

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

**Studijní program:** B0715A270013 – Strojní inženýrství  
**Studijní specializace:** Strojírenské materiály a technologie

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Vlastnosti slitin neželezných kovů po boridování**

**Autor:** Lucie KRATOCHVÍLOVÁ  
**Vedoucí práce:** Ing. David BRICÍN, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lucie KRATOCHVÍLOVÁ**  
Osobní číslo: **S19B0793P**  
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenské materiály a technologie**  
Téma práce: **Vlastnosti slitin neželezných kovů po boridování**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

### Zásady pro vypracování

1. Způsoby boridování
2. Zpracovávané slitiny neželezných kovů
3. Vliv procesu boridování na strukturu a vlastnosti slitin neželezných kovů
4. Metalografické hodnocení vybraných slitin neželezných kovů po procesu boridování
5. Diskuse výsledků
6. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**  
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

KULKA, Michal., *Current Trends in Boriding [online]. Cham: Springer International Publishing, 2019 [cit. 2020-09-29]. Engineering Materials., ISBN 978-3-030-06781-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-06782-3*

DUAN, Yonghua, Xinyu WANG, Dan LIU, Weizong BAO, Ping LI a Mingjun PENG., *Characteristics, wear and corrosion properties of borided pure titanium by pack boriding near ? ? ? phase transition temperature. Ceramics International [online]. 2020, 46(10), 16380-16387 [cit. 2020-09-29]. ISSN 02728842. Dostupné z: doi:10.1016/j.ceramint.2020.03.*

LI, Ping, Dan LIU, Weizong BAO, Lishi MA a Yonghua DUAN., *Surface characterization and diffusion model of pack borided TB2 titanium alloy. Ceramics International [online]. 2018, 46(10), 16380-16387 [cit. 2020-09-29]. ISSN 02728842. Dostupné z: doi:10.1016/j.ceramint.2018.07.*

SALAMAKHA, Leonid P., Oksana SOLOGUB, Berthold STÖGER, Herwig MICHOR, Ernst BAUER a Peter F. ROGL., *(Pt1-Cu )3Cu2B and Pt9Cu3B5, the first examples of copper platinum borides. Observation of superconductivity in a novel boron filled ?-Mn-type compound. Journal of Solid State Chemistry [online]. 2015, 229, 303-309 [cit. 2020-09-29]. ISSN 00224596*

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Bricín**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Vojtěch Průcha**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

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



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



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

V Plzni dne 30. října 2019

## Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: 25.5.2021

  
.....

podpis autora

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Kratochvílová	<b>Jméno</b> Lucie	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	B0715A270013 Strojní inženýrství		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Bricín, Ph.D.	<b>Jméno</b> David	
<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>	Vlastnosti slitin neželezných kovů po boridování		

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

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	56	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	56	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Tato bakalářská práce se zabývá vlastnostmi slitin neželezných kovů po boridování. Seznámením s metodami boridování, které lze použít na neželezné kovy a jejich slitiny. Vliv vzniklé boridové vrstvy na strukturu a vlastnosti slitin neželezných kovů. V experimentální části je zpracována metalografie slitiny hliníku 1050, mědi, titanu a mosazi. Následně je zjištěn vliv boridové vrstvy na korozivzdornost, tribologické vlastnosti, kohezi a adhezi u vzorku titanu.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Boridování, metody boridování, boridování neželezných kovů a jejich slitin, titan, měď, mosaz, hliník, tvrdost, Mercedes test, Pin on disk test

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Kratochvílová	<b>Name</b> Lucie	
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715A270013 Mechanical Engineering		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Bricín	<b>Name</b> David	
<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>	Properties of non-ferrous metal alloys after boriding process		

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

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

<b>TOTALLY</b>	56	<b>TEXT PART</b>	56	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b> <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This bachelor thesis deals with the properties of non-ferrous metal alloys after boriding. Introduction to boriding methods that can be used on non-ferrous metals and their alloys. Influence of the formed boride layer on the structure and properties of non-ferrous metal alloys. The experimental part deals with metallography of aluminum alloy 1050, copper, titanium and brass. Subsequently, the effect of the boride layer on the corrosion resistance, tribological properties, cohesion and adhesion of the titanium sample is determined.
<b>KEY WORDS</b>	Boriding, boriding methods, boriding of non-ferrous metals and their alloys, titanium, copper, brass, aluminium, hardness, Mercedes test, Pin on disk test.

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěla poděkovat za pomoc s vypracováním této bakalářské práce panu Ing. Davidu Bricínovi, Ph.D., za jeho rady a trpělivost, hlavně tedy při řešení experimentální části této práce.

Dále bych chtěla poděkovat všem svým přátelům a rodině za podporu nejen během psaní této bakalářské práce, ale i během celého studia.

## Obsah

Poděkování.....	7
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků .....	13
Seznam tabulek .....	14
Úvod .....	15
1 Úvod do boridování .....	16
1.1. Bor .....	16
1.1.1. Historie.....	16
1.1.2. Využití.....	16
1.2. Boridy.....	16
2 Metody boridování.....	17
2.1. Boridování v zásypu prášku .....	17
2.2. Boridování pomocí suspenze.....	18
2.3. Boridování pomocí elektrochemické metody [12] .....	18
2.4. Boridování s použitím fluidního lože .....	19
2.5. Boridování v plynech.....	20
3 Boridování neželezných kovů a jejich slitin .....	22
3.1. Nikl a jeho slitiny.....	22
3.1.1. Boridování v zásypu prášku .....	22
3.1.2. Boridování pomocí suspenze.....	23
3.1.3. Boridování pomocí elektrochemické metody .....	23
3.1.4. Boridování s použitím fluidního lože .....	23
3.1.5. Boridování v plynech.....	23
3.2. Titan a jeho slitiny .....	24
3.2.1. Boridování v zásypu prášku .....	25
3.2.2. Boridování pomocí elektrochemické metody [12] .....	28
3.2.3. Boridování pomocí fluidního lože.....	28
3.3. Kobalt a jeho slitiny.....	28
3.3.1. Boridování v zásypu prášku [3].....	28
3.4. Molybden .....	30
3.4.1. Boridování pomocí elektrochemické metody .....	30
4 Cíl experimentální části .....	32
5 Boridované vzorky.....	33



6	Metalografie .....	34
6. 1.	Příprava metalografického výbrusu .....	34
6. 1. 1.	Odběr vzorku .....	34
6. 1. 2.	Zalévání vzorku .....	34
6. 1. 3.	Broušení vzorku [35] .....	35
6. 1. 4.	Leštění vzorku .....	35
6. 1. 5.	Leptání vzorku [35] .....	36
6. 2.	Metalografie boridovaných vzorků .....	36
6. 3.	Chemická analýza vzorků .....	38
7	Tvrdomost .....	39
7. 1.	Zkoušky tvrdosti [36] .....	39
7. 1. 1.	Vnikací zkoušky tvrdosti .....	39
7. 2.	Zkouška mikrotvrdomosti dle Vickerse .....	39
7. 3.	Vyhodnocení mikrotvrdomosti boridovaných vzorků .....	40
7. 3. 1.	Slitina hliníku 1050 .....	41
7. 3. 2.	Měď .....	42
7. 3. 3.	Titan .....	44
7. 3. 4.	Mosaz CuZnMnAl .....	45
8	Pin on disk test .....	46
8. 1.	Pin tělíčko [41] .....	46
8. 1. 1.	Materiál Pin tělíčka .....	46
8. 1. 2.	Průměr tribologické stopy .....	46
8. 2.	Drsnost kontaktních ploch [41] .....	47
8. 3.	Vyhodnocení Pin on Disk testu .....	47
8. 3. 1.	Popis a výsledky testu .....	47
9	Mercedes test .....	48
9. 1.	Vyhodnocení Mercedes testu boridovaných vzorků .....	48
10	Korozivzdornost .....	50
11	Diskuse výsledků .....	52
12	Závěr .....	53
	Seznam použitých zdrojů .....	54

## Přehled použitých zkratk a symbolů

ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní norma ISO
FST	Fakulta strojní
KMM	Katedra materiálů a strojírenské metalurgie
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	Borax
$\text{B}_4\text{C}$	Karbid tetraboru
Ni	Nikl
B	Bor
$\text{KBF}_4$	Tetrafluoroboritan draselý
$\text{NaCl}$	Chlorid sodný
$\text{SiC}$	Karbid křemíku
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	Uhličitan sodný
$\text{K}_2\text{CO}_3$	Uhličitan draselný
KF	Fluorid draselný
LiF	Fluorid lithný
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Oxid hlinitý
$\text{BCl}_3$	Chlorid boritý
$\text{N}_2$	Dusík
$\text{H}_2$	Vodík
NiB	Borid niklu
$\text{Ni}_5\text{Si}$	Silicid pentaniklu
CrB	Borid chromu
$\text{Cr}_2\text{B}$	Borid dichromu
FeB	Borid železa
$\text{Fe}_2\text{B}$	Borid diželeza
$\text{Ni}_3\text{B}$	Borid triniklu
$\text{Ni}_2\text{B}$	Borid diniklu
$\text{Ni}_4\text{B}_3$	Triborid tetraniklu
$\text{FeCl}_2$	Chlorid železnatý
$\text{FeCl}_3$	Chlorid železitý
Ti-6Al-4V	Slitina titanu

Ti-45Nb	Slitina titanu
TiB <sub>2</sub>	Diborid titanu
TiB	Borid titanu
Ti	Titan
Cp-Ti	Čistý titan
AlB <sub>2</sub>	Diborid hlinitý
VB <sub>2</sub>	Diborid vanadu
B <sub>4</sub> C	Karbid tetraboru
Co <sub>3</sub> B	Borid trikobaltu
Co <sub>4</sub> B	Borid tetrakobaltu
Cr	Chrom
Co	Kobalt
Mo	Molybden
Si	Křemík
C	Uhlík
CoB	Borid kobaltu
Co <sub>2</sub> B	Borid dikobaltu
Mo <sub>2</sub> B	Borid dimolybdenu
KBF <sub>4</sub>	Tetrafluoroboritan draselný
Mo <sub>4</sub> B <sub>4.027</sub>	Borid molybdenu (4,027:2)
Mo <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	Pentaborid dimolybdenu
Cu	Měď
Zn	Zinek
Mn	Mangan
Al	Hliník
mm	Milimetry
mm <sup>3</sup> /Nm	Milimetry krychlové na Newtonmetry
N	Newton
kN	Kilo Newton
K	Stupně Kelvina
°C	Stupně Celsia
GPa	Gigapascal
HV <sub>0,025</sub>	Tvrдость dle Vickerse s přesností 0,025
HV	Tvrдость dle Vickerce

HK	Tvrдость dle Knoopa
Kg/mm <sup>2</sup>	Kilogram na milimetr čtvereční
MPam <sup>1/2</sup>	Megapascal metr na 1/2
μm	Mikrometry
m <sup>3</sup> /h	Metry krychlové za hodinu
mA/cm <sup>2</sup>	Miliampér na centimetr čtvereční
Hod	Hodina
OM	Optický mikroskop
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – OM Mikrostruktura slitin niklu Inconel 600 a Nimonic 80A po boridování v plynech. Leptání mramorovým činidlem. [17] .....	24
Obrázek 2 – SEM mikrografy boridové vrstvy vzniklé na Cp – Ti v závislosti na teplotě a času. [11] .....	26
Obrázek 3 – Průřezové mikrografy SEM boridových vrstev vytvořených na slitinách Cp - Ti, Ti6Al4V a Ti-45Nb při různých teplotách po dobu 24 hodin. [21] .....	27
Obrázek 4 – SEM snímky (a) Ti-6Al-4V a (b) Ti-45Nb, při boridování po dobu 24 hodin při teplotě 1100°C. [21] .....	27
Obrázek 5 – Mikrostruktura vzniklé boridové vrstvy na slitině Co – Cr - Mo – C, po boridování na teplotě 1248 K (974,85 °C); A – 6 hodin, B – 8 hodin, C – 10 hodin. [3].....	29
Obrázek 6 – Mikrostruktura vzniklé boridové vrstvy na slitině Co – Cr - Mo – C, po boridování na teplotě 1323 K (1049,85 °C); A – 6 hodin, B – 8 hodin, C – 10 hodin. [3].....	29
Obrázek 7 - Morfologie boridové vrstvy po elektrochemickém boridování (1000 °C, 2 hod, 500 mA/cm <sup>2</sup> ) [25] .....	31
Obrázek 8 - Vzorek B (vlevo) a D (vpravo) .....	33
Obrázek 9 - Příprava metalografického výbrusu [35] .....	34
Obrázek 10 - Vzorek A – slitina hliníku 1050, boridováno při 500 °C po dobu 4 hod .....	37
Obrázek 11 - Vzorek B - měď, Vzorek C - měď (vlevo) - boridováno při 900 °C po dobu 6 hod (vpravo).....	37
Obrázek 12 - Vzorek E – titan (vlevo), Vzorek F – mosaz CuZnMnAl (vpravo - boridováno při 900 °C po dobu 6 hod (vpravo).....	37
Obrázek 13 - Chemická analýza před boridováním vzorek B - měď.....	38
Obrázek 14 - Chemická analýza po boridování vzorek B - měď.....	38
Obrázek 15 - Rozdíl mezi indentory pro makrotvrdost a mikrotvrdost [38] .....	40
Obrázek 16 - Rozdělení do adhezních tříd [42] .....	48
Obrázek 17 – Hodnocení porušení okolí vtisku Rockewellovým indentorem při zatížení 1500 N [39].....	48
Obrázek 18 – SEM snímek místa vpichu .....	49
Obrázek 19 - Vzorek E - titan, 1. týden v korozní komoře, počáteční stav (vlevo), boridováno (vpravo).....	50
Obrázek 20 - Vzorek E - titan, 2. a 3. týden v korozní komoře, boridováno.....	50
Obrázek 21 - Vzorek E – titan, 4. týden v korozní komoře, počáteční stav .....	51
Obrázek 22 – Vzorek E - titan, 1.-3. týden v korozní komoře, naleptáno .....	51

## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Parametry pro boridování v zásypu prášku [12].....	17
Tabulka 2 – Parametry pro elektrochemické boridování [12] .....	19
Tabulka 3 – Parametry pro boridování s použitím fluidního lože [15] .....	20
Tabulka 4 – Parametry pro boridování v plynech [12].....	21
Tabulka 5 – Charakteristika povrchové vrstvy Ti a Ti6Al4V po boridování pomocí různých metod. [20].....	25
Tabulka 6 – Závislost teploty a času boridování na tloušťku TiB <sub>2</sub> a TiB whiskerů. [11].....	26
Tabulka 7 – Požadavky na chemické složení slitiny kobaltu ASTM F - 75 [3] [23].....	29
Tabulka 8 - Zkoušky tvrdosti [36].....	39
Tabulka 9 - Rozdělení zkoušek dle Vickerse [38] .....	40
Tabulka 10 - Mikrotvrdost vzorek A ( slitina hliníku 1050) .....	41
Tabulka 11 - Mikrotvrdost vzorek B (měď) .....	42
Tabulka 12 - Mikrotvrdost vzorek D (měď) .....	43
Tabulka 13 - Mikrotvrdost vzorek E (titan).....	44
Tabulka 14 - Mikrotvrdost vzorek F (mosaz CuZnMnAl) .....	45
Tabulka 15 - Pin on disk test – výsledky .....	47

## Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na vlastnosti slitin neželezných kovů po boridování. Boridování je tepelné zpracování materiálu pro zlepšení povrchových vlastností, jako je tvrdost nebo odolnost proti opotřebení. Tento způsob povrchové úpravy se nejvíce používá u železných materiálů s výjimkou ocelí legovaných hliníkem či křemíkem. Ale lze ho použít i na neželezné kovy a jejich slitiny, jako je například nikl a titan.

Teoretická část této práce je rozdělena do dvou částí. První část je zaměřena na popis nepoužívanějších metod boridování neželezných kovů jako je například boridování v zásypu prášku, boridování pomocí elektrochemické metody, nebo boridování v plynech. A seznámení s parametry pro jednotlivé metody, které ovlivňují výslednou boridovou vrstvu. Druhá část se pak zabývá boridování neželezných kovů, jejich slitin a vlastnostmi vzniklé boridové vrstvy.

Experimentální část této práce se zabývá vlivem boridování metodou v zásypu prášku na vlastnosti neželezných kovů a jejich slitin jako jsou hliník, měď a titan. Pro zjištění tohoto vlivu je proveden metalografický výbrus, chemická analýza a test na mikrotvrdost. Vliv boridové vrstvy na korozi, kohezi a adhezi je následně zkoumán na vzorku titanu, a to pomocí Pin on disk testu, Mercedes testu a metalografie.

# 1 Úvod do boridování

Boridování nebo také jinak bórování je metoda tepelného zpracování povrchu materiálu, která je založena na termochemickém obohacování povrchu borem. Při boridování dochází k difúzi atomů boru do krystalové mřížky základního kovu. Tím dochází ke vzniku jednofázové nebo dvoufázové vrstvy boridu kovu na povrchu materiálu. [1] [2] Tato vzniklá vrstva ovlivňuje povrchové vlastnosti materiálu jako korozivzdornost, odolnost proti opotřebení a tvrdost. [2] [3]

Výsledná tloušťka boridové vrstvy a její mikrostruktura je závislá na teplotě, době zpracování, metodě boridování a na dalších parametrech, jenž se pro různé metody liší. Boridování lze použít na železné, neželezné i kovokeramické materiály. [1] [2]

## 1.1. Bor

Jedná se o nekovový prvek, který se vyskytuje v několika alotropických modifikacích. [4] [5] V krystalické formě, se jedná o černošedou a velmi tvrdou látku. V amorfni formě, se jedná o hnědou, práškovitou látku. Jako chemický prvek se vyznačuje vysokou chemickou odolností.

V přírodě se samostatně bor nevyskytuje, většinou se jedná o součást minerálu jako například borax ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) nebo kernit. [6]

### 1.1.1. Historie

Chemický prvek bor byl poprvé izolován v roce 1808 zahříváním oxidu boritého s draslíkem. Jeho objev si připisují francouzští chemici Joseph Louis Gay-Lussac a Louis-Jacques Thenard. Nezávisle na nich pak také britský chemik Sir Humphry Davy. [7] V obou případech se ale nejednalo o úplně čistý bor, ten se podařilo izolovat až o sto let později v USA Ezekelem Weintraubem. [8] [9]

### 1.1.2. Využití

Bor se přidává do ocelí z důvodu zvýšení jejich tvrdosti. Většinou se vyskytuje v rozmezí 0,001 – 0,005 % jako borid železa. Dále se bor používá u neželezných kovů k dezoxidaci neboli ke snížení objemu kyslíku v materiálu. [7]

Amorfni bor se přidává do raketového paliva, kde slouží jako roznětka, nebo v pyrotechnice.

