

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 metody povlakování řezných nástrojů a jejich aplikace**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Rozbor moderních metod povlakování řezných nástrojů a jejich aplikace, výběr určité metody pro zvolené řezné nástroje, její ověření.

### **Cíle bakalářské práce:**

Úvod do problematiky metod PVD se zaměřením na magnetronové napařování.  
Zkoumání mechanických a trvanlivostních vlastností vybraných nástrojů povlakových PVD technologií.  
Rozbor dosažených výsledků.

### **Seznam doporučené literatury:**

- LEMMER, W., CH., GREENE, O., HULTMAN, J. E. Review of metal-ion-flux-controlled growth of metastable TiAlN by HIPIMS/DCMS co-sputtering. *Surface & Coatings Technology* 257. 2014. pp. 15–25.
- BOUZAKIS, K.-D., MAKRIMALLAKIS, S., KATIRTZOGLU, G., SKORDARIS, G., GERARDIS, S., BOUZAKIS, E., LEYENDECKER, T., BOLZ, S., KOELKER, W. Adaptation 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*. 205, 2010. pp. 1564-1570.
- HOVSEPIAN, P. E., EHIASIAN, A. P. P. I. Structure evolution and properties of TiAlCN/VCN coatings deposited by reactive HIPIMS. *Surface & Coatings Technology*. 2014. pp. 38–47.

GRECZYNSKI, G. J., JENSEN, L., BOLZ, J., KOLKER, S., SCHIFFERS, BOBZIN, K., BAGCIVAN, N., IMMICH, P., BOLZ, S., CREMER, R., LEYENDECKER, T. Mechanical properties and oxidation behaviour of (Al,Cr)N and (Al,Cr,Si)N coatings for cutting tools deposited by HPPMS. Thin Solid Films. 517, 2008. pp. 1251–1256.

PERNE, J. Plastic flow behavior of (Cr, Al)N hard coatings in dependence of strainrate and nanostructure. Thin Solid Films. 556, 2014. pp. 390–394.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Práce pojednává o PVD povlakovacích metodách so zameraním na katodické magnetronové naprašovanie HIPIMS. Venuje sa štúdiu mechanických a štruktúrnych vlastností povlakov vytvorených týmito metodami. Experimentálna časť analyzuje mechanické a trvanlivostné vlastnosti rezných nástrojov s rôznymi povlakmi vytvorených metódou HIPIMS. Výstupom experimentálnej časti bakalárskej práce je overenie metodiky porovnávania rezných momentov nástrojov s rôznymi povlakmi TiN a TiAlN vytvorených naprašovaním HIPIMS nástrojom bez povlaku.

### Klíčová slova

PVD, HIPIMS, naprašovanie, povlak, rezný nástroj

## ABSTRACT

This study is aimed on PVD coatings with focus on one of the more advanced PVD methods – high-power impulse magnetron sputtering (HIPIMS). This study aims to describe mechanical and structural proprieties of multiple types of PVD coatings. Experimental part of this study aims to analyse mechanical proprieties and durability of cutting tools with coatings created using HIPIMS methods. The experimental part of this work results in comparison of cutting moments of cutting tools coated with TiN and TiAlN using HIPIMS and a cutting tool without coating.

### Key words

PVD, HIPIMS, sputtering, coating, cutting tool

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOLENIČ, Michal. *Moderní metody povlakování rezných nástrojů a jejich aplikace*. Brno 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 71 s. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Piška, CSc..

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Moderní metody povlakování řezných nástrojů a jejich aplikace** vypracoval/la samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

.....  
Michal Kolenič

## **PODĚKOVÁNÍ**

Týmto by som chcel poďakovať prof. Ing. Miroslavovi Píškovi CSc. za cenné rady a pripomienky pri vypracovaní tejto bakalárskej práce.

**OBSAH**

OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 Teoretická časť.....	9
1.1 Základné rozdelenie metód pri deponovaní rezných nástrojov .....	9
1.1.1 Metóda CVD.....	9
1.1.2 Metóda PVD .....	9
1.2 Metódy PVD.....	10
1.2.1 Odparovanie.....	10
1.2.3 Iónové plátovanie.....	11
1.2.2 Naprašovanie (sputtering).....	12
1.2.3 Mechanizmy vzniku a rastu tenkých vrstiev u PVD.....	14
1.2.4 Materiály povlakov PVD.....	15
1.2.5 Zvyškové napätie v PVD povlakoch .....	16
1.2.6 Tieňový efekt .....	17
1.2.7 Štruktúra PVD povlakov.....	18
1.2.8 Príprava substrátu na deponovanie .....	21
1.3 Katodické magnetronové naprašovanie .....	22
1.3.1 Vznik plazmy .....	24
1.3.2 Interakcia iónov s povrchom.....	24
1.3.3 Rýchlosť erózie terča .....	25
1.3.4 Účinnosť naprašovania .....	25
1.3.5 Ionizácia častíc naprašovaného materiálu.....	25
1.3.6 Typy magnetronového katodického naprašovania .....	26
1.3.7 DCMS .....	26
1.3.8 HIPIMS – magnetronové naprašovanie vysokovýkonnými pulzmi .....	26
1.3.9 Porovnanie DCMS a HIPIMS.....	28
1.3.10 Aplikovanie elektrického prepätia na substrát (bias sputtering).....	30
1.3.11 Povlakovanie komplexnej geometrie nástroja .....	32
1.3.12 Vplyv medzivrstvy na adhéziu povlaku.....	33
1.4 Testovanie vlastností povlakov.....	34
1.4.1 Adhézia (priľnavosť) .....	34
1.4.2 Tvrdosť .....	34
1.4.3 Odolnosť proti abrázii.....	35
2 Experimentálna časť .....	37

2.1 Návrh experimentálnych skúšok.....	37
2.2 Meranie silového zaťaženia pri rezaní závitov .....	37
2.3 Skúmané povlaky.....	40
2.3.1 FerroCon® .....	40
2.3.2 TINALOX® GOLD.....	41
2.4 Testované vzorky .....	41
2.4.1 Rezný nástroj .....	41
2.4.2 Testované vzorky .....	42
2.5 Obrábaný materiál.....	53
2.5.1 E335 .....	53
2.6 Rezné podmienky .....	53
3 Vyhodnotenie výsledkov .....	55
ZÁVĚR .....	63
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	64
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	69



## ÚVOD

Povlaky sa nanášali na materiály rôzneho typu už od nepamäti. Či už ide o estetické účely kde môže objekt získať atraktívny vzhľad (napríklad povlak zlatej farby), alebo najmä o praktické účely, ktoré nanosením povlaku výrazne zlepšujú vlastnosti materiálu. Napríklad môžu zvyšovať odolnosť proti korózii, abrazívnemu poškodeniu, zvyšovať tvrdosť, elektrickú vodivosť alebo meniť optické vlastnosti (matný a lesklý povlak). Svoje výrazné a dnes už nevyhnutné postavenie majú povlaky aj v oblasti obrábania materiálov, kde sa povlakujú rezné nástroje. Zavedenie povlakov na rezné nástroje znamenal veľký zlom v efektívnosti celého procesu. Povlaky rezných nástrojov mnohonásobne zvyšujú ich životnosť, tvrdosť, odolnosť proti opotrebeniu, či odolnosť proti oxidácii. To umožňuje nástrojom pracovať v náročnejších podmienkach – za vyšších rezných a posuvových rýchlostí a s menšou potrebou používať chladiace či mazacie kvapaliny, čo by bez povlakov možné nebolo. To má významný ekonomický význam ale aj význam ekologický.

Keďže nástrojové materiály sú rokmi pomerne dôkladne preskúvané, nepredpokladá sa v ich vývoji veľký posun. Oveľa väčšiu perspektívu, čo sa zlepšovania rezných vlastností a zvyšovania životnosti nástrojov týka, má výskum povlakov.

Ako prvá bola pre účely povlakovania rezných nástrojov zavedená metóda chemického naparovania – CVD, ktorá pracovala na princípe chemických reakcií za vysokých teplôt. Táto metóda vytvára tvrdé povlaky, avšak nie je schopná po napovlakovaní zachovať ostrú hranu nástroja. Kvôli potrebe napovlakovať ostré hrany, čo je pri niektorých typoch geometrií nástrojov nevyhnutné, ako aj kvôli potrebe deponovať povlaky na nástroje z rýchloreznej oceli, ktoré by nezniesli vysoké teploty CVD, bola vyvinutá metóda fyzikálneho naprašovania – PVD. Tá dokáže po deponovaní povlaku zachovať ostrú hranu na nástroji a pracuje za podstatne nižších teplôt. Navyše sú schopné metódy PVD vytvárať veľmi tenké vrstvy, čo umožňuje deponovanie veľkého počtu multivrstvičiek pri zachovaní tenkého výsledného povlaku. Na druhú stranu sa PVD stretáva s problémom tieňového efektu, tzn. že sa povlak netvorí na všetkých miestach rovnakou rýchlosťou alebo sa niekde nemusí tvoriť takmer vôbec. Aby sa zabezpečila rovnomernosť v hrúbke povlaku, musí sa pri deponovaní nástrojmi otáčať.

Medzi najmodernejšie metódy PVD patrí medzi metóda magnetrónového katodického naprašovania vysokovýkonnými elektrickými impulzmi – HIPIMS. Spomedzi ostatných metód PVD vyniká najmä preto, lebo minimalizuje hlavný nedostatok PVD – tieňový efekt. Metódou HIPIMS je možné napovlakovať aj ťažko dostupné miesta a komplexné geometrie rezných nástrojov pri zachovaní výborných mechanických a štruktúrnych vlastností povlaku. Aj preto si metóda HIPIMS dnes zasluhuje čoraz väčšiu pozornosť a stáva sa objektom mnohých výskumov.

Metódam PVD ako aj vlastnostiam povlakov vytvorených metódami PVD sa bude venovať aj táto práca. Detailnejšie preskúma metódu HIPIMS, ktorú sa bude snažiť aj prakticky overiť na povlakoch rezných nástrojov s komplexnou geometriou.

# 1 TEORETICKÁ ČASŤ

## 1.1 Základné rozdelenie metód pri deponovaní rezných nástrojov

Metódy deponovania rezných nástrojov delíme na 2 základné typy na základe chemického alebo fyzikálneho deja pomocou ktorého je dosiahnutá plynná fáza [1].

Základné typy povlakovania rezných nástrojov:

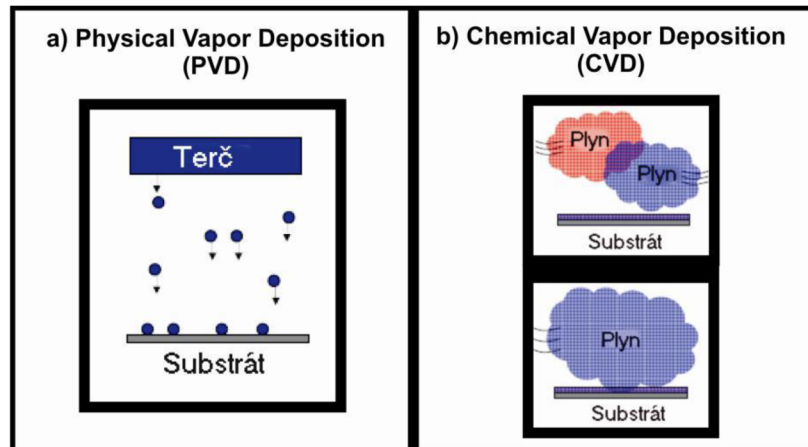
- Chemical Vapour Deposition (CVD),
- Physical Vapour Deposition (PVD).

### 1.1.1 Metóda CVD

CVD (z ang. Chemical Vapour Deposition) označuje chemické metódy depozície vrstiev. Počiatky siahajú do 50. rokov 20. storočia kde sa ňou úspešne podarilo deponovať povlaky z TiN [2]. Je založená na princípe chemických reakcií látok v plynnom skupenstve. Tá prebehne v blízkosti substrátu na ktorý sa produkt reakcie deponuje. (Obr. 1-1 a) Aby reakcia mohla prebehnúť tak je potrebné dodržiavať isté teploty. Tie bývajú vysoké (700 – 1500 °C) čo neumožňuje povlakovať všetky materiály pretože tie nemusia takéto teploty znášať. Tak isto pri reakciách vznikajú vedľajšie produkty. Napríklad kyselina fluorovodíková pri tvorbe povlaku wolframu [3]. Metóda MTCVD (Middle Temperature Chemical Vapour Deposition – CVD za stredných teplôt), vytvára povlaky za teplôt 700 – 850°C [1].

### 1.1.2 Metóda PVD

PVD (z ang. physical vapour deposition) označuje fyzikálne metódy depozície vrstiev. Vývoj začal v 80tych rokoch 20. storočia [2]. Materiál ktorý má tvoriť povlak je transformovaný z pevného skupenstva do skupenstva plynného odparovaním, sublimáciou alebo rozprašovaním. Materiál, ktorý slúži ako zdroj k tvoreniu povlaku sa nazýva terč. Potom sú častice presunuté k substrátu kde kondenzujú alebo sú implantované (Obr. 1-1 b) [3]. Toto všetko sa deje za zníženého tlaku a za pomerne nízkych teplôt (do 500 °C) [4] čo umožňuje napríklad povlakovať rýchlorezné oceli pre ktoré bola metóda PVD pôvodne navrhnutá. Dnes sa ňou samozrejme povlakuje nástroje z rôznych materiálov vrátane rýchlorezných ocelí alebo spekaných karbidov [1,5]. Na vytvorenie niektorých zlúčenín je potrebné do systému zaviesť reaktívny plyn. Napríklad dusík pre tvorbu nitridov alebo kyslík pre tvorbu oxidov. Častice materiálu ktorý bol uvedený do plynnej fázy zreagujú s reaktívnym plynom a vytvoria tak požadovanú zlúčeninu. Takto je možné syntetizovať zlúčeniny, ktoré by nebolo možné vytvoriť za normálneho tlaku a teploty. Takéto metódy nesú prívlastok reaktívne. (napr. reaktívne naprašovanie)[1].



Obr. 1-1 Spôsob deponovania povlaku a) pri PVD, b) pri CVD [5].

Procesy PVD môžeme rozdeliť do troch kategórií:

- odparovanie (Evaporation),
- naprašovanie (Sputtering),
- iónové plátovanie (Ion plating) [6].

## 1.2 Metódy PVD

### 1.2.1 Odparovanie

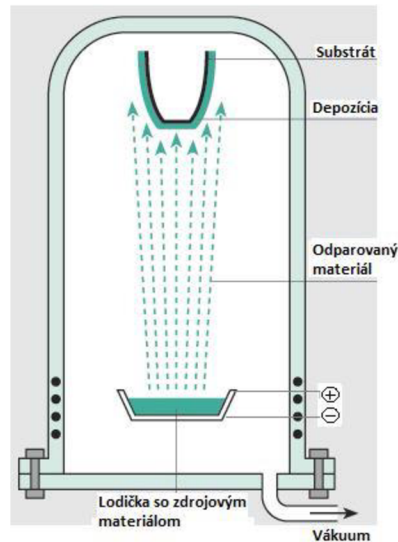
V komore za prítomnosti vákua zohrievame materiál z ktorého chceme spraviť povlak (zdroj) až na takú teplotu aby tlak jeho par presiahol tlak v komore a aby par bolo dostatok. Následne sa pary na povrchu substrátu kondenzujú a vytvárajú tak povlak. Obvykle sa tak deje pri tlaku  $10^{-2} - 10^{-3}$  Pa nakoľko je energia odparených atómov nízka (0,1 - 0,5 eV) a snažíme sa redukovať počet kolízií častíc pary na ceste k substrátu Túto metódu je možné vykonávať za prítomnosti reaktívneho plynu (častokrát  $N_2$ ) kvôli tvorbe požadovaných zlúčenín. Hrúbka povlaku závisí od vzdialenosti substrát – zdroj (hrúbka povlaku je prevrátená hodnota kvadrátu vzdialenosti). Tak isto hrúbka závisí od orientácie plochy od zdroja (tieňový efekt). V prípade potreby odparovať viacero zdrojov naraz sa volí väčšia vzdialenosť zdroj – substrát aby sa pary pred uložením na substrát stihli premiešať. Zdroj môže byť ohrievaný elektrickým odporom, oblúkovým výbojom alebo ožarovaním elektrónov [4].

Výhody odparovania [4]:

- vysoká depozičná rýchlosť,
- nie príliš vysoká cena aparatury,
- lacný zdroj pre odparovanie,
- množstvo aplikácií (optika, elektronika, dekorácia),
- nezahrieva príliš substrát (možnosť povlakovať polyméry).

Nevýhody odparovania [4]:

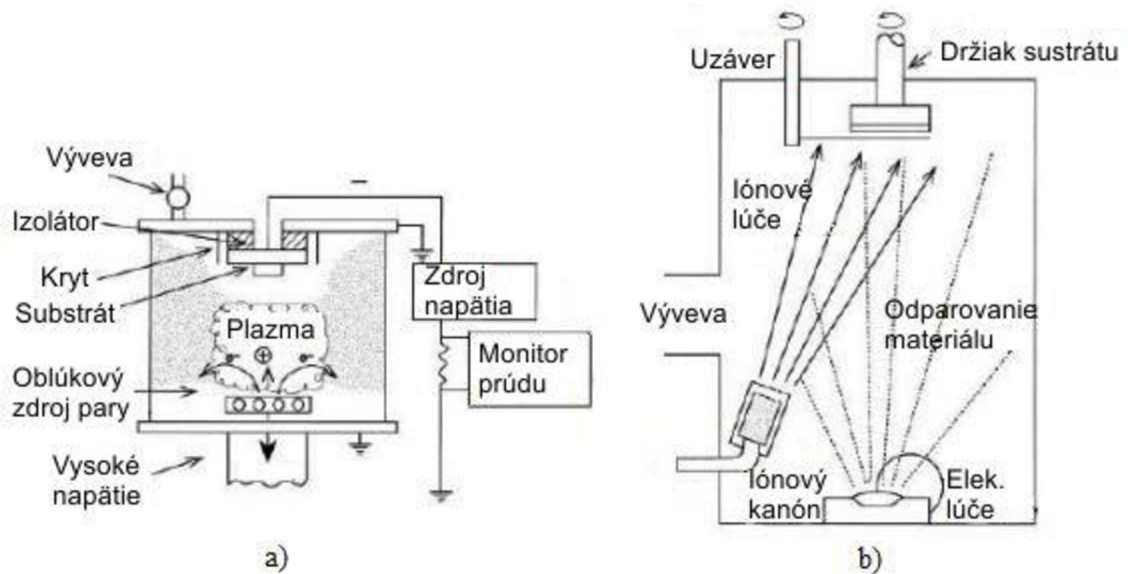
- problematické deponovať zliatiny (odparovanie viacerých zdrojov),
- slabšia priľnavosť ako u naprašovania či iónového plátovania,
- občasná porozita povlaku,
- problém udržať rovnomernú hrúbku povlaku.



Obr. 1-2 Metóda odparovania [7].

### 1.2.3 Iónové plátovanie

Počas deponovania sa navyše používa energetický iónový bombard. To má za cieľ dosiahnuť lepšiu celistvosť povlaku a lepšie kontrolovať vlastnosti povlaku ako sú vnútorné zvyškové napätie a mikroštruktúra. Ako zdroj bombardu môže byť priamo urýchľovanie iónov v plazme smerom k substrátu (Obr. 1-3a) alebo použitie oddeleného iónového kanónu (Obr. 1-3b). V prvom prípade kde ako zdroj iónov slúži plazma je na substrát aplikované záporné prepätie. To urýchľuje ióny smerom k substrátu. V druhom prípade kde sa používa kanón nemusí byť substrát pod prepätím. Iónovým plátovaním je možné deponovať väčšinu kovov, sklo, keramiku ale aj polyméry. Typickými povlakmi sú kovy (Ag, Al, Au, Cu, Cr, Ni, Ti, Pt), nitrídy kovov (TiN, Cr<sub>2</sub>N, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, AlN, ZrN), oxidy (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), rôzne karbidy a diamant (DLC) [8].



Obr. 1-3 a) Plazmové ionové plátovanie, b) ionové plátovanie s použitím kanónu [8].

Výhody ionového plátovania [8]:

- vysoká energia na povrchu substrátu,
- lepšie pokrytie povrchu ako pri naprašovaní či odparovaní,
- kontrolovaný iónový bombard zlepšuje adhéziu, celistvosť a znižuje napätie,

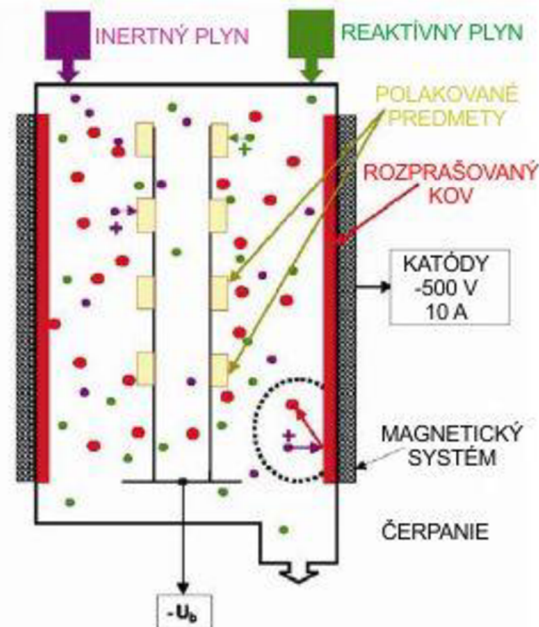
Nevýhody ionového plátovania [8]:

- viac premenných počas procesu ako pri iných PVD technikách,
- môže sa vyskytnúť problém s rovnomernosťou hrúbky povlaku,
- prílišné zahrievanie substrátu,
- v niektorých prípadoch vysoké zvyškové tlakové napätie.

### 1.2.2 Naprašovanie (sputtering)

Materiál ktorý má vytvárať povlak je do plynnej fázy uvedený rozprášením. Pôvodne je v pevnej fáze a nazýva sa terč. Terč nesie záporný potenciál (katóda). V komore sa nachádza aj anóda a medzi terčom anódou vzniká elektrické pole. Do komory je zavedený inertný plyn (Zvyčajne argón pretože nereaguje s inými látkami). Vďaka elektrickému poľu vznikne medzi katódou (terčom) a anódou plazma. Ióny plazmy sú elektrickým poľom urýchľované ku terču kde vrazia. Tým vyrazia atómy kovu zo štruktúry terča a odovzdajú im kinetickú energiu. Atómy kovu sa presúvajú na substrát kde tvoria povlak. Atómy kovu dopadajú na substrát s kinetickou energiou až 50 krát vyššou ako je tomu u odparovania. Pre tvorbu niektorých zlúčenín sa do komory zavádza aj reaktívny plyn (Obr. 1-4). Naprášené atómy zreagujú s reaktívnym plynom počas svojej trajektórie k substrátu [4]. Energia potrebná na vyrazenie atómu zo štruktúry cieľa. Pohybuje sa od 5 do 40eV. Závisí hlavne

od charakteru iónov a od charakteru materiálu pre deponovanie. Pri argóne sa hodnoty pohybujú od 13 pre hliník do 33 pre volfrám [3].



Obr. 1-4 Schéma procesu naprašovania [5].

Výhody naprašovania [9]:

- možnosť depozície prvkov, zlúčenin aj zliatín,
- rozprašovaný terč je stabilným zdrojom pár a má dlhú životnosť,
- terč môže mať rôzne tvary,
- depozícia môže byť ľahko zdokonalená použitím reaktívneho plynu, ktorý je aktivovaný v plazme,
- nízke tepelné zaťaženie radiáciou,
- terč a substrát môže ležať v vzájomnej blízkosti,
- depozičná komora môže mať malý objem.

Nevýhody naprašovania [9]:

- v porovnaní s tepelným odparovaním je intenzita naprašovania nízka,
- nutnosť pohybovať so substrátom aby sa dosiahol rovnomerný povlak,
- vysoká cena terčov a ich malé využitie,
- veľká časť energie z dopadajúcich iónov sa mení na teplo, ktoré je nutné z terča odvádzať,
- ak je v plazme plynová kontaminácia tak znečisťuje povlak viac než je tomu u naparovania,

- pri reaktívnom naprašovaní je nutná presné regulácia plynov aby nedošlo k znečisteniu substrátu.

Naprašovanie delíme na [3]:

- Diódové naprašovanie
- Triódové naprašovanie,
- Magnetronové naprašovanie.

### **Diódové naprašovanie**

Najjednoduchšia spomedzi metód naprašovania. Substrát tvorí anódu systému (kladný potenciál), terč katódu (záporný potenciál). Pracovný tlak v komore je  $10^{-1} - 10^{-2}$  mbar. Atómy kovu strácajú kvôli zrážkam s iónmi v plazme veľkú časť svojej energie (až 90%) čo má za následok nižšie depozičné rýchlosti než je tomu u ostatných typoch naprašovania. Rýchlosť nárastu povlaku je niekoľko mikrónov za hodinu [3].

### **Triódové naprašovanie**

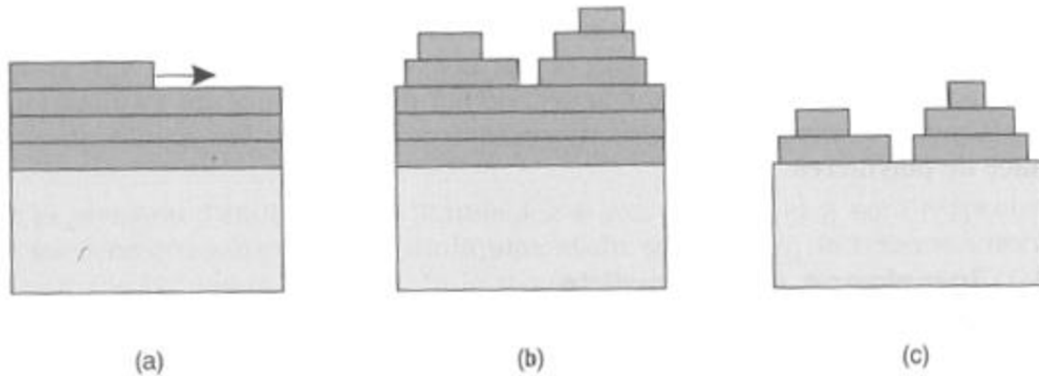
Pri tejto metóde sú katóda a anóda umiestnené mimo substrátu či terču. Anódou je wolfrámové vlákno ktoré slúži ako zdroj elektrónov. Pomocou magnetov sa v komore vytvorí magnetické pole. Vďaka nemu sa trajektória elektrónov špirálovito zakrivuje. Tým pádom sa zvýši pravdepodobnosť zrážok. V porovnaní s diódovým naprašovaním sa pri tejto metóde dá udržiavať plazma aj pri nižšom tlaku ( $10^{-3}$  mbar) čo má za následok, že aj rýchlosť tvorenia povlaku je značne vyššia. Nevýhodou je že wolfrámové vlákno nemá dlhú životnosť a nemôže sa používať sa prítomnosti veľa reaktívnych plynov [3].

### **1.2.3 Mechanizmy vzniku a rastu tenkých vrstiev u PVD**

Z pohľadu termodynamickej rovnováhy rozdeľujeme pri náraste povlaku na kryštalickej úrovni z plynnej fázy na substráte 3 typy narastania vrstiev. Typ nárastu závisí najmä od typu deponovaného materiálu a od materiálu substrátu. Závisí to od veľkosti väzbových síl medzi atómami substrátu a síl medzi atómami nanášaného materiálu [7,10].

- a) Pri Frankov – van der Merweovom mechanizme sa nárast deje homogénne vrstva po vrstve. Jedná sa teda o postupný nárast monovrstiev. Tento mechanizmus nastáva keď sú medzi atómové väzby v narastajúcej vrstve menšie alebo rovné ako sú väzby medzi atómami vrstva – substrát.
- b) Stranského – Krastanov mechanizmus spočíva v náraste prvých vrstiev homogénne no potom častice začnú tvoriť malé ostrovčeky a nárast pokračuje lokálne. Je kombináciou 2 ostatných mechanizmov nárastu tenkých vrstiev.
- c) Volnerov – Weberov mechanizmus nastáva vtedy keď sú väzby medzi atómami substrátu väčšie ako väzby substrát – narastajúca vrstva. Atómy už od začiatku

tvoria ostrovčeky, ktoré sa neskôr prepoja do súvislej vrstvy. Je to najčastejší mechanizmus pri tvorbe tenkých vrstiev [7,10].



Obr. 1-5 Rôzne mechanizmy vzniku tenkých vrstiev. a) Frankov – van der Merweov mechanizmus, b) Stranského – Krastanov mechanizmus c) Volnerov – Weberov mechanizmus, [10].

#### 1.2.4 Materiály povlakov PVD

Povlakové materiály možno v závislosti od ich tvrdosti rozdeliť na Tvrdé (<40GPa) a supertvrde (>40GPa). Tvrdosť avšak nie je jediná podstatná vlastnosť. Medzi dôležité vlastnosti povlakov patria aj drsnosť povrchu a koeficient trenia. Tie majú veľký vplyv na rezný výkon [1]. Povlaky na rezných nástrojoch nástroj chránia pred mechanickou, tepelnou a chemickou záťažou [12].

##### Povlak TiN

Najdlhšie používaný povlak. Má mikrotvrdosť 20 – 25 GPa a zlatú farbu. Má dobrú elasticitu a adhéziu (priľnavosť) [11].

##### Povlak DLC

Povlak zo syntetického diamantu (DLC – diamond like carbon). Má veľmi vysokú tvrdosť (až 60 GPa). Je čiernej farby. Nevhodný pri obrábaní oceli [11].

##### Povlak TiCN

Mikrotvrdosť 30 až 40 GPa, hnedočierna farba, hnedá až bronzová. V porovnaní s povlakom TiN ma nižší koeficient trenia vyššiu tvrdosť. Vhodný na prerušovaný rez [11].

##### Povlak CrAlN

Povlaky s vysokou priľnavosťou a vysokou chemickou stabilitou za zvýšených teplôt. Vysoký obsah Al zabezpečuje odolnosť proti oxidácii. Ten vytvára na povrchu vrstvu Al-Cr-O a tá ďalej bráni difúzii kyslíku do povlaku [13].

##### Povlak TiAlN

Tvrdosť 25 až 38 Gpa, nízke zbytkové napätie jednotlivých vrstiev -3 až -5 Gpa. Vyznačujú sa taktiež vysokou odolnosťou voči teplote. Tepelná vodivosť ja menšia o 30% oproti TiN vrstvám [14]. Má čierno šedú farbu. Pri obrábaní vytvára vrstvu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> čo znižuje trenie, zvyšuje odolnosť voči difúzii a zlepšuje rezné vlastnosti [11].



### Klzné vrstvy

Majú nižšiu tvrdosť ako oteruvzdorné vrstvy. Ich cieľom je vytvoriť klzný povrch. Nanášajú sa v kombinácii s tvrdými vrstvami a tak vo výsledku vytvárajú povlak s dobrou tvrdosťou a zároveň nízkym koeficientom trenia [13].

### Povlak MoS<sub>2</sub>

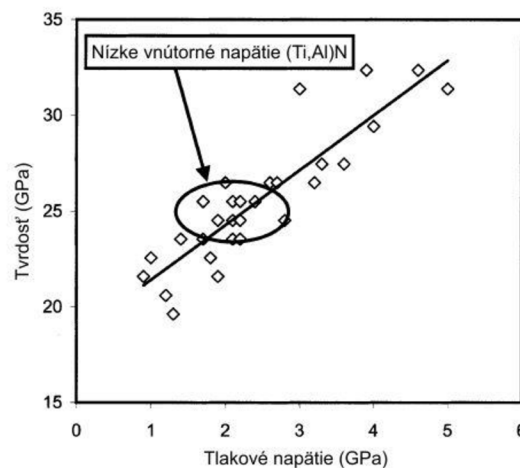
Používa sa ako klzný povlak. Je mäkký. Nanáša sa ako vrchná vrstva na iný tvrdý povlak [11].

### HEA povlaky

Ako materiály s výbornou odolnosťou proti oxidácii za vysokých teplôt a dobrou odolnosťou proti opotrebeniu sa osvedčili high-entropy alloys (HEAs) [15]. HEA sú zliatiny, ktoré obsahujú 5 alebo viac prvkov v ekvimolárnej koncentrácii [16]. Terče z HEA je možné použiť pri magnetronovom naprašovaní, ktoré je schopné vytvoriť povlak s identickým zložením. Zachováva teda pomery jednotlivých prvkov. Taktiež je možné takéto terče použiť pri reaktívnom naprašovaní [17,15].

### 1.2.5 Zvyškové napätie v PVD povlakoch

Pri povlakoch PVD je typické že ich zvyškové napätie je tlakového charakteru [1]. Ruka v ruku s vyššími zvyškovými tlakovými napätiami narastá aj ich tvrdosť [18]. Zvýšené zvyškové tlakové napätie môže spomaliť šírenie trhlín v povlaku avšak zároveň môže veľké napätie spôsobiť zlú adhéziu povlaku. Na Obr. 1-6 je zobrazená závislosť medzi tvrdosťou od zvyškového tlakového napätia. Oboje klesajú so zvyšujúcou sa teplotou povlaku [19].



Obr. 1-6 Závislosť tvrdosti od tlakového napätia povlaku TiAlN [19].

U PVD povlakov je charakteristické zvyškové tlakové napätie [1]. Vyššie napätie potom spravidla znamená aj vyššiu tvrdosť [18]. Celkové výsledné napätie v povlaku sa skladá z 3 komponentov (3):  $\sigma_{\text{ext}}$  -vonkajšie napätie ktoré vzniká vplyvom externého zaťažovania,  $\sigma_i$  - zvyškové vnútorné napätie,  $\sigma_{\text{th}}$  - termálne indukované napätie.

$$\sigma = \sigma_{ext} + \sigma_i + \sigma_{th} [20] \quad (3)$$

V praxi sa pre určenie zvyškového vnútorného napätia používa Stoney-iho rovnica (4).

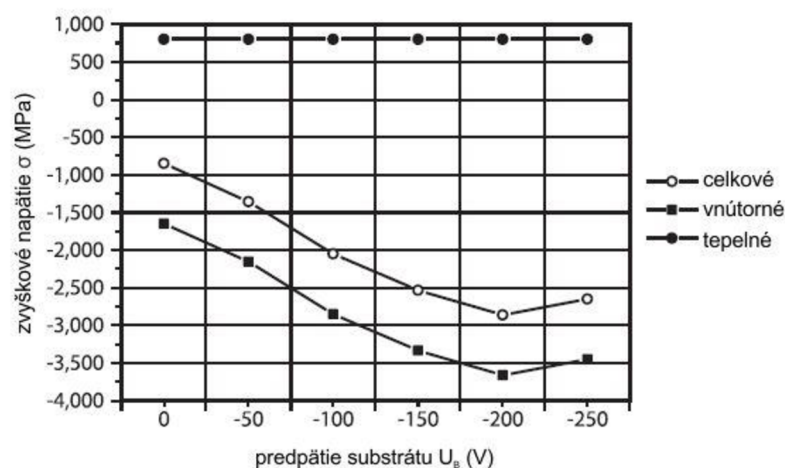
$$\sigma = \frac{E * h^2}{6 * t * (1 - \nu)} * (K_2 - K_1) [44a] \quad (4)$$

Kde E a  $\nu$  sú Youngov modul a poissonovo číslo materiálu substrátu, t je hrúbka substrátu, h je hrúbka povlaku,  $K_1$  a  $K_2$  sú krivosti ( $1/R$ ) substrátu pred a po depozícii [20]. Krivosti substrátu je možné merať napríklad digitálnou holografickou mikroskopiou [21].

$$\sigma_{th} = (\alpha_s - \alpha_f) * \left( \frac{E_f}{1 - \nu_f} \right) * \Delta T [46a] \quad (5)$$

Termálne indukované napätie sa potom vypočíta zo vzťahu (5), kde  $\alpha_s$  a  $\alpha_f$  sú koeficienty tepelnej rozťažnosti substrátu a povlaku,  $E_f$  a  $\nu_f$  sú Youngov modul a poissonovo číslo povlaku a  $\Delta T$  znamená rozdiel medzi teplotou deponovania a izbovou teplotou (teda teplotou pri ktorej sa zisťuje napätie v povlaku) [22].

Na Obr. 1-7 je zobrazený priebeh vnútorných napätí v povlaku (Cr,Al)N vytvoreného naprašovaním HIPIMS v závislosti od meniaceho sa prepätia na substráte. Je možné pozorovať vzťah medzi zvyškovým vnútorným napätím, termálne indukovaným napätím a celkovým výsledným napätím [21].



Obr. 1-7 Vnútorné napätia v povlaku (Cr,Al)N [21].

### 1.2.6 Tieňový efekt

Metódy PVD sa potykajú obecnne s tieňovým efektom. To znamená, že na niektorých pre častice ťažšie dostupných plochách, ktoré napríklad nie sú kolmo orientované smerom k zdroju častíc bude rýchlosť nárastu povlaku nižšia, ba dokonca na niektorých miestach

nemusi povlak rásť vôbec. Tento nedostatok sa kompenzuje permanentným otáčaním substrátu (nástroja) čo má za cieľ deponovať povlak rovnomerne po celej ploche nástroja. Tieňový efekt zapríčiňuje porozitu a nedostatočnú priľnavosť [10].



Obr. 1-8 Rotačné držiaky s nástrojmi PVD [24].

### 1.2.7 Štruktúra PVD povlakov

Štruktúra závisí na mnoho faktoroch, najmä teplote a pracovnom tlaku.

#### Gradientné vrstvy

Sú to povlakové vrstvy s postupne sa meniacim chemickým a štruktúrnym zložením. Napríklad pri povlaku AlTiN sa využíva postupne sa meniaci pomer jednotlivých zložiek tak že bližšie k povrchu sa zvyšuje obsah Al aby sa tým zabezpečila odolnosť proti oxidácii pri zachovaní tvrdosti [13].

#### Multi nano vrstvy

Sústava tenkých vrstiev. Ich hrúbka môže zodpovedať atómovým štruktúram [14].

Obecne sa používajú 2 kombinácie prekladania jednotlivých vrstiev v povlaku. 1) kombinácia tvrdá/mäkká kde sa striedajú vrstvy tvrdšieho a mäkšieho kovu. Takéto vrstvy sú chemicky odolné. 2) kombinácia mäkká/mäkká – nízky koeficient trenia a malé zvyškové napätie [24].

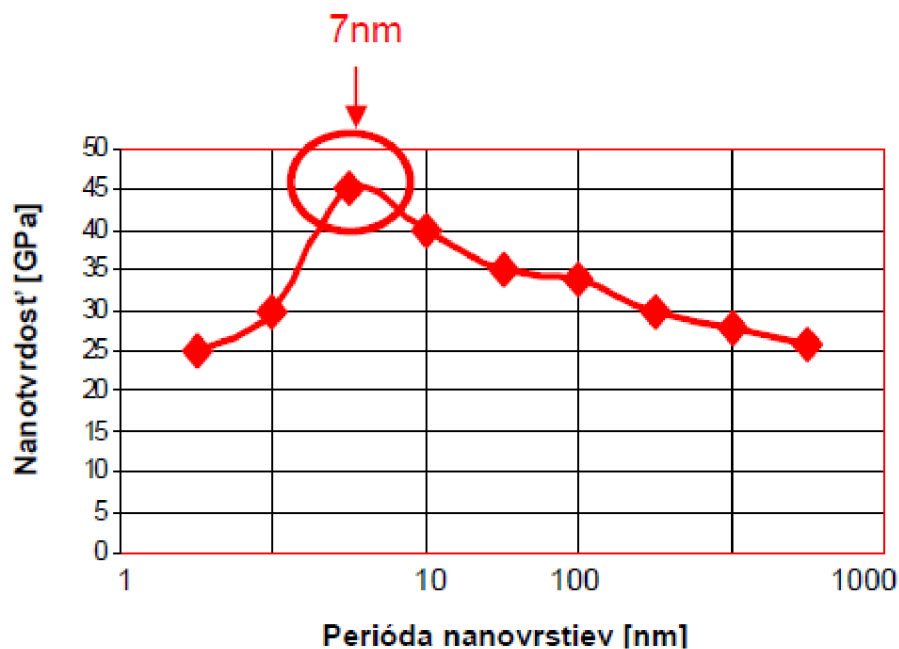
Hrúbka jednotlivých vrstvičiek má len niekoľko nanometrov kdežto hrúbka povlaku dosahuje 2 – 5 mikrometrov. Povlak teda môže obsahovať stovky vrstvičiek. Typický multivrstvový povlak je vidieť na Obr. 1-9. Jeho vrstvy majú rovnomernú hrúbku [24].

Pri dodržaní istých hrúbok sa môže ovplyvniť kryštalová štruktúra v povlaku. Takto je možné vytvoriť vrstvy napríklad (Al,Ti)N s vysokým obsahom Al a kubickou mriežkou. Normálne by pri vysokom obsahu Al bola mriežka hexagonálna [14].



Obr. 1-9 Snímka SEM Multivrstvého povlak B4C/W [24].

Každá z jednotlivých vrstvičiek má hrúbku pod 10nm. Pri kombinovaní vrstiev z rôznych materiálov existuje optimálna perióda, ktorá môže tvrdosť celého povlaku zvýšiť. Tvrdosť povlaku zloženého z viacerých nano vrstvičiek závisí od ich periódy - Obr. 1-10. Maximálna tvrdosť povlaku je približne pri perióde nano vrstiev 7nm [13].

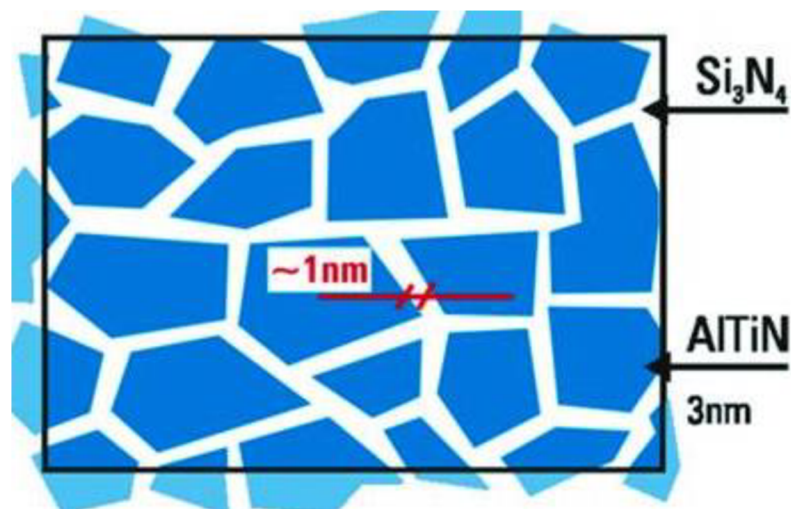


Obr. 1-10 Mikrotvrdosť povlaku v závislosti od periódy nanovrstiev [6].

### Nanokompozitné vrstvy

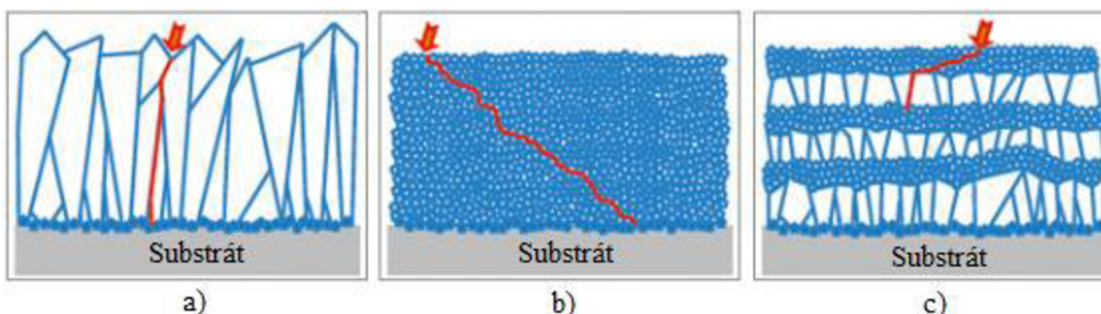
Vyznačujú sa vysokou tvrdosťou, tepelnou stabilitou a odolnosťou voči oxidácii [13].

Nanokompozit je tvorený aspoň 2 zložkami, ktoré sú navzájom nerozpustné, s tým, že jedna zo zložiek musí mať kryštalický charakter. Vďaka malej zrnitosti získava materiál na tvrdosti. Vzhľadom na to, že sa jedná o termodynamicky stabilné materiály, nedochádza k nárastu zŕn dokonca ani pri teplotách blízkyh 1000°C. Príklad: vrstvy (Al,Ti,Si) N tvoria kryštály (Al,Ti) N s rozmermi asi 5nm ktoré sa nachádzajú v amorfnej matrici Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Obr. 1-11). Nano kompozitná štruktúra sa objavuje so zvyšujúcim sa obsahom Si. Pri nízkom obsahu Si by bola štruktúra stĺpovitá [25]. Tvrdosť nanokompozitov môže dosahovať 40 až 50 Gpa v závislosti od materiálu. Vytvorenie takýchto vrstiev je náročné a sú pre to potrebné špecifické parametre [14]. Príkladom je tiež povlak Cr-Mo-Si-N pripravený pomocou oblúkového iónového plátovania a HIPIMS. Vyrába sa z terčov Cr a MoSi. Výsledná štruktúra povlaku sa mení s meniacim sa obsahom Si. Pri nízkom obsahu Si je štruktúra stĺpovitá. Pri obsahu Si 8.15% je pozorovaná štruktúra nanokompozitná. Nano kryštalická fáza Cr(Mo)N sa nachádzala v amorfnom pojive Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Pri nanokompozitnej štruktúre je tak isto výrazné zlepšenie tvrdosti, zvyškového tlakového napätia ako aj odolnosti proti opotrebeniu oproti štruktúre stĺpovitej [26]. Nanokompozitné povlaky majú výbornú odolnosť proti abrazívnemu poškodeniu [27].



Obr. 1-11 Nanokompozitná štruktúra povlaku (AlTiSi)N [27].

Výhodou multivrstvových povlakov je, že majú schopnosť odkloniť šírenie trhliny a tým ju spomaliť. Podobný jav možno pozorovať pri povlakoch s nanokompozitnou štruktúrou. Zvyškové tlakové napätie v povlakoch tiež spomaľuje šírenie trhliny [28].



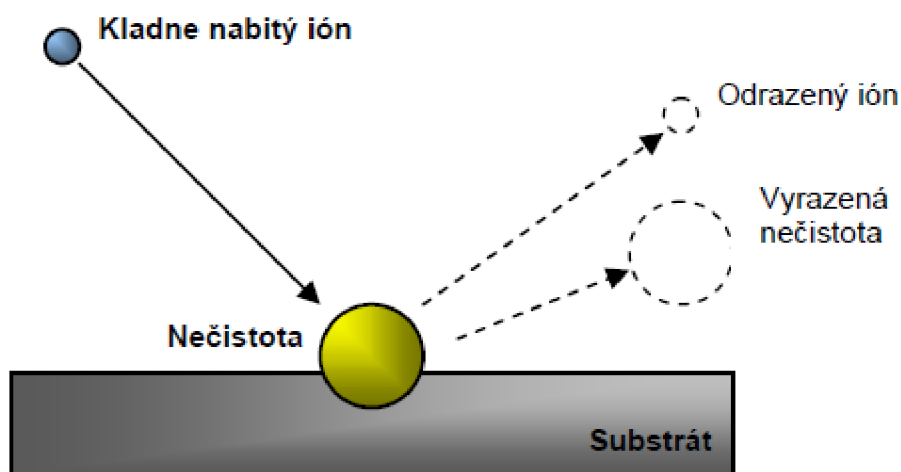
Obr. 1-12 Šírenie trhliny cez a) jednovrstvový povlak, b) povlak s nanokompozitnou štruktúrou, c) multivrstvový povlak [28].

### 1.2.8 Príprava substrátu na deponovanie

Dôležité je povrch substrátu pred deponovaním dobre vyčistiť. Ak by začal povlak narastať na nejakej nečistote tak sa to odrazí na jeho zlej príľnavosti. Ako prvé je potrebné povrch dokonale očistiť a odmastiť. Pre odmastenie sa používajú mierne alkalické roztoky tenzidov a vodné oplachy. Potom sa substrát suší pod prúdom teplého vzduchu alebo v sušičkách. Nasleduje iónové čistenie kde sa odstráni niekoľko nanometrov povrchu substrátu [11].

#### Iónové čistenie

Je to operácia, ktorá predchádza deponovaniu. Hlavný cieľ je odstrániť nečistoty, ktoré pretrvali napriek čisteniu pred umiestnením do komory. Iónovým čistením sa zvyšuje teplota substrátu nakoľko väčšina energie z dopadajúcich atómov sa premení na teplo. Okrem čistenia a zahrievania substrátu môžu dopadajúce ióny na povrchu vytvárať drsnosť povrchu na atómovej úrovni tým že premiestnia alebo vyrazia atómy zo štruktúry substrátu. Tento efekt je žiadúci pretože drsnosť substrátu na atómovej úrovni zlepšuje adhéziu povlaku. Iónové čistenie sa uskutočňuje v depozičnej komore. Dopadajúce ióny po dopadnutí na substrát odstránia z jeho povrchu nečistoty (Obr. 1-13). Pri dopade odovzdajú kinetickú energiu (až 10 eV). Takúto energiu získajú vďaka vysokému prepätiu na substráte (600 až 2400V). Pri tomto procese sa tak isto zvyšuje teplota substrátu [6,19].



Obr. 1-13 Princíp iónového čistenia [6].

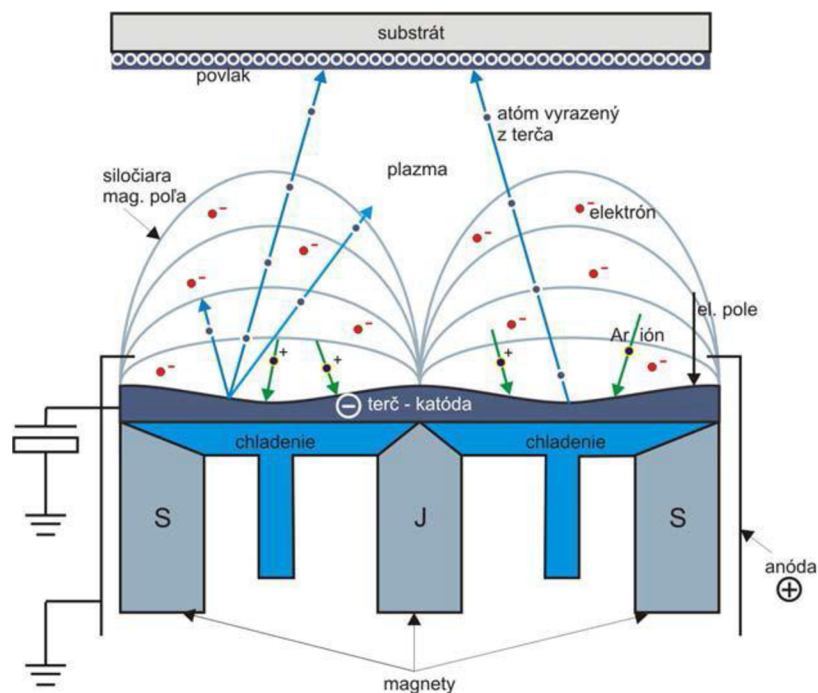
### 1.3 Katodické magnetronové naprašovanie

Pri tejto metóde naprašovania je plazma tvorená magnetronovou katódou ktorá je obklopená anódou. Sú teda v tesnej blízkosti. Mezi nimi sa zavedie rozdiel potenciálov 600 – 1000V. Záporný na katóde a kladný na anóde. V komore sa vytvorí tlak  $10^{-5}$  mbar. Po zavedení argónu je to asi  $10^{-3}$  mbar. Podobne ako u ostatných metód naprašovania sa medzi anódou a katódou vytvorí plazma vysokej intenzity vďaka tesnej vzájomnej blízkosti anódy a katódy. Väčším počtom iónov sa zvýši aj počet naprašovaných častíc [3, 22]. V porovnaní s diódovým naprašovaním je u magnetronového naprašovania rýchlosť tvorby povlaku 5-krát vyššia [29]. V porovnaní s povlakmi vytvorenými odparovaním majú povlaky naprašované nižšie zbytkové napätie [30].

Pred terčom sa vytvorí magnetické pole kolmé na pole elektrické budené elektromagnetmi, permanentnými magnetmi alebo oboma naraz (Obr. 1-14). Takéto zariadenie sa nazýva magnetrón. Elektróny sa potom vplyvom lorentzovej sily (6) budú pohybovať po šroubovici čím sa zvýši pravdepodobnosť ionizácie plynu. Vďaka tomuto javu je možné výboj udržať i za nižšieho tlaku (desatiny pascalov) aj pri nižšom napätí. Vďaka nižšiemu tlaku má potom vytvorený povlak vyššiu čistotu [31].

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times B \quad [32] \quad (6)$$

Keďže podľa druhého Newtonovho zákona je zrýchlenie inverzne proporčné ku hmotnosti. Trajektóriu kladne nabitých iónov  $Ar^+$  ovplyvní magnetické pole len zanedbateľne kvôli ich vysokej hmotnosti kdežto na elektróny má vplyv veľký [3].



Obr. 1-14 Magnetronové katódové naprašovanie s rovnovážnym magnetronom [7].

Pomocou magnetronového katodického naprašovania je možné deponovať kovy, zliatiny, keramiky, polyméry. Má využitie v mnohých oblastiach ako sú obrábanie, biomedicínske aplikácie, optika či elektro komponenty. Magnetronové naprašovanie umožňuje syntetizovať zlúčeniny mimo termodynamickej rovnováhy. Môže teda deponovať metastabilné fázy [29].

Pri nevodivých terčoch sa postupne na terči kumuluje elektrický náboj čo zabraňuje ďalšiemu bombardovaniu. Pre odstránenie tohto nepriaznivého javu je potrebné magnetron napájať striedavým elektrickým prúdom. Potom je možné naprašovať aj nevodivé materiály ako napríklad rôzne keramiky [31].

#### **Rýchlosť depozície možno ovplyvniť:**

- menením vzdialenosti terč-substrát. Obvykle sa táto vzdialenosť pohybuje v rozmedzí 50 – 100mm,
- tlakom pracovného plynu,
- materiálom terča,
- vyššou hustotou výkonu na povrchu terča [33].

Na Obr. 1-14 sú znázornené 2 typy magnetov. Jeden je v ose a dva z nich sú pri stene magnetronu. Ak oba tieto typy magnetov majú rovnakú intenzitu tak hovoríme o rovnovážnom magnetrone. Pokiaľ sú vonkajšie magnety (magnety pozdĺž steny) silnejšie ako magnety v ose, plazma môže siahať až k povrchu substrátu. V takomto prípade sa jedná o nerovnovážny magnetron [34].

Na Obr. 1-15 je znázornené ako sa mení štruktúra PVD povlakov pri magnetronovom naprašovaní v závislosti na tlaku  $Ar^+$  v povlakovacej komore a teplote substrátu. T je teplota substrátu a  $T_m$  je teplota topenia substrátu

Podľa obrázka je možné rozlíšiť celkovo 4 štruktúrne zóny.

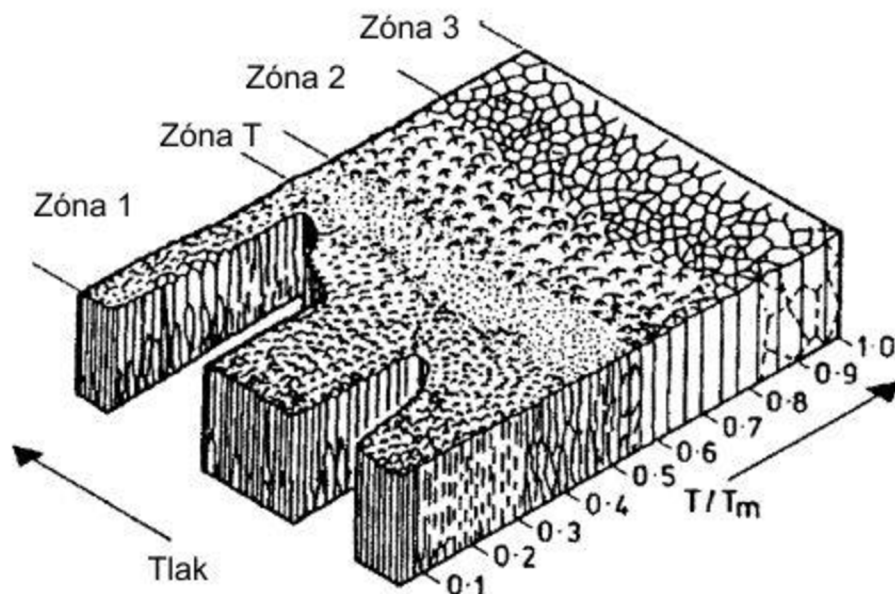
Zóna 1 – pórovitá štruktúra s drsným povrchom

Zóna T – vďaka zvýšenej teplote mali atómy väčšiu mobilitu čo malo za následok hustejšiu stĺpovitú štruktúru.

Zóna 2- hustejšia stĺpovitá štruktúra ako v zóne T

Zóna 3 – rovnoosé zrná a značne hladší povrch ako u predošlých zón [19]





Obr. 1-15 Štruktúra povlakov vytvorených magnetronovým naprašovaním [19].

### 1.3.1 Vznik plazmy

Argón, ako každý iný plyn, obsahuje istý počet voľných elektrónov vďaka UV žiareniu. Tých málo voľných elektrónov ktoré obsahuje je v elektrickom poli urýchlených a tým prichádzajú do kolízie s atómami argónu. Tým sa po ionizácii vytvorí ďalšie (6). Takto vznikne reťazová reakcia a tým aj plazma.



Ióny vzniknuté v plazme medzi anódou a katódou (terčom) sú priťahované k terču rozprašujú ho. Okrem častíc kovu, vyrážajú z terča aj sekundárne elektróny. Tie sa ocitnú v plazme kde prídu do kolízie s atómami argónu a tým pádom sa dej (6) môže opakovať [3].

### 1.3.2 Interakcia iónov s povrchom

Pri dopade iónov  $\text{Ar}^{+}$  na povrch môžu nastať nasledujúce situácie:

- ión  $\text{Ar}^{+}$  môže byť od povrchu odrazený alebo môže byť odrazený ako Ar s tým, že stratí veľkú časť svojej energie,
- ión môže byť absorbovaný do povrchu terča. Mechanickým efektom je vyrazený atóm z terča, podobne ako jeden či viac sekundárnych elektrónov. Tieto elektróny zabezpečujú plazmu naďalej v chode. Tento spôsob interakcie je u naprašovania vyhl'adávaný,

- ióny môžu byť absorbované do štruktúry terča a lokálne zmeniť kryštalickú štruktúru materiálu. Podobne ako v predošlom prípade môže dôjsť k uvoľneniu elektrónov [3].

### 1.3.3 Rýchlosť erózie terča

$$R_e = 62,3 * \frac{J * S * m_t}{\rho} [\text{\AA} \cdot \text{min}^{-1}] \quad [35] \quad (6)$$

Kde:	$J[\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}]$	- prúdová hustota iónov
	$S[\text{atómy/ióny}]$	- účinnosť naprašovania
	$M_t [\text{g}]$	- atómová hmotnosť
	$\rho [\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	- objemová hmotnosť terča

### 1.3.4 Účinnosť naprašovania

Pomer medzi počtom dopadajúcich iónov a počtu vyrazených atómov. Pod tejto účinnosti je možné predpovedať rýchlosť deponovania.

Účinnosť závisí od:

- od použitého plynu: čím ťažší tým lepšia účinnosť,
- od materiálu terča,
- od energie dopadajúcich iónov – teda od potenciálu medzi anódou a katódou,
- od uhlu dopadajúcich iónov [3].

### 1.3.5 Ionizácia častíc naprašovaného materiálu

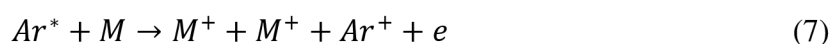
Mnoho aplikácii si dnes vyžaduje vysoký stupeň ionizácie naprašovaných častíc. Možnosť kontrolovania toku častíc má zásadný vplyv na výslednú kvalitu povlaku. Tok Neutrálnych častíc je komplikované kontrolovať avšak ióny je možné ovládať pomocou elektrického poľa. Tok ionizovaných naprašovaných častíc je urýchľovaný smerom k substrátu tým že sa na substrát aplikuje elektrické prepätie (bias). Ak tok týchto častíc smerujúcich k substrátu obsahuje viac iónov ako neutrálnych častíc  $\Gamma_M^+ > \Gamma_M$  tak ho zaraďujeme medzi IPVD (ionized PVD) metódy. Vďaka takémuto kontrolovanému toku častíc sa dajú povlakať aj ťažkodostupné miesta ako napríklad diery, alebo záhyby. Preto je možné deponovať aj nástroje s komplexnou geometriou [36].

Výboj pri naprašovaní je zložený z elektrónov, Ar atómov v základnom stave, metastabilných Ar iónov, Ar<sup>+</sup> iónov, atómov kovu M a iónov kovu M<sup>+</sup>. Ióny kovu vznikajú kolíziami atómov kovu s elektrónmi (6) a takzvanou Penningovou ionizáciou kde do kolízie prichádzajú atomy kovu s metastabilnými iónmi Ar (7) [29].

Vznik iónov kovu kolíziami časticami kovu s elektrónmi. Tento proces je dominantný keď je v plazme vysoká elektronová hustota ( $n_e \gg 10^{17} \text{ m}^{-3}$ ) to znamená aj v prípade HIPIMS naprašovania [29, 36].



Penningova ionizácia je dominantná pri nízkej elektrónovej hustote v plazme ( $n_e \ll 10^{17} \text{ m}^{-3}$ ). Prípád DC naprašovania a RF naprašovania [29, 36].



### 1.3.6 Typy magnetrónového katodického naprašovania

Podľa toho aký typ elektrického prúdu je na magnetrón aplikovaný sa magnetrónové katodické naprašovanie delí na:

**DCMS (Direct Current Magnetron Sputtering)** – naprašovanie kde je magnetrón napájaný jednosmerným prúdom,

**HIPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering)** – naprašovanie kde je magnetrón napájaný elektrickými vysokovýkonnými impulzami [29].

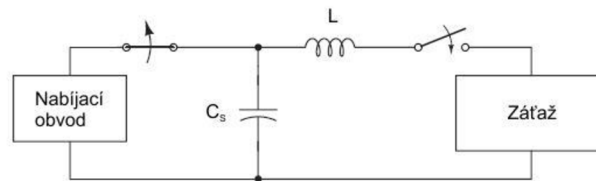
### 1.3.7 DCMS

Pri DCMS je na katóde konštantné záporné napätie. Pri bežnom DC magnetrónovom naprašovaní je pracovný tlak 1-10mTorr, magnetmi budená hustota magnetického toku 0.01 – 0.1 T a napätie na katóde (terči) 300-700V. To vedie k prúdovej hustote na terči asi  $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  a výkonovej hustote až do  $50 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  [29].

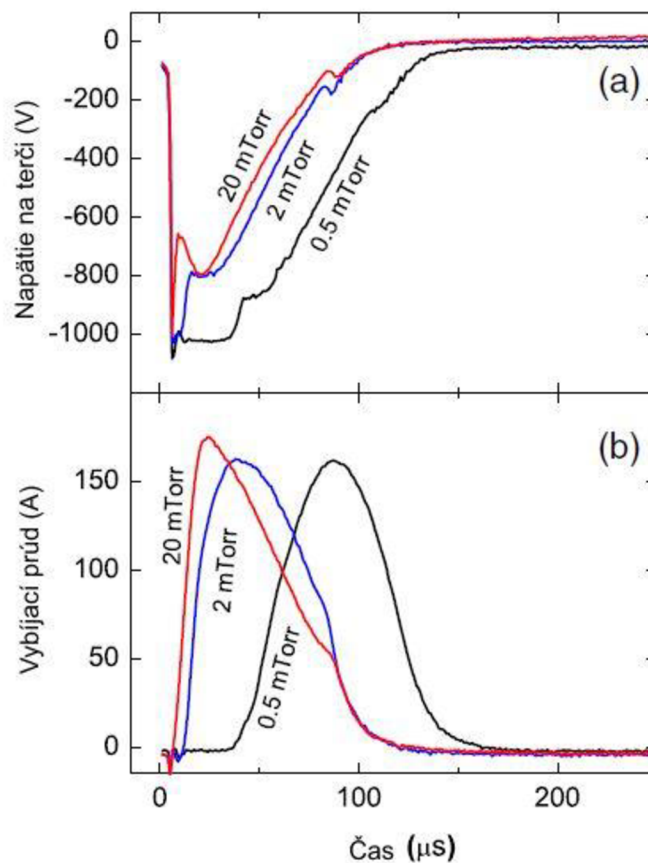
### 1.3.8 HIPIMS – magnetrónové naprašovanie vysokovýkonnými pulzmi

V niektorých literárnych zdrojoch označované aj ako HPPMS (high-power pulsed magnetron sputtering). Maximálny aplikovateľný výkon na magnetróne pri klasickom DC naprašovaní je limitovaný termálnou záťažou terča a možnosťami jeho chladenia. Aby bolo možné výkon zvýšiť, je potrebné na magnetrón aplikovať elektrický prúd v krátkych pulzoch. Pri takomto vysokom výkone sa skrakuje strieda (duty cycle). Strieda je pomer zapnutia (on-time) k času celého cyklu. Tá býva obvykle u tohto typu naprašovania < 10%. Takto je možné dosiahnuť vyšší výkon počas on-time [37].

Ako zdroj impulzov slúži jeden alebo viac LC reťazcov (Obr. 1-16). Kondenzátor  $C_s$  je nabitý z nabíjacieho obvodu cez tyristorový spínač. Nabíjací obvod obvykle pozostáva z DC zdroja napätia a nabíjacieho elementu. Kondenzátor sa potom vybije cez cievku  $L$  smerom k naprašovaciemu zariadeniu. Kapacita kondenzátora sa obvykle pohybuje od 1 do  $50 \mu\text{F}$ . Cievka je o indukčnosti 20 –  $50 \mu\text{H}$ . Časový priebeh napätia a prúdu na katóde po vybití kondenzátora je zobrazený na Obr. 1-17. Dĺžka jednotlivých impulzov je 50 –  $500 \mu\text{s}$  [29].



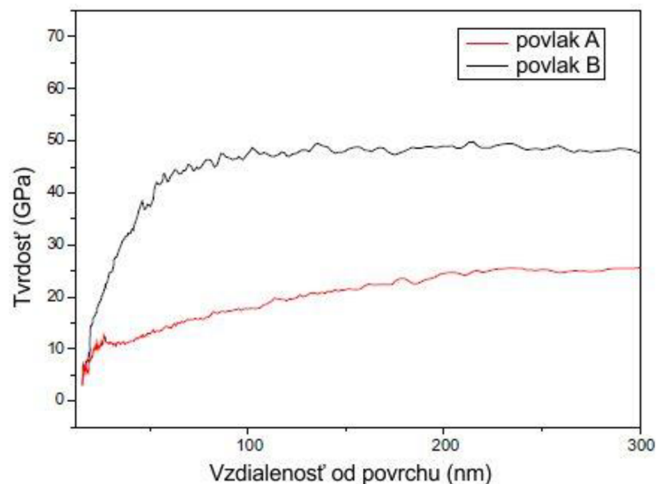
Obr. 1-16 LC reťazec ktorý prepojuje nabíjaci obvod a záťaž [36].



Obr. 1-17 Časový priebeh a) napätia na terči, b) prúdu na terči počas jedného impulzu pri rozdielnych tlakoch plynu [29].

Od pracovných podmienok pri deponovaní HIPIMS závisia výsledné mechanické a štruktúrne vlastnosti povlaku. Kvalita výsledného povlaku závisí od dobrého zladenia pracovných podmienok. Li et al. [38] dokázali s použitím rovnakého terča ( $\text{Ti}_{0,64}\text{Al}_{0,3}\text{Si}_{0,06}$ ) rovnakých impulzov (dĺžka impulzu  $400\mu\text{s}$  s frekvenciou  $50\text{Hz}$ ) s použitím odlišného tlaku, napätia a prepätia na substráte dosiahnuť 2 povlaky s odlišnými vlastnosťami. Povlak B mal zase vyššiu tvrdosť. Pri povlaku A použili prepätie na substráte  $150\text{V}$ , zdrojové napätie  $850\text{V}$  a pracovný tlak  $0,8\text{Pa}$ . Resp. pre povlak B:  $270\text{V}$ ,  $900\text{V}$  a  $1\text{Pa}$ . Povlak A sa vyznačoval lepšou adhéziou ako povlak B. Tvrdosti jednotlivých povlakov je možné vidieť na Obr. 1-18. Povlak A má lepšiu príľnavosť za čo vďaka tomu, že má podobnú tvrdosť ako substrát. Veľké

rozdiely v tvrdostiach medzi povlakom a substrátom zhoršujú adhéziu. Ako substrát slúžili vymeniteľné rezné doštičky z WC-Co.



Obr. 1-18 Tvrdosti povlakov TiAlSiN-A a TiAlSiN-B [38].

### 1.3.9 Porovnanie DCMS a HIPIMS

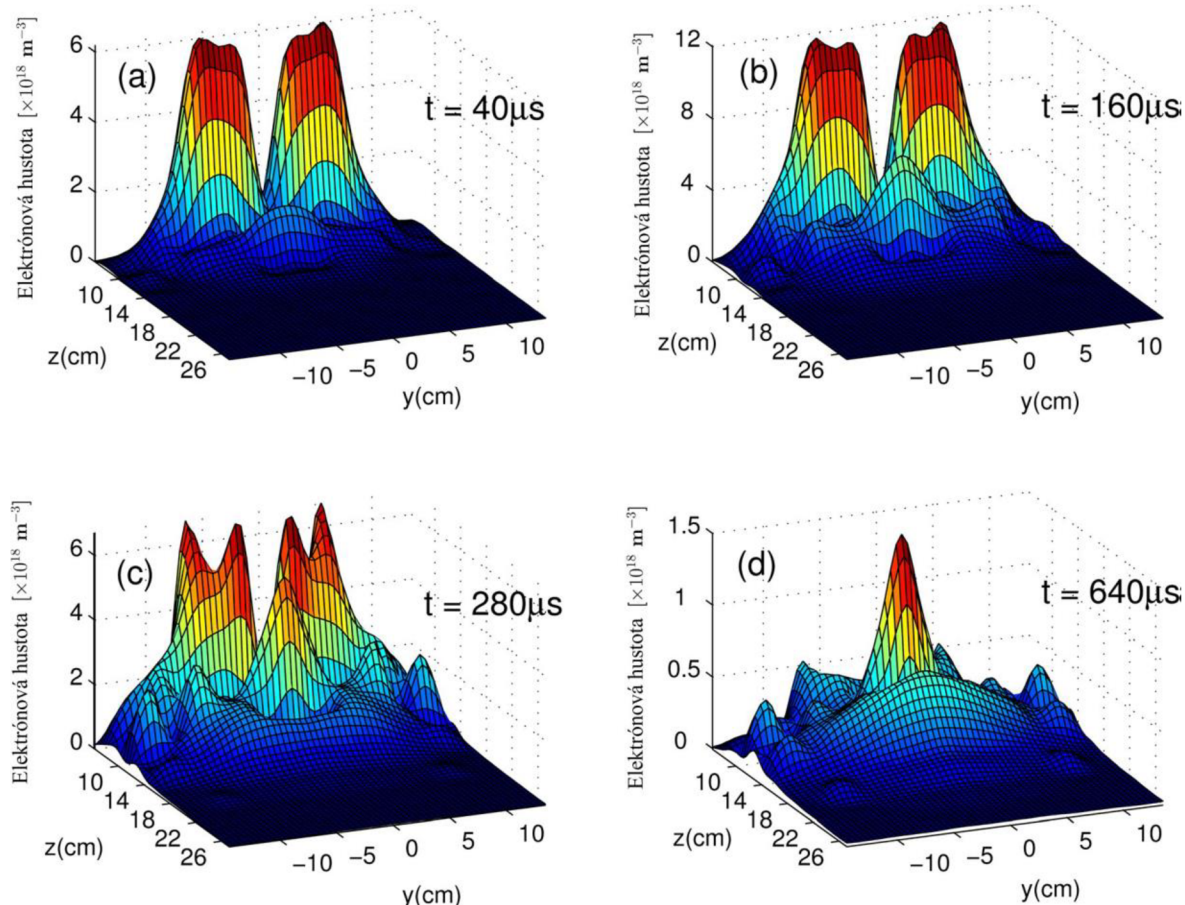
Povlaky tvorené HIPIMS sú celistvé a majú nízku drsnosť povrchu. Taktiež majú dobrú priľnavosť vďaka mikroštruktúrnym zmenám, ktoré nastávajú medzi jednotlivými deponovanými vrstvami či medzi povlakom a substrátom [8, 39, 40]. Celkovo sa povlaky HIPIMS vyznačujú lepšou kvalitou ako tomu je u povlakov pri naprašovaní DC. Avšak pri povlakovaní HIPIMS sú nižšie depozičné rýchlosti. Napríklad pri depozícii povlakov z Ti a Cu je pri HIPIMS 2x nižšia depozičná rýchlosť než pri DCMS. Depozičná rýchlosť tiež závisí od dĺžky jednotlivého impulzu. Pri deponovaní Ti metódou HIPIMS s dĺžkou jedného impulzu 5 $\mu$ s bola depozičná rýchlosť asi 70% rýchlosti pri DCMS, zatiaľ čo pri zvýšení dĺžky impulzu na 20 $\mu$ s depozičná rýchlosť klesla na 20%. Avšak pokiaľ sa jedná o depozíciu na ťažko dostupné plochy prípadne plochy kolmo orientované na rovinu terča, môžu byť depozičné rýchlosti pri HIPIMS väčšie ako pri DCMS [41].

Hustota výkonu môže rádovo dosahovať niekoľko kW/cm<sup>2</sup> na rozdiel od klasického DC naprašovania kde je sa energia pohybuje rádovo v jednotkách W/cm<sup>2</sup> [17].

#### **Zo zvyšujúcim výkonom magnetrónu sa zvyšuje:**

- rýchlosť depozície
- zvyšuje sa teplota substrátu kvôli zvyšujúcemu sa počtu na substrát dopadajúcich častíc a taktiež kvôli teplu, ktoré sála z katódy (terča)
- zvýši sa mikrotvrdosť povlaku
- zvýšená hustota stĺpovitej štruktúry a väčšia veľkosť stĺpcov [18].

Vysokým výkonom magnetronu pri HIPIMS je možné dosiahnuť vysokých hustôt plazmy až  $10^{19} \text{ m}^{-3}$  a veľký počet ionizovaných atómov kovu [29]. Na Obr. 1-19 je znázornená priestorovo-časová evolúcia elektrónovej hustoty v plazme v okolí magnetronu cylindrického tvaru s titánovým terčom o priemere 150mm. Jednotlivé obrázky zobrazujú elektrónovú hustotu v rovine kolmej na magnetron v rôznych časoch: a)  $40 \mu\text{s}$  b)  $160 \mu\text{s}$  c)  $280 \mu\text{s}$  d)  $640 \mu\text{s}$  od začiatku impulzu. Celková dĺžka impulzu bola  $100 \mu\text{s}$  [36]



Obr. 1-19 Elektrónová hustota po a)  $40 \mu\text{s}$  b)  $160 \mu\text{s}$  c)  $280 \mu\text{s}$  d)  $640 \mu\text{s}$  od začiatku impulzu [36].

Výkon magnetronu vplýva na výslednú štruktúru povlaku. Taktiež rýchlosť depozície, ktorá stúpa so stúpajúcim výkonom na magnetóne. Pri menení výkonu na magnetróne z  $2,65$  na  $4,65 \text{ kW}$  bola zaznamenaná u povlakov  $\text{TiAlN}$  zmena tvrdosti z  $23,5 \text{ GPa}$  ( $2400 \text{ HV}$ ) na  $28,4 \text{ GPa}$  ( $2900 \text{ HV}$ ). Povlaky vytvorené za vyšších depozičných rýchlostí vykazujú často vysoké zvyškové napätie a hustú štruktúru. Tieto 2 posledne spomínané faktory zvyšujú povlaku tvrdosť. Povlaky boli stĺpovitej štruktúry, ktorá bola hustejšia/celistvejšia za vyšších magnetronových výkonov [18].

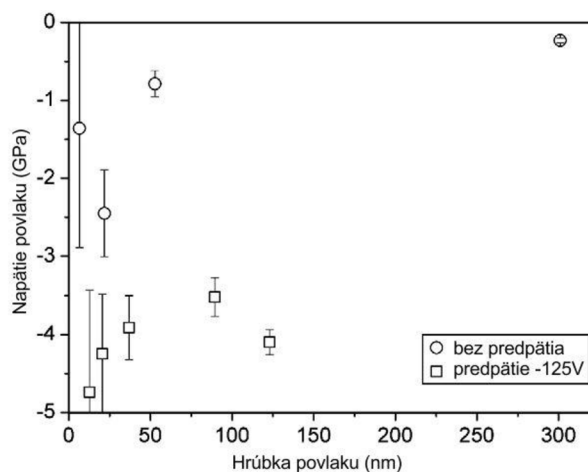
Chang et al. [17] porovnávali kvalitatívne a trvanlivostné vlastnosti povlakov rezných nástrojov vytvorených DCMS a HIPIMS metódami. Pri povlakoch  $(\text{AlCrNbSiTiV})\text{N}$  ktoré boli deponované na vymeniteľné rezné doštičky z cermetu bolo zaznamenané zvýšenie

tvrdosti z 2321 pri DCMS na 2385HV pri HIPIMS. Následne sa s nástrojmi sústružila ocel 42CrMo4 (dĺžka rezu: 300mm, posuv na otáčku: 0,2mm, rezná rýchlosť 220 m/min, šírka záberu ostria: 2mm). Obrobená plocha mala drsnosť povlaku 3.58 $\mu$ m pri povlaku DCMS a 3.51 $\mu$ m pri HIPIMS. Opotrebenie chrbtu nástroja bolo 13,95 $\mu$ m pri DCMS a 12,71  $\mu$ m pri HIPIMS [17].

### 1.3.10 Aplikovanie elektrického prepätia na substrát (bias sputtering)

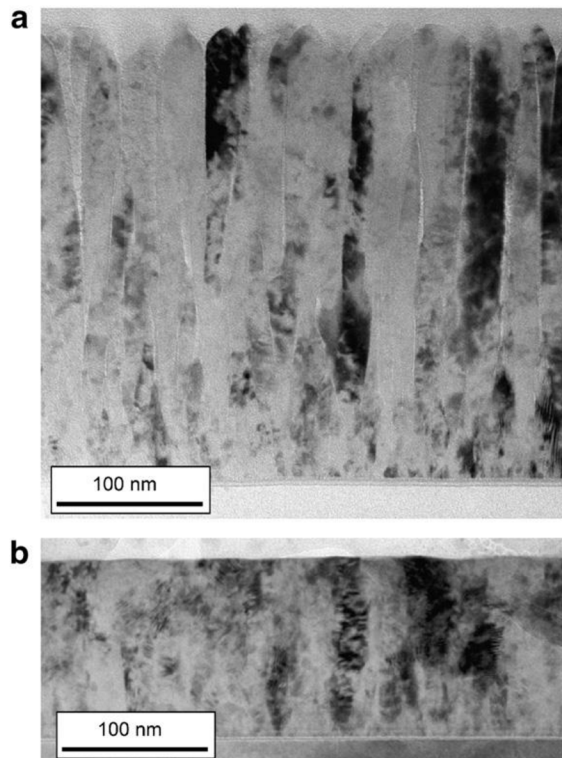
Na substrát sa aplikuje záporné elektrické prepätie (bias). To priťahuje kladne nabité častice kovu, ktoré sa na svojej dráhe k substrátu v plazme zionizovali. Povlak vzniknutý pri naprašovaní s aplikovaným elektrickým prepätím na substráte ma v porovnaní s povlakom bez prepätia vyššiu celistvosť, menšiu porozitu a jemnejšie zrná. Takéto vlastnosti povlaku zvyšujú jeho odolnosť proti opotrebeniu [19, 20].

Aplikovanie prepätia pri naprašovaní tiež ovplyvňuje vnútorné napätie v povlakoch. Na Obr. 1-20 Sú znázornené nútorné napätia povlakov TiN deponovaných naprašovaním HIPIMS v závislosti od ich hrúbky. Hodnoty značené krúžkom symbolizujú povlaky vytvorené bez aplikácie elektrického prepätia na substrát. Hodnoty označené štvorcami vyjadrujú napätia povlakov kde bolo pri deponovaní HIPIMS aplikované na substrát elektrické prepätie -125V. Keďže sú hodnoty napätia záporné, jedná sa o napätie tlakové [46].



Obr. 1-20 Vnútorné napätia povlakov TiN [22].

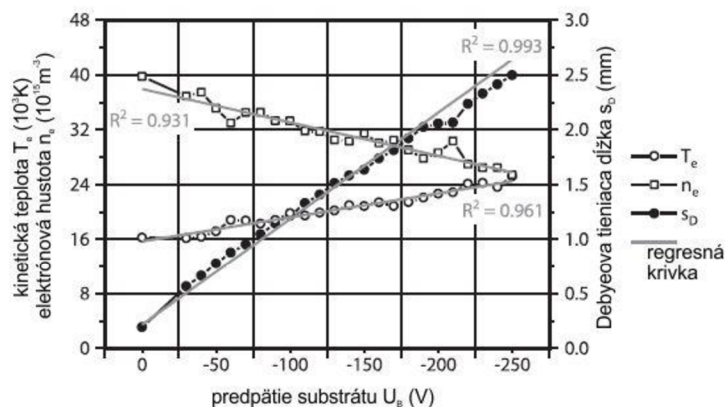
Pri vytváraní povlakov TiN naprašovaním HIPIMS sa ukázalo že aplikovanie elektrického prepätia na substrát počas deponovania má zásadný vplyv na výslednú štruktúru povlaku a tak isto aj na drsnosť povlaku. Na Obr. 1-21a je znázornené snímka SEM prierezu povlaku TiN bez elektrického prepätia. U tohto povlaku je vidieť miernu porozitu a vyššiu drsnosť povrchu ako je tomu o povlaku na Obr. 1-21b ktorý bol vytvorený s elektrickým prepätím -125V [22].



Obr. 1-21 Snímky SEM prierezu povlakom TiN HIPIMS a) bez el. prepätia, b) s el. prepätím [22].

Vplyvom elektrického prepätia substrátu na vlastnosti plazmy v okolí substrátu sa zaoberali Bobzin et al. [21]. Na magnetrón bol aplikovaný HIPIMS výkon 1kW a na substráte menené elektrické prepätie od  $U=0V$  až po  $U=-250V$ . V okolí substrátu bol pozorovaný jav Debyeovho tienenie. Ten nastáva pokiaľ sa do plazmy vloží napríklad pevné teleso (substrát) nesúce elektrický náboj (prepätie na substráte). Tento jav spočíva v tom, že v blízkom okolí substrátu na ktorom je záporné prepätie sa kumuluje elektrický náboj s opačnou polaritou a vytvorí tak tieniacu vrstvu. Hrúbka tejto vrstvy sa nazýva Debyeova tieniaca dĺžka [42]. V štúdií narastala Debyeova tieniaca dĺžka ( $S_d$ ) lineárne ( $R^2=0,993$ ) z  $S_d=0,25mm$  pre  $U=0V$  na  $S_d=2,5mm$  pre  $U=-250V$  (Obr. 1-22). Elektrónová hustota klesala lineárne so zvyšujúcim sa prepätím z  $n_e = 40 \cdot 10^{15} m^{-3}$  na  $n_e = 25 \cdot 10^{15} m^{-3}$  ( $R^2=0,931$ ). Počet elektrónov klesá pretože sú z oblasti kde je kumulovaný kladný náboj odpudzované [21].

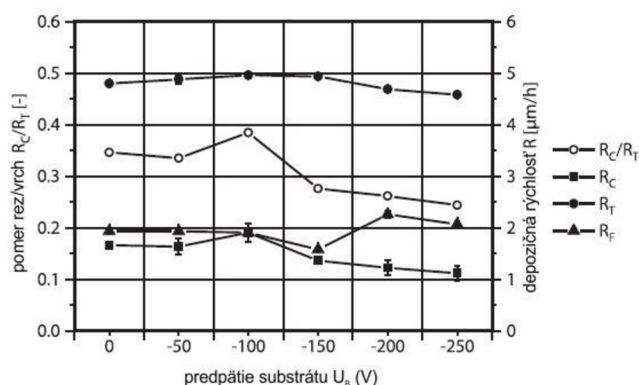




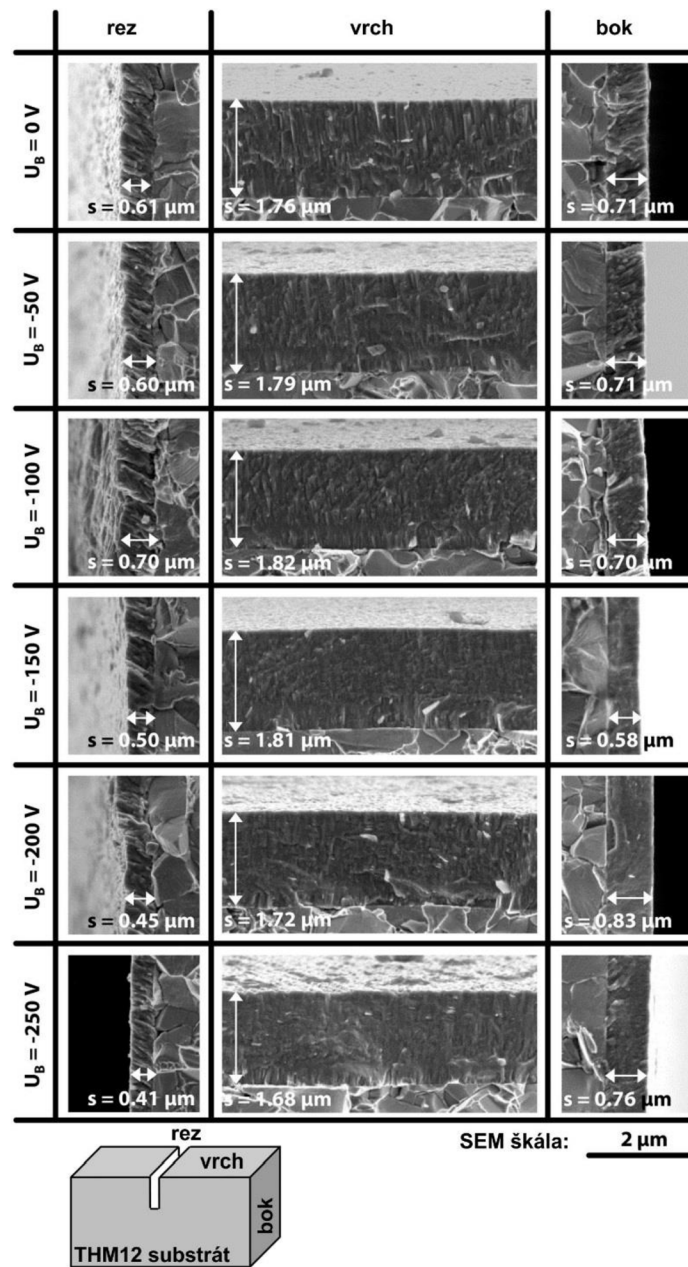
Obr. 1-22 Debyeova tieniaca dĺžka, kinetická teplota a elektronová hustota v závislosti od prepätia na substráte [21].

### 1.3.11 Povlakovanie komplexnej geometrie nástroja

Technológia HIPIMS sa vyznačuje dobrou schopnosťou deponovať aj nástroje s komplexnou geometriou pri zachovaní rovnomernosti hrúbky povlaku a vysokých depozičných rýchlostí aj na plochách, ktoré niesú kolmé na terč [43]. Je preto vhodná pre deponovanie nástrojov s komplexnou geometriou. Overiť to mali za cieľ Bobzin et al. Povlak (Cr,Al)N bol nanášaný na substrát zo spekaného karbidu. Do substrátu bol vyrezaný zárez s hĺbkou 1,5mm a o šírke 0,75mm. Substrát bol uložený vo vzdialenosti 60mm od magnetrónej katódy Na Obr. 1-23 je vidieť evolúciu rýchlosti nárastu povlaku v závislosti na tom ako sa menilo prepätie na substráte. Na Obr. 1-24 je znázornený REM pohľad na pričný prierez skrz substrát aj s povlakom. Je tak možné pozorovať štruktúru a hrúbku povlaku. Tiež je vidieť, že so zvyšovaním prepätia sa štruktúra menila z hrubej stĺpovitej na jemnú stĺpovitú. Vo všetkých prípadoch bol čas depozície 22 min. [21]



Obr. 1-23 Depozičné rýchlosti.  $R_c$  - v oblasti zárezu,  $R_T$  - na vrchnej časti substrátu,  $R_F$  - na boku substrátu [21].



Obr. 1-24 SEM pohľad na priečny prierez povlakom v oblasti zárezu (naľavo), vrchnej časti substrátu (v strede) a na boku substrátu (v pravo) [21].

### 1.3.12 Vplyv medzivrstvy na ahéziu povlaku

Adhézia povlaku závisí od toho na aký substrát bol povlak deponovaný. Adhézia môže byť zlepšená uložením vhodných medzivrstvy medzi substrát a povlak [44] alebo iónovým bombardom substrátu (etching). Medzivrstva však nemá vplyv na odolnosť povlaku proti opotrebeniu. Veľké rozdiely medzi mikrotvrdosťou a koeficientom tepelnej rozťažnosti medzi substrátom a povlakom môže viesť k zlej adhézii povlaku k substrátu [19].

Tab. 1 Adhézna sila povlaku TiAlN na substráte z HSS bola zvýšená z 5N na 50N aplikovaním medzivrstvy TiN [19].

Materiál	Mikrotvrdosť (HV <sub>25 g</sub> )	Koeficient tepelnej rozťažnosti (* 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )
TiAlN	3450	7,5
TiN	2950	9,4
WC/Co	1600	5,0
HSS	800	11,7

## 1.4 Testovanie vlastností povlakov

### 1.4.1 Adhézia (prilnavosť)

Priľnavosť povlaku k substrátu. Aby sa využilo dobrej oteruvzdornosti materiálu, je nevyhnutná aj dobrá adhézia. Tá mimo iné závisí na hrúbke povlaku, materiáli substrátu a na príprave nástroja pred deponovaním. Pre testovanie sa používa tzv. scratch test. Rockwellov hrot sa posúva tangenciálne k povlaku a na neho je aplikovaná sila, ktorá sa postupne zväčšuje. Pri testovaní je možné zaznamenávať akustickú emisiu. Dosiachnutie kritickej sily a oddelenie povlaku od substrátu je sprevádzané náhlym nárastom hodnôt v akustickej stope. Výsledok je v N [33]. Pre testovanie adhézie sa používa scratch test, skúšky tvrdosti a metóda nárazovej vysokorýchlostnej vlny [19]. Stopy po scratch teste sú znázornené na Obr. 1-25. Zľava smerom doprava sa zvyšuje prítlačná sila indentoru až do oddelenia substrátu.

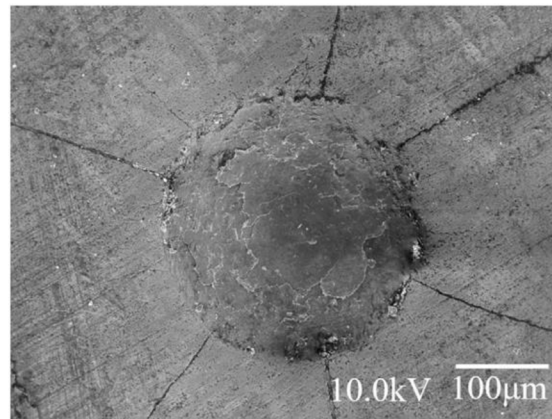


Obr. 1-25 Pohľad na povlak po scratch teste.

### 1.4.2 Tvrdosť

Tvrdosť je definovaná ako schopnosť materiálu voči vnikaniu cudzích telies. Vysoká tvrdosť znamená dobrú odolnosť materiálu proti abrázii. Pri meraní tvrdosti u povlakov je treba dbať na to aby indentor vnikol maximálne do 1/10 hrúbky povlaku, aby výsledok nebol ovplyvnený vlastnosťami substrátu. Keďže hrúbka povlakov je spravidla niekoľko jednotiek mikrometrov, hĺbka vtláčku a tým aj jeho plocha sú malých rozmerov a teda sa ťažko vyhodnocujú na mikroskope. Preto sa pre meranie tvrdosti povlakov používajú špeciálne

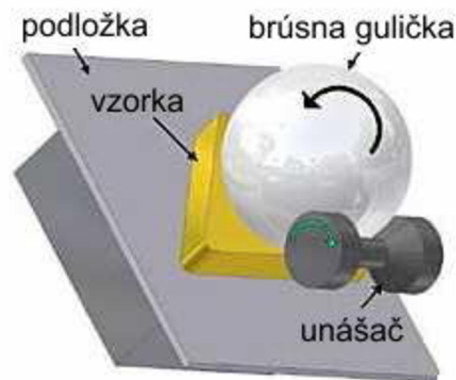
zariadenia – mikrotvrdomery. Súbežne so zaťažovaním hrotu merajú aj hĺbku vtláčku s presnosťou na jednotky nm. Zaťažovacia sila býva rádovo v mN. Výsledok sa udáva v GPa [33,20].



Obr. 1-26 Otláčok po skúške tvrdosti s identorom Rockwell-C do povlaku (AlCrNbSiTiV)N vytvoreného metódou HIPIMS. Na obrázku je vidieť trhliny, ktoré na povlaku pri skúške vznikli [17].

### 1.4.3 Odolnosť proti abrázii

Tento druh opotrebenia sa tiež nazýva oter. Abrázia vzniká vplyvom Tvrdých mikročastíc obrábaného materiálu. Testuje sa použitím kalotestu (Obr. 1-27). Ten bol pôvodne vyvinutý na zistenie hrúbky povlaku. Gulička z kalenej oceli je unášaná hnacím hriadeľom a tlačí na povrch povlaku počas niekoľkých sekúnd. Takto postupne vytvorí jamku [45].



Obr. 1-27 Princíp kalotestu [45].

Pri pohľade kolmo na povrch na jamku vidieť 2 rôzne priemery (Obr. 1-28). Pomocou nich a pomocou priemery guličky vieme určiť hrúbku povlaku podľa vzorca (8) [43].

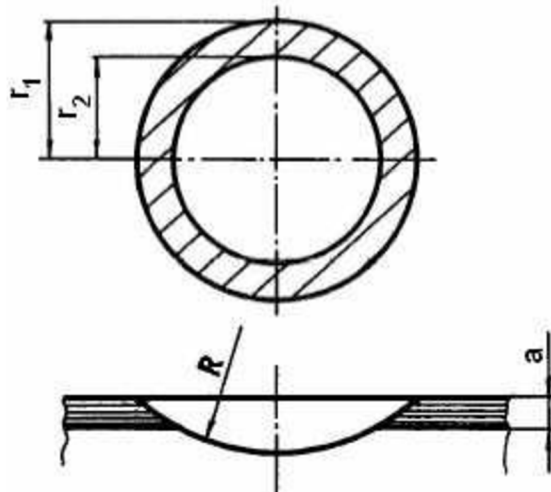
Vzorec pre výpočet hrúbky povlaku [43]

$$t = \sqrt{(R^2 - r_2^2)} - \sqrt{(R^2 - r_1^2)} \quad [\mu\text{m}] \quad (8)$$

Kde:  $R$  – polomer guličky [ $\mu\text{m}$ ]

$r_1$  – vonkajší polomer medzikružia [ $\mu\text{m}$ ]

$r_2$  – vnútorný polomer medzikružia [ $\mu\text{m}$ ]



Obr. 1-28 Schéma výbrusu [43].

## 2 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

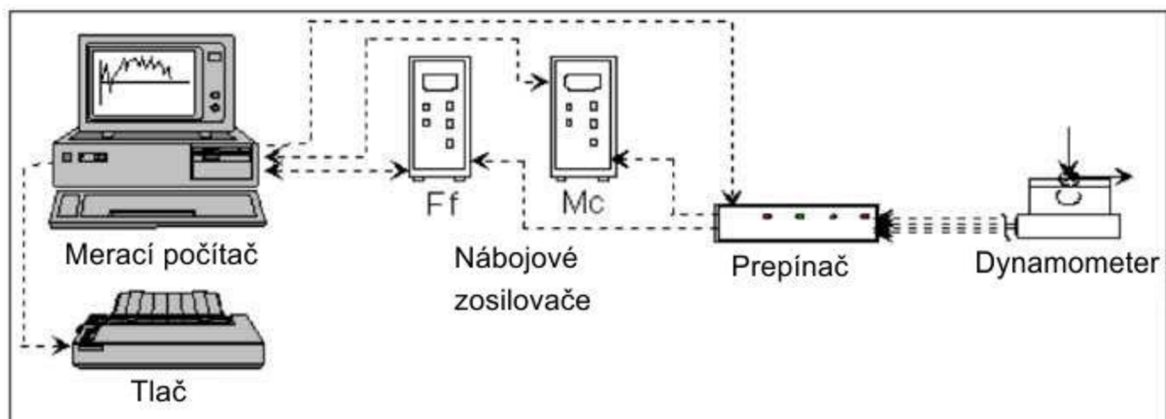
Cieľom experimentálnej časti tejto práce je skúmať kvalitu povlakov z TiN a TiAlN vytvorených metódou HIPIMS, ktorej princíp fungovania bol popísaný v teoretickej časti tejto práce. V experimentálnej časti boli objektom štúdia povlaky rezných nástrojov. Cieľom je skúmať kvalitu, štruktúru a celistvosť povrchu povlakov na rezných nástrojoch. Tak isto je cieľom experimentálnej časti analyzovať mechanické a trvanlivostné vlastnosti týchto nástrojov.

### 2.1 Návrh experimentálnych skúšok

3 rôzne povlaky (TINALOX® GOLD, FerroCon® a FerroCon® s vrstvou TiAlN) boli nanosené metódou HIPIMS na závitorezné matice emuge - M10-6g vyrobené z rýchloreznej oceli (HSS). S nástrojmi sa rezali závity M10 do oceli E335. Počas obrábania sa meral rezný moment (na dynamometri Kistler 9272), aby sa zistilo ktorý povlak má najlepšiu rezivosť a taktiež sa hodnoty porovnajú s hodnotami rezného momentu nástroja bez povlaku. Z vývoja rezného momentu bolo tiež možné určiť opotrebenie nástroja. Výsledky boli štatisticky spracované. Miera opotrebenia nástrojov bola tiež analyzovaná na optickom zariadení pre 3D charakteristiku povrchu Alicona infiniteFocus G5 a na rastrovacom elektrónovom mikroskope Tescan Mira3. Spôsob merania silového zaťaženia pri obrábaní je popísaný v nasledujúcej kapitole.

### 2.2 Meranie silového zaťaženia pri rezaní závitov

Pre meranie silového zaťaženia bol použitý dynamometer Kistler 9272 (Obr. 2-4 - 4). Ten zaznamenával krútiaci (rezný) moment a posuvovú silu. Dynamometer prešiel pred meraniami kalibráciou.



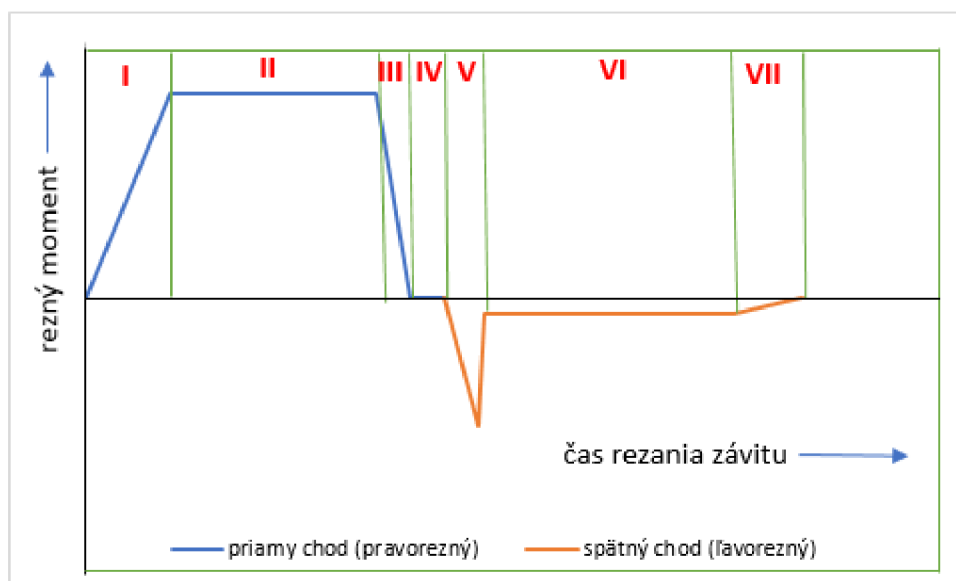
Obr. 2-1 Meracia aparatúra.



Obr. 2-2 Merací počítač a nábojové zosilňovače.

Pre rezanie každého závitú sa vykonávalo nové meranie pre rezný moment a posuvovú silu. Jedno meranie trvalo 100s a meracia aparatúra počas toho zaznamenala 4000 hodnôt pre moment a 4000 hodnôt pre silu. Údaje boli potom vyexportované vo forme textových súborov, ktoré boli následne spracované v programe microsoft excel 2016, kde boli aj vykreslené do grafov.

Teoretický časový priebeh rezného momentu pri rezaní vonkajšieho závitú závitoreznou maticou je znázornený na Obr. 2-3.



Obr. 2-3 Teoretický časový priebeh rezného momentu.

Jednotlivé intervaly v grafe na Obr. 2-3 :

I - zarezávanie závitoreznej matice do obrobku až do zarezania všetkých zubov,

- II - rezanie závitu všetkými zubami. Teoreticky má konštantný priebeh,
- III - zabrzdzenie stroja,
- IV - stroj stojí (pri okamžitom prepnutí na spätný chod táto oblasť nie je viditeľná),
- V - zapnutie reverzu, odtrhnutie triesky a prekonanie statického trenia medzi zubami nástroja a závitom,
- VI - šmykové trenie medzi nástrojom a závitom obrobku,
- VII - obrobok vychádza z nástroja, znižuje sa plocha kontaktu medzi nástrojom a obrobkom.

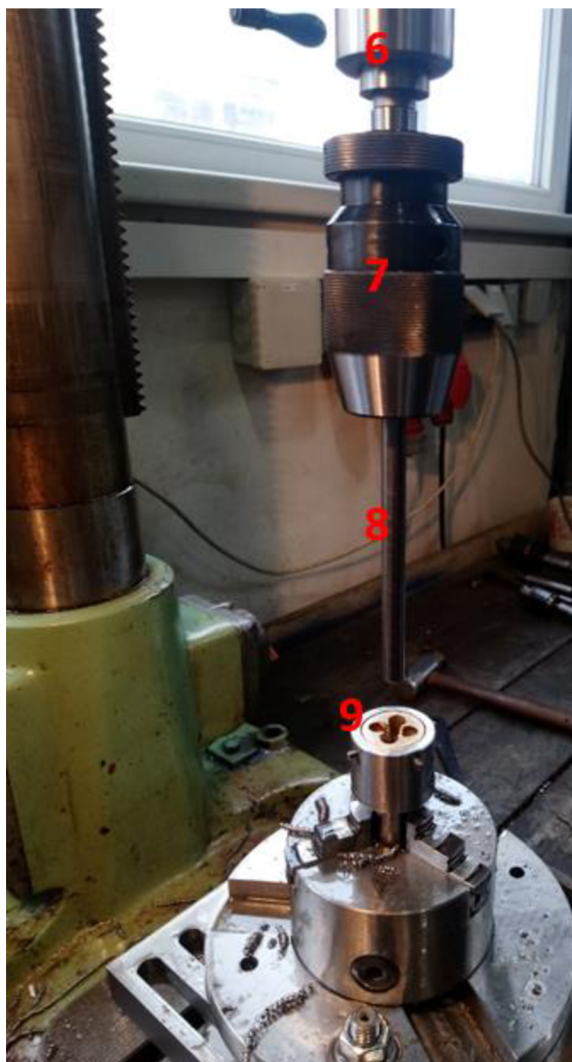
Držiak s nástrojom bol upnutý do skľučovadla ležiaceho na vodorovnej ploche ktorá bola namontovaná na dynamometri Kistler 9272. Dynamometer bol staticky ukotvený na stôl vrtáčky.



*Obr. 2-4 Upnutie dynamometra. 1 – držiak na matice, 2- trojčelustové skľučovadlo, 3- upínacia doska, 4 – dynamometer, 5 – stôl vrtáčky.*

Obrobok bol upnutý do vretena vrtáčky. Tak aby bola zaistená koaxialita so stredom nástroja. Konfigurácia meracej zostavy sa nemenila a ostala rovnaká pre všetky merania.





Obr. 2-5 Upnutie obrobku. 6 – vreteno vrtáčky, 7 – vrtacie skľučovadlo, 8 – obrobok, 9 – nástroj upnutý v držiaku.

## 2.3 Skúmané povlaky

Všetky skúmané typy povlakov boli vytvorené metódou HIPIMS vo firme CemeCon s.r.o., Ivančice.

### 2.3.1 FerroCon®

Povlak s dobrou adhéziou a celistvosťou povrchu. Vyznačuje sa tiež vysokou tvrdosťou [46].

Tab. 2 Vlastnosti povlaku FerroCon® [46].

Materiál povlaku	TiAlN
Farba	antracitová
Maximálna pracovná teplota [°C]	1100

### 2.3.2 TINALOX® GOLD

Dlho rokov používaný povlak. Hodí sa pre obrábanie s malými reznými rýchlosťami a na rezanie závitov [47].

Tab. 3 Vlastnosti povlaku TINALOX® GOLD [47].

Materiál povlaku	TiN
Farba	zlatá
Maximálna pracovná teplota [°C]	600

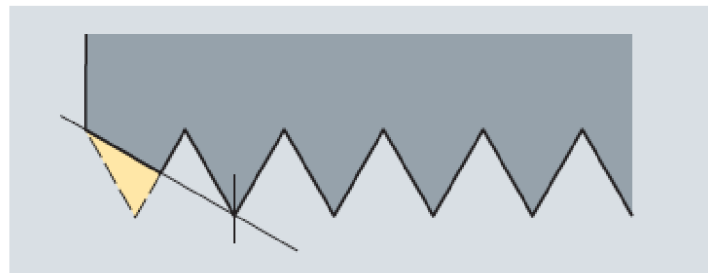
### 2.4 Testované vzorky

#### 2.4.1 Rezný nástroj

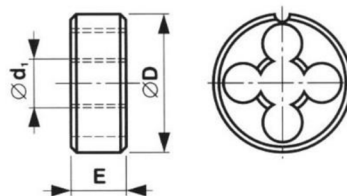
Testované nástroje sú závitorezné matice emuge M10 - 6g (D0101000.0100) z rýchloreznej oceli (HSS). Matice majú svoju vonkajšiu stranu kruhového tvaru a na jej boku sú vytvorené 4 otvory, pomocou ktorých sa nástroje upínajú do držiaka (Obr. 2-6). Vo vnútornej strane sa nachádzajú rezné hrany ktoré do obrobeného materiálu vytvárajú metrický závit  $\text{Ø}10\text{mm}$  s nábehom 1,5 závitů (Obr. 2-7, klasickým hrubým stúpaním 1,5mm s toleranciou 6g. Rozmery nástroja sú znázornené na Obr. 2-8.



Obr. 2-6 Závitorezná matica [48].



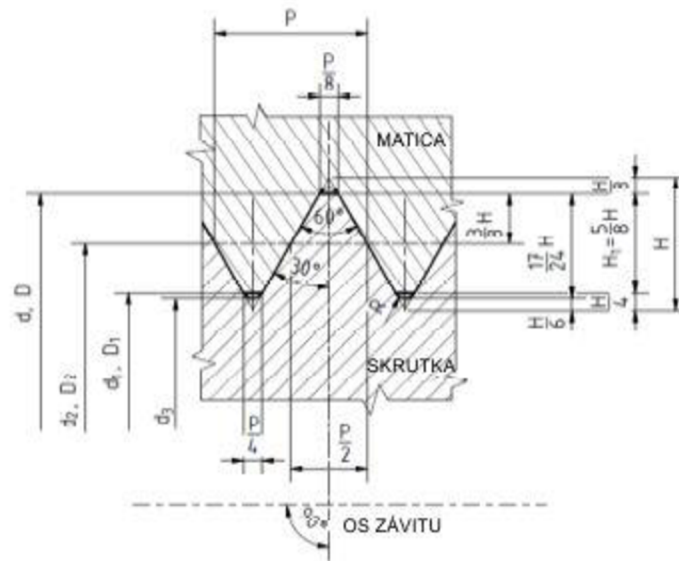
Obr. 2-7 Nábeh závitů [48].



Obr. 2-8 Rozmery závitoreznej matice:  $\text{Ø}d_1 = 10\text{mm}$ ,  $\text{Ø}D = 30\text{mm}$ ,  $E = 11\text{mm}$  [49].

#### 2.4.1.1 Metrický závit

Patrí medzi najpoužívanejšie typy závitů. Profil metrického závitů je znázornený na Obr. 2-9.



Obr. 2-9 Profil metrického závitu [50].

Kde:

$P$  – rozstup závitu [mm],

$H$  – výška základného trojuholníka závitu [mm],

$R$  – polomer zaoblenia závitového dna [mm],

$d$  – priemer závitu [mm],

$d_1$  – priemer vonkajšieho závitu [mm],

$D_1$  – priemer vnútorného závitu [mm],

$d_2$  – stredný priemer vonkajšieho závitu [mm],

$D_2$  – stredný priemer vnútorného závitu [mm].

#### 2.4.2 Testované vzorky

Jednotlivé vzorky (závitorezné matice) boli označené ako A,B,C a D podľa toho aký mali na sebe povlak. Každá z matic bola pred tým než ňou bolo obrábané pozorovaná na rastrovom elektrónovom mikroskope (REM). Fotky z elektrónového mikroskopu obsahujú 2 módy. Vľavo mód sekundárnych elektrónov a vpravo mód odrazených elektrónov. Pozorovali sa zuby nástroja, ktoré ležia vo vnútornej časti závitoreznej matice teda v časti ktorá reže materiál obrobku a zároveň predstavuje ťažko prístupné miesto pre väčšinu povlakovacích metód.

Tab. 4 Prehľad testovaných vzoriek.

Vzorka A	bez povlaku
Vzorka B	povlak TINALOX <sup>®</sup> GOLD
Vzorka C	Povlak FerroCon <sup>®</sup>
Vzorka D	Povlak FerroCon <sup>®</sup> + TiAlN



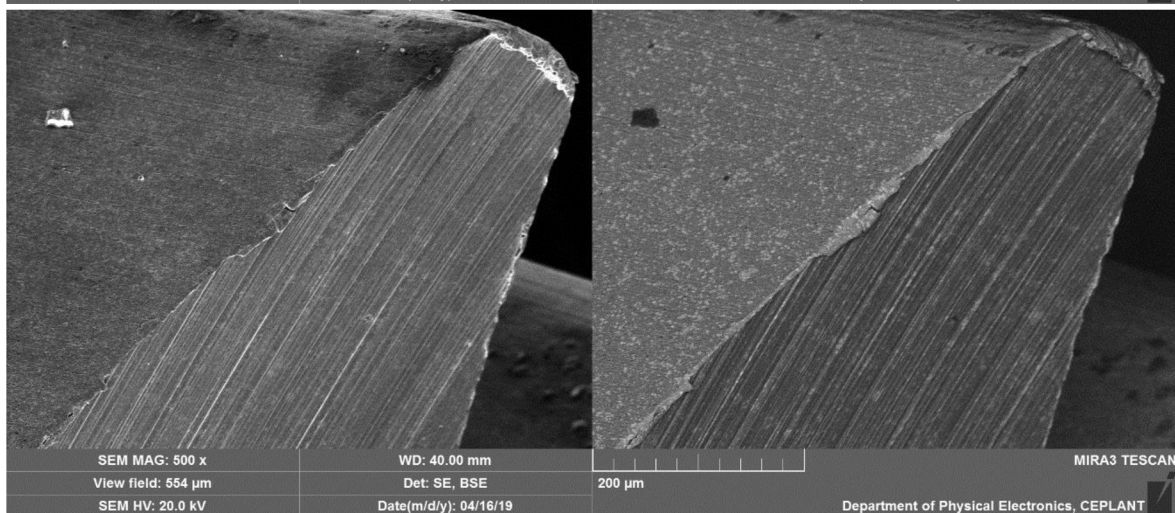
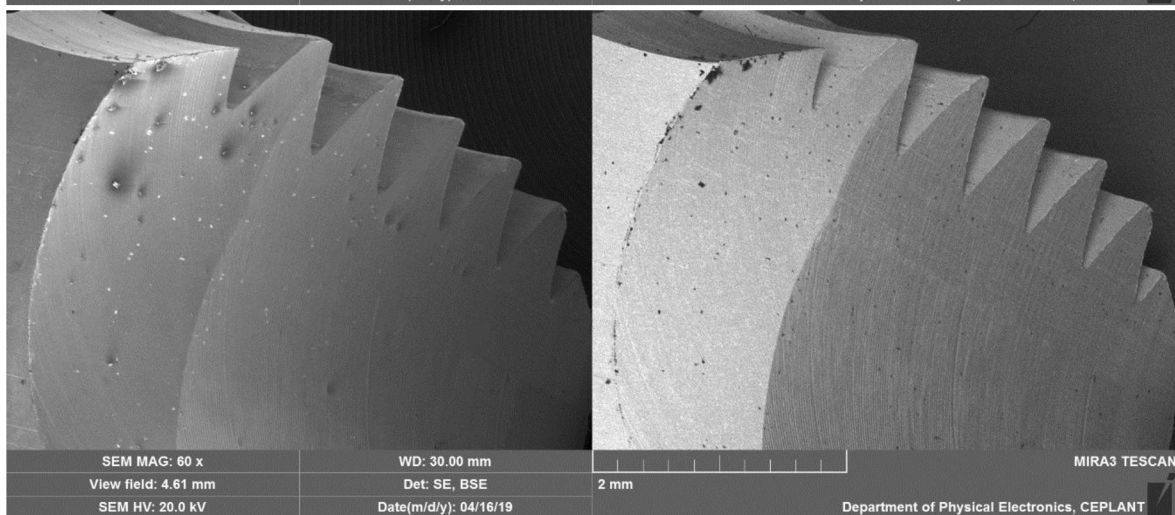
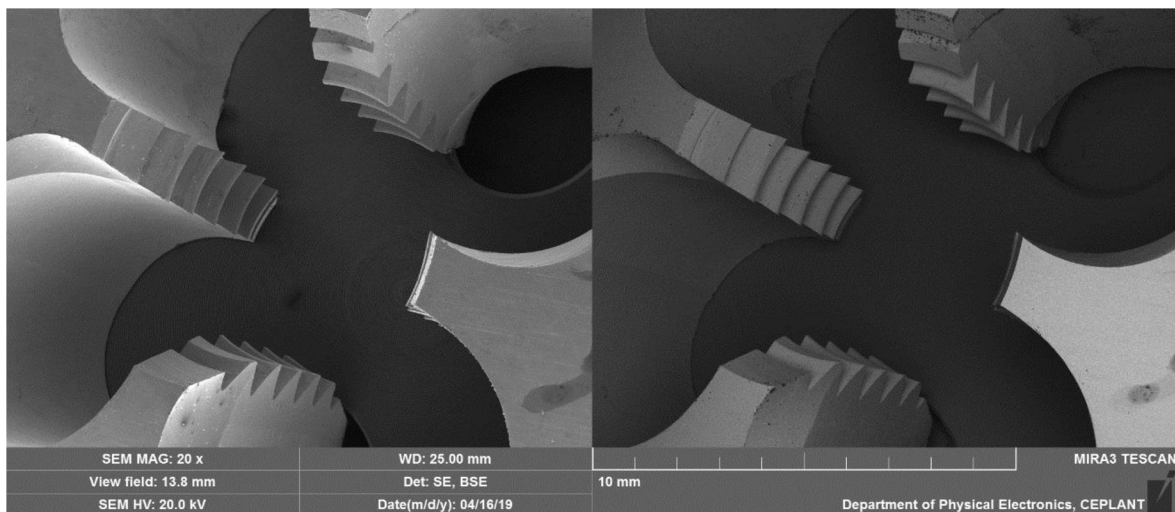
Obr. 2-10 Testované vzorky. Zlava: matice B, matice D, matice C, matice A.

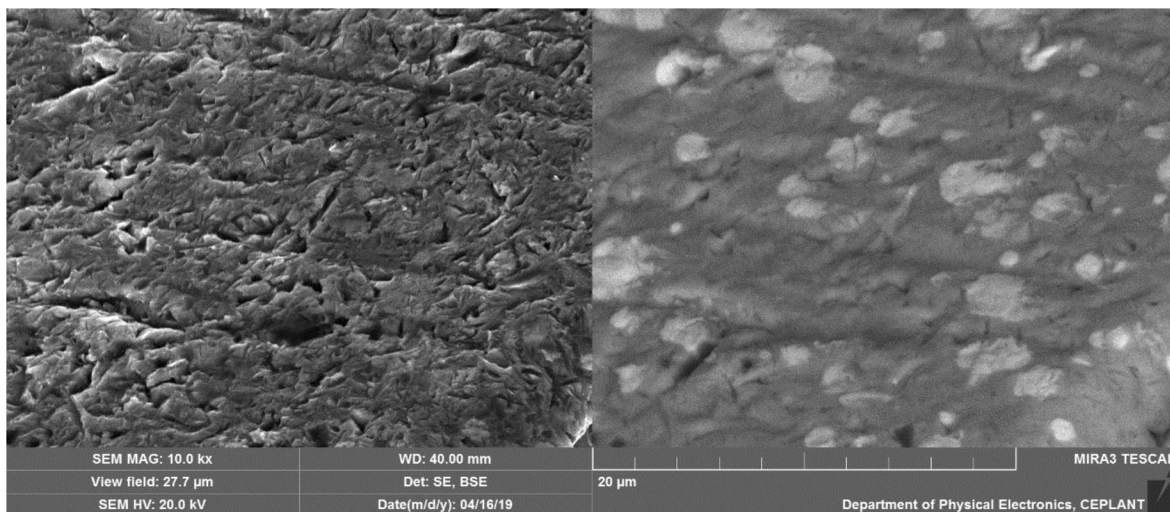
### 2.5.2.1 Matice A

Matice bez povlaku.

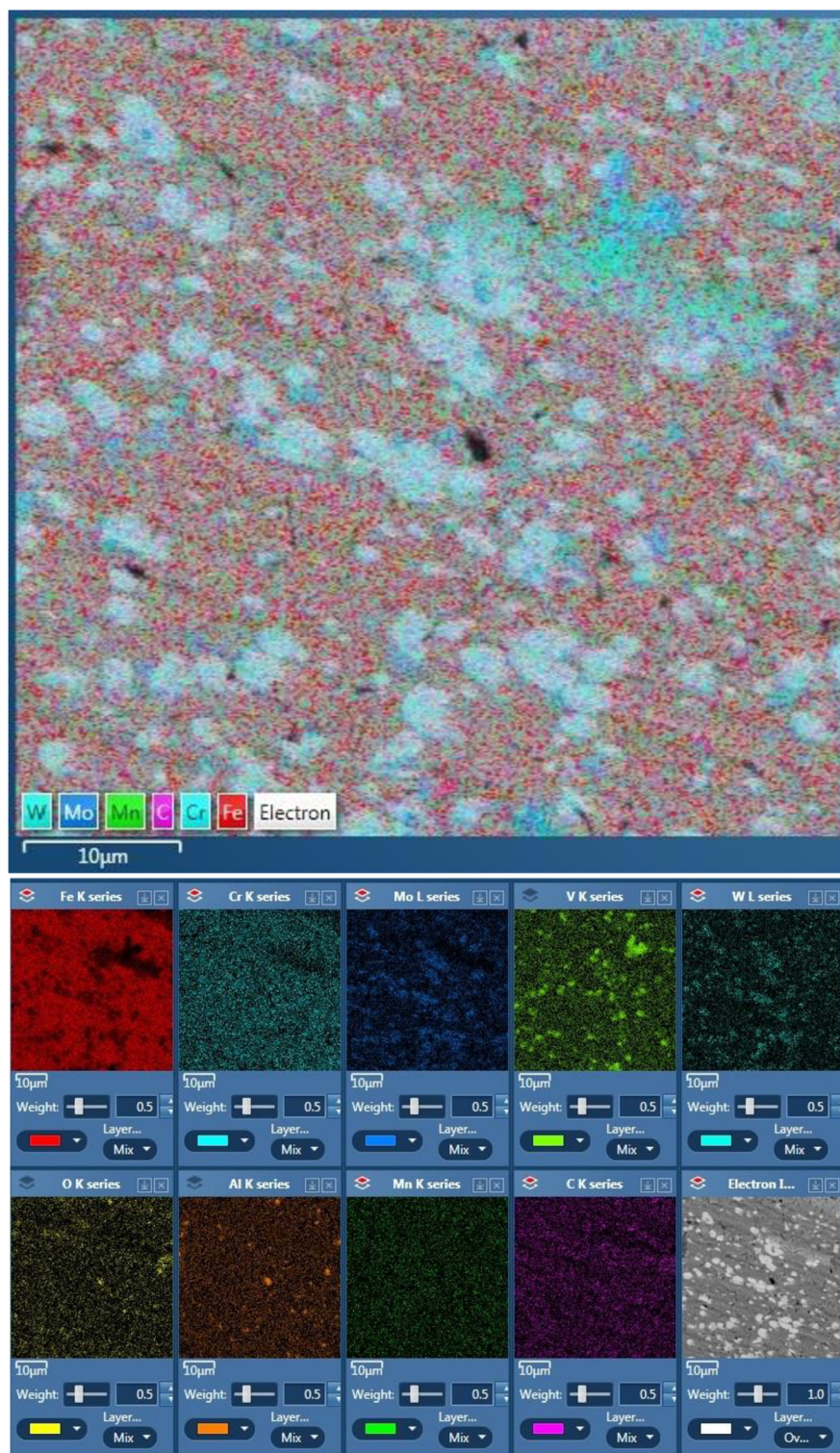


Obr. 2-11 Matice A.

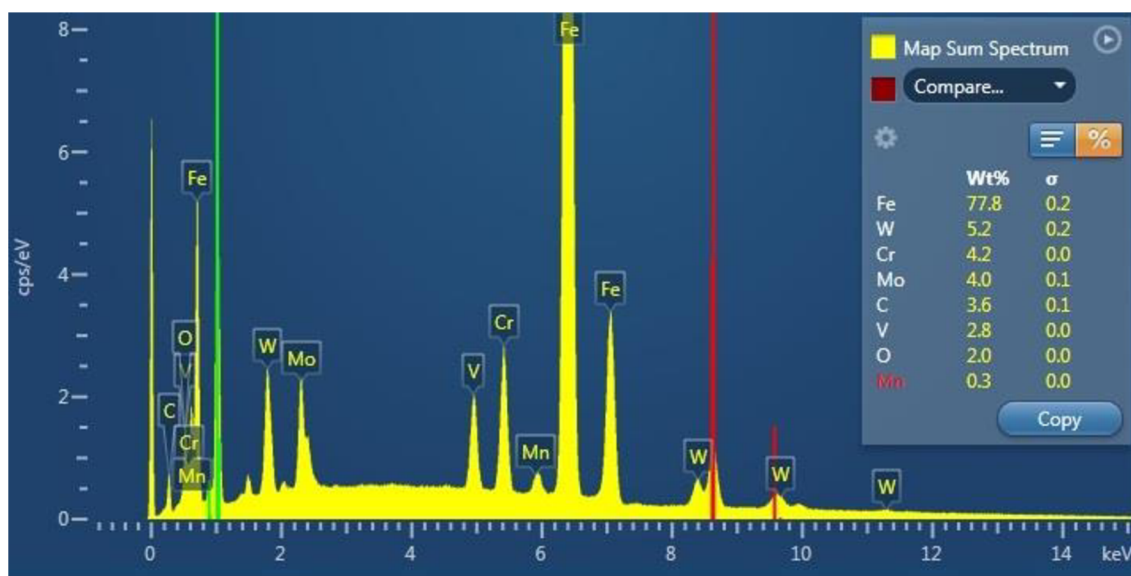




*Obr. 2-12 SEM snímky povrchu matice A s přiblížením a) 20x, b) 60x, c) 500x a d) 10000x.*



Obr. 2-13 a,b) zastúpenie jednotlivých prvkov na povrchu matice A.



Obr. 2-14 EDS – chemické zloženie povlaku.

Na Obr. 2-14 je vidieť chemické zloženie materiálu nástroja (HSS). Obsahy jednotlivých prvkov sú v hmotnostných percentách.

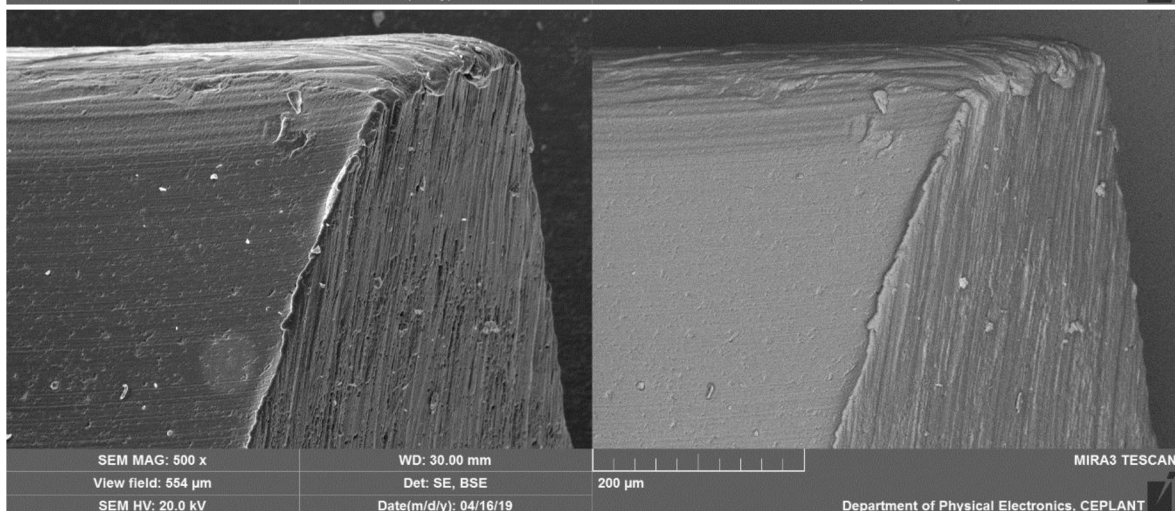
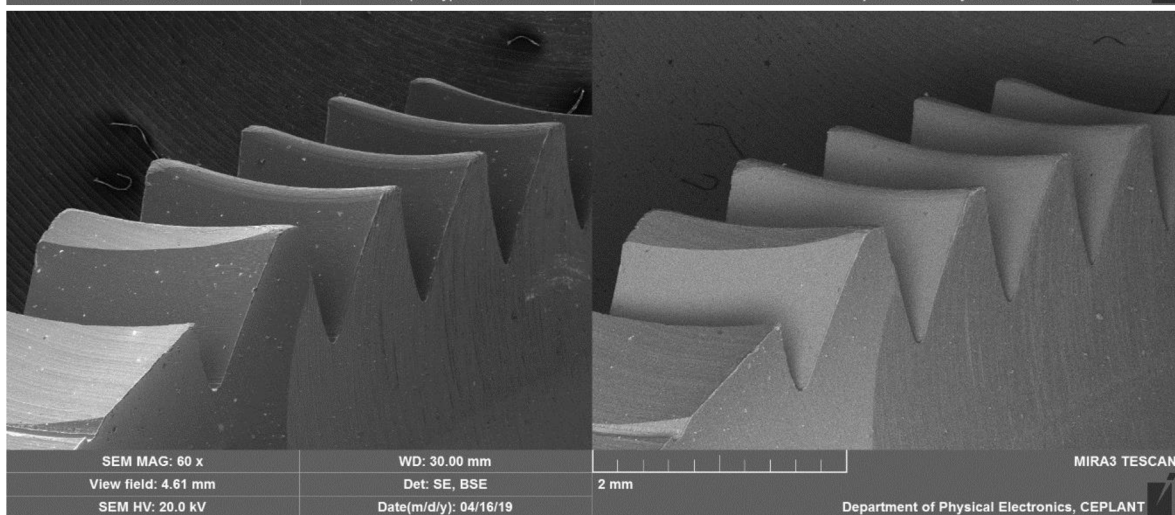
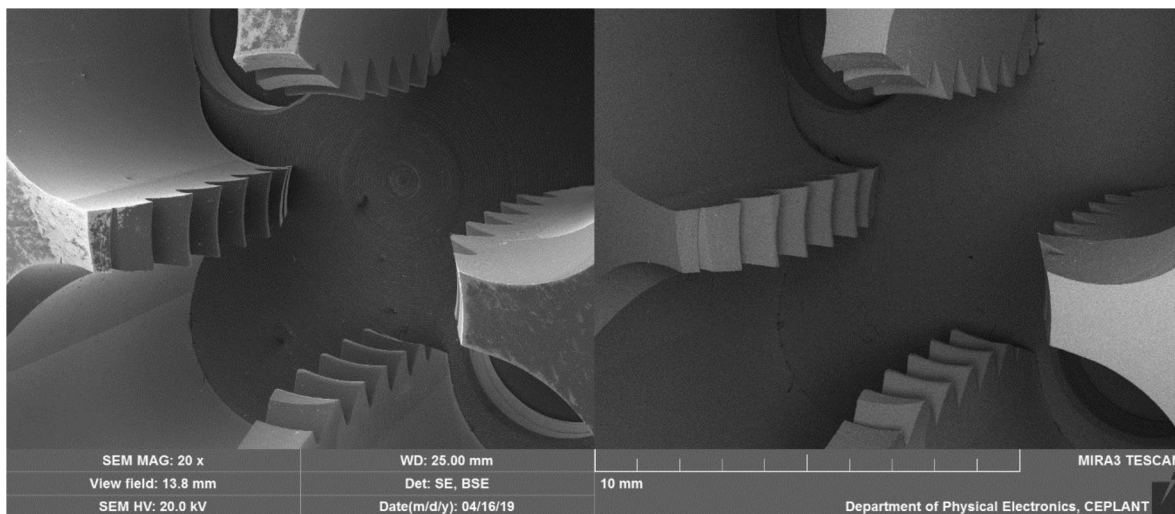
#### 2.5.2.2 Matica B

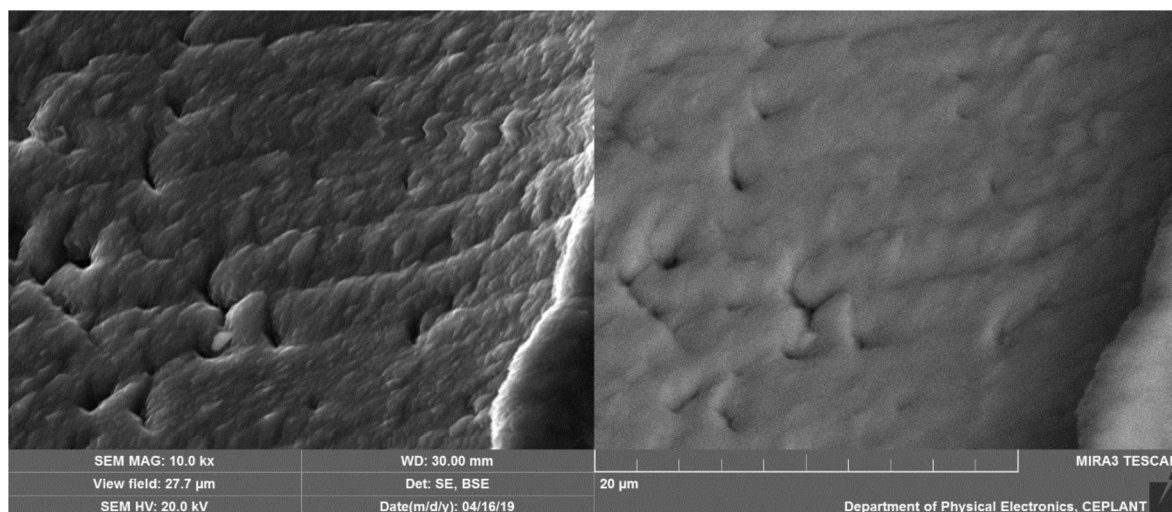
Matica s povlakom TINALOX® GOLD.



Obr. 2-15 Matica B.





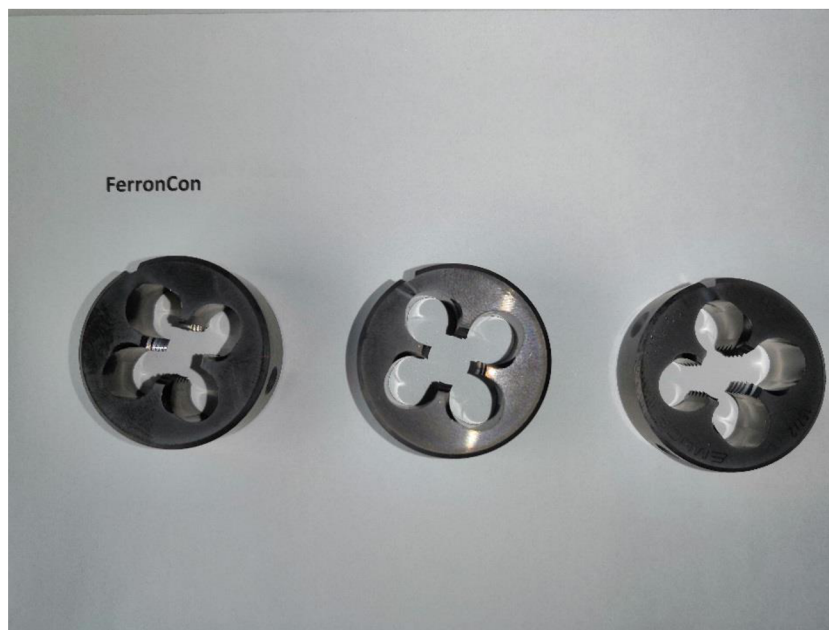


Obr. 2-16 SEM snímky povrchu matice B s priblížením a) 20x, b) 60x, c) 500x a d) 10000x.

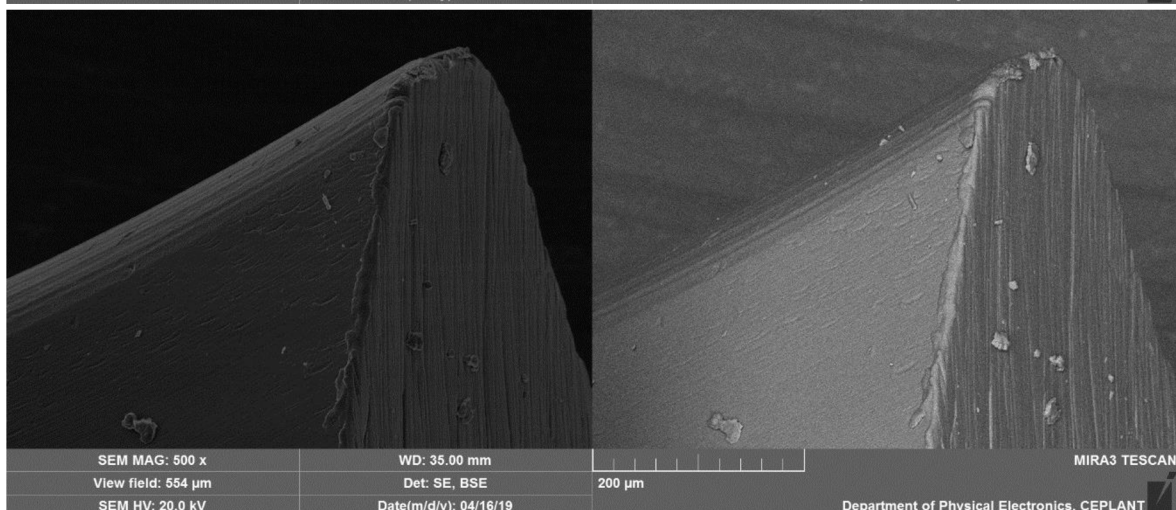
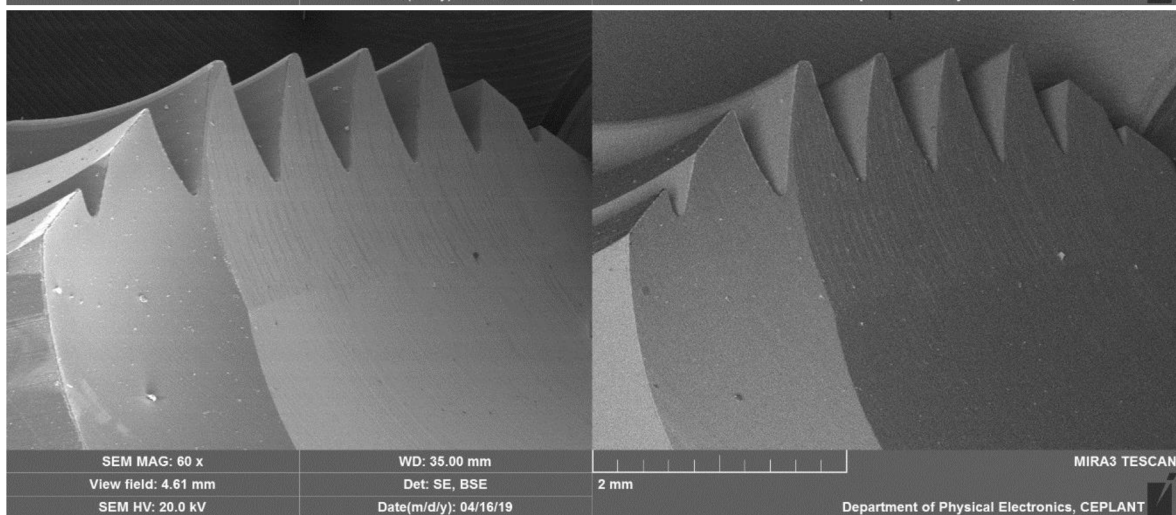
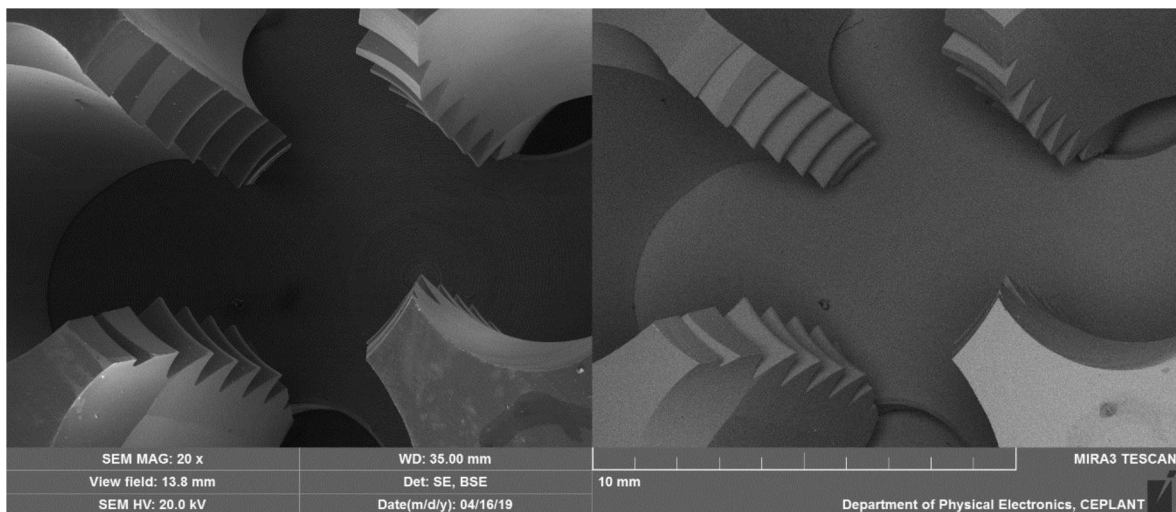
Pri zväčšení 10000x je možné pozorovať miernu pórovitosť povlaku.

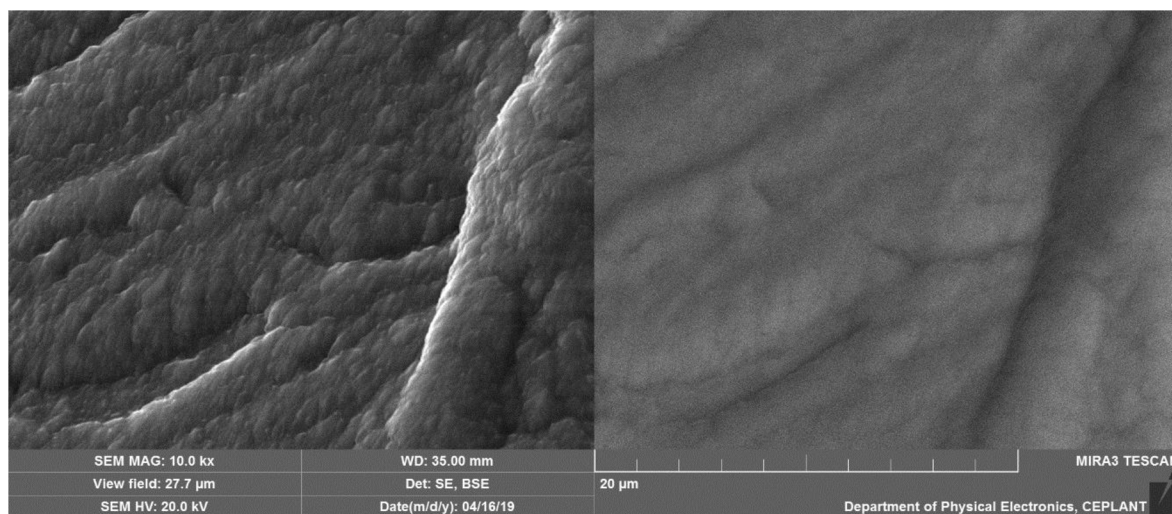
### 2.5.2.3 Matica C

Matica s povlakom FerroCon<sup>®</sup>.



Obr. 2-17 Matica C.





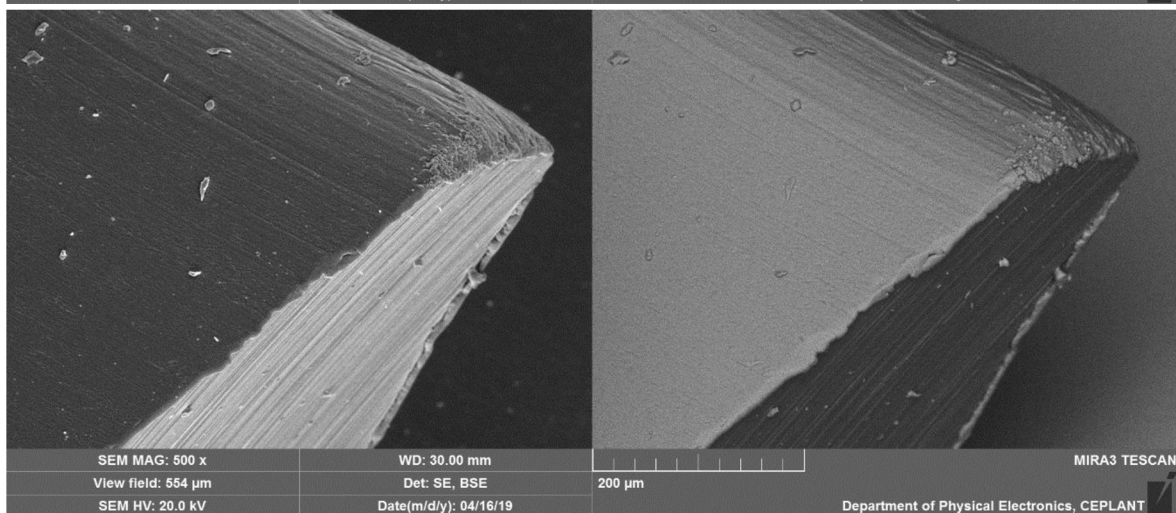
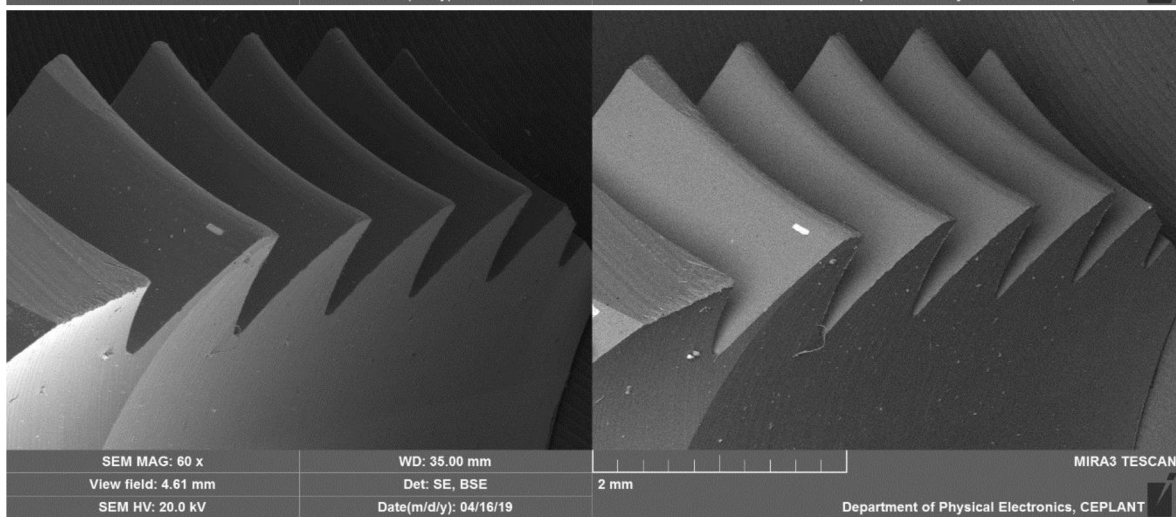
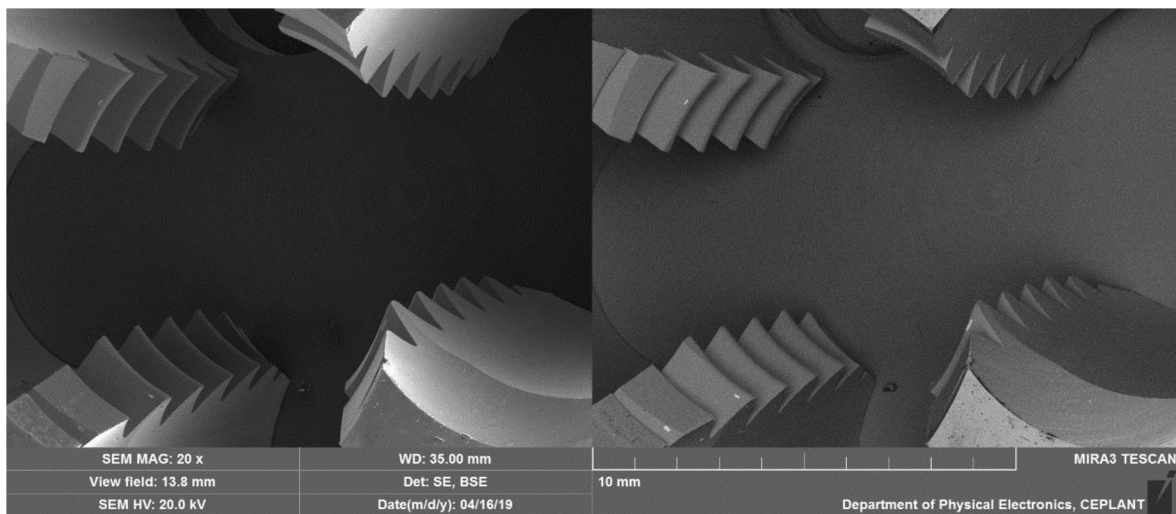
Obr. 2-18 SEM snímky povrchu matice C s približením a) 20x, b) 60x, c) 500x a d) 10000x.

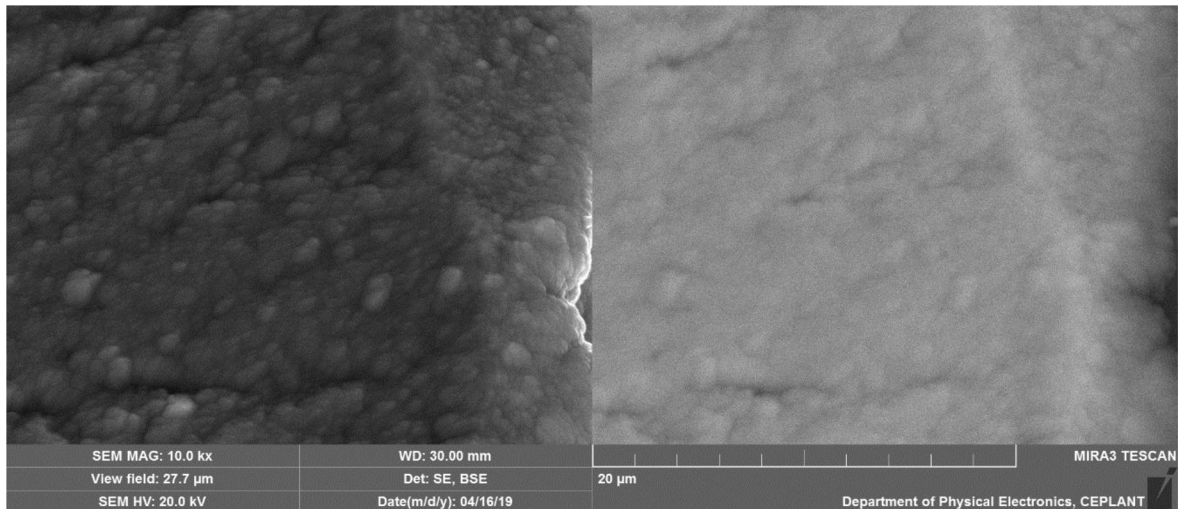
#### 2.5.2.4 Matica D

Matica s povlakom FerroCon<sup>®</sup> + TiAlN.



Obr. 2-19 Matica D.





Obr. 2-20 SEM snímky povrchu matice D s približením a) 20x, b) 60x, c) 500x a d) 10000x.

## 2.5 Obrábaný materiál

Všetky obrobky boli z ocele E335 (značenie ČSN: 11600). Polotovary boli vo forme tyčí ťahaných za studena. Materiál bol napílený na tyčky s dĺžkou 150mm. Následne boli na obrobku zrazené hrany na  $45^\circ$   $1 \times 1$ mm aby sa zabezpečilo hladké zarezanie rezných hrán závitoreznej matice. Z boku bola do každého obrobku kolmo na jeho osu vyvrtaná nepriechodná diera, tak aby sa pomocou kolíku mohol zo skľučovadla prenášať krútiaci moment a predišlo sa tak možnému prešmykovaniu, čo by malo za následok nepresnosti pri meraní rezného momentu.

### 2.5.1 E335

Oceľ pre strojné súčasti s medzou elasticity 335 MPa a medzou pevnosti 570 MPa.

Tab. 5 Chemické zloženie ocele E335.

Prvok	C (uhlík)	P (fosfor)	S (síra)	N (dusík)
Max. obsah [%]	0,5	0,045	0,045	0,012

## 2.6 Rezné podmienky

Pre kategóriu do ktorej zapadá materiál E335 výrobca doporučuje použiť reznú rýchlosť v rozmedzí 1 – 5 m/min. Pri voľbe reznej rýchlosti sme obmedzení otáčkami vŕtačky. Po vyskúšaní všetkých možných rezných rýchlostí s obdobným nástrojom z HSS v rozmedzí udávaným výrobcom sa rozhodlo pre všetky merania použiť 112ot./min čo zodpovedá reznej rýchlosti 3,52m/min.

Tab. 6 – rezné parametre pri experimentálnych skúškach.

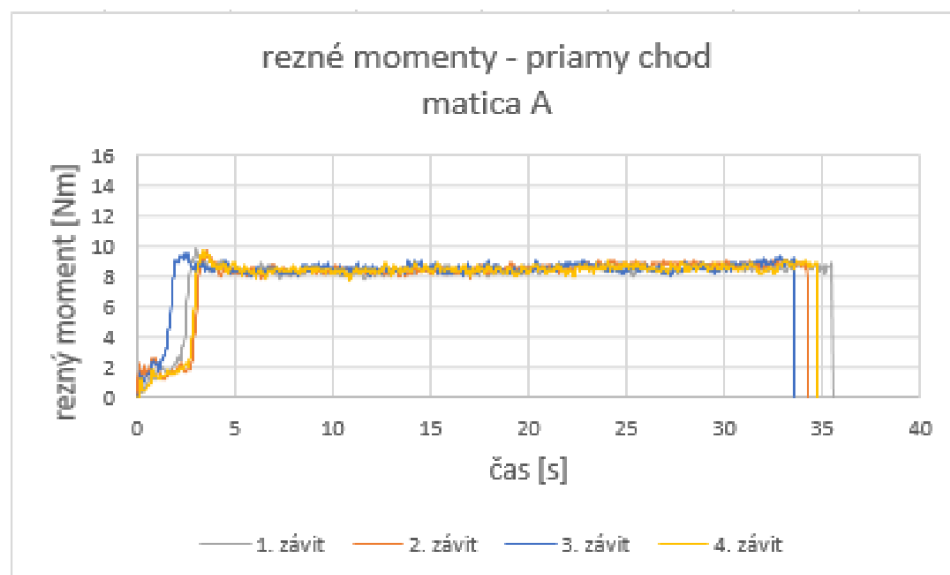
$\varnothing$ – priemer obrobku [mm]	10
N – otáčky obrobku [ot./min]	112
$v_c$ – rezná rýchlosť [m/min]	3,52

Celkovo sa každým nástrojom rezali 4 závity. Pri každom závite bola plánovaná dĺžka 100mm. Nakoľko boli experimenty vykonávané na manuálnom stroji, nepodarilo sa pri každom závite presne dodržať stanovenú dĺžku. Pri niektorých meraniach bol obsluhujúci personál nútený rezať menšiu dĺžku závitu najmä z dôvodu kumulácie triesok.

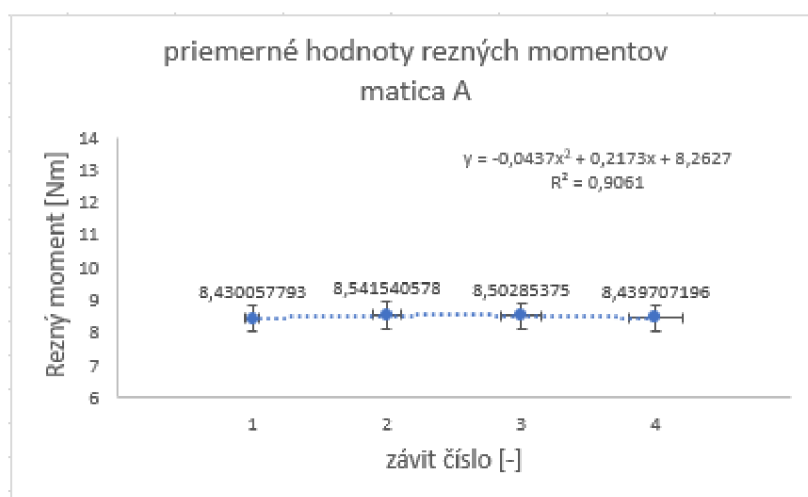
Dôležitým faktorom pri procese rezania bolo mazanie. Výrobca nástrojov doporučuje pri rezaní závitov používať emulziu alebo olej. Pri experimente bol vo všetkých prípadoch použitý olej pre rezanie závitov FUCHS ECOCUT 532 LE (kinematická viskozita pri 40 °C – 30mm<sup>2</sup>/s, hustota pri 15 °C – 0,88 [51]). Olej bol nanášaný štetcom na obrobok v rovnakých časových intervaloch a množstvách vo všetkých prípadoch.

### 3 VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV

Pre zistenie rezivosti jednotlivých nástrojov je vhodnejšie z údajov odseparovať časový úsek kde bol nástroj v pravorezných otáčkach – teda v priamom chode nakoľko vtedy prebiehal proces rezania. Pri určovaní priemerných hodnôt rezného momentu pri priamom chode nástroja boli použité úseky (z intervalu II na Obr. 2-3) kde sa priebeh javil konštantný.



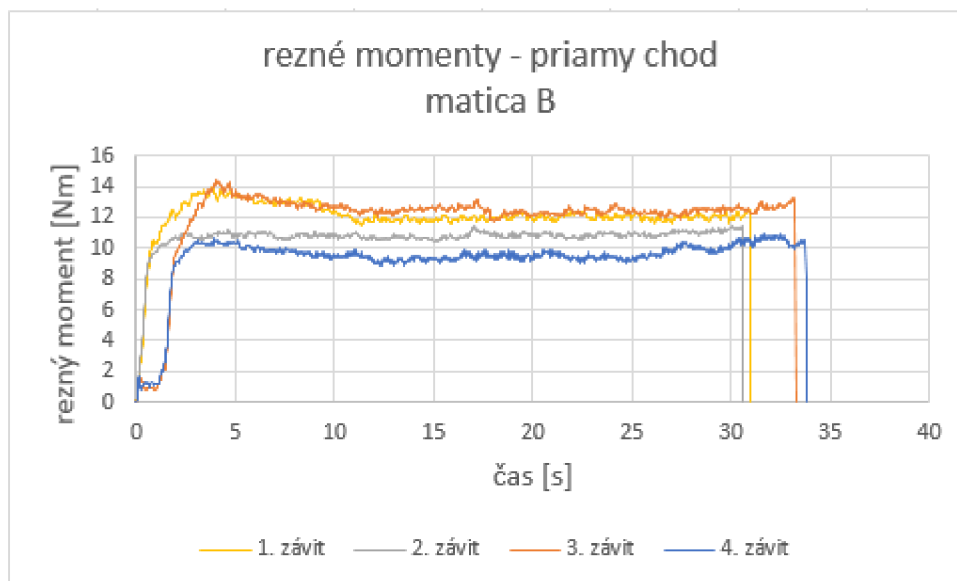
Obr. 3-1 Časový priebeh rezných momentov matice A.



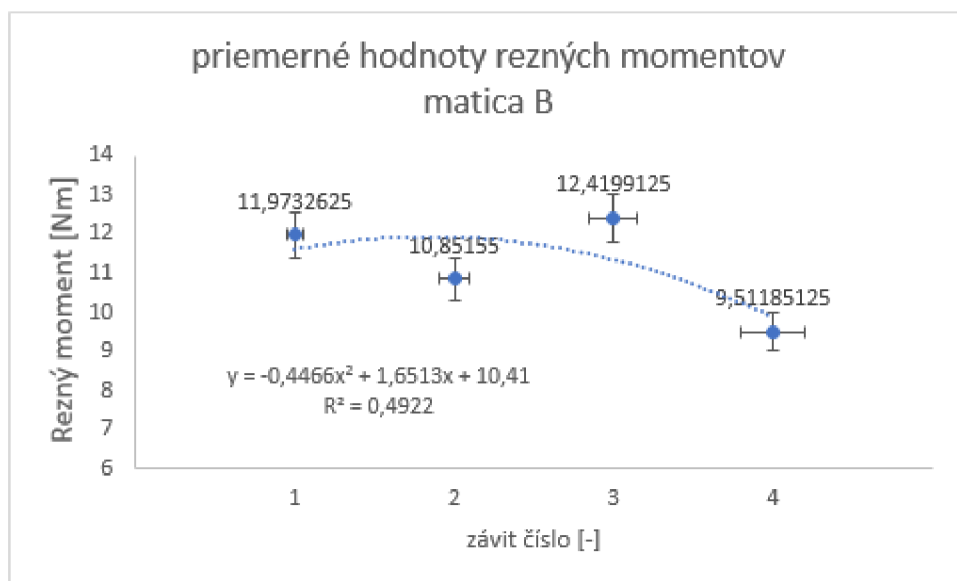
Obr. 3-2 Priemerné hodnoty rezných momentov matice A a ich štatistické chyby.

Prvá z testovaných matic bola matica A – teda matica bez povlaku. Pri všetkých pokusoch s týmto nástrojom rezné momenty po zarezaní všetkých zubov dosiahli hodnoty približne 9,7Nm, následne v priebehu asi 2 sekúnd klesli a udržiavali sa na konštantnej hodnote bez výraznejších výkyvov okolo 8,45 Nm až do vypnutia priameho chodu stroja. Priemerné hodnoty boli vyrátané na časových úsekoch 10 až 30 sekúnd.



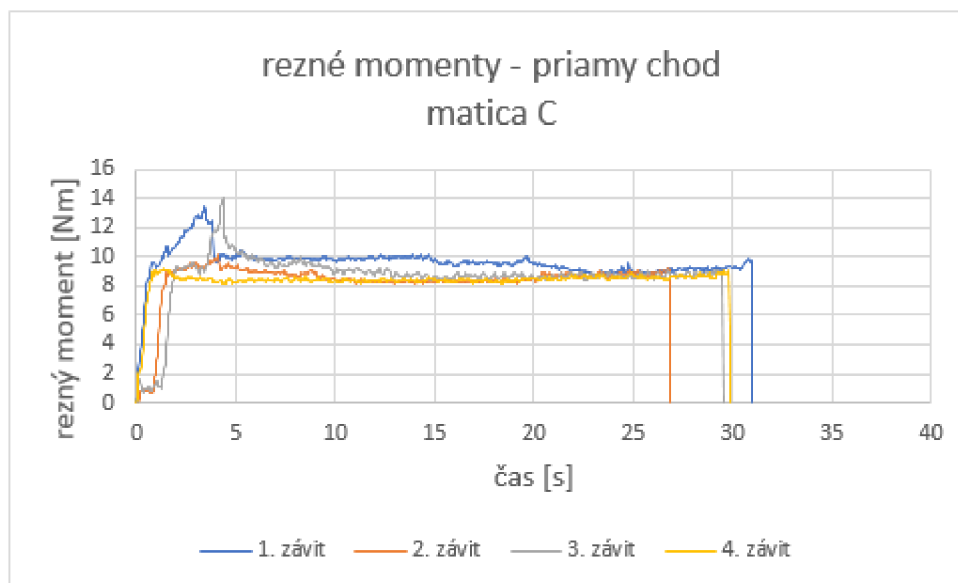


Obr. 3-3 Časový priebeh rezných momentov matice B.

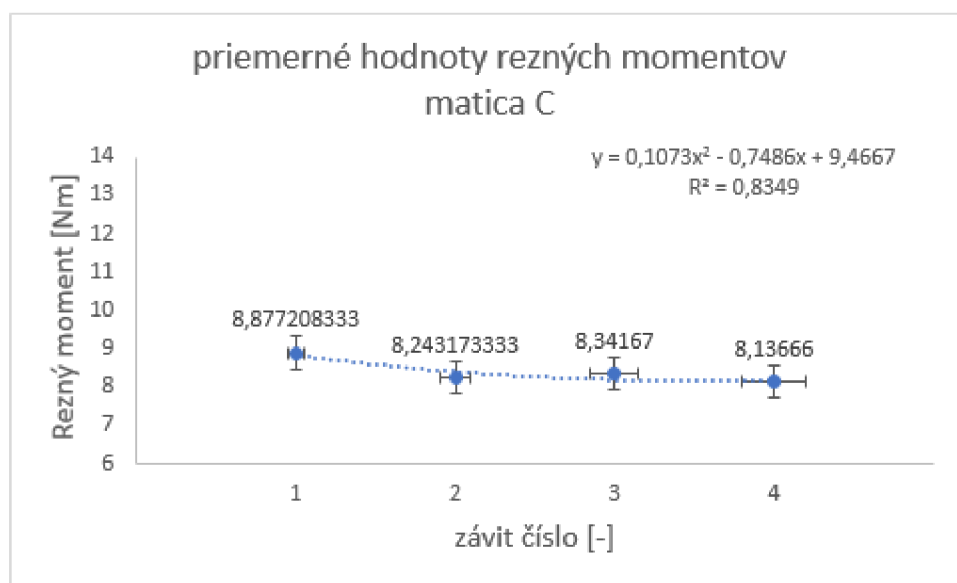


Obr. 3-4 Priemerné hodnoty rezných momentov matice B a ich štatistické chyby.

Pri rezaní maticou B sa priemerné hodnoty v jednotlivých pokusoch od seba odlišovali viac než tomu bol u matice A od 9,51 Nm pre 4. závit po takmer 12,42 Nm pre 3. závit. Vo všetkých prípadoch boli priemerné hodnoty vyššie ako u matice A. Maximálne hodnoty sa v 2 prípadoch vyšplhali až na 14,45 Nm. Priebeh momentu pri záвите 4 a záвите 2 má podobný charakter – po zarezaní všetkých zubov nástroja ostáva konštantný. Pri záвите 1 a 3 hodnoty narastú až do zarezania všetkých zubov, potom mierne klesajú a od 10. sekundy majú konštantný charakter až do vypnutia priameho chodu. Priemery boli vyrátané na časových úsekoch 10 až 25 sekúnd.

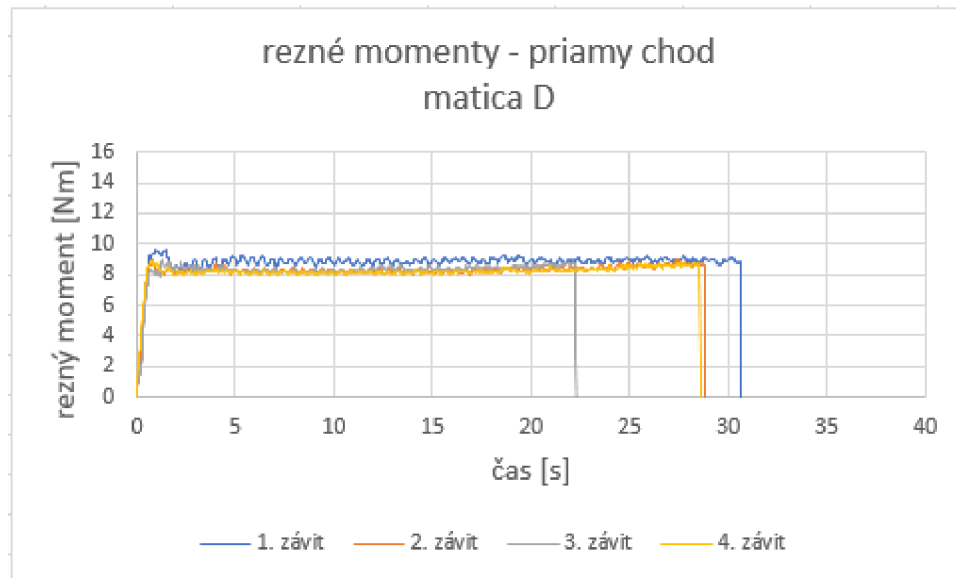


Obr. 3-5 Časový priebeh rezných momentov matice C.

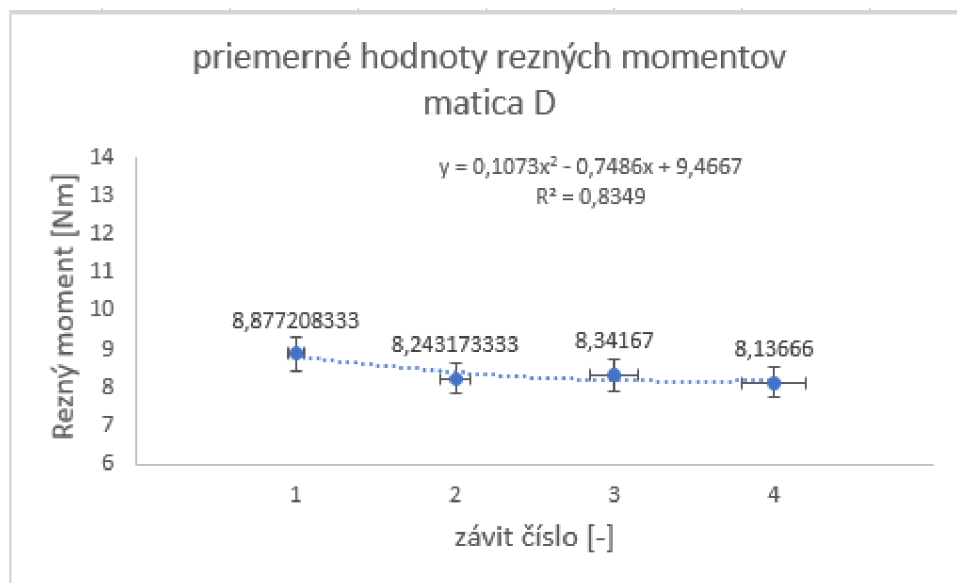


Obr. 3-6 Priemerné hodnoty rezných momentov matice C a ich štatistické chyby.

Časový priebeh momentov matice C mal pre závit 2 a 4 podobný charakter. Hodnoty momentu majú podobné a až na malé výkyvy takmer konštanté hodnoty okolo 8,20Nm. Pri závite 1 a 3 sa hodnoty vyšplhali až na 13,43Nm a 14,06Nm. Potom hodnoty klesli a ustálili sa. Rezanie závit 2 sa muselo ukončiť skôr z dôvodu kumulácie a obmotania sa triesok. S týmto problémom sme sa potýkali aj pri rezaní závit 1. Celkovo sa pri rezaní tvorili dlhé triesky, ktoré sa od seba neoddeľovali a mali sa tendenciu o seba zachytiť. Priemery pre jednotlivé závit boli vyrátané na časových úsekoch medzi 10. a 20. sekundou.



Obr. 3-7 Časový priebeh rezných momentov matice D.



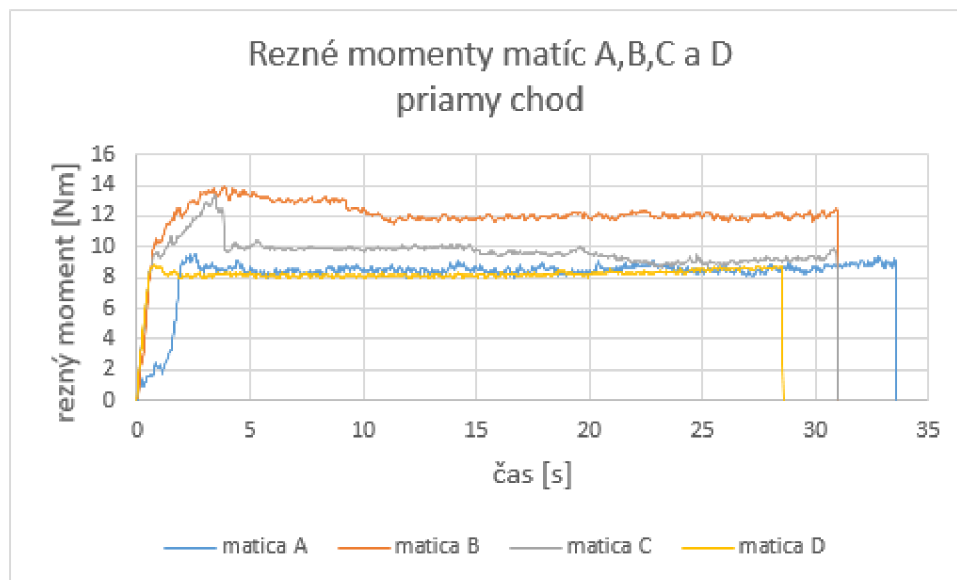
Obr. 3-8 Priemerné hodnoty rezných momentov matice D a ich štatistické chyby.

Priebehy momentov v priamom chode matice D majú všetky veľmi podobný charakter ako je to znázornené na Obr. 2-3. po zarezaní všetkých zubov nástroja do obrobku mali hodnoty konštantný charakter až do vypnutia priameho chodu nástroja. Pri 1. závite boli hodnoty mierne vyššie (priemer 8,88Nm) ako pri závitoch ostatných (cca 8,20Nm). Pri rezaní závitu číslo 3 sa triesky obmotali okolo obrobku a v reze nebolo možné pokračovať. Priemery rezných momentov boli vyrátané z dát z úsekov medzi 5. a 20. sekundou.

Ani pri jednej z matic nemá evolúcia priemerov rezných momentov žiadny logický charakter a vzorka 4 závitů čiže približne 400mm dĺžky závitů je malá na určenie opotrebenia. To mohlo mať v tomto štádiu mikroskopický charakter a nebolo ho teda možné prostredníctvom nameraných hodnôt pozorovať. Predpokladá sa, že rezný moment bude v priebehu zvyšujúceho sa opotrebenia nástroja stúpať, čo sa však prejaví pri vyššom počte meraní.

Dynamometer prešiel pred meraniami kalibráciou čiže Teoreticky by mal ukazovať nulové hodnoty pre rezný moment aj silu pokiaľ nástroj nie je v reze. Z nameraných hodnôt, ktoré následne boli aj vykreslené do grafu je však možné pozorovať mierne kolísajúce nenulové hodnoty pokiaľ nástroj nebol v činnosti. Môže to byť spôsobené vibráciami bežiacieho stroja (vrtáčky).

Kumulácia triesok bola spôsobená zhoršenou schopnosťou deliť triesku ako tomu bolo pri niektorých povlakoch. Dĺžka triesky stále narastala a od istého momentu sa dlhé triesky o seba navzájom zachytili a začali obmotávať okolo kusa.



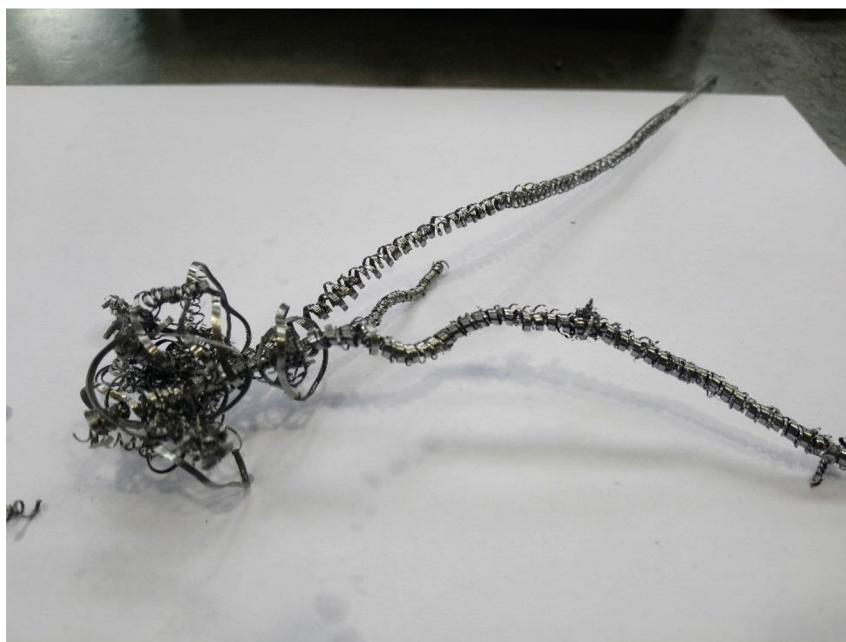
Obr. 3-9 – rezné momenty matic A,B,C a D

Priebeh rezných momentů u matice A a matice D mali podobný charakter čo sa nameraných hodnôt týka. Pri matici C boli rezné momenty vyššie ako pri maticiach A a D a pre maticu B boli rezné momenty najvyššie zo všetkých testovaných. Môže to byť spôsobené napríklad tým, že povlak mierne znížil vnútorný priemer nástroja čo mohlo spôsobiť vyššie silové zaťaženie počas rezania závitů. Ďalšie z možných vysvetlení je že povlak mohol spôsobiť zaoblenie reznej hrany čo zhoršilo rezivosť.

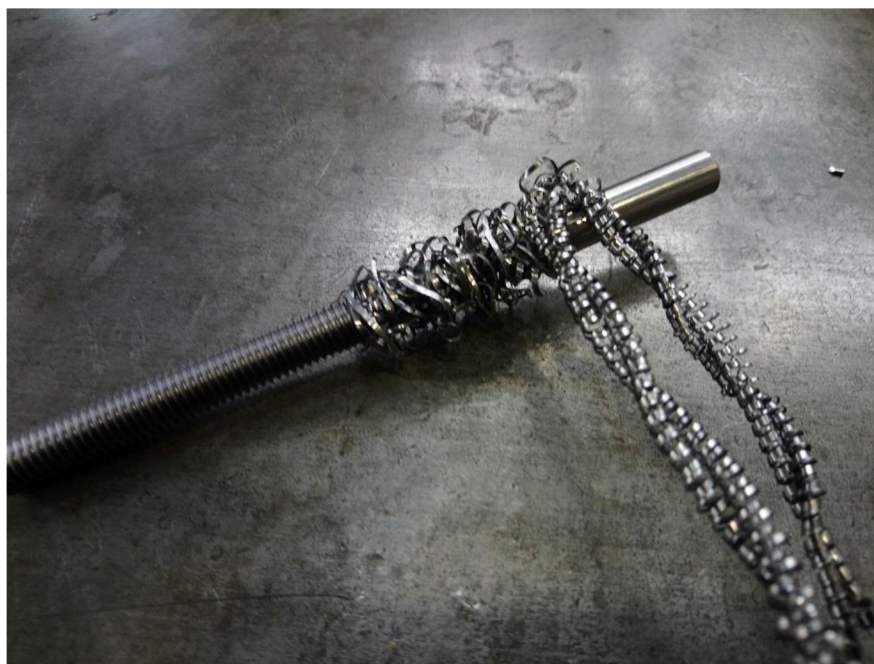


*Obr. 3-10 Matica B v spätnom chode obrobku.*

Na Obr. 3-10 (matica B) je vidieť ako sa triesky o seba navzájom zachytili kvôli ich zlej lámavosti a teda veľkej dĺžke.

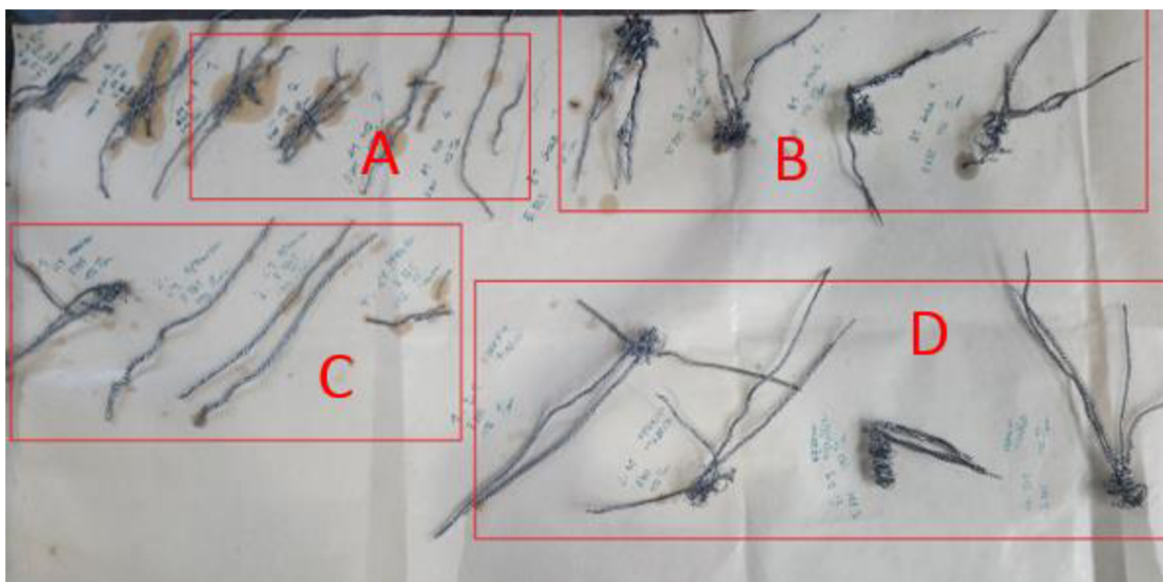


*Obr. 3-11 Triesky z rezania závitu maticou B.*



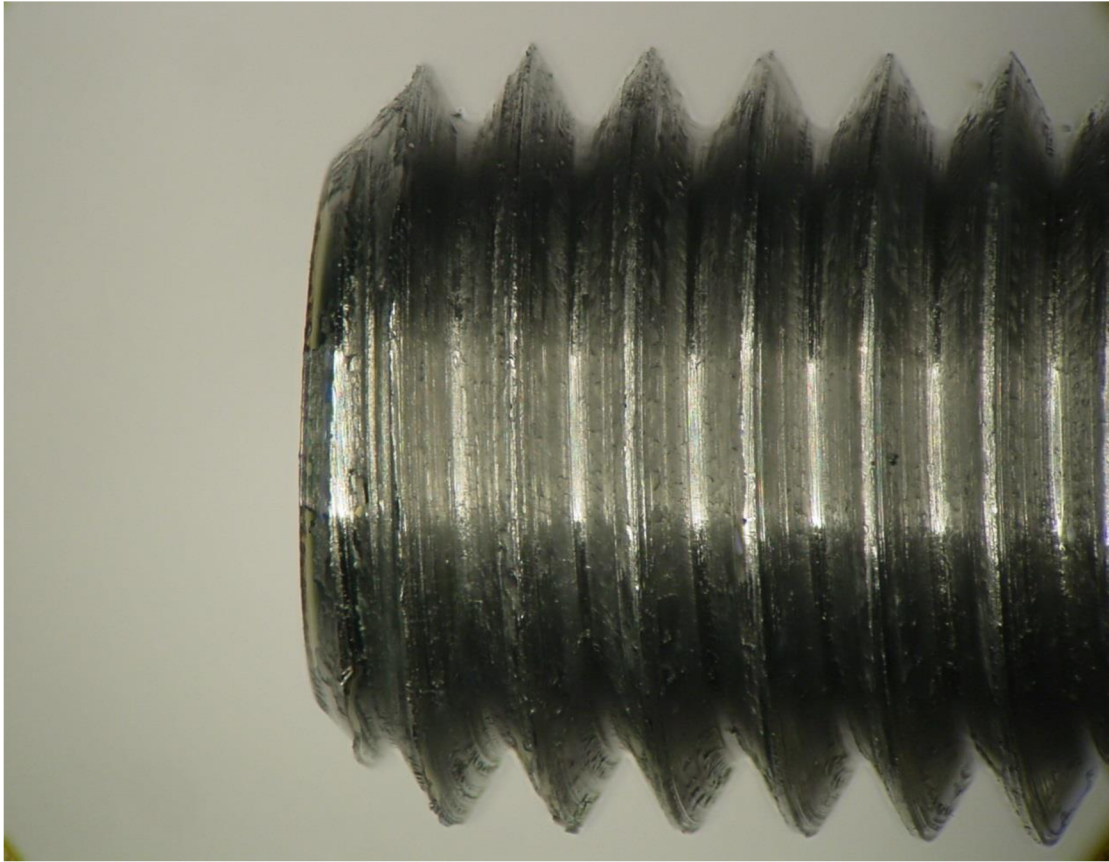
Obr. 3-12 3. závit rezaný maticou D.

Pri rezaní 3. závitu maticou D sa triesky obmotali okolo obrobku a rezanie bolo preto potrebné ukončiť skôr. To je vidno aj na grafe v Obr. 3-7.



Obr. 3-13 Triesky po vykonaní experimentálnych skúšok.

Na Obr. 3-13 sú zobrazené triesky z každého merania. Je vidieť že najmä pri rezaní maticou B a maticou D sa proces potýkal s problémom vzájomného zachytávania sa triesok.



*Obr. 3-14 Závit vyrobený maticou A.*

Na Obr. 3-14 je zobrazená fotografia závitú vytvoreného maticou A. Je vidieť, že štruktúra povrchu je vyhovujúca a nenesie známky poškodenia. Taktiež je možné pozorovať nábeh 1,5 závitú ako to bolo zobrazené na Obr. 2-7.

Triesky boli dôkladne pozbierané a odložené po obrábaní každého závitú. Môžu tak slúžiť pre ďalšie skúmanie kvality obrábacieho procesu jednotlivých nástrojov.

Cieľom bakalárskej práce bolo otestovať metodiku porovnávania rezných nástrojov s rôznou povrchovou úpravou. Najnižšia spotreba rezného momentu bola pozorovaná u nástroja A bez povlaku a u povlakovaného nástroja D. Nepotvrdila sa týmto teória že povlakované nástroje majú vyššiu efektivitu avšak experimenty prebehli na malom počte vzoriek zo štatistického hľadiska, čiže experimenty slúžili iba na otestovanie zvolenej metodiky. Je predpoklad že pri väčšej dĺžke narezaných závitov by nástroje s povlakom dosiahli lepšie výsledky ako bez povlaku z dôvodu pomalšieho otupenia povlakovaných nástrojov.

## ZÁVĚR

Zavedenie povlakov na rezné nástroje znamenal veľký zlom v efektívite celého procesu. Povlaky rezných nástrojov mnohonásobne zvyšujú ich životnosť, tvrdosť, odolnosť proti opotrebeniu, či odolnosť proti oxidácii. To umožňuje nástrojom pracovať v náročnejších podmienkach – za vyšších rezných a posuvových rýchlostí a s menšou potrebou používať chladiace či mazacie kvapaliny, čo by bez povlakov možné nebolo. To má významný ekonomický význam ale aj význam ekologický.

V práci som sa zaoberal najmä metódou PVD magnetronového katodického naprašovania vysokovýkonnými elektrickými impulzmi – HIPIMS, ktorá patrí medzi najmodernejšie metódy. Spomedzi ostatných metód PVD vyniká najmä preto, lebo minimalizuje hlavný nedostatok PVD – tieňový efekt.

Najnižšia spotreba rezného momentu bola pozorovaná u nástroja A bez povlaku a u povlakovaného nástroja D. Nepotvrdila sa týmto teória že povlakované nástroje majú vyššiu efektívnosť avšak experimenty prebehli na malom počte vzoriek zo štatistického hľadiska, čiže experimenty slúžili iba na otestovanie zvolenej metodiky. Je predpoklad že pri väčšej dĺžke narezaných závitov by nástroje s povlakom dosiahli lepšie výsledky ako bez povlaku z dôvodu pomalšieho otupenia povlakovaných nástrojov.

Výsledky bakalárskej práce je možné využiť v ďalšom výskume v oblasti povlakovania rezných nástrojov a pri výuke študentov na Fakulte strojního inženýrství VUT Brno.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje* [online]. Interaktivní multimediální text pro všechny studijní programy FSI. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006, 192 s. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat\\_pro\\_rez\\_nastroje/materialy\\_pro\\_rezne\\_nastroje\\_v2.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf).
2. HAUBNER, R., LESSIAK, M., PITONAK, R., KÖPF, A., WEISSENBACHER, R. *Evolution of conventional hard coatings for its use on cutting tools*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Volume 62, Part B, 2017, s. 210-218, ISSN 0263-4368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2016.05.009>.
3. BILLARD, A., PERRY, F. *Pulvérisation cathodique magnétron*. Traitements de surface des métaux par voie sèche et en milieu fondu. Editions T.I., 2005.
4. *Manuel des traitements de surface*. Centre Technique des Industries Mécaniques, 1987. ISBN 2-85400-084-6.
5. BITTNER, J. *Metody povlakování řezných nástrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 42s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
6. JANČOVIČ, R. *Trvanlivosť povlakovaných rezných nástrojov*. Dizertačná práca, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Trnava 2010, 120 s.
7. TAKÁČ, L. *Tvrde nanoštrukturované vrstvy pripravené magnetronovým naprašovaním*. Diplomová práca, Slovenská technická univerzita v Bratislave. Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav materiálov, Vedúci práce: Ing. Marián Mikula PhDr. –Bratislava; FMFI UK 2012.
8. LAMPERT, C. *Vacuum Deposition and Coating Options*. Production Finishing Magazine [online]. Gardner Business Media, 2013 [cit 3.5.2019]. Dostupné z: <https://www.pfonline.com/articles/vacuum-deposition-and-coating-options>.
9. *Vacuum Deposition Processes: Products Finishing*. *Products Finishing Magazine* [online]. Copyright © Gardner Business Media, Inc 2019 [cit.20.2.2019]. Dostupné z : <https://www.pfonline.com/articles/vacuum-deposition-processes>.
10. CORNET, A. *Physique et ingénierie des surfaces*. Paris: EDP Sciences, 1998. ISBN 2-86883-352-7.
11. VODIČKA, M. *Současnost a trendy povlakování technologií PVD*. MM Průmyslové spektrum. 4/2003, s. 52 – 53. Dostupné z : <https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologiei-pvd.html>.

12. PERNE, J. Plastic flow behavior of (Cr, Al)N hard coatings in dependence of strainrate and nanostructure. *Thin Solid Films*. 556, 2014. s. 390–394.
13. HOLUBÁŘ, P., JÍLEK, M., RŮŽIČKA, M. *Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření*. MM Průmyslové spektrum 9/2003, s. 106 – 108. Dostupné z : <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-pvd-povlaky-pro-rezne-aplikace-a-tvareni.html>.
14. JÍLEK, M., HOLUBÁŘ, P., CSELLE, T., MORSTEIN, M. *Nová průmyslová technologie povlakování*. MM Průmyslové spektrum 4/2003, s. 48 – 49. Dostupné z : <https://www.mmspektrum.com/clanek/nova-prumyslova-technologie-povlakovani.html>.
15. LIN, M.-I., TSAI, M.-H., SHEN, W.-J., YEH, J.-W., *Evolution of structure and properties of multi-component (AlCrTaTiZr)Ox films*. *Thin Solid Films*, Volume 518, Issue 10, 2010, s. 2732-2737, ISSN 0040-6090. Dostupné z : <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.10.142>.
16. TSAI, CH.-W., LAI, S.-W., CHENG, K.-H., TSAI, M.-H., DAVISON, A., TSAU, C.-H., YEH, J.-W. *Strong amorphization of high-entropy AlBCrSiTi nitride film*. *Thin Solid Films*, Volume 520, Issue 7, 2012, s. 2613-2618, ISSN 0040-6090. Dostupné z : <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.11.025>.
17. CHANG, Ch.-H., YANG, Ch.-B., SUNG, Ch.-Ch., HSU, Ch.-Y. *Structure and tribological behavior of (AlCrNbSiTiV)N film deposited using direct current magnetron sputtering and high power impulse magnetron sputtering*. *Thin Solid Films*, Volume 668, 2018, s. 63-68, ISSN 0040-6090. Dostupné z : <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.10.023>.
18. GREĐIĆ, T., ZLATANOVIĆ, M. *Plasma deposition of (Ti,Al)N coatings at various magnetron discharge power levels*. *Surface and Coatings Technology*, Volume 48, Issue 1, 1991, s. 25-30, ISSN 0257-8972. Dostupné z : [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(91\)90125-G](https://doi.org/10.1016/0257-8972(91)90125-G).
19. PALDEY, S., DEEVI, S. C. *Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review*. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 342, Issues 1–2, 2003, s. 58-79, ISSN 0921-5093. Dostupné z : [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00259-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00259-9).
20. SHEN, W.-J., TSAI, M.-H., CHANG, Y.-S., YEH, J.-W. *Effects of substrate bias on the structure and mechanical properties of (Al<sub>1.5</sub>CrNb<sub>0.5</sub>Si<sub>0.5</sub>Ti)<sub>Nx</sub> coatings*. *Thin Solid Films*, Volume 520, Issue 19, 2012, s. 6183-6188, ISSN 0040-6090. Dostupné z : <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.06.002>.
21. BOBZIN, K., BRÖGELMANN, T., KRUPPE, N. C., ENGELS, M. *Investigations on the substrate bias influence on reactive HPPMS plasmas*. *Thin Solid Films*, Volume 663, 2018, s. 62-72, ISSN 0040-6090. Dostupné z : <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.07.048>.

22. MACHUNZE, R., EHIASARIAN, A. P., TICHELAAR, F.D., JANSSEN, G.C.A.M. *Stress and texture in HIPIMS TiN thin films*, Thin Solid Films, Volume 518, Issue 5, 2009, s. 1561-1565, ISSN 0040-6090. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.09.069>.
23. *1/4 SE 4 FLUTE SOLID CARBIDE END MILL*. Shars tool company [online]. [cit.18.3.2019]. Dostupné z: <https://www.shars.com/1-4-se-4-flute-solid-carbide-end-mill>.
24. KUSTAS, F. M., FEHREHNBACHER, L. L., KOMANDURI, R. *Nanocoatings on Cutting Tools For Dry Machining*. CIRP Annals, Volume 46, Issue 1, 1997, s. 39-42, ISSN 0007-8506. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60771-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60771-9).
25. SUI, X., LI, G., QIN, X., YU, H., ZHOU, X., WANG, K., WANG, O., *Relationship of microstructure, mechanical properties and titanium cutting performance of TiAlN/TiAlSiN composite coated tool*. Ceramics International, Volume 42, Issue 6, 2016, s. 7524-7532, ISSN 0272-8842. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.01.159>.
26. DING, J. Ch., ZHANG, T. F., WANG, Q. M., SONG, Ch. W., WANG, T.-G., KIM K.-H., *Microstructure and mechanical properties of the Cr-Mo-Si-N nanocomposite coatings prepared by a hybrid system of AIP and HiPIMS technologies*. Journal of Alloys and Compounds, Volume 740, 2018, s. 774-783, ISSN 0925-8388. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.057>.
27. HOLUBÁŘ, P. *Počítačová simulace růstu PVD povlaků a nová řada trojvrstevných povlaků*. MM průmyslové spektrum. 9/2008, s. 136. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pocitacova-simulace-rustu-pvd-povlaku-a-nova-rada-trojvrstevnych-povlaku.html>.
28. KANTAR, F. *PVD povlaky nové generace*. Bakalářská práce, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Jaroš.
29. HELMERSSON, U., LATTEMANN, M., BOHLMARK, J., EHIASARIAN, A. P., GUDMUNDSSON, J. T. *Ionized physical vapor deposition (IPVD): A review of technology and applications*. Thin Solid Films, Volume 513, Issues 1-2, 2006, s. 1-24, ISSN 0040-6090. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.03.033>.
30. LEMMER, W., CH., GREENE, O., HULTMAN, J. E. *Review of metal-ion-flux-controlled growth of metastable TiAlN by HIPIMS/DCMS co-sputtering*. Surface & Coatings Technology 257. 2014. s. 15-25.
31. *Naprašování tenkých vrstev – Časopis Elektro – Odborné časopisy. Odborné časopisy* [online]. 2014 [cit 22.2.2019]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/naprasovani-tenkych-vrstev--14441>.

32. HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. V Brně: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
33. ŠÍMA, M., JÍLEK, M., HOLUBÁŘ, P., ZINDULKA, O. *Měření vlastností povlaků na nástrojích*. MM Průmyslové spectrum [online]. 2004 [cit 25.2.2019]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-vlastnosti-povlaku-na-nastrojich.html>.
34. FOLTYN, M. *Povlakované slituté karbidy*. Bakalářská práce, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humar, CSc.
35. SINGH, K., LIMAYE, P. K., SONI, N. L., GROVER, A. K., AGRAWAL, R. G., SURI, A. K. *Wear studies of (Ti–Al)N coatings deposited by reactive magnetron sputtering*. *Wear*, Volume 258, Issues 11–12, 2005, s. 1813-1824, ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.023>.
36. GUDMUNDSSON, J. T., BRENNING, N., LUNDIN, D., HELMERSSON, U. *High power impulse magnetron sputtering discharge*. *Journal Article 2012, Journal of Vacuum Science & Technology A*, Volume 30, Issue 3, May 2012. Dostupné z: <https://avs.scitation.org/doi/abs/10.1116/1.3691832>.
37. FEKETE, M., *Příprava tenkých vrstev magnetronovým naprašováním buzeným pulzami velkého výkonu a ich charakterizácia*. Bakalářská práce, Brno: Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, 2013. 34 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Mgr. Petr Vašina, Ph.D.
38. LI, G., SUN, J., XU, Y., XU, Y., GU, J., WANG, L., HUANG, K., LIU, K., LI, L. *Microstructure, mechanical properties, and cutting performance of TiAlSiN multilayer coatings prepared by HiPIMS*, *Surface and Coatings Technology*. Volume 353, 2018, s. 274-281, ISSN 0257-8972. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.017>.
39. PAULITSCH, J., SCHENKEL, M., ZUFRAß, T., MAYRHOFER, P. H., MÜNZ, W.-D. *Structure and properties of high power impulse magnetron sputtering and DC magnetron sputtering CrN and TiN films deposited in an industrial scale unit*. *Thin Solid Films*, Volume 518, Issue 19, 2010, s. 5558-5564, ISSN 0040-6090. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.05.062>.
40. HOVSEPIAN, P. E., EHIASAIAN, A. P. P. *I. Structure evolution and properties of TiAlCN/VCN coatings deposited by reactive HIPIMS*. *Surface & Coatings Technology*. 2014. s. 38 – 47.
41. ANDERS, A. *Deposition Rates of High Power Impulse Magnetron Sputtering: Physics and Economics*. *Journal of Vacuum Science and Technology A* 28, 2010, s. 783-790, ISSN 1553-1813. Dostupné z: <https://doi.org/10.1116/1.3299267>.

42. MARTIŠOVITŠ, V. *Základy fyziky plazmy*. Učebný text pre 3. ročník magisterského štúdia, Univerzita Komenského Bratislava, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, 2004 216 s.
43. GRECZYNSKI, G. J., JENSEN, L., BOLZ, J., KOLKER, S., SCHIFFERS, BOBZIN, K., BAGCIVAN, N., IMMICH, P., BOLZ, S., CREMER, R., LEYENDECKER, T. *Mechanical properties and oxidation behaviour of (Al,Cr)N and (Al,Cr,Si)N coatings for cutting tools deposited by HPPMS*. Thin Solid Films. 517, 2008. s. 1251–1256.
44. BOUZAKIS, K.-D., MAKRIMALLAKIS, S., KATIRTZOGLU, G., SKORDARIS, G., GERARDIS, S., BOUZAKIS, E., LEYENDECKER, T., BOLZ, S., KOELKER, W. *Adaptation 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. 205, 2010. s. 1564-1570.
45. DOLEŽALOVÁ, P. *Vlastnosti povlaků řezných nástrojů ze slitutého karbidu*. Diplomové práce, Brno 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 52 s. příloh 3. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osíčka PhD.
46. *FerroCon®*. CemeCon [katalog online]. [cit. 22.4.2019]. Dostupné z: [https://www.cemecon.de/sites/default/files/data\\_sheets/CemeCon\\_FerroCon\\_EN\\_0.pdf](https://www.cemecon.de/sites/default/files/data_sheets/CemeCon_FerroCon_EN_0.pdf).
47. *Tinalox® Gold*. CemeCon [online]. [cit. 22.4.2019]. Dostupné z: <https://www.cemecon.cz/povlakovani-tinalox-sup-reg-gold>.
48. *Schneideisen. Dies*. EMUGE, 2016. S. 473 – 506. Dostupné z: [http://www.emugefranken.cz/files/files/katalogy/EMUGE-Katalog\\_150-PDF.pdf](http://www.emugefranken.cz/files/files/katalogy/EMUGE-Katalog_150-PDF.pdf).
49. *Závitové očko s lámačom HSS, M4x07*. [katalóg online]. NaradiOnline.cz, 2003 [cit. 20.4.2019]. Dostupné z: <https://www.naradionline.cz/zavitove-ocko-s-lamacem-hss-m4x07.html>.
50. ŠTOKMAN, M. *Analýza řezných sil při řezání závitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakluta strojního inženýrství, 2014. 77 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
51. *Ecocut 532 LE*. FUCHS [online]. 2019 [cit. 20.4.2019]. Dostupné z: <https://www.fuchs.com/de/en/special/product/product/9379-ecocut-532-le/>.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
A, B, C, D	typy povlaků
CVD	Chemical Vapour Deposition
ČSN	Československé štátné normy
DC	Direct Current
DCMS	Direct Current Magnetron Sputtering
DLC	Diamond Like Carbon
EDS	Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy
FCC	Face Centered Cubic
LC	cievka-kondenzátor reťazec
HCP	Hexagonal Closed Packed
HEA	High-Entropy Alloys
HIPIMS	High Power Impulse Magnetron Sputtering
HPPMS	High-Power Pulsed Magnetron Sputtering
HRA	tvrdosť dle Rockwella
HSS	High Speed Steel
IPVD	Ionized PVD
MTCVD	Middle Temperature Chemical Vapour Deposition
PVD	Physical Vapour Deposition
RF	Radio Frequency
SEM	Scanning Electron Microscope
UV	Ultra Violet

Symbol	Jednotka	Popis
B	[T]	magnetická indukcia
D <sub>1</sub>	[mm]	priemer vnútorného závitú
D <sub>2</sub>	[mm]	stredný priemer vnútorného závitú
E	[MPa]	Youngov modul
E <sub>f</sub>	[MPa]	Youngov modul povlaku

<b>F</b>	[N]	сила
<b>F<sub>f</sub></b>	[N]	posunová sila
<b>H</b>	[mm]	výška základného trojuholníka závitů
<b>J</b>	[mA.cm <sup>-2</sup> ]	prúdová hustota iónov
<b>K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub></b>	[1/m]	krivosti substrátu pred a po depozícií
<b>M<sub>c</sub></b>	[N]	zezný moment
<b>M<sub>t</sub></b>	[g]	atómová hmotnosť
<b>N</b>	[ot./min]	otáčky obrobku
<b>P</b>	[mm]	rozstup závitů
<b>R</b>	[mm]	polomer zaoblenia závitového dna
<b>R<sub>a</sub></b>	[μm]	stredná aritmetická hodnota drsnosti
<b>R<sub>c</sub></b>	[μm/h]	depozitná rýchlosť v oblasti zárezu
<b>R<sub>e</sub></b>	[Å.min <sup>-1</sup> ]	rýchlosť erózie terča
<b>R<sub>F</sub></b>	[μm/h]	rýchlosť erózie terča na boku substrátu
<b>R<sub>q</sub></b>	[μm]	stredná kvadratická hodnota drsnosti
<b>R<sub>T</sub></b>	[μm/h]	depozitná rýchlosť na vrchnej časti substrátu
<b>S</b>	[-]	účinnosť naprašovania
<b>S<sub>d</sub></b>	[μm]	Debyeova tieniaca dĺžka
<b>T</b>	[K]	teplota substrátu
<b>T<sub>m</sub></b>	[K]	teplota topenia substrátu
<b>T<sub>e</sub></b>	[K]	elektrónová teplota
<b>U<sub>B</sub></b>	[V]	predpätia na substrátu
<b>V<sub>b</sub></b>	[μm]	kritérium opotrebenia chrbtu nástroja
<b>d</b>	[mm]	priemer závitů
<b>d<sub>1</sub></b>	[mm]	priemer vonkajšieho závitů
<b>d<sub>2</sub></b>	[mm]	stredný priemer vonkajšieho závitů
<b>h</b>	[mm]	hrúbka povlaku
<b>n<sub>e</sub></b>	[m <sup>-3</sup> ]	elektrónová hustota
<b>r<sub>1</sub></b>	[μm]	vonkajší polomer medzikružia
<b>r<sub>2</sub></b>	[μm]	vnútorný polomer medzikružia

<b>q</b>	[C]	elektrický náboj
<b>t</b>	[mm]	hrúbka substrátu
<b>v</b>	[m/s]	rýchlosť náboja
<b>v<sub>c</sub></b>	[m.min <sup>-1</sup> ]	rezná rýchlosť
<b>α<sub>f</sub></b>	[-]	koeficienty tepelnej rozťažnosti povlaku
<b>α<sub>s</sub></b>	[-]	koeficienty tepelnej rozťažnosti substrátu
<b>ρ</b>	[g.cm <sup>-3</sup> ]	objemová hmotnosť terča
<b>σ</b>	[MPa]	Celkové výsledné napätie
<b>σ<sub>ext</sub></b>	[MPa]	vonkajšie napätie
<b>σ<sub>i</sub></b>	[MPa]	zvyškové vnútorné napätie
<b>σ<sub>th</sub></b>	[MPa]	termálne indukované napätie
<b>ν</b>	[-]	Poissonovo číslo materiálu substrátu
<b>ν<sub>f</sub></b>	[-]	Poissonovo číslo povlaku



