

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program: N0715A270014 - Materiálové inženýrství a výrobní  
technologie**

**Studijní specializace: Bez specializace**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Korozní odolnost slitin neželezných kovů nitridování**

**Autor: Bc. Radek LETÁK**

**Vedoucí práce: Ing. Ondřej CHOCHOLATÝ, Ph.D.**

**Akademický rok 2020/2021**

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek LETÁK**  
Osobní číslo: **S19N0067K**  
Studijní program: **N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a výrobní technologie**  
Téma práce: **Korozní odolnost slitin neželezných kovů nitridování**  
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

### Zásady pro vypracování

1. Způsoby nitridace
2. Podstata tvorby nitridačních vrstev
3. Vliv nitridace na korozní odolnost zpracovávaných materiálů
4. Aplikace nitridace pro zpracování slitin neželezných kovů
5. Metalografické hodnocení vybraných slitin neželezných kovů po procesu jejich nitridace
6. Stanovení vlivu nitridace na korozní odolnost slitin neželezných kovů
7. Diskuse výsledků
8. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-60 stran**  
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

LIU, Xin, Dianli QU, Xudong LUO a Yuxiang GUO., *Modification of matrix for magnesia material by in situ nitridation.*, Ceramics International [online]. 2019, 45(14), 17955-17961 [cit. 2020-10-08]. ISSN 02728842. Dostupné z: doi:10.1016/j.ceramint.2019.06.013

ZONG, Xiao, Huaming WANG, Zhuo LI, Jing LI, Xu CHENG, Yanyan ZHU, Xiangjun TIAN a Haibo TANG., *Laser nitridation on Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy.*, Surface and Coatings Technology [online]. 2020, 386 [cit. 2020-10-08]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2020.125425

ZHANG, P.G., K.Y. WANG, Jiandong LIANG a S.M. GUO., *Formation of hexagonal AlN nanotowers and layered nanorods by direct nitridation of aluminum.*, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures [online]. 2011, 43(4), 934-937 [cit. 2020-10-08]. ISSN 13869477. Dostupné z: doi:10.1016/j.physe.2010.11.020

JINLONG, Lv, Liang TONGXIANG a Luo HONGYUN., *Effect of grain refinement and electrochemical nitridation on corrosion resistance of the 316L stainless steel for bipolar plates in PEMFCs environment.*, Journal of Power Sources [online]. 2015, 293, 692-697 [cit. 2020-10-08]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2015.06.006

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ondřej Chocholatý, Ph.D.**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Ing. David Bricín**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**



**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan



**Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2020

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Velké poděkování patří především vedoucímu diplomové práce panu Ing. Ondřeji Chocholatému, Ph.D. za jeho cenné rady, odborné připomínky a ochotu při zpracování této práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Davidu Bricínovi a paní Ing. Kateřině Nové Ph.D. za poskytnutí všech informací a vstřícné jednání.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Leták	<b>Jméno</b> Radek		
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie			
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Chochoolatý, Ph.D.	<b>Jméno</b> Ondřej		
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KMM			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Korozní odolnost slitin neželezných kovů nitridováním			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	79	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	65	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Cílem práce bylo vytvořit nitridační vrstvu na neželezných kovech. Neželezné kovy byly zařazeny do nitridace za účelem zlepšení jejich mechanických vlastností. Především těch vlastností, mezi které patří tvrdost, otěruvzdornost a korozivzdornost. Vzorky byly následně vystaveny korozi. Práce popisuje vliv nitridace na neželezné kovy, a jak ovlivnila jejich metalografii a vlastnosti.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	nitridace neželezných kovů, koroze, tvrdost, tribologie, opotřebení, povrchová vrstva, nitrid titanu, nitrid hliníku

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Leták	Name Radek		
<b>STUDY PROGRAMME</b>	N0715A270014 Design engineering of machines and technical devices			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Chochoolatý, Ph.D.	Name Ondřej		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM			
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Corrosion resistance of non-ferrous alloys by nitriding			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2021
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	79	<b>TEXT PART</b>	65	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The aim of this master's thesis was to create a nitriding layer on non-ferrous metals. Non-ferrous metals were included to the nitriding process to improve their mechanical properties, such as toughness, abrasion resistance and corrosion resistance. All of the samples were afterwards exposed to corrosion. The work describes how nitridation process affected the non-ferrous metals and the way how their metallography and properties changed.
<b>KEY WORDS</b>	non-ferrous metals nitridation, corrosion, toughness, tribology, wear, surface layer, titan nitridation, aluminum nitridation

## Obsah

Úvod .....	10
TEORETICKÁ ČÁST .....	11
1 Nitridace .....	11
1.1 Historie .....	11
1.2 Nitridační proces .....	12
1.3 Materiály využívané k nitridaci .....	13
1.4 Nitridační vrstva .....	14
1.5 Rozdělení a způsoby nitridace .....	14
1.5.1 Nitridace v plynu .....	14
1.5.2 Nitridace v solných lázních .....	15
1.5.3 Iontová nitridace .....	16
1.5.4 Nitridace v prášku .....	17
2 Koroze .....	19
2.1 Rozdělení koroze .....	19
2.2 Typy korozního napadení .....	20
2.2.1 Rovnoměrná koroze .....	20
2.2.2 Nerovnoměrná koroze .....	20
2.2.3 Důlková koroze .....	20
2.2.4 Štěrbinová koroze .....	21
2.2.5 Mezi-krytalová koroze .....	21
2.2.6 Selektivní koroze .....	22
2.2.7 Koroze pod napětím .....	22
2.3 Charakter korozního děje .....	22
2.3.1 Chemická koroze .....	22
2.3.2 Elektrochemická koroze .....	23
2.3.3 Koroze redukčními plyny .....	23
2.4 Charakter korozního prostředí .....	23
2.4.1 Atmosférická koroze .....	23
2.4.2 Koroze v kapalinách .....	24
2.4.3 Koroze v půdě .....	25
3 Nitridace neželezných kovů .....	27
3.1 Nitridace hliníku .....	27
3.1.1 Nitrid hliníku .....	28
3.2 Nitridace titanu .....	29
3.2.1 Nitrid titanu .....	30
4 Charakteristika testovaných materiálů .....	31



4.1	Titan .....	31
4.2	Měď .....	31
4.3	Hliník.....	32
4.4	Mosaz .....	32
4.5	Slitiny hliníku.....	33
4.5.1	Slitina 2017, ČSN 42 4201 .....	33
4.5.2	Slitina hliníku, ČSN 42 4401, EW AW 6060.....	34
4.5.3	Slitina hliníku 42 4254, EN AW 2007 .....	35
5	Popis experimentu .....	37
5.1	Postup nitridačního zpracování .....	37
5.2	Metalografie vzorků .....	37
5.3	Leptání vzorků.....	39
5.3.1	Titan.....	39
5.3.2	Mosaz .....	40
5.3.3	Měď .....	40
5.3.4	Hliníkové slitiny .....	40
5.4	Korozní zkouška.....	40
5.5	Měření mikrotvrdomosti.....	41
5.6	Tribologická zkouška .....	42
PRAKTICKÁ ČÁST.....		45
6	Výsledky přípravy metal. výbrusů .....	45
6.1.1	Měď .....	45
6.1.2	Mosaz .....	48
6.1.3	Titan.....	51
6.1.4	Slitiny hliníku .....	54
6.1.5	Chemická analýza.....	58
6.2	Průběh korozní zkoušky .....	59
6.3	Zhodnocení hliníkových slitin.....	63
6.4	Zhodnocení mikrotvrdomosti .....	67
6.5	Získané hodnoty z tribologické zkoušky.....	69
7	Diskuse výsledků.....	71
8	Závěr .....	73
Bibliografie.....		74
Seznam obrázků .....		77
Seznam tabulek .....		79
Seznam grafů.....		79

## Úvod

Kovy zná lidstvo již velmi dlouho. Odhaduje se, že více než deset tisíc let. Jako první byly objeveny ty, které bylo možné nalézt na povrchu a byly v ryzím stavu. Ať už to bylo zlato ve zlatonosných potocích, či železo, které bylo převážně nalezeno v oblasti spadlých meteoritů. Mezi nejstarší známé kovy patří například olovo, měď, cín, stříbro a již zmiňované zlato a železo.

Od té doby, co lidstvo poznalo čisté železo a umělo z různých rud dostat kov, poznalo i korozi. Tedy proces, při kterém se kov přeměňuje na korozní produkt. Tento produkt je podobný tomu z čeho byl kov vytvořen. Koroze je samovolný proces, kdy kov přechází do stabilnějšího stavu. Pro lidi to je většinou nežádoucí stav a chtějí se mu vyhnout či ho alespoň na dost dlouhou dobu potlačit.

Hojně je koroze řešena i v průmyslu. Stále se hledají nové možnosti, které by dokázaly ochránit materiál před korozi. Ať už to jsou odolnější slitiny vůči atmosférické korozi nebo nové povlaky, které by uchránily, ne tak ušlechtilé oceli.

Pro využívání materiálu je důležitá znalost jeho mechanických a korozních vlastností, které zaručují funkčnost a bezpečnost materiálu během používání ve zvolených podmínkách. Napadení materiálu korozi je nebezpečné a nežádoucí, neboť materiál ztrácí svoje vlastnosti, kvůli kterým byl vybrán. Dochází k poškození mechanických vlastností mezi které se řadí pevnost, houževnatost nebo i elektrická vodivost. Koroze se ovšem ve většině případů nedá úplně potlačit.

Jednou z možných ochran proti korozi je vytvořit na materiálu tenký povlak. Tento tenký film má za úkol chránit materiál proti korozi a zároveň zlepšit jeho vlastnosti. Mezi hlavní vlastnosti patří zvýšení tvrdosti povrchu a ořezuvzdornosti. Nitridování je jeden z procesů, který nám umožňuje vytvoření takového filmu. Jde o chemické vytvrzení povrchu oceli pomocí dusíku.

## TEORETICKÁ ČÁST

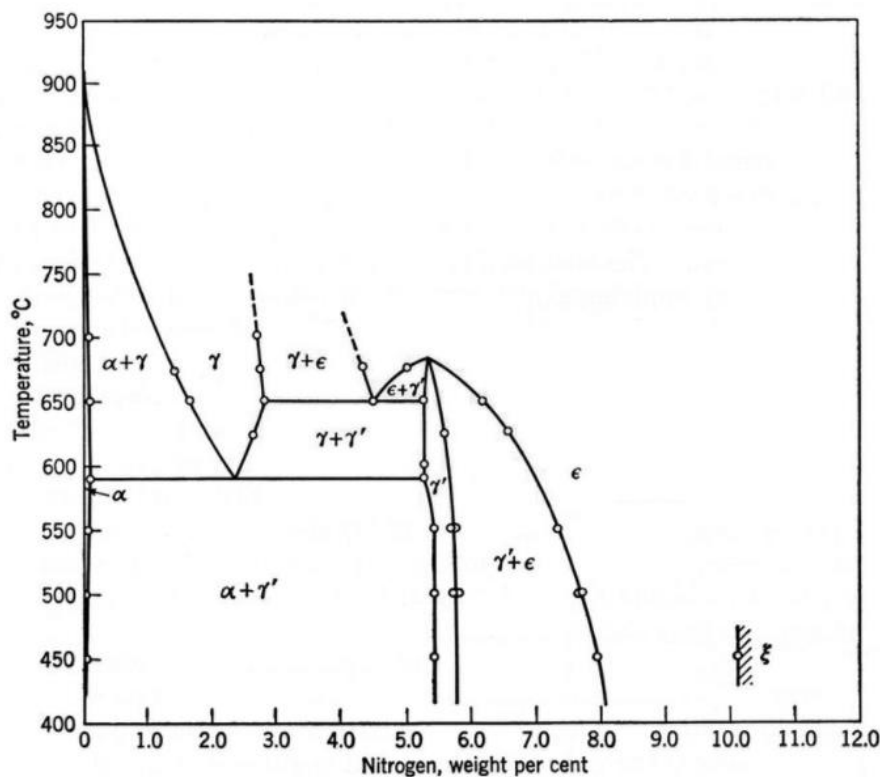
### 1 Nitridace

#### 1.1 Historie

Nitridace je druh chemicko-tepelného zpracování. Jde o způsob zvyšování tvrdosti povrchu. Zvýšené tvrdosti dosahujeme pomocí sycení povrchu materiálu dusíkem. V roce 1913 vyrobil ruský vědec N.P. Čiževskij čistý nitrid  $\text{Fe}_2\text{N}$ . Povrch materiálu sytíme dusíkem za vzniku nitridů u ocelí k tomu přednostně určených. Jde většinou o zušlechťené ocele. Vhodné oceli pro nitridování jsou slitinové oceli obsahující hliník, molybden, chrom či vanad. Teplota procesu je nižší než popouštěcí teplota tedy teplota A1. Nitridaci podporuje vyšší obsah hliníku, protože hliník tvoří tvrdé nitridy hliníku.

V dalších letech se vědci snažili objasnit, jak přesně vypadá a funguje a co všechno z chemického hlediska nitridační vrstva obsahuje. Důležitý mezník v tomto hledání závisel na atomárním dusíku. Díky němu jsou vytvořeny čisté nitridy. První nitrid, který byl izolován, byl nitrid železa. Soustava dusík-železo byla důležitá při svařování a dalším výzkumu austenitických ocelí. Vědci Sawyere a Frye sestavili první diagram železo-dusík, ten ovšem nebyl kompletní. Finální diagram nám přinesli až vědci Lehrer a Hägg, ti využili moderních metod jako jsou rentgen a magnetometrii. [1],[17]

Finální diagram Fe-N jak ho známe dnes.



Obr. 1: Rovnovážný diagram Fe-N [2]

V digramu se nachází 5 fází:  $\alpha$ ;  $\gamma$ ;  $\gamma'$ ;  $\epsilon$ ;  $\xi$

- $\alpha$  – v diagramu znázorňuje dusíkový ferit, jde o tuhý roztok dusíku v železe  $\alpha$ . Maximální rozpustnost dusíku v  $\alpha$ -Fe je 0,1 hm. % při eutektoidní teplotě (592 °C) Krystalová mřížka je zde kubická prostorově středěná.
- $\gamma$  – tuhý roztok dusíku v železe  $\gamma$ , jinak také dusíkový austenit, tato fáze vzniká nad 590 °C, má maximální hodnotu dusíku 2,8 %. Mřížka je zde kubická plošně středěná.
- $\gamma'$  – tuhý roztok dusíku v železe, jedná se o nitrid  $\text{Fe}_4\text{N}$ , z diagramu je vidět, že se jeho koncentrace pohybují mezi 5,3-5,75 hm. % N. Blíží se k čistému nitridu. Do teploty 672 °C je tato fáze stabilní. Má kubickou plošně středěnou mřížku, od fáze  $\gamma$  se odlišuje vlastnostmi. Má vysokou houževnatost, vyznačuje se vysokou tvrdostí a má výbornou ořezovatelnost.
- $\epsilon$  – tuhý roztok dusíku v železe, jde o nitrid  $\text{Fe}_2\text{N}$ . Opět z grafu vyčteme, že má koncentraci dusíku v rozmezích 4,35-11 hm. %. Tato fáze se odlišuje od ostatních mřížkou, která je hexagonální. Má to nejtěsnější uspořádání atomů. Při tvoření nitridových povlaků je velice důležitá. Vyznačuje se nízkým koeficientem tření. Má také nízkou ořezovatelnost, ale výbornou odolnost vůči korozi.
- $\xi$  – nitrid  $\text{Fe}_2\text{N}$ , má ortorombickou mřížku. [3] [4] [2]

## 1.2 Nitridační proces

Na počátku procesu je přiveden čpavek nebo jiná složka, ze které se získává dusík. Nejčastěji je používán právě čpavek, který se po zahřátí se rozpadá. Při rozpadu čpavku vznikne dusík, který se následně slučuje s chromem, železem, hliníkem, nebo jiným legujícím prvkem, se kterým tvoří stabilní nitridy. Díky těmto spojením vzniká tenký povrchový film, který obsahuje z velké části pouze právě daný nitrid. V pokračujícím procesu difunduje dusík hlouběji do vrstvy. Difúze probíhá lépe v žíhaných ocelích než v ušlechtilých. Na povrchu materiálu, který byl nitridován se promítnou všechny fáze, dle toho, jak se objevují v diagramu a v závislosti na sycení dusíkem. Na jejich výskyt má veliký vliv i teplota. Struktura vylučovaných fází je taktéž závislá na druhu oceli, nebo druhu materiálu a teplotě, při které se povrch vytváří. [3]

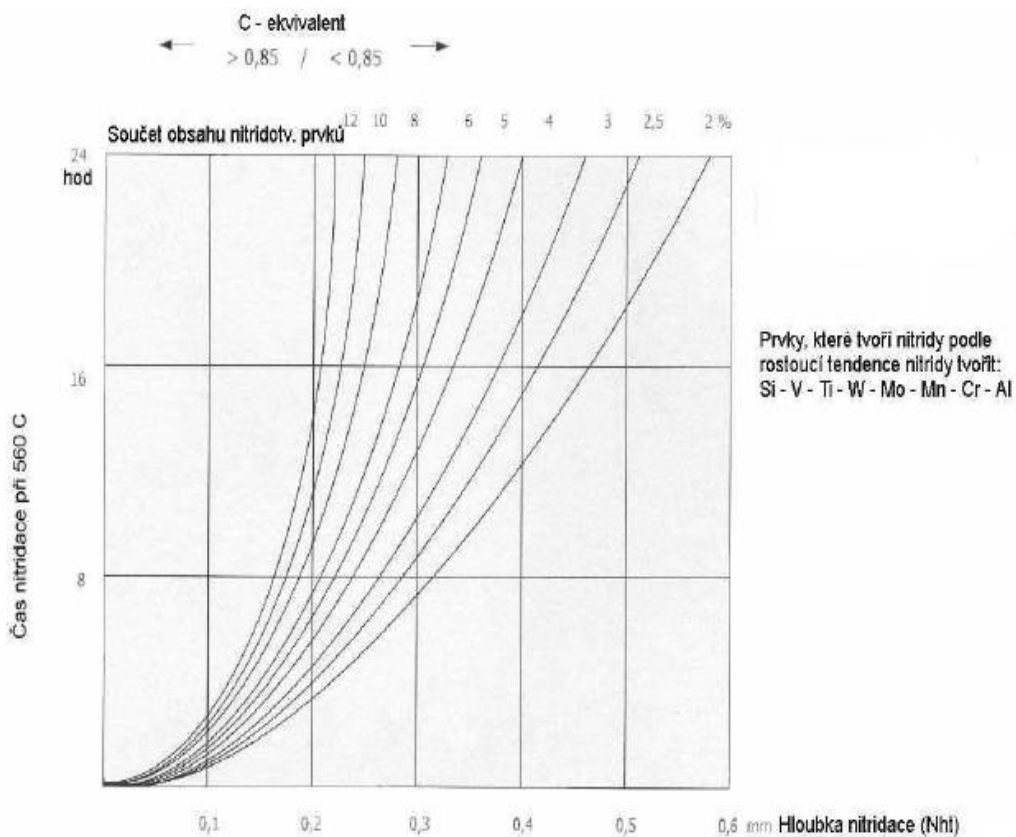
Vlastnosti nitridovaného povrchu jsou:

- Odolnost proti opotřebení
- Odolnost proti zadírání
- Odolnost proti popouštění
- Stabilita nitridační vrstvy
- Zvýšená odolnost vůči únavě
- Zvýšená citlivost vůči vrubům
- Malé objemové změny
- Vysoká tvrdost, která může mít přes 67 HRC

### 1.3 Materiály využívané k nitridaci

Než se vybere vhodný materiál k nitridování, musí být známo, k čemu bude využíván. Ne každá ocel je vhodná o nitridaci. Velice důležité je chemické složení ocelí, které budou nitridovány. Některé legující prvky vytváří stabilní nitridy, a právě tyto prvky jsou k nitridaci vhodnější jedná se především o vhodnost jednotlivých prvků, na kterou odkazuje obr. 2. [5]

- Nikl chrom molybdenová ocel  
86 XX-složení: Mo 0,20, Ni 0,55, Cr0,5  
87XX-složení: Mo 0,25 Ni0,5 Cr 0,5
- Chromová ocel  
51XX-složení: Cr 0,8 až 1,5



Obr. 2: Závislost teploty nitridace na hloubce nitridace a vliv legujících prvků [6]

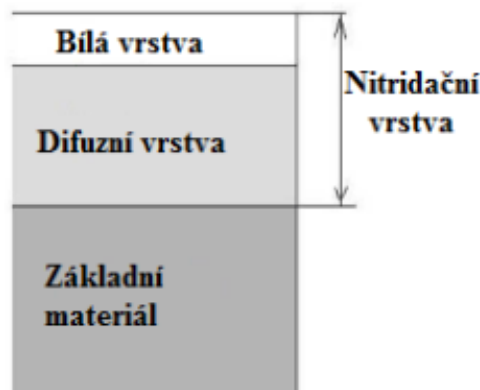
## 1.4 Nitridační vrstva

Nitridační vrstva se skládá ze dvou částí. Jedna se nazývá bílá vrstva a druhá difúzní vrstva zobrazena na obr.3.

- Bílá vrstva se někdy nepřesně nazývá jako spojovací vrstva. Skládá se z vrstvy nitridů. Bílá vrstva obsahuje fázi  $\gamma$  nebo fázi  $\epsilon$  v některých případech obsahuje kombinaci těchto dvou fází. Pokud vrstvu podrobíme metalografickému výbrusu, uvidíme ji zřetelně a její tloušťka nebude silnější než 0,01 mm.
- Druhá vrstva se nazývá se nazývá difúzní a leží pod bílou vrstvou. Tato vrstva obsahuje  $\gamma'$  a  $\alpha$  fázi. Dusík společně se železem a legujícími prvky tvoří síť nitridů, jež s vylučují především po hranici zrn. Nebo jsou dusík a železo společně vyloučeni uvnitř zrn jako nitridy. Difúzní vrstva má nižší tvrdost než bílá vrstva. Čím dál jsem od povrchu, tím je obohacení dusíku nižší, což souvisí s poklesem tvrdosti. Tloušťka vrstvy se pohybuje kolem setin až desetin milimetrů.

Úroveň a hustota rozložení částic jsou zodpovědné za tvrdost a pevnost nitridované součásti. Závisí především na:

- Druhu nitridované oceli
- Vlivu legujících prvků na rozpustnost dusíku v tuhém roztoku
- Koncentrace legujících prvků
- Teplota nitridace
- Afinita legujících prvků k dusíku



Obr. 3: Ukázka nitridační vrstvy [7]

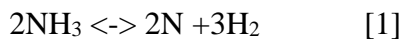
## 1.5 Rozdělení a způsoby nitridace

V dnešní době jsou využívány tři různé způsoby nitridování: nitridace v plynu, iontovou nitridací a nitridací v solných lázních.

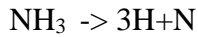
### 1.5.1 Nitridace v plynu

Aby k nitridačnímu procesu vůbec došlo, musí být dodrženy určité parametry. Mezi nejdůležitější patří teplota v peci, čas a průtok plynu. Při nitridaci v plynu je zdrojem dusíku, který se ukládá na povrch čpavek. Čpavek se rozkládá v peci za vysokých teplot.

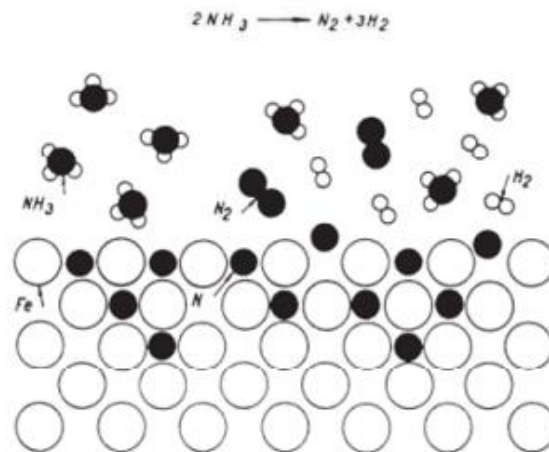
Při klasické nitridační teplotě 500-560 °C je čpavek silně nestabilní a jeho chování nám ukazuje následující rovnice:



Další rovnice nám ukazují, co se na povrchu nitridovaného materiálu děje.



Z rozloženého čpavku vzniká atomární dusík a vodík. Tyto prvky jsou nestabilní a mají potřebu se spojit s dalšími atomy a vytvořit molekuly, jak uvádějí rovnice 2 a 3. Dusík má velkou afinitu k železu. Také lehce difunduje za vyšší teploty. Pokud je nitridace prováděna při vyšších teplotách, difuze probíhá rychleji a umožňuje dosáhnout větších hloubek. Dusík v oceli vytváří po difuzi intersticiální prvek. Jak je vidět na obr.4. [5]



Obr. 4: Intersticiální difúze dusíku během nitridace [5]

### 1.5.1.1 Nitridační cyklus

Než do pece bude přidán čpavek, musí být pec zbavená vzduchu. Tento krok je důležitý z hlediska bezpečnosti, neboť by mohlo dojít k výbuchu. V peci jsou poté očištěné součásti zahřáty na nitridační teplotu, tedy teplotu pod A1 v dusíkové atmosféře. Po dokončení ohřívání je do pecního prostoru vpouštěn čpavek. Ze začátku je využíván velký průtok čpavku, který pomáhá zlepšit difuzi dusíku do oceli. Po čase, kdy jsou vytvořeny na povrchu sloučeniny, je možné průtok čpavku snížit. Nitridační proces je opakován, dokud nitridační vrstva nedosáhne potřebné hloubky. Po ukončení nitridačního procesu je pec propláchnuta dusíkem, abychom pec zbavili čpavku, který by mohl být nebezpečný při otvírání dveří. Dále nitridovaný materiál je ponechán v peci do vychladnutí.