Sloučeniny boru jako například kyselina boritá, boritan sodný a oxid boritý mají využití v lékařství, lze je najít v očních kapkách nebo v antiseptikách. [9] Dalšími využívanými sloučeninami boru jsou boridy.

## 1.2. Boridy

Jedná se o skupinu více než dvou set sloučenin kovu a boru, které jsou velmi tvrdé, chemicky netečné, netěkavé a žáruvzdorné. [10]



## 2 Metody boridování

V současnosti existuje několik metod boridování jako například boridování v zásypu prášku, pomocí suspenze, pomocí elektrochemické metody a boridování v plynech. Každá z těchto metod má svoje výhody a nevýhody, a lze ji použít na různé kovy a jejich slitiny. [11]

### 2.1. Boridování v zásypu prášku

Jedná se o jednu z nejpoužívanějších metod boridování v pevném mediu již od roku 1960 a to především kvůli její ceně a jednoduchosti. [11]

Při boridování v zásypu prášku spočívá postup v tom, že se očištěný obrobek vloží do válcového kontejneru, který je naplněn práškovou směsí. Samotný kontejner je vyroben z nerezové oceli odolné proti teplu. Následně je celá nádoba vložena do elektrické odporové pece a zahřívána na teplotu boridování. [12] Boridovací teplota je udržována po určitou dobu a následně je vše ochlazen na vzduchu. [13]

Teplota a čas boridování ovlivňují výslednou tloušťku vzniklé boridové vrstvy na obrobku. Její tloušťka závisí na jednotlivých materiálech a zvolené práškové směsi viz *Tabulka 1*. Celý proces se provádí ve vakuu nebo v ochranné atmosféře vodíku popřípadě argonu, protože by za zvýšené teploty došlo k reakci boru s dusíkem nebo kyslíkem. [12]

Druh materiálu	Prášková směs	Teplota [°C]	Čas [hod]
Titan a jeho slitiny	EKABOR II	1100	2,5
	B	800 - 1100	1 - 24
Nikl a jeho slitiny	EKABOR Ni	800 - 900	2
	B <sub>4</sub> C	950	4
Kobalt a jeho slitiny	EKABOR III	900 - 1000	1 - 6
	DURBORID	950 - 1000	6 - 10

Tabulka 1 – Parametry pro boridování v zásypu prášku [12]

Prášková směs je složena ze tří složek. Zdroje boru, aktivátoru a ředidla.

Zpočátku se jako zdroj boru v práškové směsi používal amorfní bor, borid železa, karbid boru nebo jejich různé kombinace.

Ačkoliv má použití samostatného amorfního boru výhodu v tom, že se prášková směs může použít opakovaně po jejím odplynění pomocí žhání, jeho nevýhodou je vysoká cena, a proto se běžně nepoužívá. Naopak při použití samostatného boridu železa nedochází ke vzniku kvalitní boridové vrstvy na povrchu materiálu a dochází k prodloužení doby boridování.

V posledních letech se proto začaly využívat různé směsi jako například EKABOR nebo DUBORID. Tyto směsi jsou založeny na karbidu boru a jsou dobře zpracovatelné. Při jejich použití dochází ke vzniku kvalitní boridové vrstvy a použití prášku je opakovatelné. [12] Používají se nejen při boridování ocelí, ale jsou vhodné i na neželezné kovy jako je titan nebo nikl a jejich slitiny. [14]

Aktivátor se při boridování v zásypu prášku používá z důvodu zrychlení dodávání atomů boru do povrchu materiálu. V současnosti se používá KBF<sub>4</sub> nebo NaCl. Jako ředidlo karbid křemíku (SiC). [12]

## 2. 2. Boridování pomocí suspenze

Boridování pomocí suspenze je metoda, která se využívá již od roku 1959 a to převážně pro boridování ocelí. Tato metoda má oproti boridování v zásypu prášku výhodu v tom, že lze boridovat konkrétní místo na povrchu obrobku.

Ze začátku metoda spočívala v nanesení dvou vrstev suspenze na povrch materiálu. První vrstva byla složena ze zdroje boru, kryolitu a aktivátoru. Jako zdroj boru byl využíván karbid boru nebo směs karbidu boru, amorfního boru a boridu železa. Druhá vrstva se pak používala k ochraně proti oxidaci.

Samotný postup je velmi podobný jako při boridování v zásypu prášku. Spočívá v nanesení suspenze na očištěný obrobek a jeho následné zahřátí v peci na boridovací teplotu, ve vakuu nebo v ochranné atmosféře argonu.

V současnosti se metoda používá především pro boridování ocelí, ale dá se touto metodou boridovat i nikl a jeho slitiny. Při boridování niklu se jako suspenze používá speciální samo-ochranná boridovací suspenze. [12]

## 2. 3. Boridování pomocí elektrochemické metody [12]

Elektrochemické boridování nebo také jinak řečeno elektrolytické boridování využívá k vytvoření boridové vrstvy elektrolyzu. Oproti ostatním metodám se vyznačuje kratší dobou boridování a nižšími teplotami.

Základem je zdroj stejnosměrného elektrického proudu, kelímek naplněný roztavenou solnou lázní nebo roztaveným boraxem ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), obrobek připravený k boridování a topné zařízení s možností regulace teploty.

V případě realizace elektrochemického boridování v roztavené solné lázni, tato lázeň neobsahuje bor, ten je do ní přidáván pomocí redukčního činidla. V případě roztaveného boraxu se zase přidávají uhličitany a chloridy, které snižují viskozitu, upravují vodivost elektrolytu a zrychlují difúzi boru do povrchu materiálu. Dříve se používal chlorid sodný, ale docházelo ke korozi konektorů elektrod, proto se v současnosti používá uhličitán draselný nebo uhličitán sodný.

Nejčastěji se elektrochemické boridování provádí mezi teplotami od 700 – 1000 °C, se zvyšující se teplotou dochází ke snížení času boridování. Oproti předchozím metodám, je mimo teploty a času boridování také důležitá hustota elektrického proudu, která se pohybuje mezi 5 – 1120 mA/cm<sup>2</sup>. Zvolené parametry jsou ovlivněny druhem materiálu, viz *Tabulka 2*.

Celý proces se odehrává ve dvou krocích. V prvním kroku dochází k redukci boru na katodě. Poté dojde k vypnutí elektrického proudu a následuje homogenizace boridové vrstvy.

V současnosti se k ohřevu používá elektrická odporová pec nebo vysokofrekvenční indukční ohřev. Kelímek vyrobený z grafitu nebo karbidu křemíku s roztavenou lázní je napevno uložen v hliníkové nádobě. Celý proces může být prováděn v ochranné atmosféře.

Druh materiálu	druh lázně / ochranná atmosféra	Teplota [°C]	Čas [hod]	Hustota elektrického proudu [mA/cm <sup>2</sup> ]
Čistý titan	90 % Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> + 10 % Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / nepřítomnost	900 - 1100	0,0833 - 2	200 - 300
	85 % Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> + 15 % Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / nepřítomnost	900 - 1200	0,0167 - 4	50 - 700
	80 % Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> + 20 % K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / nepřítomnost	950	8	200
Slitiny niklu	90 % Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> + 10 % Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / dusík	950	0,0833 - 0,25	200
Čistý molybden	KF + LiF směs + 10 % KBF <sub>4</sub> / argon	830	1 - 5	5,5 - 30
	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> / dusík	900 - 1000	0,5 - 3	500

Tabulka 2 – Parametry pro elektrochemické boridování [12]

## 2. 4. Boridování s použitím fluidního lože

Tato metoda se používá již více jak 25 let k vytvoření tvrdých a korozivzdorných rovnoměrných vrstev jako jsou například nitridy, karbidy, boridy apod. Výsledná boridová vrstva je velmi podobná té, která vzniká při boridování v zásypu prášku. Vyznačuje se vysokou kvalitou jak pro kovové, tak nekovové materiály. Metoda je jednoduchá, flexibilní a cenově přívětivá. [15]

Zařízení pro boridování s použitím fluidního lože se skládá z reaktorové jednotky s fluidním ložem, elektrické odporové pece pro ohřev reaktoru, systému pro přívod fluidizačního plynu, jednotky zajišťující reaktanty, ovládacího panelu a měřicího přístroje. [12]

Obrobek je zasypán do směsi termoprášků obsahující zdroj boru, kterým je nejčastěji karbid boru. Z této směsi se bor dostává do povrchu materiálu. Lože částic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se díky vibracím a přívodu fluidizačního plynu chová jako tekutina a začne vířit. Celý proces se vyjadřuje vysokou rychlostí přesunu hmoty a tepla, což má za následek zvýšení kvality boridové vrstvy. [12] [16]

Parametry, které ovlivňují výslednou boridovou vrstvu vidíme v *Tabulka 3*. Kromě teploty boridování, která se pohybuje mezi 900 – 1000 °C a času boridování, je to i fluidizační plyn a jeho průtok. Nejčastěji se volí argon s průtokem 1,4 m<sup>3</sup>/h. [15]

Druh materiálu	Složení lože	Fluidizační plyn	Teplota [°C]	Čas [hod]
Titan a jeho slitiny	B <sub>4</sub> C + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + pevné sloučeniny obsahující halogen	argon	900-1000	1-6
	B <sub>4</sub> C + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + fluorid nebo chlorid sodný nebo draselný	argon	950	1,5 - 6
Nikl a jeho slitiny	B <sub>4</sub> C + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + pevné sloučeniny obsahující halogen	argon	950	5
	B <sub>4</sub> C + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + fluorid nebo chlorid sodný nebo draselný	argon	950 - 975	1,5 - 5
Čistý kobalt	B <sub>4</sub> C + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + pevné sloučeniny obsahující halogen	argon	950	3
	B <sub>4</sub> C + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + fluorid nebo chlorid sodný nebo draselný	argon	950	3
Čistý chrom	B <sub>4</sub> C + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + fluorid nebo chlorid sodný nebo draselný	argon	950	3
Čistý molybden	B <sub>4</sub> C + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + fluorid nebo chlorid sodný nebo draselný	argon	950	5

Tabulka 3 – Parametry pro boridování s použitím fluidního lože [15]

## 2. 5. Boridování v plynech

Mezi hlavní výhodu boridování v plynech patří konstantní chemické složení boridační atmosféry a nevyčerpatelnost borového zdroje, který na rozdíl od jiných metod může být stále doplňován. Tyto výhody mají za následek vznik rovnoměrné boridové vrstvy na povrchu boridovaného materiálu.

Jako zdroj boru pro vznik boridové vrstvy se více jak dvacet let používá chlorid borný (BCl<sub>3</sub>). Jedná se o bezbarvý toxický plyn, který se vyznačuje ostrým zápachem vysokou reaktivitou a tepelnou stabilitou. [12]

Zařízení pro boridování v plynech se skládá z topného systému s rotorem. Rotor je nejčastěji vyroben z křemene, nerezové oceli nebo ze slitin niklu. Systému pro přívod nosného plynu a systému pro regulaci a kontrolu teploty. [12] [2]

Očištěný obrobek se vloží do tepelné komory nebo do válcového rotoru elektrické odporové pece. Tato pec může být vybavena ventilátorem, který pomáhá udržet konstantní tok boridační atmosféry a její chemické složení. Před začátkem boridování může být z pece odsán veškerý vzduch pomocí vakuové pumpy. Následně dochází ke zvýšení teploty. Po dosažení boridovací teploty je zahájeno boridování plynem. Celý proces se provádí v ochranné atmosféře argonu nebo dusíku, která zabraňuje oxidaci. Po skončení procesu je obrobek ochlazen na pokojovou teplotu pod ochranným plynem argonu nebo dusíku. [12]

Při boridování v plynech se využívá různé složení boridovacího plynu viz *Tabulka 4*. Tento plyn se skládá z nosného plynu a z chloridu boritého (BCl<sub>3</sub>). Jako nosný plyn se používá vodík, nebo směs argonu a vodíku, nebo směs dusíku a vodíku. [12] [17]

Boridovací teplota se pohybuje mezi 550 – 1000 °C, boridovací čas mezi 1 – 6 hodinami. Oba tyto parametry jsou velmi podobné jako například u boridování s použitím fluidního lože, nebo boridování v zásypu prášku. Stejně jako v předchozích metodách jsou závislé na druhu materiálu, a navíc na použité atmosféře. [12] Další parametr, který u boridování v plynech nelze opomenout je množství chloridu borného. Pokud je ho dodáváno moc, vzniklá boridová vrstva obsahuje póry, naopak pokud je ho málo, dochází k pomalému nasycení povrchu a výsledná boridová vrstva je tenká. [2]

Druh materiálu	Složení plynu	BCl <sub>3</sub> [%]	Teplota [°C]	Čas [hod]
95,5 % Nikl (Nisil)	75% N <sub>2</sub> + 25% H <sub>2</sub> + BCl <sub>3</sub>	2,3	910	2 (z toho 1 hodina žíhání)
Inconel 600	75% N <sub>2</sub> + 25% H <sub>2</sub> + BCl <sub>3</sub>	1,34	920	2 (z toho 1 hodina žíhání)
Nimonic 80A a Inconel 600	75% N <sub>2</sub> + 25% H <sub>2</sub> + BCl <sub>3</sub>	1,36	920	2
Nimonic 80A	75% N <sub>2</sub> + 25% H <sub>2</sub> + BCl <sub>3</sub>	1,36	920	2

**Tabulka 4 – Parametry pro boridování v plynech [12]**

### 3 Boridování neželezných kovů a jejich slitin

Ačkoliv se boridování provádí nejvíce u železných materiálů s výjimkou ocelí legovaných hliníkem či křemíkem, lze ho použít i na zlepšení povrchových vlastností neželezných materiálů a jejich slitin. Tato povrchová úprava má za úkol zlepšit povrchové vlastnosti a rozšířit tak oblasti použití neželezných materiálů. Mezi nejčastěji boridované neželezné kovy patří nikl a titan, ale lze boridovat i kobalt, molybden a další.

Jednotlivé metody a jejich parametry ovlivňují nejvíce tloušťku vzniklé boridové vrstvy. Vzniklá boridová vrstva zlepšuje odolnost proti opotřebení a tvrdost. Pro boridování těchto materiálů se nejčastěji se používá metoda v zásypu prášku, převážně kvůli nízkým nákladům. [11] [13] [17]

#### 3. 1. Nikl a jeho slitiny

Slitiny niklu se vyznačují vysokou odolností vůči korozi a oxidaci. A proto se používají v prostředí, které těmto vlastnostem vyhovuje. Jako například pro konstrukci nádrží v chemickém průmyslu, nebo pro výrobu turbín. Jejich nevýhodou je ovšem nízká tvrdost a odolnost proti opotřebení. Proto bylo v posledních letech zkoumáno mnoho metod, které měly tyto vlastnosti zlepšit. [18] [17]

Boridování niklu a jeho slitin, lze provádět různými způsoby, ale mezi nejefektivnější metodu se řadí boridování v plynech. Vlastnosti a tloušťka vzniklé boridové vrstvy jsou ovlivněny volbou metody a jejích parametrů. Tloušťka je dále pak ovlivněna chemickým složením dané slitiny. Slitiny niklu mají menší tloušťku boridové vrstvy oproti čistému niklu a to z důvodu obsahu chromu, který brání difúzi boru. [2] [17]

Při boridování niklu a jeho slitin dochází ke vzniku boridů niklu, popřípadě boridů chromu na povrchu materiálu, což má za následek zvýšení tvrdosti a odolnosti proti opotřebení. Zároveň nedochází ke ztrátě odolnosti vůči korozi. [18]

##### 3. 1. 1. Boridování v zásypu prášku

Při boridování niklu a jeho slitin touto metodou je velmi důležitá volba směsi prášku. Pokud zvolíme prášek, který obsahuje karbid křemíku (SiC) dochází nejen ke vzniku boridové vrstvy, ale také ke vzniku vrstvy silicidů na povrchu boridovaného materiálu. Silicidová vrstva se vyjadřuje nízkou tvrdostí, pórovitostí a její tvrdost je od 750 – 980 HV. [18]

Celková tloušťka vzniklé difúzní vrstvy po boridování touto metodou, dosahuje u slitin niklu tloušťky 281  $\mu\text{m}$ , z toho je pouze 10  $\mu\text{m}$  tvořeno boridy niklu (NiB), zbytek je tvořen silicidy (Ni<sub>5</sub>Si). Proto se používají speciální práškové směsi pro boridování niklu a jeho slitin jako například EKABOR-Ni. [2] [18]

V případě boridování čistého niklu s použitím práškové směsi bez karbidu křemíku dochází ke vzniku boridové vrstvy (Ni<sub>2</sub>B) maximální tloušťky 100  $\mu\text{m}$  a tvrdosti 1300 HK. Tato vrstva se vyznačuje zvýšenou odolností proti opotřebení v porovnání se základním materiálem.

Při boridování slitiny niklu Incoloy 825, po dobu šesti hodin při teplotě 950 °C touto metodou dochází ke vzniku vícesložkové difúzní vrstvy, která se skládá z boridů niklu, chromu a železa (NiB, Ni<sub>2</sub>B, CrB, Cr<sub>2</sub>B, FeB, Fe<sub>2</sub>B). Její tloušťka dosahuje maximálně 170  $\mu\text{m}$  a tvrdost mezi 600 – 2200 HV. [2]

### 3. 1. 2. Boridování pomocí suspenze

Při boridování niklu a jeho slitin pomocí suspenze se musí stejně jako při boridování v zásypu prášku brát ohled na její složení, které by nemělo obsahovat karbid křemíku (SiC), tedy měla by být zvolena suspenze vytvořená přímo pro boridování niklu a jeho slitin. [18] Nebo je za potřebí současně silikonizovat povrch boridovaného materiálu. [15]

U čistého niklu dochází ke vzniku jednotné boridové vrstvy ( $\text{Ni}_2\text{B}$ ), která má za následek zvýšení tvrdosti až na 1100 HV. Pro srovnání čistý nikl před boridováním má tvrdost 100 HV. A zároveň dochází i ke zvýšení jeho korozivzdornosti.

V případě slitiny niklu Nimonic 90 vzniká vícesložková difúzní vrstva, což má za následek malé snížení korozivzdornosti. Dochází ovšem k zvýšení tvrdosti boridované slitiny ze 400 HV na 2500 HV. [2]

### 3. 1. 3. Boridování pomocí elektrochemické metody

Slitina niklu Inconel 600 může být boridována touto metodou za vzniku boridové vrstvy skládající se převážně z  $\text{Ni}_3\text{B}$ ,  $\text{Ni}_2\text{B}$ , a dále pak z  $\text{Ni}_4\text{B}_3$  a  $\text{NiB}$ . Její tloušťka dosahuje přibližně 80  $\mu\text{m}$ . Po elektrochemickém boridování dochází k zvýšení ochrany proti opotřebení a k zvýšení tvrdosti vzniklé povrchové vrstvy. Výsledná tvrdost je v rozmezí 1600 – 2100 HV. [12] [2]

### 3. 1. 4. Boridování s použitím fluidního lože

Při boridování niklu a jeho slitin touto metodou dochází ke vzniku velmi tenké povrchové vrstvy boridů, a to i za předpokladu, že není použit termoprášek obsahující karbid křemíku (SiC). Výsledná tloušťka takové vrstvy je pouze 35  $\mu\text{m}$  a její tvrdost 870 HV. Tato vrstva se skládá z  $\text{Ni}_3\text{B}$ . V případě ochrany proti opotřebení ovšem dochází o 50 % zvýšení oproti základnímu materiálu. [2] [18]

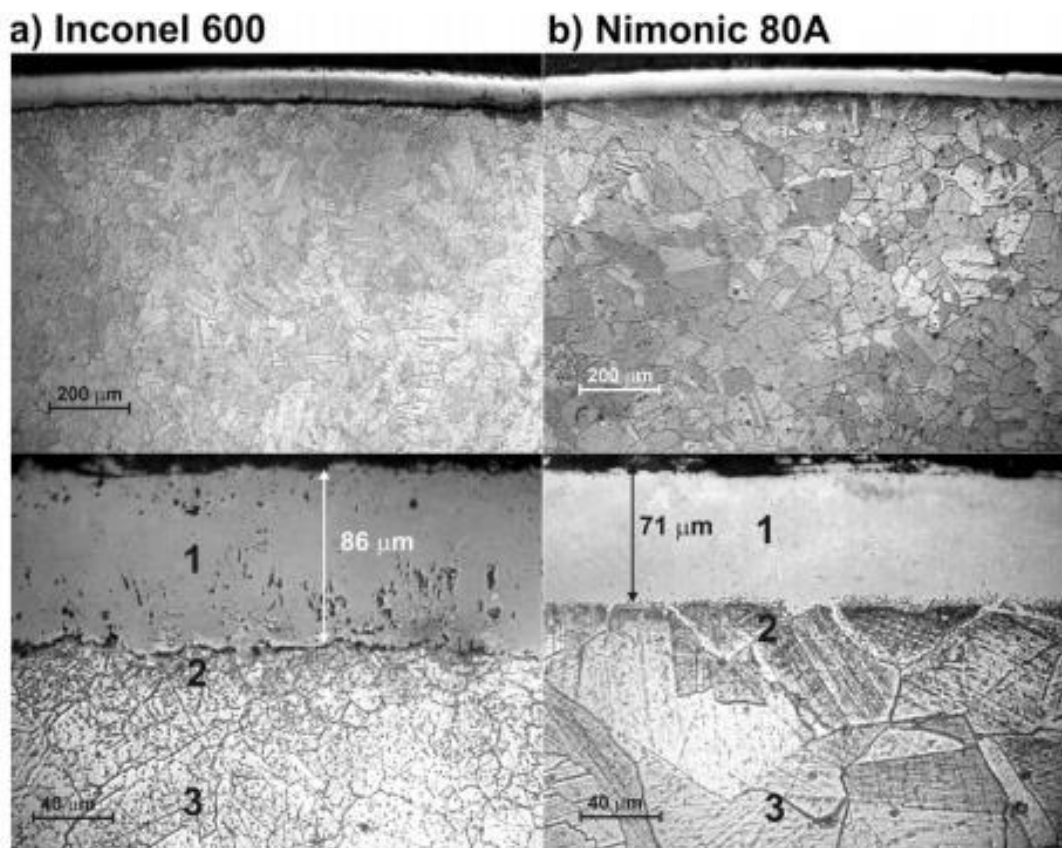
### 3. 1. 5. Boridování v plynech

Tato metoda je v případě niklu a jeho slitin velmi výhodná, jelikož získáme silnou povrchovou vrstvu za velmi krátký čas, oproti například boridování v zásypu prášku. Je to dáno tím, že boridování v plynech urychluje difúzi boru do základního materiálu. Vzniklá difúzní zóna se skládá ze dvou vrstev a neobsahuje žádné póry nebo trhliny. Její celková tloušťka je 3x větší než po boridování pomocí suspenze. [2]

Plyn pro boridování niklu a jeho slitin je složen z  $\text{N}_2 + \text{H}_2 + \text{BCl}_3$  a boridování je možné provádět dvěma způsoby, kontinuálně nebo ve dvou fázích. [17]

V případě boridování ve dvou fázích proces probíhá po dobu dvou hodin. Ke změně fáze dojde každých 15 minut a celý proces je 4x opakován. V první fázi se spustí přívod chloridu boritého ( $\text{BCl}_3$ ), který slouží jako zdroj boru při boridování v plynech, a tím dojde k nasycení povrchu materiálu. Poté následuje difúzní žihání. Dojde k zastavení přívodu  $\text{BCl}_3$ , což má za následek snížení koncentrace boru v povrchové vrstvě a zvýšení tloušťky difúzní vrstvy. [17] [18]

Na *Obrázek 1* je zobrazena výsledná mikrostruktura slitin niklu po boridování v plynech. Pod číslem 1 je vidět kompaktní boridová vrstva, která je tvořena převážně boridy niklu a dále pak boridy chromu. Pod číslem 2 je vrstva, ve které se boridy vyskytují na hranicích zrn. Pod číslem 3 je základní materiál. [17]



Obrázek 1 – OM Mikrostruktura slitin niklu Inconel 600 a Nimonic 80A po boridování v plynech. Leptání mramorovým činidlem. [17]

V případě boridování Nisilu (95,5 % Ni) touto metodou dochází v difúzní vrstvě ke vzniku boridu niklu, a to konkrétně  $\text{Ni}_2\text{B}$  a  $\text{Ni}_3\text{B}$ . V tomto případě dochází během difúzního žihání ke snížení koncentrace boru a k ovlivnění výsledné mikrostruktury. Boridy niklu, které vyžadují větší koncentraci boru  $\text{Ni}_4\text{B}_3$  a  $\text{NiB}$  se zde nevyskytují. [17]

Při boridování slitiny niklu Nimonic 80A dochází ke vzniku difúzní vrstvy tloušťky okolo 110 μm. Z toho kompaktní boridová vrstva měří mezi 70 – 86 μm a je složena z boridů niklu  $\text{Ni}_3\text{B}$ ,  $\text{Ni}_2\text{B}$ ,  $\text{Ni}_4\text{B}_3$  a  $\text{NiB}$  a boridů chromu  $\text{Cr}_2\text{B}$  a  $\text{CrB}$ . Množství boridů chromu ovlivňuje tvrdost, která může dosahovat až 2100 HV a lomovou houževnatost, která dosahuje hodnot od 0,609 – 4,436 MPam<sup>1/2</sup>. Nejvyšší hodnoty jsou naměřeny na povrchu boridovaného materiálu, kde se také nachází největší množství boridů chromu. [2] [17]

Slitina niklu Inconel 600 obsahuje na rozdíl od slitiny Nimonic 80A šest až deset hmotnostních procent železa, což vede ke vzniku chloridů železa  $\text{FeCl}_2$  a  $\text{FeCl}_3$  v boridovací atmosféře. Tyto chloridy způsobují vznik pórů v oblasti kompaktní boridové vrstvy. Tato vrstva dosahuje tloušťky v rozmezí 64 - 86 μm a tloušťka celé difúzní vrstvy je přibližně 110 μm. Boridová vrstva je tvořena boridy niklu  $\text{Ni}_3\text{B}$ ,  $\text{Ni}_2\text{B}$ ,  $\text{Ni}_4\text{B}_3$  a  $\text{NiB}$  a boridy chromu  $\text{Cr}_2\text{B}$  a  $\text{CrB}$  a její tvrdost je v rozmezí 1450 - 1925 HV. [17] [18] [19]

### 3. 2. Titan a jeho slitiny

Titan a jeho slitiny se používají převážně v chemickém průmyslu, farmacii, v automobilovém průmyslu a letectví. Vyznačují se výbornými mechanickými vlastnostmi a vysokou korozní odolností. [10] Mezi nevýhody slitin titanu patří špatné tribologické vlastnosti,



které omezují oblasti jejich využití. Pro zlepšení těchto vlastností jako je například odolnost proti opotřebení, se používají různé povrchové úpravy, včetně boridování. [20]

Slitiny titanu se rozdělují podle krystalické struktury na  $\alpha$ ,  $\alpha+\beta$  a  $\beta$ . Slitiny  $\alpha$  mají všechny základní vlastnosti titanu s omezenou pevností a houževnatostí. Slitiny  $\alpha+\beta$  se vyznačují vyšší pevností jak slitiny  $\alpha$ , mají také lepší mechanické vlastnosti a biokompabilitu. Mezi tuto skupinu patří i nejpoužívanější slitina titanu Ti-6Al-4V. Slitiny  $\beta$  mají nejlepší biokompabilitu a nižší Youngův modul pružnosti oproti předchozím skupinám. [21]

Boridování titanu a jeho slitin se nejčastěji provádí metodou v zásypu prášku, ale lze použít i další metody jako například boridování pomocí fluidního lože. Výsledná boridová povrchová vrstva zlepšuje tvrdost, odolnost proti opotřebení a korozi. Je složena převážně z boridů titanu  $TiB_2$  a  $TiB$  viz *Tabulka 5*. [11] [20]

Boridovací metoda	Základní materiál	Povrchová vrstva	Tvrdost
V zásypu prášku	Ti	TiB whiskery	550 HV
	Ti	TiB a $TiB_2$	1440 HV
	Ti	TiB, $TiB_2$ a TiC	820 HV
	Ti-6Al-4V	$TiB_2$	3200 HV
	Ti-6Al-4V	$TiB_2$	3300 HV
Pomocí fluidního lože	Ti a Ti-6Al-4V	TiB a $TiB_2$	1925 HV

**Tabulka 5 – Charakteristika povrchové vrstvy Ti a Ti6Al4V po boridování pomocí různých metod. [20]**

### 3. 2. 1. Boridování v zásypu prášku

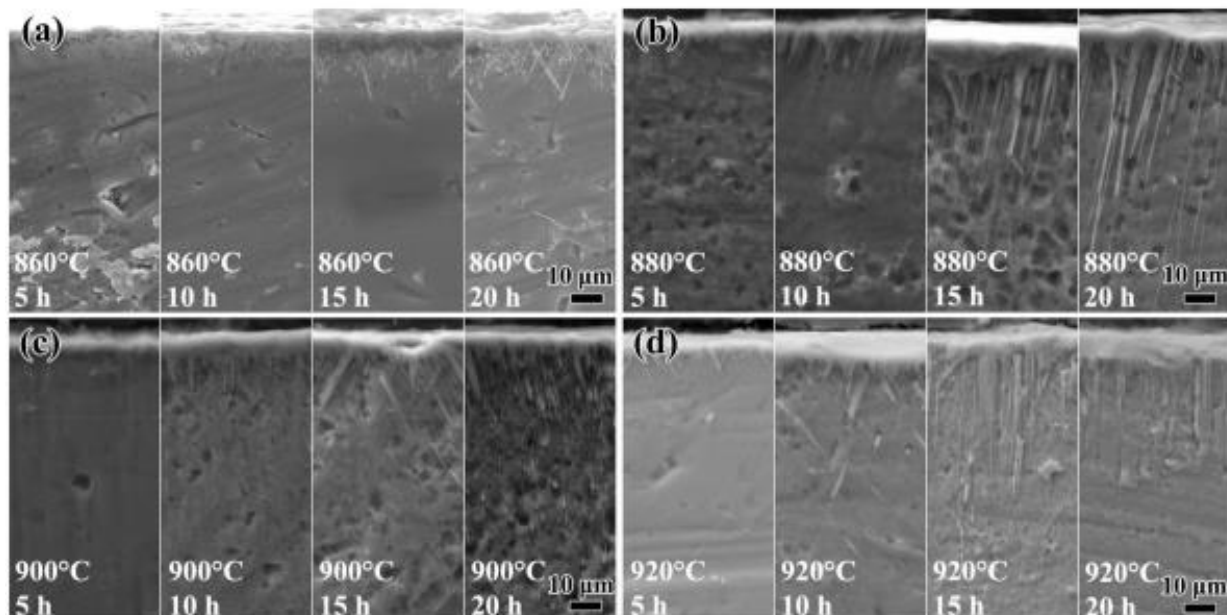
Boridování čistého titanu (Cp-Ti) je možné provádět při teplotách mezi 860 – 1200 °C po dobu 3 – 24 hod. Vzniklá povrchová vrstva je tvořena boridy titanu, a to vnitřní vrstvou TiB ve formě whiskerů, a vnější  $TiB_2$  vrstvou na povrchu materiálu. Tloušťka povrchové vrstvy je ovlivněna parametry boridování. Oproti ostatním neželezným kovům a jiným slitinám titanu však neplatí, že se tloušťka boridové vrstvy zvyšuje s rostoucí teplotou a časem. Naopak při překročení určité teploty dochází k jejímu zmenšování, a to kvůli snižování tloušťky TiB vrstvy whiskerů. Stejný efekt se objevuje i u slitiny titanu Ti-6Al-4V. [11] [21]

Při teplotě 860 °C po pěti hodinách boridování je výsledná boridová vrstva velmi tenká, a to i po dvaceti hodinách boridování na této teplotě. Tloušťka vnější  $TiB_2$  vrstvy je velmi malá, což nemá za následek výrazné ovlivnění vlastností jako je opotřebení nebo korozivzdornost.

Po zvýšení teploty boridování na 880 °C a času dvaceti hodin, dochází ke vzniku povrchové vrstvy  $TiB_2$  tloušťky 3 – 5  $\mu m$  a vrstvy dlouhých TiB whiskery tloušťky 70  $\mu m$ . Při dalším zvyšování teploty dochází k nárůstu tloušťky  $TiB_2$  vrstvy, ale zároveň ke snížení tloušťky TiB whiskerů viz *Tabulka 6* a *Obrázek 2*. [11]

Teplota - čas	860 °C – 20 hod	880 °C – 20hod	920 °C – 20 hod
Tloušťka TiB <sub>2</sub>	< 10 μm	3 - 5 μm	10 μm
Tloušťka TiB whiskerů	-	70 μm	40 μm

Tabulka 6 – Závislost teploty a času boridování na tloušťku TiB<sub>2</sub> a TiB whiskerů. [11]



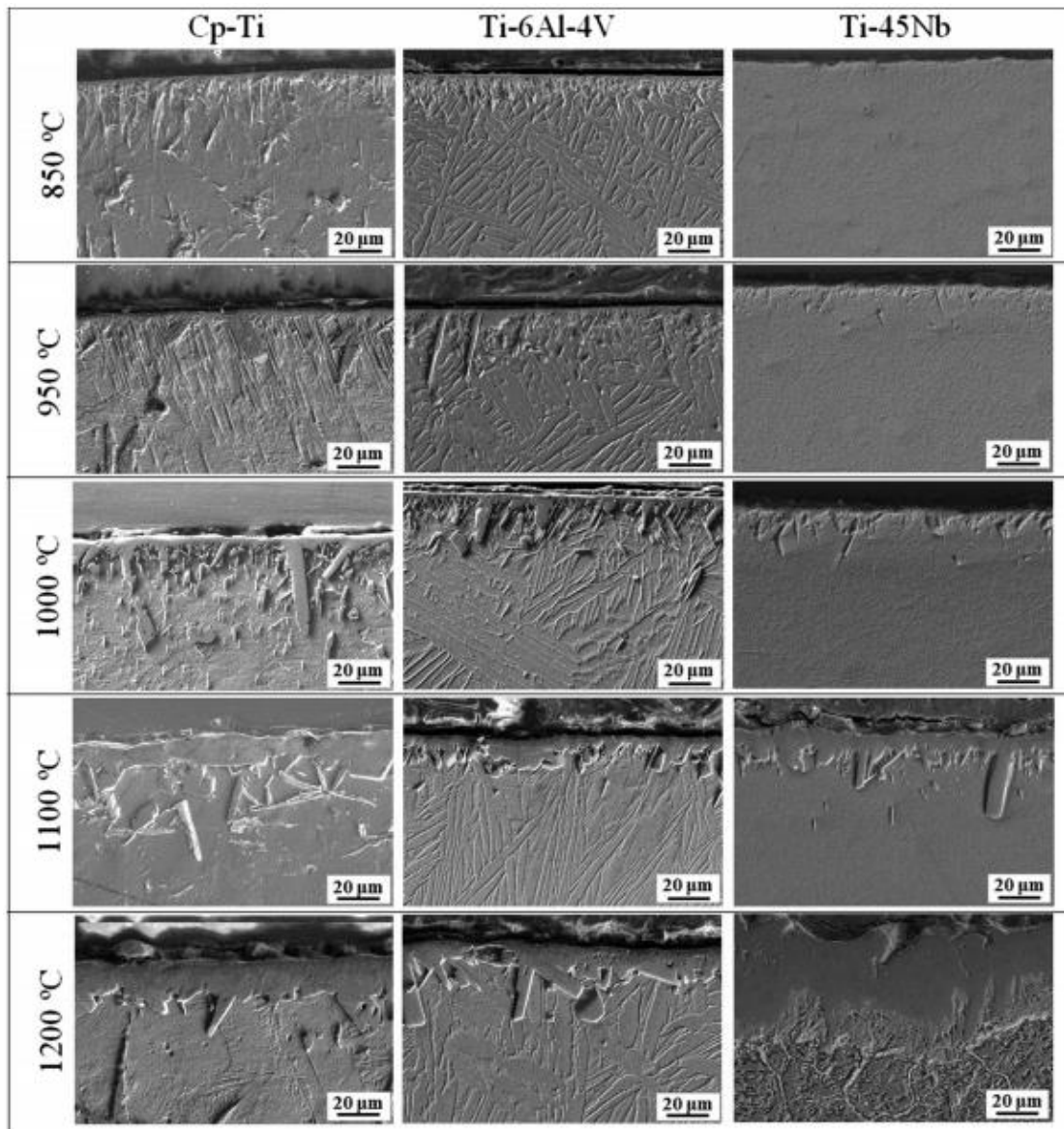
Obrázek 2 – SEM mikrografy boridové vrstvy vzniklé na Cp – Ti v závislosti na teplotě a času. [11]

Největší tvrdost po boridování čistého titanu (Cp – Ti) je na povrchu součásti, a postupně směrem do středu klesá. Při boridování na teplotě 920 °C po dobu dvaceti hodin je tvrdost TiB<sub>2</sub> vrstvy v rozmezí 3200 – 3500 kg/mm<sup>2</sup>. Nejvyšší hodnota odpovídá přítomnosti pouze TiB<sub>2</sub>, zatímco nižší hodnota odpovídá výskytu TiB<sub>2</sub> a TiB. Dále tvrdost klesá z 3200 kg/mm<sup>2</sup> na 380 kg/mm<sup>2</sup>. Nejnižší hodnota odpovídá základnímu materiálu. Z toho plyne, že tvrdost je nejvíce ovlivněna vzniklou TiB<sub>2</sub> vrstvou. [11]

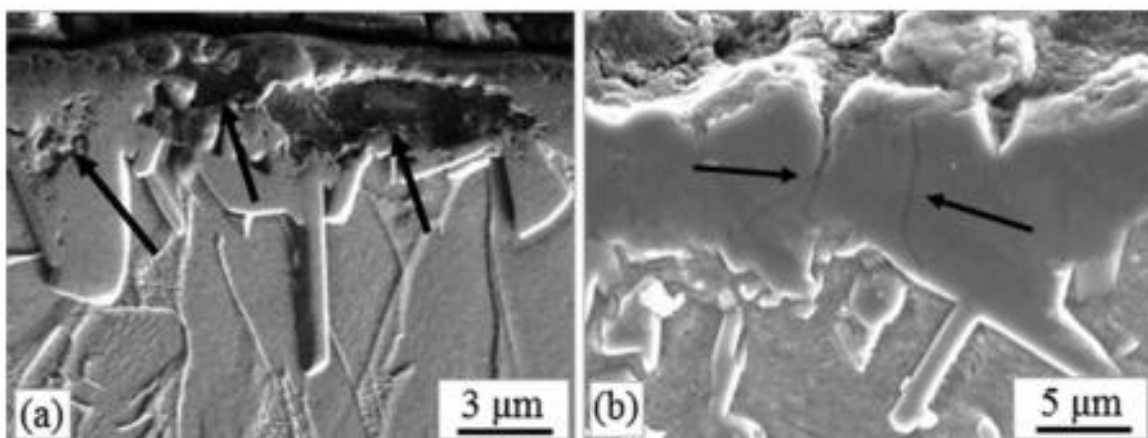
Při boridování slitiny Ti-6Al-4V touto metodou lze využít prášek Ekabor II. Stejně jako u Cp-Ti vzniká boridová vrstva, která je složena z vnější TiB<sub>2</sub> vrstvy tloušťky cca 4 μm a vnitřní TiB vrstvy tloušťky cca 6 μm. Také dochází ke vzniku boridu hliníku a vanadu (AlB<sub>2</sub> a VB<sub>2</sub>), ale ty se vyskytují až v hloubce 12 μm od povrchu. Toto je ovlivněno volnou Gibbsovou energií, které způsobuje přednostní vznik boridů titanu.

Pod boridovou vrstvou se nachází zóna difúze boru, která dosahuje hloubky až 50 μm. Její mikrostruktura není homogenní, a je složena z náhodně orientovaných whiskerů TiB smíchaných se základním kovem. Whiskery se vyznačují jehlicovou morfológií, se zvyšující teplotou se stávají hrubšími, a při teplotě nad 1000 °C tvoří silné desky, což můžeme vidět na Obrázek 3. [20] [21]

Při boridování této slitiny při teplotě 1200 °C dochází ke vzniku nespojitostí v monolitické vrstvě, nebo mezi ní a vrstvou TiB whiskerů. Tyto vady jsou znázorněny šipkou na Obrázek 4. [21]



Obrázek 3 – Průřezové mikrografy SEM boridových vrstev vytvořených na slitinách Cp - Ti, Ti6Al4V a Ti-45Nb při různých teplotách po dobu 24 hodin. [21]



Obrázek 4 – SEM snímky (a) Ti-6Al-4V a (b) Ti-45Nb, při boridování po dobu 24 hodin při teplotě 1100°C. [21]

Minimální povrchová tvrdost Ti-6Al-4V slitiny po boridování je 2000 HV a směrem do středu materiálu klesá. Je to přibližně 5x větší hodnota oproti neboridované slitině. Nejvyšší tvrdost 2700 HV<sub>0,025</sub> dosahuje TiB<sub>2</sub> na povrchu boridovaného materiálu, tato hodnota je několikanásobně vyšší oproti základnímu materiálu, jehož tvrdost je 315 HV<sub>0,025</sub>. [20] [21]

Při boridování slitiny titanu Ti-45Nb je monolitická povrchová vrstva tvořena z TiB<sub>2</sub>.NbB<sub>2</sub>. Pod touto vrstvou se nachází TiB whiskery. Tyto whiskery nemají jehlicovitý tvar, ale připomínají spíše pruty. Na rozdíl od Cp-Ti a slitiny titanu Ti-6Al-4V celková boridová vrstva roste rovnoměrně se zvyšující se teplotou. Její největší tloušťka 72,1 μm vzniká při boridování na teplotě 1200 °C, což je 6x více než při teplotě boridování na teplotě 1100 °C.

Stejně jako v případě slitiny Ti-6Al-4V při boridování na teplotě větší jak 1100 °C dochází ke vzniku trhlin, které můžeme vidět na *Obrázek 4*. Tyto trhliny vznikají vlivem rozdílu mezi koeficienty tepelné roztažnosti. [21]

### 3. 2. 2. Boridování pomocí elektrochemické metody [12]

Stejně jako při boridování titanu a jeho slitin v zásypu prášku dochází ke vzniku TiB a TiB<sub>2</sub> vrstvy na povrchu materiálu. Tato boridová vrstva je kompaktní a kontinuální a je jí možné vidět již po pěti minutách boridování v 90 % Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> a 10 % Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> při teplotě 950 °C a hustotě elektrického proudu 300 mA/cm<sup>2</sup>.

Se zvyšující se teplotou dochází k nárůstu tloušťky TiB<sub>2</sub> a TiB whiskerů, které po osmy hodinách boridování na teplotě 950 °C dosahují tloušťky 230 μm. Celková boridová vrstva je největší v porovnání s ostatními metodami.

### 3. 2. 3. Boridování pomocí fluidního lože

Při boridování titanu a jeho slitin touto metodou, je fluidní lože složena z B<sub>4</sub>C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a pevné sloučeniny obsahující halogen jako například fluorid sodný nebo fluorid amonný.

V případě čistého titanu je vzniklá boridová vrstva tvořena jednofázovou vrstvou TiB. Naopak při boridování Ti-6Al-4V vzniká typická boridová vrstva složena z TiB a TiB<sub>2</sub> s možným výskytem vanadu. [12] [15]

## 3. 3. Kobalt a jeho slitiny

Kobalt a jeho slitiny se vyznačují dobrými magnetickými vlastnostmi, korozní odolností a odolností vůči opotřebení. Proto se používají například v letectví, námořnictví a medicíně. Například slitina Co – Cr se využívá jako náhrada kloubů. [3] [22]

Boridování kobaltu a jeho slitin je prováděno nejčastěji metodou boridování v zásypu prášku, ale čistý kobalt lze boridovat i pomocí fluidního lože. Při boridování dochází ke vzniku boridů kobaltu jako jsou boridy Co<sub>3</sub>B a Co<sub>4</sub>B. Tloušťka této vrstvy dosahuje průměrně 130 μm při boridování na teplotě 950 °C po dobu tří hodin. [3] [15]

Mechanické a chemické vlastnosti vzniklé boridové vrstvy jsou ovlivněny její tloušťkou, mikrostrukturou, metodou boridování a zvolenými parametry. [3]

### 3. 3. 1. Boridování v zásypu prášku [3]

Boridování čistého kobaltu touto metodou po dobu osmi hodin při teplotě 950 °C (1223 K) vede ke vzniku povrchové vrstvy, která je složena z boridu kobaltu Co<sub>2</sub>B a silicidu kobaltu Co<sub>2</sub>Si. Tato vrstva dosahuje nejlepších oxidačních vlastností v porovnání s boridováním na jiné teplotě.

Slitina Co – Cr – Mo – C s chemickým složením, které nalezneme v *Tabulka 7*, vyhovuje normě pro ASTM F - 75. [3]

Prvek	Cr	Mo	Ni	Si	C
ASTM F – 75 požadavky	27 - 30 %	5 - 7 %	< 0,5 %	< 1 %	< 0,35 %
Slitina Co – Cr – Mo -C	27 - 30 %	5 – 7 %	0,25 %	0,7 %	0,25 %

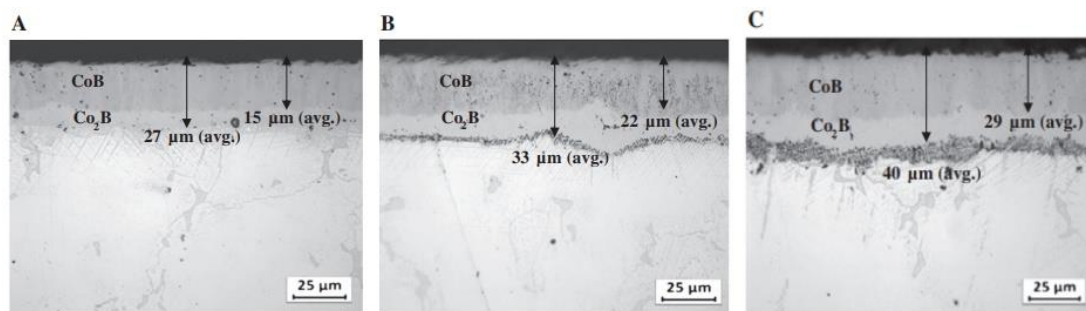
**Tabulka 7 – Požadavky na chemické složení slitiny kobaltu ASTM F - 75 [3] [23]**

Při boridování této slitiny v prášku Durborid dochází primárně ke vzniku boridů kobaltu. Vnější vrstva je složena z CoB, a její tvrdost je v rozmezí 18 – 20 GPa. Pod touto vrstvou se nachází Co<sub>2</sub>B, jehož tvrdost je v rozmezí 15 – 16 GPa.

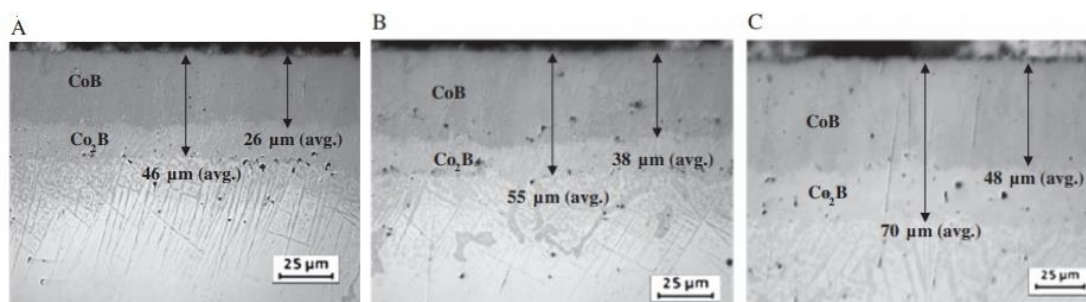
Tloušťka vzniklé boridové vrstvy je spojena s časem a teplotou boridování viz *Obrázek 5* a *Obrázek 6*, kde můžeme vidět, že s rostoucí teplotou dochází i k nárůstu tloušťky boridové vrstvy. Vrstva CoB dosahuje větší tloušťky, než vrstva Co<sub>2</sub>B nezávisle na teplotě a času. Z obrázků také vyplývá, že největší celkové tloušťky boridové vrstvy 70 μm, získáme při boridování na teplotě 1323 K (1049,85 °C) po dobu deseti hodin. Zatímco nejmenší celkovou tloušťku 27 μm dosáhneme při boridování na teplotě 1248 K (974,85 °C) po dobu šesti hodin.

Mimo boridů kobaltu může dojít ke vzniku boridů chromu a boridů molybdenu (CrB a Mo<sub>2</sub>B). Tyto boridy způsobují difúzní bariéru na rozhraní boridové vrstvy a základního materiálu a zároveň zvyšují tvrdost boridové vrstvy.

Výsledná mikrostruktura je podobná jako u vysokolegovaných a nerezových ocelí, které byly touto metodou boridovány.



**Obrázek 5 – Mikrostruktura vzniklé boridové vrstvy na slitině Co – Cr - Mo – C, po boridování na teplotě 1248 K (974,85 °C); A – 6 hodin, B – 8 hodin, C – 10 hodin. [3]**



**Obrázek 6 – Mikrostruktura vzniklé boridové vrstvy na slitině Co – Cr - Mo – C, po boridování na teplotě 1323 K (1049,85 °C); A – 6 hodin, B – 8 hodin, C – 10 hodin. [3]**

### 3. 4. Molybden

Molybden se využívá pro výrobu drátů, které mají další využití v žárovkách nebo v elektrických pecích. [24]

Boridy molybdenu napomáhají rychlému přenosu tepla a vyznačují se odolností proti korozi a oxidaci. Využití boridové vrstvy tvořené boridy molybdenu najde využití u obráběcích strojů a ozubených kol.

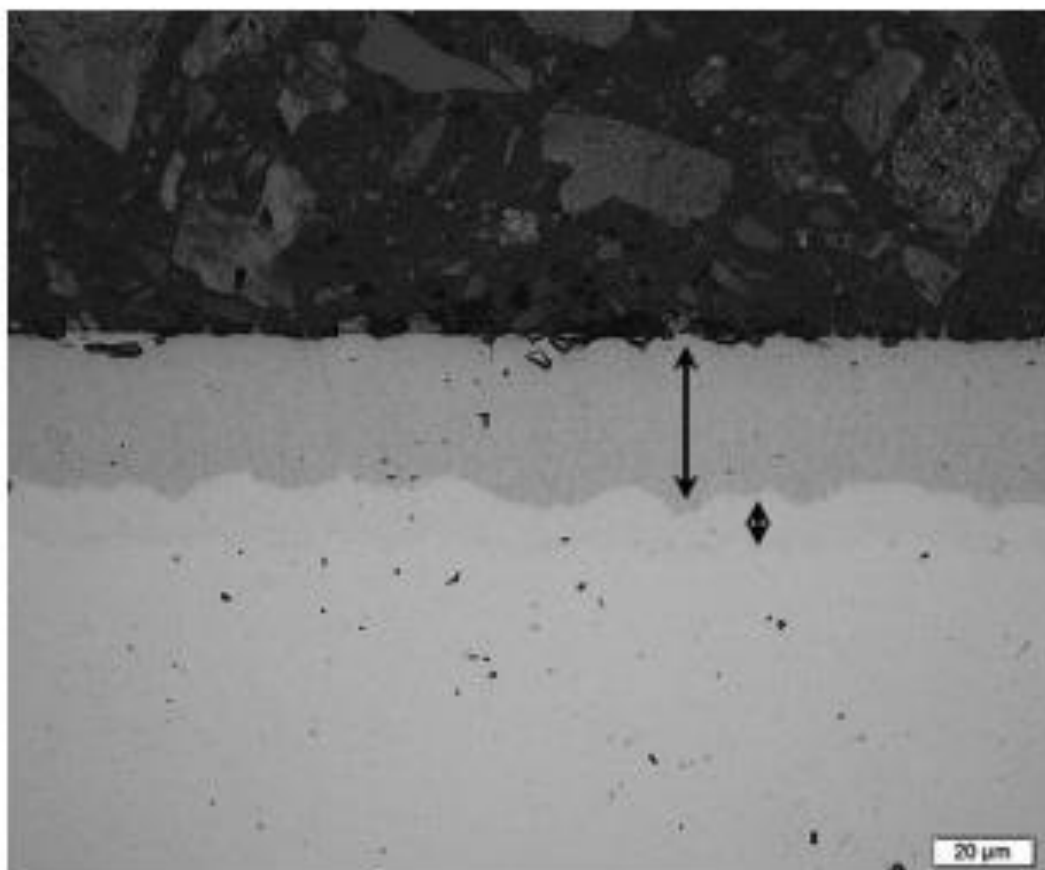
Při boridování molybdenu vzniká boridová vrstva složená z boridů molybdenu, vyznačuje se vyšší tvrdostí oproti neboridovanému materiálu. [25]

#### 3. 4. 1. Boridování pomocí elektrochemické metody

Při boridování čistého molybdenu pomocí této metody vzniká na povrchu součásti vrstva složená z boridů molybdenu. Lze boridovat jak v roztaveném boraxu, tak ve směsi KF, LiF a  $\text{KBF}_4$ . [12] [25]

Při boridování v roztaveném boraxu mezi teplotami 900 - 1000 °C po dobu 30 -180 minut dojde ke vzniku dvoufázové homogenní boridové vrstvy, která se vyznačuje vysokou tvrdostí a tloušťkou. Tvrdost této vrstvy je nejvyšší na povrchu a směrem ke středu se snižuje. Zvýšení teploty boridování o 50 % má za následek zvýšení tloušťky vzniklé vrstvy přibližně o 10 %. Dále lze tloušťku zvýšit pomocí prodloužení času boridování. Nejrychlejší růst je zaznamenán mezi třiceti až šedesáti minutami, později dochází ke zpomalení růstu. Je to dáno tím, že po šedesáti minutách ustává difúze boru a dochází k růstu tloušťky boridové vrstvy.

Na *Obrázek 7* vidíme boridovou vrstvu vzniklou po boridování na teplotě 1000 °C po dobu 2 hodin při hustotě elektrického proudu 500 mA/cm<sup>2</sup>. Průměrná tloušťka vzniklé povrchové vrstvy dosahuje 47 μm a je tvořena ze dvou vrstev. Vnější vrstva je tvořena  $\text{Mo}_2\text{B}_5$  a dosahuje maximální tloušťky 35 μm. Vyznačuje se vysokou tvrdostí (3150 HV) a křehkostí. Pod ní se nachází vrstva tvořená z  $\text{Mo}_2\text{B}_{4.027}$ , tato vrstva dosahuje maximální tloušťky 9 μm a její maximální tvrdost je 1960 HV. [25]



Obrázek 7 - Morfologie boridové vrstvy po elektrochemickém boridování (1000 °C, 2 hod, 500 mA/cm<sup>2</sup>)  
[25]

## 4 Cíl experimentální části

Cílem experimentální části této bakalářské práce je zjistit vlastnosti a strukturu slitin neželezných kovů, které byly boridovány metodou zásypu v prášku. Celkem budou zpracovány čtyři typy vzorků a to hliníková slitina 1050, měď, titan a mosaz CuZnMnAl.

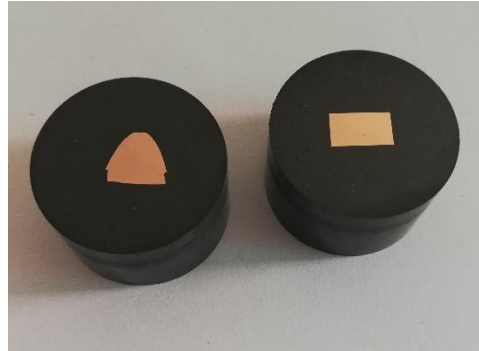
U vzorků bude proveden metalografický výbrus, chemická analýza, Pin on disk test, Mercedes test a změřena mikrotvrdost dle Vickerse a odolnost proti korozi.

Dle teoretické části této bakalářské práce lze očekávat vznik jednofázové nebo dvoufázové boridové vrstvy na povrchu vzorku, tato vrstva by se měla vyznačovat zvýšenou tvrdostí a zlepšenou odolností proti opotřebení, a měla by být složena z boridů mědi či hliníku dle boridované slitiny.



## 5 Boridované vzorky

V experimentální části této bakalářské práce se zpracovávaly celem čtyři typy vzorků a to hliníková slitina 1050 v podstatě čistý hliník (Vzorek A), měď (Vzorek B,C a D), rozdíl mezi tvarem vzorku B a D můžeme vidět na *Obrázek 8*, titan (Vzorek E) a mosaz CuZnMnAl (Vzorek F).



Obrázek 8 - Vzorek B (vlevo) a D (vpravo)

Hliník je lehký kov bělavě šedé barvy, který má široké využití napříč průmysly. Vyznačuje se dobrou odolností vůči korozi a výbornou elektrickou a tepelnou vodivostí. [26] [27]

Hliníková slitina 1050 patří do řady 1000, jedná se o slitinu s minimálním obsahem hliníku 99 %. Tento materiál je vhodný ke svařování, má dobrou elektrickou a tepelnou vodivost a špatně se obrábí. Využití slitin hliníku z této řady je především v elektrotechnickém a chemickém průmyslu. [26] [28] [29]

Měď je ušlechtilý kov načervenalé barvy, který je měkký a houževnatý. Vyznačuje se dobrou odolností vůči korozi a dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí. [30]

Titan je lehký kov stříbrně bílé barvy. Vyznačuje se vysokou pevností, tuhostí a dobrou odolností vůči korozi. Je nemagnetický a má nízkou hustotu. [31]

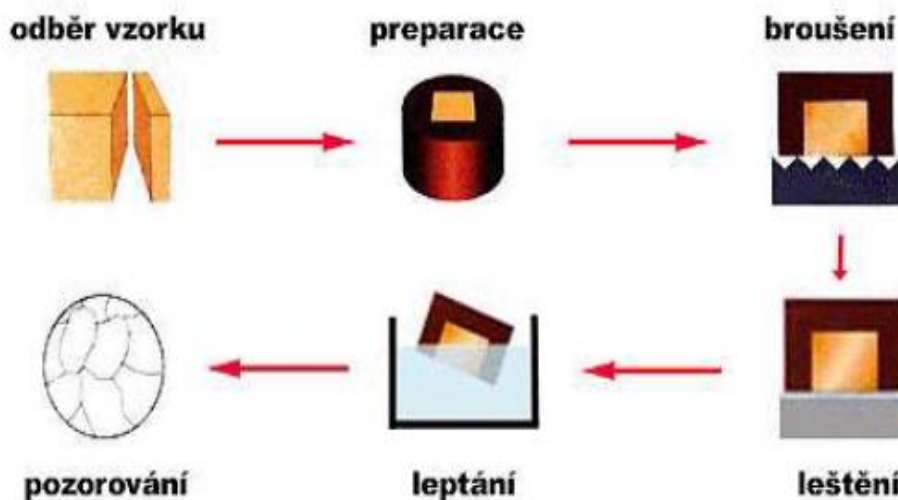
Mosaz je slitina mědi a zinku případně dalších prvků. V našem případě ještě manganu a hliníku. Mezi vlastnosti mosazi patří dobrá obrobitelnost, odolnost vůči korozi. [32]

## 6 Metalografie

Metalografie je nauka zabývající se vnitřní skladbou kovů a jejich slitin. Zkoumá mikrostrukturu a makrostrukturu a určuje, jak je daná struktura ovlivněna chemickým složením, teplotou, tepelným nebo mechanickým zpracováním. [33] [34]

### 6.1. Příprava metalografického výbrusu

Příprava metalografického výbrusu se skládá z několika navazujících kroků, při kterých nesmí dojít k ovlivnění materiálu, jelikož by došlo ke zkreslení výsledků. Jsou to odběr, zalévání, broušení, leštění a v případě potřeby leptání viz *Obrázek 9* [35]



Obrázek 9 - Příprava metalografického výbrusu [35]

#### 6.1.1. Odběr vzorku

Před samotným odběrem vzorku je nutné správně určit místo, ze kterého bude zkušební vzorek odebrán. Volí se takové místo, které je pro řešení problému klíčové a bude plně charakterizovat zkoumaný vzorek. K rozříznutí se používá abrazivní kotoučová pila s rozbrušovacím kotoučem. Volba kotouče záleží na odebíraném materiálu. Rozbrušovací kotouč minimalizuje ohřev a deformaci vzorku, to je důležité zejména proto, že téměř nedochází k ovlivnění vzorku a tedy i výsledků zkoušek. Při odběru vzorku je snaha udělat čistý rovný řez s minimální drsností. [35] [36]

#### 6.1.2. Zalévání vzorku

*„Metalografické vzorky jsou zalévány za studena nebo zalisovány za tepla do umělé hmoty (polymerní pryskyřice), především z důvodů snazší manipulace (malé vzorky – zvětšení plochy), pro ochranu hran během přípravy a pro automatickou přípravu, kde se zajistí jednotný tvar vzorků.“* [35]

Jako umělou hmotu lze použít termoplast nebo reaktoplast. Termoplast je měkčí a vyznačuje se větší smrštitivostí mezi hmotou a hranou vzorku, naopak reaktoplast je tvrdší a má menší smrštitivost.

Zalévání za studena lze využít u vzorků, u kterých by mohlo vlivem vysoké teploty dojít ke změně struktury, což by vedlo ke zkreslení výsledků zkoušek. Vzorek se umístí do formy, ve které je následně zalit zalévací hmotou, která po určité době ztuhne. Jako zalévací hmotu lze

použít epoxidové nebo práškové akrylátové, polyesterové pryskyřice, promíchané s tvrdidlem v předepsaném poměru. Zalévání za studena je možné provádět též ve vakuu, kdy je pryskyřice vytvrzovaná pod tlakem a tudíž dojde k vyplnění všech póru, trhlin a dojde k eliminaci vzduchových bublin v zalévací hmotě.

Zalisování za tepla je možná provádět u vzorků, kde nehrozí změna struktury zvýšenou teplotou. V tomto případě se vzorek umístí do tlakové nádoby, kde je zasypán práškem. Prášek je složen ze speciálního polymeru, který za zvýšené teploty (100 – 180 °C) a tlaku (30 - 50 kN) roztaví a obklopí vzorek. Tato hmota ztuhne přibližně do deseti minut. [35]

### 6. 1. 3. Broušení vzorku [35]

Broušení vzorku se provádí s cílem získat rovnou plochu s minimálním poškozením. Vzorek se postupně brousí na brusných SiC papírech nebo brusných kotoučích u kterých se postupně zmenšuje drsnost. Při přechodu na jemnější papír, je nutné vzorek opláchnout a zbavit případných nečistot z předchozího broušení.

Broušení lze provádět ručně nebo mechanicky. Výhoda mechanického broušení spočívá v opakovatelnosti podmínek broušení jako je upevnění vzorku, přítlačná síla nebo otáčky kotouče, a možnosti zpracování několika vzorků najednou. Mechanické broušení se provádí na univerzálních brusných zařízeních, na kterých lze následně provést i leštění.

Samotné broušení je ovlivněno několika parametry, které se odvíjí od broušeného materiálu. Jsou to druh povrchu brusného kotouče, typ brusiva, velikost a tvar částic brusiva, velikost přítlačné síly, rychlost otáčení kotouče, použité smáčedlo a druh chladicího média.

### 6. 1. 4. Leštění vzorku

Leštění se provádí po broušení a jeho cílem je zjemnit povrchovou drsnost a zbavit se zbytku brusiva. Na rozdíl od broušení při leštění téměř nedochází k úbytku materiálu. Leštění je možné provádět mechanicky, chemicky nebo elektrolyticky. [35] [36]

Mechanické leštění je velmi podobné mechanickému broušení. Vzorek se leští přiložením a přítlačením na rotující kotouč s leštícím médiem. Leštící plátno a medium se volí dle leštěného materiálu. [35]

Chemické leštění se aplikuje po mechanickém leštění a odstraňuje jakékoliv zbytkové deformace. „*Povrch vzorku je leštěn ponořením do vhodného roztoku bez vnějšího potenciálu.*“ [35] Používá se především na měď, olovo, hliník a jejich slitiny. [36]

Elektrolytické leštění využívá tak zvaný anodický film, který vzniká na leštěném povrchu vlivem průchodu elektrického proudu mezi anodou, ponořeným vzorkem do elektrolytu a katodou. Tloušťka anodického filmu není konstantní, ale je ovlivněna prohlubněmi a výstupky na vzorku. Během leštění se výstupky rozpouštějí a tím dochází k vyhlazování povrchu. Samotné elektrolytické leštění je ovlivněno několika parametry. Jsou to složení a teplota elektrolytu, vzdálenost elektrod, proudovými podmínkami, rychlostí proudění elektrolytu a plochou vzorku. [35]

Po leštění lze již pozorovat pomocí mikroskopu některé detaily jako jsou póry, lupínky grafitu v litině, staženiny apod. Pokud chceme pozorovat nekovové fáze jako například oxidické vměstky, hlinitany nebo sulfidy je nutné vzorek naleptat. [35] [36]

### 6. 1. 5. Leptání vzorku [35]

Při leptání dochází ke zviditelnění jednotlivých strukturních součástí lze ho provádět chemicky, elektrolyticky nebo tepelně.

Při chemickém leptání se vzorek ponoří na určitou dobu do leptacího činidla. Činidlo napadá energeticky bohatá místa jako jsou hranice zrn a rozhraní mezi fázemi, a tím dochází k leptání. Chemické leptání lze rozdělit na leptání na hranice zrna, plošné leptání, selektivní leptání a barevné leptání.

Elektrolytické leptání je principiálně stejné jako elektrolytické leštění. Vzorek je ponořen do elektrolytu a zapojen jako anoda. Následně vlivem proudění elektrického proudu mezi anodou a katodou dochází k leptání. Tento druh leptání je používán především u kovů a slitin, které jsou odolné vůči účinkům běžných leptadel.

Tepelné leptání využívá k leptání povrchu zvýšenou teplotu k vytvoření oxidické vrstvy na povrchu vzorku, která se pak v mikroskopu jeví barevně. Tepelné leptání je možné provádět i ve vakuu. V tomto případě pak na povrchu vzniká reliéf odpařováním částic materiálu nebo pomocí iontového odpařování. Tento druh leptání je možný provádět například u keramických materiálů.

### 6. 2. Metalografie boridovaných vzorků

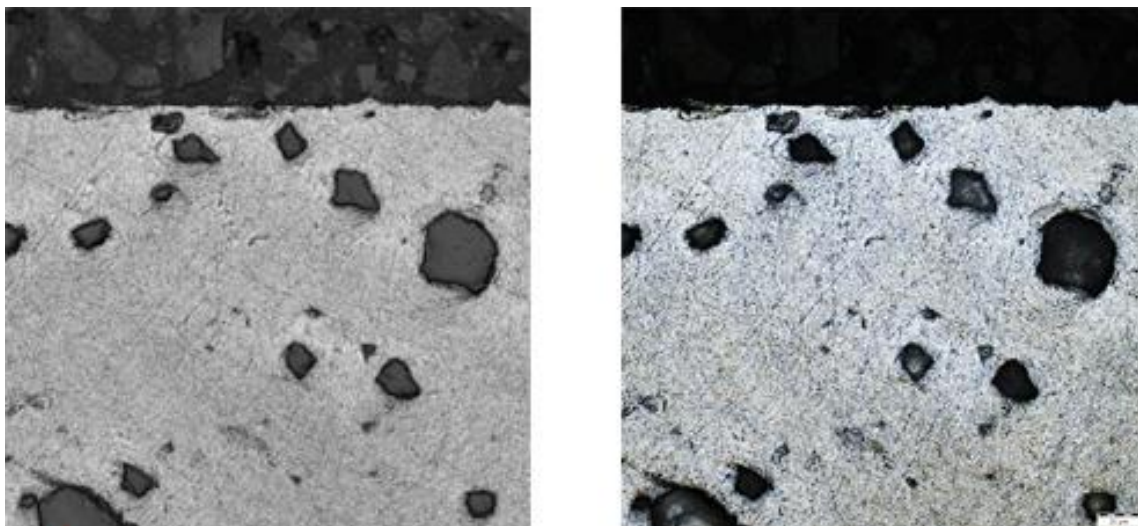
Na *Obrázek 10* a *Obrázek 11* a *Obrázek 12* můžeme vidět metalografii vzorků po boridování metodou v zásypu prášku.

V případě vzorku A – slitina hliníku 1050 bylo boridování provedeno při teplotě 500 °C po dobu 4 hodin. U tohoto vzorku dle metalografie není vidět žádná oblast ovlivněná boridováním.

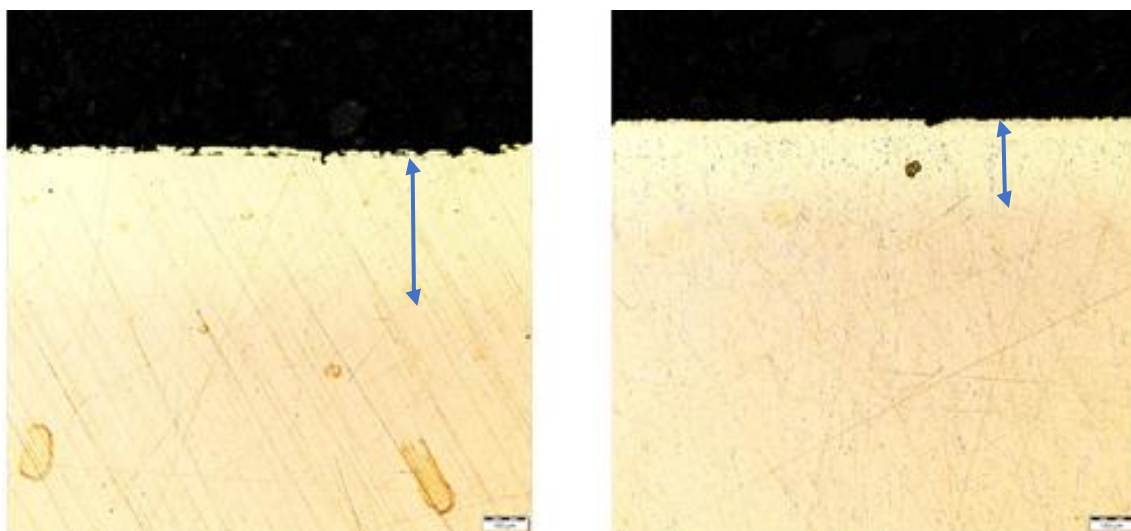
V případě vzorku B a C – měď bylo boridování provedeno při teplotě 900 °C po dobu 6 hodin. U těchto vzorků je vidět ovlivněná oblast, jež je na *Obrázek 11* znázorněna modrou šipkou. V případě vzorku B byla hloubka ovlivněné oblasti po boridování měřena na devíti místech. Její minimální tloušťka dosahuje 331,31 μm, maximální 370,06 μm a v průměru 331,31 μm. V případě vzorku C dosahuje minimální tloušťka 220,06 μm, maximální 257,55 μm a v průměru 242,26 μm.

V případě vzorku E – titan a vzorku F – mosaz CuZnMnAl bylo boridování provedeno opět při teplotě 900 °C po dobu 6 hodin. Ovlivněná vrstva boridováním je vidět pouze na vzorku titanu. V tomto případě byla boridová vrstva měřena na pěti místech. Její minimální tloušťka dosahuje 120 μm, maximální 180 μm a v průměru 143 μm. Následně byla změřena i celková ovlivněná oblast pod boridovou vrstvou. Její minimální tloušťka dosahuje 240 μm, maximální 330 μm a v průměru 294 μm. Obě vrstvy jsou na *Obrázek 12* znázorněny oranžovou šipkou. V průměru je celková hloubka ovlivněné oblasti 442 μm.

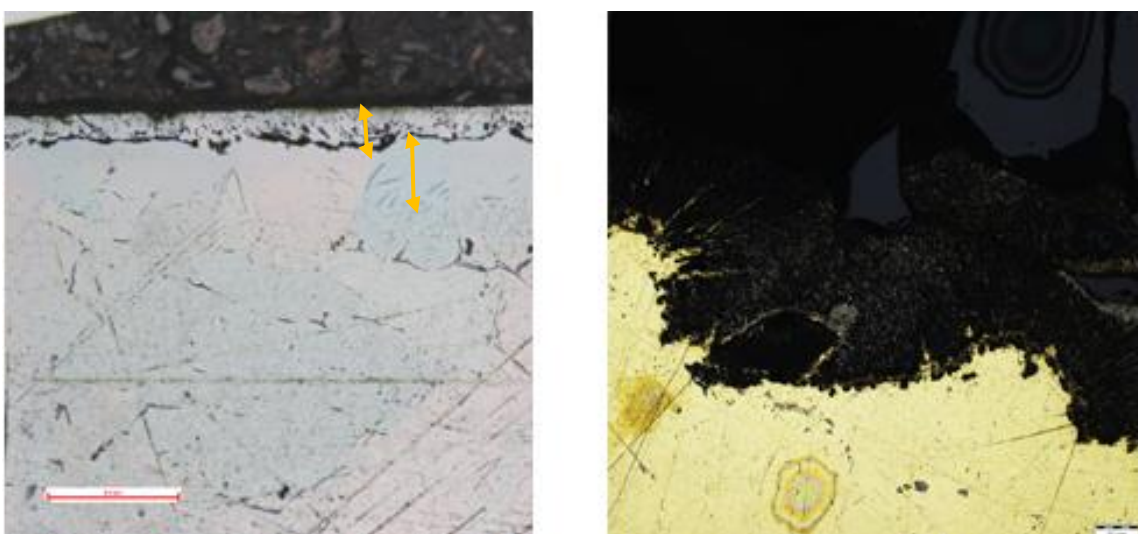
Na vzorku F – mosaz CuZnMnAl stejně jako v případě vzorku A není na metalografickém snímku vidět žádná ovlivněná oblast.



Obrázek 10 - Vzorek A – slitina hliníku 1050, boridováno při 500 °C po dobu 4 hod



Obrázek 11 - Vzorek B - měď, Vzorek C - měď (vlevo) - boridováno při 900 °C po dobu 6 hod (vpravo)



Obrázek 12 - Vzorek E – titan (vlevo), Vzorek F – mosaz CuZnMnAl (vpravo - boridováno při 900 °C po dobu 6 hod (vpravo)

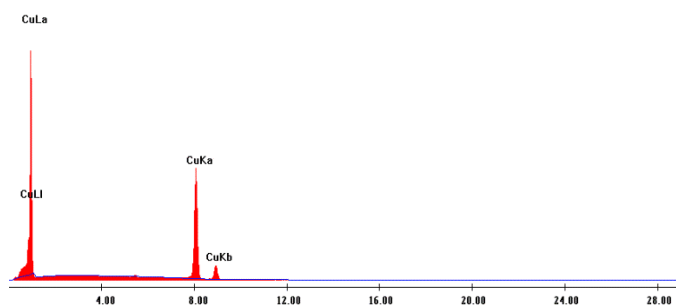
### 6.3. Chemická analýza vzorků

Chemická analýza je založena na principu detekce charakteristického rtg záření pomocí rtg spektrometru, který je součástí řádkovacího elektronového mikroskopu. Rtg spektrometr je schopný zjistit rozložení jednotlivých prvků ve zkoumaném vzorku. [36]

V případě experimentální části této práce byla chemická analýza provedena na elektronovém řádkovacím mikroskopu PHILIPS XL30ESEM, při zvětšení 200x a to u povrchu a ve středu vzorků.

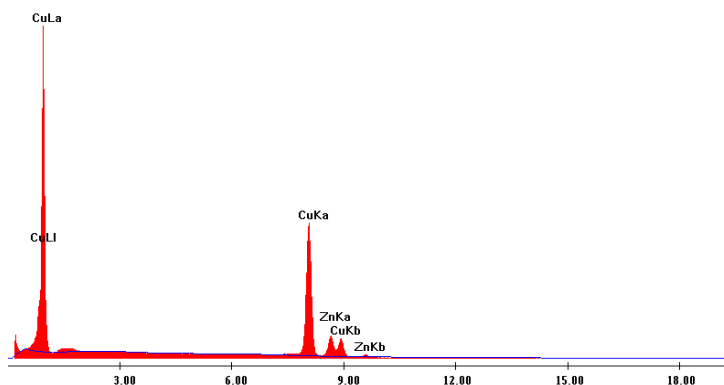
Dle provedené chemické analýzy před a po boridování bylo zjištěno, že pouze v případě vzorku mědi viz *Obrázek 13* a *Obrázek 14*, došlo k difúzi zinku do povrchu materiálu u ostatních vzorků nebylo zjištěno, že během boridování došlo k difúzi prvků z boridovacího prášku do materiálu.

Label A: Chlorite [Nrm.%= 38.86, 20.96, 34.83, 1.14, 3.84, 0.28]



Obrázek 13 - Chemická analýza před boridováním vzorek B - měď

Label A: Chlorite [Nrm.%= 38.86, 20.96, 34.83, 1.14, 3.84, 0.28]



Obrázek 14 - Chemická analýza po boridování vzorek B - měď

## 7 Tvrдость

Jedná se o mechanickou vlastnost povrchu materiálu neboli jinak řečeno o odolnost povrchové oblasti materiálu proti místnímu porušení cizím tělesem. Tvrдость je ovlivněna například pružností zkoušeného materiálu, plastickými vlastnostmi a velikostí zatěžovací síly působící na vnikací těleso. Dále pak vlastnostmi vnikajícího tělesa jako je tvar, rozměr, tvrдость a modul pružnosti. [37] [36]

### 7.1. Zkoušky tvrđosti [36]

Zkoušky tvrđosti lze rozdělit dle principu na zkoušky vrypové, vnikací, nárazové a odrazové. Dle rychlosti ztěžující síly na statické a dynamické. Nebo dle účelu na zkoušky makrotvrđosti a mikrotvrđosti. Zkoušky tvrđosti jsou jednoduché, a pro jejich provedení není nutno dělat další vzorek, proto se často používají pro doplnění výsledků jiných zkoušek jako je zkouška tahem nebo rázem v ohybu. Rozdělení zkoušek tvrđosti vidíme v *Tabulka 8*.

Zkoušky makrotvrđosti	Statické	Vrypové	Metoda Martens
		Vnikací	Metoda Brinell
			Metoda Vickers
			Metoda Rockwell
	Dynamické	Plastické nárazové	Metoda volným pádem
			Metoda stlačenou pružinou
			Porovnávací metoda
		Elastické odrazové	Metoda volným pádem (Shorova)
Metoda kyvadlová (Durosop)			
Zkoušky mikrotvrđosti	Statické	Vnikací	Metoda Vickers při zatížení do 4,9 N

**Tabulka 8 - Zkoušky tvrđosti [36]**

#### 7.1.1. Vnikací zkoušky tvrđosti

U vnikacích zkoušek tvrđosti je důležité mít dobře připravený povrch vzorku. Ten by měl být rovný a hladký a je nutné eliminovat jeho jakékoliv možné ovlivnění během přípravy.

Vnikací zkoušky tvrđosti jsou založeny na vnikání předmětu přesného geometrického tvaru do povrchu zkoumaného vzorku. Geometrický tvar vnikacího tělesa je volen typem zkoušky. Tvrđost se pak zjišťuje dle velikosti otisku ve zkoušeném vzorku. Nejčastěji se provádí zkoušky tvrđosti dle Brinella, Rockwella a Vickerse.

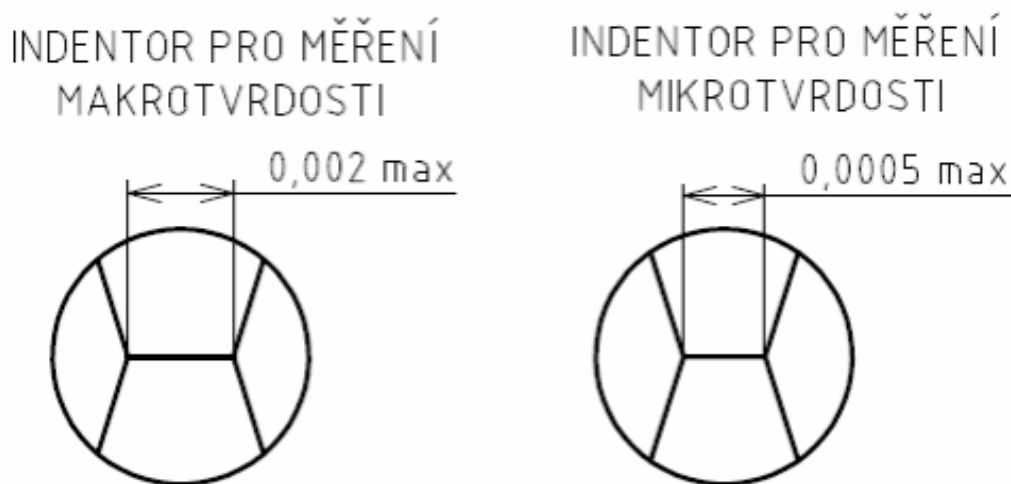
V experimentální části této bakalářské práce byla mikrotvrđost měřena dle Vickerse.

#### 7.2. Zkouška mikrotvrđosti dle Vickerse

Tato zkouška se provádí dle normy ČSN EN ISO 6507–1. Měření mikrotvrđosti se od měření makrotvrđosti touto metodou liší pouze v zatěžovací síle a velikosti indentoru viz *Tabulka 9* a *Obrázek 15*. Čím menší zatěžovací síla, tím menší výsledný vtisk, výsledná tvrđost je pak na této síle závislá. Postup provedení je stejný jako při měření makrotvrđosti. [38]

Oblast zkušebního zatížení [N]	Symbol tvrdosti	ISO 6507-1
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až $< HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až $< HV 0,2$	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

Tabulka 9 - Rozdělení zkoušek dle Vickerse [38]



Obrázek 15 - Rozdíl mezi indentory pro makrotvrdost a mikrotvrdost [38]

### 7. 3. Vyhodnocení mikrotvrdosti boridovaných vzorků

V našem případě bylo měření mikrotvrdosti provedeno při zatěžující síle 0,4903 N což odpovídá symbolu tvrdosti HV0.05. [38] Měření bylo provedeno na příčném metalografickém výbrusu ve stavu po leštění. Samotné měření bylo provedeno ve dvou řadách. První řada byla měřena ve vzdálenosti 50 mikronů od hrany vzorku tedy od povrchu. Druhé měření bylo provedeno ve středu každého vzorku. Minimální vzdálenost mezi vtisky byla 150 mikronů.

Měření bylo provedeno u všech vzorků před i po boridování jak je vidět v následujících tabulkách. Výsledky měření před boridováním jsou vždy na pravé straně tabulky, naopak výsledky po boridování jsou na levé straně tabulky.



### 7. 3. 1. Slitina hliníku 1050

	Po boridování		Před boridováním	
	Mikrotvrdość 50 mikronů od hrany vzorku [HV]	Mikrotvrdość ve středu vzorku [HV]	Mikrotvrdość 50 mikronů od hrany vzorku [HV]	Mikrotvrdość ve středu vzorku [HV]
Vzorek A (hliník)	39,8	51	33,7	39
	30,6	50	37	34,3
	42,4	38,3	41,5	35,7
	41,6	34,9	37,2	40,5
	36,7	35,3	35,9	-
	33,3	-	36,5	-
	-	-	35,3	-
	-	-	35,4	-
	-	-	35,9	-
	<b>Průměrná hodnota</b>	<b>37,4 <math>\cong</math> 37</b>	<b>41,9 <math>\cong</math> 42</b>	<b>36,5 <math>\cong</math> 37</b>
Směrodatná odchylka	1,8 $\cong$ 2	7,1 $\cong$ 7	2,0 $\cong$ 2	2,5 $\cong$ 3

Tabulka 10 - Mikrotvrdość vzorek A (slitina hliníku 1050)

Dle výsledků měření mikrotvrdości dle Vickerse u vzorku A viz *Tabulka 10* je průměrná mikrotvrdość po boridování ve vzdálenosti 50 mikronů od povrchu rovna  $37 \pm 2$  HV a ve středu  $42 \pm 7$  HV. Ve stavu před boridováním je průměrná mikrotvrdość ve vzdálenosti 50 mikronů od povrchu rovna  $37 \pm 2$  HV a ve středu  $37 \pm 3$  HV.

Z těchto výsledků bylo zjištěno, že v případě povrchové tvrdosti slitiny hliníku 1050 nedošlo k žádným změnám.

### 7. 3. 2. Měď

	Po boridování		Před boridováním	
	Mikrotvrdot 50 mikronů od hrany vzorku [HV]	Mikrotvrdot ve středu vzorku [HV]	Mikrotvrdot 50 mikronů od hrany vzorku [HV]	Mikrotvrdot ve středu vzorku [HV]
Vzorek B (měď)	107	82,8	177	167
	120	89	176	171
	111	86,7	180	175
	106	86,6	176	179
	112	86,7	174	177
	98,4	83,5	179	-
	107	83,1	175	-
	107	84,6	-	-
	101	85,1	-	-
	107	84,6	-	-
	<b>Průměrná hodnota</b>	<b>107,6 <math>\cong</math> 108</b>	<b>85,27 <math>\cong</math> 85</b>	<b>176,7 <math>\cong</math> 177</b>
Směrodatná odchylka	5,6 $\cong$ 6	1,9 $\cong$ 2	2,0 $\cong$ 2	4,3 $\cong$ 4

Tabulka 11 - Mikrotvrdot vzorek B (měď)

Dle výsledků měření mikrotvrdoti dle Vickerse u vzorku B viz *Tabulka 11* je průměrná mikrotvrdot po boridování ve vzdálenosti 50 mikronů od povrchu rovna **108  $\pm$  6 HV** a ve středu **85  $\pm$  2 HV**. Ve stavu před boridováním je průměrná mikrotvrdot ve vzdálenosti 50 mikronů od povrchu rovna **177  $\pm$  2 HV** a ve středu **174  $\pm$  4 HV**.

Z těchto výsledků bylo zjištěno, že se tvrdost na povrchu i ve středu vzorku B mědi po boridování nezvýšila, ba naopak je nižší než ve stavu před boridováním.

	Po boridování		Před boridováním	
	Mikrotvrdotost 50 mikronů od hrany vzorku [HV]	Mikrotvrdotost ve středu vzorku [HV]	Mikrotvrdotost 50 mikronů od hrany vzorku [HV]	Mikrotvrdotost ve středu vzorku [HV]
Vzorek D (měď)	386	233	113	115
	404	263	112	118
	276	233	110	112
	270	301	111	110
	310	307	113	111
	-	-	112	-
	-	-	114	-
	<b>Průměrná hodnota</b>	<b>329,2 <math>\cong</math> 329</b>	<b>267,4 <math>\cong</math> 267</b>	<b>112,1 <math>\cong</math> 112</b>
Směrodatná odchylka	24,9 $\cong$ 25	14,2 $\cong$ 14	1,2 $\cong$ 1	2,9 $\cong$ 3

**Tabulka 12 - Mikrotvrdotost vzorek D (měď)**

Dle výsledků měření mikrotvrdotosti dle Vickerse u vzorku D viz *Tabulka 12* je průměrná mikrotvrdotost po boridování ve vzdálenosti 50 mikronů od povrchu rovna **329  $\pm$  25 HV** a ve středu **267  $\pm$  14 HV**. Ve stavu před boridováním je průměrná mikrotvrdotost ve vzdálenosti 50 mikronů od povrchu rovna **112  $\pm$  1 HV** a ve středu **113  $\pm$  3 HV**.

Z těchto výsledků bylo zjištěno, že v tomto případě došlo ke zvýšení tvrdosti jak na povrchu tak ve středu vzorku D mědi.

### 7. 3. 3. Titan

	Po boridování		Před boridováním	
	Mikrotvrdość 50 mikronů od hrany vzorku [HV]	Mikrotvrdość ve středu vzorku [HV]	Mikrotvrdość 50 mikronů od hrany vzorku [HV]	Mikrotvrdość ve středu vzorku [HV]
Vzorek E (titan)	507	277	192	179
	408	311	187	221
	365	235	175	193
	419	255	223	182
	358	231	186	196
	388	-	177	-
	-	-	183	-
	<b>Průměrná hodnota</b>	<b>407,5 <math>\cong</math> 408</b>	<b>261,8 <math>\cong</math> 262</b>	<b>189</b>
Směrodatná odchylka	49,4 $\cong$ 49	29,5 $\cong$ 30	14,9 $\cong$ 15	14,9 $\cong$ 15

Tabulka 13 - Mikrotvrdość vzorek E (titan)

Dle výsledků měření mikrotvrdości dle Vickerse u vzorku E viz *Tabulka 13* je průměrná mikrotvrdość po boridování ve vzdálenosti 50 mikronů od povrchu rovna **408  $\pm$  49 HV** a ve středu **262  $\pm$  30 HV**. Ve stavu před boridováním je průměrná mikrotvrdość ve vzdálenosti 50 mikronů od povrchu rovna **189  $\pm$  15 HV** a ve středu **194  $\pm$  15 HV**.

Z těchto výsledků bylo zjištěno, že v tomto případě došlo ke zvýšení tvrdosti jak na povrchu tak ve středu vzorku E.

### 7. 3. 4. Mosaz CuZnMnAl

	Po boridování		Před boridováním	
	Mikrotvrdotost 50 mikronů od hrany vzorku [HV]	Mikrotvrdotost ve středu vzorku [HV]	Mikrotvrdotost 50 mikronů od hrany vzorku [HV]	Mikrotvrdotost ve středu vzorku [HV]
Vzorek F (mosaz)	145	134	261	277
	135	203	262	273
	145	129	268	262
	137	138	250	289
	132	109	274	275
	-	-	264	-
	-	-	282	-
			253	-
			258	-
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>138,8 <math>\cong</math> 139</b>	<b>142,6 <math>\cong</math> 143</b>	<b>263,6 <math>\cong</math> 264</b>	<b>275,2 <math>\cong</math> 275</b>
Směrodatná odchylka	7,54 $\cong$ 8	31,8 $\cong$ 32	9,5 $\cong$ 10	8,6 $\cong$ 9

Tabulka 14 - Mikrotvrdotost vzorek F (mosaz CuZnMnAl)

Dle výsledků měření mikrotvrdotosti dle Vickerse u vzorku F viz *Tabulka 14* je průměrná mikrotvrdotost po boridování ve vzdálenosti 50 mikronů od povrchu rovna **139  $\pm$  8 HV** a ve středu **143  $\pm$  32 HV**. Ve stavu před boridováním je průměrná mikrotvrdotost ve vzdálenosti 50 mikronů od povrchu rovna **264  $\pm$  10 HV** a ve středu **275  $\pm$  9 HV**.

Z těchto výsledků bylo zjištěno, že po boridování došlo ke snížení tvrdosti jak na povrchu vzorku F tak v jejím středu.

## 8 Pin on disk test

Tento test se používá pro zjištění tribologických vlastností zkoumaného vzorku. Kromě koeficientu tření dané materiálové dvojice lze určit i charakter zkoumaného materiálu a jeho možnosti využití v praxi. [39] Jinak řečeno využívá se při měření opotřebení mezi dvěma materiály.

Při tomto testu se může simulovat jak jednosměrné, obousměrné, všesměrné i kvazisměrné opotřebení u jakékoli materiálové dvojice. [40]

*„Tato metoda je v současné době používána nejen k popisu tribologických vlastností systému, ale i k určení míry odolnosti povrchu při kontaktním namáhání.“* [41] Tento test se může provádět před zavedením nové kombinace materiálu do praxe, popřípadě pokud byly materiály podrobeny pouze mechanickému testování. Pin on disk test umožňuje rychlé porovnání materiálu za stejných podmínek. [40]

Test se provádí pomocí zařízení, kterému se říká tribometr. Ten je sestaven tak, aby během testu nedocházelo k ovlivnění výsledků vnějším prostředím. To je zajištěno ochranným krytem. Během samotného testu se pak kontroluje teplota, a vlhkost vzduchu uvnitř tohoto přístroje. [39]

Na povrch vzorku je přiloženo tak zvané Pin tělísko, které může být ve tvaru kuličky nebo válečku. Ve zvolené vzdálenosti od středu vzorku je tělísko zatíženo silou. Následně se disk začne otáčet a vykonávat předem stanovený počet cyklů. Tím dochází ke vzniku dráhy na povrchu vzorku, která je následně analyzována. Konkrétně se zkoumá její tvar, hloubka, okolí apod.

Výsledky tohoto testu jsou ovlivněny zvolenou zatěžující silou, velikostí a geometrií Pin tělíska, rychlostí otáčení, počtem cyklů, teplotou povrchu vzorku, zvoleným mazáním a dále stavem a vlastnostmi zkoumaného materiálu, případně Pin tělíska. [41]

### 8. 1. Pin tělísko [41]

Pin tělísko, které se při tomto testu využívá má nejčastěji tvar kuličky, pak můžeme hovořit o Ball on disk testu. Lze ale používat i válečkový tvar Pin tělíska.

#### 8. 1. 1. Materiál Pin tělíska

Výsledky zkoušky nejsou ovlivněny pouze materiálem testovaného vzorku, ale i materiálem Pin tělíska. Nejčastěji se jako Pin tělísko volí ocelová kulička z ČSN 14 109. Jelikož se jedná o snadno dostupný materiál, který ovšem může přinést problémy například u testování slinitých karbidů. Tvrdost a oteruvzdornost je u kuličky z tohoto materiálu značně menší, v průběhu testu pak dochází k otěru kuličky a její materiál zůstává na testovaném vzorku. To má za následek zmenšování kuličky a tím snižující se tlaku na stykovou plochu. *„Opotřebování kuličky tak má u různých materiálů vzorků jiný průběh a tím dochází ke zkreslení výsledků.“*

Tento problém pro tvrdé materiály lze vyřešit použitím válečkového Pin tělíska, nebo zvolením kuličku z jiného materiálu.

#### 8. 1. 2. Průměr tribologické stopy

Tento parametr ovlivňuje především dráhu, kterou Pin tělísko objede během testu. Čím delší je dráha tím se zvětšuje opotřebení tělíska. Velikost a charakter tohoto opotřebení se pak promítá do vzniklé stopy. Pro tvrdé materiály je proto lepší volit trajektorii o menším průměru se současným zvýšením počtu otáček. Tato změna se projeví na teplotě vzorku a Pin tělíska

během analýzy. To může způsobit, že v lokálních místech se bude materiál Pin tělíska stávat plastický a bude docházet k pevnému adheznímu ulpění materiálu na vzorku.

## 8. 2. Drsnost kontaktních ploch [41]

Různá drsnost vzorků vede k ovlivnění výsledků testu, jelikož drsnost je spojena s opotřebením i třením. Je proto nutné sledovat jakékoliv defekty na zkoumaných vzorcích, jelikož mohou působit jako vruby a vyvolávat napětí při mechanickém a tepelném namáhání.

*„Je často obtížné až nemožné provádět analýzy s požadovanou přesností na laboratorně neupraveném drsném povrchu.“* Z tohoto důvodu se k porovnání výsledků využívají normalizované i nenormalizované charakteristiky drsnosti povrchu.

Pokud je drsnost povrchu vysoká dochází během testu k přeskokům Pin tělíska což vede k velkému rozptylu hodnot, který se s délkou testu (počtem cyklů) zmenšuje, vlivem deformování nerovností. Naopak pokud je drsnost povrchu nízká dojde k okamžitému vytvoření tribologické stopy a nízkému rozptylu hodnot.

## 8. 3. Vyhodnocení Pin on Disk testu

Při vyhodnocování je důležité zmínit velikost zatížení Pin tělíska a jeho materiál, který ovlivňuje výslednou velikost koeficientu tření a výsledky samotného testu.

Kromě koeficientu tření, lze z Pin on disk testu získat i charakter a opotřebení vzniklé tribologické stopy a Pin tělíska. Výsledné opotřebení lze vyhodnotit například pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu. Profil tribologické stopy pak pomocí příčného výbrusu nebo lomu.

*„Cílem popsaných dokumentačních možností je zjistit míru poškození tribologické stopy, její geometrii a přesné stanovení dějů odehrávající se v dynamickém procesu“* [41]

### 8. 3. 1. Popis a výsledky testu

Pin on disk test byl proveden na Vzorku E – titan před a po boridování. Doba trvání testu byla 6 minut a 30 sekund při rychlosti 154 ot/min se zatížením 1000g. Celkem bylo provedeno devět stop, tři stopy na boridovaném vzorku a dvakrát tři stopy na dvou vzorcích v základním stavu. Šířka vzniklých stop byla vyhodnocena pomocí 3D MEASURING LASER MICROSCOPE OLS500.

Průměr vzniklé stopy a koeficient opotřebení jednotlivých vzorků je vidět v *Tabulka 15*. Dle těchto výsledků nedošlo ke změně před a po boridování.

Vzorek	Průměr stopy [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	Koeficient opotřebení [(mm <sup>3</sup> /Nm)10 <sup>-2</sup> ]	Směrodatná odchylka [(mm <sup>3</sup> /Nm)10 <sup>-2</sup> ]
Před boridováním	0,919	0,052	7122,1	414,5
Před boridováním	0,899	0,050	6885,7	791,1
Po boridování	0,934	0,067	7504,8	591,9

Tabulka 15 - Pin on disk test – výsledky

## 9 Mercedes test

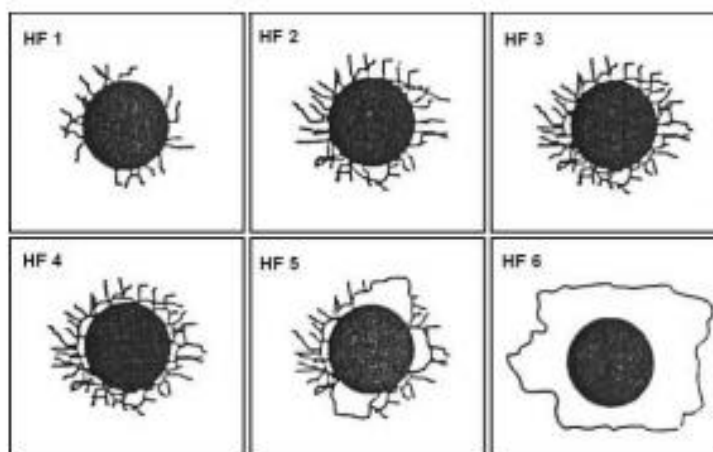
Mercedes test nebo také indentační vnikací zkouška patří mezi metody zkoumající adhezi vrstev. [39] Jedná se o statickou zkoušku, při které se do zkoumaného vzorku vtlačuje tělíčko, indentor Rockwell silou 1500 N. [42] Vtisk způsobuje pnutí, které vyvolá v místě vpichu vznik trhlin, které se šíří směrem k povrchu. [39]

### 9.1. Vyhodnocení Mercedes testu boridovaných vzorků

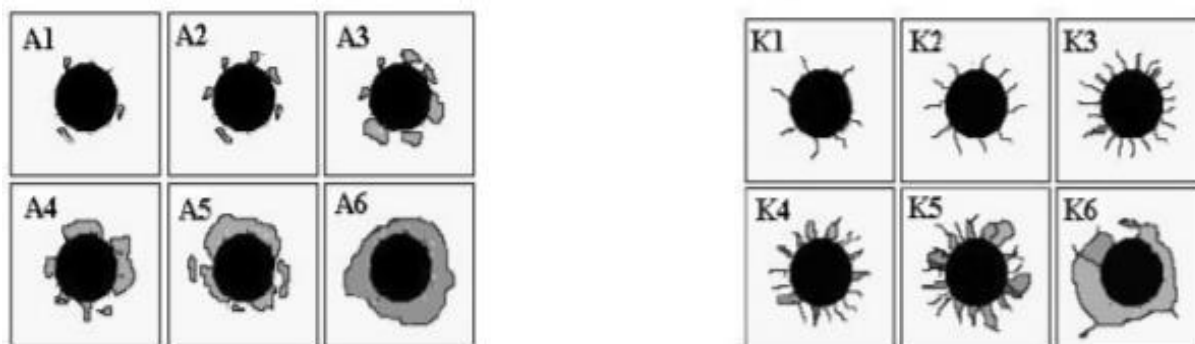
Vyhodnocuje se místo vpichu indentoru pomocí mikroskopu. Zkoumá se rozměr, rozvoj a charakter vzniklých trhlin, jelikož odpor vůči šíření trhlin je měřítkem adheze. Samotné vyhodnocení se pak provádí pomocí adhezního čísla, které charakterizuje stupeň popraskání či odloupení vrstvy a rozděluje vtisky do jednotlivých kategorií viz *Obrázek 17* a *Obrázek 16*. [39] [42] [43]

*„První třída popisuje jen drobné prasklinky, další pak vzrůstající stupeň poškození a poslední pak selhání adheze. Jako vyhovující se považují vzorky ve třídě HF 1 až HF 3.“* [44]

Mercedes test lze ovšem vyhodnocovat pro adhezi a kohezi zvlášť. V tomto případě se používají dvě tabulky, jež rozdělují výsledky testu do jednotlivých kategorií. V obou případech je vyhodnocení ovlivněno vyhodnocovatelem a jeho úhlem pohledu.



Obrázek 16 - Rozdělení do adhezních tříd [42]

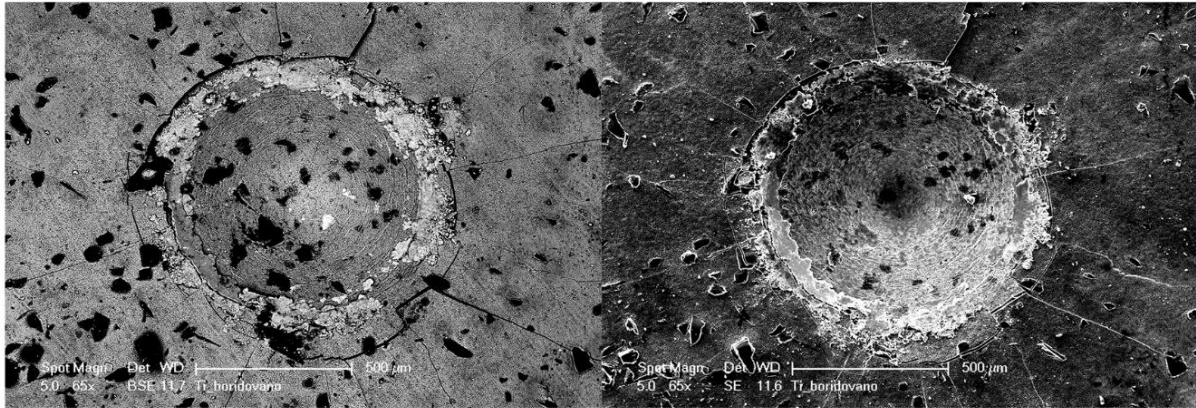


Obrázek 17 – Hodnocení porušení okolí vtisku Rockwellovým indentorem při zatížení 1500 N [39]



V této práci byl proveden Mercedes test na vzorku E – titanu po boridování. Snímek místa vpichu je vidět na *Obrázek 18*.

V případě porovnání těchto snímků s *Obrázek 16* by výsledek testu odpovídal kategorii HF3 – HF4 v případě vyhodnocování dle *Obrázek 17* pak kategorii A5 a K2.



**Obrázek 18 – SEM snímek místa vpichu**

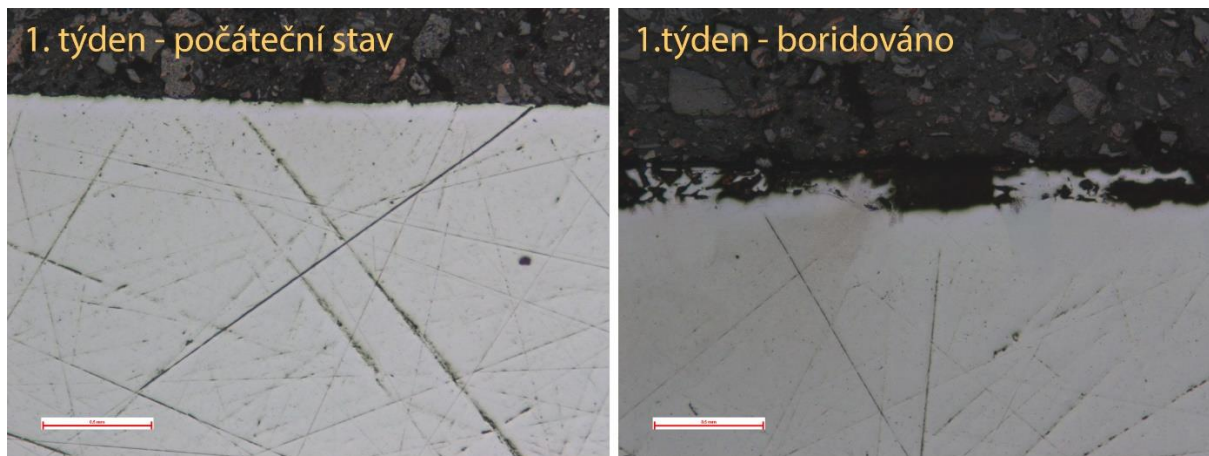
## 10 Korozi vzdornost

Koroze je fyzikálně-chemická reakce mezi kovem a prostředím, ve kterém se nachází. Jedná se o nežádoucí jev, který vede k zhoršení vlastností kovů. [45]

Korozi vzdornost nebo také odolnosti proti korozi či korozi odolnost je schopnost kovu odolávat vzniku koroze. V případě titanu je tato odolnost dána vznikem oxidické vrstvy  $\text{TiO}_2$  na povrchu. [46]

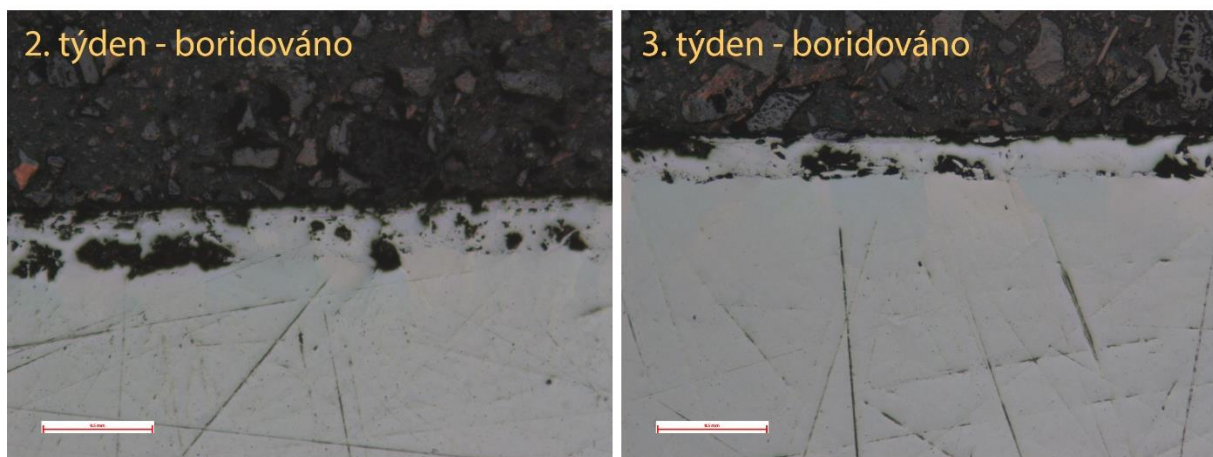
V případě této bakalářské práce byl zkoumán vliv koroze na boridovaný vzorek E – titan, tento vzorek byl ponechán v korozi komoře po dobu jednoho, dvou a tří týdnů.

Na *Obrázek 19* vidíme porovnání u boridovaného a neboridovaného vzorku titanu po prvním týdnu v korozi komoře. V případě neboridovaného vzorku nedošlo ke vzniku koroze. Naopak u boridovaného vzorku vznikla na povrchu korozi vrstva. Tato vrstva byla změřena na pěti místech a v průměru dosahovala hloubky 218  $\mu\text{m}$ .



**Obrázek 19 - Vzorek E - titan, 1. týden v korozi komoře, počáteční stav (vlevo), boridováno (vpravo)**

Na *Obrázek 20* vidíme boridovaný vzorek po 2. a 3. týdnech v korozi komoře. Korozi vrstva byla změřena opět na deseti místech. V případě vzorku, jenž byl v korozi komoře dva týdny dosahovala v průměru 297  $\mu\text{m}$ . V případě vzorku, jenž byl v korozi komoře tři týdny 234  $\mu\text{m}$ .



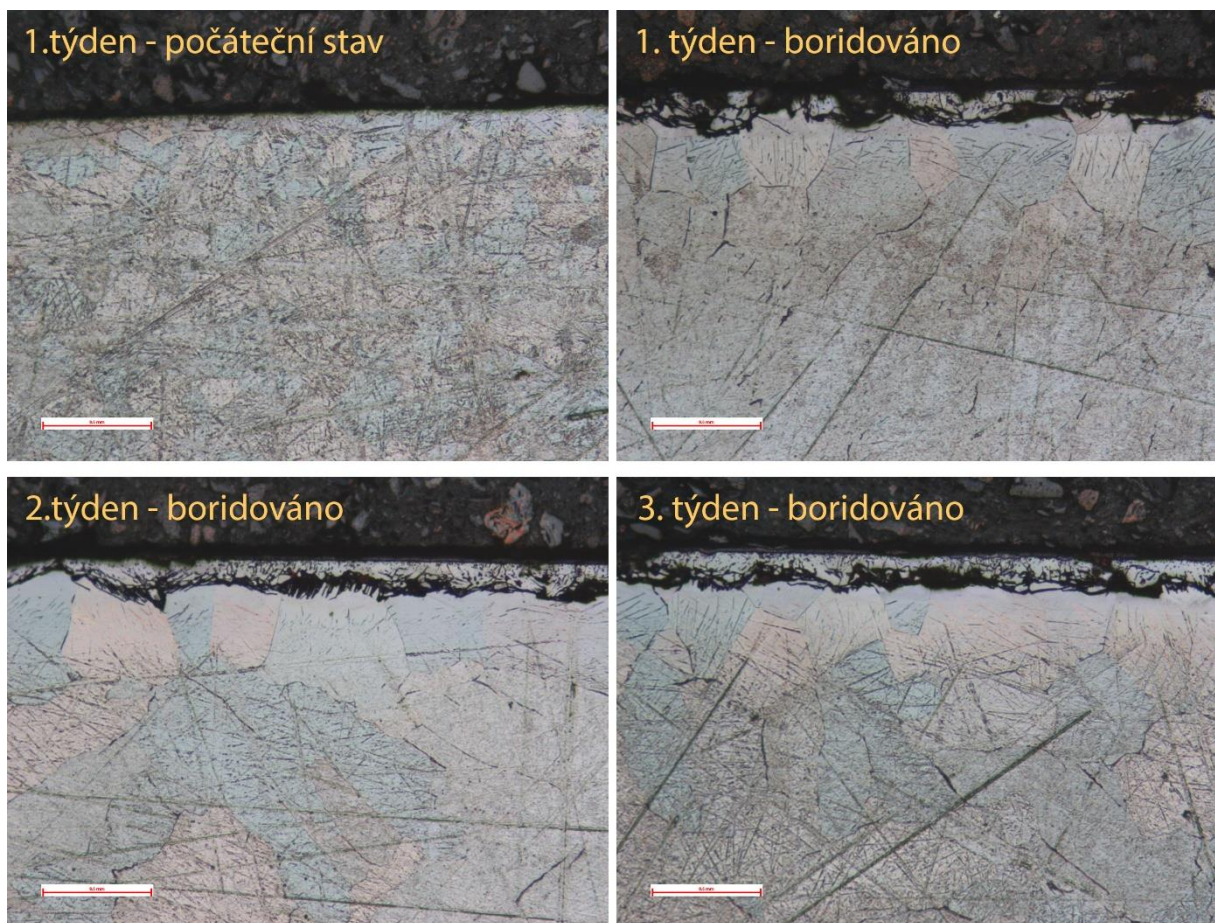
**Obrázek 20 - Vzorek E - titan, 2. a 3. týden v korozi komoře, boridováno**

Na *Obrázek 21* vidíme neboridované vzorek po 4. týdnech v korozní komoře. Ani v tomto případě nedošlo ke vzniku korozní vrstvy na povrchu vzorku.



**Obrázek 21 - Vzorek E – titan, 4. týden v korozní komoře, počáteční stav**

Na *Obrázek 22* vidíme vzorek E – titan po 1.-3. týdnu v korozní komoře v naleptaném stavu. Při porovnání s *Obrázek 19* a *Obrázek 20* lze říct, že koroze napadla boridovou vrstvou, která je složena z titanu a boridů, je to dáno tím, že prvky tvořící boridy jsou náchylnější na vznik koroze, jak čistý titan.



**Obrázek 22 – Vzorek E - titan, 1.-3. týden v korozní komoře, naleptáno**

## 11 Diskuse výsledků

Z metalografických výbrusů byla patrná boridová vrstva pouze na dvou vzorkách mědi (vzorek B - 331,31  $\mu\text{m}$  a vzorek C - 242,26  $\mu\text{m}$ ) a titanu (143  $\mu\text{m}$ ). V případě vzorku hliníku a mědi není vidět žádná ovlivněná oblast. To je dáno nejspíše tím, že zvolená metoda nebo její parametry nebyly pro tento druh materiálu vhodné.

Toto potvrdily i zkoušky mikrotvrdosti, kde v případě mědi (vzorek D) došlo ke zvýšení mikrotvrdosti po boridování z  $112 \pm 1$  HV na  $329 \pm 25$  HV a v případě titanu došlo ke zvýšení mikrotvrdosti z  $189 \pm 15$  HV na  $408 \pm 49$  HV. Naopak v případě hliníku a mosazi se tak nestalo.

Pin on disk test, který byl proveden na vzorku titanu neprokázal zlepšení mezi vzorkem před a po boridování. Průměr vzniklé stopy na vzorku před boridováním 0,919  $\mu\text{m}$  a po boridování 0,934  $\mu\text{m}$ . Rozdíl mezi těmito hodnotami je v rámci směrodatné odchylky. Nedošlo tedy ke zlepšení odolnosti proti opotřebení.

Dle tabulky pro vyhodnocování Mercedes testu, bylo místo vpichu zařazeno do kategorie A5 a K2. Lze říct, že odolnost proti kohezi je u boridovaného vzorku titanu velmi dobrá, na rozdíl oproti odolnosti proti adhezi.

Korozní odolnost byla zkoumána na vzorkách, které byly ponechány v korozní komoře. Následně byl provedený metalografický výbrus a zkoumán efekt boridové vrstvy na odolnost proti korozi. Bylo zjištěno, že boridovaný vzorek byl napaden přesně v místech boridové vrstvy zatímco neboridovaný vzorek nejevil ani po čtyřech týdnech žádné napadení. Toto je způsobeno tím, že koroze napadla prvky, které se dostali do povrchu materiálu během boridování.

## 12 Závěr

Boridování je metoda založena na difúzi atomů boru do krystalické mřížky boridovaného materiálu. Na povrchu materiálu dochází ke vzniku jednofázové nebo dvoufázové boridové vrstvy, které má za následek zlepšení povrchových vlastností jako je tvrdost nebo odolnost proti opotřebení. Toto tepelné zpracování povrchu se využívá především u železných materiálů, ale lze ho použít i na neželezné kovy a jejich slitiny.

Výsledná boridová vrstva je ovlivněna zvolenou metodou a jejími parametry. Obecně se dá říct, že nejdůležitější je správně zvolená teplota a čas boridování, které mají vliv na tloušťku této vrstvy.

Boridování neželezných kovů je možné uskutečnit několika metodami, nejvíce používána je metoda boridování v zásypu prášku. Tento způsob má výhodu v ceně a nenáročnosti provedení, a lze ho použít bez potíží na většinu neželezných kovů a jejich slitin jako jsou například titan nebo kobalt. Výjimku tvoří nikl a jeho slitiny, kde se musí brát zřetel na správný výběr boridovacího prášku. Pokud zvolíme prášek, který obsahuje karbid křemíku, dojde při boridování nejen ke vzniku boridové vrstvy, ale i vrstvy silicidové. Tato vzniklá povrchová vrstva se vyznačuje nízkou tvrdostí a pórovitostí.

Při boridování titanu a jeho slitin touto metodou vzniká boridová vrstva složená z boridů titanu. Její tloušťka je ovlivněna zvolenými parametry, na rozdíl však od niklu a jeho slitin a kobaltu neplatí, že se zvyšující teplotou a časem dochází i ke zvýšení boridové vrstvy. To je ovlivněno vznikem TiB whiskerů a jejich délkou. Nejvyšší tvrdost byla v případě titanu i niklu a jejich slitin naměřena na povrchu boridové vrstvy.

Boridování kobaltu v zásypu prášku vede ke vzniku boridové vrstvy složené z boridů a silicidů kobaltu. Nejvyšší tvrdost byla naměřena na jejím povrchu.

Experimentální část této práce se věnovala neželeznými kovům a jejich slitinám, které byly boridovány právě metodou v zásypu prášku. Jednalo se o vzorky slitiny hliníku 1050, mědi, titanu a mosazi CuZnMnAl. Dle teoretické části této práce bylo očekáváno, že boridová vrstva zlepší tvrdost boridovaného materiálu. Tento předpoklad se potvrdil u jednoho vzorku mědi a titanu, v případě vzorku slitiny hliníku 1050 a mosazi CuZnMnAl se toto nestalo, je to dáno tím, že během boridování nevznikla boridová vrstva.

Vzorek titanu byl následně dále zkoumán pomocí Pin on disk testu, Mercedes testu a na odolnost proti korozi.

Pin on disk test je test, zkoumající tribologické vlastnosti materiálu. A to pomocí Pin tělíska, kuličky, která po určitou dobu a s určitým zatížením krouží po zkoumaném vzorku. Následně se tento test vyhodnocuje pomocí mikroskopu, ve kterém se měří šířka stopy. V případě vzorku titanu, byl tento test proveden jak na vzorku před boridováním, tak na vzorku po boridování. Následné měření průměru stopy neprokázalo zlepšení odolnosti proti opotřebení na boridovaném vzorku.

Mercedes test zkoumá odolnost proti kohezi a adhezi. Test se provádí pomocí vpichu indentoru do zkoumaného vzorku. Tento vpich se zkoumá pomocí mikroskopu. Rozměr, rozvoj a charakter vzniklých trhlin se porovnává s tabulkou, podle které se přiřadí kategorie adheze a koheze. Tento test byl proveden na boridovaném vzorku titanu. Podle následného zkoumání místa vpichu byl výsledek přirovnán do kategorií A5 a K2.

Odolnost proti korozi byla zkoumán opět na boridovaném vzorku titanu pomocí metalografie. Bylo zjištěno boridování titanu v tomto případě zapříčinilo menší odolnost proti korozi, jelikož došlo ke koroznímu napadení právě boridované vrstvy.

## Seznam použitých zdrojů

1. Bodycote. Boridování. *Bodycote*. [Online] 2019. [Citace: 11. Říjen 2020.] <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/vytvrzovani-povrchu-s-naslednym-kalenim/boridovani/>.
2. Makuch, N. a Kulka, M. Fracture toughness of hard ceramic phases produced on Nimonic 80A-alloy by gas boriding. *Ceramics International*. místo neznámé : ELSEVIER, 2015.
3. Campos-Silva, I., a další. Grown kinetics and mechanical properties of boride layers formed at the surface of the ASTM F-75 biomedical alloy. [autor knihy] A. Matthews. *Surface and Coatings Technology*. místo neznámé : ELSEVIER, 2013.
4. Lenntech. Boron - B. *lenntech.com*. [Online] lenntech, 2020. [Citace: 29. Říjen 2020.] <https://www.lenntech.com/periodic/elements/b.htm>.
5. Stehlík, M. is.muni.cz. *Vlastnosti prvku*. [Online] 24. 10 2005. [Citace: 13. Říjen 2020.] <https://is.muni.cz/do/sci/UChem/um/spchp/ch05s01.html>.
6. Bor. *Prvky*. [Online] 2017. [Citace: 11. Říjen 2020.] <http://www.prvky.com/5.html#vlastnosti>.
7. The Editors of Encyclopaedia Britannica. Boron. *britannica.com*. [Online] 26. 10 2020. [Citace: 6. Prosinec 2020.] <https://www.britannica.com/science/boron-chemical-element>.
8. Pappas, Stephanie. Facts About Boron. *livescience.com*. [Online] LIVESCIENCE, 5. 11 2014. [Citace: 6. 12 2020.] <https://www.livescience.com/28674-boron.html>.
9. ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY. Boron. *rsc.org*. [Online] Royal Society of Chemistry, 2020. [Citace: 6. 12 2020.] <https://www.rsc.org/periodic-table/element/5/boron>.
10. Skálová, Jana, Koutský, Jaroslav a Motyčka, Vladislav. *Nauka o materiálech*. Plzeň : Západočeská Univerzita v Plzni, 2000. 80-7082-677-0.
11. Duan, Yonghua, a další. Characteristics, wear and corrosion properties of borided pure titanium by pack boriding near  $\alpha \rightarrow \beta$  phase transition temperature . [autor knihy] P. Vincenzini. *Ceramics International*. místo neznámé : ELSEVIER, 2020.
12. Kulka, Michal. *Current Trends in Boriding*. Cham : Springer, 2019. 1868-1212.
13. *Vytváření otěruvzdorných povrchových vrstev boridováním*. Gerstenberger, Jan. 4, místo neznámé : MM Průmyslové spektrum, 2003. 030405.
14. BorTec. Surface hardening of metals with EKABOR products. *bortec.de*. [Online] BorTec. [Citace: 22. Říjen 2020.] <https://bortec.de/en/blog/ekabor/>.
15. Anthymidis, K.G., a další. Boriding of ferrous and non ferrous metals and alloys in fluidised bed reactor. *Surface Engineering*. Huddersfield : The Charlesworth Group, 2002.
16. Černohorský, Bc. Jiří. otik.zcu.cz. *Možnosti zvyšování řezivosti nástrojů z RO*. [Online] 2013/2014. [Citace: 26. Říjen 2020.] [https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/15068/1/DP\\_Cernohorsky\\_Zvysovani\\_rezivosti\\_RO.pdf](https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/15068/1/DP_Cernohorsky_Zvysovani_rezivosti_RO.pdf).
17. Makuch, N., Kulka, M. a Piasecki, A. The effects of chemical composition of Nimonic 80A-alloy on the microstructure and properties of gas - borided layer. [autor knihy] A. Matthews. *Surface and Coatings Technology*. místo neznámé : ELSEVIER, 2015.

18. Makuch, N. a Kulka, M. Microstructural characterization and some mechanical properties of gas-borided Inconel 600-alloy. [autor knihy] H. Rudolph. *Applied Surface Science*. místo neznámé : ELSEVIER, 2014.
19. Bibusmetals. INCONEL® Alloy 600. *bibusmetals.cz*. [Online] BIBUS METALS s.r.o., 2020. [Citace: 4. Listopad 2020.] <https://www.bibusmetals.cz/materialy/nikl-niklove-slitiny/inconelr-alloys/inconelr-alloy-600/>.
20. Atar, Erdem, Kayali, E. Sabri a Cimenoglu, Huseyin. Characteristics and wear performance of borided Ti6Al4V alloy. [autor knihy] A. Matthews. *Surface and Coatings Technology*. místo neznámé : ELSEVIER, 2007.
21. Kara, Gokhan a Purcek, Gencaga. Boriding behaviour of titanium alloys with different crystalline structures. *Surface Engineering*. místo neznámé : Taylor & Francis, 2019.
22. NeoNickel. Slitiny kobaltu. *neonickel.com*. [Online] NeoNickel. [Citace: 7. Listopad 2020.] <https://www.neonickel.com/cs/alloys/slitiny-kobaltu/>.
23. Arcam EBM system. ASTM F75 CoCr Alloy. *arcam.com*. [Online] [Citace: 7. Listopad 2020.] <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-ASTM-F75-Cobalt-Chrome.pdf>.
24. prvky. Molybden. *prvky.com*. [Online] 2017. [Citace: 28. Listopad 2020.] <http://www.prvky.com/42.html>.
25. Kahvecioglu Feridun, O., a další. Electrochemical boriding of molybdenum in molten borax. *Surface Engineering*. místo neznámé : Institute of Materials, Minerals and Mining, 2015.
26. PROAL. Hliník. *proal.cz*. [Online] NPS PROAL S.R.O, 2019. [Citace: 1. Květen 2021.] <https://proal.cz/hlinik/>.
27. WOLFTEN. Hliník. *Wolften.pl*. [Online] WOLFTEN. [Citace: 1. Květen 2021.] <https://wolften.pl/cs/hlinik/>.
28. PROAL. EN-AW-1050A. *proal.cz*. [Online] NPS PROAL S.R.O, 2019. [Citace: 1. Květen 2021.] <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-1050a/>.
29. Feropol. Slitiny hliníku. *feropol*. [Online] Feropol, 2012. [Citace: 1. Květen 2021.] <http://www.feropol.cz/cz/product/slitiny-hliniku/1/0/>.
30. METAL CENTRUM. Měď. *metalcentrum.cz*. [Online] MetalCentrum s.r.o, 2021. [Citace: 1. Květen 2021.] <https://www.metalcentrum.cz/med/>.
31. Total Materia. Vlastnosti titanu. *totalmateria.com*. [Online] Key to Metals AG, 2021. [Citace: 1. Květen 2021.] <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=TitaniumProperties&LN=CZ>.
32. Mosaz. *litomysky.cz*. [Online] 2020. [Citace: 1. Květen 2021.] <http://www.litomysky.cz/mat/ms.htm>.
33. Procházka, Karel. Metalografie 1. *sspu-opava.cz*. [Online] 2011/2012. [Citace: 10. Duben 2020.] [https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/\\_sablony/KOM\\_IV/VY\\_52\\_INOVACE\\_J-06-01.pdf](https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/KOM_IV/VY_52_INOVACE_J-06-01.pdf).
34. Elfmarková, Miroslava. Základy metalografie. *gorkzy.cz*. [Online] 2012. [Citace: 10. Duben 2021.] <https://www.gorkzy.cz/wp-content/uploads/2017/12/20Z%C3%81KLADY-METALOGRAFIE.pdf>.

35. Průcha, Vojtěch. Příprava metalografického výbrusu. *courseware.zcu.cz*. [Online] 2019. [Citace: 10. Duben 2021.]  
<https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=170073>.
36. Skálová, Jana, Kovařík, Rudolf a Benedikt, Vladimír. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2000.
37. Zkoušky tvrdosti. *opi.zcu.cz*. [Online] [Citace: 10. Duben 2021.]  
[https://www.opi.zcu.cz/Zkousky\\_tvrlosti.pdf](https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf).
38. MĚŘENÍ TVRDOSTI MATERIÁLŮ A ZPRACOVÁVÁNÍ ZJIŠTĚNÝCH HODNOT. *vutbr.cz*. [Online] 2010. [Citace: 10. Duben 2021.]  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27306](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27306).
39. Sosnová, Martina. Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně-kohezivního a tribologického chování. *opi.zcu.cz*. [Online] 2006. [Citace: 4. Říjen 2021.]  
[https://www.opi.zcu.cz/FRVS\\_zprava\\_dalsi\\_studium\\_sosnova.pdf?fbclid=IwAR2hvfq2L15fvBZwPhcwzU-QBJx5wwnolKP-ErCrKibO8IurCb015-tnO57s](https://www.opi.zcu.cz/FRVS_zprava_dalsi_studium_sosnova.pdf?fbclid=IwAR2hvfq2L15fvBZwPhcwzU-QBJx5wwnolKP-ErCrKibO8IurCb015-tnO57s).
40. Pin on Disk Wear Testing. *element.com*. [Online] Element Materials Technology, 2021. [Citace: 10. