



## Diplomová práce

# Depozice dekorativních vrstev metodou Magnetronového naprašování a hodnocení vybraných vlastností v závislosti na tloušťkách připravených vrstev.

*Studijní program:*

N0719A270001 Nanotechnologie

*Autor práce:*

**Bc. Jan Kocman**

*Vedoucí práce:*

Ing. Lukáš Voleský, Ph.D.

Katedra materiálu

*Konzultant práce:*

Ing. Totka Bakalova, Ph.D.

Katedra materiálu

Liberec 2024



## Zadání diplomové práce

# Depozice dekorativních vrstev metodou Magnetronového naprašování a hodnocení vybraných vlastností v závislosti na tloušťkách připravených vrstev.

*Jméno a příjmení:*

**Bc. Jan Kocman**

*Osobní číslo:*

M21000190

*Studijní program:*

N0719A270001 Nanotechnologie

*Zadávající katedra:*

Katedra materiálu

*Akademický rok:*

2022/2023

## Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku depozice tenkých vrstev technologií PVD a zaměřte se na metodu Magnetron sputtering.
2. Prostudujte teorii testování vlastností/kvality tenkých vrstev.
3. Pomocí magnetronového naprašovacího zařízení vytvořte tenké vrstvy Cr, Cu, Ti, Nerez a Ni na substráty oceli a mosazi různých tloušťek.
4. Na vytvořených tenkých vrstvách proveďte měření vybraných mechanických, chemických a fyzikálních vlastností.
5. Určete vliv teploty substrátu při depozici na vybrané mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti tenkých vrstev.

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:* 40 – 50  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* čeština

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] Sedláček, V.: Povrchy a povlaky kovů, Skripta ČVUT Praha 1992
- [2] Musil, J., Vyskočil J.: Tenké vrstvy nitridu titanu. Academia Praha 1989
- [3] Daďourek, Karel: Vybrané technologie povrchových úprav, Liberec 2007
- [4] KRAUS, Václav. Povrchy a jejich úpravy, Západočeská univerzita, Fakulta strojní, Plzeň, 2000, 216 s., ISBN 80-7082-668-1
- [5] LEDRAPPIER, F.; HOUZE, L.; HEAU, C.; GERSTENBERGER, J. Tenké povlaky pro snížení ztrát třením: Tribologie povlaků typu DLC, Metal 2008, Hradec nad Moravicí.
- [6] ] PETKOV, N., T. BAKALOVA, T. CHOLAKOVA, H. BAHCHEDZHIEV, P. LOUDA, P. RYŠÁNEK, M. KORMUNDA, P. ČAPKOVÁ, P. KEJZLAR, Study of surface morphology, structure, mechanical and tribological properties of an AlSiN coating obtained by the Cathodic Arc Deposition method, Superlattices and Microstructures, 109 (2017) p. 402-413.

*Vedoucí práce:* Ing. Lukáš Voleský, Ph.D.  
Katedra materiálu

*Konzultant práce:* Ing. Totka Bakalova, Ph.D.  
Katedra materiálu

*Datum zadání práce:* 18. října 2022  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 15. května 2024

L.S.

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.  
děkan

doc. Ing. Adam Hotař, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval všem, kteří se jakýmkoliv způsobem podíleli na vzniku této práce. Především bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Lukášovi Voleskému, Ph.D., za skvělé vedení mé práce, cenné rady a naprosto bezproblémové vycházení po celou dobu studia.

Dále děkuji Ing. Radanovi Panáčkovi, Ing. Totce Bakalové, Ph.D., Ing. Michalovi Krafce a Bc. Ireně Novotné za odborné rady, veškerou pomoc a především čas, který mi věnovali při realizaci mé diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat svým spolužákům, kamarádům a spolubydlícím na kolejích za poskytování vzájemné podpory po celou dobu studia.

V neposlední řadě patří poděkování celé mé rodině za poskytnutí dokonalého zázemí a neustálé psychické podpory během všemožných strastí, které mě během studia potkali.

# **Depozice dekorativních vrstev metodou magnetronového naprašování a hodnocení vybraných vlastností v závislosti na tloušťkách připravených vrstev**

## **Abstrakt**

Práce se v teoretické části zabývá metodami depozic tenkých vrstev technologií PVD, popisem depozičního zařízení a procesů v něm probíhajících. Práce je zaměřena na vlastnosti povrchu tenkých vrstev a metody jejich hodnocení. V experimentální části byli vyrobeny dekorativní tenké vrstvy chromu, mědi, titanu, nerezů a niklu různých tloušťek. Vrstvy byly deponovány na substráty oceli a mosazi. Byly stanoveny vybrané vlastnosti povrchu připravených tenkých vrstev v závislosti na jejich tloušťce. Hodnocení bylo zaměřeno na drsnost povrchu, kontaktní úhel smáčení, barevný odstín, adheze vrstvy a korozního testy.

**Klíčová slova:** depozice tenkých vrstev, magnetronové naprašování, vlastnosti tenkých vrstev, korozní odolnost

# **Deposition of decorative layers using the method of magnetron sputtering and the evaluation of selected properties depending on the thickness of the prepared layers**

## **Abstract**

The theoretical part of the thesis is about the methods of thin film deposition by PVD technology, describing the deposition chamber and work processes happening in the chamber. The thesis focuses on surface properties of thin film and the methods of their evaluation. Thin decorative films of chrome, copper, titanium, stainless steel and nickel of various thicknesses were produced in the experimental part. Layers were deposited on substrates of steel and brass. Selected surface properties of the prepared thin layers were determined depending on their thickness. The evaluation was focused on surface roughness, contact angle, hue, adhesion and corrosion tests.

**Keywords:** deposition of thin films, magnetron sputtering, properties of thin films, corrosion resistance

# Obsah

Seznam obrázků . . . . .	9
Seznam tabulek . . . . .	10
Seznam zkratk . . . . .	11
<b>1 Úvod</b>	<b>12</b>
<b>2 Teoretická část</b>	<b>13</b>
2.1 Metody depozice tenkých vrstev . . . . .	13
2.1.1 Technologie CVD . . . . .	13
2.1.2 Technologie PVD . . . . .	13
2.1.3 PVD – Napařování . . . . .	14
2.1.4 PVD – Naprašování . . . . .	17
2.1.5 Plazmové procesy . . . . .	20
2.2 Popis depozičního zařízení . . . . .	21
2.2.1 Vakuové prostředí . . . . .	21
2.2.2 Target . . . . .	22
2.2.3 Umístění substrátu . . . . .	23
2.2.4 Vyvážený a nevyvážený magnetron . . . . .	23
2.2.5 Pracovní plyn . . . . .	24
2.2.6 Reaktivní napařování . . . . .	24
2.2.7 Rychlost napařování . . . . .	25
2.2.8 Způsob růstu vrstvy . . . . .	26
2.2.9 Vliv čistoty prostředí . . . . .	26
2.3 Vlastnosti povrchu tenkých vrstev . . . . .	27
2.3.1 Faktory ovlivňující vlastnosti tenkých vrstev . . . . .	27
2.3.2 Charakteristické vlastnosti tenkých vrstev . . . . .	28
2.4 Hodnocené vlastnosti tenkých vrstev . . . . .	29
2.4.1 Tloušťka vrstvy . . . . .	29
2.4.2 Drsnost povrchu . . . . .	30
2.4.3 Barevný odstín . . . . .	31
2.4.4 Úhel smáčení . . . . .	33
2.4.5 Adhezní vlastnosti . . . . .	33
2.4.6 Korozní odolnost . . . . .	35
<b>3 Experimentální část</b>	<b>36</b>
3.1 Výroba tenkých vrstev . . . . .	36
3.1.1 Popis použitého zařízení pro výrobu tenkých vrstev . . . . .	36
3.1.2 Předpříprava vzorků . . . . .	38
3.1.3 Postup napařování vrstev Cu, Cr, Ni, Ti, Nerez 316 . . . . .	39



3.2 Postup měření a testování vybraných vlastností tenkých vrstev . . . . .	40
3.2.1 Postup stanovení tloušťky vrstvy . . . . .	40
3.2.2 Postup stanovení drsnosti povrchu . . . . .	41
3.2.3 Postup stanovení úhlu smáčení . . . . .	43
3.2.4 Postup stanovení změny barevného odstínu . . . . .	44
3.2.5 Postup stanovení adheze vrstvy . . . . .	45
3.2.6 Testování v korozních komorách . . . . .	45
<b>4 Výsledky a diskuze</b>	<b>50</b>
4.1 Výsledky ze stanovení tloušťky vrstvy . . . . .	50
4.2 Výsledky ze stanovení drsnosti povrchu . . . . .	51
4.3 Výsledky ze stanovení úhlu smáčení . . . . .	52
4.4 Výsledky ze stanovení změny barevného odstínu . . . . .	53
4.5 Výsledky ze stanovení adheze vrstvy . . . . .	53
4.6 Výsledky z testování v korozních komorách . . . . .	56
<b>5 Závěr</b>	<b>62</b>
<b>Seznam použité literatury</b>	<b>64</b>
<b>Přílohy</b>	<b>70</b>

## Seznam obrázků

2.1	Princip napařování odporovým ohřevem . . . . .	15
2.2	Princip napařování elektrickým obloukem . . . . .	15
2.3	Princip napařování elektronovým svazkem . . . . .	16
2.4	Princip napařování laserem . . . . .	16
2.5	Princip naprašování stejnosměrným proudem a střídavým proudem . . . . .	18
2.6	Princip magnetronového naprašování . . . . .	19
2.7	Zobrazení driftového pohybu sekundárních elektronů v erozní oblasti . . . . .	23
2.8	Vznik různých druhů plazmových oblastí . . . . .	24
2.9	Schéma konfokálního mikroskopu . . . . .	31
2.10	Schéma spektrofotometru a příklad reflexního spektra modrého vzorku . . . . .	32
2.11	Znázornění barevného prostoru CIE a jeho hlavních os . . . . .	32
2.12	Rozdělení jednotlivých druhů povrchů podle jejich smáčivosti . . . . .	33
2.13	Princip mřížkového testu . . . . .	34
3.1	Naprašovací zařízení KWS NP70 . . . . .	36
3.2	Vzor jednotlivých substrátů určených k depozici . . . . .	38
3.3	Ukázka způsobu měření tloušťky vrstvy krycí metodou . . . . .	40
3.4	Drsnoměr INSEZE ISR-C300 a konfokální mikroskop Sensofar S Neox . . . . .	41
3.5	Ukázka principu měření drsnoměru INSEZE ISR-C300 . . . . .	42
3.6	Snímky struktury povrchu jednotlivých substrátů . . . . .	43
3.7	Snímek testovací kapaliny na povrchu vzorku . . . . .	44
3.8	Spektrofotometr Byk Spectro Guide Gloss . . . . .	44
3.9	Měřicí sada Elcometer 107 . . . . .	45
3.10	Fotografie vzorků před zahájením testování . . . . .	46
3.11	Digitální mikroskop KEYENCE VHX-5000 . . . . .	47
3.12	Zavěšení vzorků v kondenzační komoře CON 300 - FL . . . . .	47
3.13	Testovací komora Ascott S120 a umístění vzorků v komoře . . . . .	48
3.14	Graf průběhu teplot v klimatické komoře WEISS WKL 140 . . . . .	49
3.15	Zavěšení vzorků v klimatické komoře . . . . .	49
4.1	Hodnoty drsnosti povrchu pro substráty AISI 303(a), mosaz(a), AISI 303(b) . . . . .	51
4.2	Hodnoty drsnosti povrchu pro substráty AISI 303(c), AISI 316, mosaz(b) . . . . .	51
4.3	Výsledné hodnoty úhlu smáčení . . . . .	52
4.4	Graf výsledných hodnot změny barevného odstínu . . . . .	53
4.5	Snímky mřížek po odtržení pásky z povrchu vrstev Cr, Ni, Nerez a Ti . . . . .	54
4.6	Snímky mřížek před a po odtržení pásky z povrchu Cu-vrstev . . . . .	55
4.7	Snímky Cr-vrstev po expozici 648h v kondenzační komoře . . . . .	56
4.8	Snímky Ni-vrstev po expozici 648h v kondenzační komoře . . . . .	57
4.9	Snímky Nerez-vrstev po expozici 648h v kondenzační komoře . . . . .	57
4.10	Snímky Ti-vrstev po expozici 648h v kondenzační komoře . . . . .	57
4.11	Snímky Cr-vrstev po expozici 72h v solné komoře . . . . .	58
4.12	Snímky Ni-vrstev po expozici 72h v solné komoře . . . . .	58
4.13	Snímky Nerez-vrstev po expozici 144h v solné komoře . . . . .	59
4.14	Snímky Ti-vrstev po expozici 240h v solné komoře . . . . .	59

4.15	Snímky Cr-vrstev po expozici 480h v klimatické komoře . . . . .	59
4.16	Snímky Ni-vrstev po expozici 480h v klimatické komoře . . . . .	60
4.17	Snímky Nerez-vrstev po expozici 480h v klimatické komoře . . . . .	60
4.18	Snímky Ti-vrstev po expozici 480h v klimatické komoře . . . . .	61

## Seznam tabulek

2.1	Porovnání rychlostí růstu vrstev v závislosti na použitém materiálu targetu . . . . .	25
2.2	Klasifikace adhezních tříd podle vzhledu poškození . . . . .	35
3.1	Substráty určené k depozici . . . . .	38
3.2	Čas jednotlivých depozic . . . . .	39
3.3	Hodnoty tloušťek kalibračních standardů . . . . .	41
4.1	Tloušťky vrstev stanovené krycí metodou . . . . .	50
4.2	Tloušťky vrstev stanovené XRF spektrometrií . . . . .	50
4.3	Výsledné hodnoty adhezních tříd testovaných vrstev . . . . .	55
7.1	Hodnoty drsnosti povrchu vrstev určené drsnoměrem . . . . .	70
7.2	Hodnoty drsnosti povrchu vrstev určené konfokální mikroskopií . . . . .	71
7.3	Hodnoty úhlu smáčení tenkých vrstev . . . . .	72
7.4	Naměřené souřadnice barevného prostoru CIE . . . . .	73
7.5	Naměřené souřadnice barevného prostoru CIE vytvořených vrstev . . . . .	73
7.6	Snímky Cr-vrstev testovaných v kondenzační komoře . . . . .	74
7.7	Snímky Ni-vrstev testovaných v kondenzační komoře . . . . .	75
7.8	Snímky Nerez-vrstev testovaných v kondenzační komoře . . . . .	76
7.9	Snímky Ti-vrstev testovaných v kondenzační komoře . . . . .	77
7.10	Snímky Cr-vrstev testovaných v solné komoře . . . . .	78
7.11	Snímky Ni-vrstev testovaných v solné komoře . . . . .	79
7.12	Snímky Nerez-vrstev testovaných v solné komoře . . . . .	80
7.17	Snímky Ti-vrstev testovaných v solné komoře . . . . .	81
7.14	Snímky Cr-vrstev testovaných v klimatické komoře . . . . .	82
7.15	Snímky Ni-vrstev testovaných v klimatické komoře . . . . .	83
7.16	Snímky Nerez-vrstev testovaných v klimatické komoře . . . . .	84
7.17	Snímky Ti-vrstev testovaných v klimatické komoře . . . . .	85

## Seznam zkratek

AAS	absorpční atomová spektroskopie
AFM	mikroskop atomárních sil
AISI	nerezavějící ocel s nízkým obsahem uhlíku
Arc-PVD	napařování elektrickým obloukem
CH <sub>4</sub>	molekula methanu
CIE	souřadnice barevného prostoru
CuZn37	mosaz s obsahem 37% zinku
CVD	chemická depozice z plynné fáze
DLC	uhlíková vrstva podobná struktuře diamantu
HIPIMS	vysokovýkonné impulzní magnetronové napařování
IR	infračervené záření
MFC	regulátor hmotnostního průtoku
N <sub>2</sub>	molekula dusíku
NaCl	chlorid sodný
O <sub>2</sub>	molekula kyslíku
PE-CVD	plazmou podpořená chemická depozice z plynné fáze
PLC	programovatelný logický automat
PLD	pulzní laserová depozice
PVD	fyzikální depozice z pevné fáze
QCM	křemenná krystalová mikrováha
$R_a$	aritmetická odchylka drsnosti povrchu
$R_{max}$	maximální odchylka drsnosti povrchu
UV	ultrafialové záření
XRF	rentgenová fluorescence
$\Delta E^*$	změna barevného odstínu
$\theta$	velikost kontaktního úhlu smáčení

# 1 Úvod

Nacházíme se v době, kdy se kolem nás vyskytuje stále více výrobků z různých technických materiálů, které disponují nějakou povrchovou úpravou. Jejím úkolem je přispět ke zlepšení vlastností původního materiálu, až už k jeho ochraně před poškozením, zlepšení vzhledu, funkčním vlastnostem, či ho přizpůsobit specifickým potřebám.

Mezi tyto povrchové úpravy můžeme řadit i metody depozice tenkých vrstev. Ty mohou být využívány jako moderní alternativa k tradičním metodám úprav povrchů kovů, mezi které patří například proces galvanizace. Metody depozice tenkých vrstev mají navíc několik předností ve srovnání s ostatními metodami povrchových úprav. Mezi ty se řadí především možnost přesnějšího řízení tloušťky vrstvy a depozice vícero druhů materiálu v jednom zařízení.

Jednotlivé typy těchto metod depozic tenkých vrstev se neustále vyvíjejí už od druhé poloviny 20.století a postupně si nacházejí uplatnění v mnoha klíčových průmyslových oblastech. Jednou z nich je i výroba tenkých vrstev pro dekorativní účely. Díky možnosti nanášení několika druhů materiálů, které se mnohdy dají kombinovat z jinými druhy materiálů, dochází ke vzniku širokého spektra barev výsledných vrstev o tloušťce jednotek nm až po desítky  $\mu\text{m}$ .

To nám umožňuje vytvářet vrstvy na bázi jednotlivých kovů, které disponují dekorativním vzhledem jako je například chrom, nikl, měď, či mosaz. Velice populární jsou vrstvy nitridu titanu, které kromě svého zlatého odstínu disponují i velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. V neposlední řadě mohou hrát významnou roli pro dekorativní účely i vrstvy na bázi oxidů, karbidů či DLC vrstvy.

Předmětem rešeršní části této práce bylo prostudovat problematiku depozice tenkých vrstev technologií PVD se zaměřením na metodu magnetronového naprašování. Dále se zabývat možnostmi testování vlastností a kvality tenkých vrstev. Cílem experimentální části bylo pomocí magnetronového naprašovacího zařízení vytvořit dekorativní tenké vrstvy chromu, mědi, titanu, nerezů a niklu o různých tloušťkách na substráty oceli a mosazi.

Na vytvořených vrstvách bylo následně provedeno měření vybraných mechanických, chemických a fyzikálních vlastností, jako je tloušťka vrstvy, drsnost povrchu, kontaktní úhel smáčení, barevný odstín, adheze vrstvy a odolnost vrstvy za působení určitého druhu korozního prostředí. Výsledné hodnoty získané z jednotlivých měření byly na závěr mezi sebou porovnány. Určení vlivu teploty substrátu při depozici na vybrané mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti tenkých vrstev nebylo provedeno, z důvodu nefunkčnosti určité potřebné komponenty povlakovacího zařízení.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Metody depozice tenkých vrstev

Tématem této kapitoly je představení určitých vybraných metod depozice tenkých vrstev. Ty lze rozdělit na dvě základní: chemická depozice z plynné fáze (CVD) a fyzikální depozice z pevné fáze (PVD). Kapitola je zaměřena hlavně na jednotlivé možnosti metody PVD. Hlavní rozdíl mezi metodou CVD a PVD je v tom, že u CVD se využívají chemické principy zatímco u PVD fyzikální principy. Dalším rozdílem je rozsah pracovních teplot při samotném procesu depozice.

Depozice je proces, při kterém dochází k nanášení materiálu vrstvy z prekursoru na substrát, kde následně vzniká tenká vrstva o tloušťce jednotek nm až po desítky  $\mu\text{m}$ .

#### 2.1.1 Technologie CVD

Chemická depozice z plynné fáze je proces, při kterém reagují chemické plynné látky na rozhraní povrchu ohřátého substrátu. Nejčastěji jsou těmito látkami různé reaktivní plyny. Reakční látky jsou následně za působení vysokých teplot a určitého tlaku z plynného prostředí přeměněny na substrátu na tenkou vrstvu. Chemická depozice z plynné fáze (CVD) je určena pro substráty z materiálů, které mají stabilní strukturu za vysokých teplot mezi 800 - 1100°C. Jako substrát mohou sloužit některé karbidy a keramické materiály. (Xu 2019)

Vyrobené tenké vrstvy metodou CVD mají velmi vysokou odolnost proti opotřebení a dobrou adhezi k podkladovému materiálu. Výhodou metody CVD je možnost výroby vrstev jednotné tloušťky a nízké pórovitosti i na tvarově komplikovanějších substrátech. Nevýhodou je energetická náročnost v souvislosti s vysokou teplotou procesu. Dále vznik toxických odpadních zplodin a omezené množství materiálů, které lze při těchto vysokých teplotách deponovat. (Carlsson a Martin 2010)

Omezení depozice na substrátech, které jsou stabilní při těchto vysokých teplotách, vedlo k vývoji metody PE-CVD (Plazmou podpořená chemická depozice z plynné fáze). Tato metoda využívá k iniciaci chemických reakcí na povrchu substrátu částečně plazmatického výboje a částečně zvýšenou teplotu (300 – 600 °C). Teplota už nemusí být tak vysoká, jako je tomu u standartního procesu CVD a lze tak deponovat na méně teplotně stabilní materiály substrátu. Nevýhodou oproti metodě CVD je nižší čistota deponovaného materiálu a vyšší finanční náklady na samotné zařízení. (Bublíková 2012)

#### 2.1.2 Technologie PVD

Fyzikální depozice z pevné fáze (PVD) je další z metod vakuové depozice, pomocí které lze vytvořit tenkou vrstvu na povrchu podkladového materiálu (substrát). Fyzikální depozice z pevné fáze (PVD) je proces, kdy zdrojový materiál, který chceme nanášet na substrát,

nejdříve přechází z pevné fáze do plynné fáze, a poté zpět do pevné fáze do formy tenké vrstvy na povrchu substrátu. Tento proces probíhá za sníženého tlaku v komoře zařízení.

Přechod zdrojového materiálu z pevné fáze do plynné je způsoben různými způsoby přivodu tepelné energie na zdrojový materiál. Zdrojový materiál následně na svém povrchu ionizuje a reaguje s atmosférou v komoře. Atmosféra v komoře se skládá z inertních a reaktivních plynů, které jsou do komory přiváděny. Touto reakcí vzniká určité složení atmosféry, která dopadá ve formě iontů na substrát a vytváří na něm tenkou vrstvu.

Fyzikální depozice z pevné fáze (PVD) je určena pro substráty z materiálů, které nemají tak vysokou tepelnou stabilitu, jako materiály určené pro CVD metodu. Pracovní teplota pro proces PVD se pohybuje v rozmezí 150 - 500 °C. Důsledkem těchto nižších teplot depozice mají vytvořené vrstvy obecně menší vnitřní pnutí než vrstvy vytvořené metodou CVD. Proces PVD je šetrnější k životnímu prostředí než metoda CVD. Jako substrát lze použít různé druhy kovů, slitin, polymerů, tkanin nebo skleněných materiálů. Existují dva základní principy fyzikální depozice z plynné fáze, a to buď napařování nebo naprašování. (Voleský 2019)

### **Aplikace**

Technologie PVD se používá pro výrobu předmětů, které vyžadují závěrečné nanášení tenké vrstvy, pro zlepšení jejich mechanických, optických, chemických nebo elektronických vlastností. Využití nalezne na širokém poli působnosti jako je výroba vodivých či nevodivých folií pro mikroelektroniku, reflexní vrstvy pro skla, funkční vrstvy pro optické prvky, různě barevné dekorativní vrstvy, vrstvy pro zlepšení korozivzdornosti a odolnosti proti opotřebení, obalové materiály v potravinářství a mnoho dalších aplikací. (Mattox 2010f)

### **2.1.3 PVD - Napařování**

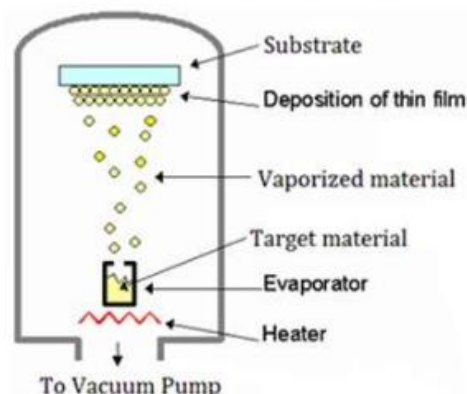
Základní princip napařování spočívá v tom, že do zdrojového materiálu, který chceme napařovat na substrát, je nutné dodat nějakým způsobem energii, např. zvýšením teploty. Ze zdrojového materiálu se následně začnou odpařovat atomy, které následně reagují s atmosférou v komoře a míří směrem k povrchu substrátu, kde kondenzují do pevné fáze a vytváří tenkou vrstvu.

Zdrojový materiál může být ve formě kovu nebo slitiny, a to jak v pevném skupenství tak kapalném. Jako zdroj ohřevu se využívá odporový ohřev, indukční ohřev, elektrický oblouk, elektronový paprsek nebo laser. Účelem zdroje ohřevu je zahřát zdrojový materiál na teplotu dostatečnou k jeho odpaření. Tento proces probíhá za vysokého vakua, jednak z důvodu zvětšení střední volné dráhy částic napařovaného materiálu, tak i potřeby snížit bod varu zdrojového materiálu, který se snižuje se snižujícím se tlakem v komoře. Dále jsou popsány metody napařování v závislosti na druhu použitého zdroje pro ohřev.

#### **Napařování odporovým ohřevem**

Zdrojový materiál je umístěn v žáruvzdorné nádobce (tzv. lodičce), která je zahřívána elektrickým odporovým ohřevem. Tímto způsobem je docíleno odpaření materiálu do

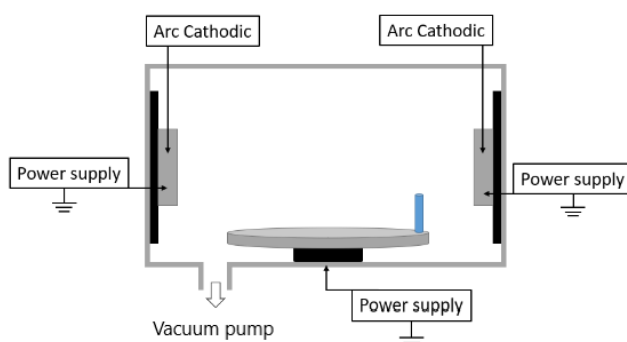
atmosféry v komoře. (viz obr. 2.1) Místo odporového ohřevu lze již dnes použít i indukční ohřev, který je rychlejší a více efektivnější. Výhodou napařování pomocí odporového ohřevu je především jednoduchost provedení v napařovacím zařízení. Nevýhoda je určitý poměrně nízký teplotní limit ohřátí nádoby, kterého lze odporovým ohřevem dosáhnout. Tento problém vedl k vývoji následujících možností způsobu napařování. (Mattox 2010e)



Obrázek 2.1: Princip napařování odporovým ohřevem (Sharma et al. 2019)

### Napařování elektrickým obloukem

Odpařením zdrojového materiálu je při této metodě docíleno pomocí elektrického oblouku, který hoří mezi zdrojovým materiálem (katodou) a stěny komory (anodou) (viz obr. 2.2). Na rozhraní vzniklého elektrického oblouku a povrchu zdrojového materiálu vzniká vysoká teplota a dochází k odpařování zdrojového materiálu do atmosféry v komoře. Napařovací technologie na tomto principu se jednotně nazývá Arc-PVD. Nevýhodou této metody je nemožnost odpařování elektricky nevodivých materiálů a možný vznik nežádoucích makročásteček na povrchu substrátu.



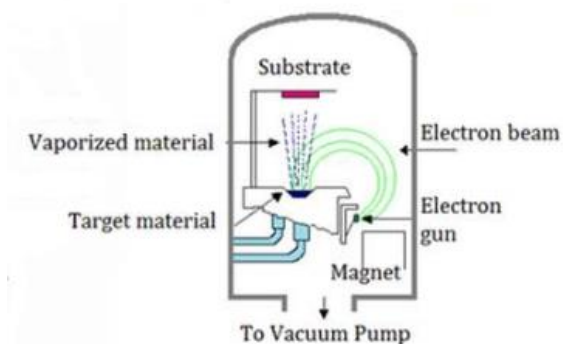
Obrázek 2.2: Princip napařování elektrickým obloukem (Surftech technology CO., LTD. 2023)

### Napařování elektronovým svazkem

Odpaření zdrojového materiálu je zde provedeno pomocí elektronového děla. Z elektronového děla, které se skládá z katody a anody, je vystřelen svazek elektronů



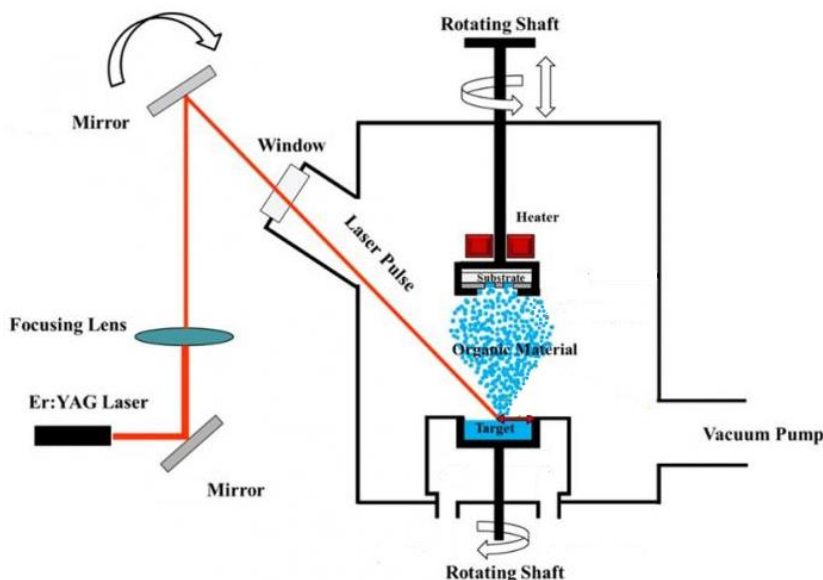
směrem ke zdrojovému materiálu (viz obr. 2.3). Mezi elektronový dělo a zdrojový materiál je přivedeno urychlovací napětí. Správné nasměrování svazku elektronů ke zdrojovému materiálu je korigováno pomocí systému elektromagnetů. Po dopadu elektronů na povrch materiálu dochází v interakční oblasti k vypařování zdrojového materiálu do atmosféry a následně k depozici na substrát.



Obrázek 2.3: Princip napařování elektronovým svazkem (Sharma et al. 2019)

### Napařování laserem

Na povrch zdrojového materiálu je fokusován laserový svazek. Po dopadu svazku se z tohoto místa začne odpařovat zdrojový materiál do atmosféry v komoře (viz obr. 2.4). Nejčastěji se používá jako zdroj pulzní laser, od kterého je odvozena pulzní laserová depozice (PLD). Výhodou této metody je výsledné stejné chemické složení vzniklé vrstvy, jako je zdrojový materiál pro napařování. Tato metoda je tedy ideální pro napařování slitin různého chemického složení. (Klára 2017)



Obrázek 2.4: Princip napařování laserem (Duke University 2023)

## 2.1.4 PVD - Naprašování

Základní princip naprašování spočívá ve vytvoření elektrického výboje v komoře zařízení, do které je přiveden inertní plyn. Tímto způsobem vzniká mezi zdrojovým materiálem (katodou) a substrátem (anodou) plazma. Plazma je ionizovaný kvazineutrální plyn, složený z elektronů, iontů a neutrálních částic. Vysoce energetické kladné ionty jsou přitahovány k povrchu zdrojového materiálu (targetu), odkud vyrážejí jednotlivé atomy materiálu. Vyražené atomy se průchodem plazmy ionizují a kondenzují na povrchu substrátu, kde vytvářejí tenkou vrstvu.

Jako inertní plyn se nejčastěji využívá argon. Zdrojový materiál neboli target, je ve formě samotného kovu nebo slitiny vždy v pevném skupenství. Zároveň se již nemusí vyskytovat na spodní části komory jako při metodě napařování, ale může být naprašován i ze shora či ze strany komory zařízení. Proces naprašování je mnohem méně energeticky účinný než proces napařování. Vyražení atomu z targetu spotřebuje větší podíl energie než jeho odpaření.

Pokud je do komory zařízení přiveden kromě inertního plynu i reaktivní plyn ( $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $O_2$ ), jsme schopni deponovat sloučeniny na bázi nitridů, karbidů nebo oxidů v určitém stechiometrickém složení v poměru ku zdrojovému materiálu. Dále jsou popsány různé metody naprašování dle jejich principu technologie. (Baptista et al. 2018)

### Naprašování stejnosměrným proudem

Na zdrojový materiál (katodu) je přiveden stejnosměrný proud k vytvoření doutnavého výboje, který ionizuje částice v atmosféře komory a vzniká plazma (viz obr. 2.5). Kladné ionty jsou přitahovány k záporně nabitému povrchu zdrojového materiálu. Vlivem doutnavého výboje je před katodou vytvořeno silné elektrické pole, které urychluje kladné ionty směrem k targetu, kde z něho vyrážejí jednotlivé atomy materiálu. Vyražené atomy následně ionizují a kondenzují na povrch substrátu (anody), kde vytvářejí tenkou vrstvu.

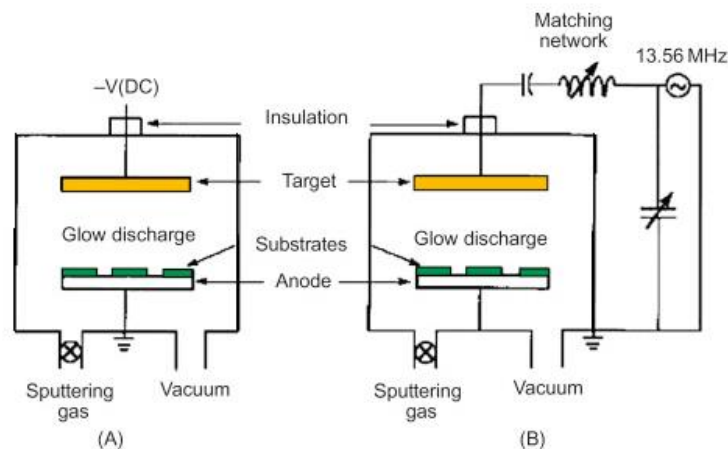
Zdrojový materiál a substrát jsou přímo proti sobě ve vzdálenosti 5-10cm. Zdrojový materiál je při tomto procesu velmi zahříván a je nutné ho chladit. Výhodou naprašování stejnosměrným proudem je především jednoduchost provedení technologie v naprašovacím zařízení. Nevýhodou je nízká rychlost naprašování a nemožnost deponovat elektricky nevodivé materiály, protože katoda (target) zde musí být vodivá.

### Naprašování střídavým proudem

Na elektrody je přiveden střídavý proud o vysoké frekvenci 13,56 MHz (viz obr. 2.5). Target se substrátem si tak mezi sebou neustále periodicky vyměňují funkci anody a katody. Elektrony a kladně nabitě částice začnou mezi elektrodami kmitat. Protože kladné ionty mají daleko nižší rychlost než elektrony, stíhají při takto vysoké frekvenci kmitat pouze elektrony a kladné částice jsou téměř v klidu. Na zdrojovém materiálu se tak vytvoří záporný potenciál, který přitahuje kladné ionty. Tyto kladné ionty vyrážejí jednotlivé atomy materiálu.

Při těchto procesech nezáleží na vodivosti naprašovaného materiálu a lze tak deponovat i nevodivé materiály (dielektrika). Ty při použití stejnosměrného proudu deponovat nelze

důsledkem hromadění elektrického kladného náboje na povrchu targetu. Tento způsob naprašování se může také nazývat jako radiofrekvenční naprašování. (Krafka 2020)

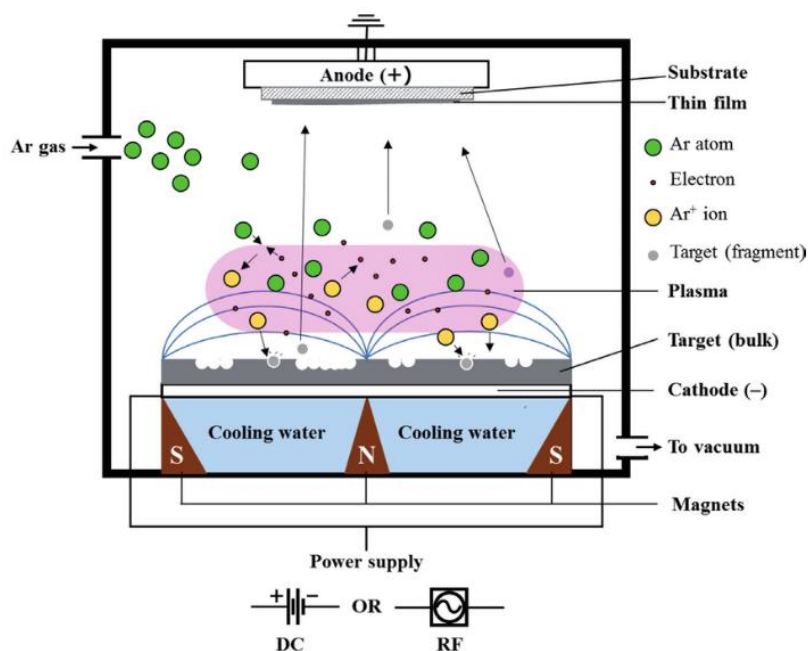


Obrázek 2.5: Princip naprašování stejnosměrným proudem (A) a střídavým proudem (B) (Faraji et al. 2018)

### Magnetronové naprašování

Do komory je přiveden pracovní plyn, který je po přivedení napětí na magnetron ionizován. Ionty jsou za přítomnosti elektrického pole urychlovány k targetu, kde z něho vyrážejí jednotlivé atomy materiálu (viz obr. 2.6). Kromě elektrického pole je v této metodě naprašování využíváno i magnetického pole, které způsobuje zakřivení a prodloužení dráhy letu nabytých částic v okolí targetu. To má za následek zvýšení počtu srážek těchto nabytých částic s neutrálními atomy pracovního plynu. Více srážek vede ke vzniku většího počtu iontů, které tak mohou narážet na povrch targetu a odprašovat větší počet atomů z materiálu targetu.

Přítomností magnetického a elektrického pole bylo docíleno k vyšší ionizaci pracovního plynu, která vede k vyšší rychlosti deponice tenké vrstvy na substrátu. Výhodou magnetronového naprašování je možnost použití menšího napětí a nižšího pracovního tlaku, který vede k vyšší kvalitě deponované vrstvy. Zdrojem magnetronového naprašování může být konfigurace jak se stejnosměrným napětím tak se střídavým napětím (Wang a Wu 2023)



Obrázek 2.6: Princip magnetronového naprašování (Hishimone et al. 2020)

### Napařování iontovým paprskem

Na zdrojový materiál je zaměřen iontový zdroj, ze kterého je vyslán monoenergetický iontový paprsek. Z targetu se následně vyrazí atomy, které kondenzují na substrátu a vytváří tenkou vrstvu.

Tento způsob odprašování lze využít jak pro kovové, tak dielektrické materiály. Výhodou napařování iontovým paprskem je velmi dobré řízení stechiometrie a tloušťky vrstvy. Proto se této metody využívá hlavně pro výrobu optických prvků a polovodičů. (Denton Vacuum 2022)

### Iontová implantace

Do komory je přiveden pracovní plyn, který reaguje s povrchem zdrojového materiálu. Mezi zdrojovým materiálem a substrátem lze různě měnit napětí. Při vyšším napětí mají odprašené ionty vyšší rychlost. Při napětím vyšším než 50 keV začnou odprašené ionty pronikat hlouběji do povrchu substrátu. Tento jev se nazývá iontová implantace. (Voleský 2019)

Vyražené ionty mají tak vysokou energii, že při dopadu na substrát mohou odprašovat již vzniklou vrstvu. To vede k zpomalení samotné depozice a zkvalitnění povrchu vrstvy, které tak mají lepší adhezi k substrátu a vyšší hustotu naprašovaného materiálu. Bombardování takto vysoce energetických iontů vede k postupnému zahřívání substrátu, proto je třeba substrát chladit, aby nedošlo k narušení struktury materiálu. (Martin 2010)

### Vysokovýkonné impulzní magnetronové naprašování (HIPIMS)

Tato technologie využívá velmi vysokého napětí na špičkách jednotlivých peaků, které vytváří pulzní zdroj napětí. Toto vysoké napětí se udrží během procesu zhruba jen mezi 0,5-5% doby z celkového času depozice. Průměrný výkon je tak podobný tomu s použitím

obyčejných pulzních zdrojů. Výhodou je však vyšší poměr ionizace kovů v plazmatu. Vrstvy nanesené touto technologií disponují vysokou hustotou a vynikající adhezí. (Anders 2014)

### **2.1.5 Plazmové procesy**

Plazma je částečně ionizované plynné prostředí obsahující dostatek elektronů a iontů, které jí dávají vlastnosti dobrého elektrického vodiče. Je nezbytnou součástí probíhajících procesů technologie PVD. Jedná se o kvazineutrální plyn, ve kterém se mohou vyskytovat jednotlivé atomy, molekuly, ionty, elektrony, radikály, pozitrony, fotony a neutrony. Důsledkem toho je, že v plazmovém prostředí může probíhat mnoho fyzikálních procesů, jako jsou různé druhy excitace, ionizace, disociace, rekombinace a polymerizace, které jsou důsledkem srážek vyskytujících se částic. Plazma se vyskytuje v oblastech se sníženým tlakem. (Mattox 2010d)

Jedním způsobem, jak docílit vzniku plazmy, je použití diody skládající se z katody a anody. Při správném tlaku v pracovní komoře a přivedením dostatečného napětí na katodu a anodu, které jsou umístěné uvnitř komory, se docílí rozpadu plynu na plazmový výboj. Plazma se v těchto procesech používá jako zdroj pro zvýšení energie inertních a reaktivních iontů. To vede k urychlení iontů a elektronů ke srážkám s povrchem anody (targetu), ze kterého jsou následně odprášeny jednotlivé atomy materiálu. Plazma je dále zdrojem elektronů, UV záření a lze ji při procesu použít k čištění povrchu tzv. "leptáním". (Walton a Greene 2010)

## 2.2 Popis depozičního zařízení

Tato kapitola se zabývá podrobněji obecným popisem depozičního zařízení. Kvalita a reprodukovatelnost konkrétní depozice závisí na několika provozních podmínkách, vlastnostech zařízení a nastavených pracovních parametrech samotného procesu. V kapitolách níže budou proto některé z nich blíže rozebrány. Popis se zaměřuje především na metodu magnetronového naprašování.

### 2.2.1 Vakuové prostředí

Kvalitní naprašovací zařízení se neobejde bez dobrého vakuového prostředí. To je důležité především pro reprodukovatelnost jednotlivých procesů a zabraňování jejich kontaminace nečistotami. Vakuum lze definovat jako uzavřený objem plynu, který obsahuje méně molekul plynu, než okolní prostředí při stejném chemickém složení a teplotě. Prostředí vysokého vakua nám poskytuje delší volnou střední dráhu pro srážky částic mezi targetem a substrátem. Vakuové prostředí je tvořeno depoziční komorou, čerpacím systémem, přívody a vývody plynu.

#### Depoziční komora

Depoziční komora by měla být vyrobena s materiálů, které jsou stabilní při nízkém tlaku a nedegradují. Nevyhovující jsou polymerní materiály a mosaz, ze které se uvolňuje zinek. Dále nelze použít antikoroziční vrstvy kadmia na železných šroubech. Ideálním materiálem pro depoziční komory je tak nízkouhlíková nerezová ocel. Pro výrobu tvarově složitějších součástí je vhodný hliník. Veškeré kovové části, které neslouží jako elektrody, je třeba mít uzemněné.

Komory zařízení mohou být různých velikostí, tvarů a konfigurací. Jednou konfigurací je možnost vkládat díly k povlakování přímo do depoziční komory s magnetronem. Jedná se o nejjednodušší a nejlevnější řešení na realizaci. Další možností je využití dvou či více přechodných komor před depoziční komorou. Díly určené k povlakování se vloží do přechodových komor a nechají se vyčerpat na hodnoty hrubého vakua. Depoziční komora je přitom po celou dobu udržována na hodnotách hrubého vakua. Po dosažení stejné hodnoty tlaku v obou komorách se komory mezi sebou otevrou a stůl s díly vjede do depoziční komory, kde je připraven k procesu depozice. Po skončení depozice se stůl s povlakovanými díly vyjme obdobným způsobem přes přechodovou komoru. Tento způsob konstrukčního řešení vede k lepšímu udržování čistoty v depoziční komoře i samotného procesu. (Mattox 2010b)

#### Čerpací systém

Čím je větší depoziční komora, tím se prodlužuje čas evakuace komory. Proto je potřeba pro každou velikost zajistit dostatečný výkon čerpacího systému vývěv pro vytvoření vakua. Každá vývěva má určité rozmezí tlaků, při kterých je schopna efektivně pracovat, proto se často využívá dvoustupňového čerpání.

Prvním typem jsou vývěvy určené pro nízké vakuum. Jedná se o rotační olejové vývěvy nebo rotační suché vývěvy. Druhým typem jsou vývěvy pro vysoké vakuum. Do tohoto typu se řadí difuzní vývěva, sorpční vývěva a turbo molekulární vývěva. Čerpací rychlost se snižuje s přítomností delšího a širšího čerpacího potrubí. Dále to jsou veškeré jeho záhyby a ventily na cestě do komory zařízení. (Bishop 2015a)

### **Měření tlaku**

Kontrola aktuálního tlaku v komoře je zajištěna digitálními vakuometry. I zde se využívá dvou druhů měrek podle určitého rozmezí tlaku v komoře. Jedna měrka slouží k měření v oblasti nízkého vakua (Pirani), další k měření v rozmezí vysokého vakua (Pening).

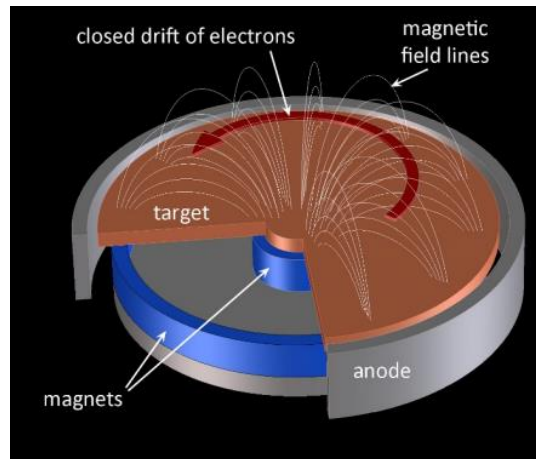
### **Těsnost zařízení**

V případě podezření na výskyt hůře zjizitelných netěsností zařízení lze využít heliový detektor netěsností. Toto zařízení je vybaveno čerpacími vývěvami a hmotnostním spektrometrem pro analýzu helia. Detektor je napojen na potrubí čerpacího systému komory. Během odsávání prostředí z komory je obsluhou na různých místech vnějšího pláště komory připouštěn plyn helia. Jakmile helium vnikne netěsností do komory zařízení, detektor to zaznamená. (Bishop 2015b)

## **2.2.2 Target**

Targety se vyrábějí v různých tvarech. Nejčastěji se používají planární, trubkové a sférické. Chemické složení targetů může být jak jednoprvkové tak i na bázi slitin. Od výrobce jsou dodávány s určitou čistotou, obvykle kolem 99%. S vyšší čistotou materiálu rostou i pořizovací náklady. Odprašování atomů z targetu probíhá v uzavřené kruhové erozní oblasti, kde je největší hustota plazmy způsobená driftovým pohybem sekundárních elektronů emitovaných z katody (viz obr. 2.7).

Každý materiál má v plazmě jiné de-excitační emisní spektrum, které lze pozorovat změnou barvy plazmatu. K přesnějšímu sledování parametrů plazmy se využívá optická emisní spektroskopie. Magnetické pole hůře prochází magnetickými materiály. To se projeví při použití targetů, které jsou z magnetických materiálů. Targety je při procesu třeba chladit přítokem vody. Dostatečné chlazení lze přibližně ověřit pomocí změny teploty vody v odváděcím potrubí. (Mattox 2010f)



Obrázek 2.7: Zobrazení driftového pohybu sekundárních elektronů v erozní oblasti (Anders 2017)

### 2.2.3 Umístění substrátu

Jednotlivé díly určené k povlakování lze do depoziční komory umístit několika způsoby. Lze využít pohyblivého stolku, tzv. karusel, kde vzorky mohou být naprašovány ve stacionární poloze nebo v pohybu. Depozice z magnetronu nezajišťuje příliš rovnoměrnou depozici (tloušťku vrstvy) na celé ploše substrátu. Proto je často využito jednoosé až trojosé rotace, která zajistí rovnoměrnější rozložení deponované vrstvy, a to především na trojrozměrných substrátech. (Mattox 2010f)

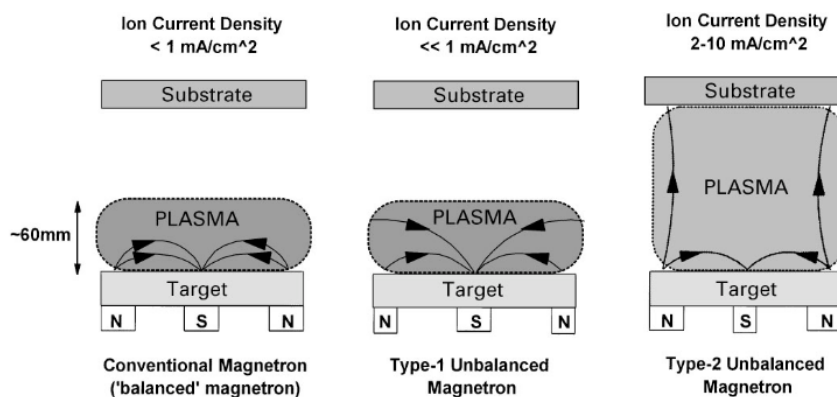
### 2.2.4 Vyvážený a nevyvážený magnetron

K ionizaci plazmy v zařízeních na bázi magnetronového naprašování se využívá přítomnost elektrického a magnetického pole.

Magnetické pole lze zajišťovat pomocí elektromagnetů nebo permanentních magnetů, které jsou součástí magnetronu. Různého typu magnetického pole lze docílit dvěma typy magnetronů: vyváženým a nevyváženým (viz obr. 2.8). Rozdíl je ve způsobu uzavření magnetických čar, které drží největší podíl plazmy pouze v blízkosti katody. Použitím nevyváženého magnetronu se hranice plazmy dostane dále od katody, kde může reagovat s dalšími ionty. Uspořádání pomocí nevyváženého magnetronu je proto vhodné pro reaktivní naprašování. Vznik plazmové oblasti tedy závisí na velikosti iontové hustoty a použitím typu magnetronu (viz obr. 2.8).

Magnetrony lze vyrábět v různých tvarech, které přímo závisí na tvaru targetu. Nejpoužívanější konfigurací jsou planární magnetrony. Naprašovat lze z jednoho či více magnetronů najednou. (Bishop 2015c)





Obrázek 2.8: Vznik různých druhů plazmových oblastí (Kelly a Arnell 2000)

## 2.2.5 Pracovní plyn

Depoziční komora disponuje jedním nebo více přívody pro pracovní plyny. Minimálně jeden přívod je zpravidla určen pro inertní plyn (argon). Další přívody mohou být pro reaktivní plyny ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ), které slouží k procesům reaktivního naprašování.

Nerovnoměrné proudění pracovních plynů v komoře může vést k nestejnorodým depozicím v různých místech komory. Proto by měly být přívody rozmístěny tak, aby zajišťovaly co nejvíce rovnoměrný rozvod pracovních plynů po celém objemu komory. Toho lze docílit rozsáhlejší distribucí otvorů samotného přívodu.

K přesnému připouštění pracovních plynů slouží regulátory hmotnostního průtoku (MFC ventily), které obsahují snímače kontroly průtoku jednotlivých plynů. Napojení zařízení na tlakové lahve musí být přes regulační ventily, které omezí maximální vstupní tlak určený pro MFC ventily. (Mattox 2010c)

## 2.2.6 Reaktivní naprašování

Reaktivní naprašování se používá pro depozici vrstev na bázi oxidů, nitridů a karbidů. Rozdíl oproti standardnímu naprašování je v přivedení reaktivního plynu ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ). Reaktivní plyn reaguje s odprášenými atomy s targetu a společně vytváří směs chemických sloučenin, které se deponují na povrch substrátu. Pro správnou depozici sloučenin o určitém stechiometrickém složení je třeba nalézt vhodné pracovní parametry procesu.

Reaktivní plyn se používá vždy za přítomnosti inertního plynu. Ten podporuje aktivaci pracovního plynu a zabraňuje tak otrávení targetu, které by vedlo k výraznému zpomalení depozice. Sledování poměrového složení plynu v komoře lze provést pomocí optické emisní spektroskopie. Reaktivní naprašování je obecně pomalejší než naprašování v čisté argonové atmosféře. Pro lepší adhezi těchto vrstev k substrátu se využívá vytvoření podkladové vrstvy ze samotného kovu. (Musil et al. 2005)

## 2.2.7 Rychlost naprašování

Rychlost naprašování závisí na pracovním tlaku, velikosti zdroje napětí, druhu naprašovaného materiálu (viz tab. 2.1), vzdálenosti a úhlu dopadu mezi targetem a substrátem. Měření rychlosti depozice lze provádět během procesu pomocí křemenného krystalu (QCM), nebo optické absorpční atomové spektroskopie (AAS).

### Pracovní tlak

Rychlost depozice přímo závisí na pracovním tlaku v zařízení. Při velmi nízkém tlaku nedojde mezi targetem (katodou) a substrátem (anodou) k dostatečnému urychlení iontů k vzájemným srážkám, které by vedly ke vzniku plazmy. Je třeba dosáhnout prahové energie, kdy postupným zvyšováním tlaku se ionty urychlují natolik, až dojde ke vzniku doutnavého výboje. Při zvyšujícím se tlaku roste katodová skvrna a elektrická vodivost plazmy. Jedná se o slabě ionizující plazma. Pracovní tlak může mít vliv na výsledné vlastnosti deponované vrstvy.

### Zdroj napětí

Zdroj napětí pro magnetronové naprašování může mít několik konfigurací a parametrů. Nejpoužívanějším typem jsou pulzní zdroje, které dodávají výkon pouze v určitých pulzech a ve zbytku času je napětí na nulových hodnotách. Skutečný příkon, který je do plazmy dodáván, je snížen nesouladem impedance, která způsobuje zpětné odrazy energie do napájecího zařízení. Obecně platí, že s vyšším výkonem roste rychlost naprašování.

### Vzdálenost mezi targetem a substrátem

Čím víc se substrát vzdaluje od plazmové oblasti, tím víc v této oblasti klesá teplota plazmy. To vede ke snížení počtu energetických částic a dochází k jejich postupné rekombinaci, která vede ke snížení účinnosti depozice.

Materiál targetu	Rychlost naprašování [ $\text{\AA}/\text{s}$ ]
Ag	380
Cu	320
Co	190
Ni	190
Cr	180
Fe	180
Al	170
Zr	85
Ti	80

Tabulka 2.1: Porovnání rychlostí růstu vrstev v závislosti na použitém materiálu targetu. *Výpočet byl proveden pro hustotu výkonu:  $250 \text{ W}/\text{in}^2$  a vzdálenosti mezi substrátem a targetem: 4in (palce).* (Semicore Equipment, Inc. 2014)

### 2.2.8 Způsob růstu vrstvy

Způsob, jakým roste vrstva, závisí na morfologii, chemickém složení povrchu, úhlu dopadu, teplotě substrátu, znečištění substrátu a depoziční rychlosti. Obecně platí, že s růstem vrstvy se zvyšuje drsnost povrchu, protože některé krystalografické roviny mohou růst rychleji. Pokud má nanášený substrát vysokou drsnost povrchu, bude se upřednostňovat růst materiálu na vyvýšených místech povrchu než na místech, která jsou více zakryta (důlky), tím se bude výrazněji zvyšovat drsnost povrchu. (Mattox 2010g)

#### Přehřev substrátu

Zvýšením teploty substrátu se zvýší počet adsorbovaných atomů na povrchu substrátu. Je třeba dbát na teplotní stabilitu vyhřívaného substrátu. S rostoucí teplotou roste možná difúze materiálu z hloubky substrátu až na povrch vzorku, kde se odpařuje. Například zinek může z vyhřívané mosazi tékat do atmosféry v komoře. Měření teploty substrátu lze sledovat pomocí zapuštěného termočlánku nebo IR pyrometrem. (Bishop 2015d)

#### Předpětí Bias

Jedná se o systém, který přivede na povrch substrátu záporný potenciál. To vede k vyššímu urychlení kladných iontů směrem k substrátu, které tak dopadají na substrát s velmi vysokou energií.

### 2.2.9 Vliv čistoty prostředí

Čistota prostředí v depoziční komoře je důležitá pro dobrou opakovatelnost depozice vrstev. Narušení čistoty celého procesu naprašování mohou způsobovat jak nečistoty na povrchu substrátu, tak naprašované usazeniny na jednotlivých dílech uvnitř komory, dále zbytkové plyny, částice a páry ve vakuu, jako je desorbovaná voda. Jakékoliv narušení čistoty může vést ke zpomalení procesu vytvoření vysokého vakua, či narušit čistotu depozice, která vede k rozdílnějším vlastnostem výsledné nanosené vrstvy.

Důraz je kladen i na prostředí, ve kterém je povlakovací zařízení umístěno. To by mělo být bezprašné, s nízkou vlhkostí a bez znečišťujících částic ve vzduchu.

K minimalizaci potřeby čištění a snížení tvorby usazenin na površích komory je vhodné využívat ochranných vložek a krytů, které lze snadno dle potřeby vyjmout z komory a čistit mimo komoru zařízení, či případně vyměnit za nové. To ale může vést k delší době čerpání vakua. (Mattox 2010b)

## 2.3 Vlastnosti povrchu tenkých vrstev

### 2.3.1 Faktory ovlivňující vlastnosti tenkých vrstev

Vytvořená tenká vrstva na povrchu substrátu vede ke změně vlastností původního povrchu. Faktory, které obecně ovlivňují výsledné vlastnosti vytvořených vrstev jsou:

- Stav povrchu substrátu před a po čištění povrchu
- Parametry procesu depozice
- Způsob růstu vrstvy na povrchu substrátu
- Způsob zpracování po depozici

#### **Předpříprava povrchu**

Pro opakovatelné vlastnosti týkající se stavu povrchu před depozicí je důležité udržovat stálý postup předpřípravy substrátu. Ten se týká především způsobu mechanického obrábění a čištění před depozicí.

Mezi mechanické úpravy se řadí broušení, otryskání, omílání, kartáčování a leštění. Obvykle platí, že hladší povrchy substrátu poskytují hustší naprášené vrstvy. Povrch s vyšší drsností povrchu substrátu naopak může vést k lepší adhezi vrstvy.

K čištění povrchu před depozicí lze využít možnosti chemického odmašťování, moření a odrezování. Často se využívá ultrazvukových čističek. Přímo v komoře naprašovacího zařízení se používá Iontové čištění, kdy je na substrát přivedeno záporné předpětí, které vede k vyššímu urychlení iontů na povrch substrátu, kde vyráží atomy nečistot. K ošetření povrchu polymerů lze využít plazmové aktivace nebo korónového výboje. K odstranění staré vrstvy se používá metoda stripping. (Rajtmajer 2016)

#### **Parametry procesu depozice**

Jakákoliv změna výrobních parametrů depozice může ovlivnit výsledné vlastnosti/reprodukovatelnost nanesené vrstvy. Mezi ty hlavní patří změny: pracovního tlaku, velikosti zdroje napětí a polohy substrátu v komoře. Každé depoziční zařízení je svým způsobem originální a neplatí pravidlo, že to, co jde při určitých parametrech deponovat v jednom zařízení, půjde deponovat v jiném zařízení.

#### **Růst vrstvy**

Způsob růstu vrstvy závisí na chemickém složení deponované vrstvy, depoziční rychlosti a vlastnostech samotného povrchu substrátu. Mezi vlastnosti povrchu substrátu, které ovlivňují výsledné vlastnosti vrstvy jsou:

- Chemické složení materiálu
- Morfologie povrchu
- Mechanické vlastnosti
- Fázové složení a mikrostruktura povrchu

### **Po depoziční zpracování**

Při depozici je substrát i postupně rostoucí vrstva vystavena poměrně prudkým změnám teplot materiálu. S tím souvisí vnitřní pnutí ve vrstvě, které může způsobovat destrukci/praskání vrstvy, s příliš rychlou změnou teploty materiálu substrátu i vrstvy po vyjmutí z komory.

Až už jsou vlastnosti povrchu substrátu nebo výsledné vrstvy jakékoliv, nejdůležitější roli hraje především jejich homogenita na celé oblasti vzorku. (Mattox 2010a)

### **2.3.2 Charakteristické vlastnosti tenkých vrstev**

Vlastnosti, které můžeme zkoumat na tenkých vrstvách je celá řada, zde jsou uvedeny některé z nich:

- Morfologie povrchu – rozložení objemu vrstvy, drsnost povrchu, porozita
- Chemické vlastnosti – stechiometrické složení nanesených vrstev, reaktivita povrchu, stabilita v různých prostředích, koroze,
- Struktura a mikrostruktura – krystalografické fáze, orientace krystalografické mřížky, mřížkové vady
- Fyzikální vlastnosti – hustota, tloušťka
- Mechanické vlastnosti – elastický modul, tvrdost, odolnost proti opotřebení, adheze k povrchu, zbytkové napětí
- Elektrické vlastnosti – rezistivita
- Optické vlastnosti – absorpce, index lomu, odraz, barva

Zkoumat pro každou vrstvu všechny možné vlastnosti by bylo vysoce zdlouhavé, finančně nákladné a spousta zjištěných vlastností by nemuselo mít žádné smysluplné využití. Proto je třeba si nejdříve určit jakou funkci by měla vrstva plnit a kde je její potencionální využití. Na základě této prvotní úvahy pak vybereme vlastnosti, které je třeba změřit, určit či testovat. Tyto vlastnosti by měly hrát nejdůležitější roli na celkovou kvalitu a funkci výsledné vrstvy. Například pro výrobu tenkých vysoce tvrdých vrstev pro obráběcí nástroje se budou zkoumat spíše mechanické vlastnosti. Zatímco pro funkční transparentní vrstvy u optických prvků bude brán důraz na měření optických vlastností. (Mattox 2010i)

Charakteristika vlastností vrstev je důležitá nejen pro zjištění požadovaných funkčních vlastností, ale také slouží jako kontrola správného chodu výrobního procesu depozice. Indikace toho, že je s procesem něco v nepořádku, se projeví změnou vlastností deponované vrstvy. Proto je důležité pravidelně kontrolovat kvalitu a jednotlivé vlastnosti i u dlouhodobě zaběhlých výrobních procesů. (Mattox 2010h)

## 2.4 Hodnocené vlastnosti tenkých vrstev

Určení vlastností tenkých vrstev lze obecně rozdělit na metody destruktivní a nedestruktivní. Důležitou roli hraje také doba, kdy je vrstva podrobena měření či testování. Tato kapitola se zaměřuje na možnosti měření a testování několika vybraných vlastností tenkých vrstev, které byly zkoumány v experimentální části této práce.

### 2.4.1 Tloušťka vrstvy

#### Krycí metoda

Princip stanovení tloušťky tenké vrstvy touto metodou spočívá v zakrytí části substrátu při procesu naprašování. Po depozici tak vznikne na vzorku ostrý přechod (schod), kde byla vrstva deponovaná a kde ne. Následuje změření výškového rozdílu tohoto přechodu, které určí přibližnou tloušťku vrstvy. K měření lze využít buď profilometr nebo konfokální mikroskop (viz kap. 2.4.2). (Javdošňák 2013)

#### Metalografický výbrus

Substrát s tenkou vrstvou je kolmo na vrstvu přeříznut metalografickou pilou. Následuje zapouzdření přeříznutého vzorku do pryskyřice tak, aby struktura řezu byla vidět na povrchu pouzdra. Takto připravený vzorek se následně postupně brousí a leští, aby byl řez s rozhraním vrstva/substrát dobře viditelný v zobrazovacích mikroskopických technikách. Pomocí těchto zobrazovacích technik pak můžeme změřit přesně tloušťku vrstvy. (Voleský 2019)

#### Kalotest

Metoda spočívá v probroušení tenké vrstvy pomocí otáčející ocelové kuličky k povrchu substrátu. Na ocelovou kuličku je nanášena diamantová pasta, která zlepšuje úběr materiálu tenké vrstvy. Cílem je vytvořit na povrchu vzorku mezikruží. Jedna kružnice určuje hranici mezi nepoškozenou vrstvou a obroušenou vrstvou, zatímco druhá kružnice určuje hranici mezi obroušenou vrstvou a materiálem substrátu. Díky známému průměru ocelové kuličky a naměřeným průměrům jednotlivých kružnic pomocí optického mikroskopu, lze výpočtem určit tloušťku vrstvy. (Železný 2013)

#### XRF spektrometrie

Stanovit tloušťku tenkých vrstev lze také pomocí rentgen fluorescenční (XRF) spektrometrie. Podmínkou je, aby chemické složení měřené tenké vrstvy bylo z jednoho druhu materiálu a bylo dobře rozeznatelné od materiálu substrátu. Ke stanovení tloušťky určité vrstvy musí spektrometr znát kalibrační data pro stanovovanou vrstvu. K tomu slouží jednotlivé kalibrační standardy. (Spektrometry.cz 2023)

#### Optické metody

Tloušťky transparentních vrstev lze změřit pomocí optických přístrojů, které jsou založené na principu měření absorpce. Z rostoucí tloušťkou transparentní vrstvy klesá intenzita prošlého záření, která vede k vyšší zaznamenané absorpci. Dalším možným způsobem je

měření interference světla na transparentní vrstvě pomocí interferenčního mikroskopu. (Žanta 2011)

## 2.4.2 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které vznikají při výrobě, či zpracování povrchu. Drsnost povrchu může být určena jako  $R_a$  nebo  $R_{max}$ . Hodnota  $R_a$  určuje aritmetický průměr odchylky profilu drsnosti od její střední hodnoty.  $R_{max}$  určuje rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší naměřenou hodnotou odchylky profilu. Přístroje k určení drsnosti povrchu lze rozdělit na kontaktní a bezkontaktní typy. Kontaktní typy mohou během měření poškozovat vytvořenou vrstvu.

### Profilometr

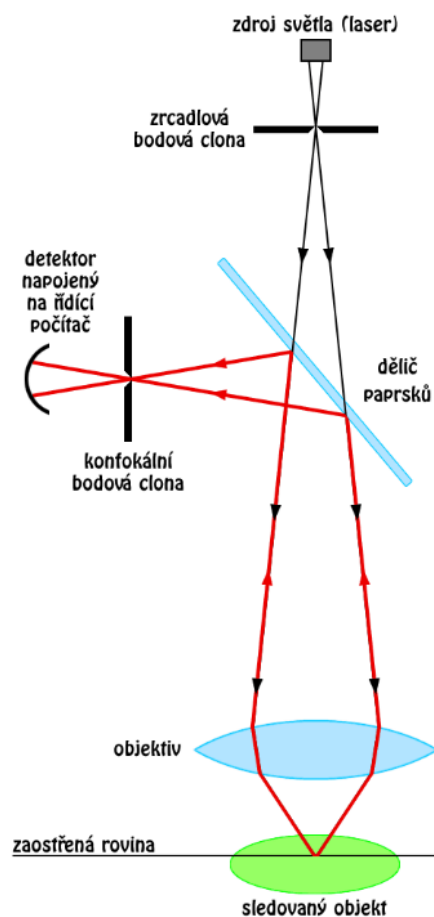
Jedná se o zařízení, které využívá kontaktu sondy s povrchem vzorku. Sonda kopíruje povrch zkoumaného vzorku a zařízení zaznamenává vertikální pohyb sondy. Sonda se pohybuje vždy v jednom směru, čímž poskytuje profil drsnosti ve 2D. V režimu postupného skenování dokáže profilometr vytvořit i 3D obraz. Toto měření je však ale časově velmi náročné. Přesnost měření závisí jak na morfologii povrchu, tak na velikosti a tvaru hrotu.

### Skenovací interferometr

Zařízení slouží pro měření drsnosti povrchu transparentních vrstev. Interferometr vytváří zdroj světla, který generuje interferenční obraz se světlými a tmavými proužky. Tyto proužky závisí na rozdílu optické dráhy od referenčního vzorku a konkrétního místa na povrchu měřené vrstvy. Tím je vytvořen obraz topografie vzorku. Toto zařízení je také velmi vhodné pro stanovení tloušťky transparentních vrstev. (Vrbata 2023)

### Konfokální mikroskop

Jedná se o optický mikroskop, který používá jako zdroj světla laser. Laserové světlo má menší aperturu a tím docílí většího rozlišení než klasický optický mikroskop. Mikroskop je navíc vybaven bodovým snímáním vzorku zaostřeným v jedné rovině. Snímání probíhá postupně vertikálně pro několik rovin. Po snímání všech rovin software sestaví výsledný 3D obraz profilu povrchu vzorku. Jedná se o bezkontaktní metodu poskytující rozlišení dosahující  $0,1\mu\text{m}$ . Princip je takový, že laser přes bodovou (konfokální) clonu a objektiv osvětluje měřený povrch (viz obr. 2.9). Odražené paprsky prochází zpět objektivem a dichroickým zrcadlem směrem k bodové cloně, kde dochází k odfiltrování světla z jiných rovin. Následně paprsky míří přes fotonásobič k detektoru. (Běla 2022)



Obrázek 2.9: Schéma konfokálního mikroskopu (SR 2023)

### Mikroskop atomárních sil

Mikroskop atomárních sil (AFM) je založen na principu působení elektromagnetických sil mezi sondou a povrchem vzorku. Jako sonda zde vystupuje cantilever, který je složen z pružného raménka (nosníku), na jehož konci je umístěn ostrý hrot, jehož špičku by měl ideálně tvořit jediný atom. Hrot se pohybuje těsně nad povrchem zkoumaného vzorku řádek po řádku. Vlivem působení různé velikosti přitažlivých a odpuzivých elektromagnetických sil se raménko ohýbá. To je následně detekováno pomocí laserového paprsku, který na raménko míří. Určitý ohyb raménka způsobí odraz paprsku laseru na různé místo na detektoru, a v závislosti na místě dopadu laserového svazku vyšle určitou intenzitu elektrického signálu do softwaru, který podle něho následně sestaví profil povrchu vzorku ve 3D. (Clauberg 2015)

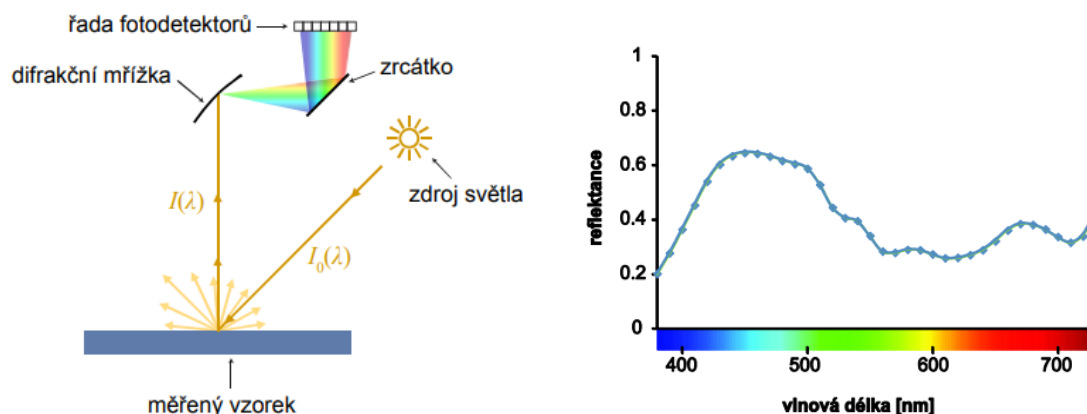
### 2.4.3 Barevný odstín

Pro stanovení či kontrolu barevného odstínu vzorku jakéhokoliv materiálu se používá spektrofotometr. Ten disponuje zdrojem bílého světla, které lze rozložit na jednotlivé barvy záření s vlnovými délkami v rozmezí 380-750 nm. Princip měření je takový, že přístroj vyšle



na povrch vzorku bílé světlo, ze kterého je charakteristická část světla pohlcena a část odrazena na difrakční mřížku (viz obr. 2.10). Odražené světlo se na difrakční mřížce rozloží na jednotlivé vlnové délky záření, které potom pokračují na řadu fotodetektorů. Na detektory dopadají jednotlivé intervaly vlnových délek záření o určité intenzitě. (Šulla 2022)

Poměr mezi intenzitou odraženého a absorbovaného světla se nazývá reflektance. Z naměřených hodnot reflektance se následně sestrojí reflexní spektrum charakteristické pro barevnost daného vzorku (viz obr. 2.10).

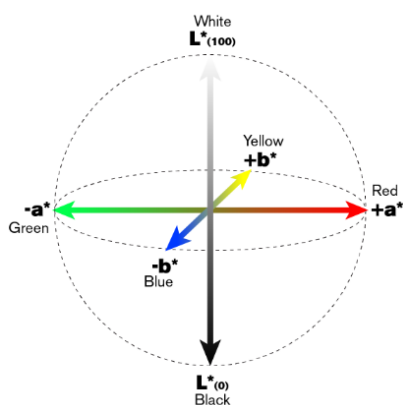


Obrázek 2.10: Schéma spektrofotometru a příklad reflexního spektra modrého vzorku (Panák 2023)

Z reflexního spektra se pak vypočítají souřadnice barevného prostoru CIE (viz obr. 2.11), jehož souřadnice jsou ve tvaru  $[L^*, a^*, b^*]$ . Osa  $L^*$  určuje měrnou světlost, tedy zda je barva světlá nebo tmavá. Na ose  $a^*$  se nachází rozpětí barev od zelené po červenou a na ose  $b^*$  je rozpětí barev od modré po žlutou. Tento systém souřadnic nám umožňuje přesně popsat jakýkoliv barevný odstín. (Panák 2023)

Změnu barevného odstínu mezi dvěma vzorky lze určit pomocí barevné odchylky  $\Delta E$ , která je dána vztahem:

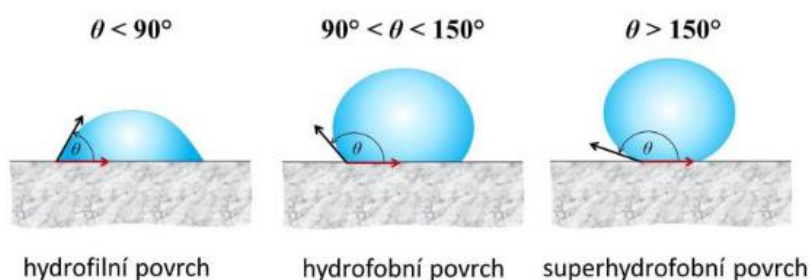
$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$



Obrázek 2.11: Znázornění barevného prostoru CIE a jeho hlavních os (Nazdar 2023)

## 2.4.4 Úhel smáčení

Kontaktní úhel smáčení je úhel, který vzniká mezi rozhraním kapalina–plyn a pevná látka–kapalina. Podle velikosti úhlu smáčení lze určit, do jaké míry bude povrch nanesené vrstvy smáčen danou kapalinou. Kapalina povrch více smáčí, čím menší je úhel smáčení. Pro vodu je smáčený povrch nazýván jako hydrofilní, pokud je úhel  $\theta$  menší než  $90^\circ$  (viz obr. 2.12). Naopak nesmáčivý povrch je považován za hydrofobní a platí pokud je úhel smáčení větší než  $90^\circ$ . Pokud je úhel větší než  $150^\circ$  můžeme mluvit dokonce o superhydrofobním povrchu. (Novák 2008)



Obrázek 2.12: Rozdělení jednotlivých druhů povrchů podle jejich smáčivosti (Peer et al. 2019)

Stanovení úhlu smáčení lze provést následujícím postupem. Na povrch vrstvy se nanese kapka příslušného roztoku. Rozhraní kapky se pak z bočního směru zaostří na videokameru, která přenáší obraz na monitor. Následně se pořídí fotografie rozhraní kapky, u kterého se pomocí příslušného softwaru určí kontaktní úhel smáčení. Přesnost měření se pohybuje okolo  $1^\circ$  a závisí jak na homogenitě povrchu vzorku, tak na rychlosti obsluhy zařízení ve fázi pořízení fotografie. (Holub 2010)

## 2.4.5 Adhezní vlastnosti

Adheze je mechanická pevnost spojující dva různé materiály k sobě. Jednotlivé způsoby testování adhezních vlastností tenkých vrstev se zaměřují na zkoumání velikosti vazebných sil mezi vrstvou a substrátem.

### Vrypová zkouška

Vrypová zkouška, známá taky pod pojmem Scratch test, spočívá v postupném zatěžování Rockwelova indentoru k povrchu tenké vrstvy. Indetor se zároveň během postupného zatěžování pohybuje konstantní rychlostí po povrchu vrstvy a postupně proniká do tenké vrstvy, kde vytváří vryp. Pomocí optického mikroskopu, který je součástí zařízení, jsme schopni pozorovat rozsah a typ poškození. Lze také určit místo a příslušnou hodnotu síly, při které došlo k prvotnímu porušení vrstvy nebo oddělení vrstvy od substrátu. K přesnějšímu stanovení těchto parametrů porušení je vhodné použít souběžné měření akustické emise. (Fořt 2014)

### **Odrhová zkouška**

Zkouška spočívá v přilepení rovinného čela trhacího stroje k povrchu tenké vrstvy. Trhací stroj následně působí odtrhovou silou kolmo k rovině vrstvy. Test slouží k určení hodnoty síly potřebné k odtržení tenké vrstvy od substrátu. Důležitou roli hraje použité lepidlo, které musí mít vyšší pevnost k vrstvě, než je vazební síla mezi vrstvou a substrátem.

### **Zkouška smykem**

Zkouška probíhá na podobném principu jako odtrhová zkouška. Rozdíl je jen v působení síly v rovnoběžném směru s povrchem tenké vrstvy.

### **Zkouška ohybem**

Testovaná vrstva je ohýbaná přes cylindrické trny definovaného průměru. Test spočívá v nalezení minimálního průměru cylindrického trnu, při kterém začne docházet k poškození vrstvy. Vyhodnocení se provádí pomocí optického mikroskopu. (Šilingová 2021)

### **Zkouška tahem**

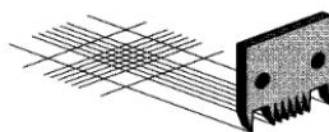
Zkouška spočívá v postupném tahovém namáhání substrátu s tenkou vrstvou a sledování vzniku poškození. Tato zkouška má vliv především na dvojici materiálu, které mají velmi rozdílné mechanické vlastnosti.

### **Mercedes test**

Test je založen na vtlačování Rockwellova indentoru do vzorku s tenkou vrstvou konstantní silou 1 500 N. Vzniklý rozsah poškození se vyhodnocuje pomocí tabulek, které obsahují srovnávací obrázky s jednotlivými typy poškození. Rozsah poškození se kvalifikuje do několika tříd.

### **Mřížkový test**

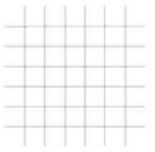
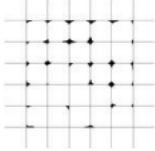
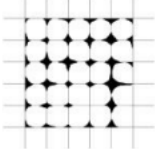
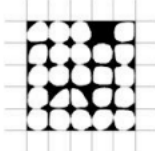
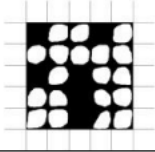
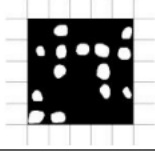
Princip této metody spočívá ve vytvoření pravidelné mřížky pomocí několika rovných řezů na povrchu vrstvy (viz obr. 2.13). Řez se provádí pomocí speciálního vícečepelového řezného nástroje, který je pomocí dvou tahů schopen vytvořit pravidelnou pravoúhlou mřížku. Jednotlivé řezy musí projít skrz celou tloušťku povlaku až k substrátu.



Obrázek 2.13: Princip mřížkového testu (Škvařil 2018)

Mřížka je následně očištěna a porovnána s tabulkou adhezních tříd, které klasifikují rozsah poškození (viz tab. 2.2). Podle rozsahu poškození je pak testovanému vzorku přiřazena adhezní třída.

Pro rozsáhlejší analýzu adhezních vlastností lze na vytvořenou mřížku nalepit speciální lepicí pásku, která se po uplynutí určité doby pod definovaným úhlem s konstantní rychlostí strhne. Následuje opět vyhodnocení podle adhezních tříd. (Rajtmajer 2016)

Adhezní třídy	Popis	Vzhled testované plochy po provedení testu adheze (šest paralelních řezů)
0	Hrany řezů jsou absolutně hladké, žádný ze čtverečků v mřížce se neodlupuje.	
1	Tenká vrstva je porušená jen minimálně, k porušení dochází především v rozích čtverečků. Celková velikost porušení není větší než 5 % z celkové plochy mřížky.	
2	Dochází k většímu odlupování tenké vrstvy v rozích čtverečků a/nebo podél hran řezů. Velikost porušení zůstává v rozsahu od 5 % do 15 % z celkové plochy mřížky.	
3	Vrstva se odlupuje ve velkém rozsahu v rozích čtverečků i podél hran řezů. Některé čtverečky můžou zcela odpadnout. Porušení mřížky je mnohem větší než 15 %, ale nepřesahuje 35 % celkové plochy mřížky.	
4	Některé čtverečky úplně odpadly, zbytek testované plochy je značně poškozen jak v rozích, tak i podél hran řezů. Poškození v rozsahu 35 % až 65 %.	
5	Nejhorší stupeň adheze, který signalizuje natolik závažné poškození testované plochy, že jeho rozsah nejde odhadnout ani podle adhezní třídy 4.	

Tabulka 2.2: Klasifikace adhezních tříd podle vzhledu poškození (Rajtmajer 2016)

## 2.4.6 Korozní odolnost

Koroze je jeden z nežádoucích způsobů degradace kovových materiálů, která je způsobená reakcí povrchu kovu s okolním prostředím. Průběh koroze závisí na druhu expozičního prostředí, struktuře a materiálovém složení povrchu vzorku. Koroze se může projevit změnou mechanických vlastností, vzhledu a hmotnosti materiálu. (Jarolímová 2020)

Testování korozní odolnosti se provádí korozními zkouškami, které lze rozdělit na expoziční metody a elektrochemické metody. Expoziční metody jsou zkoušky v korozních komorách o předem definovaném expozičním prostředí a době expozice. Důvodem využití expozičních metod je urychlení procesu koroze na řádově desítky až stovky hodin. Tyto metody probíhají většinou podle přesně stanovených norem klasifikující druh korozního prostředí. Elektrochemické metody využívají průchodu elektrického proudu přes vodivý povrch vzorku a měří korozní potenciál v závislosti na elektrickém proudu a čase. (Tittel 2019)

## 3 Experimentální část

### 3.1 Výroba tenkých vrstev

Tato kapitola se zabývá popisem naprašovacího zařízení, které bylo použito pro depozici všech vytvořených vrstev v rámci této diplomové práce. Je zde popsán postup předpřípravy vzorků před depozicí a postup naprašování vrstev.

#### 3.1.1. Popis použitého zařízení pro výrobu tenkých vrstev

K výrobě tenkých vrstev pro tuto diplomovou práci bylo využito naprašovací zařízení NP70 (viz obr. 3.1) od firmy KWS CZ s.r.o. sídlící v Opočně. Jedná se o naprašovací zařízení, které disponuje těmito parametry:



Obrázek 3.1: Naprašovací zařízení KWS NP70

#### **Depoziční komora**

Pracovní komora je ve tvaru kruhového zvonu z korozi-vzdorné oceli o průměru 50cm a výšce cca 35cm. Pracovní vzdálenost mezi terčem magnetronu a stolkem se substrátem je 12cm.

#### **Magnetron**

Zařízení disponuje čtyřmi kruhovými magnetrony o průměru terče 78mm. Jedná se o nevyvážený typ magnetronu (s permanentními magnety), které lze různě polohovat

a natáčet do různých směrů. Magnetrony mohou být provozovány jak v unipolárním režimu, tak v bipolárním režimu. Při bipolárním režimu jsou dva magnetrony nasměrovány na jeden substrát a naprašování probíhá z obou magnetronů najednou. Maximální výkon provozu magnetronů je 10kW. Zadní povrch terče je při depozici přímo chlazen protékající vodou.

### **Držák substrátů**

Ve spodní části pracovní komory se nachází pracovní stůl, který lze různou rychlostí otáčet podél své vertikální osy ve středu pracovní komory. Na stůl je možné přivést záporný potenciál pro předpětí na substrátu.

### **Ohřev substrátu**

Zařízení umožňuje možnost přehřevu substrátu před samotnou depozicí i během ní. K tomu je určen přídavný stoleček kruhového tvaru o průměru 7cm, který se upevňuje do pracovního stolku. Maximální teplota ohřevu je stanovena až na 350°C.

### **Zdroj**

Zařízení disponuje pulzním zdrojem v rozsahu 1-80kHz o celkovém výkonu 10kW. Výstupní napětí zdroje lze nastavit buď v režimu DC, nebo pulzní s nastavitelnou střídou a frekvencí. Střída se zde nastavuje jako šířka jednotlivých pulzů dodávaného výkonu pro konkrétní magnetrony. Zařízení dále umožňuje měření aktuálního napětí a proudu na magnetronech, či měření efektivního a odraženého výkonu napájení.

### **Čerpací systém**

Proces evakuace komory zde zajišťuje dvoustupňový suchý čerpací systém. První stupeň zajišťuje vývěva typu SCROLL. Druhý stupeň zajišťuje turbomolekulární vývěva. Kontrola aktuálního tlaku v komoře je zajištěna pomocí třech digitálních vakuometrů. Jedna měrka slouží k měření v oblasti nízkého vakua (Pirani), další k měření v rozmezí vysokého vakua (Pening). Třetí měrka slouží k měření vakua na výstupu z turbo molekulární vývěvy (Pirani).

### **Pracovní plyn**

Depoziční komora disponuje třemi přívody pro pracovní plyny. Jeden přívod je zpravidla určen pro inertní plyn, v našem případě Argon, a zbylé dva pro reaktivní plyny. K přesnému připouštění pracovních plynů slouží regulátory hmotnostního průtoku (MFC ventily) s rozsahem 0-200scm.

### **Chladicí systém**

Do zařízení je připojen přívod vody, která je usměřována do několika chladících okruhů. Jednotlivé okruhy zajišťují přímé chlazení jednotlivých magnetronů, procesního zdroje a turbomolekulární vývěvy. Každý chladicí okruh obsahuje na svém konci snímač průtoku a aktuální teploty. Tím je možné kontrolovat množství chladicí kapaliny a zahřívání jednotlivých součástí.

Zařízení je dále vybaveno několika přídavnými ventilátory. Jejich funkcí je odvádět přebytečné teplo z prostoru strojovny s elektronickými součástkami, které se mohou při procesu zahřívát.

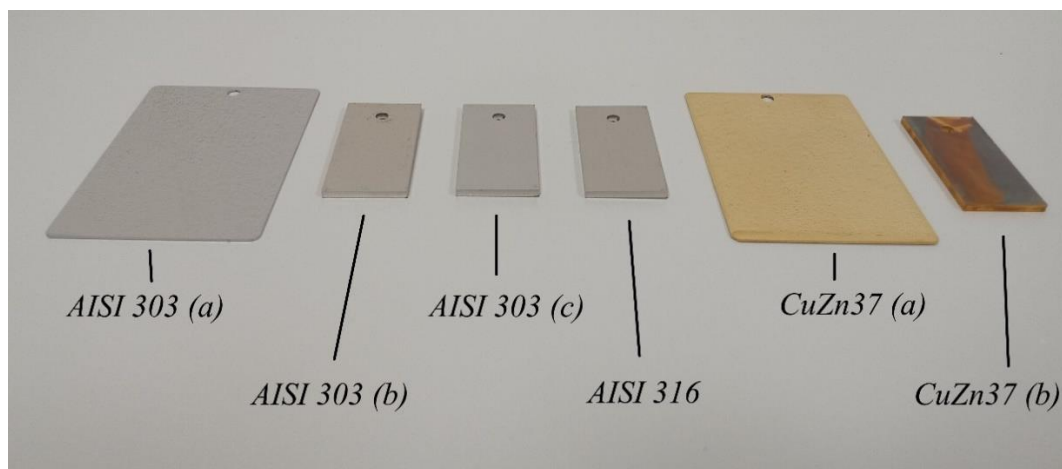
## Řídicí systém

Celé zařízení je řízeno pomocí systému PLC a ovládacího panelu obsluhy. Řízení procesů v zařízení může probíhat ve třech uživatelských režimech.

- Automatický režim – veškeré procesy se provádí automaticky podle předem naprogramovaných receptur.
- Poloautomatický režim - veškeré procesy se provádí podle předem naprogramovaných receptur, ale lze do nich během jednotlivých procesů zasahovat obsluhou zařízení.
- Ruční režim – veškeré nastavení jednotlivých parametrů procesu provádí přímo sama obsluha zařízení v reálném čase.

### 3.1.2 Předpříprava vzorků

Jako materiály substrátu pro napařování tenkých vrstev byly zvoleny mosaz *CuZn37*, nerezová ocel *AISI 303* a *316* (viz obr. 3.2). Substráty měly různé mechanické opracování povrchu. Tím bylo docíleno různé počáteční drsnosti povrchu (viz tab. 3.1), které umožňuje sledovat případné změny drsnosti povrchu v závislosti na tloušťce deponované vrstvy (viz kap. 3.2.1).



Obrázek 3.2: Vzor jednotlivých substrátů určených k depozici

Označení substrátu	Rozměr	Drsnost povrchu [nm]
<i>AISI 303(a)</i>	100 × 70 × 1 mm	27 ± 3
<i>AISI 303(b)</i>	60 × 30 × 3 mm	81 ± 9
<i>AISI 303(c)</i>	60 × 30 × 3 mm	500 ± 20
<i>AISI 316</i>	60 × 30 × 3 mm	700 ± 200
<i>CuZn37(a)</i>	100 × 70 × 1 mm	26 ± 4
<i>CuZn37(b)</i>	60 × 30 × 3 mm	560 ± 40

Tabulka 3.1: Substráty určené k depozici

Uvedená drsnost povrchu byla stanovena pomocí konfokálního mikroskopu. V rámci předpřípravy byly jednotlivé vzorky roztríděny podle mechanického opracování povrchu a třídy oceli, která byla určena pomocí ručního rentgen fluorescenčního spektrometru DELTA PROFESSIONAL. Přístroj je schopen pomocí předem nahraných spekter jednotlivých tříd ocelí, přesně určit o jakou třídu oceli se jedná. Následovalo stržení ochranné folie po laserovém řezání a důkladné odstranění zbytků lepidla ze vzorků.

Vzorky se umístily do vyhřáté provozní mycí linky s ultrazvukem, která slouží k mytí substrátů před procesem galvanizace. Po dokončení procesu mytí byly vzorky opatrně zabaleny do tenkého papíru a přesunuty k naprašovacímu zařízení, kde byly opatrně vyjmuty, a bez dalších procedur umístěny přímo na karusel do depoziční komory.

### 3.1.3 Postup naprašování vrstev Cu, Cr, Ni, Ti a Nerez 316

Do depoziční komory je na karusel umístěn vzorek substrátu. Následně se komora uzavře a zapne se proces evakuace komory. Dojde k sepnutí primární vývěvy pro vytvoření nízkého vakua. Během toho se pomalu zvyšuje výkon turbomolekulární vývěvy. Rychlost čerpání primární vývěvou postupně exponenciálně klesá. Po dosažení mezní hodnoty tlaku pro primární vývěvu se čerpání přepne na sekundární vývěvu. Jakmile je dosaženo pracovního tlaku, tak se na ovládacím panelu zadají konkrétní parametry depozice.

Nejdříve je nastavena hodnota pracovního tlaku a množství připouštění inertního plynu. Následuje nastavení parametrů procesních zdrojů, mezi které patří: nastavení potenciálů na komoře, anody magnetronu a stolku se substrátem. Potom se vybere napěťový rozsah zdroje a magnetron, ze kterého se bude naprašovat. Posledním krokem je zadání hodnoty efektivního výkonu zdroje přivedeného na magnetron. Jakmile byly nastaveny všechny tyto parametry, byl spuštěn zdroj napětí, čímž se zahájil proces samotné depozice.

Tímto postupem byly deponovány všechny vytvořené vrstvy z těchto pěti materiálů. Jednotlivé postupy se lišily pouze časem depozice (viz tab. 3.2).

Deponovaná vrstva	Čas depozice					
Cu	15s	30s	60s	120s	240s	480s
Cr						
Ni						
Nerez						
Ti	1min	2min	4min	8min	16min	32min

Tabulka 3.2: Čas jednotlivých depozic

Po uplynutí konkrétní doby depozice, byl proces naprašování zastaven. Nejdříve je vypnut zdroj napětí a regulace pracovního tlaku. To vede k navrácení tlaku v komoře na hodnoty



vysokého vakua. Následně je zadán pokyn k otevření komory, který vede k automatickému bezpečnému odstavení turbomolekulární vývěvy a zavzdušnění komory. Po dosažení atmosférického tlaku je komora otevřena a vzorek s deponovanou vrstvou vyjmut.

## 3.2 Postup měření a testování vybraných vlastností tenkých vrstev

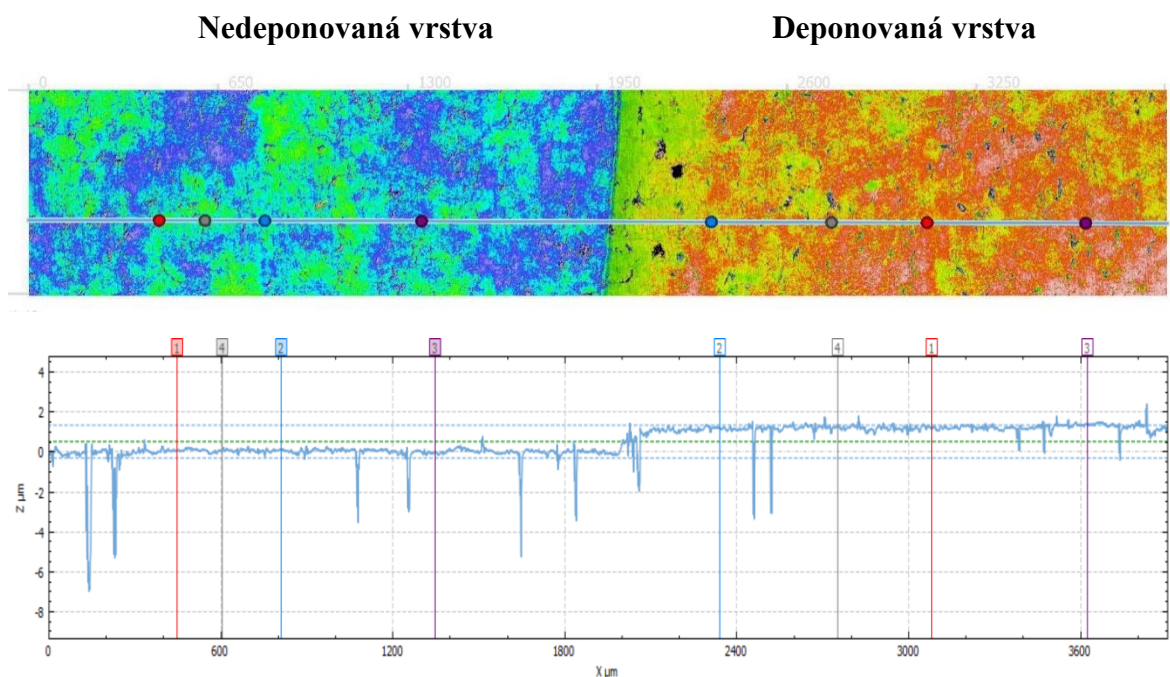
V této kapitole jsou popsány postupy měření a testování vybraných vlastností vytvořených tenkých vrstev. Měření a testování bylo zaměřeno především na stanovení tloušťky vrstvy, drsnost povrchu, úhel smáčení, barevný odstín, adheze vrstvy a testování v korozních komorách.

### 3.2.1 Postup stanovení tloušťky vrstvy

Stanovení tloušťky vrstvy bylo provedeno pomocí krycí metody a XRF spektrometrie.

#### Krycí metoda

Naprašovaný vzorek byl z části zakryt hliníkovou destičkou ve tvaru čtverce o rozměrech hrany 5mm. Po depozici tak vzniknul na vzorku ostrý přechod, který označoval kde je vrstva deponovaná a kde naopak není. Změření výškového rozdílu bylo provedeno konfokálním mikroskopem Sensofar S Neox. Následně se vybralo několik konkrétních míst (bodů), kde nebyla vrstva deponována, a kde proběhla depozice vrstvy (viz obr. 3.3). Z naměřených výškových rozdílů mezi těmito body byla potom stanovena přibližná tloušťka vrstvy.



Obrázek 3.3: Ukázka způsobu měření tloušťky vrstvy krycí metodou

### **XRF spektrometrie**

Vzorky tenkých vrstev naprášené na substrátech *AISI 303(a)* a *CuZn37(a)* byly podrobeny měření tloušťky pomocí rentgen fluorescenční (XRF) spektrometrie. Podmínkou bylo přístroj nakalibrovat na příslušné standardy. K dispozici byly tři standardy v určitém rozmezí (viz tab. 3.3). Bylo tedy teoreticky možné měřit tloušťku vrstvy pouze u těchto tří vrstev.

<b>Deponovaná vrstva</b>	<b>Kalibrační standardy [<math>\mu\text{m}</math>]</b>		
Cu	1,24	5,14	12,2
Cr	0,31	1,07	2,08
Ni	0,5	5,18	-

Tabulka 3.3: Hodnoty tlouštěk kalibračních standardů

### **3.2.2 Postup stanovení drsnosti povrchu**

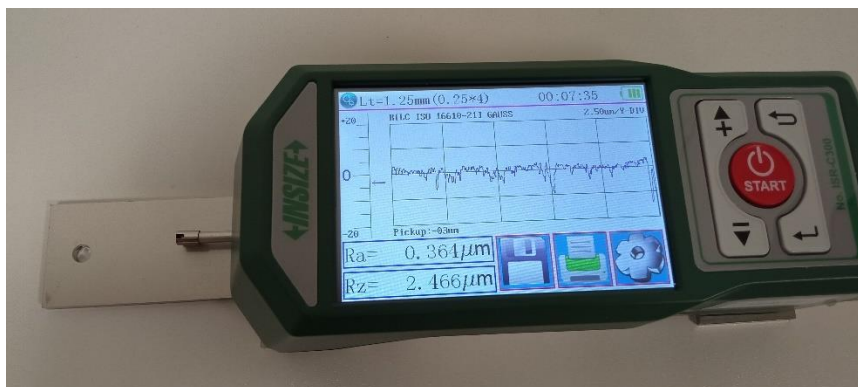
Stanovení drsnosti povrchu bylo provedeno dvěma různými metodami. Jednak pomocí drsnoměru, tak pomocí konfokálního mikroskopu (viz. obr 3.4).



Obrázek 3.4: Drsnoměr INSEZE ISR-C300 a konfokální mikroskop Sensofar S Neox (Calibr 2023), (schaefer 2014)

#### **Stanovení drsnosti povrchu za použití drsnoměru**

Drsnost povrchu byla měřena pomocí dotykového drsnoměru INSIZE ISR-C300 s odpojitelnou sondou. Toto zařízení měří drsnost povrchu na principu profilometru (viz kap. 2.4.2).

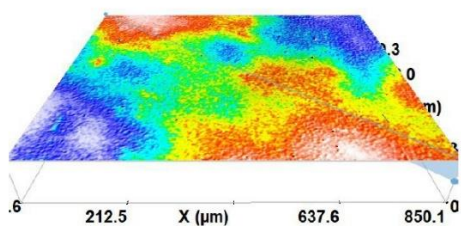


Obrázek 3.5: Ukázka principu měření drsnoměru INSEZE ISR-C300

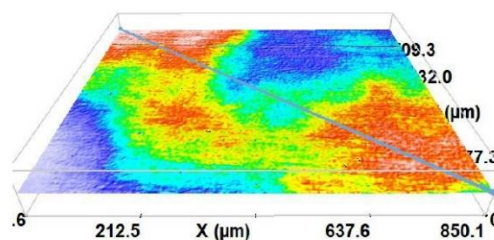
Výslednou hodnotou měření je aritmetická střední odchylka profilu  $R_a$ . Vzdálenost jednoho měření na vzorku byla 4mm. Měření bylo provedeno pro každý vzorek vždy šestkrát. Tři měření v jednom směru a další tři měření v kolmém směru na předchozí měření. Z naměřených dat na jednom vzorku byla následně stanovena průměrná hodnota drsnosti povrchu vzorku. Kalibrace zařízení byla provedena po každých 30 měřeních. Výsledné hodnoty ze stanovení drsnosti povrchu pomocí drsnoměru jsou uvedeny v tabulce 7.1.

#### **Stanovení drsnosti povrchu za použití konfokálního mikroskopu**

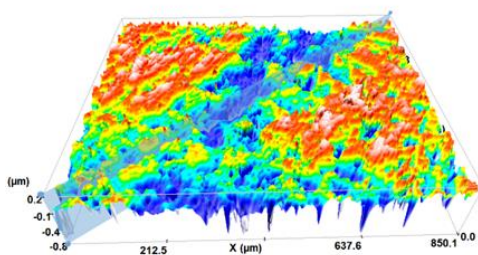
K měření byl použit konfokální mikroskop Sensofar S Neox, který pracuje na principu popsaném v kapitole 2.4.2. Slouží tedy k určení drsnosti povrchu v ploše 2D. Ke snímání povrchu vzorku byl použit objektiv s celkovým zvětšením 25x. Snímání povrchu vzorku bylo provedeno v automatickém režimu, který je schopen povrch vzorku automaticky zaostřit a zvolit správný jas světla. Snímky zobrazující strukturu povrchu jednotlivých substrátů jsou zobrazeny na obrázku 3.6.



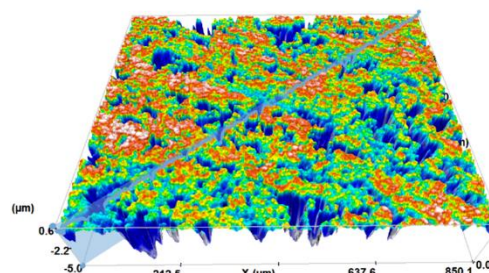
*AISI 303(a)*



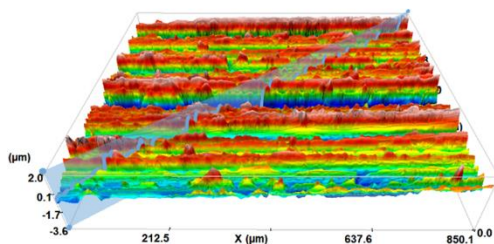
*CuZn37(a)*



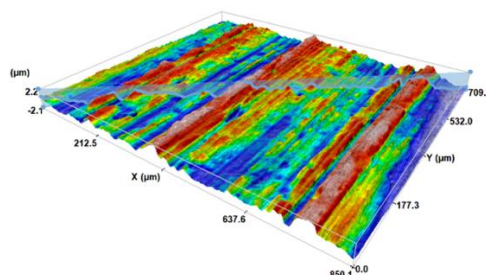
*AISI 303(b)*



*AISI 303(c)*



*AISI 316*



*CuZn37(b)*

Obrázek 3.6: Snímky struktury povrchu jednotlivých substrátů

Software mikroskopu je ze snímku schopen následně určit drsnost povrchu v celé snímané ploše. Pro každý vzorek byly pořízeny vždy tři snímky na různých místech, ze kterých byla následně stanovena průměrná hodnota drsnosti povrchu. Výsledné hodnoty z měření drsnosti povrchu pomocí konfokálního mikroskopu jsou uvedeny v tabulce 7.2.

### 3.2.3 Postup stanovení úhlu smáčení

Zařízení, které bylo použito pro měření úhlu smáčení, disponuje manuálně posuvným stolem ve třech osách, videokamerou pro focení nanesené kapky a monitorem s příslušným softwarem pro zobrazení. Princip měření byl již dříve popsán v kapitole 2.4.4. Jako testovací kapalina byla použita destilovaná voda nanesená pomocí mikropipety v množství 5 $\mu$ l. Po nanesení kapky na povrch vzorku byl neprodleně pořízen snímek příslušné kapky (viz. obr. 3.7). Testovací kapalina byla nanášena vždy na tři odlišná místa na vzorku.



Obrázek 3.7: snímek testovací kapaliny na povrchu vzorku

Z vytvořených snímků byly pomocí příslušného softwaru určeny jednotlivé úhly smáčení, ze kterých byla vypočtena průměrná hodnota úhlu smáčení. Výsledné hodnoty z měření úhlu smáčení jsou k dispozici v tabulce 7.3.

### 3.2.4 Postup stanovení změny barevného odstínu

Stanovení barevného odstínu bylo provedeno pomocí přístroje Spectro Guide Gloss od výrobce BYK Gardner (viz. obr 3.8). Jedná se o spektrofotometr, který se využívá pro průmyslové účely k měření barevného odstínu a lesku jakéhokoliv pevného materiálu. Princip měření byl již dříve popsán v kapitole 2.4.3.



Obrázek 3.8: Spektrofotometr Byk Spectro Guide Gloss (Gamin s.r.o. 2023)

Zařízení bylo nejdříve nakalibrováno pomocí příslušných standardů. Následně jsme mohli zahájit měření. Přístroj se přiložil pomocí speciální šablony k povrchu vrstvy a stisklo se tlačítko k zahájení měření. Po cca 8 sekundách bylo měření dokončeno. Potom nás přístroj vyzval k potvrzení uložení právě provedeného měření do paměti zařízení.

Jednotlivá měření byla provedena zhruba uprostřed vzorku a pro každý vzorek vždy třikrát. Stanovení barevného odstínu tenkých vrstev bylo provedeno pouze na vzorcích, které byly nanášeny na substráty *AISI 303(a)*, *CuZn37(a)*. Veškerá data uložená v zařízení byla následně stažena ke zpracování. Výsledné hodnoty naměřených souřadnic barevného prostoru CIE jsou uvedeny v tabulce 7.4 a 7.5.

Z těchto výsledných souřadnic barevného prostoru CIE byla následně vypočtena hodnota změny barevného odstínu pro vrstvy ze stejného materiálu. Tato hodnota byla stanovena vždy ku vrstvě s nejdelším časem depozice. Změna barevného odstínu byla určena pomocí barevné odchylky  $\Delta E^*$ , která je dána vztahem:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

### 3.2.5 Postup stanovení adheze vrstvy

Stanovení adheze vrstvy substrátu bylo provedeno pomocí mřížkového testu. Princip měření byl již dříve popsán v kapitole 2.4.5. Ke stanovení bylo užito měřicí sady Elcometer 107 (viz. obr 3.9), a pro následné vyhodnocení digitální mikroskop KEYENCE VHX-5000 (viz. obr 3.11).

Na každém vzorku byla nejprve pomocí speciálního řezného nástroje vyříznuta mřížka tak, aby vznikla viditelná plocha 25 čtverců (5x5). Vzdálenost jednotlivých řezných břitů od sebe je 1mm. Plocha jednoho čtverce je tedy 1 mm<sup>2</sup>. Po vytvoření mřížky byl vzorek umístěn pod digitální mikroskop, kde se nechal vytvořit snímek mřížky pro pozdější hodnocení. Tento způsob testování odpovídá technické normě: ČSN EN ISO 2409.

Druhou částí testu bylo nalepení lepicí pásky přímo na vzniklou mřížku. Následně byla páska vyhlazena, aby byla na všech místech v kontaktu s povrchem vrstvy a nedocházelo ke tvorbě vzduchových bublin. Po uplynutí cca 3 minut, byla páska stržena. Stržení pásky probíhalo pod úhlem 60° a rychlostí mezi 0,5-1 sekundy. Následovalo opět pořízení snímku mřížky na digitálním mikroskopu.



Obrázek 3.9: Měřicí sada Elcometer 107 (Elcometer limited 2023)

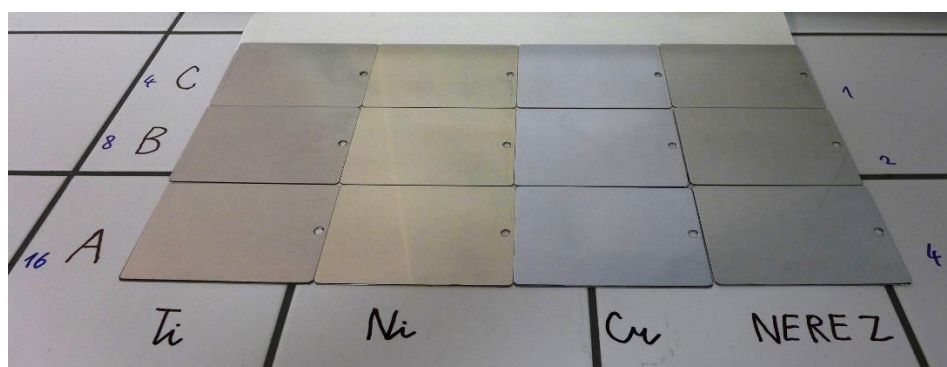
### 3.2.6 Testování v korozních komorách

Testování vrstev na odolnost proti korozi a různým vlivům prostředí bylo provedeno ve třech různých typech komor, z nichž každá poskytovala různý druh simulovaného prostředí. K testování byla použita solná komora, kondenzační komora a klimatická komora. Jednotlivé parametry prostředí pro testování jsou popsány zvlášť pro každou komoru níže. Během testu probíhalo také průběžné sledování vlivu konkrétního prostředí na kvalitu

vzorků. Sledování probíhalo jak pomocí vizuální oční kontroly, tak pomocí digitálního mikroskopu, ze kterého byly pořízeny snímky pro vyhodnocení.

### Hodnocení vlivu prostředí na vzorky

Hodnocení vlivu prostředí na vzorky bylo prováděno vždy po uplynutí určité doby expozice v komoře. První hodnocení bylo provedeno po 24 hodinách a další pak tak, aby doba mezi hodnocením nebyla více jak dvojnásobně delší než dosavadní doba expozice v komoře. Vzorky byly po vyjmutí z komor nejprve osušeny fénem (bez ohřevu) a umístěny na laboratorní stůl k porovnání mezi sebou (viz. obr. 3.10). Následovala fotodokumentace pomocí fotoaparátu.



Obrázek 3.10: Fotografie vzorků před zahájením testování

Následně byl každý vzorek umístěn pod digitální mikroskop KEYENCE VHX-5000 pro detailnější zkoumání případného narušení kvality povrchu (viz. obr 3.11). Pozorování bylo provedeno při zvětšení objektivu 20x a při dvou různých režimech osvětlení, protože pod každým byl lépe vidět jiný druh defektu. Z každého vzorku byl pořízen snímek, a z těchto snímků pak vznikla výsledná fotodokumentace, která je k dispozici v sekci Přílohy (tabulky 7.6 až 7.17).

Po vyhodnocení byly vzorky umístěny zpět do jednotlivých komor. Hodnocení probíhalo nejdříve vždy pro všechny vzorky z jedné komory najednou. Teprve potom následovalo hodnocení z další komory tak, aby se docílilo co nejkratšího času vystavení vzorků mimo simulované prostředí v komoře.



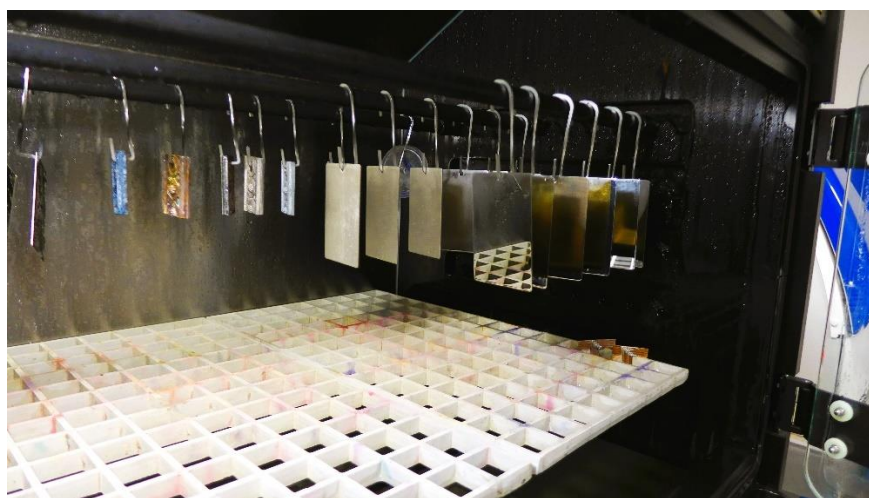
Obrázek 3.11: Digitální mikroskop KEYENCE VHX-5000 (mendelu.cz 2023)

### **Kondenzační komora**

Testování bylo provedeno v kondenzační komoře CON 300-FL, která simuluje vliv vlhkého korozního prostředí na vložené vzorky. Během všech provedených testů byla komora stále v nepřetržitém provozu při těchto nastavených parametrech:

- Teplota: 40°C
- Relativní vlhkost: 100%

Objem komory je 300 dm<sup>3</sup>. Vzorky byly v komoře rovnoměrně zavěšeny pomocí háčků, které se nachází ve vrchní části komory (viz. obr 3.12). Tento způsob testování odpovídá zároveň technické normě: ČSN EN ISO 6270.



Obrázek 3.12: Zavěšení vzorků v kondenzační komoře CON 300-FL



### Solná komora

Testování bylo provedeno v komoře Ascott S120 (viz. obr 3.13), která simuluje vliv vysoce korozní solné mlhy (5% NaCl) na vložené vzorky. Testování probíhá 24h/den v několika cyklech. Jeden cyklus trvá 4 hodiny a je naprogramován ve třech krocích. V prvním kroku probíhá rozprašování solné mlhy při konstantní teplotě 35°C. V druhém kroku následuje pouze samotný ohřev komory na 50°C (sušení). V třetím kroku probíhá samovolné chladnutí komory.

Takto se cyklus neustále opakuje, až do doby, kdy je komora otevřena ke kontrole. Následuje hodnocení vzorků a stanovení určitých parametrů právě proběhlého testu. Mezi tyto parametry se řadí:

- Spád solné mlhy na plochu 1dm<sup>2</sup>: (1-2 ml/h)
- Parametry solného roztoku  
koncentrace NaCl: (4,5 - 5,5) %  
pH: 6,5 - 7,2  
vodivost: (68 - 80) μS/cm

Objem komory je 120 dm<sup>3</sup>. Vzorky jsou v komoře rovnoměrně rozmístěny v drážkách plastového držáku, který se nachází ve spodní části komory (viz. obr 3.13). Po skončení testu jsou vzorky ostříknuty destilovanou vodou a případně vyjmuty k hodnocení. Před zahájením dalšího testu jsou vzorky přemístěny na jinou polohu ve stojanu a pootočený o 90° tak, aby byl vyloučen vliv umístění vzorku na korozní odolnost. Tento způsob testování odpovídá zároveň technické normě: ČSN EN ISO 9227.



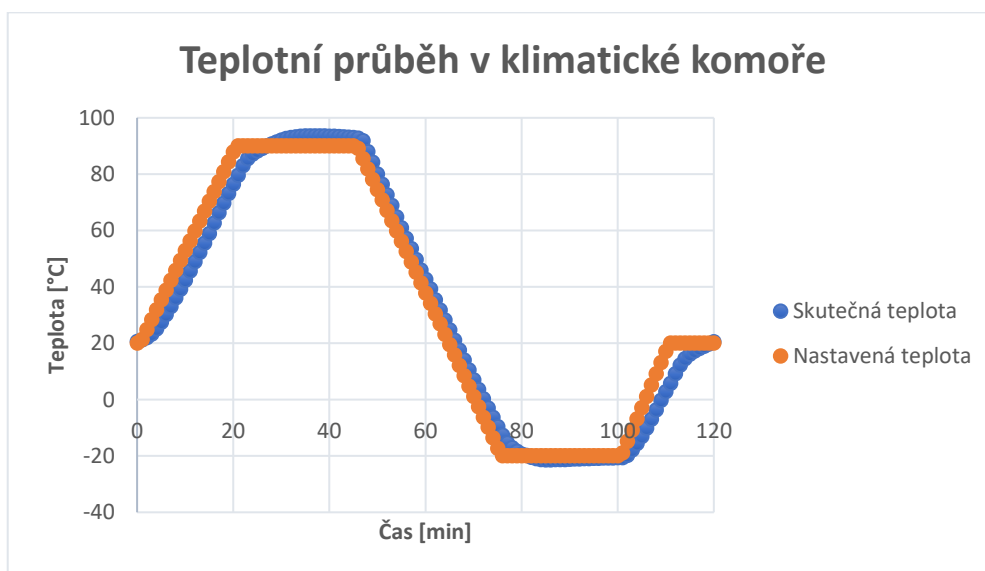
Obrázek 3.13: Testovací komora Ascott S120 a umístění vzorků v komoře (Ascott Analytical Equipment 2023)

### Klimatická komora

Testování bylo provedeno v komoře WEISS WKL 140, která simuluje prostředí o konkrétní dané teplotě v rozmezí od -40°C do +180°C. Dále je zde možné naprogramovat cyklus, při kterém se teplota mění v závislosti na času expozice.

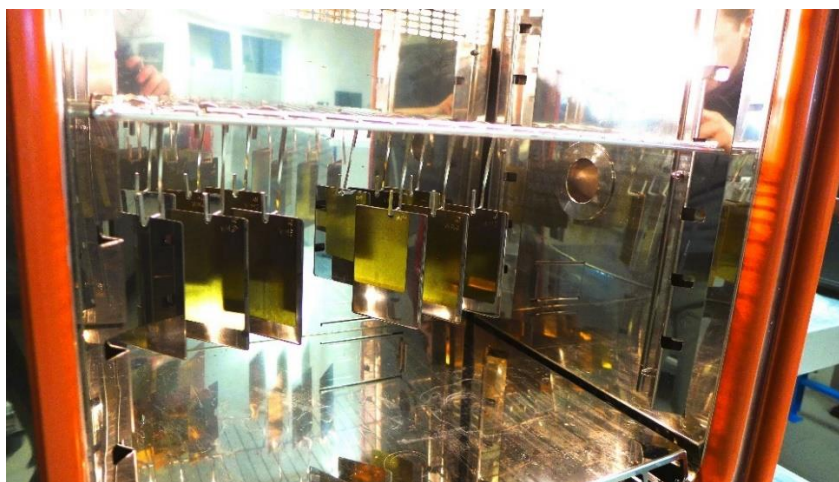
Pro testování připravených vzorků byl naprogramován cyklus (viz. obr. 3.14), který obsahoval tři určité teploty, při kterých probíhala po určitou dobu expozice na vzorky:

- Čas jednoho cyklu: 120 min
- Maximální teplota: 90°C (25 min)
- Minimální teplota: -20°C (25 min)
- Laboratorní teplota: 20°C (10 min)



Obrázek 3.14: Graf průběhu teplot v klimatické komoře

Mezi jednotlivými nastavenými teplotami probíhalo po určitý čas postupné ohřívání, či ochlazování. Z obrázku 3.14 je vidět porovnání vždy aktuálně nastavené teploty se skutečnou teplotou v komoře. Objem komory je 100 dm<sup>3</sup>. Vzorky byly v komoře rovnoměrně zavěšeny pomocí háčků, které se nachází uprostřed komory (viz. obr. 3.15). Vyjmutí vzorků z komory pro hodnocení probíhalo až po ukončení celého jednoho cyklu, tedy když teplota v klimatické komoře dosáhla 20°C.



Obrázek 3.15: Zavěšení vzorků v klimatické komoře WEISS WKL 140

## 4 Výsledky a diskuze

Tato kapitola pojednává o výsledcích měření a testování vybraných vlastností tenkých vrstev popsaných v předchozí kapitole. Výsledné hodnoty jsou ve tvaru intervalu spolehlivosti, který byl určen na základě průměrné hodnoty, směrodatné odchylky všech měření a 95% úrovní spolehlivosti.

### 4.1 Výsledky ze stanovení tloušťky vrstvy

#### Krycí metoda

Hodnoty přibližné tloušťky vrstev v závislosti na deponovaném materiálu a času depozice jsou v tabulce 4.1. Pro vrstvy s nižším časem depozice nebylo stanovení tloušťky vrstvy adekvátně proveditelné.

Substrát	Deponovaná vrstva	Tloušťka vrstvy [nm] v závislosti na době depozice					
		15 s	30 s	60 s	120 s	240 s	480 s
<i>AISI 303(b)</i>	Cu	-	-	-	-	500 ± 200	1200 ± 200
<i>AISI 303(b)</i>	Cr	-	-	-	-	300 ± 200	800 ± 200
<i>AISI 303(b)</i>	Ni	-	-	-	-	300 ± 200	500 ± 200
<i>AISI 303(b)</i>	Nerez	-	-	-	-	200 ± 200	400 ± 200
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
<i>AISI 303(b)</i>	Ti	-	-	-	-	400 ± 200	800 ± 200

Tabulka 4.1: Tloušťky vrstev stanovené krycí metodou

#### XRF spektrometrie

Hodnoty stanovené tloušťky vrstev v závislosti na deponovaném materiálu a času depozice jsou v tabulce 4.2. Každý standard byl k dispozici pro jiné detekční rozmezí tlouštěk. Proto nebyl XRF spektrometr schopen stanovit nižší tloušťky u vrstev mědi a niklu.

Substrát	Deponovaná vrstva	Tloušťka vrstvy [nm] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
<i>AISI 303(a)</i>	Cu	-	-	-	-	-	1160 ± 120
<i>CuZn37(a)</i>	Cr	12 ± 5	37 ± 5	80 ± 10	160 ± 20	340 ± 40	660 ± 70
	Ni	-	-	50 ± 10	170 ± 20	370 ± 40	790 ± 80

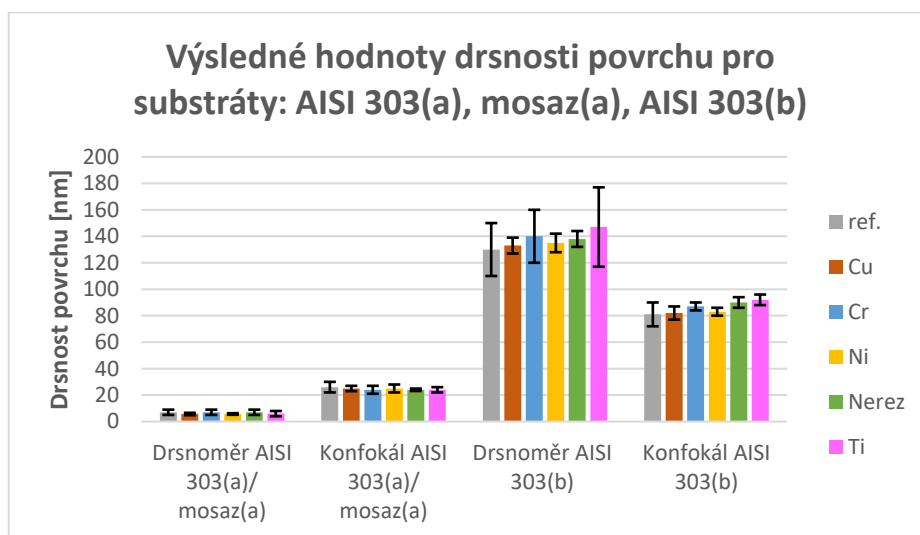
Tabulka 4.2: Tloušťky vrstev stanovené XRF spektrometrií

Vzhledem ke stejným výrobním parametrům všech druhů vrstev můžeme porovnat rychlosti naprašování jednotlivých materiálů. Je vidět, že nejrychlejší růst vrstvy probíhá u depozice mědi. Naopak nejpomalejší je depozice titanu. Vrstvy Ni, Cr a nerez rostou přibližně stejně rychle.

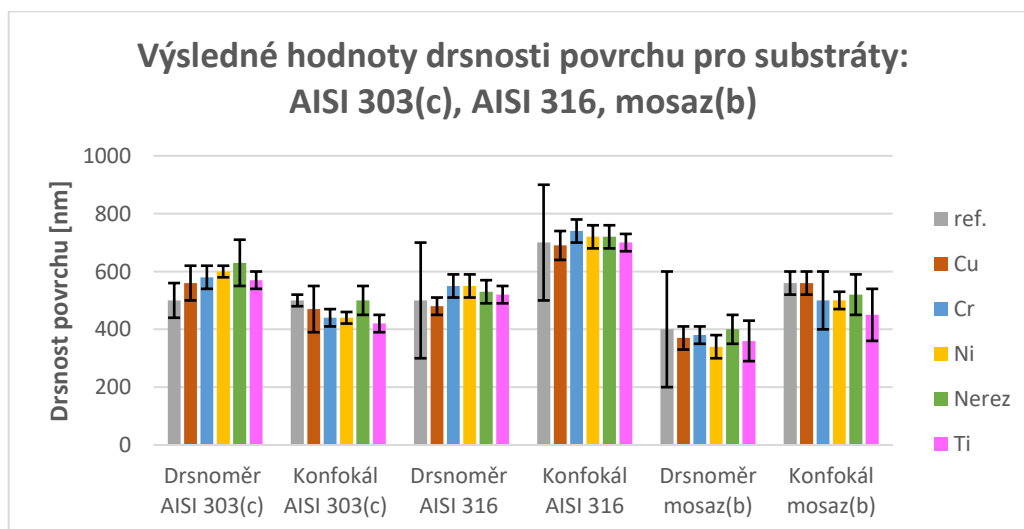
## 4.2 Výsledky ze stanovení drsnosti povrchu

Z naměřených hodnot v tabulce 7.1 a 7.2 je patrné, že drsnost povrchu se s rostoucí tloušťkou deponované vrstvy nemění. Toto tvrzení platí pro všechny typy použitých substrátů s odlišnou drsností povrchu. Můžeme proto konstatovat, že tloušťka vrstvy nemá vliv na drsnost povrchu. Na základě toho můžeme v rámci zjednodušení určit průměrnou drsnost povrchu pro každý konkrétní substrát s určitým deponovaným materiálem bez vlivu na dobu depozice.

Pro porovnání byly výsledné hodnoty drsnosti povrchu vyneseny do grafů, kde závisí na druhu substrátu, použité metodě hodnocení a deponovaném druhu materiálu (viz obr. 4.1 a 4.2). Z grafů je patrné, že na výslednou drsnost povrchu má vliv jak počáteční drsnost povrchu substrátu, tak i použitá metoda pro stanovení drsnosti povrchu.



Obrázek 4.1: Hodnoty drsnosti povrchu pro substráty *AISI 303(a)*, *mosaz(a)*, *AISI 303(b)*

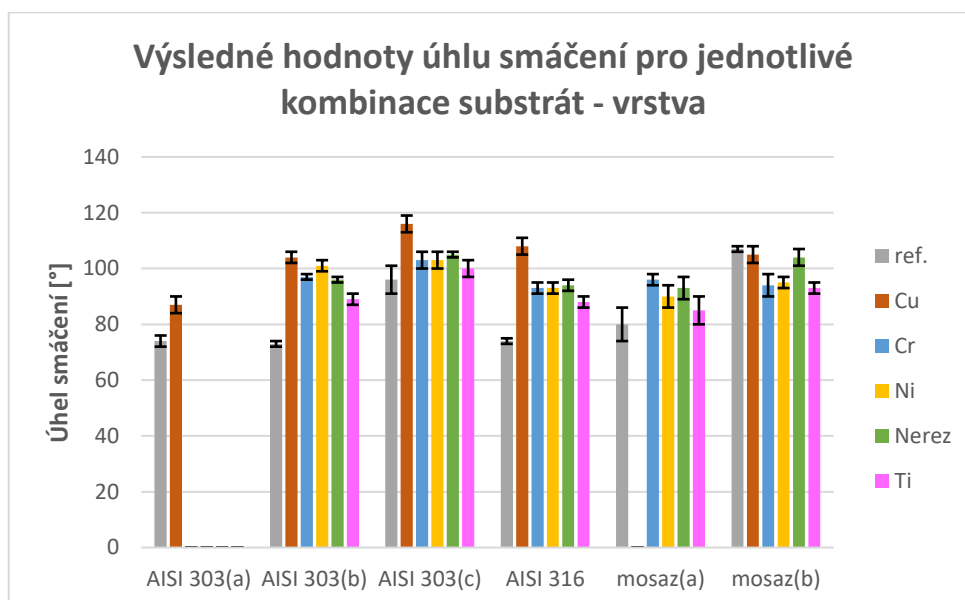


Obrázek 4.2: Hodnoty drsnosti povrchu pro substráty *AISI 303(c)*, *AISI 316*, *mosaz(b)*

## 4.3 Výsledky ze stanovení úhlu smáčení

Z naměřených hodnot v tabulce 7.3 je patrné, že pro jednotlivé druhy deponovaných vrstev se hodnota úhlu smáčení s rostoucí tloušťkou deponované vrstvy příliš nemění. Není zde jednoznačně vidět ani klesající ani stoupající trend změny hodnoty úhlu smáčení v závislosti na době depozice. Toto tvrzení platí pro všechny typy použitých substrátů. Na základě toho můžeme v rámci zjednodušení určit průměrnou hodnotu úhlu smáčení pro každý konkrétní substrát s určitým deponovaným materiálem bez vlivu na dobu depozice.

Pro porovnání byly výsledné hodnoty úhlu smáčení vyneseny do grafu, kde závisí na druhu substrátu a deponovaném druhu materiálu (viz obr. 4.3). Z grafu je patrné, že jak materiál základního substrátu, tak i jeho drsnost povrchu má vliv na výslednou hodnotu úhlu smáčení.

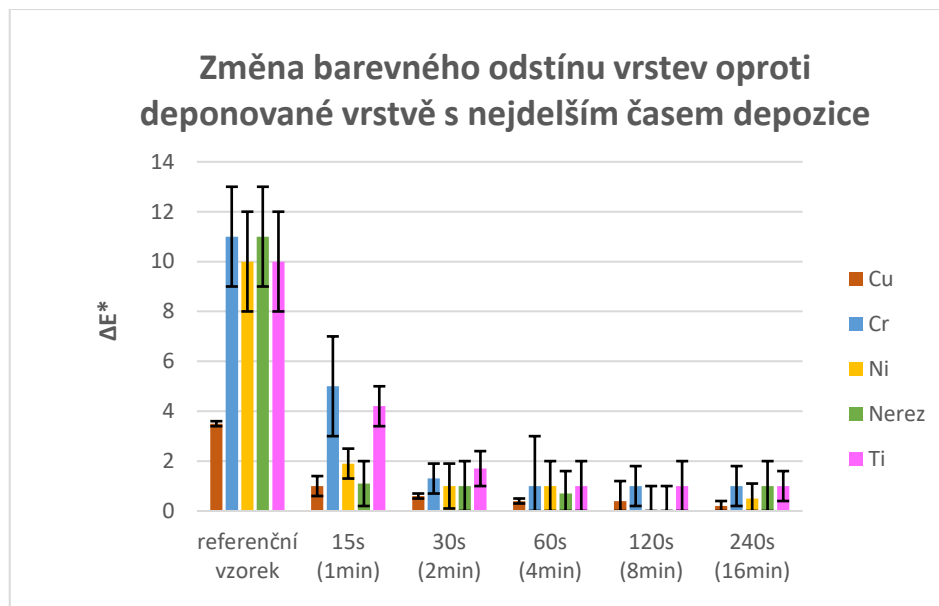


Obrázek 4.3: Výsledné hodnoty úhlu smáčení

Dále je patrné, že už při minimálním použitém času depozice se hodnota úhlu smáčení výrazně mění. Nejvíce je tato změna patrná u měděných vrstev na všech substrátech nerez. Naopak u měděných vrstev na mosazném substrátu nenastala žádná změna úhlu smáčení. Pokud se podíváme na chromové, niklové, nerezové a titanové vrstvy, tak lze pozorovat u všech vrstev na nerezových substrátech nárůst hodnoty úhlu smáčení. To je velmi zajímavé pro nerezové vrstvy, kde by nemělo docházet ke změně chemického složení povrchu. Přesto je patrná výrazná změna těchto vrstev na všech nerezových substrátech.

## 4.4 Výsledky ze stanovení změny barevného odstínu

Hodnoty naměřených souřadnic barevného prostoru CIE jsou v tabulce 7.4 a 7.5. Z těchto souřadnic byla následně vypočtena hodnota změny barevného odstínu pro vrstvy ze stejného materiálu. Tato hodnota byla stanovena vždy ku vrstvě s nejdelším časem depozice. Pro porovnání byly hodnoty změny barevného odstínu vyneseny do grafu (viz obr. 4.4).



Obrázek 4.4: Graf výsledných hodnot změny barevného odstínu

Z grafu (viz. obr. 4.4) lze určit, že některé vrstvy mají při stejné době depozice výrazně odlišnou hodnotu změny barevného odstínu. To může být dáno odlišnou rychlostí růstu jednotlivých vrstev. Výrazně menší počáteční rozdíl barevného odstínu substrátu a měděné vrstvy s nejdelším časem depozice je dán hodnotami barevných souřadnic materiálu substrátu *AISI 303(a)*, který má bližší hodnoty s měděnou vrstvou, než zbylé stříbrné vrstvy se substrátem *CuZn37(a)*.

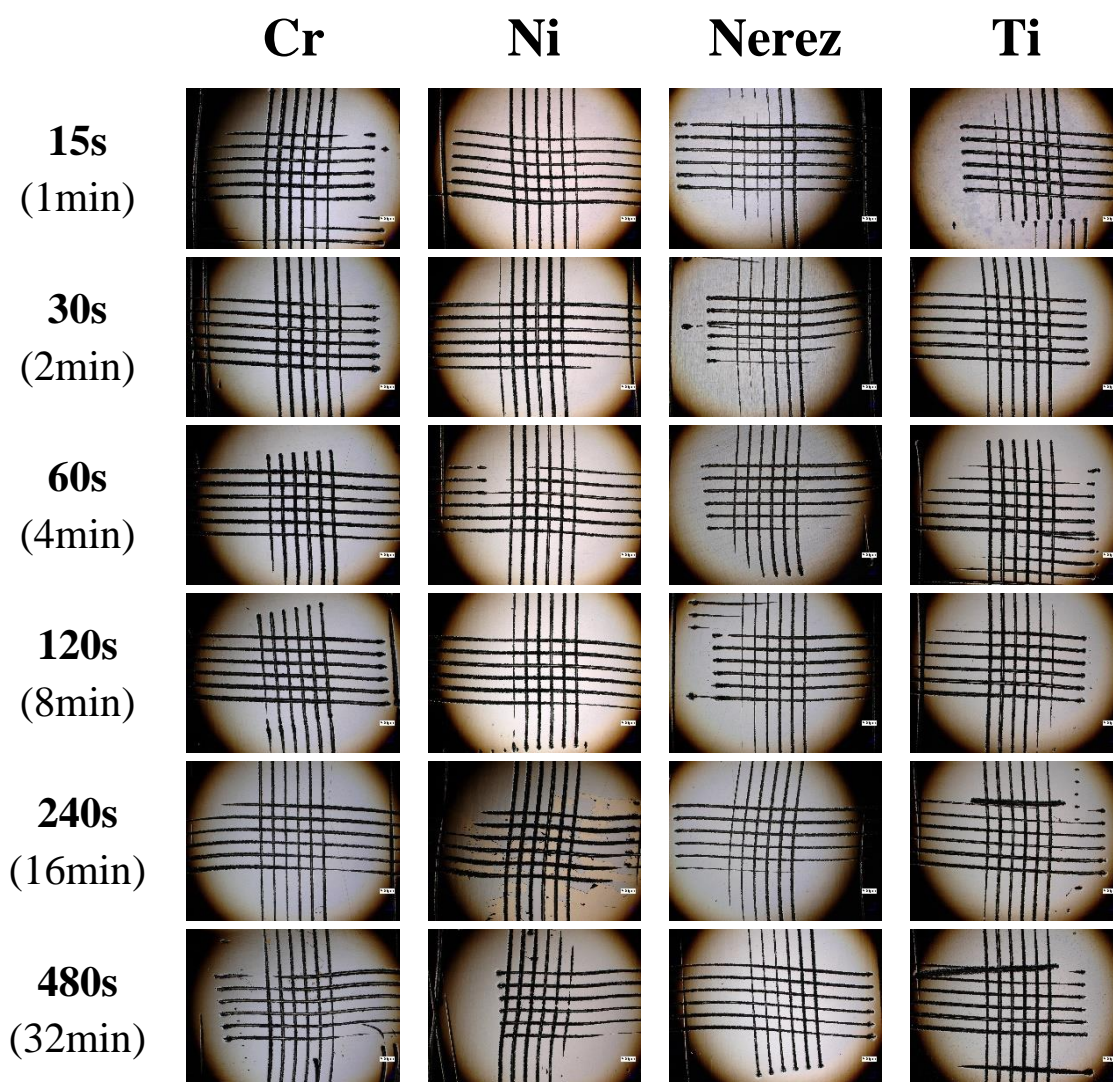
Na základě vizuální oční kontroly a naměřených dat byl určen minimální čas depozice pro spolehlivé zakrytí substrátu. Při depozici měděných vrstev nebyla již po 30s patrná žádná výrazná změna barevného odstínu. Vrstvy Cr, Ni a nerez vykazovaly stabilní barevný odstín po 60s depozice. Nejdelší čas depozice (4min) pro spolehlivé zakrytí substrátu byl potřeba u Titanu. Tyto hodnoty přímo závisí na rychlosti růstu těchto vrstev (viz kap. 4.1).

## 4.5 Výsledky ze stanovení adheze vrstvy

Při stanovení adheze vrstvy pomocí mřížkového testu bez použití pásky nedošlo na žádném z testovaných vzorků k viditelnému porušení vrstvy. Pokud jsme následně na vytvořenou

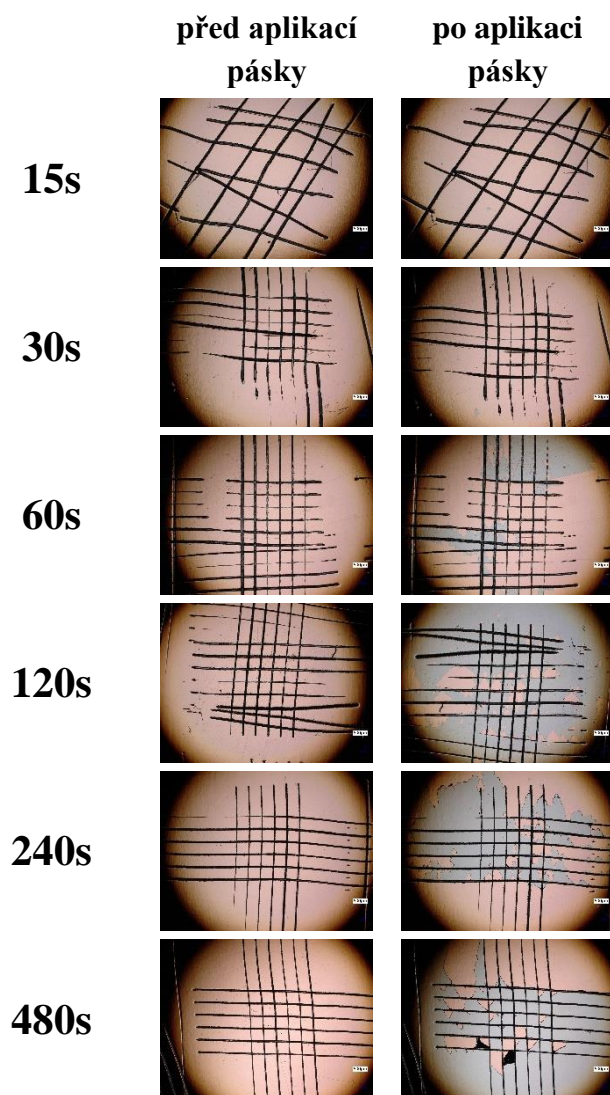
mřížku aplikovali lepicí pásku, která byla následně stržena, bylo již u některých vzorků patrné viditelné porušení vrstvy (viz. obr. 4.5 a 4.6).

Z obrázku 4.5 je vidět, že po odtržení lepicí pásky, došlo k porušení vrstvy pouze u jednoho vzorku, konkrétně u Ni-vrstvy s časem depozice 240s. Je zajímavé, že u stejného druhu vrstvy s kratší i delší dobou depozice k žádnému viditelnému poškození nedošlo. Vzhledem k tomu, že se jedná o poměrně ojedinělé poškození a ještě k tomu většího rozsahu (adhezní třída 4-5), je možné konstatovat, že povrch tohoto konkrétního substrátu nemusel být důkladně umyt v rámci předúpravy. To by vysvětlovalo, proč vrstvy s kratší i delší dobou depozice nevykazují žádné viditelné poškození.



Obrázek 4.5: Snímky mřížek po odtržení pásky z povrchu vrstev Cr, Ni, Nerez a Ti

Z obrázku 4.6 lze vidět, že po odtržení lepicí pásky nastalo porušení vrstvy u vzorků s delší dobou depozice. Lze tedy konstatovat, že delší doba depozice měděné vrstvy na substrát *AIISI 303(a)* vede k horší adhezi vrstvy.



Obrázek 4.6: Snímky mřížek před a po odtržení pásky z povrchu Cu-vrstev

K jednotlivým snímkům, které byly pořízeny po odtržení lepicí pásky, byly následně přiřazeny adhezní třídy (viz tab. 4.3). Pro testování adheze bez použití lepicí pásky byla určena pro všechny vrstvy adhezní třída 0.

Substrát	Deponovaná vrstva	Adhezní třídy v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
AISI 303(a)	Cu	0	0	3	5	5	5
	Cr	0	0	0	0	0	0
CuZn37(a)	Ni	0	0	0	0	4-5	0
	Nerez	0	0	0	0	0	0
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	0	0	0	0	0	0

Tabulka 4.3: Výsledné hodnoty adhezních tříd testovaných vrstev



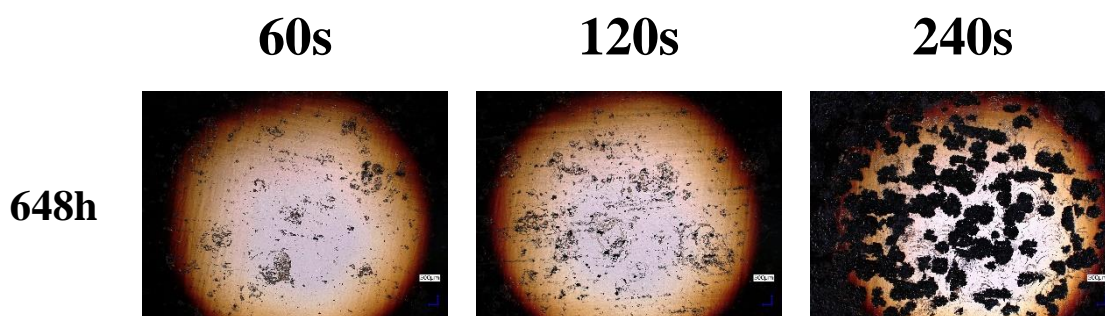
Ze snímků můžeme vidět, že na výslednou adhezi vrstvy může mít vliv jak tloušťka vrstvy, materiál substrátu, tak i kvalita provedené předúpravy před depozicí.

## 4.6. Výsledky z testování v korozních komorách

Testování v korozních komorách prokázalo, že každý druh vrstvy s určitou dobou depozice vykazuje odlišnou odolnost vůči různému typu korozního prostředí. Pro každý druh vrstvy byla vytvořena tabulka snímků v závislosti na času depozice vrstvy a její době expozice v určitém korozním prostředí. Tabulky s těmito snímky jsou v sekci Přílohy (viz tabulka 7.6–7.17). Níže bude popsán vliv jednotlivých korozních prostředí na testované vrstvy.

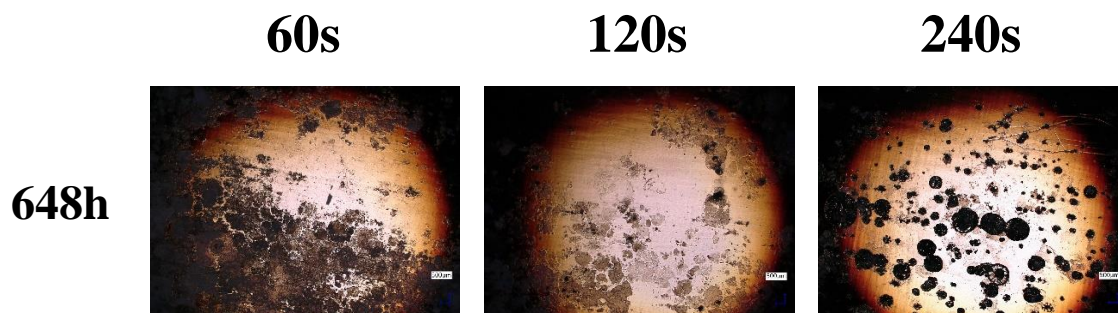
### Kondenzační komora

**Cr-vrstvy:** z tabulky 7.6 lze určit, že vyšší odolnost proti tomuto prostředí měly vrstvy s nižším časem depozice. U vrstvy s nejvyšším časem depozice docházelo v průběhu testování k odlupování samotné vrstvy z povrchu substrátu (viz obr. 4.7). Tento jev může být způsoben velkým vnitřním pnutím ve vrstvě.



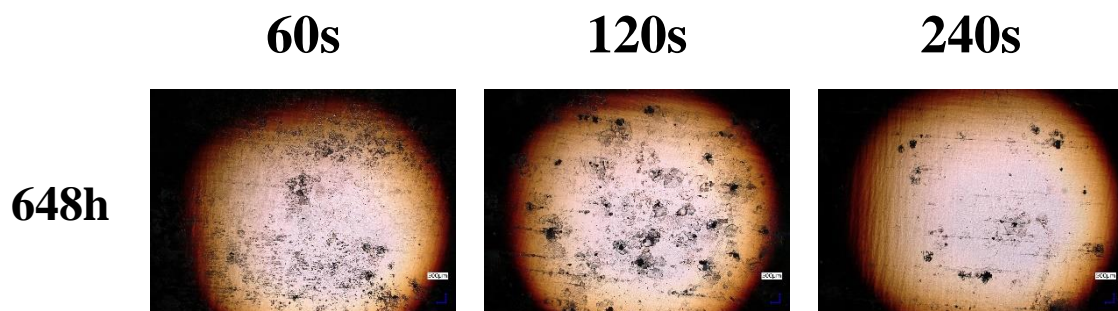
Obrázek 4.7: Snímky Cr-vrstev po expozici 648h v kondenzační komoře

**Ni-vrstvy:** z tabulky 7.7 lze určit, že všechny testované vrstvy měly celkově slabou odolnost proti tomuto prostředí. U vrstvy s nižším časem depozice docházelo k postupnému vzniku mikroprasklin ve tvaru šupinek, které se postupně šířily a odlupovaly po velmi malých kusech samotnou vrstvu. U vrstvy s nejvyšším časem depozice tento jev ustupoval a nebyl tak patrný. Docházelo zde spíše ke tvorbě velkých kráterů (viz obr. 4.8). Z testovaných vrstev nejlépe odolávala vrstva s časem depozice 120s, kde byly patrné oba tyto jevy poškození, ale v menším rozsahu než u zbylých dvou testovaných vzorků.



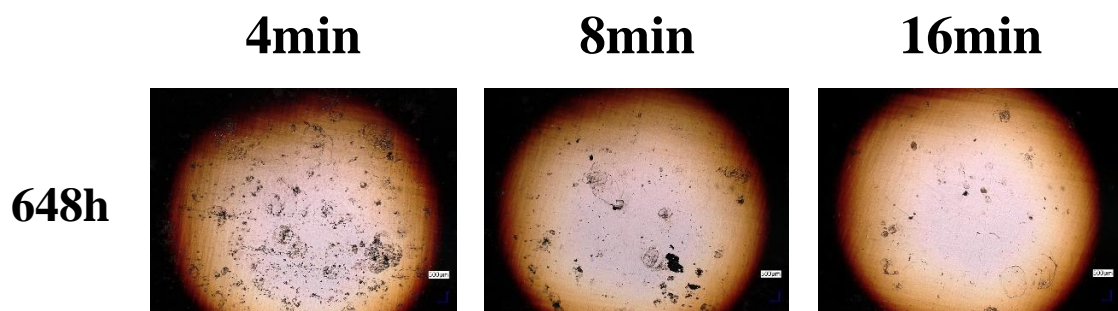
Obrázek 4.8: Snímky Ni-vrstev po expozici 648h v kondenzační komoře

*Nerez-vrstvy*: z tabulky 7.8 lze určit, že nejlépe si vedla vrstva s nejdelším časem depozice. U vrstvy s nižším časem depozice docházelo ke vzniku malých mikroprasklin a postupnému odlupování vrstvy (viz obr. 4.9). U vrstvy s časem depozice 120s docházelo navíc ke vzniku kráterů. Vrstva s nejdelším časem depozice se potýkala se vznikem mikroprasklin jen ojediněle a krátery se na ní objevovaly v menším množství než u vrstvy s časem depozice 120s.



Obrázek 4.9: Snímky Nerez-vrstev po expozici 648h v kondenzační komoře

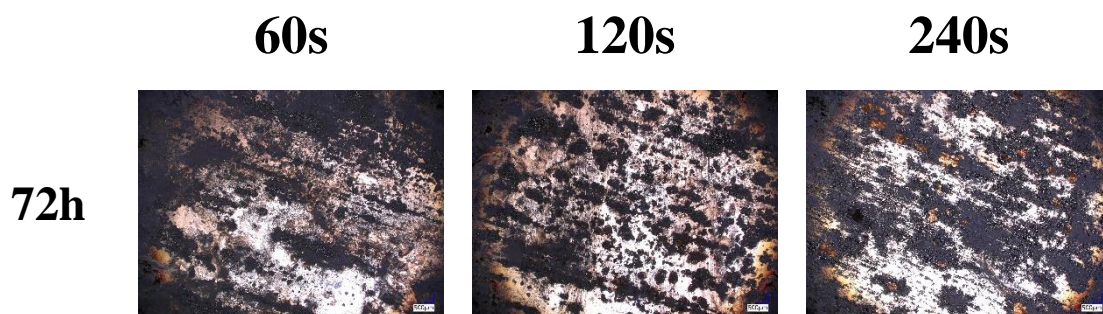
*Ti-vrstvy*: z tabulky 7.9 lze určit, že titanové vrstvy si vedly v tomto prostředí nejlépe. Čím byl čas depozice delší, tím byla odolnost vrstvy vyšší (viz obr. 4.10).



Obrázek 4.10: Snímky Ti-vrstev po expozici 648h v kondenzační komoře

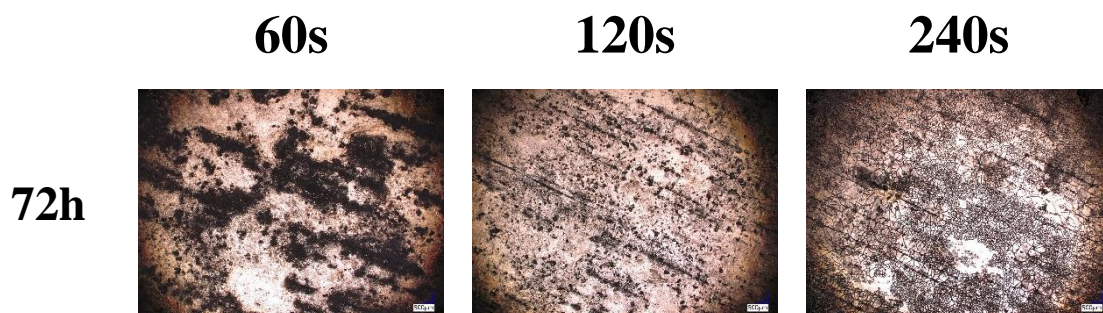
### Solná komora

**Cr-vrstvy:** z tabulky 7.10 lze určit, že všechny testované vrstvy měly už po 72 hodinách velmi malou odolnost proti tomuto prostředí (viz obr. 4.11). Nelze ani určit, že by některá z vrstev měla lepší odolnost, než zbylé dvě. Po 480 hodinách lze pozorovat, jak se v celkově porušené vrstvě zažírání roztok NaCl, kde následně krystalizuje (viz tab. 7.10).



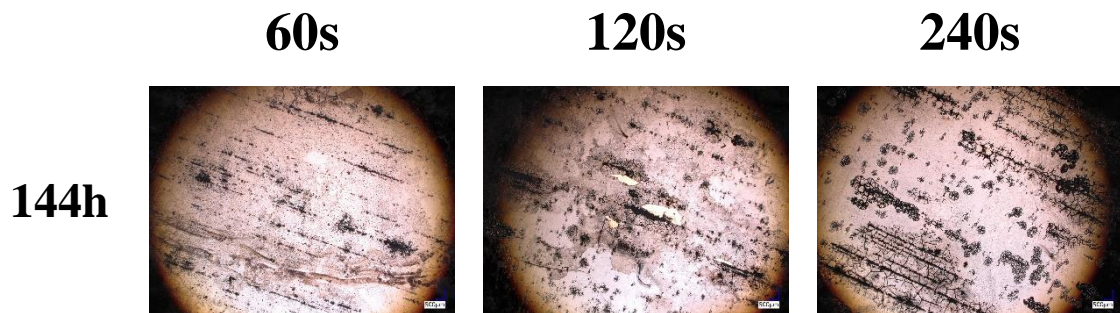
Obrázek 4.11: Snímky Cr-vrstev po expozici 72h v solné komoře

**Ni-vrstvy:** z tabulky 7.11 lze určit, že všechny testované vrstvy měly už po 72 hodinách velmi malou odolnost proti tomuto prostředí. Lze však pozorovat odlišný vzhled počátečního poškození u testovaných vrstev (viz obr. 4.12). U vrstvy s nižším časem depozice od začátku docházelo ke tvorbě mnohem širších drah poškození než u vrstvy s nejdelším časem depozice, kde nejdříve docházelo k poškození formou malých mikroprasklin po celém povrchu vrstvy. Po 480 hodinách lze pozorovat, jak se v celkově porušené vrstvě zažírání roztok NaCl, kde následně krystalizuje (viz tab. 7.11).



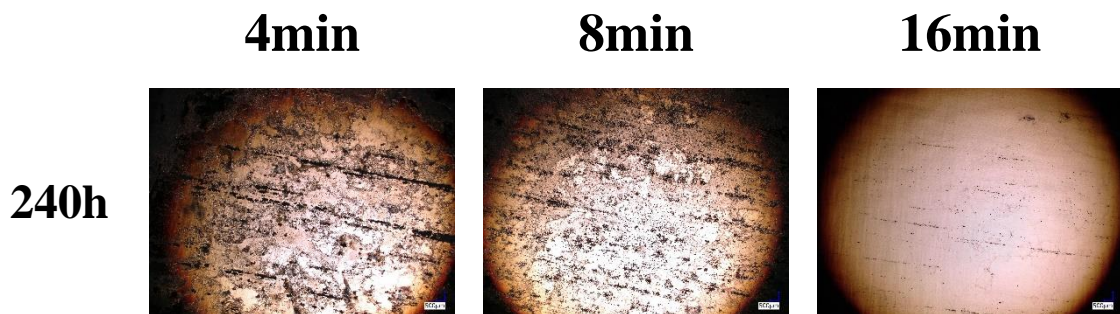
Obrázek 4.12: Snímky Ni-vrstev po expozici 72h v solné komoře

**Nerez-vrstvy:** z tabulky 7.12 lze určit, že všechny testované vrstvy měly po 144 hodinách vyšší odolnost v testovaném prostředí, než všechny Cr a Ni-vrstvy po 72 hodinách. Nelze však určit, že by některá z vrstev měla lepší odolnost než zbylé dvě (viz obr. 4.13). Prvotní objevení zkrystalizované soli ve vrstvě se objevuje u všech vzorků až po 648 hodinách (viz tab. 7.12).



Obrázek 4.13: Snímky Nerez-vrstev po expozici 144h v solné komoře

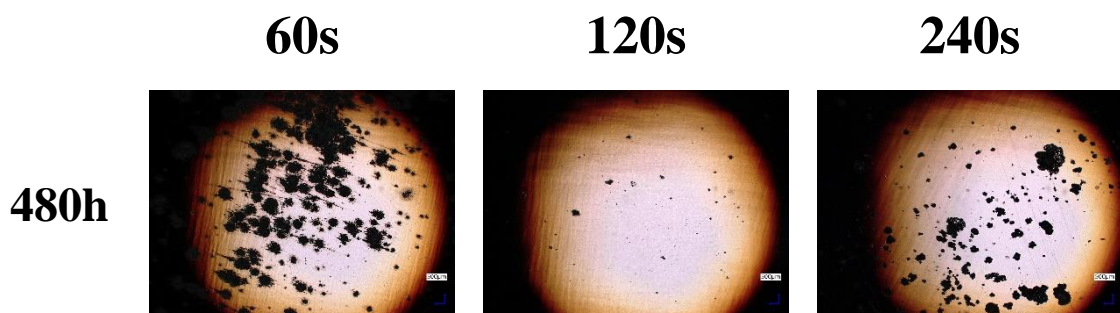
**Ti-vrstvy:** z tabulky 7.13 lze určit, že titanové vrstvy si vedly v tomto prostředí opět nejlépe. Nejvyšší odolnost projevila vrstva s nejdelším časem depozice. U této vrstvy lze pozorovat velmi malé poškození vrstvy i po 240 hodinách (viz obr. 4.14).



Obrázek 4.14: Snímky Ti-vrstev po expozici 240h v solné komoře

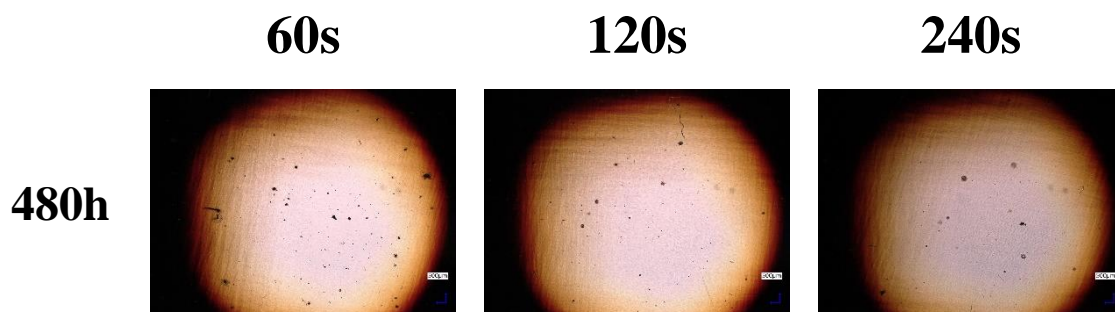
#### **Klimatická komora**

**Cr-vrstvy:** z tabulky 7.14 lze určit, že nejvyšší odolnost proti tomuto prostředí měla vrstva s časem depozice 120s (viz obr. 4.15). U zbylých dvou vrstev docházelo v průběhu testování k praskání a následnému odlupování vrstvy z povrchu substrátu.



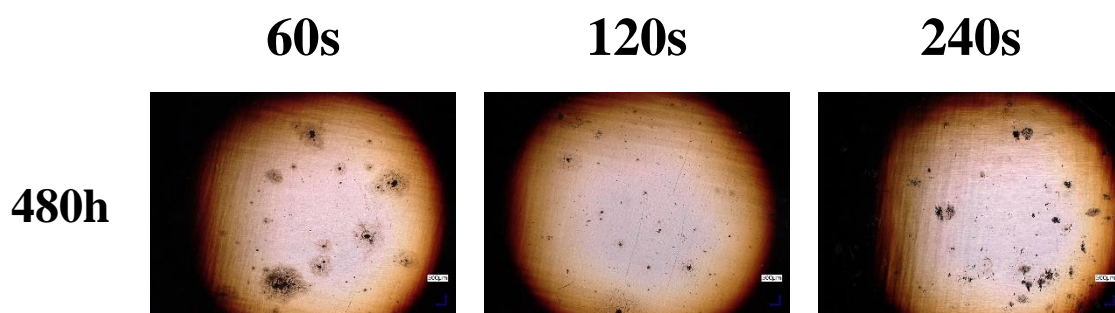
Obrázek 4.15: Snímky Cr-vrstev po expozici 480h v klimatické komoře

**Ni-vrstvy:** z tabulky 7.15 lze určit, že všechny testované vrstvy měly celkově velmi dobrou odolnost proti tomuto prostředí. Nelze určit, že by některá z vrstev vykazovala lepší vlastnosti než zbylé dvě (viz obr. 4.16). Kvalita povrchu vrstev se dokonce s časem expozice nijak výrazně neměnila (viz tab. 7.15).



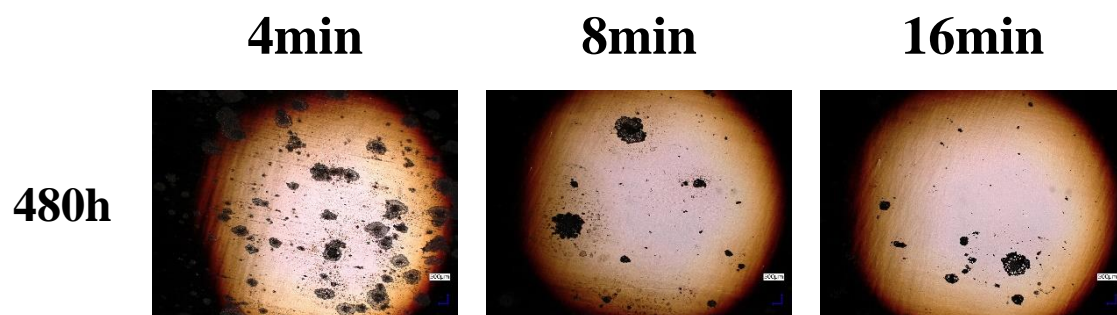
Obrázek 4.16: Snímky Ni-vrstev po expozici 480h v klimatické komoře

**Nerez-vrstvy:** z tabulky 7.16 lze určit, že u všech testovaných vrstev docházelo k postupnému vzniku lokálních prasklin. Nepatrně lepší odolnost zde vykazovala vrstva s časem depozice 120s (viz obr. 4.17).



Obrázek 4.17: Snímky Nerez-vrstev po expozici 480h v klimatické komoře

**Ti-vrstvy:** z tabulky 7.17 lze určit, že u všech testovaných titanových vrstev docházelo k postupnému vzniku prasklin. Nelze však určit, že by některá z vrstev měla výrazně lepší odolnost než zbylé dvě (viz obr. 4.18).



Obrázek 4.18: Snímky Ti-vrstev po expozici 480h v klimatické komoře

## 5 Závěr

V této diplomové práci bylo pojednáno o metodách depozic tenkých vrstev a hodnocení jejich vlastností. Byla provedena rešerše na možnosti depozic tenkých vrstev, která byla široce zaměřena především na jednotlivé možnosti fyzikální depozice z pevné fáze. Byly obecně popsány jednotlivé parametry procesu a složení depozičního zařízení. Jsou zde shrnuty řešené vlastnosti tenkých vrstev a metody jejich stanovování a testování.

V rámci experimentální části diplomové práce byla provedena výroba tenkých vrstev mědi, chromu, nerezů, niklu a titanu, na substrátech z nerezové oceli a mosazi s různou drsností povrchu. Vrstvy byly vytvořeny vždy v šesti různých tloušťkách. Následně bylo provedeno měření vybraných mechanických, chemických a fyzikálních vlastností, jako je tloušťka vrstvy, drsnost povrchu, kontaktní úhel smáčení, barevný odstín, adheze vrstvy a odolnost vrstvy za působení určitého druhu korozního prostředí.

Ze stanovení tloušťky vrstvy pomocí krycí metody bylo ověřeno, že pro přesné stanovení tloušťky vrstvy velice záleží na drsnosti povrchu substrátu a celkové tloušťce vrstvy. U vzorků s vyšší drsností povrchu, nebylo možné tloušťky těchto vrstev vůbec měřit. U substrátů *AISI 303(b)* se dala změřit přibližná tloušťka alespoň u dvou největších tlouštěk vrstev. Stanovení tloušťky vrstvy pomocí XRF spektrometru ukázalo, že pokud jsou k jednotlivým deponovaným tloušťkám vrstev příslušné kalibrační standarty, lze s relativně velkou přesností stanovit tloušťku vrstvy. To je nejvíce patrné u chromových vrstev, kde tloušťka vrstvy rovnoměrně rostla s časem depozice.

Při stanovení drsnosti povrchu bylo dle předpokladu prokázáno, že při těchto tloušťkách deponovaná vrstva přesně kopíruje povrch substrátu. Při experimentu nedocházelo ke změně drsnosti povrchu v závislosti na tloušťce vrstvy a deponovaném materiálu. Byl zde ale patrný rozdíl ve výsledných hodnotách drsnosti povrchu v závislosti na použité metodě hodnocení.

Bylo prokázáno, že hodnota úhlu smáčení závisí jak na materiálu deponované vrstvy, tak na její drsnosti povrchu. Dále se ukázalo, že hodnota úhlu smáčení se s rostoucí tloušťkou deponované vrstvy příliš výrazně nemění.

Při stanovení změny barevného odstínu bylo možné pozorovat, že doba, kdy dojde k ustálení barevného odstínu požadované vrstvy, která dostatečně zakryje substrát, závisí na rychlosti růstu vrstvy a počátečním rozdílu barevného odstínu substrátu a výsledné vrstvy. Dále bylo ověřeno, že není vhodné se spoléhat pouze na naměřené hodnoty barevného odstínu pomocí spektrofotometru, ale také si vzorky mezi sebou porovnat vizuální oční kontrolou. Spektrometr Byk nemá dostatečnou citlivost pro rozeznání barevného odstínu mezi dvěma velmi podobnými vzorky. Ukázalo se, že pro přesnější kontrolu spolehlivosti zakrytí tenké vrstvy substrátu, bude oko metrické porovnání pomocí příslušných standardů více vhodná metoda.

Měření adheze systému vrstva-substrát, jednoznačně prokázalo, že největší vliv na adhezi má předúprava, dále pak tloušťka vrstvy a kompatibilita materiálu substrátu s konkrétním materiálem deponované vrstvy.

Testování v korozních komorách prokázalo, že každý druh vrstvy s určitou dobou depozice vykazuje odlišnou ochranu mosazného substrátu, vůči různému typu korozního prostředí. Nejlépe si vedly titanové vrstvy. Ty měly přesvědčivě nejlepší odolnost v kondenzační i solné komoře. Dále pak nerezové vrstvy, které měly nepatrně lepší odolnost v kondenzační a solné komoře než Chromové a Niklové vrstvy. Niklové vrstvy si zachovaly velmi dobrou stabilitu v klimatické komoře. Chromové vrstvy, vykazovali vyšší odolnost v kondenzační komoře pouze za přítomnosti menší tloušťky vrstvy.

Dále byla v kondenzační a solné komoře patrná závislost u titanových vrstev. S rostoucí tloušťkou vrstvy rostla i odolnost vrstvy v těchto dvou prostředích. To může být zapříčiněno tím, že titanové vrstvy rostly zhruba čtyřikrát až pětkrát pomaleji než vrstvy chromu, niklu a nerezů. V důsledku toho tak mohla vzniknout mnohem kvalitnější vrstva pro ochranu mosazného substrátu.

Cílem této diplomové práce bylo také určit vliv teploty substrátu při depozici na vybrané mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti tenkých vrstev. To se však nepodařilo prokázat, protože zařízení v době konání experimentu nebylo provozu schopné pro ohřev substrátu a měření jeho aktuální teploty.



## Seznam použité literatury

ANDERS, André, 2014. A review comparing cathodic arcs and high power impulse magnetron sputtering (HiPIMS). *Surface and Coatings Technology* [online]. 25 years of TiAlN hard coatings in research and industry, 308–325 [vid. 2023-05-11]. ISSN 0257-8972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2014.08.043

ANDERS, André, 2017. Tutorial: Reactive high power impulse magnetron sputtering (R-HiPIMS). *Journal of Applied Physics* [online]. 121(17), 171101 [vid. 2023-05-09]. ISSN 0021-8979, 1089-7550. Dostupné z: doi:10.1063/1.4978350

ASCOTT ANALYTICAL EQUIPMENT, 2023. Salt Spray Chamber Specification - Ascott Analytical UK, USA & Worldwide. *Ascott Analytical* [online] [vid. 2023-11-30]. Dostupné z: <https://www.ascott-analytical.com/salt-spray-specifications/>

BAPTISTA, Andresa, Francisco SILVA, Jacobo PORTEIRO, José MÍGUEZ a Gustavo PINTO, 2018. Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands. *Coatings* [online]. (11), 402 [vid. 2023-05-11]. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:10.3390/coatings8110402

BĚLA, Alois, 2022. *Analýza vlivu nárůstku na drsnost povrchu při soustružení nerezové oceli* [online]. Liberec [vid. 2023-05-13]. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/99ebd874-36e5-4f02-aaca-5dba4bfb8070/content>

BISHOP, Charles A., 2015a. Chapter 4 - Pumping. In: Charles A. BISHOP, ed. *Vacuum Deposition Onto Webs, Films and Foils (Third Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 67–84 [vid. 2023-05-11]. ISBN 978-0-323-29644-1. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-29644-1.00004-9

BISHOP, Charles A., 2015b. Chapter 6 - Leaks, Water Vapor, and Leak Testing. In: Charles A. BISHOP, ed. *Vacuum Deposition Onto Webs, Films and Foils (Third Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 129–138 [vid. 2023-05-11]. ISBN 978-0-323-29644-1. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-29644-1.00006-2

BISHOP, Charles A., 2015c. Chapter 20 - Magnetron Sputtering Source Design and Operation. In: Charles A. BISHOP, ed. *Vacuum Deposition Onto Webs, Films and Foils (Third Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 371–399 [vid. 2023-05-11]. ISBN 978-0-323-29644-1. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-29644-1.00020-7

BISHOP, Charles A., 2015d. Chapter 24 - Heat Load on the Webs/Foils. In: Charles A. BISHOP, ed. *Vacuum Deposition Onto Webs, Films and Foils (Third Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 439–461 [vid. 2023-05-11]. ISBN 978-0-323-29644-1. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-29644-1.00024-4

BUBLÍKOVÁ, Petra, 2012. Tvorba polykrystalických křemíkových vrstev rekrystalizací amorfního křemíku deponovaného metodami PVD a CVD [online]. [vid. 2023-03-13]. Dostupné z: <http://dspace5.zcu.cz/handle/11025/4609>

CALIBR, E.-shop | MB, 2023. Dotykový drsnoměr INSIZE ISR-C300 s odpojitelnou sondou. *eshop.mbcCalibri.cz* [online] [vid. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://eshop.mbcCalibri.cz/meridla-drsnosti-povrchu/drsnomer-insize-isr-c300/>

CARLSSON, Jan-Otto a Peter M. MARTIN, 2010. Chapter 7 - Chemical Vapor Deposition. In: Peter M. MARTIN, ed. *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings (Third Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 314–363 [vid. 2023-03-13]. ISBN 978-0-8155-2031-3. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-8155-2031-3.00007-7

CLAUBERG, Andreas, 2015. *Mikroskopie atomárních sil* [online]. B.m. [vid. 2023-05-13]. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: <http://dspace5.zcu.cz/handle/11025/18834>

DENTON VACUUM, 2022. Infinity Ion Beam Sputtering Systems. *Denton Vacuum* [online] [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.dentonvacuum.com/products/infinity/>

DUKE UNIVERSITY, 2023. *Matrix-Assisted Pulsed Laser Evaporation* [online] [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://stiffrobertslab.pratt.duke.edu/research/rir-maple>

ELCOMETER LIMITED, 2023. *Elcometer 107 Cross Hatch Cutter* [online] [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.elcometer.com/en/coatings-inspection/all-coatings-inspection/adhesion-testers/elcometer-107-cross-hatch-cutter.html>

FARAJI, Ghader, Hyoung Seop KIM a Hessam Torabzadeh KASHI, 2018. Introduction. In: Ghader FARAJI, Hyoung Seop KIM a Hessam Torabzadeh KASHI, ed. *Severe Plastic Deformation* [online]. B.m.: Elsevier, s. 1–17 [vid. 2023-05-09]. ISBN 978-0-12-813518-1. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-813518-1.00020-5

FOŘT, Tomáš, 2014. *Charakterizace nanostruktur deponovaných PVD a CVD technologiemi* [online]. B.m. [vid. 2023-05-15]. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <http://dspace.vutbr.cz/handle/11012/15182>

GAMIN S.R.O., 2023. Spectro guide Byk Gardner. *Gamin* [online] [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.elcometer.cz/spectroguide-gloss-S-Byk/>

HISHIMONE, Philipus, Hiroki NAGAI a Mitsunobu SATO, 2020. Methods of Fabricating Thin Films for Energy Materials and Devices. In: [online]. ISBN 978-1-78985-463-3. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.85912

HOLUB, Jiří, 2010. *Smáčivost povrchu vůči kapalinám a druhá viskozita kapalin* [online]. B.m. [vid. 2023-05-14]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <http://dspace.vutbr.cz/handle/11012/15852>

JAROLÍMOVÁ, Lucie, 2020. *Povrchové úpravy jako protikorozní ochrana heterogenního svaru* [online]. B.m. [vid. 2023-05-15]. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: <http://dspace5.zcu.cz/handle/11025/41324>

JAVDOŠŇÁK, Daniel, 2013. *Vliv tloušťky nanokompozitních vrstev Si-Zr-O na jejich mechanické vlastnosti* [online]. B.m. [vid. 2023-05-17]. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: <http://dspace5.zcu.cz/handle/11025/9864>

KELLY, P. J a R. D ARNELL, 2000. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum* [online]. (3), 159–172 [vid. 2023-05-09]. ISSN 0042-207X. Dostupné z: doi:10.1016/S0042-207X(99)00189-X

KLÁRA, Ševčíková, 2017. *Antibakteriální vlastnosti tenkých vrstev a biomateriálů* [online]. B.m. [vid. 2023-05-11]. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/74887>

KRAFKA, Michal, 2020. *Plazmové modifikace povrchů nástrojových ocelí metodou depozice katodickým obloukem (Arc-PVD) - Portaro - katalog knihovny* [online]. Liberec [vid. 2022-06-01]. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Dostupné z: [https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/159703/DP\\_MICHAL\\_KRAFKA\\_2020\\_S TAG\\_FINAL.pdf](https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/159703/DP_MICHAL_KRAFKA_2020_S TAG_FINAL.pdf)

MARTIN, Peter M., ed., 2010. Chapter 6 - Ion Plating. In: Peter M. MARTIN, ed. *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings (Third Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 297–313 [vid. 2023-05-11]. ISBN 978-0-8155-2031-3. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-8155-2031-3.00006-5

MATTOX, Donald M., 2010a. Chapter 2 - Substrate (“Real”) Surfaces and Surface Modification. In: Donald M. MATTOX, ed. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 25–72 [vid. 2023-05-18]. ISBN 978-0-8155-2037-5. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-8155-2037-5.00002-2

MATTOX, Donald M., 2010b. Chapter 3 - The “Good” Vacuum (Low Pressure) Processing Environment. In: Donald M. MATTOX, ed. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 73–145 [vid. 2023-05-11]. ISBN 978-0-8155-2037-5. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-8155-2037-5.00003-4

MATTOX, Donald M., 2010c. Chapter 4 - The Sub-Atmospheric Processing Environment. In: Donald M. MATTOX, ed. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 147–156 [vid. 2023-05-11]. ISBN 978-0-8155-2037-5. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-8155-2037-5.00004-6

MATTOX, Donald M., 2010d. Chapter 5 - The Low Pressure Plasma Processing Environment. In: Donald M. MATTOX, ed. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 157–193 [vid. 2023-05-11]. ISBN 978-0-8155-2037-5. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-8155-2037-5.00005-8

MATTOX, Donald M., 2010e. Chapter 6 - Vacuum Evaporation and Vacuum Deposition. In: Donald M. MATTOX, ed. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 195–235 [vid. 2023-05-11]. ISBN 978-0-8155-2037-5. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-8155-2037-5.00006-X

MATTOX, Donald M., 2010f. Chapter 7 - Physical Sputtering and Sputter Deposition (Sputtering). In: Donald M. MATTOX, ed. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 237–286 [vid. 2023-05-11]. ISBN 978-0-8155-2037-5. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-8155-2037-5.00007-1

MATTOX, Donald M., 2010g. Chapter 10 - Atomistic Film Growth and Some Growth-Related Film Properties. In: Donald M. MATTOX, ed. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 333–398 [vid. 2023-05-11]. ISBN 978-0-8155-2037-5. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-8155-2037-5.00010-1

MATTOX, Donald M., 2010h. Chapter 11 - Film Characterization and Some Basic Film Properties. In: Donald M. MATTOX, ed. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 399–438 [vid. 2023-05-18]. ISBN 978-0-8155-2037-5. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-8155-2037-5.00011-3

MATTOX, Donald M., 2010i. Chapter 15 - Non-Elemental Characterization of Films and Coatings. In: Peter M. MARTIN, ed. *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings (Third Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 716–748 [vid. 2023-05-18]. ISBN 978-0-8155-2031-3. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-8155-2031-3.00015-6

MENDELU.CZ, 2023. *Ústav hospodářské úpravy lesa a aplikované geoinformatiky* [online] [vid. 2023-11-30]. Dostupné z: [http://uhulag.mendelu.cz/cz/veda/biometricka\\_laborator/mikroskop-vhx-5000](http://uhulag.mendelu.cz/cz/veda/biometricka_laborator/mikroskop-vhx-5000)

MUSIL, J., P. BAROCH, J. VLČEK, K. H. NAM a J. G. HAN, 2005. Reactive magnetron sputtering of thin films: present status and trends. *Thin Solid Films* [online]. (1), Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering 2003 Proceedings of the 4th Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering, 208–218 [vid. 2023-05-11]. ISSN 0040-6090. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsf.2004.07.041

NAZDAR, 2023. Enter the L\*a\*b\*oratory: Making Color Spatial. *Nazdar* [online] [vid. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.nazdar.com/en-us/News-events/ArtMID/4165/ArticleID/224>

NOVÁK, Josef, 2008. *Fyzikální chemie - bakalářský a magisterský kurz* [online]. 1. Praha: VŠCHT Praha [vid. 2023-05-14]. ISBN 978-80-7080-675-3. Dostupné z: [https://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/publikace?uid=uid\\_isbn-978-80-7080-675-3](https://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/publikace?uid=uid_isbn-978-80-7080-675-3)

PANÁK, Ondřej, 2023. *Měření barevnosti* [online]. 2023. B.m.: Univerzita Pardubice. [vid. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6534218-Ing-ondrej-panak-ondrej-panak-upce-cz-katedra-polygrafie-a-fotofyziky-fakulta-chemicko-technologicka-univerzita-pardubice.html>

PEER, P., M. POLÁŠKOVÁ a L. MUSILOVÁ, 2019. *Reologie: Vytvořili jsme nanovláknennou membránu se superhydrofobním povrchem – ÚSTAV PRO HYDRODYNAMIKU AV ČR* [online]. [vid. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.ih.cas.cz/reologie-vytvorili-jsme-nanovlakennou-membranu-se-superhydrofobnim-povrchem/>

RAJTMAJER, Josef, 2016. *Testování adheze tenkých vrstev metodou cross hatch* [online]. Plzeň. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: <http://dspace5.zcu.cz/handle/11025/23151>

SEMICORE EQUIPMENT, INC., 2014. Sputtering Yield Rates. *Semicore Equipment Inc.* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.semicore.com/reference/sputtering-yields-reference>

SHARMA, Shreea, Radha KOTHANDARAMAN, Shalav ARORA a Chew XUN, 2019. Copper(Cu)-Indium(In)-Gallium(Ga)-Selenide(Se)/Sulphur(S) (CIGS) Thin Film Solar Cells: Evaluation of Processing Techniques and Perspectives [online]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/335203066>

SCHAEFER, 2014. *Workshop Non-contact 3D Profilometer Sensofar S Neox - 11/12 March* [online] [vid. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.schaefer-tec.it/en/blog/workshop-non-contact-3d-profilometer-sensofar-s-neox-1112-march>

SPEKTROMETRY.CZ, 2023. *Měření tloušťky vrstev - spektrometr pro měření tloušťky vrstev, tloušťky povlaku a pasivace - VANTA Olympus* [online] [vid. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.spektrometry.cz/mereni-tloustky-vrstev/spektrometr-pro-mereni-tloustky-vrstev.php>

SR, MEFANET, síť lékařských fakult ČR a, 2023. *Konfokální mikroskop – WikiSkripta* [online] [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Konfok%C3%A1ln%C3%AD\\_mikroskop](https://www.wikiskripta.eu/w/Konfok%C3%A1ln%C3%AD_mikroskop)

SURFTECH TECHNOLOGY CO., LTD., 2023. *PVD Cathodic Arc Evaporation* [online] [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://en.surftech.com.tw/list/cate-195522.htm>

ŠILINGOVÁ, Lucie, 2021. *Měření adheze tenkých vrstev* [online]. Praha [vid. 2023-05-15]. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/97025>

ŠKVAŘIL, Michal, 2018. *Optimalizace metod pro stanovení trvanlivosti nátěrových systémů na dřevo* [online]. Brno [vid. 2023-05-15]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/114408>

ŠULLA, Stanislav, 2022. Profesionální kontrola barevnosti. *Anamet s.r.o.* [online]. [vid. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.anamet.cz/professionalni-kontrola-barevnosti-nezbytny-krok-k-prosperite/>

TITTEL, Jan, 2019. *Testování korozní odolnosti kompozitních laserem navařených materiálů s vysokým poločasem rozpadu.* [online]. Plzeň [vid. 2023-05-15]. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: <http://dspace5.zcu.cz/handle/11025/38995>

VOLESKÝ, Lukáš, 2019. *Studium degradačních procesů modifikovaných povrchů implantátů* [online]. Liberec. Technická univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/153991/DPVolesky.pdf>

VRBATA, Tomáš, 2023. *Drsnost povrchu a její dopad na únavovou životnost* [online]. Praha [vid. 2023-05-13]. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/107407>

WALTON, Scott G. a J. E. GREENE, 2010. Chapter 2 - Plasmas in Deposition Processes. In: Peter M. MARTIN, ed. *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings (Third Edition)* [online]. Boston: William Andrew Publishing, s. 32–92 [vid. 2023-05-09]. ISBN 978-0-8155-2031-3. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-8155-2031-3.00002-8

WANG, Fuzhen a Junwei WU, 2023. Chapter 8 - Magnetron sputtering. In: Fuzhen WANG a Junwei WU, ed. *Modern Ion Plating Technology* [online]. B.m.: Elsevier, s. 189–228 [vid. 2023-05-11]. ISBN 978-0-323-90833-7. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-90833-7.00008-5

XU, Kwang Leong Choy, Cigang, 2019. Introduction. In: *Chemical Vapour Deposition (CVD)*. B.m.: CRC Press. ISBN 978-0-429-34236-3.

ŽANTA, Marek, 2011. *Měření tloušťky napařované vrstvy* [online]. Liberec [vid. 2023-05-17]. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://knihovna-opac.tul.cz/search?type=global&q=M%C4%9B%C5%99en%C3%AD+tlou%C5%A1%C5%A5ky+napa%C5%99ovan%C3%A9+vrstvy>

ŽELEZNÝ, Jakub, 2013. *Progresivní tenké vrstvy v aplikaci na řezné nástroje* [online]. Plzeň [vid. 2023-05-17]. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: <http://dspace5.zcu.cz/handle/11025/8625>

# Přílohy

Tabulka 7.1: Hodnoty drsnosti povrchu vrstev určené drsnoměrem

Substrát	Deponovaná vrstva	Drsnost povrchu [nm] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
AISI 303(a)	Cu	8 ± 2	6 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1
	Cr	7 ± 1	8 ± 1	10 ± 3	8 ± 3	6 ± 1	5 ± 1
CuZn37(a)	Ni	6 ± 1	7 ± 1	6 ± 2	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1
	Nerez	9 ± 1	8 ± 1	7 ± 1	6 ± 1	5 ± 1	5 ± 1
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	6 ± 1	6 ± 1	6 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	10 ± 2
Substrát	Deponovaná vrstva	Drsnost povrchu [nm] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
AISI 303(b)	Cu	140 ± 30	130 ± 40	140 ± 30	140 ± 50	130 ± 30	120 ± 30
	Cr	130 ± 20	140 ± 30	170 ± 70	120 ± 20	140 ± 30	140 ± 20
	Ni	140 ± 30	130 ± 20	130 ± 20	150 ± 40	130 ± 20	130 ± 20
	Nerez	130 ± 30	140 ± 40	150 ± 30	140 ± 10	140 ± 10	130 ± 20
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	140 ± 20	130 ± 20	150 ± 20	110 ± 20	200 ± 40	150 ± 20
Substrát	Deponovaná vrstva	Drsnost povrchu [nm] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
AISI 303(c)	Cu	500 ± 200	600 ± 200	500 ± 70	500 ± 200	560 ± 90	700 ± 200
	Cr	520 ± 50	620 ± 20	630 ± 70	570 ± 50	550 ± 30	610 ± 60
	Ni	630 ± 70	610 ± 60	570 ± 40	620 ± 60	600 ± 60	560 ± 60
	Nerez	830 ± 60	570 ± 50	600 ± 90	600 ± 30	580 ± 30	600 ± 50
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	540 ± 40	610 ± 80	600 ± 200	570 ± 50	570 ± 90	540 ± 50
Substrát	Deponovaná vrstva	Drsnost povrchu [nm] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
AISI 316	Cu	500 ± 200	500 ± 300	500 ± 200	400 ± 300	500 ± 300	500 ± 300
	Cr	600 ± 200	600 ± 200	500 ± 300	500 ± 300	500 ± 200	600 ± 300
	Ni	600 ± 300	600 ± 200	500 ± 200	600 ± 200	500 ± 200	500 ± 200
	Nerez	500 ± 300	500 ± 200	600 ± 200	600 ± 200	500 ± 200	500 ± 300
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	500 ± 300	500 ± 300	500 ± 200	500 ± 200	500 ± 200	600 ± 300
Substrát	Deponovaná vrstva	Drsnost povrchu [nm] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
CuZn37(b)	Cu	400 ± 200	400 ± 200	400 ± 200	300 ± 200	300 ± 200	400 ± 200
	Cr	400 ± 200	400 ± 200	400 ± 200	400 ± 200	300 ± 200	400 ± 200
	Ni	300 ± 200	360 ± 90	300 ± 200	300 ± 200	400 ± 200	400 ± 200
	Nerez	400 ± 200	300 ± 100	400 ± 200	400 ± 200	400 ± 100	500 ± 200
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	370 ± 40	200 ± 30	460 ± 30	400 ± 200	340 ± 200	410 ± 200

Tabulka 7.2: Výsledné hodnoty drsnosti povrchu vrstev určené konfokální mikroskopií

Substrát	Deponovaná vrstva	Drsnost povrchu [nm] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
<i>AISI 303(a)</i>	Cu	30 ± 20	24 ± 2	22 ± 6	26 ± 6	23 ± 3	25 ± 5
<i>CuZn37(a)</i>	Cr	26 ± 7	23 ± 1	18 ± 2	22 ± 4	24 ± 6	30 ± 20
	Ni	22 ± 5	24 ± 5	27 ± 4	24 ± 7	30 ± 3	22 ± 4
	Nerez	23 ± 3	24 ± 5	25 ± 7	26 ± 4	23 ± 3	25 ± 2
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	23 ± 1	24 ± 4	24 ± 4	23 ± 4	23 ± 2	29 ± 6
Substrát	Deponovaná vrstva	Drsnost povrchu [nm] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
<i>AISI 303(b)</i>	Cu	83 ± 8	76 ± 3	78 ± 5	95 ± 8	81 ± 6	78 ± 8
	Cr	85 ± 3	92 ± 6	82 ± 5	85 ± 5	90 ± 12	86 ± 5
	Ni	87 ± 6	79 ± 6	80 ± 10	83 ± 8	81 ± 5	87 ± 7
	Nerez	88 ± 3	87 ± 9	83 ± 3	95 ± 4	92 ± 8	93 ± 20
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	90 ± 2	88 ± 7	96 ± 5	86 ± 7	100 ± 30	90 ± 20
Substrát	Deponovaná vrstva	Drsnost povrchu [nm] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
<i>AISI 303(c)</i>	Cu	450 ± 10	420 ± 40	430 ± 20	440 ± 50	420 ± 80	670 ± 40
	Cr	410 ± 50	410 ± 40	460 ± 40	420 ± 20	440 ± 80	480 ± 20
	Ni	470 ± 30	440 ± 30	440 ± 30	420 ± 40	460 ± 10	430 ± 90
	Nerez	610 ± 50	500 ± 100	480 ± 70	500 ± 80	440 ± 30	460 ± 70
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	430 ± 40	450 ± 50	390 ± 20	410 ± 70	450 ± 40	370 ± 30
Substrát	Deponovaná vrstva	Drsnost povrchu [nm] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
<i>AISI 316</i>	Cu	600 ± 40	650 ± 20	690 ± 30	700 ± 200	750 ± 30	750 ± 10
	Cr	780 ± 80	800 ± 200	700 ± 200	720 ± 70	720 ± 80	700 ± 200
	Ni	750 ± 70	800 ± 200	700 ± 30	730 ± 30	670 ± 40	680 ± 50
	Nerez	800 ± 200	680 ± 60	690 ± 90	750 ± 40	700 ± 200	680 ± 60
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	650 ± 70	730 ± 40	740 ± 20	690 ± 20	660 ± 40	740 ± 40
Substrát	Deponovaná vrstva	Drsnost povrchu [nm] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
<i>CuZn37(b)</i>	Cu	640 ± 90	530 ± 20	590 ± 40	560 ± 90	530 ± 70	490 ± 20
	Cr	520 ± 30	460 ± 60	500 ± 50	800 ± 200	460 ± 80	550 ± 90
	Ni	470 ± 50	510 ± 70	500 ± 100	460 ± 70	510 ± 40	540 ± 40
	Nerez	650 ± 90	450 ± 40	540 ± 30	460 ± 20	440 ± 90	600 ± 200
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	380 ± 20	240 ± 20	450 ± 60	550 ± 90	520 ± 50	530 ± 80



Tabulka 7.3: Hodnoty úhlu smáčení tenkých vrstev

Substrát	Deponovaná vrstva	Úhel smáčení [°] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
AISI 303(a)	Cu	84 ± 7	86 ± 2	92 ± 1	90 ± 3	87 ± 2	83 ± 2
	Cr	98 ± 3	94 ± 1	96 ± 5	98 ± 3	94 ± 1	97 ± 1
CuZn37(a)	Ni	85 ± 1	97 ± 4	90 ± 3	93 ± 2	91 ± 3	86 ± 3
	Nerez	97 ± 4	98 ± 4	86 ± 3	97 ± 2	88 ± 1	89 ± 4
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	95 ± 4	76 ± 3	81 ± 4	86 ± 3	87 ± 2	84 ± 3
Substrát	Deponovaná vrstva	Úhel smáčení [°] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
AISI 303(b)	Cu	105 ± 2	106 ± 2	103 ± 1	106 ± 2	103 ± 1	102 ± 2
	Cr	95 ± 1	98 ± 2	97 ± 1	98 ± 1	98 ± 2	97 ± 2
	Ni	100 ± 1	101 ± 1	103 ± 2	103 ± 1	101 ± 1	99 ± 1
	Nerez	96 ± 3	98 ± 1	95 ± 2	94 ± 2	96 ± 2	95 ± 1
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	91 ± 3	87 ± 3	90 ± 1	88 ± 2	88 ± 1	91 ± 1
Substrát	Deponovaná vrstva	Úhel smáčení [°] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
AISI 303(c)	Cu	114 ± 3	118 ± 1	116 ± 4	111 ± 3	117 ± 1	121 ± 2
	Cr	97 ± 3	99 ± 3	106 ± 2	103 ± 2	104 ± 1	107 ± 1
	Ni	107 ± 2	108 ± 3	99 ± 5	102 ± 2	101 ± 1	103 ± 1
	Nerez	103 ± 2	106 ± 3	107 ± 2	104 ± 2	104 ± 1	105 ± 1
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	94 ± 6	98 ± 2	104 ± 3	98 ± 1	102 ± 4	101 ± 2
Substrát	Deponovaná vrstva	Úhel smáčení [°] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
AISI 316	Cu	104 ± 3	105 ± 2	111 ± 2	109 ± 1	107 ± 1	113 ± 2
	Cr	91 ± 2	92 ± 1	92 ± 2	91 ± 1	93 ± 2	97 ± 2
	Ni	94 ± 2	93 ± 1	91 ± 3	93 ± 2	91 ± 3	95 ± 1
	Nerez	94 ± 2	97 ± 1	90 ± 2	93 ± 1	94 ± 2	96 ± 2
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	87 ± 3	89 ± 5	87 ± 2	87 ± 2	86 ± 3	91 ± 2
Substrát	Deponovaná vrstva	Úhel smáčení [°] v závislosti na době depozice					
		15s	30s	60s	120s	240s	480s
CuZn37(b)	Cu	105 ± 1	107 ± 2	107 ± 1	100 ± 2	105 ± 3	108 ± 2
	Cr	102 ± 2	96 ± 3	90 ± 6	88 ± 3	94 ± 1	96 ± 1
	Ni	99 ± 1	95 ± 3	96 ± 1	93 ± 2	96 ± 1	92 ± 1
	Nerez	107 ± 2	108 ± 2	106 ± 1	98 ± 7	106 ± 3	101 ± 5
		1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	92 ± 5	97 ± 5	91 ± 2	92 ± 3	95 ± 1	92 ± 3

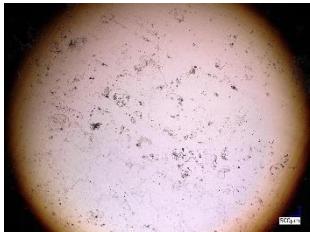
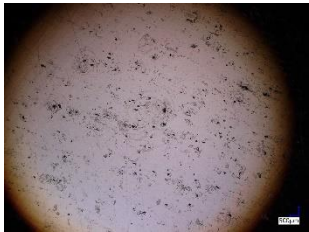
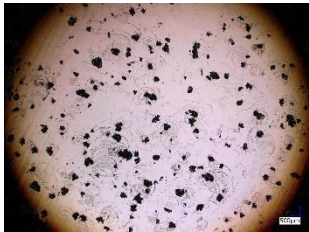

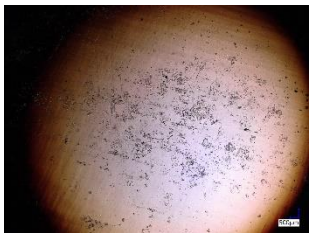
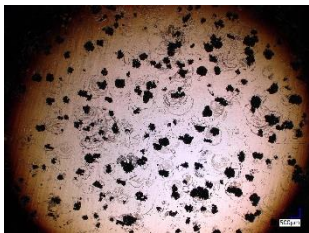
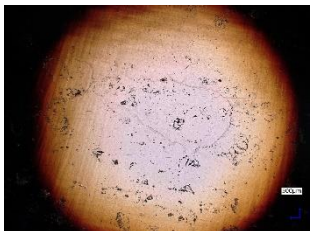
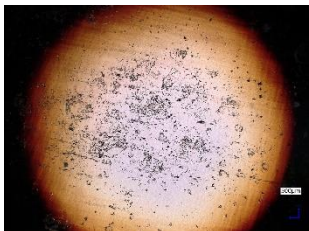
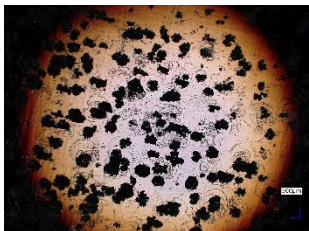
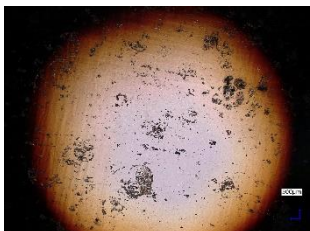
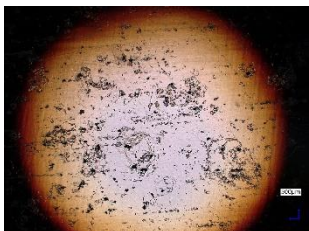

Tabulka 7.4: Naměřené souřadnice barevného prostoru CIE substrátů

Substrát	Osa	Souřadnice barevného prostoru CIE
AISI 303(a)	L*	3,69 ± 0,03
	a*	-0,04 ± 0,02
	b*	0,72 ± 0,04
CuZn37(a)	L*	14 ± 2
	a*	-1,2 ± 0,5
	b*	6,3 ± 0,2

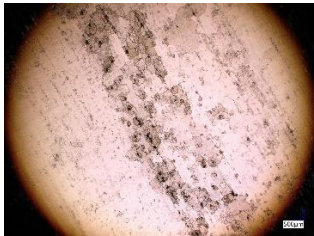

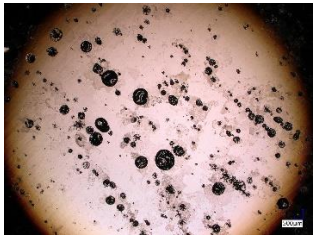


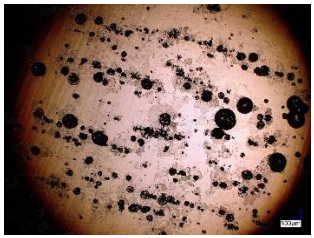
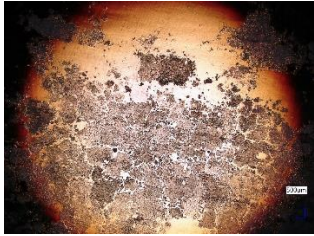
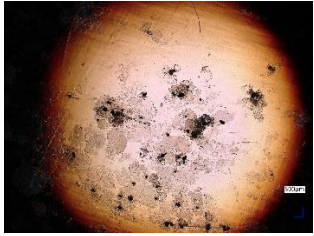
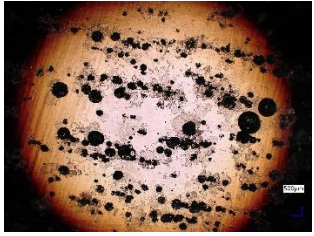



Tabulka 7.5: Naměřené souřadnice barevného prostoru CIE vytvořených vrstev

Substrát	Deponovaná vrstva	Osa	Souřadnice barevného prostoru CIE v závislosti na době depozice					
			15s	30s	60s	120s	240s	480s
AISI 303(a)	Cu	L*	5,7 ± 0,4	4,34 ± 0,06	4,47 ± 0,02	5,1 ± 0,8	4,9 ± 0,2	4,7 ± 0,4
		a*	2,79 ± 0,09	2,37 ± 0,03	2,51 ± 0,02	2,85 ± 0,05	2,77 ± 0,01	2,82 ± 0,05
		b*	2,8 ± 0,2	2,49 ± 0,01	2,55 ± 0,03	2,42 ± 0,06	2,50 ± 0,03	2,48 ± 0,07
CuZn37 (a)	Cr	L*	6 ± 2	11,5 ± 0,6	11 ± 2	10,1 ± 0,7	11,0 ± 0,3	10,7 ± 0,8
		a*	-0,3 ± 0,2	-0,99 ± 0,04	-0,8 ± 0,2	-0,6 ± 0,3	-0,8 ± 0,2	-0,8 ± 0,3
		b*	-3,2 ± 0,6	-5,3 ± 0,2	-4,3 ± 0,5	-4,7 ± 0,3	-5,0 ± 0,7	-4,4 ± 0,3
	Ni	L*	6,1 ± 0,6	6,9 ± 0,8	6,8 ± 1	8 ± 1	7,3 ± 0,4	8 ± 1
		a*	0,24 ± 0,08	-0,3 ± 0,2	-0,3 ± 0,3	-0,4 ± 0,3	-0,5 ± 0,3	-0,4 ± 0,2
		b*	-2,2 ± 0,2	-2,2 ± 0,3	-1,1 ± 0,4	-1,8 ± 0,3	-1,9 ± 0,5	-1,7 ± 0,8
	Nerez	L*	6,8 ± 0,8	7,5 ± 0,9	6,8 ± 0,7	7 ± 1	8 ± 1	7,4 ± 0,5
		a*	-0,5 ± 0,2	-0,6 ± 0,2	-0,4 ± 0,2	-0,5 ± 0,2	-0,5 ± 0,3	-0,5 ± 0,2
		b*	-3,6 ± 0,3	-3,3 ± 0,4	-2,7 ± 0,4	-2,7 ± 0,5	-3,2 ± 0,3	-2,7 ± 0,3
			1min	2min	4min	8min	16min	32min
	Ti	L*	3,9 ± 0,7	7,5 ± 0,6	7,2 ± 0,9	7 ± 1	7,2 ± 0,6	8,0 ± 0,4
		a*	0,25 ± 0,03	-0,6 ± 0,2	-0,4 ± 0,2	-0,4 ± 0,2	-0,22 ± 0,03	-0,4 ± 0,3
b*		-1,3 ± 0,4	-3,5 ± 0,1	-2,0 ± 0,4	-2,6 ± 0,4	-1,54 ± 0,03	-1,9 ± 0,3	

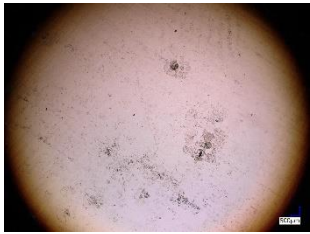

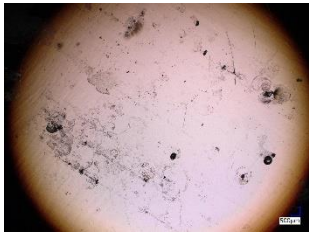
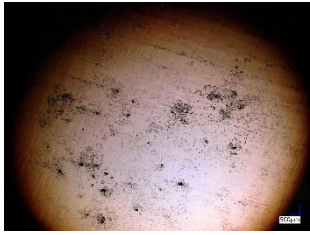
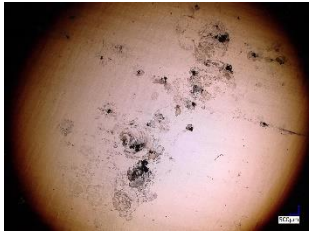
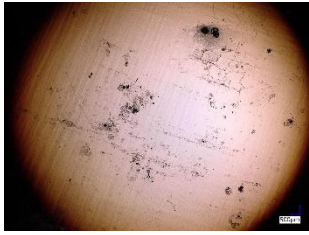
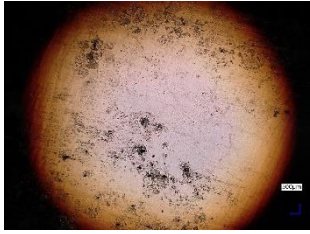
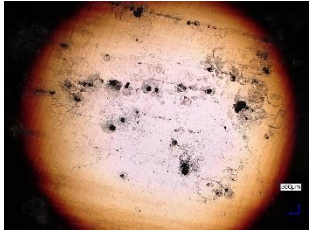
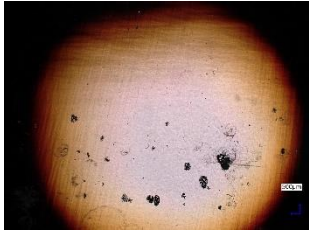
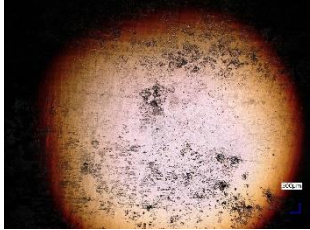
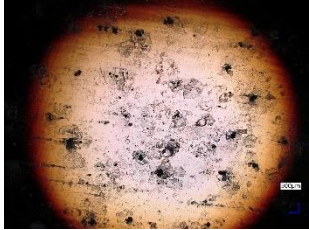
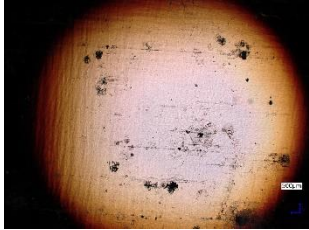
Tabulka 7.6: Snímky **Cr-vrstev** testovaných v **kondenzační komoře**

Doba expozice	Čas depozice vrstvy		
	60s	120s	240s
144h			
240h			
408h			
648h			

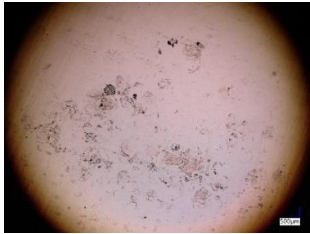
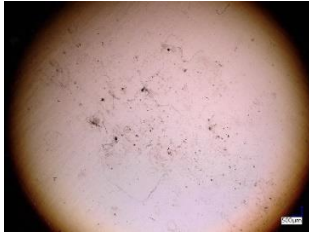
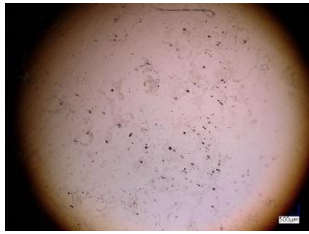
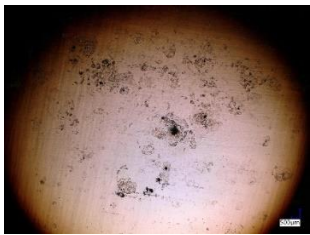
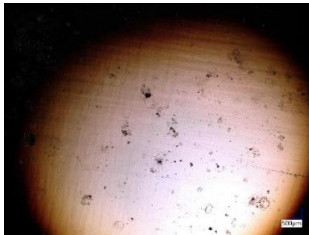
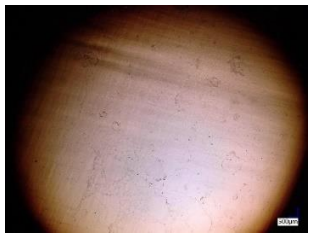
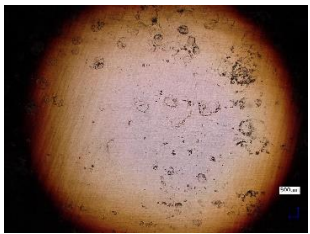
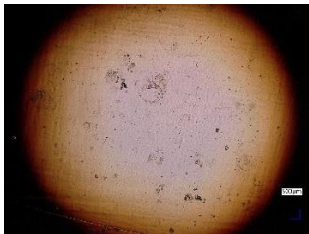
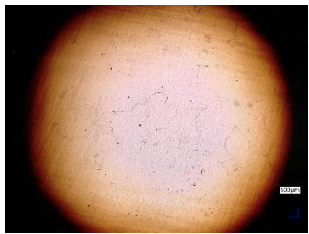
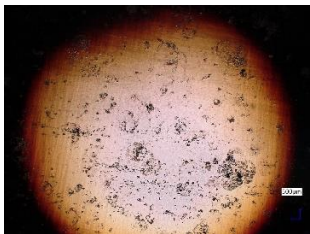
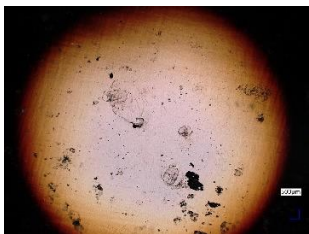
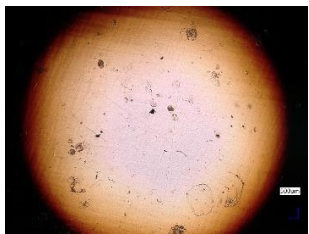
Tabulka 7.7: Snímky **Ni-vrstev** testovaných v **kondenzační komoře**

Doba expozice	Čas depozice vrstvy		
	60s	120s	240s
144h			
240h			
408h			
648h			









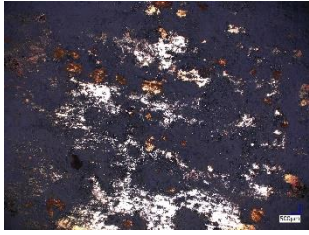





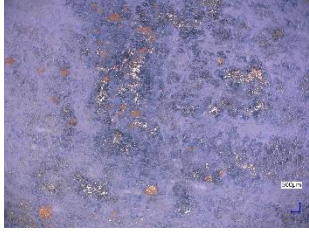
Tabulka 7.8: Snímky **Nerez-vrstev** testovaných v **kondenzační komoře**

Doba expozice	Čas depozice vrstvy		
	60s	120s	240s
144h			
240h			
408h			
648h			


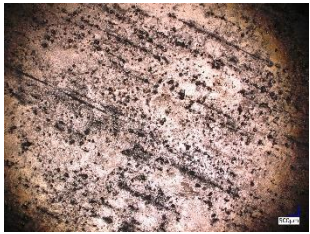













Tabulka 7.9: Snímky **Ti-vrstev** testovaných v **kondenzační komoře**

Doba expozice	Čas depozice vrstvy		
	60s	120s	240s
144h			
240h			
408h			
648h			

Tabulka 7.10: Snímky **Cr-vrstev** testovaných v **solné komoře**

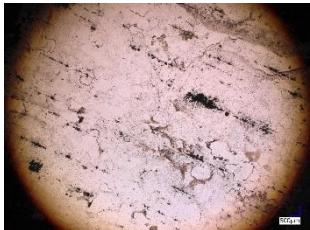
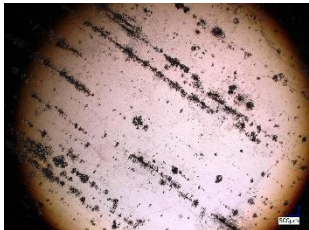
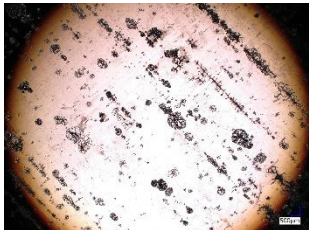
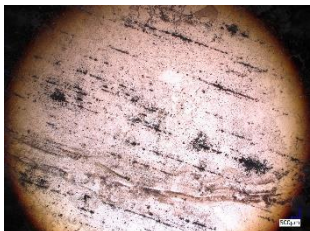

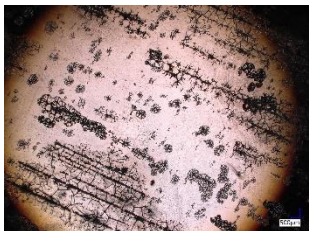









Doba expozice	Čas depozice vrstvy		
	60s	120s	240s
72h			
144h			
240h			
408h			
648h			

Tabulka 7.11: Snímky **Ni-vrstev** testovaných v **solné komoře**

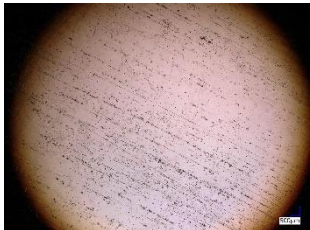
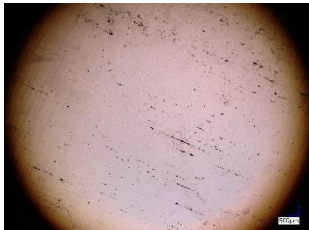
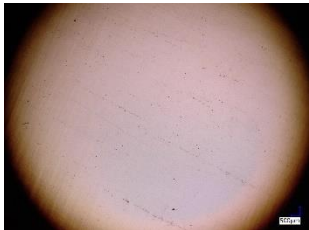

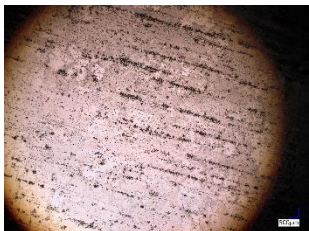



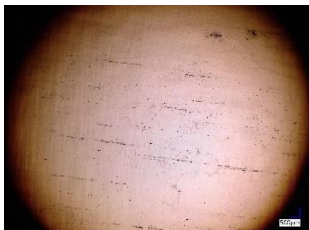






Doba expozice	Čas depozice vrstvy		
	60s	120s	240s
72h			
144h			
240h			
408h			
648h			



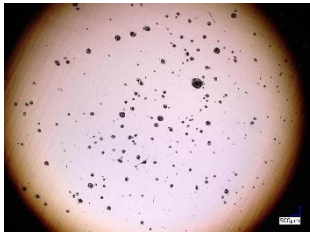





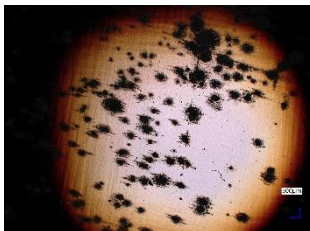
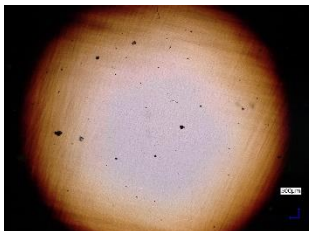
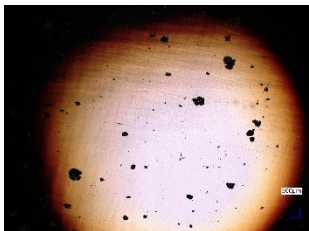

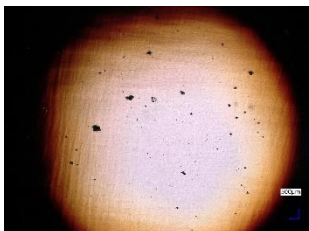
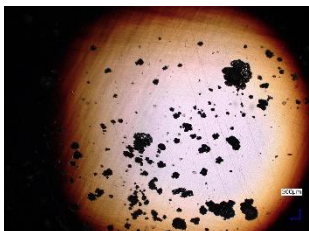
Tabulka 7.12: Snímky **Nerez-vrstev** testovaných v **solné komoře**

Doba expozice	Čas depozice vrstvy		
	60s	120s	240s
72h			
144h			
240h			
408h			
648h			




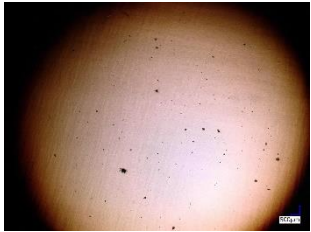
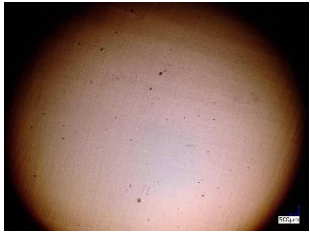
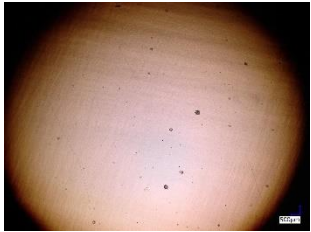
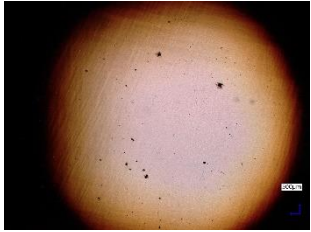
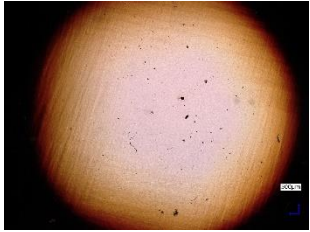
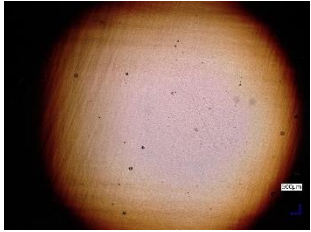
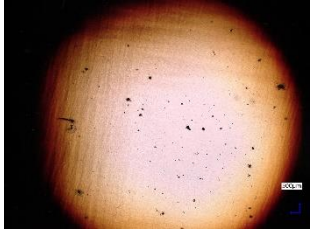
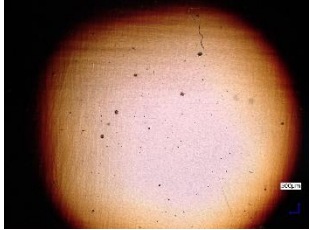

Tabulka 7.13: Snímky **Ti-vrstev** testovaných v **solné komoře**

Doba expozice	Čas depozice vrstvy		
	60s	120s	240s
72h			
144h			
240h			
408h			
648h			


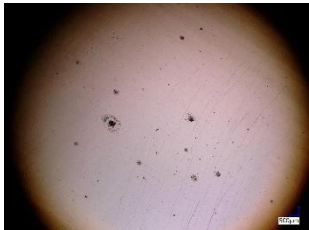
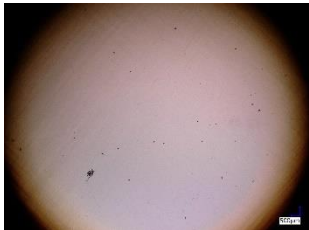
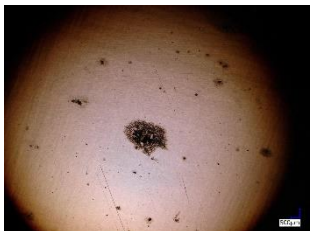


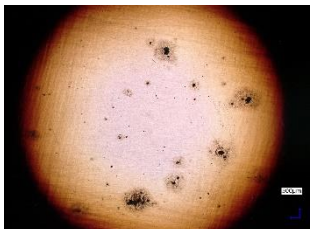
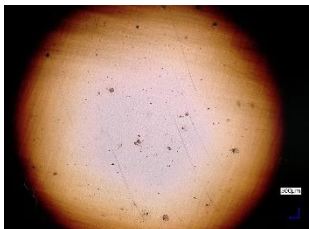
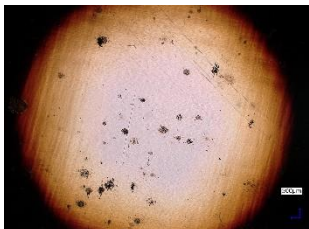
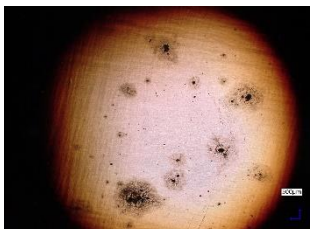
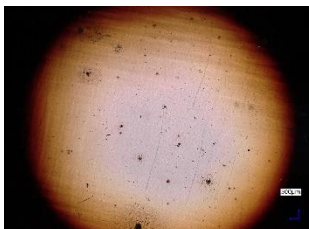

Tabulka 7.14: Snímky **Cr-vrstev** testovaných v **klimatické komoře**

Doba expozice	Čas depozice vrstvy		
	60s	120s	240s
48h			
144h			
264h			
480h			


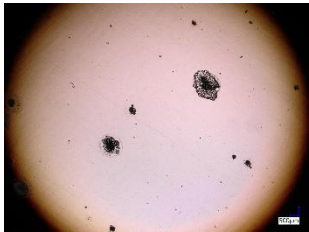

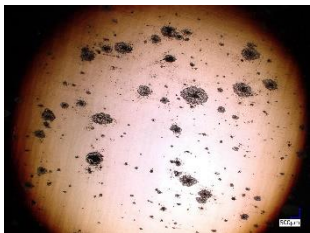
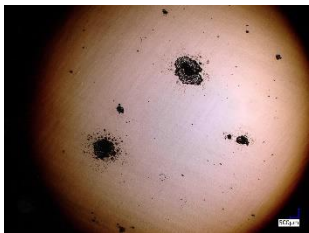
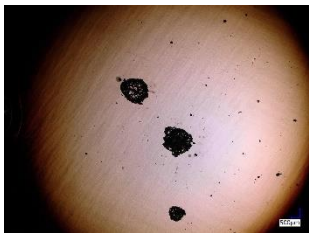

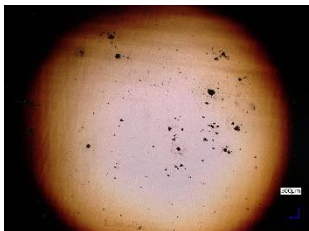
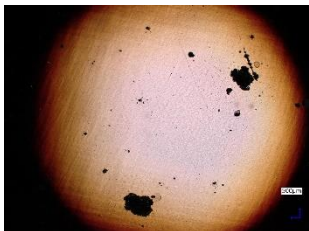
Tabulka 7.15: Snímky **Ni-vrstev** testovaných v **klimatické komoře**

Doba expozice	Čas depozice vrstvy		
	60s	120s	240s
48h			
144h			
264h			
480h			

Tabulka 7.16: Snímky **Nerez-vrstev** testovaných v **klimatické komoře**

<b>Doba expozice</b>	<b>Čas depozice vrstvy</b>		
	<b>60s</b>	<b>120s</b>	<b>240s</b>
<b>48h</b>			
<b>144h</b>			
<b>264h</b>			
<b>480h</b>			

Tabulka 7.17: Snímky **Ti-vrstev** testovaných v **klimatické komoře**

Doba expozice	Čas depozice vrstvy		
	60s	120s	240s
48h			
144h			
264h			
480h	