### 1.5.2 Nitridace v solných lázních

Metoda nitridace v solných lázních využívá rozpuštěné soli, které mají vysoký obsah dusíku. Povlak je vytvářen ponorem do kádě. Kád' je zahřátá na požadovanou teplotu, která se

pohybuje okolo 500-560 °C. V zahřátém roztoku probíhají obdobné reakce jako při nitridaci v plynu. Můžeme mít dvě typické složení pro nitridovací lázně. [5]

- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| • První možnost:   | • Druhá možnost:                     |
| NaCl – 30%   | NaCN – 60%                           |
| KCl – 39%  | KCl – 24%                            |
| Na <sub>2</sub> CO nebo K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> – 31% | K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> – 15% |

#### 1.5.2.1 Výhody a nevýhody nitridace v lázni

Jasná výhoda lázni je jejich ekonomičnost. Lázně nepotřebují velké investice. Provozní náklady jsou celkově nízké. A na rozdíl od nitridace v plynu není potřebná komora, ve které je potřeba vyměňovat vzduch, a tedy není potřebná ani vývěva. Nevýhodu můžeme spatřovat v problémové likvidaci obsahu lázně a omezení ve velikosti nitridovaných částí. [5]

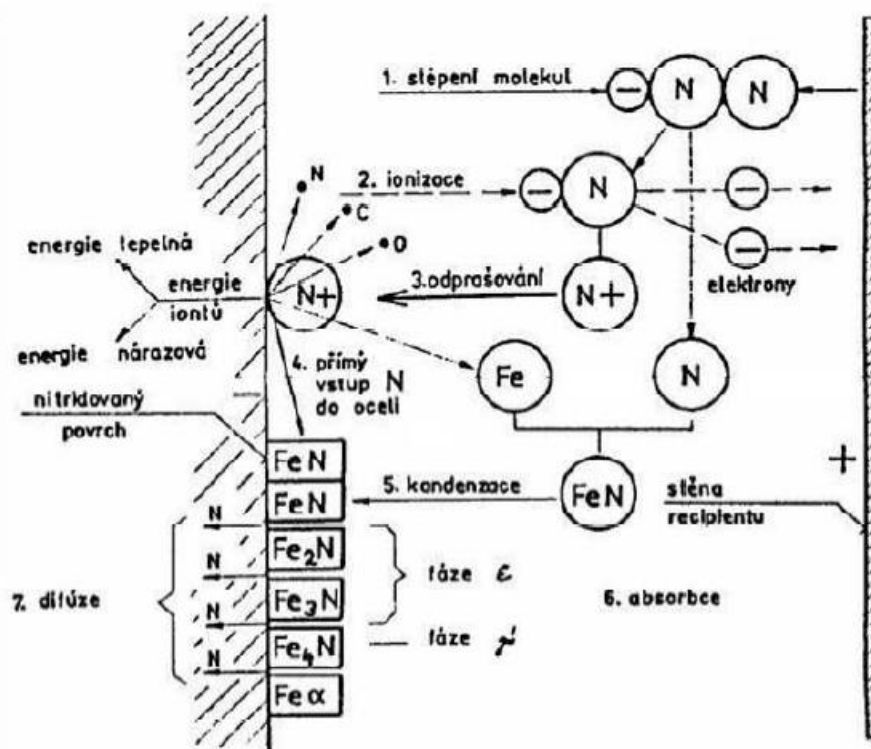
#### 1.5.3 Iontová nitridace

Iontová nitridace využívá k sycení povrchu dusíkem částečně ionizovaného plazmatu. Iontová nitridace se nazývá různými názvy, mezi něž patří plazmová nitridace, nitridace v doutnavém výboji a plazmová iontová nitridace. [3] [5]

Materiály, které jsou tímto typem nitridovány, jsou umísťovány do vakuové nádoby (recipientu). Vakuová nádoba je zapojena jako anoda a je v ní stále snížený tlak s obsahem plynů potřebných pro nitridaci. Po připojení stejnosměrného proudu o hodnotě mezi 400-1000 V vznikne mezi katodou a anodou elektrické pole. Kontrolní systémy upravují toto pole, aby proces nitridace probíhal nepřerušovaně a správně. [3]

Typickým znakem pohybem iontů blíže ke katodě je nárůst jejich rychlosti a zároveň zvýšení jejich kinetické energie. Důležité ovšem je, že tento nárůst není lineární. K hlavní změně dochází až v bezprostřední blízkosti povrchu, kdy ionty prudce zrychlují a tím získávají vyšší energii. Díky tomu většina dějů probíhá těsně nad povrhem a/nebo v přímé blízkosti povrchu. Děje, které probíhají na povrchu, znázorňuje obr. 5.





Obr. 5: Schéma iontové nitridace [3]

### 1.5.3.1 Průběh iontové nitridace

Kladné ionty za vysoké rychlosti narážejí do nitridovaného povrchu. Po dopadu se jejich kinetická energie je přeměňována na teplo a díky tomuto postupu je povrch ohříván. Po dopadu ionty nejen že ohřívají povrch, ale i z povrchu jsou vyráženy atomy železa a jiné prvky. Tomuto jevu se říká odprašování. Díky tomuto jevu vzniknou nitridy železa. A právě díky nim se na povrchu vytváří pomocí kondenzace absorpční vrstvička, která obsahuje vysoké procento dusíku. Pokud je vhodně zvoleno prostředí a správně určeny parametry, je možné do značné míry ovlivnit povrchový film. [3]

### 1.5.3.2 Výhody a nevýhody iontové nitridace

Velkou výhodou tohoto principu nitridace je využívání tepla. Není potřeba žádný externí zdroj tepla, protože dopad iontů vytváří stálý ohřev na nitridační teplotu. Další výhodou je rychlejší růst nitridační vrstvy. Proč se tomu tak děje, není doposud zcela zřejmé. Ovšem pokud chceme, aby film zasahoval hlouběji do materiálu, poté se rychlost růstu vrstvy sníží. Iontová nitridace má velikou škálu možností, jak nastavit určité parametry a tím i velké pole působnosti. Jedna z hlavních předností je omezení či úplné zamezení vytvoření bílé svrchní vrstvičky. Jako nevýhodu lze brát fakt, že tento proces musí fungovat ve sníženém tlaku. Musí být tedy zajištěno snížení tlaku, kterého bude docíleno pomocí vývěvy. Koupě celé soupravy je finančně náročnější. [3]

## 1.5.4 Nitridace v prášku

Tato nitridace bude následně využita i v experimentální části této práce. Jedná se o metodu založenou na obdobném principu jako je prášková cementace. Nitridační plyn vzniká uvnitř žáruvzdorné krabice při teplotě kolem 560°C. Aby došlo k nitridaci je potřeba uzavřené

krabice i aktivátor. Tato metoda se hojně využívá u malých kusů s různými požadavky na tvorbu nitridové vrstvy. Další výhodou této metody je její ekonomické hledisko. Je ekonomicky nenáročná, snadno dostupná v tom pohledu, že je vyžadována pec s rovnoměrným rozložením teploty. Výhodou je, pokud má pec řízenou cirkulaci atmosféry, ale není to podmínka k dobré nitridaci. Další části potřebné k nitridaci jsou nitridační prášek, aktivátor a žáruvzdorná krabice. [7], [3], [1]

Během práškové nitridace se využíváný prášek nemění. Aktivita procesu je řízena především procentem aktivátoru, který se přidává, aby proces nitridace mohl vůbec proběhnout. Aby bylo dosaženo dobré nitridační vrstvy, která bude mít dostatečné vlastnosti, je důležité optimálně navolit metodu, dobu nitridace a v neposlední řadě i teplotu nitridace. S ohlednutím k tomu, že nitridační teploty se pohybují v oblasti popouštěcích teplot, tedy kolem 520 °C, dochází zároveň s prodlužující se dobou nitridačního procesu ke snížení pevnosti základního materiálu. Tento efekt vzniká vlivem popouštění. A právě z tohoto důvodu je nutné/žádoucí sledovat vztah mezi teplotou a dobou popouštění. A z tohoto pozorování odvodit o kolik musí být vyšší pevnost před dlouhodobou nitridací, aby bylo dosaženo požadované tvrdosti, i když se bude jednat o dlouhodobou nitridaci. [6], [3]

## 2 Koroze

Materiály jsou vystaveny různým korozním vlivům. Jen málo materiálů není přímo těmto vlivům vystaveno. Za tyto vlivy jsou považovány různé přírodní podmínky nebo prostředí, které je vytvořeno lidmi. Za agresivní prostředí vytvořeno lidmi lze brát v úvahu např. lázně s různými elektrolyty. Povrch materiálu je ovlivňován korozi. V mnoha případech dochází přímo k porušení svrchních vrstev a v důsledku toho následuje snížení všech vlastností materiálu. Odolnost povrchu vůči těmto nechtěným vlivům je dána několika vlastnostmi. Primární vlastnost, která odolává korozi je chemické složení. Mezi další důležité parametry je započítávána tloušťka, struktura, velikost pnutí, jakost spojení se základním materiálem, druh namáhání součásti a taktéž i povlaku. [8]

*„Samovolně probíhající nevratný proces postupného narušování a znehodnocování materiálu chemickými a fyzikálně-chemickými vlivy prostředí.“ [8]*

Korozi podléhají nejen kovy, ale také jejich slitiny a nekovové materiály. Koroze může probíhat v mnoha typech prostředí, ale musí být s kovem přímo ve styku. Povrch materiálu, který je narušen korozi, směřuje do výchozího stavu. Tedy do neuspořádaného stavu s volnou entropií. Tímto směrem jsou směřovány postupně všechny systémy. Tento samovolný postup, který znehodnocuje povrch materiálu, odlišuje korozi od ostatních reakcí, jimiž je materiál podrobován ovšem s určitým záměrem. Tímto záměrem může být myšleno například leptání nebo rozpouštění kovů. [8]

### 2.1 Rozdělení koroze

Koroze kovu může být pozorována ve více variantách. Nejčastěji se s korozi materiálu setkáme jako s úbytkem materiálu. Kdy zároveň s procesem úbytku materiálu vznikají korozní produkty. Další ukazatel koroze nemusí být vždy tak viditelný jako úbytek hmotnosti. Projevy poškození struktury jsou viditelné až po nějakém čase například korozním praskáním. [8]

Korozní děje si můžeme rozdělit z hlediska:

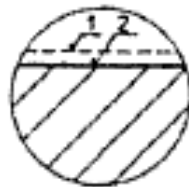
- Způsobem napadení
- Podle charakteru probíhajících dějů
- Korozního prostředí
- Hlavní činitel, jenž způsobuje korozi

## 2.2 Typy korozního napadení

Následující kapitola se zabývá jednotlivými typy korozního napadení. Korozní napadení dělíme do dvou sekcí. První je rovnoměrné napadení a druhé je nerovnoměrné napadení. V běžné praxi se častěji vyskytuje nerovnoměrné napadení.

### 2.2.1 Rovnoměrná koroze

Při této formě koroze je úbytek materiálu rovnoměrný po celé ploše poškození, jak je vidět na obr. č. 6. Z hlediska spolehlivosti zařízení je rovnoměrná koroze ta nejlepší varianta, všude bude koroze probíhat stejně. Je možné experimentálně určit jakou rychlostí bude ubývat materiál. A s tímto vědomím lze počítat s úbytkem a předem může být ponecháno více materiálu. Pokud je celý povrch materiálu v pasivním stavu, pak může dojít k rovnoměrné korozi. Mikro-články jsou uplatňovány při rovnoměrné korozi v aktivním stavu. Aby docházelo stále k rovnoměrnému úbytku povrchu, tak je zapotřebí, aby se lokalizace anodických a katodických míst průběžně měnila. [8] [9] [10]



Obr. 6: Rovnoměrné napadení korozi, kdy 1 - byl původní povrch, 2 - povrch po napadení [8]

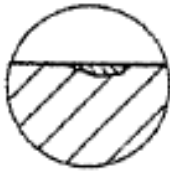
### 2.2.2 Nerovnoměrná koroze

Tento typ koroze je projevován napadením jen omezené části povrchu materiálu nebo koroze napadne jen určitou strukturní oblast součásti. Zde nastává nebezpečí, pokud dojde k tomuto druhu napadení, může zajít tak daleko, že nám např. ubyde celá jedna složka. A než tento fakt zjistíme bude již pozdě na nápravu škod. [1]

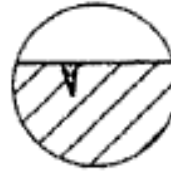
### 2.2.3 Důlková koroze

Jedná se o ohraničený korozní děj. Při této korozi vznikají na povrchu materiálu důlky. Ovšem okolí zůstává neporušené. Tento typ koroze je běžný pro lehce pasivovatelné kovy, mezi něž se řadí železo, nikl, hliník, chrom, korozivzdorné oceli a další. Důlková koroze je vytvářena místním poškozením svrchní vrstvy, jenž pasivuje povrch materiálu. Stává se tak především v prostředích, kde se vyskytují oxidující látky. V raném počátku vzniká bodové koroze nejčastěji díky tomu, že u povrchu chloridové ionty narušují strukturu povrchu, a naopak hydroxylové ji pasivují. Mezi těmito dvěma postupy nastává fluktuace podmínek. Vznik bodové koroze spočívá v napadení kovu v místech se slabšími ochrannými vlastnostmi pasivní vrstvy. Tato koroze je nebezpečná z důvodu proděravění i poměrně tlustých stěn. Důlkové porušení povrchové vrstvy se od bodového liší průměrem důlku. Důlkové porušení má větší průměr než hloubku. Mikro-důlky vznikají a zase zanikají, tam kde byla slabší ochranná vrstva ovšem přetrvávají a z nich postupně vznikají důlky a možnost vytvoření koroze. [8] [9]

Rozdíl mezi důlkovým a bodovým porušením povrchu jsou znázorněny na obr. č. 7 a 8.



Obr. 7: Důlkové porušení povrchu [8]

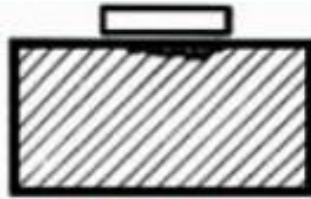


Obr. 8: Bodové porušení povrchu [8]

#### 2.2.4 Štěrbínová koroze

Tato koroze blízce souvisí také s bodovou korozí. Vyskytuje se v jemných kapilárách nebo v úzkých místech, kde dochází ke špatné cirkulaci korozního prostředí a z toho důvodu zde vznikají rozdíly v koncentraci iontů a dochází zde i ke snížení pH. Podobné místo jako je uvedeno na obr. 9. To utváří dobré podmínky pro vznik koroze. [11]

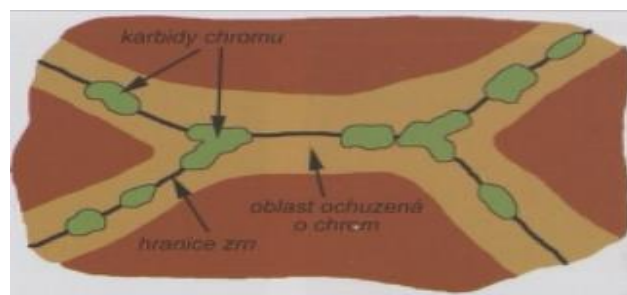
Ke štěrbinové korozi nemusí docházet pouze v důsledku účinkování silného elektrolytu, ale může k ní docházet i díky atmosférickým podmínkám. Prevence před korozí záleží na konstrukčním řešení celého spoje. Je důležité, aby bylo místo utemováno a nemohla se ve štěrbině usadit žádná voda, či jiná kapalina. Pokud bude místo suché koroze nenastane.



Obr. 9: Štěrbínová koroze [8]

#### 2.2.5 Mezi-krystalová koroze

Následující typ koroze, který je vykreslen na obr. č. 10, se objevuje převážně u korozivzdorných ocelí a slitin hliníku. Korozivzdorné oceli získávají svoji odolnost vůči korozi díky rovnoměrné pasivní vrstvě. Tato vrstva je tvořena směsnými oxidy na bázi železa a chromu. Když se ocel zahřeje na danou teplotu, např. při svařování, může dojít k tzv. „zcitlivění“. Na hranicích zrn se precipitují částice karbidů chromu, díky čemuž se okolní materiál ochuzuje o chrom. Z tohoto důvodu pasivní vrstva v oblasti blízké hranic zrn ztrácí svoje ochranné vlastnosti a dochází k rychlému koroznímu napadení. Aby k tomuto nežádoucímu účinku nedocházelo, je možné materiál stabilizovat. Tato stabilizace potlačí vytváření precipitujícího chromu za pomoci snížení obsahu uhlíku, nebo legováním prvky s vyšší afinitou k uhlíku, než má chrom. [11]



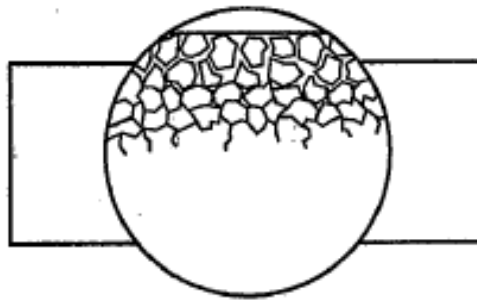
Obr. 10: Mezi-krystalová koroze [11]

### 2.2.6 Selektivní koroze

Selektivní koroze rozpouští pouze některé složky slitiny. Často jsou uváděny jako příklad selektivní koroze odzinkování mosazi. Zinek je v tomto případě méně ušlechtilý kov slitiny a přemění se – koroduje na houbovitou měď. Ke korozi může dojít po celém povrchu nebo lokálně. Velký problém může nastat při selektivním rozpouštění železa v šedé litině. Tento proces podstatně zhoršuje mechanické vlastnosti. [10] [9]

### 2.2.7 Koroze pod napětím

Jedná se o specifický druh interkrystalické koroze (viz obr. č. 11). Problémem je možnost, že se materiál náhle zhroutl. Zhroucení nastává tehdy, když je korozi napadený materiál zároveň namáhán, a to především v tahu. Doba destrukce materiálu nezávisí na časové ose. Je jedno, jestli namáhání působilo od počátku s korozi nebo bylo přidáno až později. Mechanismus této koroze je stejný jako u interkrystalické koroze. Korozivně nejméně odolná místa jsou postupně naleptávána a tím zeslabována. Jde především o hranice mezi krystaly nebo oblasti přímo v krystalech. Tyto narušená místa postupem času ztrácejí svoje vlastnosti a jsou méně odolná vůči prasknutí. Jsou činidla, která tento typ koroze velice podporují. Mezi ně jsou řazeny koncentrované roztoky dusičnanů, především dusičnan vápenatý a amonný. [12]



Obr. 11: Interkrystalická koroze [13]

## 2.3 Charakter korozního děje

Každé prostředí je specifické a účinkuje na každý materiál jinak. Nejčastější důsledek postupující koroze je většinou úbytek materiálu doprovázený vznikem korozních produktů na povrchu součásti jako jsou například oxidy a sulfidy, proděravění materiálu při dlouhodobém účinku koroze nebo vzniku strukturní koroze. [1]

Podle postupu mechanismu korozních dějů se koroze podle prostředí dělí na chemickou a elektrochemickou. [8]

### 2.3.1 Chemická koroze

Chemická koroze je aktivní v plynech, které mají oxidační nebo redukční povahu. Charakteristickým znakem chemické koroze je vznik svrchních vrstev korozního produktu. Koroze probíhá za normálních a zvýšených teplot. Na vlastnostech vytvořených korozních prvků a možnosti průniku korozního prostředí touto vrstvou závisí další růst korozní vrstvy a zároveň i rychlost jejího růstu. [8]

### 2.3.2 Elektrochemická koroze

Elektrochemická koroze může probíhat díky výskytu iontů. Ionty vzniknou disociací korozního prostředí. Jde o korozi, která probíhá, když se kov dostane do přímého kontaktu s elektrolytem. Pokud je kontakt vytvořen, dojde ke vzniku roztoků kyselin, zásad a solí. Elektrochemická koroze je charakterizována dvěma dílčími ději – oxidací a redukcí, jež jsou popsány anodickou a katodickou reakcí. Když dochází ke katodické reakci, vytváří se oxidová vrstva na kovech. Anodická a katodická reakce probíhají současně. Zároveň jsou na sebe vázány elektrony, které jsou uvolňovány při anodické reakci. A následně jsou tyto elektrony spotřebovány redukcí reakcí. [10]

### 2.3.3 Koroze redukčními plyny

Tato koroze je způsobena ve velké většině případů redukujícími plyny. Tyto plyny jsou difundovány do povrchu materiálu a způsobují korozi. Koroze vznikne, když se plyn dostane do reakce s nekovovými složkami, které jsou obsaženy v materiálu. Při této reakci na povrchu nevznikají korozní zplodiny. K těmto typům koroze lze řadit i koroze, které probíhají v kapalném prostředí neelektrolytů obsahující sírné sloučeniny. Mezi tyto sloučeniny patří kapalná paliva nebo mazací oleje. Řadí se sem i poškozování materiálu v roztavených kovech, např. sodíkem, ten se využívá jako chlazení v jaderných elektrárnách. [8]

## 2.4 Charakter korozního prostředí

Existuje mnoho prostředí, ve kterých mohou být uloženy/exponovány používané materiály. Konstrukce musí nejčastěji odolávat vysokým rozdílům teplot a rozdílné vlhkosti vzduchu. Dále na trhu existují různé kotvící konstrukce, které jsou nastálo uloženy hluboko v zemi. Zde je konstrukce vystavena jiným typům koroze. Jednou z posledních nejčastějších korozních prostředí jsou kapaliny. Velice časté je uložení konstrukcí či jiných materiálů v moři, kde je korozní prostředí velice agresivní.

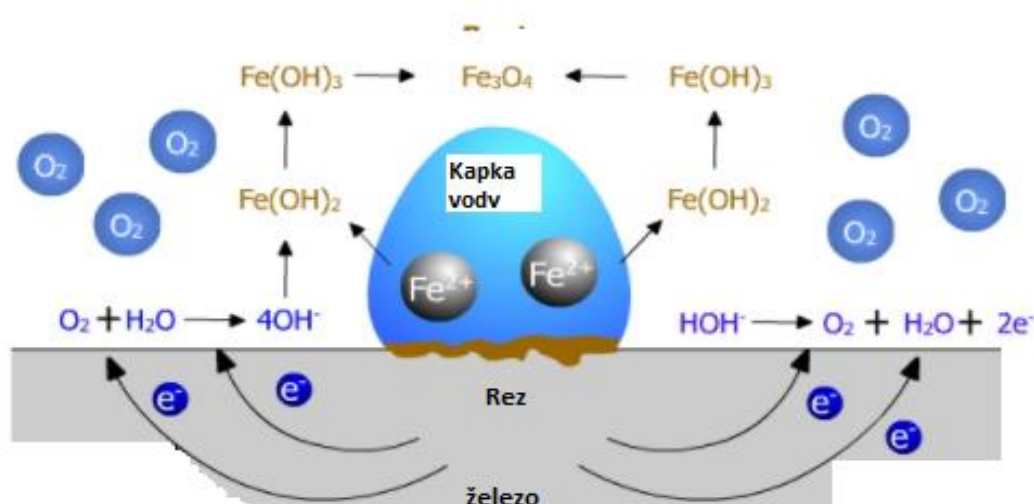
### 2.4.1 Atmosférická koroze

Tento typ koroze je nejčastější. Jde o elektrochemickou korozi, která probíhá s kyslíkovou depolarizací. Tento jev je pro lepší pochopení znázorněn na obr. č. 12. Výskyt koroze v atmosféře závisí, nejen na obsahu vlhkosti ve vzduchu, ale také na počtu částic plynných nečistot ve vzduchu, které podporují vytvoření vlhkosti, a tudíž podporují korozi. Mezi nejčastější a nejagresivnější složky, které jsou vyskytovány v atmosféře, patří  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HCl}$ , dále poté také prach a popílek. [13]

Hlavním činitelem atmosférické koroze je kyslík. Pro průběh elektrochemické reakce není nutné dosáhnout rosného bodu. Už při nižší vlhkosti je na povrchu kovu vytvářena tenká vrstva elektrolytu. Ta má 0,005 až 0,150 mm. Za příčinou stojí nerovnosti povrchu a na povrchu usazené tuhé částice. [8]

Máme různé typy atmosfér s ohledem na hodnoty vlhkosti, teploty a kontaminující látky. Z tohoto důvodu se rychlost atmosférické koroze po celém světě liší. Čím víc se blížíme k mořskému pobřeží obsahuje vzduch postupně více soli a je slanější. V průmyslových oblastech jsou ve větší míře obsaženy ve vzduchu sloučeniny  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$  a  $\text{NO}_2$ . Tyto chemické sloučeniny z velké míry způsobují korozi. Jeden z těchto činitelů může být

například kyselý déšť, který vzniká díky nim. Výše uvedené sloučeniny mohou dále vytvořit kyseliny jako například kyselinu sírovou  $H_2SO_4$ , kyselinu dusičnou  $HNO_3$  a organické kyseliny, jako je kyselina mravenčí ( $HCOOH$ ) nebo kyselina octová ( $CH_3COOH$ ). [14]



Obr. 12: Atmosférická koroze [15]

#### 2.4.2 Koroze v kapalinách

Nejčastěji se setkáváme s užitkovou vodou, ve které jsou rozpuštěny chemikálie kyselého či zásaditého charakteru. Ty poté přímo ovlivňují charakter a účinnost koroze. Když korodují kovy ve vodě, tak se jedná o elektrochemický děj. Jeho rychlost může být ovlivněna množstvím různých faktorů. Mezi ně se řadí např. mechanické nečistoty, kavitace, vliv mikroorganismů a další. Ovšem nejen kovy mohou být napadeny ve vodě korozí. Korozi mohou být napadeny i plasty a v tomto případě nejde o elektrochemický děj. I zde má kyslík vliv na rychlost koroze. [8]

Vody, vyskytující se v přírodě, jsou děleny na: vody sladké, mořské, minerální a na vody brakické – to jsou sladké vody znečištěné mořskou vodou. Pokud na kovový povrch působí pouze čistá voda bez obsahu kyslíku dochází jen k minimálně korozi. Za korozní reakce ve vodě mohou především příměsi, které jsou ve vodě obsaženy. Obsahují je všechny druhy vod, ať už provozní nebo přírodní. Z pohledu korozní prostředí rozdělujeme vody: užitkové, pitné a mořské. Tyto tři prostředí jsou nejčastější zdroje problémů s korozi v kapalinách. Koroze v pitné vodě může silně ovlivnit naše zdraví, a proto je brána jako pro nás nejnebezpečnější. Ostatní typy ohrožují „pouze“ konstrukce a jiné díly do nich ponořené např. lodě. [8], [10], [14]

Agresivita vody je určována převážně přítomným obsahem kyslíku. Další zdroje, které způsobují agresivní vody, je přítomnost a typ rozpuštěných solí, přítomnost organických látek a mikroorganismů, rychlost proudění, obsah pevných částic, teplota a na závěr i hodnota pH. Jak bylo zmíněno výše, kyslík rozpuštěný ve vodě má značný vliv na korozi v kapalinách. Ve vodách je rychlost koroze řízena rychlostí redukce kyslíku. Přístup kyslíku k povrchu je taktéž



podstatný. Pokud není přístup rovnoměrný, mohou vznikat články s diferenční aerací a vznikne napadení pod objemovou vrstvou rzi. [8], [10]

Stejně důležitým činitelem u agresivních vod jako je kyslík, je i oxid uhličitý. Ve vodách způsobuje pokles pH. Podobný pokles pH způsobuje i oxid siřičitý. Ten se do vod dostává ze znečištěné atmosféry převážně v průmyslových oblastech. Další chemičtí činitelé, kteří například způsobují korozní praskání, jsou amoniak a sulfan. Ve vodě rozpuštěné soli pomocí hydrolyzy mění hodnotu pH, touto reakcí zvyšují vodivost v roztoku. Zvýšenou vodivostí se může na povrchu vytvořit nerovnoměrná koroze. Koncentrace soli ve vodě je ovšem nízká, vysoká je pouze u mořské vody. S tím přímo souvisí elektrická vodivost vody, která nám způsobuje i častý výskyt nerovnoměrného napadení. [10], [16]

Ve vodách jsou přítomny chloridy. Ty způsobují potíže u mnoha kovů. Běžná koncentrace chloridů ve vodě je v mezích 15 až 200 mg/l (výjimkou mořské a brakické vody). Vody mají hodnotu pH mezi 4-9, a z tohoto důvodu na většině kovů vzniká vrstva nerozpustných korozních produktů (viz obr. č. 13). A tato vrstva korozních produktů určuje vlastnosti povrchové vrstvy. [10]



Obr. 13: Koroze uvnitř trubky [17]

### 2.4.3 Koroze v půdě

Výskyt této koroze není tak častý jako atmosférická koroze. Půdní koroze je nebezpečná především pro potrubí. Z důvodu koroze musí být tato potrubí pravidelně kontrolována, udržována a někdy nahrazena. Důsledek koroze v půdě je zobrazena na obr. č. 14. A netýká se to pouze potrubí, která vedou vodu, ale mnohem nebezpečnější mohou být ropovody, a to nejen pro člověka, ale pro celé životní prostředí. Pokud by došlo k poruše ropovodu, pro nás by to znamenalo finanční ztrátu. Ovšem pro životní prostředí by to bylo devastující.

Půda není vždy stejně propustná. Proud vody se řídí propustností půdy. Propustnost půdy závisí na tom, kolik a jak velké jsou pevné částice v půdě. Hrubozrnný písek například umožňuje dobrý odtok vody a zároveň umožňuje i volný přístup atmosférického kyslíku. Kyslík v těchto případech může dosáhnout velkých hloubek, větších než například jemnozrnné půdy s vysokým obsahem jílu. V jemnozrnné půdě nastává snadnější vázání vody. Jemnozrnné půdy také mnohem lépe vážou vodu a brání odvodnění. Zpomalují odpařování a tím omezují přístup kyslíku z atmosféry k zakopané konstrukci, jako je potrubí. [14]

Procesy probíhající na povrchu kovových potrubí, která jsou uložena v zemi, vznikají, pokud dojde k reakci mezi právě zmíněným kovovým povrchem a podzemní vodou. Půda

i podnebí jsou ovlivňovány složením podzemní vody. Jílovité půdy snižují pH podzemní vody a nejsou tak agresivní. Další velký rozdíl můžeme najít u pouští, ty obsahují vysoký obsah chloridů a jsou velmi korozivní. Na druhé straně tropické pralesy mívají silně kyselé půdy a podnebí v nich bývá velmi kyselé. [16]

Korozní chování železa a oceli zakopané v půdě se blíží v některých případech tomu, když je potrubí ponořeno do vody. V jiných ohledech se koroze v půdě podobá atmosférické korozi. Podobnost je zde především v rychlosti koroze. Pozorované rychlosti jsou obvykle vyšší než v atmosféře, ale ne o tolik. Rychlost se opět mění s typem půdy. V některých částech může kov uspokojivě fungovat zemi, ale jinde ne, kvůli specifickým rozdílům ve složení půdy, pH, obsah vlhkosti atd. [16]



*Obr. 14: Koroze v půdě [18]*

### 3 Nitridace neželezných kovů

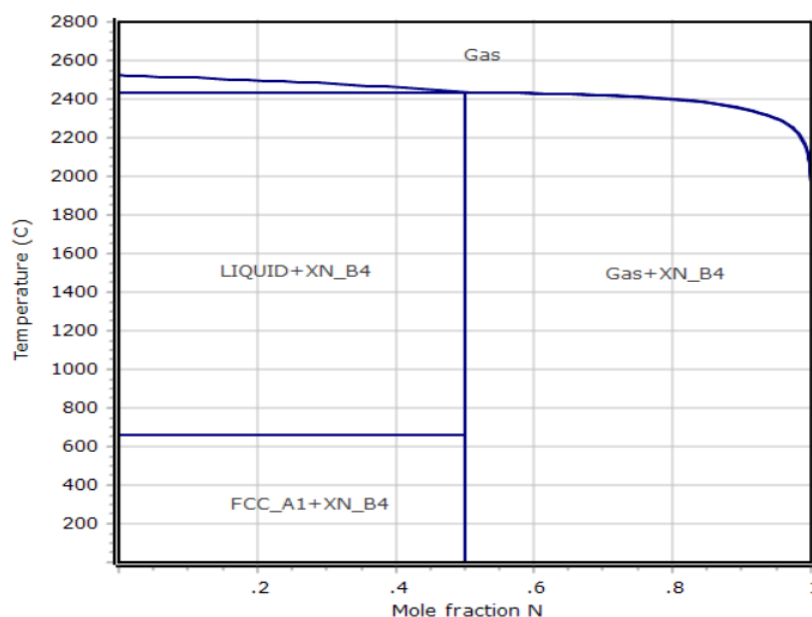
Neželezné kovy jsou nitridovány za stejným účelem jako ocele, a to především kvůli zvýšení tvrdosti povrchu, zlepšení otěruvzdornosti a získání lepší odolnosti vůči korozi, pokud produktem nitridace jsou stabilní nitridy. Jak je uvedeno výše, je důležité, aby nitridační oceli, obsahovaly legující prvky, jako je chrom nebo molybden. Z experimentálních vzorků v této práci jsou v literaturách popsány především nitridy titanu a hliníku. Tyto legující prvky pomáhají také zvyšovat korozivzdornost povlaku. Oproti tomu nitrid železa korozi podléhá. Proto se nenitridují oceli bez legujících prvků, pokud víme, že budou umístěny v korozi podporujícím prostředí. Způsoby nitridace neželezných kovů jsou stejné jako nitridace ocelí.

#### 3.1 Nitridace hliníku

Pro nitridaci hliníku jsou nejčastěji používané metody nitridace v plynu, a především plazmová nitridace. Hliník nitridujeme z důvodu, aby na jeho povrchu byla vytvořena vrstva nitridu hlinitého. Metoda nitridací pomocí plazmy má oproti metodě v plynu několik výhod. Má nízkou spotřebu plynu, energie a zároveň je netoxická. Parametry pro vytvoření vrstvy jsou teplota kolem 450 °C po dobu více jak osmi hodin. Pokud se zvolí tyto hodnoty, tak má vrstva tloušťku kolem 3 μm. Silnější vrstva by vznikla, pokud by byl vzorek v peci déle. [19], [20]

Pro nitridaci hliníku pomocí plynu jsou nastaveny teploty kolem 490 °C až 530 °C. Vzorky se vkládají do předem vyhřáté pece s atmosférou plynného amoniaku. Celková nitridace může trvat od 8 do 15 hodin, či více. Podle toho, jak silné vrstvy chceme dosáhnout. Tloušťka vrstvy závisí na časovém údaji. Po zadání teploty kolem 600 °C trvá vytvoření 1 μm kolem osmi hodin, dle autora Tatsuhiko Aizawa a jeho práce „Advanced Plasma Nitriding for Aluminum and Aluminum Alloys“ [20]

Pro zavedení nitridace do běžného průmyslu se jeví jako nejčastější problém pomalý růst vrstvy. Nitridace hliníku je řízena dle binárního diagramu Al-N, který je zaznamenán na obr. 15. Ten můžeme aplikovat, ale pouze u čistého hliníku. V případě hliníkových slitin může být brán pouze jako orientační. [20]



Obr. 15: Binární diagram Al-N [21]

### 3.1.1 Nitrid hliníku

Nitrid hliníku je extrémně tvrdá technická keramika. Poprvé byl objeven před téměř sto lety. Má hexagonální krystalovou strukturu a kovalentní vazby. Jeho teplota tání je kolem 2200 °C a ve vakuu je teplota tání téměř 1800 °C. Nitrid hliníku je vhodný pro ultrafialové světelné zdroje. Jsou využívány pro fotolitografie s vysokým rozlišením, v lékařství, dále například do bazénu na čištění vody či vzduchu. Nitrid hliníku má zároveň vysokou odolnost vůči atmosférické korozi. Na vzduchu začíná oxidovat nad 700 °C. Na povrchu je vytvářena vrstva oxidu hlinitého, která ho následně chrání až do teploty 1370 °C. Vyznačuje se také výbornou tepelnou vodivostí, která je 320 [W/m·K]. Má vhodné dielektrické vlastnosti a nízký koeficient tepelné roztažnosti (tuto hodnotu má podobnou jako křemík). Materiál se pomalu rozpouští v minerálních kyselinách. [19], [21]

Nejčastěji jsou používány slitiny hliníku, které lze nalézt skoro ve všech odvětvích. Velice často jsou používány do slitin k hliníku ještě mangan, měď či hořčík. Asi nejznámější slitinou je dural. Dural má složení 90-96 % hliníku a 4-6% mědi s malými přísadami jako hořčíku, tak manganu. Dural je narozdíl od samotnému hliníku pevnější. Tvrdost je vysoká a zároveň je zachována malá hustota materiálu. Ovšem největší využití má nitrid hliníku jako takový v elektrotechnice. Kde je využíván z důvodu vedení tepla, a tedy k ochlazování součástí elektrotechnického obvodu. Stejně jako čistý hliník tak i jeho slitiny jsou odolné vůči korozi. Kromě duralu je známa spousta dalších slitin, které se využívají např. k výstavbě výtahů nebo lodí. Dále se nitrid hliníku využívá jako komponenta pro manipulaci s roztaveným kovem. Materiál využíván pro výrobu pecních a mikrovlnných zařízení a jako patice výkonových tranzistorů. V posledních letech je využíván jako netoxická náhrada beryllia. V technické sféře se s ním potkáme jako s povlakovým materiálem například u extrémně tvrdých a ořezávacích vrtáků, a nebo kombinaci s titanem jako povlak TiAlN nebo AlTiN, kdy se obě varianty využívají jako povlaky pro speciální vrtáky nebo pro vrtáky do plechu. [21],

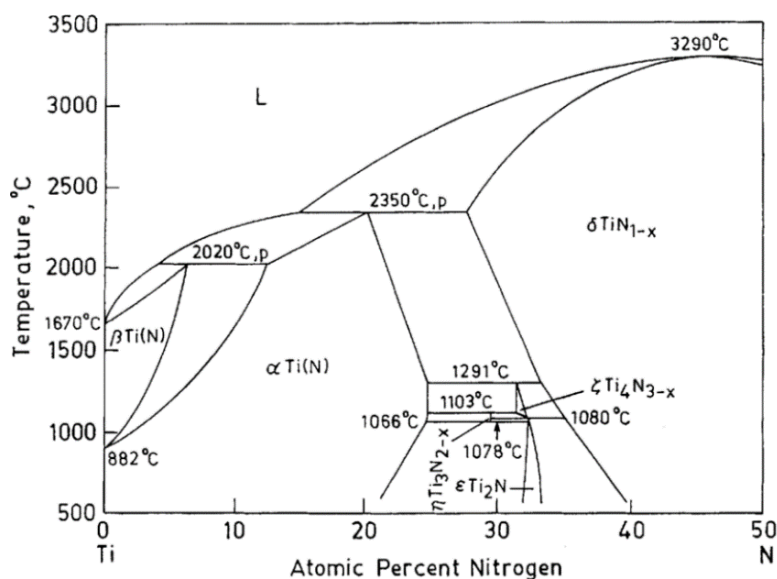


Obr. 16: Spirálový vrták [22]

### 3.2 Nitridace titanu

Stejně jako pro hliník je i pro titan nejčastěji využívaná technika nitridace v plynu či iontová nitridace. Kdy nitridace v plynu významně zvyšuje tvrdost povrchové vrstvy titanu. Další důvod nitridace je zvýšení tribologických vlastností. Při nitridaci v plynu dochází k difuznímu procesu. Při tomto procesu vniká hliník do matrice titanu. Dusík má velkou afinitu a vysokou rozpustnost v  $\alpha$  titanu, který je vidět na obr. 17. Kde  $\alpha$  titan zasahuje až do hodnot 2350 °C. Na rozdíl od povlaku, který je vytvářen pomocí metody PVD, se titan plně spojí s matricí základního materiálu a vytvoří kompaktní vrstvu. Nestane se tedy, že se povlak dobře nepřilne. Diagram dusík-titan ukazuje, že hladiny dusíku vytvoří sloučeniny titanu a dusíku, které lze považovat za tvrdou keramiku. Tedy obdobný případ jako u hliníku a jeho nitridu. Vrstva nesmí být příliš silná, aby neznehodnotila vlastnosti vrstvy. Podpovrchová difuzní vrstva zajišťuje kompatibilitu se základní matricí titanu. Titan má větší afinitu ke kyslíku než dusíku. Důležitá je tedy atmosféra při nitridaci, která ovlivňuje finální produkt. Další důležité údaje jsou čas, který rozhoduje o tloušťce vrstvy a teplota, která rozhoduje o tom, jak rychle bude vrstva nitridů růst. [4], [23]

Nitridace pomocí plazmy se nazývá iontová nitridace. Iontová nitridace je jako jiné postupy nitridování závislá na přítomnosti iontů dusíku na povrchu kovu. Dusík je schopen difundovat za zvýšené teploty do základní matice materiálu. Dusík vzniká z rozkladu molekul čpavku a na povrchu je postupně vytvářena nitridační vrstva. Vrstva je vytvářena ze sloučenin TiN a Ti<sub>2</sub>N, ty jsou znázorněné na obr. 17. Plazmová nitridace se od jiných způsobů nitridace liší teplotou. Ta je většinou vyšší a pohybuje se kolem 700-1100 °C. Vyšší teploty mají ale špatný vliv na vrstvu. Ta je následně křehčí, snižuje se mez únavy a celkově jsou zhoršovány mechanické vlastnosti vrstvy. Jsou vytvořeny i jiné modely nastavení teploty. Při nich je teplota podstatně nižší, kolem 500 °C. Pokud generují vyšší hustoty energetických iontů a zvyšují kinetiku a účinnost nitridace, tak umožňují plazmatickou nitridaci při nižších teplotách. [7], [5]



Obr. 17: Binární diagram Ti-N [23]

### 3.2.1 Nitrid titanu

Nitrid titanu má charakteristickou zlatavou barvu. Jeho mechanické vlastnosti jsou velice dobré. Vyniká extrémně vysokou tvrdostí pohybující se kolem 2300-2400 HV. Modul pružnosti je kolem 280-350 GPa a koeficient tření je +/- 0,65 oproti oceli. Teplotní bod tání je kolem 3000 °C. Teplotní odolnost vůči oxidaci je kolem 600 °C.

Mezi jeho další předností patří to, že je až třikrát tvrdší než chrom. Jeho časté využití vychází i z vlastnosti jeho výborné přilnavosti. Povlak z prvků Ti a N je výborně spojován se základním materiálem a dává mu tím výhodu pevného spojení nejen ve formě pevného povlaku, ale také vazby mezi základním materiálem a povlakem. Mezi povlakem a základním materiálem nevznikají bubliny ani prolákliny, ve kterých by se následně ukládala voda a mohla by probíhat oxidace. Samotný povlak není porézní, a proto také lépe odolává vlhkosti a s tím spojené korozi. [7]

Pokud je povlak vytvořen, tak je jednolitý. Na okrajích potahovaného materiálu není vytvářeno žádné nahromadění a je tedy rovnoměrně vytvořena vrstva. Vytváří se nám povrch, který kopíruje základní materiál. Rovný povrch je tedy kvalitněji nanitridován. [7]

Je chemicky odolný vůči většině kyselinám, leptadlům a rozpouštědlům. K lidskému zdraví je netoxický a nezatěžuje životní prostředí. Často je využíván pro medicínské účely. Díky své tvrdosti a ošetrzdornost jej můžeme často nalézt jako materiál využívaný například při náhradě kyčlí, jiných kostí v lidském těle atd. [3]

V prostředí běžného života můžeme nitrid titanu nalézt na vrtácích, které musí být velice tvrdé a ošetrzdorné a na spirálové vrtáky do plechu (viz obr.18.) [24]



Obr. 18: Spirálový vrták do plechu [22]

## 4 Charakteristika testovaných materiálů

Do experimentu byly zařazeny ke zkoumání neželezné kovy, přesněji měď, titan, slitiny hliníku a mosaz. Nitridace neželezných kovů není běžná činnost, pohybuje se ve vědeckých sférách, nikoliv v běžném užití. Měď jako taková se spíše používá jako prostředek proti nitridaci. Pokud chceme nitridovat pouze určitou oblast, tak okolí této oblasti pokryjeme mědí. V oblasti pokryté právě mědí, se nitridační vrstva nevytváří.

### 4.1 Titan

Titan je chemický prvek, má značku Ti a označuje se protonovým číslem 22. V periodické tabulce zaujímá místo ve skupině přechodných kovů. V přírodě se vyskytuje v pěti izotopech. Titan je lehký kov, šedé až stříbrně bílé barvy. Mezi jeho hlavní rysy patří kujnost, tažnost a odolnost vůči korozi. Titan nepatří mezi vzácné prvky. Jeho průměrné zastoupení v zemské kůře je 0,61 % a tak je titan řazen jako 10. nejrozšířenější prvek a je čtvrtým nejrozšířenějším konstrukčním kovem v zemské kůře. Z konstrukčních kovů má větší zastoupení jen hliník, železo a hořčík. Titan je paramagnetický kov. [25]

Tab. 1: Fyzikální vlastnosti titanu [26] [25]

Teplota varu	3287 [°C]
Hustota při tavení	4110 [kg/m <sup>3</sup> ]
Teplota alotropické přeměny	882 [°C]
Hustota	4506 [kg/m <sup>3</sup> ]
Teplota tání	1668 [°C]

Titan a jeho slitiny jsou často využívaným konstrukčním prvkem, který je uplatňován v hojně míře například v automobilovém či v leteckém průmyslu. Jako další využití titanu a jeho slitin může být lékařství, kde se využívá jako implantát za kostní tkáň ve stomatologii, ortopedii či neurochirurgii. Jsou využívány díky svému vysokému poměru pevnosti k hustotě a vysoké korozní odolnosti v mnoha agresivních prostředích. Značnou nevýhodou je jejich nízká tvrdost a taktéž nízká oteřuvzdornost. Využití slitin titanu také zhoršuje jejich zvýšená oxidace při teplotách vyšších, než je 550 °C. [27]

Před nitridací byla u vzorku provedena zkouška tvrdosti povrchu, aby bylo možné následně porovnat tvrdosti po a před nitridací. A následně byl změřen výchozí stav vzorku před nitridací, opět aby bylo možné provést porovnání před a po experimentu.

### 4.2 Měď

Měď je chemický prvek označující se zkratkou Cu. Tento prvek je znám již od pravěku. Hlavní oblastí využití mědi je při výrobě elektrovodičů v nejrůznějších slitinách (mosaz, bronz aj.). Další aplikace nachází jako součást přípravků proti houbám (fungicidy), řasám (algicidy) nebo bakteriím a virům. [28]



Tab. 2: Fyzikální a mechanické vlastnosti mědi [28] [29]

Hustota	8940 [kg/m <sup>3</sup> ]
Teplota tání	1083 [°C]
Měrná tepelná kapacita	0,385 [kJ/kgK]
Mez kluzu	60[Mpa]
Mez pevnosti	220[Mpa]
Tvrдост	50 [HB]

Měď má lehce načervenalý až zlatavý odstín. Na vzduchu vlivem oxidace tmavne a pozvolna přechází do rezavohnědé barvy. Ve velmi tenkých plíšcích prosvítá zelenomodře. Krystalizuje v plošně centrované soustavě. Má až 6x vyšší elektrickou a tepelnou vodivost než železo. Vyznačuje se velmi dobrou tvařitelností. Minimální teploty pro tvařitelnost se pohybují kolem 500-600 °C. Dále mezi její výhody patří vysoká odolnost vůči korozi. Ovšem mezi její nevýhody patří obtížná obrobiteľnosť. Měď se lepí na nástroje, které ji obrábí a tím zhoršuje celý proces. [29]

### 4.3 Hliník

Jde o neušlechtilý kov, který má stříbřitě šedivou až čistě šedivou barvu. Jde o nestálý kov, který je elektricky velmi dobře vodivý. V přírodě se čistý zpravidla nefiguruje, pouze ve formě sloučenin. Nejznámější rudou, ve které se vyskytuje, je bauxit. Hliník je v čistém stavu velice reaktivní. Na vzduchu se ovšem rychle pokryje tenkou povrchovou vrstvou oxidu hlinitého. Tato vrstva ochraňuje kov před následnou oxidací. Čistý hliník se velice poddajně rozpouští ve středních kyselinách, ovšem koncentrovaná kyselina dusičná jej obdobně jako vzduch obalí pasivační vrstvou oxidu hlinitého. [30], [31]

Tab. 3: Mechanické a fyzikální vlastnosti hliníku [26], [31]

Hustota	2700 [kg/m <sup>3</sup> ]
Teplota tání	660,3 [°C]
Teplota varu	2 519 [°C]
Měrná tepelná kapacita	896 [J/kgK]

### 4.4 Mosaz

Jedná se o slitinu mědi a zinku. Mosaz je ve světě široce využívaná slitina. Nejčastěji ji můžeme nalézt v jemné mechanice, elektrotechnice, při výrobě kovového zboží a v modelářství. Pro účely strojírenství a techniky se využívá mosaz s obsahem 58% mědi. Mědi s nižším procentem nejsou v technice využívány s ohledem na tvrdost a křehkost dané mosazi. Pevnost a tvrdost mosazí závisí na procentu mědi ve slitině.

Mosaz má mnoho modifikací, kdy se upravuje obsah mědi ve slitině. Mosaz se vyznačuje dobrou obrobiteľnosť. Vyznačuje se lahodícím vzhledem, který má barevnou škálu



od červené po tmavě zlatavou. Zinek v mědi nám ovlivňuje především hustotu slitiny tepelnou a elektrickou vodivost a mírně zasahuje i do odolnosti vůči korozi. Naopak nám zvyšuje pevnost a teplotní roztažnost. Mosazi jsou zpracovávány odléváním, tlačením a obráběním. [32], [33]

K povrchovým úpravám mosazí je využíváno nejčastěji leštění a následně lakování. Lak nám zajistí stálou barvu mědi, která se jinak postupem času mění. Velice často se využívá i možnost kartáčování a následného lakování. Pokud chceme, aby mosaz vypadala staře, využívá se metoda patinování, kdy se povrch mosazi zoxiduje a následkem toho ztmavne.

Tab. 4: Mechanické a fyzikální vlastnosti mědi [32], [33]

Hustota	8400-8700 [kg/m <sup>3</sup> ]
Teplota tání	850-920 [°C]
Tepelná vodivost	287 [w/m*k]
Měrná tepelná kapacita	896 [J/kg*K]

## 4.5 Slitiny hliníku

V experimentu jsou 3 slitiny hliníku. Jedná se o slitiny označené jako 2017, 42 425, a slitina 42 4201

### 4.5.1 Slitina 2017, ČSN 42 4201

Slitina 2017 A má v sobě vysoký podíl mědi. Tento údaj je dobře patrný v tabulce č. 5. Tato slitina je vhodná k opracování vyvrtávání děr. Má ovšem nízkou odolnost vůči korozi. To ovšem kompenzuje vcelku vysokou pevností. Tento efekt se prokázal také v prodělaném experimentu. Z důvodu vysokého obsahu mědi se nedoporučuje ke svařování. Také není doporučovaná k metodě eloxování. [34]

Díky vysoké obrobiteľnosti se tato jakost využívá na výrobu šroubovaných produktů jako jsou například armatury, kladky nebo měřidla. Poté ho můžeme často nalézt v podobě věšáků nebo pleťacích a háčkovacích jehlic. Známe je také použití v leteckém průmyslu. [35]

Další mechanické vlastnosti:

- Materiál není vhodný ke svařování
- Materiál se dá dobře obrábět a leštit
- Má vysokou pevnost tahu minimálně 360 MPa
- Tvrdost je cca 100 HBW [35]

Tab. 5: Chemické složení hliníkové slitiny 2017 [34]

Chemické složení	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ostatní
	0,2-0,8	0,7	3,5-4,5	0,4-1	0,4-1	0,1	0,25	0,15

Tab. 6: Vlastnosti hliníkové slitiny 2017 [35], [36]

Značení dle EN	2017 A
Značení dle ČSN	42 4201
Chem. složení	AlCu4Mg
Pevnost v tahu [MPa]	Min 360
Mez kluzu	240
Tažnost A% min.	10
Korozní odolnost	Přijatelná
Svařitelnost	Nelze

#### 4.5.2 Slitina hliníku, ČSN 42 4401, EW AW 6060

Tato slitina se označuje dle české normy jako 42 4401, kdy jde o tvářenou slitinu hliníku AlMgSi. Tato slitina má široké zastoupení v mnoha odvětvích průmyslu. Vyznačuje se vysokou odolností vůči korozi. Tím se liší od slitiny hliníku 2017, která byla popsána výše. Dále se slitina 42 4401 vyznačuje zvýšenou odolností vůči slané vodě a dále také proti slabě alkalickým roztokům. Tyto vlastnosti má vyšší i než čistý hliník. [35]

Slitina EN AW 6060 je často využívaná díky svým přednostem vůči korozi v potravinářském průmyslu. Výhoda této slitiny je jeho dobrá svařitelnost. V běžné praxi se tento materiál také eloxuje. Mezi další přednosti patří dobrá obrobiteľnosť a dobře se do něj vyvrtávají díry. Ve vytvrzeném stavu může dosahovat pevnosti okolo 310 MPa a tvrdost povrchu dosahuje kolem 95 hodnot dle Brinella. Slitina je výborně tvářitelná za tepla i za studena. Konkrétně tuto slitinu můžeme nalézt v architektonické sekci pro dveře či okna, dále jako kování do interiéru obývacích prostorů, skříně elektromotorů, kde zastávají chladicí funkce, a dále jako zavlažovací, topné či chladicí trubky. [35]

Další mechanické vlastnosti:

- Snadná obrobiteľnosť
- Nižší pevnost
- Vysoká tepelná roztažnosť
- Vysoký sklon k adhezi při obrábění

Tab. 7: Chemické složení slitiny hliníku EW AW 6060 [35]

Chemické složení	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostatní
	0,3-0,6	0,1-0,3	0,1	0,1	0,35-0,6	0,5	0,15	0,1	0,15

Tab. 8: Vlastnosti hliníkové slitiny EW AW 6060 [36]

Značení dle EN	EW AW 6060
Značení dle ČSN	42 4401
Chemické složení	AlMgSi
Pevnost v tahu [MPa]	170–190
Mez kluzu	140-150
Tažnost A% min.	6
Korozní odolnost	Výborná
Svařitelnost	Velmi dobrá

#### 4.5.3 Slitina hliníku 42 4254, EN AW 2007

Slitina hliníku označovaná jako EN AW 2007 patří mezi kalitelné slitiny. Její chemické označení je AlCuMgMn. Aby tato slitina mohla naplno prokázat svoje vlastnosti je nezbytné, aby tato slitina prošla stavem tepelného zpracování, žhánání a následně musí projít přirozeným stárnutím. Tento typ hliníkové slitiny tedy může následně procházet obráběním s vysokými řeznými rychlostmi, při kterém tvoří krátké třísky. Už zde lze postřehnout zásadní rozdíl mezi touto slitinou a slitinami dříve uvedenými. Díky těmto vlastnostem se tato slitina hliníku soustruží, a proto je vhodná pro součásti jako jsou podložky, šrouby nebo je často využívána přímo na konstrukce. [37]

Jedná se velice často o používané slitiny vyskytující se v leteckém či automobilovém průmyslu. Jsou využívány u součástí, které pracují v běžných teplotách. Slitina obsahuje minimálně 4-5% mědi. Velkou nevýhodou této hliníkové slitiny je její nízká odolnost vůči korozi. Mezi její další nevýhody patří nesvařitelnost, jenž je dána vysokým obsahem mědi. Dále je tato slitina špatně eloxovatelná. [37]

Další mechanické vlastnosti:

- Slitina je velice dobře obrobitelná
- Není doporučena pro kontakt s potravinami (podle EN 602)
- Není vhodná pro použití ve vysokých teplotách
- Tvrdost se pohybuje kolem 95 HB
- Tato slitina se nehodí k eloxování

Tab. 9: Chemické složení slitiny hliníku EW AW 2007 [38]

Chemické složení	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Pb	Bi
[%]	0,8	0,8	3,3-4,6	0,5-1,0	0,4-1,8	0,1	0,8	0,2	0,8-1,5	0,2

Tab. 10: Vlastnosti hliníkové slitiny EW AW 2007 [36]

Značení dle EN	EW AW 2007
Značení dle ČSN	42 4254
Chem. složení	AlCuMgMn
Pevnost v tahu [MPa]	340
Mez kluzu	220
Tažnost A% min.	6
Korozní odolnost	Špatná
Svařitelnost	Nelze

## 5 Popis experimentu

### 5.1 Postup nitridačního zpracování

Nitridace probíhala v peci nacházející se na půdě Západočeské univerzity v Plzni na katedře materiálů. Nitridace neproběhla u všech vzorků s úspěchem. Parametry nitridace byly navoleny pro všechny experimentální vzorky stejně.

Teplota pece byla stanovena na 520 °C. Tato teplota je střední hodnota mezi popisovanými hodnotami v literatuře. Při této teplotě dochází k rozpadu plynného čpavku. Doba nitridace byla zvolena na 26 hodin. Způsob nitridace byl zvolen pomocí prášku. Tato metoda je využívána u malých vzorků různých materiálů nebo také u kusové výroby. Na slitiny hliníku z nedostatku času nebyl vytvořen příčný výbrus na zkoumání vrstvy, ale jen chemická analýza a následné naleptání a zkoumání pod konfokálním mikroskopem

### 5.2 Metalografie vzorků

Všechny snímky v oblasti metalografie byly pořízeny na konfokálním mikroskopu Olympus LEXT 3DOLS5000 s antivibrační podložkou. Chemické analýzy byly provedeny na elektronovém mikroskopu Philips XL-30 ESEM vybaveného EDX detektorem. Před samotným zkoumáním mikrostruktury se vzorky předpřipravovaly. Jako první se všechny vzorky zalily do elektricky vodivé hmoty. Vzorky po zalití jsou vidět na obr. 19. K tomu, aby mohly být zality, se využil stroj Cito press-10, jež je zaznamenán na obr. 20.



Obr. 19: Vzorky po zalití



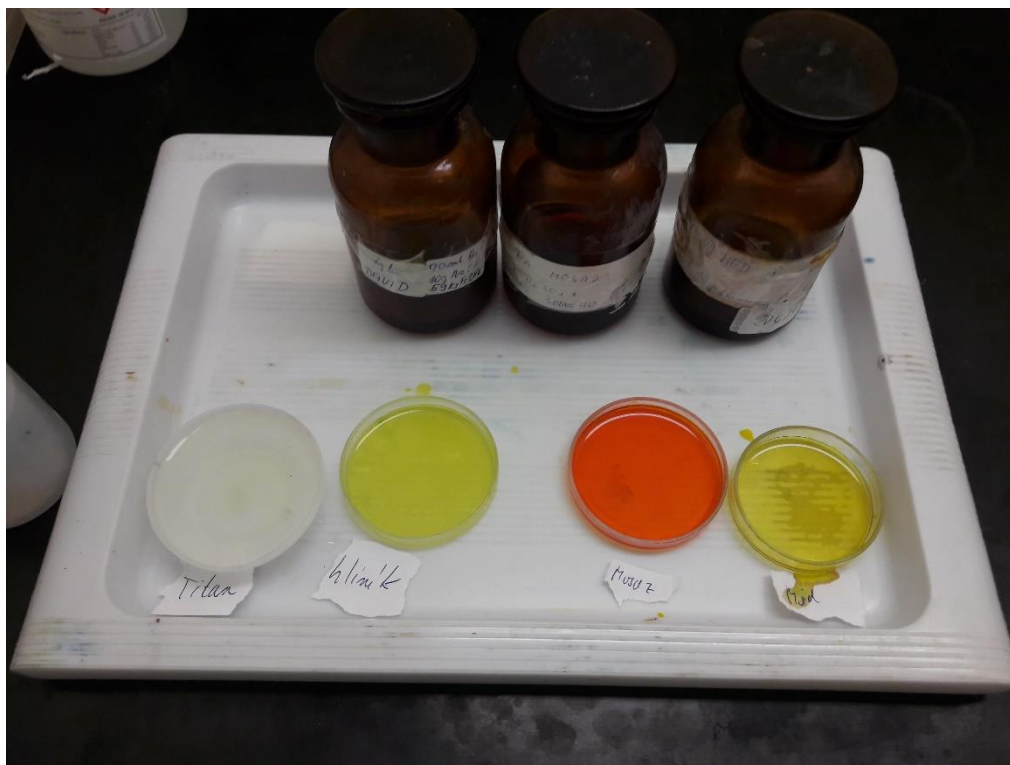
Obr. 20: CitoPress-10

Následovalo vybroušení a vyleštění vzorků. Vyleštění bylo provedeno na stroji Struers Tegramin-20, který je vidět na obr. 21. Na každý typ vzorků byl vybrán jiný typ brousícího a leštícího programu. Programy byly využívány předpřipravené a jen pokud vyleštění nesplňovalo podmínky, tak se cyklus buď opakoval, nebo bylo změněno plátno. Po vybroušení byly vzorky vloženy do ultrazvukové čističky, která vzorek zbavila povrchových nečistot. Po těchto krocích následovalo samotné pozorování struktury vzorku.



Obr. 21: Tegramin-20

### 5.3 Leptání vzorků



Obr. 22: Typy leptadel

Aby bylo prokázáno vytvoření vrstvy, byly vzorky naleptány a následně zkoumány pod konfokálním mikroskopem. Z důvodu různých vzorků, byla vrstva naleptána různými typy leptadel, jež jsou vidět na obr. 22. Složení jednotlivých leptadel a doba leptání jsou uvedeny v následujících podkapitolách. Po naleptání byly vzorky omyty pod tekoucí vodou. Následně byly opláchnuty ethanolem a vysušeny pomocí fěnu. Pro odstranění všech nečistot po leptání byly vzorky vloženy do ultrazvukového čističe. Po vyjmutí byly opět opláchnuty lihem a vysušeny fénem. Po těchto procedurách byly dokumentovány/pozorovány pod konfokálním mikroskopem.

#### 5.3.1 Titan

Metoda naleptání byla použita i na vzorky, které prošly korozi. Aby bylo možné zkoumat strukturu, která se vytvořila po korozi. Leptání a následné operace probíhaly ve stejném pořadí, jako u vzorků bez koroze.

Leptadlo použité na titan jako jediné mělo čistou barvu. Petriho miska, ve které bylo leptadlo nalito, je z plastu. Leptadlo obsahovalo kyselinu fluorovodíkovou, která se právě uchovává v plastu. Složení leptadla je zobrazeno v tabulce 11. Titan se leptal po dobu minimálně 30 s. Aby bylo zaručeno jeho naleptání.

Tab. 11: Chemické složení leptadla na titan

Voda	Peroxid vodíku	Kyselina fluorovodíková
100 [ml]	5 [ml]	2 [ml]

### 5.3.2 Mosaz

Mosaz byla leptána pomocí leptadla, jehož složení je uvedeno v Tab. 12. Mosaz se na rozdíl od titanu leptala pouze 3-4 s. Bylo zde důležité si dát pozor na čas, aby nedošlo ke spálení vzorku. Pokud by k tomu došlo, tak by bylo nutné vzorky znovu vybrousit, vyleštit a následně znovu lepat.

Tab. 12: Chemické složení leptadla na mosaz

Voda	Kyselina sírová	Dichroman sodný
80 [ml]	5[ml]	10 [g]

### 5.3.3 Měď

Dalším leptaným vzorkem byla měď. Chemické složení leptadla ukazuje následující tabulka. Leptání bylo provedeno stejně jako u předchozího mosazného vzorku.

Tab. 13: Chemické složení leptadla na měď

Kyselina chlorovodíková	Chlorid železitý	Etanol
60 [ml]	10 [g]	120 [ml]

### 5.3.4 Hliníkové slitiny

Slitiny hliníku byly naleptány leptadlem s chemickým složením, které je vidět v tab. 14. Leptání hliníkových slitin bylo v rozmezí 2-4 [s]. Slitiny hliníku reagovaly na leptání nejrychleji a muselo se s nimi pracovat nejopatrněji.

Tab. 14: Chemické složení leptadla pro hliník a jeho slitiny

Voda	Hydroxid sodný	Hexakynoželezitan draselný
90 [ml]	10 [g]	5 [g]

## 5.4 Korozní zkouška

Korozní zkouška měla za úkol otestovat, jak se nitrídační vrstva na zkoušených vzorcích zachová v korozním prostředí. Experimentální materiály byly vystaveny kondenzačnímu testu, který byl proveden dle normy ISO 6270-2. Tento test není tak agresivní jako zkouška solnou mlhou. Ke korozi materiálů dochází pomalu a lze dobře stanovit průběh. Zkušební vzorky s nitrídační vrstvou byly vloženy do korozní komory VLM Clima CORR TL FR 1000. Vzorky byly umístěny do několika řad, aby nedošlo k dotyku a zároveň aby nedošlo k záměně, která zde přicházela v úvahu.

Ke koroznímu testu byla využita korozní komora VLM Clima CORR TL FR 1000. Pomocí této komory je možné vytvořit jakékoliv klimatické podmínky, které potřebujeme. Test je kontrolován snímači, které nám zajišťují nastavené podmínky. Kontrolují tedy průtok vzduchu při sušení, teplotu a vlhkost a demineralizaci vody. Technické parametry jsou uvedeny v tabulce 15.



Tab. 15: Technické specifikace korozní [39]

Rozměry pracovní komory [mm]	1400x830x1037
Teplotní rozsah [°C]	-40 až +80
Užitný objem komory [l]	1076
Rozložení teploty v komoře [°C]	±0,5

## 5.5 Měření mikrotvrdomosti

Mikrotvrdomost je podmíněna tím, že se musí vykonávat na mikroskopu z důvodu malých rozměrů a přesných zatěžování.

Proces nitridace se primárně využívá k tomu, aby se povrch vzorku co nejvíce vytvrdil. Tvrdost takových ploch dosahuje i vyšších hodnot než u vzorků po kalení. Měření tvrdosti se podrobily všechny vzorky. Šlo o vzorky před nitridací, po nitridaci, a vzorky s nitridační vrstvou, které prošly korozí. Braly se v potaz pouze ty vzorky, které byly v korozní komoře po celou dobu testu. K testu byl využit přístroj Struers DuraScan, který je vidět na obr. 23. Jde o přístroj, jenž po zadání parametrů, může otestovat sám celou sérii vzorků. Tato série čítá limitní počet vzorků. Teto limit nám určuje „zásobník“ na vzorky a v tomto experimentu byl využit „zásobník“ na šest vzorků. Měření mikrotvrdomosti bylo provedeno u každého vzorku. Měření probíhalo na povrchu rozměrově cca 50 mikrometrů od hrany vzorku a ve středu vzorku, abychom si potvrdily, jestli vrstva je po celé ploše vzorku a má stejnou tvrdost. V testu bylo vždy zvoleno minimálně pět vtisků, které se následně zprůměrovaly a vložily do grafu. Vniknutí vzorků do povrchu testovaného vzorku bylo 10  $\mu\text{m}$ . To v některých případech mohlo způsobit zvláštní hodnoty ve výsledcích mikrotvrdomosti. Pokud byla povrchová vrstva na některých tenčí než 10  $\mu\text{m}$ , tak byla promáčknuta a měřila se tvrdost pod ní. I s tímto faktorem musíme počítat. Po vniknutí indentoru do povrchu se změřily uhlopříčky a z těchto údajů vyšly výsledky

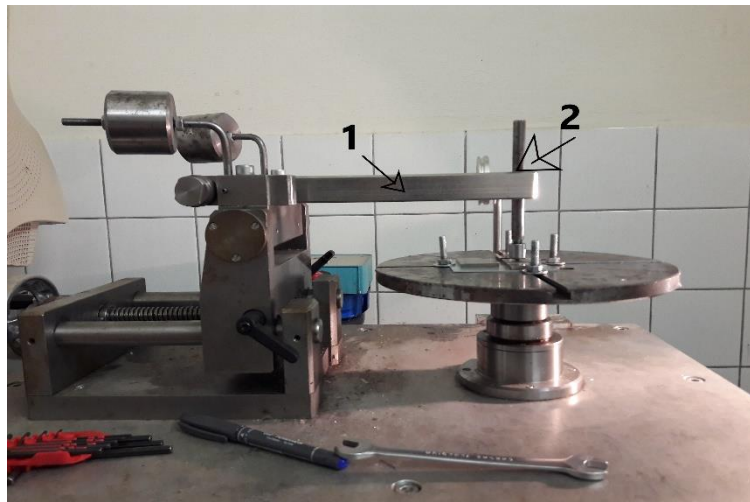


Obr. 23: Struers DuraScan

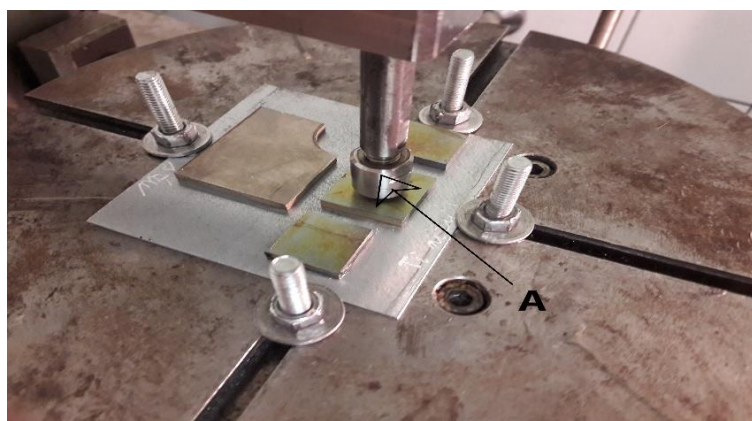
## 5.6 Tribologická zkouška

Nitridace na povrchu vzorku vytváří tenký povlak. Tento povlak zvyšuje odolnost povrchu vůči otěruvzdornosti. Na test otěruvzdornosti využijeme tribologickou zkoušku. Ta nám změří velikost opotřebení povrchu.

Měření se provádělo pomocí metody PIN on DISC. Jde o velmi rozšířenou metodu, pomocí které se měří tribologické hodnoty. Vzorek se umístí na desku, která je upnuta na otáčející se podstavec. Umístění je vidět na obr. 36. Podstavec se vzorky se umístí tak, aby se jednoho ze zkoušených vzorků dotýkala kulička umístěná v hlavě označená písmenem A na obr. 24. Kulička je umístěna na rameni, které je na obr. 35. umístěno pod číslem 1. Toto rameno je v rovnováze, aby nebylo na vzorek tlačeno jinou silou, než která se vyvine poté co se přidá přesně odměřené závaží. To se přidá na místo označující číslo 2. na obr. 35. Po přidání závaží se zapne otáčení a stůl se vzorky se začne otáčet dle nastavených otáček.



Obr. 24: Tribologická zkouška



Obr. 25: Umístění vzorku na tribologickou zkoušku

Parametry pro tribologickou zkoušku byly odvozeny na základě zkušeností s podobnými povrchy. Zkoušky u jiných druhů povrchů se liší rychlostí otáčení stolu se vzorky, a především silou zatížení, která je vynakládána na vzorky skrz kuličku. Další změna může být

materiál kuličky, která je vtačována do tělesa. V tomto měření byla použita korundová kulička. Hodnoty ze zkoušení jsou uvedeny v tabulce 12.

Tab. 12: Hodnoty tribologické zkoušky

Parametry zkoušky	
Zatížení	1000 [g]
Rychlost otáček	154 [ot/min]
Materiál kuličky	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Počet cyklů	1000

Ke tribologické zkoušce byly použity vzorky slitiny hliníku a titanu. Zkoušeny byly tři stavy: základní stav, stav po nitridaci a stav po korozi. Byly vybrány pouze tyto vzorky, protože ostatní vzorky neměly dostatečnou plochu k tomu, aby se na nich mohla být udělána tribologická zkouška.

Povrch vzorků byl před zkouškou očištěn za pomoci denaturovaného lihu. Po očištění vzorků byl spuštěn test. Na každém vzorku se vytvořily tři stopy, které byly následně studovány. Stopy se zkoumaly na mikroskopu, který je zaznamenán na obr. 26. Jde o konfokální mikroskop LEXT 3D measuring laser microscope.



Obr. 26: Mikroskop a tribologická zkouška

U stopy byla zkoumána její šířka. Stopa se rozdělila po 90° a v každé oblasti se provedla série měření, které sestávaly právě z měření šířky stopy. Velikost opotřebení byla zjištěna třemi způsoby. První způsob je za pomoci měření drsnosti povrchu. Druhý způsob je určení rozdílu hmotností a poslední způsob je řízen se dle normy. K tomuto měření byla vybrána varianta podle normy. Kdy se opotřebení určuje na základě pokynů normy ASTM G99. Tato norma nám udává, že se změří šířka stop. A pomocí těchto výsledků z měření se určuje velikost úběru. Poté se zohledňuje velikost zatížení, vzdálenost dráhy a z těchto tří parametrů zjistíme opotřebení.

Šířky jednotlivých stop byly zprůměrovány a dosazeni do vzorce pro výpočet úběru materiálu:

$$V = \frac{\pi * \text{poloměr kružnice [mm]} * \text{šířka stopy [mm]}^3}{6 * \text{poloměr testovacího tělíska [mm]}} [\text{mm}]^3, [40]$$

Výsledná hodnota z rovnice výše byla dosazena do vztahu pro výpočet vztahu pro koeficient opotřebení:

$$W = \frac{V}{F * \text{celová dráha}} \left[ \frac{\text{mm}^3}{\text{N} * \text{m}} \right], [40]$$

Kde:

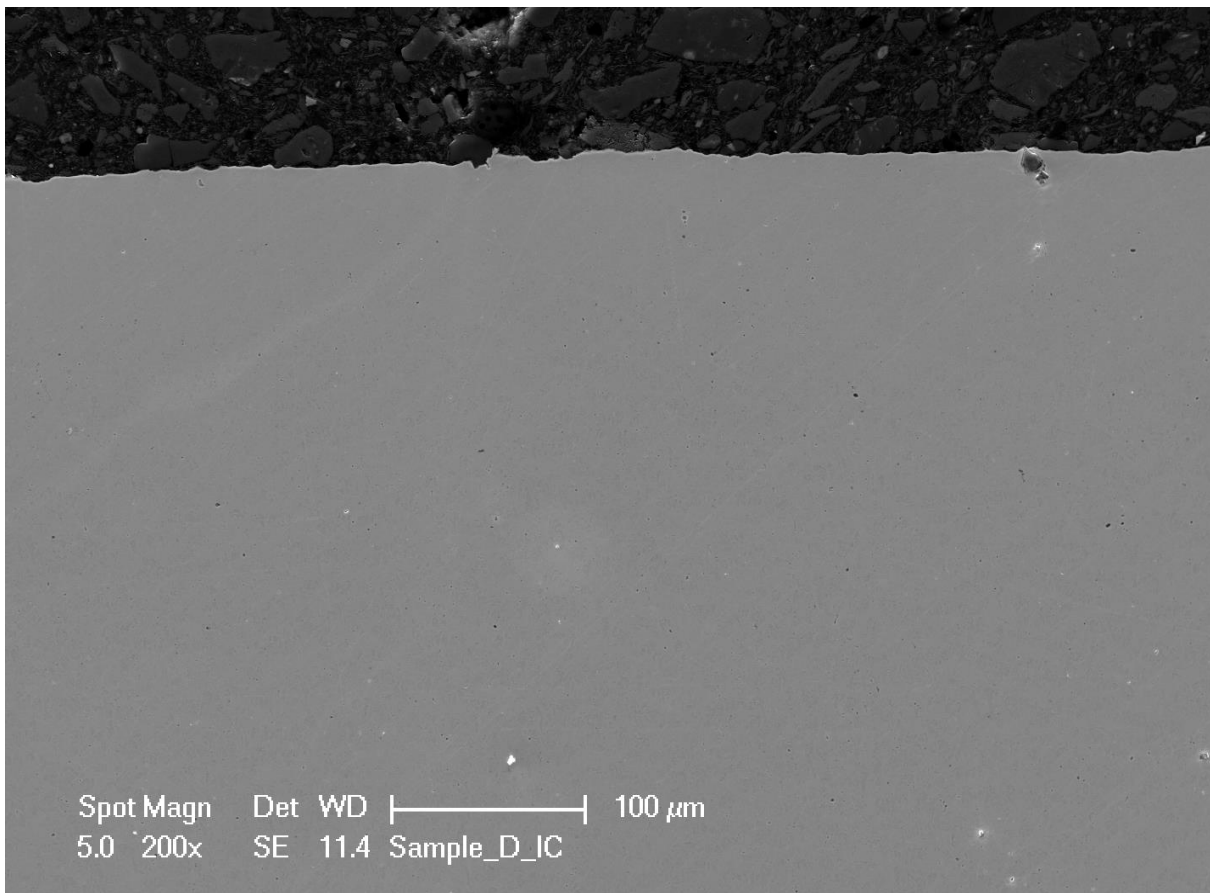
- W= koeficient opotřebení
- V= úběr
- F= zatížení

## PRAKTICKÁ ČÁST

### 6 Výsledky přípravy metal. výbrusů

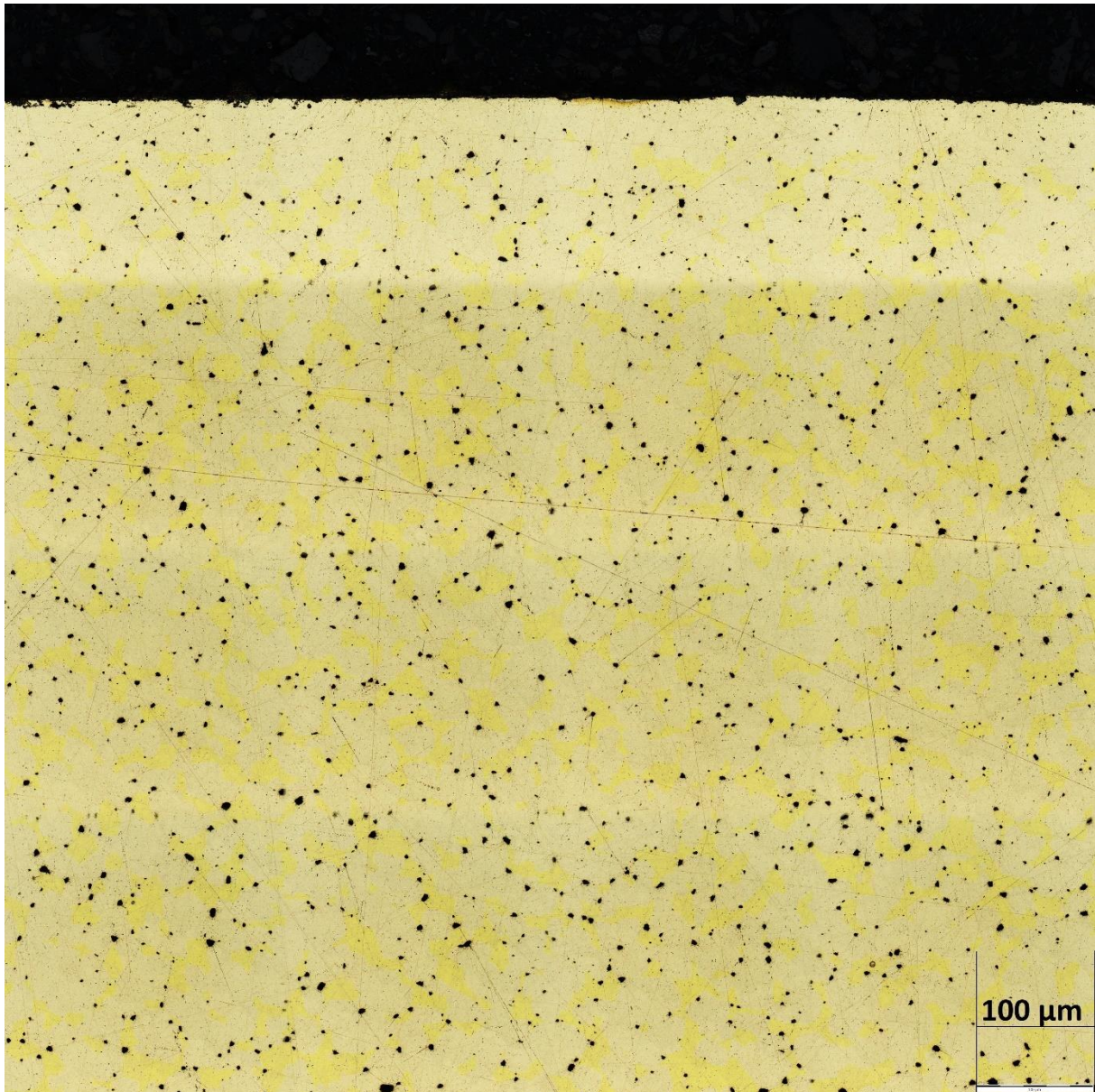
#### 6.1.1 Měď

Na obr. 28. je zachycena čistá měď po nitridaci. Struktura na povrchu vzorku se změnila. Je vidět, že se ve svrchní části vzorku vytvořila světlá oblast. To by mohlo odpovídat světlé vrstvě po nitridaci. Vrstva je na první pohled stejně silná, a tedy rovnoměrně rozložena. K porovnání je přidán vzorek před nitridací, který je zachycen na obr. 27, kde je dobře vidět, jak se vrstva po nitridaci vytvořila. Měď není využívána pro nitridaci. Využívá se v procesu nitridace, ale ne jako materiál pro nitridaci. Je využívána, pokud chceme určitou část výrobku ochránit před nitridací.



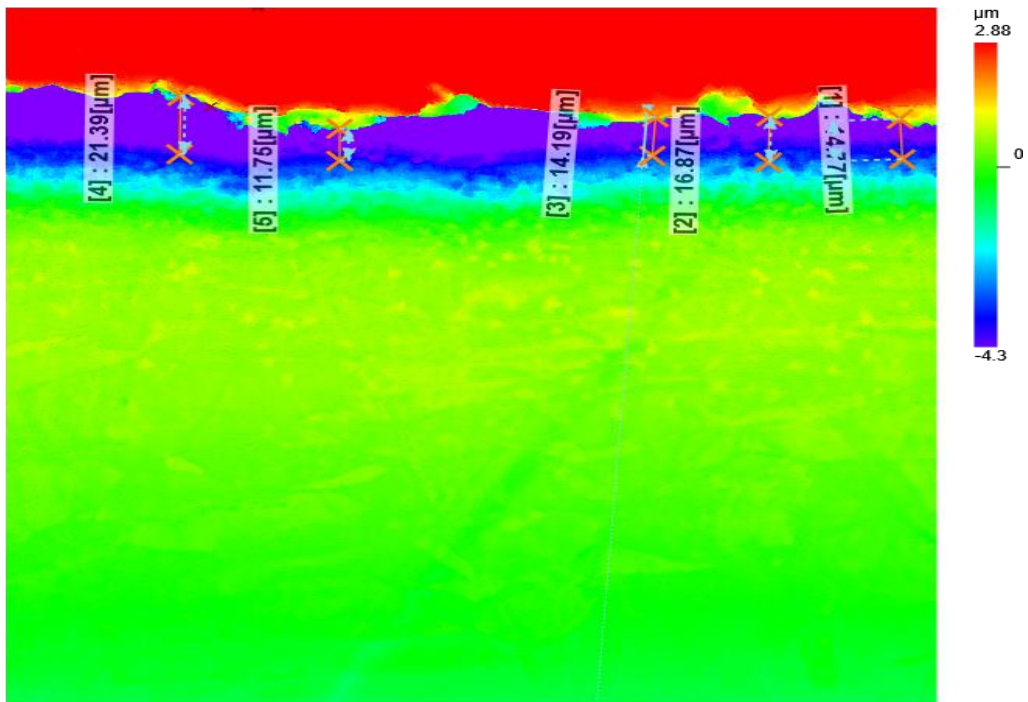
Obr. 27: Měď před nitridací



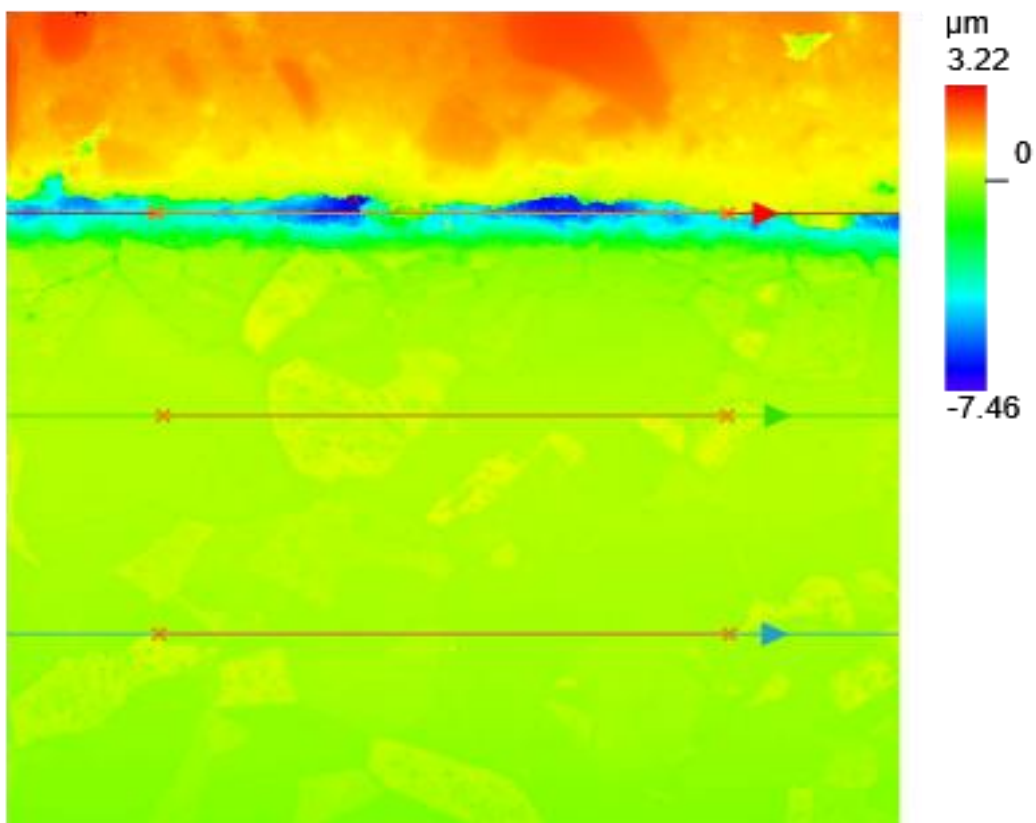


Obr. 28: Fotka mědi po nitridaci 50x

Na obr. 30. je zachycena měď po nitridaci. Jde o snímek z konfokálního mikroskopu. Snímek byl pořízen na vzorku, na kterém byla naleptaná svrchní vrstva. Samotný snímek zobrazuje hloubkový profil. Snímek ukazuje informace, ze kterých můžeme odvodit, jak je povrch tvrdý. Z toho lze usuzovat, jestli se nitridovaná vrstva vytvořila nebo ne. Pokud by byla vytvořena, měla by být tvrdší a na reliéfu to bude zobrazeno. Zobrazí se jako profil, který se obrousí méně než okolí a konfokální mikroskop výškovou informaci dokáže zpracovat. V horní části je zachycena nitridační vrstva, která má tmavě modrou barvu. Modrá barva nám ukazuje, že daná oblast je měkčí. Ze zkoumání mikrotvrlosti by tato informace odpovídala. Všechny nitridované části byly měkčí než jejich základní stavy. V porovnání s mosazí, je zde vrstva dobře vidět a je snadno rozeznatelná od spodního materiálu. Na obr. 30. je zaznamenána měď po korozi. Rozdíl je patrný v horní části snímku. Měkčí vrstva již není rovnoměrná, ale samotná koroze ji nejspíš trochu narušila. Na některých fotkách z konfokálního mikroskopu jsou vidět tři šipky, které jsou pozůstatek po srovnávání barev. Srovnávání RGB grafů bylo potřeba, aby byly snímky ostré.



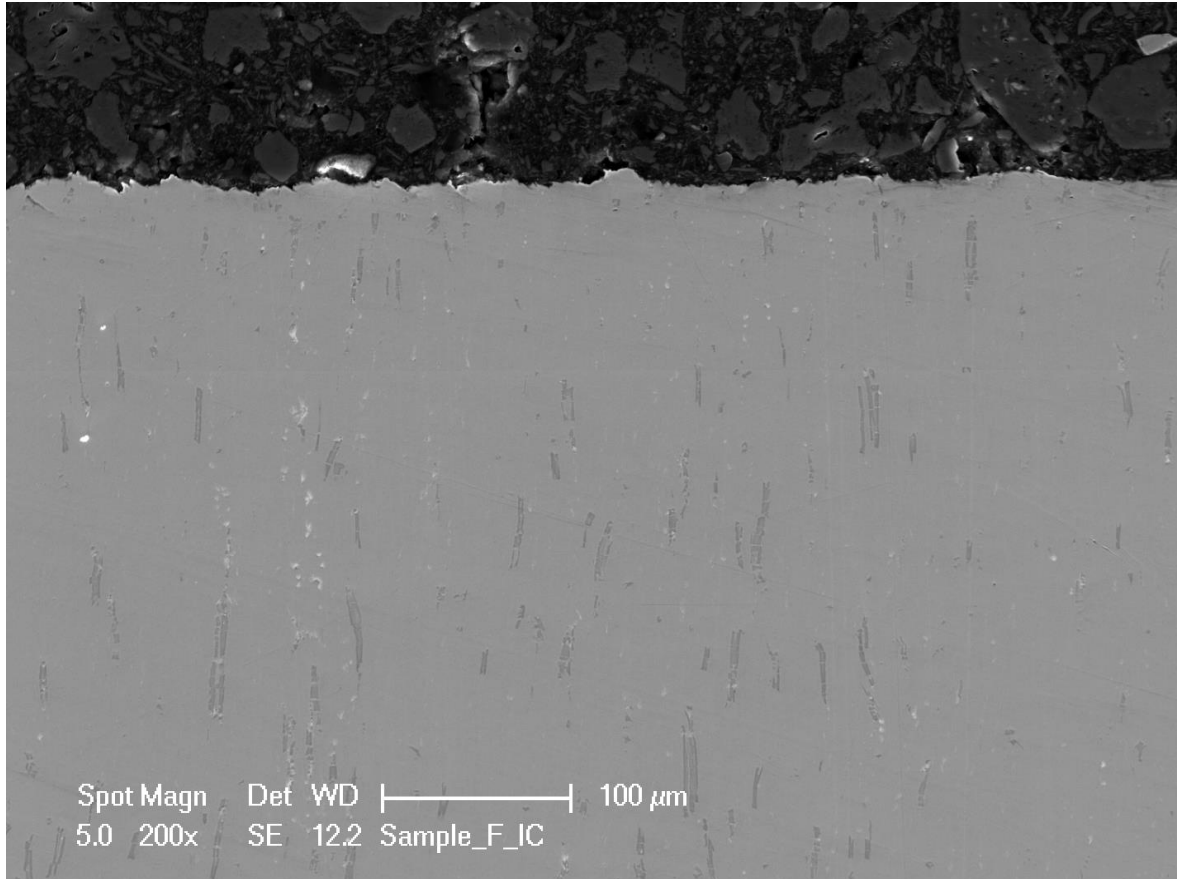
Obr. 29: Zobrazení nitridační vrstvy u mědi (zvětšení 50x)



Obr. 30: Měď po nitridaci a po korozi (zvětšení 50x)

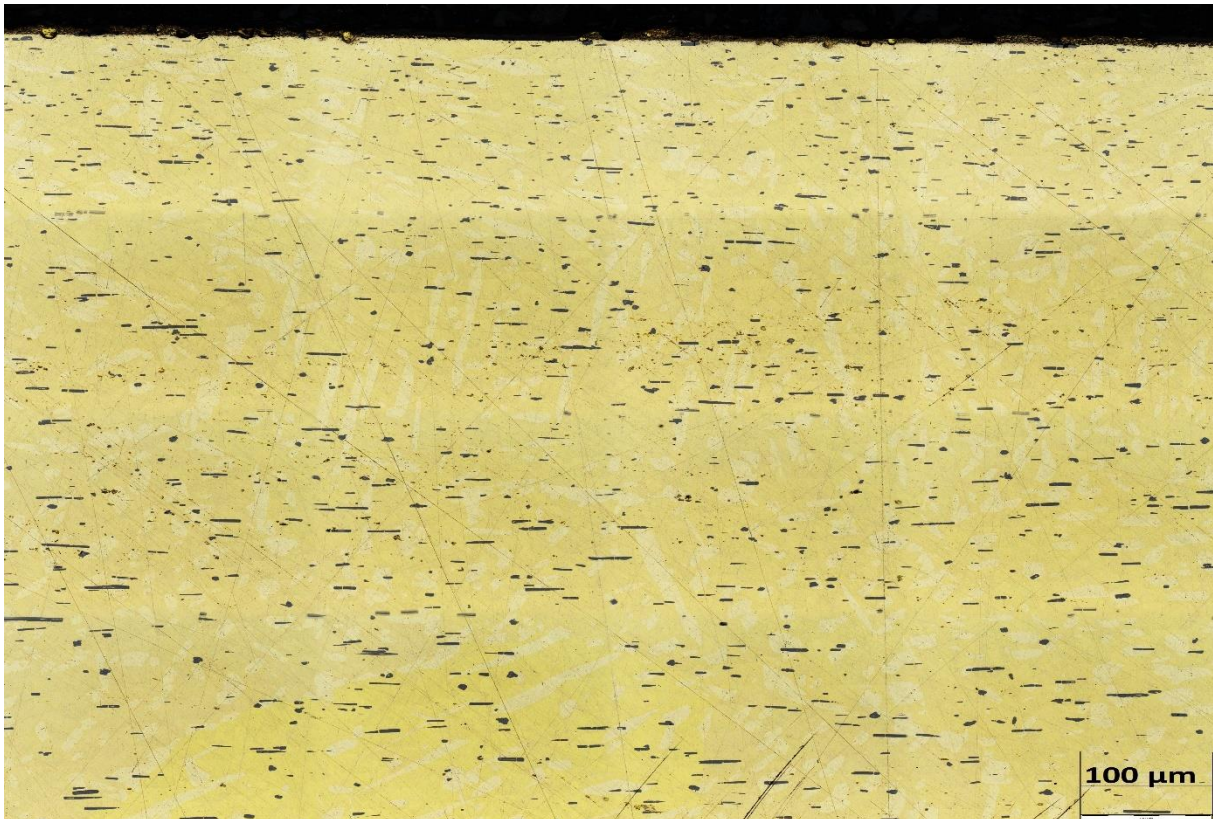
### 6.1.2 Mosaz

Na obr. 32. je zaznamenána mosaz po skončení procesu nitridace. Obdobně jako u čisté mědi je na povrchu vzorku viditelný rozdíl. Na povrchu se vytvořila světlejší souměrná oblast. Tato oblast by mohla odpovídat vrstvě po nitridaci. Obr. 31 zobrazuje mosaz před nitridací.



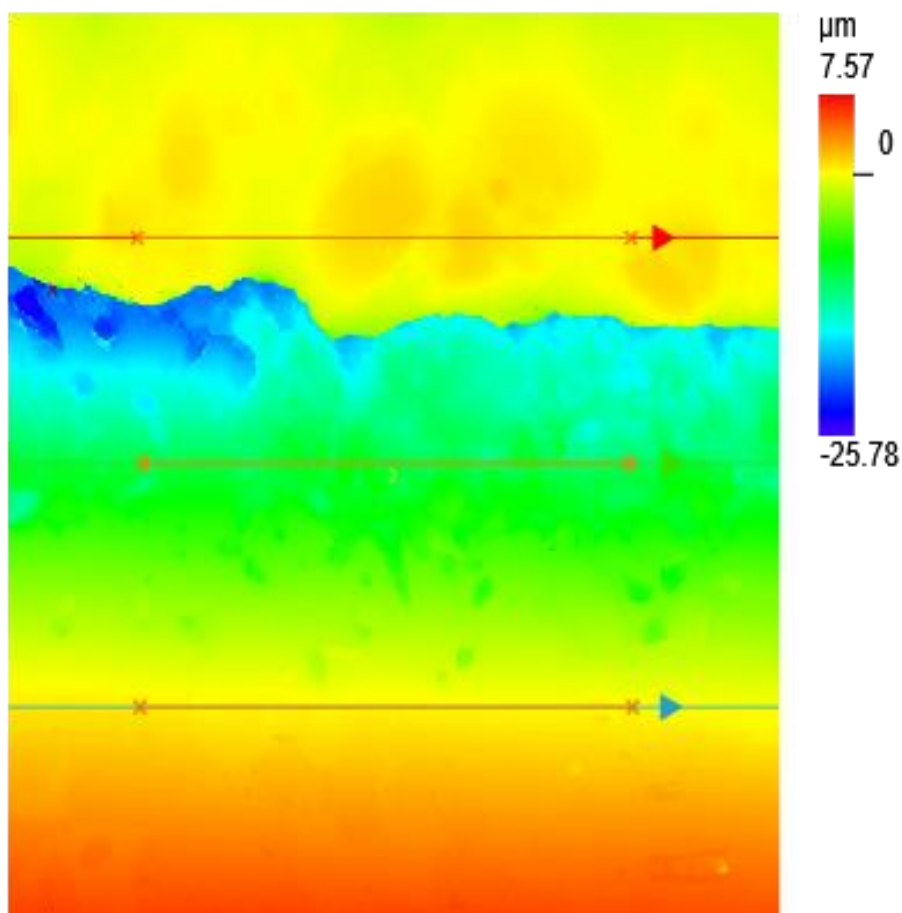
*Obr. 31: Mosaz před nitridací*



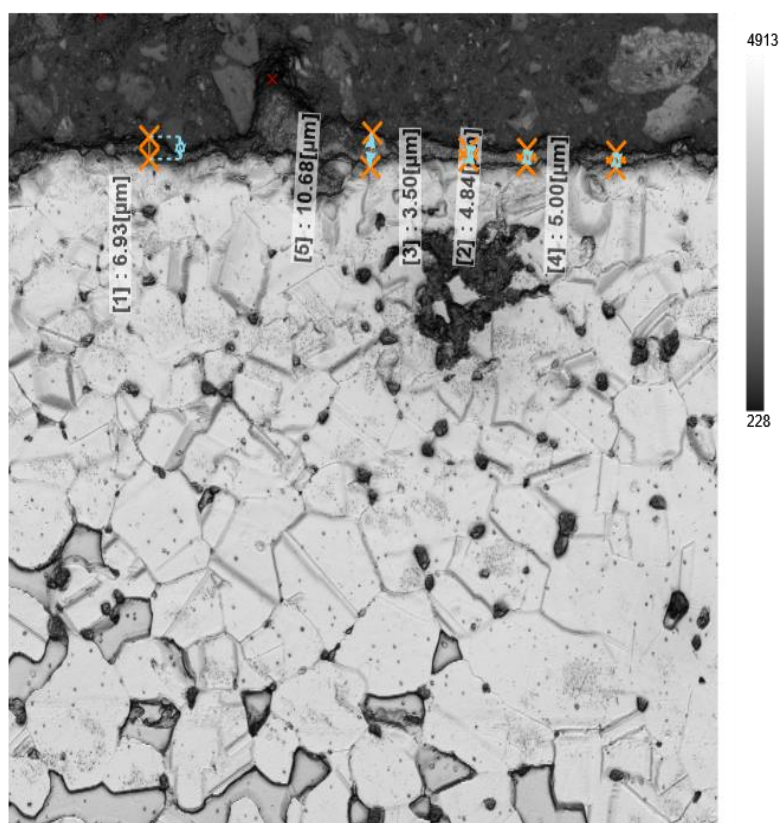


*Obr. 32: Fotka mosazi po nitridaci 50x*

Na obr. 33. a 34. je zobrazena mosaz v naleptaném stavu. Na obr. 33. lze vidět nesouměrnou nitridační vrstvu jako modrou oblast na povrchu vzorku. Jde o snímek z konfokálního mikroskopu a zobrazuje hloubkový profil vzorku. I zde je vidět, že svrchní vrstva je měkčí než střed vzorku a dle mikrotvrlosti to tedy odpovídá vytvořené nitridační vrstvě. Obr. 34 zobrazuje nitridovanou mosaz po korozi. Koroze je zde dobře viditelná na povrchu a jak zasahuje v určitém místě až 10  $\mu\text{m}$  do středu vzorku.



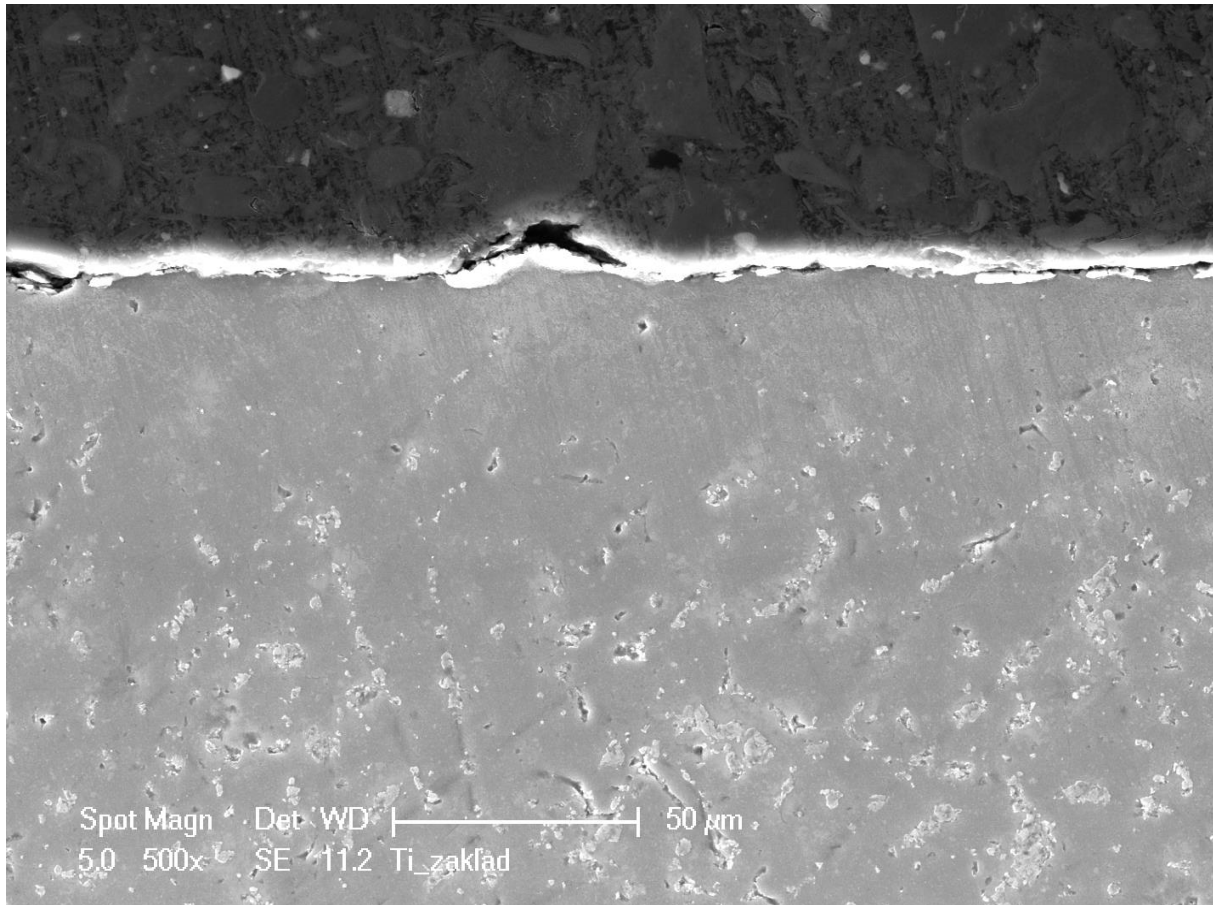
Obr. 33: Zobrazení nitrídané vrstvy pomocí konfokálního mikroskopu u mosazi (zvětšení 50x)



Obr. 34: Zobrazení nitrídané vrstvy pomocí konfokálního mikroskopu u mosazi po korozi (zvětšení 50x)

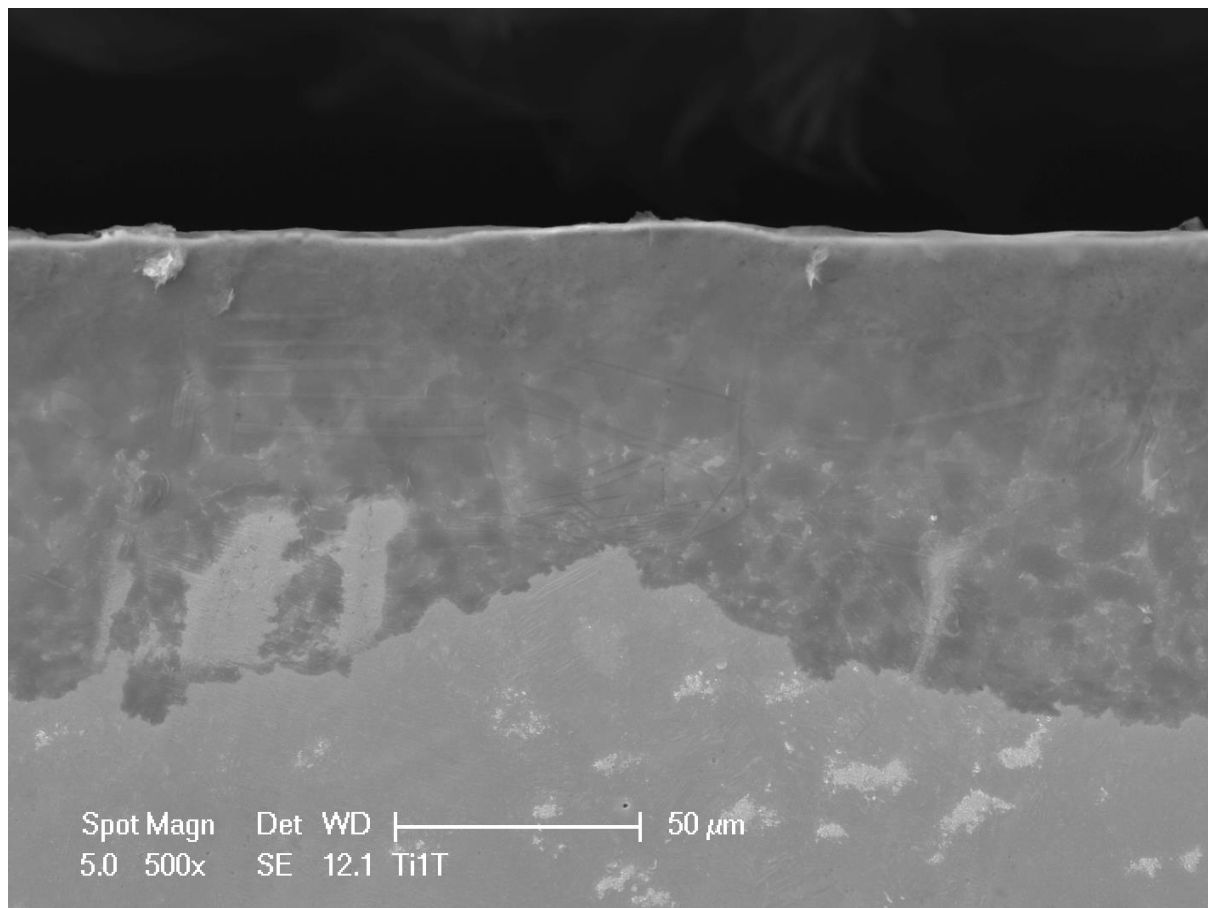
### 6.1.3 Titan

Na obr. 36 a 37 je vidět ve svrchní části vzorku vytvoření světlejší oblasti. Rozdíl oproti mosazi a mědi je viděn ve výskytu černých útvarů na povrchu vzorku na obr. 37. Porovnání snímků před a po nitridaci taktéž prokazuje vytvoření vrstvy. Další rozdíl oproti ostatním vzorkům je nesouměrnost vrstvy. Obr. 35. ukazuje titan před nitridací.

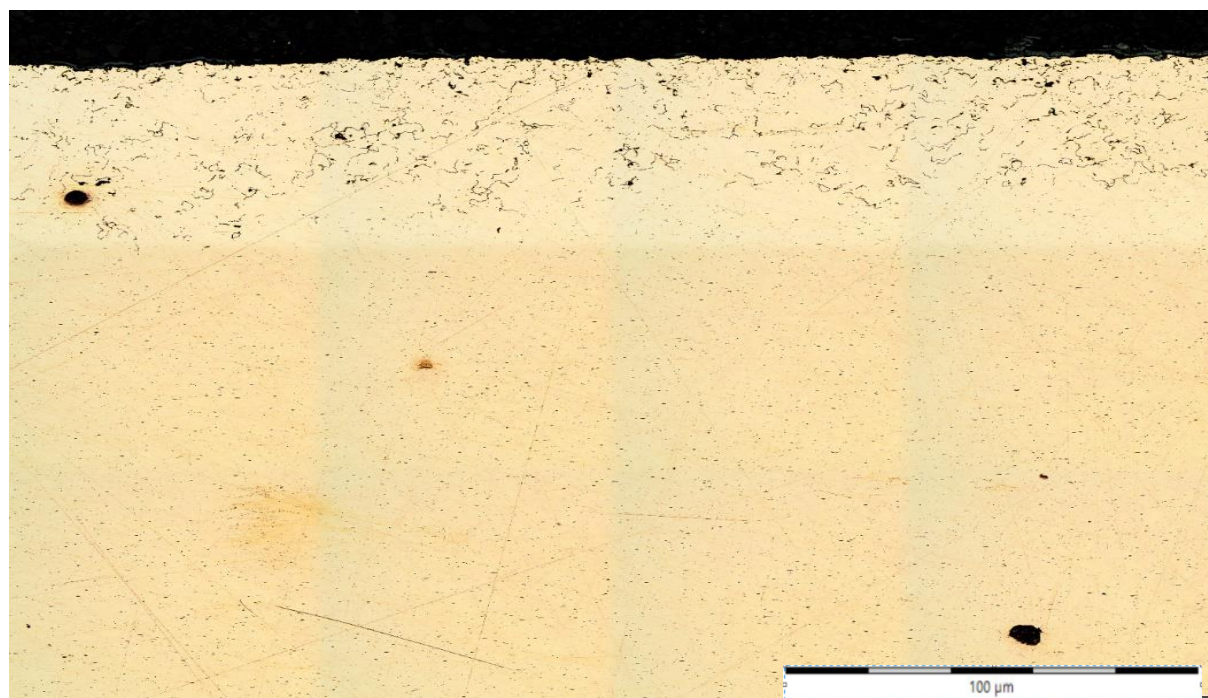


*Obr. 35: Vzorek titanu před nitridací*





Obr. 36: Nitridová vrstva titanu se zvětšením 500x

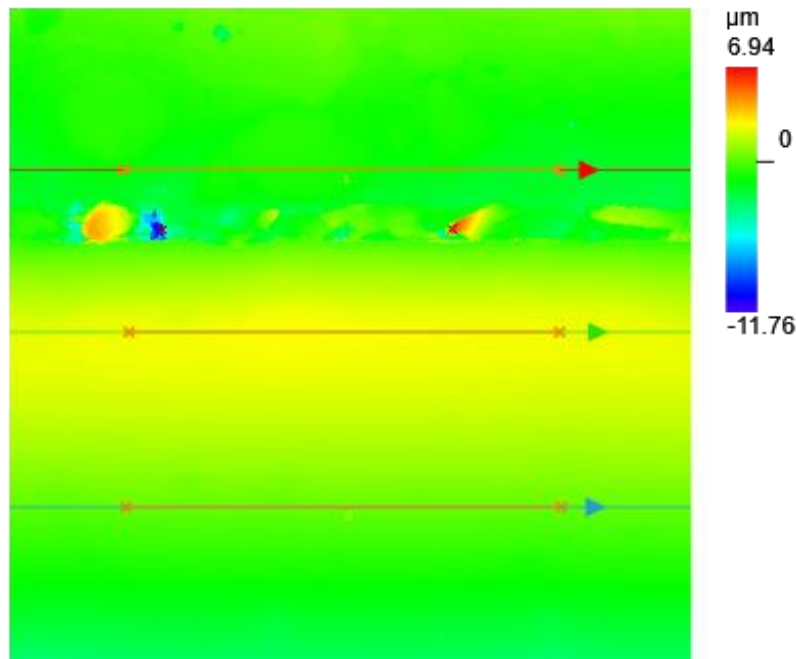


Obr. 37: Vzorek titanu po nitridaci 50x

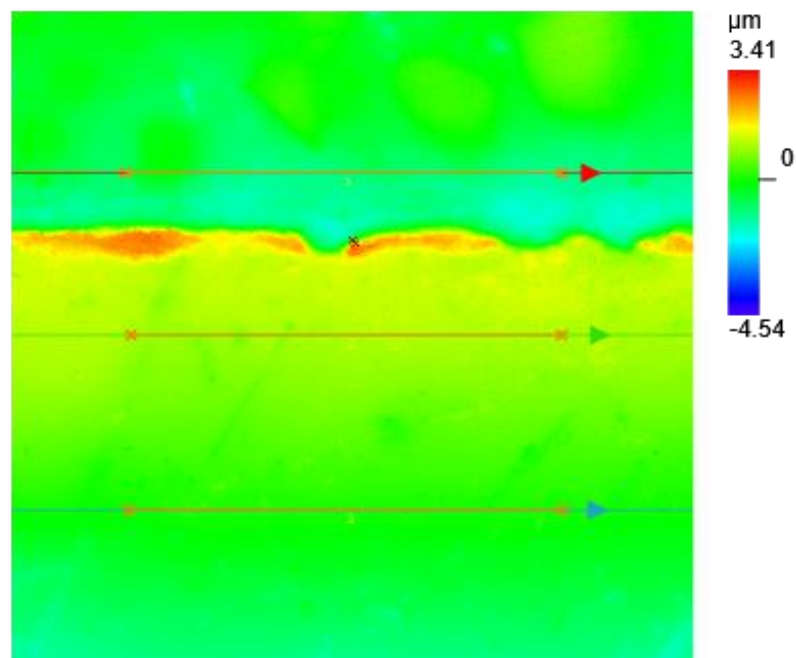
Pro dobré zhodnocení byly vybrány snímky z konfokálního mikroskopu v různých variacích. Na obr. 38. je znázorněna naleptaná svrchní vrstva titanu. Nitridovaná vrstva je

zachycena změnou barvy na světle zelenou, která dále při postupu vzorku do středu mění barvu na světle žlutou až žlutou. Dle mikrotvrdomosti by to i odpovídalo. U titanu byla tvrdost téměř stejná u vzorků před nitridací, tak po nitridaci.

Na obr. 39. je zobrazena naleptaná část vzorku titanu po korozi. V porovnání s obr. 38. je vidět rozdíl v povrchové vrstvě. Vrstva má na sobě stopy koroze a úbytek materiálu. Koroze se projevila až pod mikroskopem. Vizualní kontrola toto nezachytila.



Obr. 38: Zobrazení nitridované vrstvy pomocí konfokálního mikroskopu u titanu (zvětšení 50x)



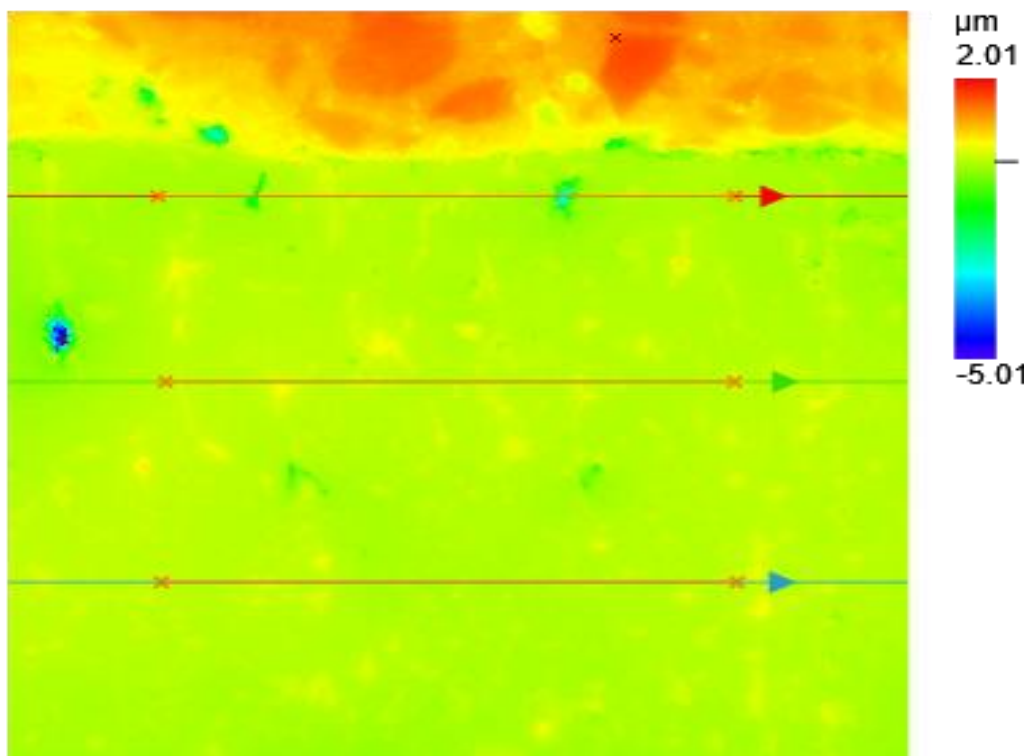
Obr. 39: Titan po korozi na konfokálním mikroskopu (zvětšení 50x)

#### 6.1.4 Slitiny hliníku

Ani u jedné slitiny hliníku nebyla potvrzena ze snímků nitrídační vrstva. Všechny snímky nám ukazují pouze stav jako na počátku nitrídace. U těchto vzorků bylo problém vytvořit snímky, na kterých by byla vrstva vidět. Ani chemická analýza nic nepotvrdila. Proto byla použita metoda leptání.

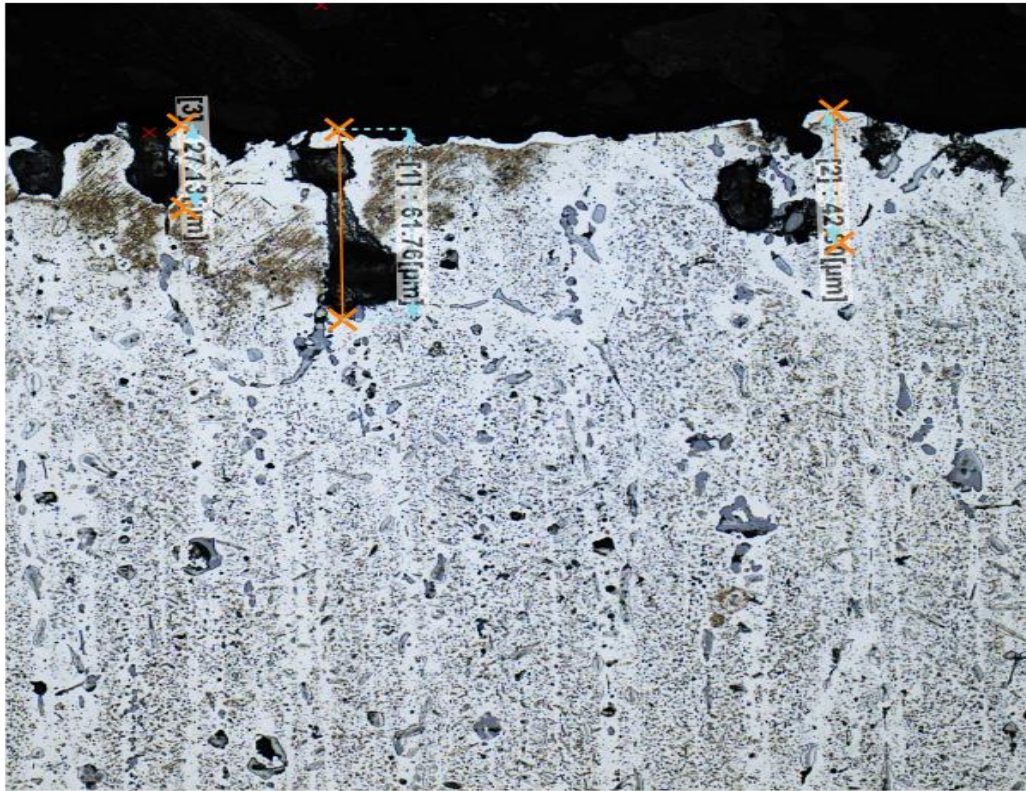
##### 6.1.4.1 Slitina 2017

Na Obr. 40 a 41 znázorněna slitina hliníku po nitrídaci. Na Obr. 40 je vidět, že se na tomto vzorku nitrídační vrstva nevytvořila. Nebyla zaznamenána na EDX analýze, ani na konfokální mikroskopu. Na konfokálním mikroskopu byla vidět pouze stejná jednolitá vrstva, což odpovídá stavu před nitrídací. A nenasvědčuje žádné změně tvrdosti, která by odpovídala vytvoření vrstvy. Na Obr. 41 je zaznamenána koroze. Od předchozích vzorků je tato koroze dobře viditelná. Je vidět, že není rovnoměrná, ale do materiálu se dostávala pouze v určitých místech. Podle snímků a záznamů se jedná o důlkovou korozi. Koroze zasahuje do hloubky 62  $\mu\text{m}$ .



Obr. 40: Slitina hliníku 2017 po nitrídaci (zvětšení 50x)

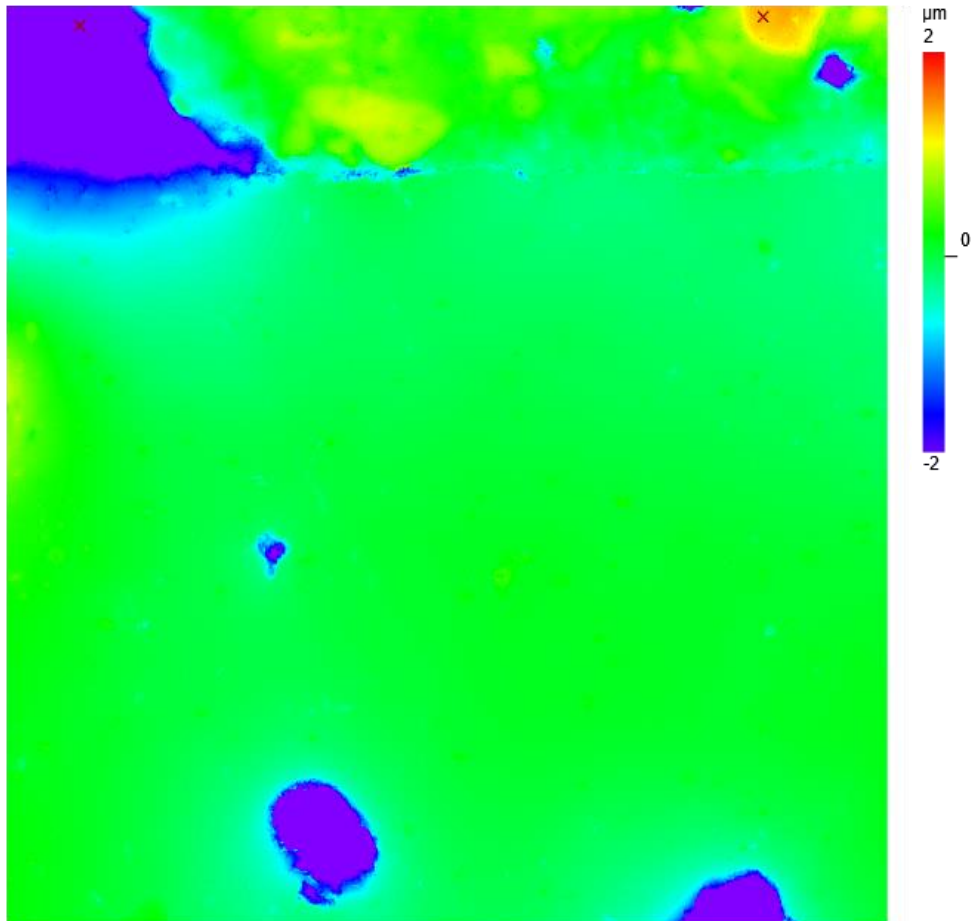




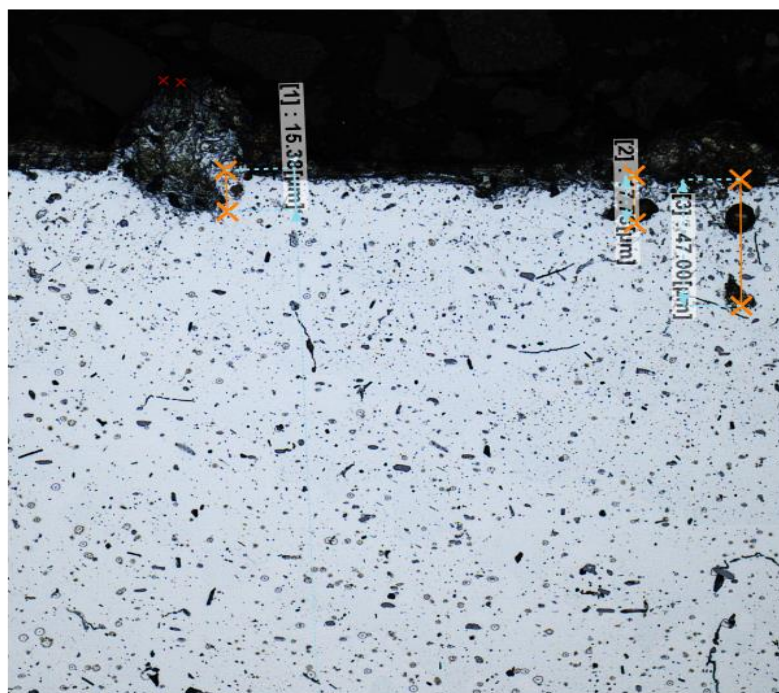
Obr. 41: Slitina hliníku 2017 po korozi (zvětšení 50x)

#### 6.1.4.2 Slitina hliníku 4401-71

Na Obr. 42. je zachycena slitina 4401-71 po nitridaci a ani u této slitiny není vidět žádná viditelná nitridační vrstva. Chemické složení dané slitiny po nitridace neukázalo žádné změny oproti základnímu materiálu. A z konfokálního mikroskopu je vidět pouze jedna barva. To odpovídá tomu, že se vrstva nevytvořila, protože nedošlo k žádné změně tvrsoti. Na obr. 43 je vidět slitina po korozi. I zde došlo k nerovnoměrné korozi. Koroze je opět dobře patrná a odpovídá důlkové korozi. Zde hloubka koroze dosahuje 16 μm. S porovnáním se slitinou 2017 je to o 75 % méně.



Obr. 42: Slitina hliníku 4401-71 (zvětšení 50x)

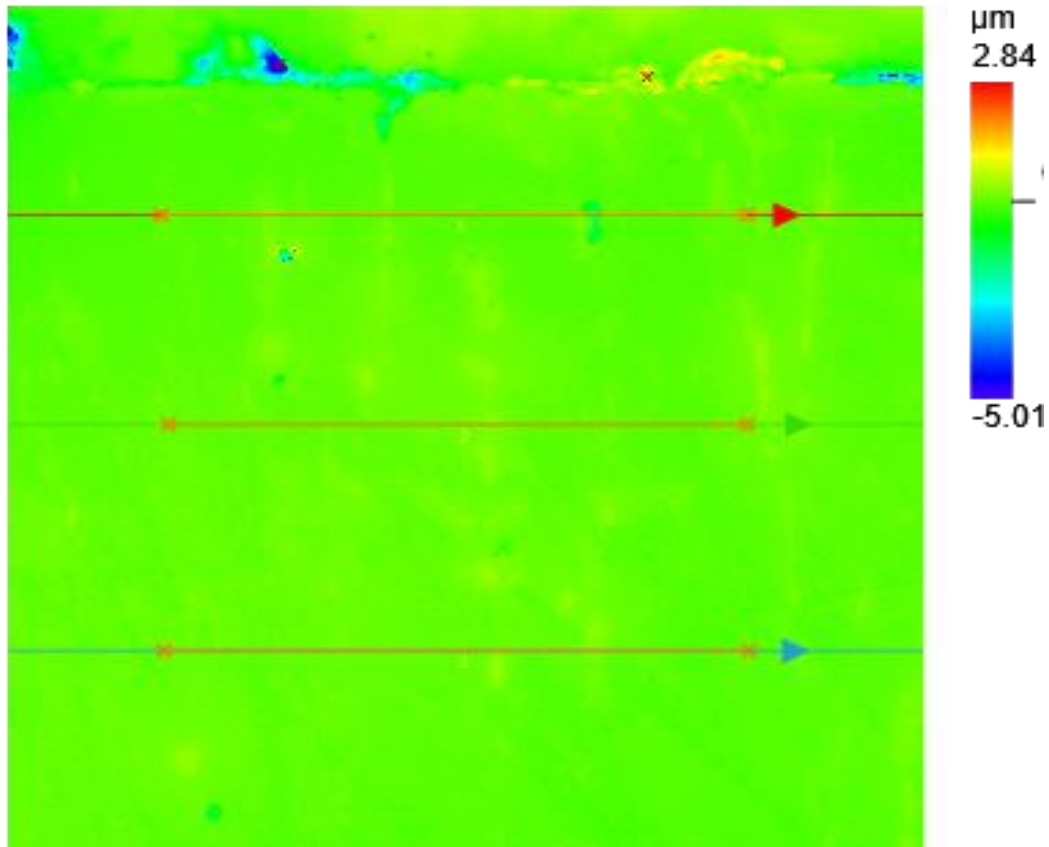


Obr. 43: Slitina hliníku 4401-71 po korozi (zvětšení 50x)

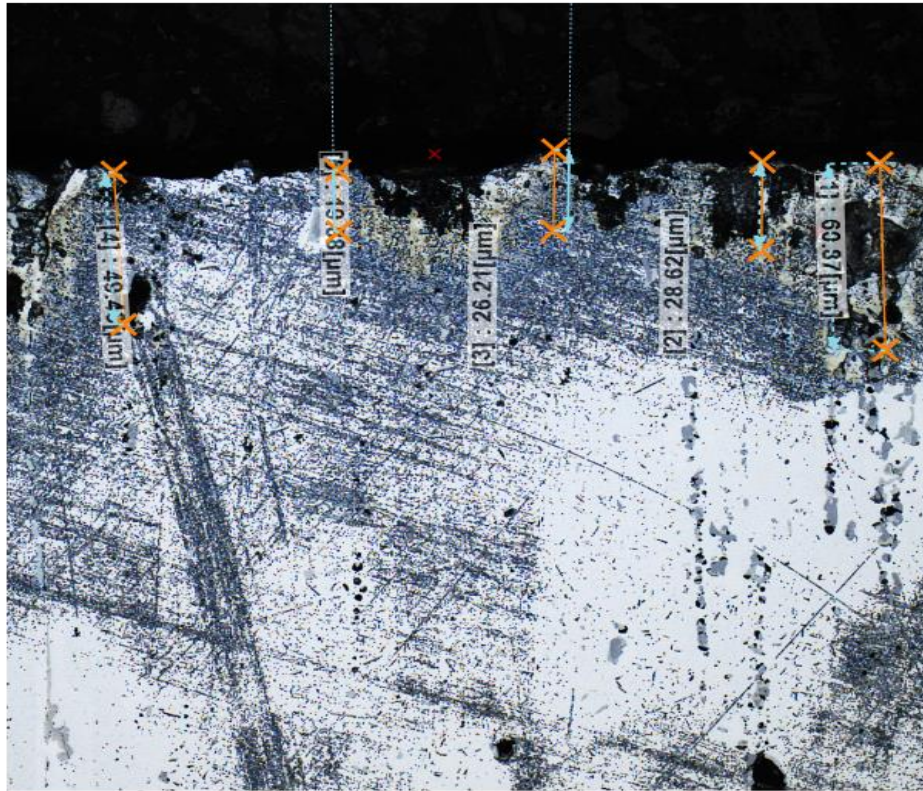


#### 6.1.4.3 Slitina hliníku 42 425

Ani u této slitiny hliníku nebyla prokázána nitridační vrstva pomocí metody naleptání a následného zkoumání pod mikroskopem. Ani jeden ze snímků (obr. 44 a 45) ji neproказuje a není tam dostatečně vidět. U této slitiny chemická analýza také nic nezaznamenala. Na obr. 45 je zaznamenána slitina po korozi. Koroze je patrná na první pohled. Z fotky lze říci, že jde důlkovou korozi. Rozsah koroze je zde značný a hloubka korozních důlku je v rozsahu od 10-60  $\mu\text{m}$ .



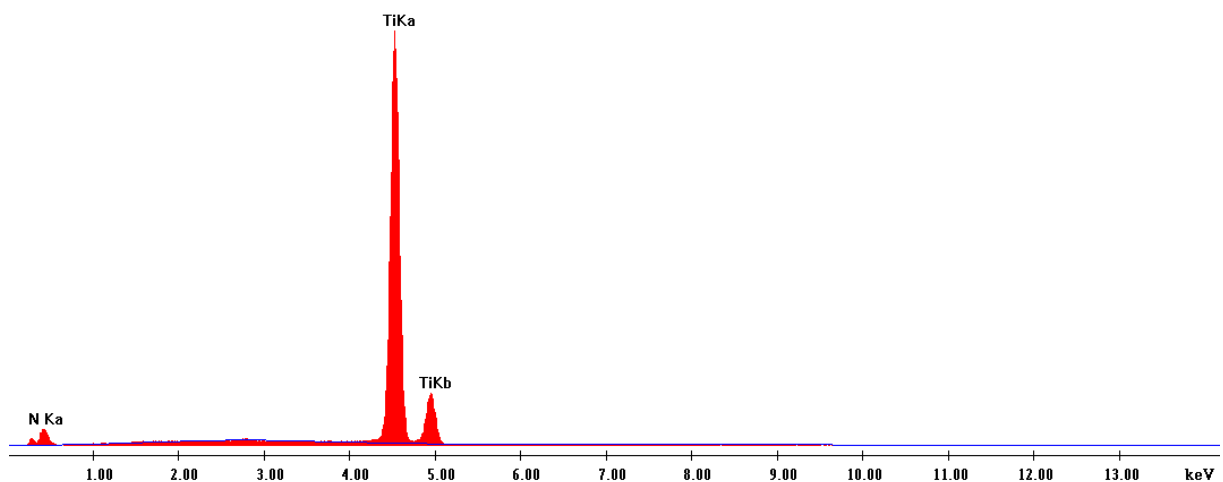
Obr. 44: Slitina hliníku 42 425 po nitridaci (zvětšení 50x)



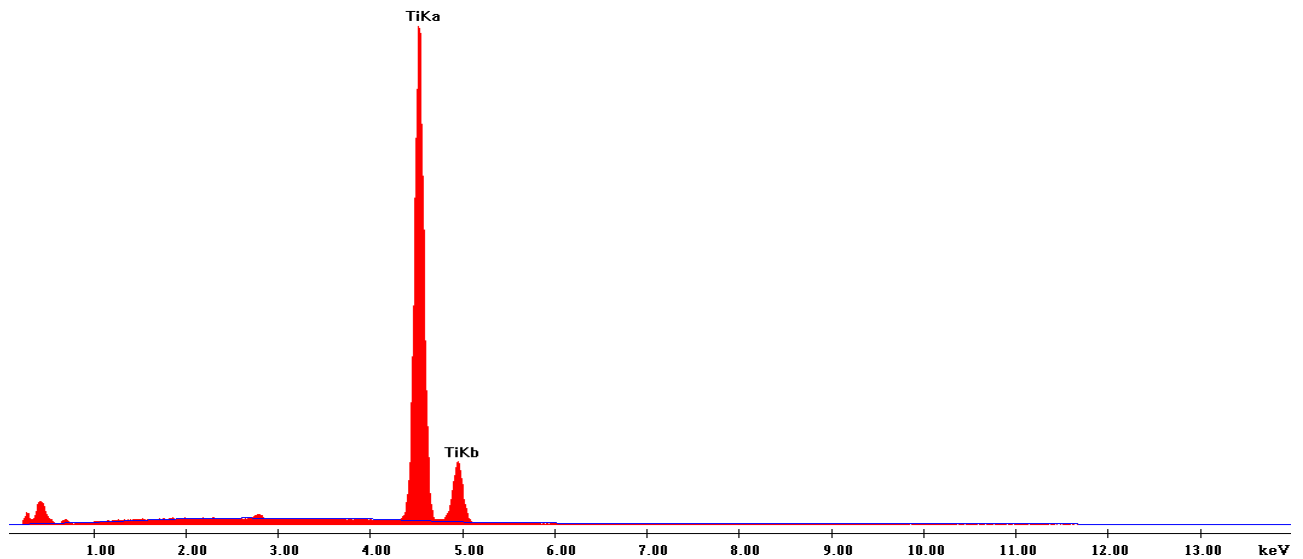
Obr. 45: Slitina hliníku 42 425 po korozi (zvětšení 50x)

### 6.1.5 Chemická analýza

Aby bylo potvrzeno, že jde skutečně o nitrídanou vrstvu, byla provedena chemická analýza. Ta se prováděla před metodou naleptání. Dusík byl zaznamenán až na několikátý pokus a pouze u vzorku titanu. U ostatních vzorků chemická analýza ukázala stejné složení jako před nitrídací. Dusík se zde nachází nejspíš v tak malém množství, že ho analýza nedokázala zachytit, což je vidět. Přikládám dva snímky obr.46 a obr. 47, kde je na prvním vidět zachycený dusík a na druhém nikoliv. Z toho důvodu byla uděláno naleptání a následně další zkoumání nitrídační vrstvy.

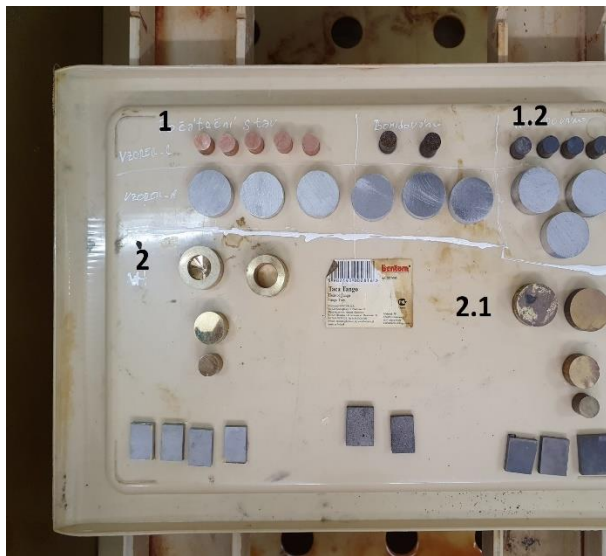


Obr. 46: Chemické složení titanu po nitrídaci



Obr. 47: Chemické složení titanu po nitridaci bez dusíku

## 6.2 Průběh korozní zkoušky



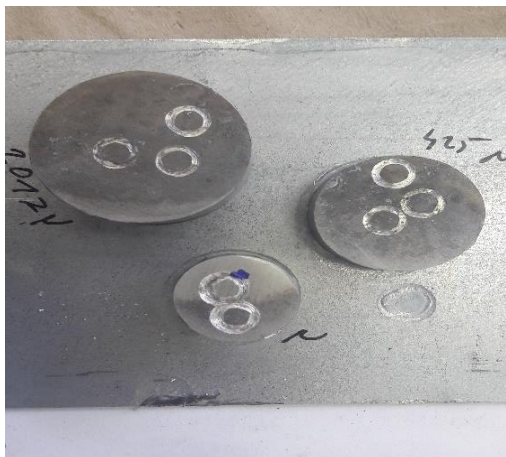
Obr. 48: Neželezné kovy umístěné v korozní komoře



Obr. 49: Titan v základním stavu a po nitridaci

Na obr. 48. je znázorněno umístění vzorků, které se skládaly především z neželezných kovů. Jde o základní stavy a o stavy nitridované. Číslem 1. je označena měď v základním stavu, číslem 1.2 měď po nitridaci, číslem 2. mosaz v základním stavu a číslem 2.1 mosaz po nitridaci. Na následujících obrázcích zůstává původní poloha vzorků, proto nejsou označovány. "

Na první pohled je vidět rozdíl mezi nitridovaným a vzorky v základním stavu. Na obr. 49. je znázorněn titan před nitridací a po nitridaci. Kdy před nitridací je jeden velký vzorek a tři menší vzorky jsou po nitridaci. Na Obr. 48 došlo k chybě a byl zde milně označen titan i když šlo o ocel, na tento omyl nás upozornila chemická analýza prováděna před nitridací, ale vyhodnocení bylo provedeno, až když byly vzorky umístěny v komoře.



Obr. 50: Slitiny hliníku po nitridaci



Obr. 51: Slitiny hliníku v základním stavu před nitridací

Na obr. 50. a 51. jsou vidět slitiny hliníku v základním stavu a ve stavu po nitridaci před tím, než byly vloženy do korozní komory. Už teď je vidět rozdíl ve vzhledu mezi nimi. Na obr. 50. je hliník po nitridaci, který je vzhledově tmavší než slitiny hliníku v základním stavu na obr. 51. Zde mají slitiny viditelně vyšší lesk, než je tomu na obr. 51.

Zkouška proběhla v prostředí se 100 % vlhkostí po dobu osmi hodin. Po následujících 16 hodinách až do konce testu byla v korozní komoře okolní vlhkost. Přesné hodnoty jsou vloženy i do tabulky 16. Ve všech místech korozní komory byly stejné pracovní podmínky.

Tab. 16: Parametry korozního testu

	Čas [h]	Vlhkost [%]	Teplota v komoře [°C]
Krok 1.	8	100	40
Krok 2.	16	100	23

Test trval měsíc a po každém týdnu byla série vzorků odebrána z korozní komory. Na vzorcích byla provedena vizuální kontrola s fotodokumentací.





Obr. 52: Neželezné kovy v korozní komoře (po 96 hodinách)

Na obr. 52 jsou zachyceny vzorky po 96 hodinách v korozní komoře. V porovnání s obr. 48 můžeme hodnotit, že na korozi reaguje mosaz, na který se vytvořil černý film, ale stále lze vidět základní měděnou barvu, která je na vzorcích bez nitridace. Vzorky v základním stavu jsou bez známek koroze.



Obr. 53: Neželezné kovy v korozní komoře (15.04.2021)



Obr. 54: Zaznamenané hodnoty

Na obr. 53 jsou zaznamenány vzorky po prvním týdnu v korozní komoře. Nebyly pozorovány žádné výrazné změny z vizuálního pohledu. Jedinou výjimkou je hliník, u kterého se nám na povrchu vytvořila tenká, viditelná vrstva. Největší změna z hlediska korozního napadení se vyskytovala u titanu. Měď již po nitrinaci měla temný až černý odstín povrchu, který po týdnu v korozní komoře změnil na již naprosto černý vzhled. S mědí v základním stavu již podle vzhledu nemá nic společného. Mosaz od prvního dne nezměnila barvu svého povrchu, může nám to tak připadat, ale je to pouze odstín fotky.

Obr. 55 zobrazuje průběh nitrinace po dvou týdnech. Vzorky byly v komoře již 336 hodin. Stav vzorků byl vizuálně zhodnocen a nenastala žádná změna u vzorků v základním stavu. Na nitrinovaných vzorcích mědi zůstává černý povlak. Na mosazi se vytvořil stejně jako na mědi tmavý film. Ovšem na rozdíl od mědi, je na mosazi stále možné pozorovat zlatavou barvu pod filmem. U titanu se po posledním měření koroze dále nerozrostla a zůstala na stejných místech jako před týdnem.



Obr. 55: Neželezné kovy v korozní komoře (22.04.2021)

Poslední pozorování je zaznamenáno na obr. 56. Celkový experiment s korozní komorou trval u neželezných kovů 672 hodin, což odpovídá čtyřem týdnům. Další prodloužení by bylo vhodné, ale časově velice náročné.



Obr. 56: Neželezné kovy v korozní komoře (06.05.2021)

Po vizuálním zhodnocení posledních vzorků z komory, které jsou zachyceny na obr. 31., lze vyhodnotit, že u neželezných kovů, které neprošly nitridací, nenastala od prvního vytažení z korozní komory žádná výrazná změna. Změna nastala u mědi, která se podobně jako nitridovaná mosaz potáhla černým filmem, který se ovšem dá suchou rukou otřít. Ostatní vzorky odolaly korozi výborně a není na nich patrná žádná koroze. U nitridovaných vzorků také nedošlo od předchozího týdne k velké změně. U mědi zůstal černý povlak a pouhým okem není vidět žádný rozdíl. Nitridovaná mosaz je jako předchozí pozorování pokryta tenkým černým filmem.

### 6.3 Zhodnocení hliníkových slitin

Na obr. 50. a 51. jsou zachyceny slitiny hliníku, které byly podrobeny nitridaci společně s neželeznými kovy. U těchto vzorků probíhala vizuální hodnocení ve dnech 22.04. a následně 06.05.





Obr. 57: Slitiny hliníku a titan po korozi (22.04.2021)

Na obr. 57. jsou zaznamenány celkem tři různé slitiny hliníku. Jako první jsou vždy vzorky po nitridaci a ve spodní řadě jsou umístěny vzorky v základním stavu, aby je bylo možné vizuálně porovnat. Z prvního pohledu je zřejmé, že titan korozi odolává jak v základním stavu, tak ve stavu nitridovaném. Jako první je vždy uveden nitridovaný stav a následně základní stav. Jedná se o různé slitiny s odlišnou odolností vůči korozi. Tato problematika je zmíněna v rešeršní části diplomové práce.

Z vizuálního hodnocení lze vyhodnotit, že se na všech slitinách vytvořily bílé tečky. U základních stavů jich není tolik. Nitridované stavy vyšly tedy hůře v tomto zkoušení. Nejvíce se rozšířily u slitiny hliníku 2017, která je na obrázku označena jedničkou. Její základní stav je skoro celý pokryt bílými tečkami, nitridovaný stav je na tom lépe. Jako dvojka je na obrázku označena slitina hliníku pod označením EN AW 6060. Na vzorku EN AW 6060 v základním stavu se objevuje méně bílých skvrn a její nitridované vzorky bílým tečkám odolaly lépe než nitridovaný stav u slitiny 2017. Poslední je zaznamenaná slitina pod označením EN AW 2007. Tato slitina odolala korozi nejlépe. Na jejím povrchu nejsou žádné bílé skvrny jak na nitridovaném povrchu, tak na základním stavu. Tato slitina se vyznačuje vysokou odolností proti korozi a v experimentu to bylo potvrzeno.





Obr. 58: Slitiny hliníku a titan po korozi (06.05.2021)

Pro jasné znázornění je vytvořena tabulka 17, ve které je postupně vynesena procentuální hodnota koroze na jednotlivých vzorcích. Toto hodnocení je subjektivní. První série vzorků byla do komory vložena o týden dříve. 0% koroze je označován stav na počátku korozního testu.

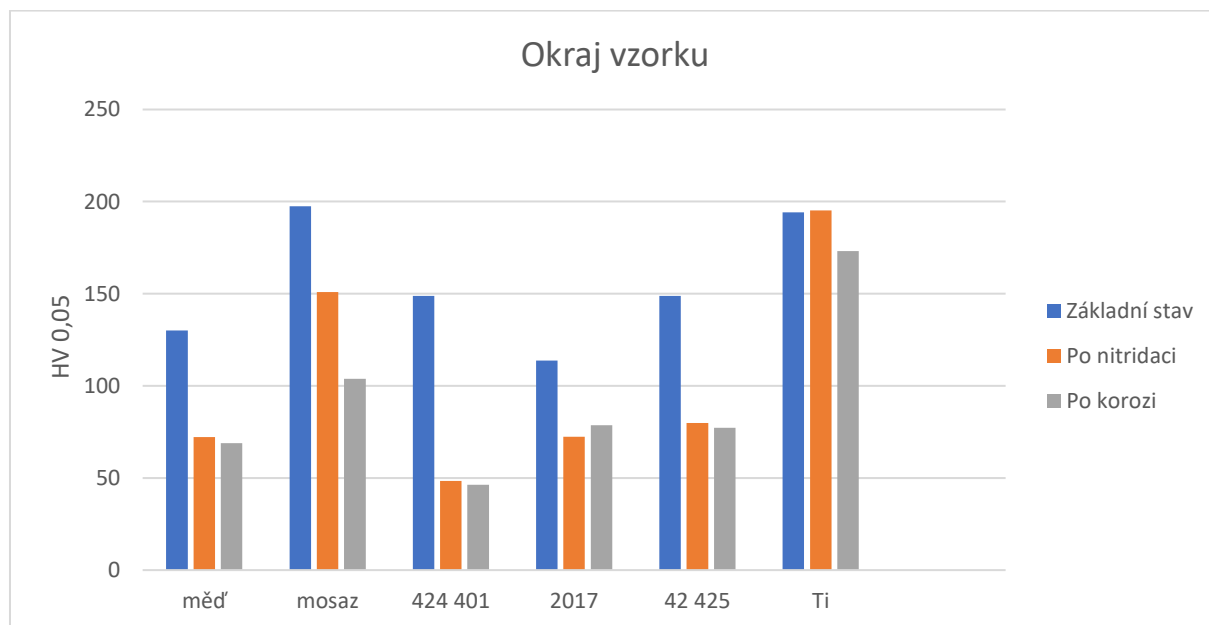
Za rychlý nárůst koroze v tabulce 17. u mědi v základním stavu a u mosazi po nitridaci, je vytvořením tmavého povlaku na jejich povrchu, který je podle mě produktem koroze. U nitridace mědi hodnota koroze nebyla hodnocena, po nitridaci se na povrchu vytvořil černý povlak, který vizuální hodnocení neumožňoval. Hodnoty v tabulce jsou uvedeny v procentech. Nitridovaná část dopadla u slitin hliníku lépe než základní stav.

Tab. 17: Zhodnocení postupu koroze

	08.04.	12.04.	15.04.	22.04.	06.05.
Měď; základní stav	0	0	4	13	65
Mosaz; základní stav	0	0	0	0	0
Titan; základní stav	0	0	0	0	0
Slitina hliníku 2017; základní stav	-	-	0	50	75
Slitina hliníku 4401-71; základní stav	-	-	0	20	35
Slitina hliníku 42 425; základní stav	-	-	0	0	0
Měď; po nitridaci	-	-	-	-	-
Mosaz; po nitridaci	0	0	40	80	85
Titan; po nitridaci	0	0	0	0	0
Slitina hliníku 2017; po nitridaci	-	-	0	10	20
Slitina hliníku 4401-71; po nitridaci	-	-	0	5	10
Slitina hliníku 42 425; po nitridaci	-	-	0	0	0

## 6.4 Zhodnocení mikrotvrdomosti

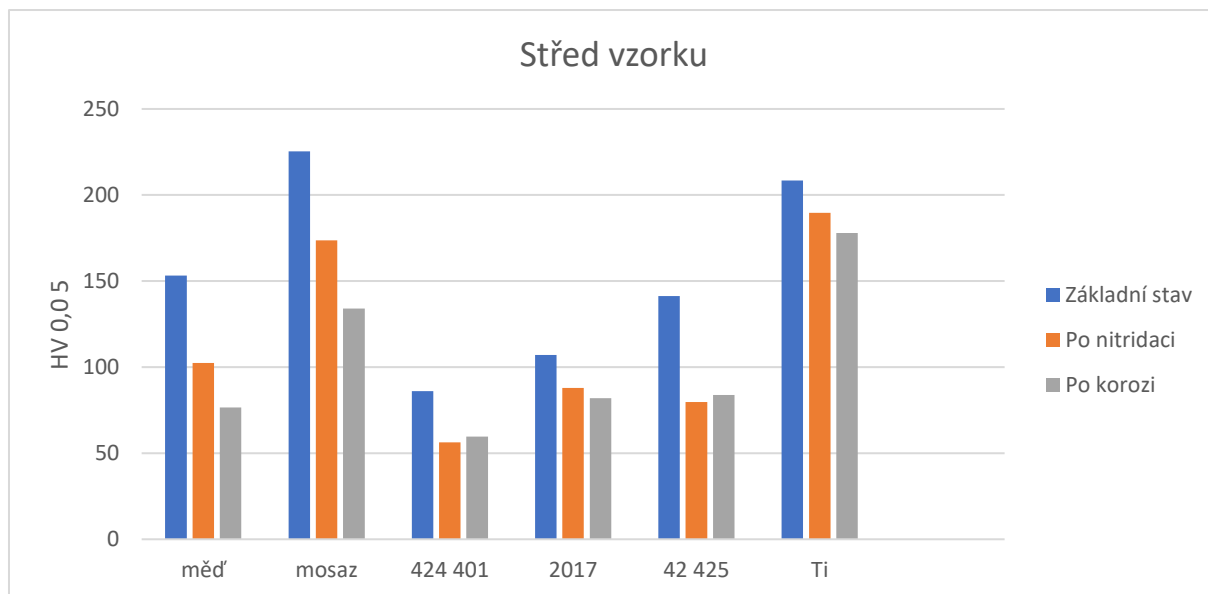
Graf 1. zobrazuje průběh mikrotvrdomosti, která shrnuje všechny testované vzorky. Zaměřuje se pouze na okraj vzorků odkud byla brána první testovací data. Jedná se o vzorky všech testovaných slitin a kovů. Testovány byly v následujícím pořadí: základní stav, vzorky po nitrinaci a vzorky po korozi.



Graf 1: Hodnoty mikrotvrdomosti, okraj vzorku

Z grafu je patrné, že u většiny testovaných vzorků se po nitrinaci snížila mikrotvrdomost. Rozdíly v mikrotvrdomostech byl různý u všech experimentálních vzorků. Jedním ze vzorků, který měl obdobnou tvrdost jako v základním stavu, tak po prodělané nitrinaci byl titan. U toho se mikrotvrdomost takřka nezměnila. Mikrotvrdomost čistého titanu nám klesla až u vzorků, které prošly korozní komorou. Po vyhodnocení vizuálního testu po korozi, bylo usouzeno, že titan korozi odolal, ale mikrotvrdomost odhalila, že v povrchu vzorku mohlo dojít ke změně, která mohla mít za následek snížení mikrotvrdomosti. U ostatních vzorků je vidět velký rozdíl v mikrotvrdomosti. Nejmarkantnější rozdíl je viděn u slitiny hliníku 4401, kdy hodnota rozdílu činila dle grafu téměř 80 hodnot HV 0,05. Rozdíl mezi nitrinovanou částí a nitrinací po korozi, je největší u slitiny mosazi, kdy se mikrotvrdomost po korozi snížila téměř o 50 hodnot HV 0,05, což je druhý největší rozdíl v grafu.

Graf 2. byl vytvořen stejně jako graf 1. Mikrotvrdomost na vzorcích byla testována ve stejném pořadí, jako u grafu číslo 1. První byl testován základní stav, následně nitrinované vzorky a jako poslední vzorky s nitrinovým povlakem, které prošly korozní komorou. Mikrotvrdomost se testovala ve středu vzorku z důvodu, aby bylo docíleno co nejpřesnějších výsledků

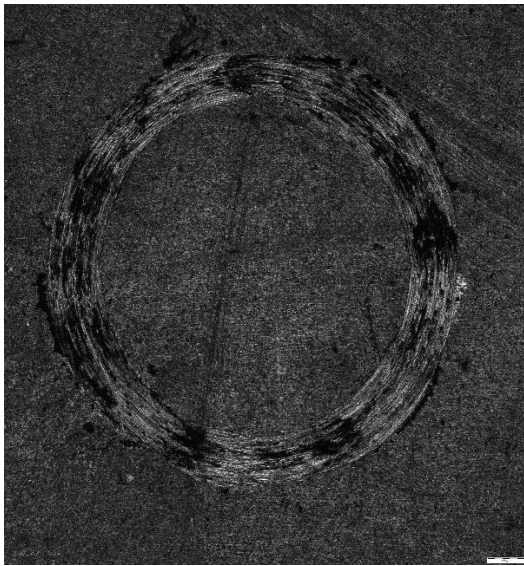


Graf 2: Hodnoty mikrotvrlosti střed vzorku

Graf 2. nám vykresluje mikrotvrdot uprostřed vzorku. U všech vzorků je tvrdost základního stavu vyšší než další zkoušené varianty vzorků. Rozdíly mezi grafy 1. a 2., jsou ty, že titan zůstal takřka na stejných hodnotách a jeho hodnoty jsou vyrovnané. Slitina hliníku 42 425 má totožný průběh u obou grafů. Hodnoty mikrotvrlosti základního stavu jsou o jednu třetinu vyšší než u stavů po nitridaci a po korozi. Pouze mikrotvrdot u grafu 2. je u vzorku po korozi o pár jednotek vyšší než po nitridaci, ale zde to může být způsobené chybou měření. Slitina hliníku 2017 dopadla při testování středu taktéž hodně podobně jako při testech na okraji. Slitina 42 4401 ovšem ve 2. grafu ztratila skoro třetinu mikrotvrlosti u vzorku v základním stavu. Měď i mosaz dopadly podobně při obou testech, jak ukazují grafy.

Všechny vzorky byly podrobeny stejné nitridaci v prášku při stejné teplotě. Nitridace v prášku má tu nevýhodu, že vytvořená vrstva je nesouměrná. To mohlo způsobit nepřesnosti při měření. Na okraji vzorku byla oblast se silnou vrstvou nitridace a při testech ve středu vzorku byla naopak na část, kde byla nitridovaná část dosti slabá a při vytvoření vtisku mohl indentor projít skrz vrstvu a měřila se oblast pod nitridovaným povrchem. To může být zdůvodnění rozdílů mezi mikrotvrdotmi mezi grafem 1. a grafem 2.

## 6.5 Získané hodnoty z tribologické zkoušky

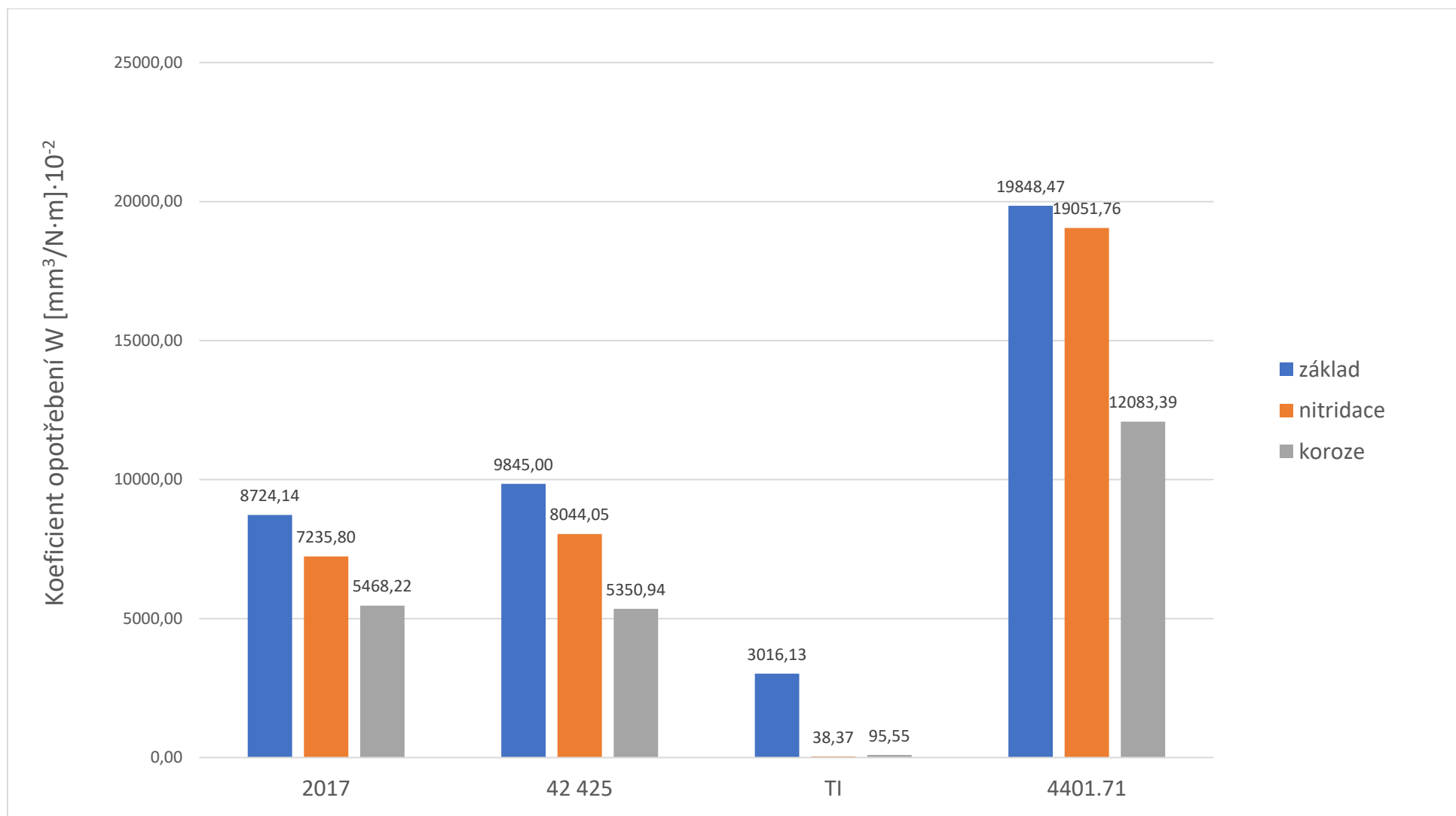


Obr. 59: Titan před nitridací



Obr. 60: Titan po nitridaci

Graf 3. ukazuje výsledky zkoušky koeficientu opotřebení W. Dle grafu má nejlepší hodnoty titan. Titan v základním stavu vykazoval velice dobrou odolnost vůči opotřebení v porovnání s hliníkovými slitinami. Z hliníkových slitin má nejvyšší koeficient opotřebení slitina 4401-71. Po nitridaci se u všech zkušných vzorků koeficient snížil. Odolnost vůči opotřebení se tedy zvýšil. Největší rozdíl je vidět u titanu, kde se koeficient snížil o 98,7 %. Poslední údaj je hodnota po korozi. U slitin hliníku zde bylo vidět opětovné snížení hodnot. U titanu naopak hodnota koeficientu lehce vzrostla. Na obr. 59. a 60. máme porovnání dvou stop titanu, kdy obr. 60. ukazuje stopu po nitridaci a obr. 59. před nitridací. Rozdíl mezi nimi je patrný a potvrzuje ho i graf 3. Tato zkouška potvrdila, že nitridační vrstva na povrchu titanu je přítomna a její otěruvzdornost je vysoká. U slitin hliníku se otěruvzdornost taktéž snížila, ale nebyla to velká změna.



Graf 3: Koefficient opotřebení  $W$

## 7 Diskuse výsledků

Cílem práce bylo doplnění stávajících informací, které se přímo týkají nitridace neželezných kovů. V rámci experimentálního programu byla zkoumána nitridační vrstva vytvořena na neželezných kovech a její odolnost vůči korozi. Jako vzorky byly zvoleny titan, měď, slitina mosazi a slitiny hliníku.

Byla vytvořena nitridační vrstva na experimentálních vzorcích. Ta byla následně testována a zkoumána. Jako první byly vzorky vystaveny korozní zkoušce. Následovaly zkoušky mikrotvrdomosti a tribologických vlastností, ze zkoušky byl stanoven koeficient opotřebení. Teplota pece byla stanovena na 520 °C a způsob nitridování byl zvolen tzv. metodou v prášku.

Při testování materiálů v korozní komoře bylo vizuálně zkoumáno jejich procentuální napadení korozi. Nitridační vrstva byla porovnávána se vzorky před nitridací. Při této zkoušce dopadl nejlépe titan a titan s nitridovou vrstvou. Jejich odolání korozi bylo dle vizuálního hodnocení nejlepší. U mědi po nitridaci vznikl na povrchu černý povlak, který znemožňoval pozorovat případnou korozi. U mosazi po nitridaci začal reagovat celý povrch a ztmavl. U slitin hliníku po zkoušení dopadly lépe základní stavy, kdy nitridované vzorky hůře odolávaly korozi.

Nitridační vrstva byla podrobena zkoušce mikrotvrdomosti a následně porovnána s výsledky mikrotvrdomosti základního stavu. Data byla sbírána z okraje a ze středu vzorku. Vždy bylo uděláno více vtisků pro co nejpřesnější měření. Nitridace je zahrnována do tepelného zpracování z důvodu zvýšení povrchové tvrdosti. Tento děj je určen rozložením nitridů v difúzní vrstvě, velikostí a jejich morfologií. Z výsledků vyplývá, že se u všech vzorků po nitridaci snížila mikrotvrdomost povrchové vrstvy. Jediný vzorek, který si zachoval obdobnou tvrdost byl titan. U některých vzorků slitin hliníku po nitridaci klesla mikrotvrdomost o jednu třetinu. Důvod může být vytvoření tenké vrstvy a následně její promáčknutí. Pokud by došlo k tomuto efektu, tak bychom měřili tvrdost pod nitridovou vrstvou.

Úroveň opotřebení u tribologické zkoušky byla hodnocena dle normy ASTM G99. Tribologická zkouška určila, že nitridovaný titan má nejlepší hodnoty. Rozdíl titanu před nitridací a po nitridaci činil více než 98 %. Hodnota se po korozi snížila, ale stále zůstává vyšší než u vzorku bez nitridace. Z důvodu rozměrů vzorku byly testovány pouze slitiny hliníku a titan. Na ostatních vzorcích nebylo možné zkoušku provést. Slitiny hliníku po nitridaci vykazovaly snížení koeficientu opotřebení. Toto snížení probíhalo i při testování vzorků po korozi.

Jako první metoda pro potvrzení vytvoření nitridační vrstvy byl zvolen příčný výbrus a následné zkontrolování vrstvy na mikroskopu. Z nedostatku času nebyl příčný výbrus proveden u slitin hliníku. Tento způsob potvrdil změnu ve svrchní části vzorků titanu, mědi i mosazi, kdy byly porovnány snímky před nitridací a po nitridaci. A bylo potvrzeno, že došlo ke změně struktury na povrchu vzorku. U slitin hliníku nebyla vrstva vidět. Nebyla zaznamenána ani změna povrchu vzorku. Pro další potvrzení byla zvolena chemická analýza, která byla vytvořena u vzorků před a po nitridaci. Chemická analýza byla úspěšná pouze u vzorků titanu, kdy potvrdila, že se spolu s titanem ve vzorku nachází i dusík. Ostatní chemické analýzy potvrzení dusíku nepřinesly.

Jako další způsob potvrzení nitrídační vrstvy bylo naleptání vzorků a následné zhodnocení na konfokálním mikroskopu. Zde byla vrstva viděna u vzorků titanu, mědi a mosazi. U slitin hliníku nebyla vrstva potvrzena.

Poslední pozorování bylo provedeno na všech vzorcích po nitridaci a po prodělání koroze. Byl zde sledován povrch vzorku po napadení korozí. Aby bylo možné povrch lépe pozorovat byl naleptán. Největší napadení korozí bylo prokázáno u slitin hliníku. U ostatních nitridovaných vzorků nebylo napadení velké. A shodovalo se s napadením korozí v základním stavu.



## 8 Závěr

Diplomová práce vznikla na základě studentského projektu ESGS-2021-030 „*Vývoj nových materiálů, aplikace moderních metod, jejich zpracování, ekologické výroby, svařování a testování*“.

Neželezné kovy titan, měď, slitina mosazi a slitiny hliníku byly vystaveny nitridaci. Následně byly testovány na přítomnost nitridační vrstvy a vlastnosti dané nitridační vrstvy. Kromě testování, byly porovnávány stavy před nitridací, po nitridaci a po korozi, kde byl sledován postup koroze u jednotlivých vzorků. Nitridační vrstvy bylo dosaženo pomocí nitridace v prášku při 520 °C. Proces trval 26 hodin. Následně byly vzorky podrobeny korozi v korozní komoře.

Velký vliv na vytvoření nitridované vrstvy měla struktura zkoušených materiálů. Vrstva se potvrdila pouze u titanu, mědi a slitiny mosazi. U slitin hliníku nebylo možné potvrdit vznik nitridované oblasti. Vliv na to mohl mít nitridovací proces, který byl zvolen s vyšší teplotou. U slitin hliníku nemusela být nitridační vrstva vytvořena z důvodu právě vyšší teploty. Následnými testy mikrotvrdosti a koeficientu opotřebení byla testována vytvořená vrstva. Rozdíl je vidět u mikrotvrdosti, která na povrchu po nitridaci výrazně u slitin klesla, a klesla i následně po korozi. Stejného výsledku bylo dosaženo i u mosazi a mědi. U titanu jako jediného ze vzorků nebylo zaznamenáno snížení povrchové tvrdosti. Ale byla u něj potvrzena vyšší odolnost proti opotřebení. Rozdíl činil více než 98 %. Z pohledu koroze obstál nejlépe titan. Oproti ostatním slitinám na něm nebylo zaznamenáno žádné viditelné napadení korozí. Ostatní vzorky se pokryly korozními produkty, které zohledňuje tabulka.

Z výsledků tedy vyplývá, že se vrstva prokazatelně vytvořila na titanu, slitině mosazi a mědi. Výraznějších výsledků dosáhl pouze titan. A to v oblasti otěruvzdornosti a koroze. Ve zkoušce mikrotvrdosti jeho hodnoty neklesly, ale ani se nezvýšily. U ostatních vzorků tvrdost po nitridaci klesla. U slitin hliníku by musela být nitridace vytvářena, buď jiným způsobem, nebo za jiných teplot, aby se nitridační vrstva mohla vytvořit. U ostatních zkoušených materiálů se vrstva vytvořila, ale nedosahovala takových výsledků, které se očekávaly. Aby bylo docíleno zlepšení, vzorky by se měly podstoupit nitridaci při nižší teplotě a následně srovnat výsledky.

## Bibliografie

- [1] Ptáček, Luděk. Nauka o materiálu II. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [2] SHOHOJI, Nobumitsu. ReseachGate. [Online] 03.. 01. 2016. [Citace: 01.. 12 2020.] [https://www.researchgate.net/figure/Equilibrium-phase-diagram-for-binary-Fe-N-system-presented-over-T-C-coordinate\\_fig3\\_314094894](https://www.researchgate.net/figure/Equilibrium-phase-diagram-for-binary-Fe-N-system-presented-over-T-C-coordinate_fig3_314094894).
- [3] Kraus, Václav. Tepelné zpracování a slinování. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2013. 978-80-261-0260-1.
- [4] Korecký, Jan. Nitridování, povrchové tvrzení oceli dusíkem. Praha : průmyslové vydavatelství, 1951.
- [5] Pye, David. Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing. Ohio : ASM International, 2003. 978-0-087170-791-8.
- [6] hef-durferrit. [Online] HEF-DURFERRIT s.r.o. [Citace: 10.. 05. 2021.] <http://www.hef-durferrit.cz/>.
- [7] Hrubý, Alois a Hrubý, Vojtěch. Iontová nitridace v praxi: tvrdé a porosní. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1989. 978-80-903694-5-0.
- [8] Kraus, Václav. Povrchy a jejich úpravy. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2009. 978-80-7043-668-1.
- [9] Novák, Pavel. Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství VŠCHT Praha. [Online] 6.. 9. 2016. [Citace: 8.. 12. 2020.] <https://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze%20kov%C5%AF.pdf?redirected>.
- [10] Druhy koroze kovů. Novák, Pavel. 49, 2005, Koroze a ochrana materiálu, Sv. 4, stránky 75-82.
- [11] Vojtěch, Dalibor. Materiály a jejich mezní stavy. Praha : Vydavatelství VŠCHT, 2010. 978-80-7080-741-5.
- [12] Kizlink, Jurj. Technologie chemických látek. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2005. 80-214-2913-5.
- [13] Jones, Denny A. Principles and Revention of corrosion. New Jersey : Pretice Hall, 1996. 0-13-359993-0.
- [14] Uhling, Herbert H. a Revie, R. Winston. Corrosion and corrosion Control. New Jersey : Wiley-interscience, 2008. 978-0-471-73279-2.
- [15] Car Cosmetics . [Online] Car Cosmetics - Leeds West Yorkshire. [Citace: 7.. 12. 2020.] <https://www.carcos.co.uk/services/rust-repairs/>.
- [16] Stumm, Werner a Morgan, James J. Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters. New York : Wiley, 1995. 978-0-471-51185-4.
- [17] EuroClean. [Online] EuroClean s. r. o. [Citace: 8.. 12. 2020.] <https://euroclean.cz/clanky/jake-problemy-prinasi-zelezo-a-mangan-ve-vode/>.

- [18] DC Voltage Gradient Technology & Supply Ltd. [Online] DCVG Ltd. 2008, 2008. [Citace: 7.. 12. 2020.] <http://dcvoltagegradient.com/page8.html>.
- [19] Ion beam assisted deposition of AlN monolithic films and Al/AlN multilayers:. Wang, X., a další. 1996, Surface and Coatings Technology, Sv. 103–104, stránky 334-339. 0257-8972.
- [20] Advanced Plasma Nitriding for Aluminum and Aluminum Alloys. Aizawa, Tatsuhiko. 12, místo neznámé : The Japan Institute of Metals, 12.. 12. 2016, Materials Transactions, Sv. 44.
- [21] ehliník. [Online] A + A Pardubice spol. s r.o. [Citace: 08.. 12 2020.] <https://www.ehlinik.cz/hlinik>.
- [22] eshop.Würth. Würth. [Online] [Citace: 20. 05. 2021.] <https://eshop.wuerth.cz/Kategorie-produktu/Loupaci-vrtak-do-plechu-HSS-TiN/31467501030301.cgid/3146.cgid/cs/CZ/CZK/?CampaignName=CS002&RecoId=box1@modelldetailpageA>.
- [23] ZHANG, P.G., K.Y.WANG, Zhuo Li, Xu CHENG. Laser nitridation on Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy. Surface and Coatings Technology. 2020.
- [24] Prachár, Patrik. Povrchová úprava chromkobaltové slitiny nitridem. Brno : Stomatologická klinika lékařské fakulty, Masarykova univerzita v Brně, 2007.
- [25] wikimépieae otevřená encyklopédia . [Online] wikimedia project, 03.. 02. 2021. [Citace: 07.. 04. 2021.] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Titan\\_\(prvek\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Titan_(prvek)).
- [26] Periodická tabulka. [Online] www.prvky.com . [Citace: 05.. 04. 2021.] <http://www.prvky.com/22.html>.
- [27] Jahnová, V., a další. Metal 2013. [Online] [Citace: 07.. 12. 2020.] [http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_04/papers/33.pdf](http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal_04/papers/33.pdf).
- [28] wikipédie otevřená encyklopedie. [Online] Wikimedia Foundation, 02.. 04. 2021. [Citace: 08.. 04. 2021.] <https://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9B%C4%8F>.
- [29] Katedra materiálů; kmt. [Online] [Citace: 10.. 04. 2021.] <http://www.kmt.tul.cz/kestaz/MED-a-jeji-slitiny.pdf>.
- [30] Alinvest. [Online] AL Invest Břidličná, a.s. [Citace: 29.. 04. 2021.] <https://www.alinvest.cz/cs/hlinik/vlastnosti-hliniku>.
- [31] wikipédie otevřená encyklopedie. [Online] wikimedia project. [Citace: 10.. 05. 2021.] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hlin%C3%ADk>.
- [32] CEJCHY.CZ. [Online] GEW, Ing. Marek Konvičný. [Citace: 11.. 05. 2021.] <https://www.cejchy.cz/mosaz-nebo-zelezo.html>.
- [33] wikipédie otevřená encyklopedi. [Online] Wikiedia Foundation. [Citace: 15.. 05. 2021.] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Mosaz>.
- [34] Alumeco. [Online] Alumeco CZ s.r.o. [Citace: 05.. 05. 2021.] <https://www.alumeco.cz/hlink/plechydesky/prodn-plechydesky/en-aw-2017a/1-x-1000-x-2000-mm/p/1026/23061>.

- [35] ehlinik.cz. [Online] [Citace: 05.. 05. 2021.] <https://www.ehlinik.cz/prilohy/zakladni-technicke-informace.pdf>.
- [36] Berka, Pavel. alunet.cz. [Online] ALUNET s.r.o. [Citace: 09.. 05. 2021.] <http://www.alunet.cz/normy-tvrdosti-hlinikovych-slitin>.
- [37] Hliníkové proal profily. [Online] NPS PROAL Ostrava. [Citace: 29.. 04. 2021.] <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-2007/>.
- [38] leichtmetall. [Online] Leichtmetall Aluminium Giesserei Hannover GmbH. [Citace: 10.. 05. 2021.] [https://www.leichtmetall.eu/site/assets/files/datenblatt/2007\\_Produktdatenblatt\\_A4-en\\_us.pdf](https://www.leichtmetall.eu/site/assets/files/datenblatt/2007_Produktdatenblatt_A4-en_us.pdf).
- [39] <http://www.vlm-labtec.com/>. [Online] VLM Korrosions-Prüftechnik, Labortechnik & Dienstleistungen GmbH. [Citace: 10.. 05. 2021.] <http://www.vlm-labtec.com/Products/Corrosion-Test-Cabinets-33548,l-en.html>.
- [40] G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. [Online] ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. [Citace: 19.. 05. 2020.] [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [41] Koudelka, Ctirad. Bludné proudy. Ostrava : Vysoká škola báňská- Technická univerzita Ostrava; Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2003.
- [42] Pitter, Jaroslav. engineering.sk. [Online] CB Media, s.r.o. [Citace: 08.. 12. 2020.] <https://www.engineering.sk/strojarstvo-extra/3442-mikrobiologicka-koroze-priciny-a-formy-napadeni>.
- [43] Mikrobiální koroze kovových materiálů v hlubinném uložení radioaktivního odpadu. J., a další. 2, 2016, Koroze a ochrana materiálu, Sv. 60, stránky 59-67.
- [44] Nitriding of Aluminum Extrusion Die: Effect of Die Geometry. S.S. Akhtar, A.F.M. Arif. 403, 19.. 03. 2010, Journal of Materials Engineering and Performance, Sv. 19.
- [45] modification of matrix for magnesia material by in situ nitridation. LIU, Xin, Dianli Xudong LUO a Yuxiang GUO. 14, místo neznámé : ceramics international, 2019, Sv. 45, stránky 17955-17961. ISSN 02928842.
- [46] ZHANG, P.G., K.Y.WANG, Jiandong LIANG. Formation of hexagonal AlN nanotowers and layered nanorods by directio nitridation of aluminium. Physica E: Low-dimensional systems and nanostructures. 2020, Sv. 43, 4, stránky 934-937.
- [47] Jinlong, Lv, Liang TONGXIANG Luo HONGYUN. Effect of grain refinement and electrochemical nitridation on corrosion resistance of the 316L stainless steel for biopolar plates in PEMFCs enviroment. Journal of pover sources. 293, 2015, stránky 692-697.
- [48] eshop.wuerth. Würth . [Online] Würth spol. s.r.o. [Citace: 20. 05. 2021.] <https://eshop.wuerth.cz/Kategorie-produktu/Stupnovity-spir.-vrtak-HSS-Multi-Performance-TiAlN/31467501031208.cyid/3146.cgid/cs/CZ/CZK/>.

## Seznam obrázků

Obr. 1: Rovnovážný diagram Fe-N [2] .....	11
Obr. 2: Závislost teploty nitridace na hloubce nitridace a vliv legujících prvků [6].....	13
Obr. 3: Ukázka nitridační vrstvy [7] .....	14
Obr. 4: Intersticiální difúze dusíku během nitridace [5] .....	15
Obr. 5: Schéma iontové nitridace [3] .....	17
Obr. 6: Rovnoměrné napadení koroze, kdy 1 - byl původní povrch, 2 - povrch po napadení [8] .....	20
Obr. 7: Důlkové porušení povrchu [8] .....	21
Obr. 8: Bodové porušení povrchu [8].....	21
Obr. 9: Štěrbínová koroze [8].....	21
Obr. 10: Mezi-krystalová koroze [11].....	21
Obr. 11: Interkrystalická koroze [13].....	22
Obr. 12: Atmosférická koroze [15] .....	24
Obr. 13: Koroze uvnitř trubky [17] .....	25
Obr. 14: Koroze v půdě [18] .....	26
Obr. 15: Binární diagram Al-N .....	27
Obr. 16: Spirálový vrták [21] .....	28
Obr. 17: Binární diagram Ti-N [23] .....	29
Obr. 18: Spirálový vrták do plechu [22] .....	30
Obr. 19: Vzorky po zalití.....	37
Obr. 20: Citopress-10 .....	38
Obr. 21: Tegamin-20.....	38
Obr. 22: Typy leptadel .....	39
Obr. 23: Struers DuraScan .....	41
Obr. 24: Tribologická zkouška.....	42
Obr. 25: Umístění vzorku na tribologickou zkoušku .....	42
Obr. 26: Mikroskop a tribologická zkouška.....	43
Obr. 27: Měď před nitridací .....	45
Obr. 28: Fotka mědi po nitridaci 50x .....	46
Obr. 29: Zobrazení nitridační vrstvy u mědi (zvětšení 50x) .....	47
Obr. 30: Měď po nitridaci a po korozi (zvětšení 50x).....	47
Obr. 31: Mosaz před nitridací .....	48
Obr. 32: Fotka mosazi po nitridaci 50x.....	49
Obr. 33: Zobrazení nitridované vrstvy pomocí konfokálního mikroskopu u mosazi (zvětšení 50x).....	50
Obr. 34: Zobrazení nitridované vrstvy pomocí konfokálního mikroskopu u mosazi po korozi (zvětšení 50x) .....	50
Obr. 35: Vzorek titanu před nitridací .....	51
Obr. 36: Nitridová vrstva titanu se zvětšením 500x .....	52
Obr. 37: Vzorek titanu po nitridaci 50x .....	52
Obr. 38: Zobrazení nitridované vrstvy pomocí konfokálního mikroskopu u titanu (zvětšení 50x) .....	53

Obr. 39: Titan po korozi na konfokálním mikroskopu (zvětšení 50x).....	53
Obr. 40: Slitina hliníku 2017 po nitridaci (zvětšení 50x).....	54
Obr. 41: Slitina hliníku 2017 po korozi (zvětšení 50x).....	55
Obr. 42: Slitina hliníku 4401-71 (zvětšení 50x).....	56
Obr. 43: Slitina hliníku 4401-71 po korozi (zvětšení 50x) .....	56
Obr. 44: Slitina hliníku 42 425 po nitridaci (zvětšení 50x).....	57
Obr. 45: Slitina hliníku 42 425 po korozi (zvětšení 50x).....	58
Obr. 46: Chemické složení titanu po nitridaci.....	58
Obr. 47: Chemické složení titanu po nitridaci bez dusíku .....	59
Obr. 48: Neželezné kovy umístěné v korozní komoře .....	59
Obr. 49: Titan v základním stavu a po nitridaci .....	59
Obr. 50: Slitiny hliníku po nitridaci .....	60
Obr. 51: Slitin hliníku v základním stavu před nitridací .....	60
Obr. 52: Neželezné kovy v korozní komoře (po 96 hodinách) .....	61
Obr. 53: Neželezné kovy v korozní komoře (15.04.2021).....	61
Obr. 54: Zaznamenané hodnoty .....	62
Obr. 55: Neželezné kovy v korozní komoře (22.04.2021).....	62
Obr. 56: Neželezné kovy v korozní komoře (06.05.2021).....	63
Obr. 57: Slitiny hliníku a titan po korozi (22.04.2021).....	64
Obr. 58: Slitiny hliníku a titan po korozi (06.05.2021).....	65
Obr. 59: Titan před nitridací.....	69
Obr. 60: Titan po nitridaci.....	69



## Seznam tabulek

Tab. 1: Fyzikální vlastnosti titanu [24] [23].....	31
Tab. 2: Fyzikální a mechanické vlastnosti mědi [26] [27].....	32
Tab. 3: Mechanické a fyzikální vlastnosti hliníku [24], [29].....	32
Tab. 4: Mechanické a fyzikální vlastnosti mědi [30], [31].....	33
Tab. 5: Chemické složení hliníkové slitiny 2017 [32].....	33
Tab. 6: Vlastnosti hliníkové slitiny 2017 [33], [34].....	34
Tab. 7: Chemické složení slitiny hliníku EW AW 6060 [33].....	34
Tab. 8: Vlastnosti hliníkové slitiny EW AW 6060 [34].....	35
Tab. 9: Chemické složení slitiny hliníku EW AW 2007 [36].....	35
Tab. 10: Vlastnosti hliníkové slitiny EW AW 2007 [34].....	36
Tab. 11: Chemické složení leptadla na titan.....	39
Tab. 12: Chemické složení leptadla na mosaz.....	40
Tab. 13: Chemické složení leptadla na měď.....	40
Tab. 14: Chemické složení leptadla pro hliník a jeho slitiny.....	40
Tab. 15: Technické specifikace korozní [37].....	41
Tab. 16: Parametry korozního testu.....	60
Tab. 17: Zhodnocení postupu koroze.....	66

## Seznam grafů

Graf 1: Hodnoty mikrotvrdosti, okraj vzorku.....	67
Graf 2: Hodnoty mikrotvrdosti střed vzorku.....	68
Graf 3: Koeficient opotřebení W.....	70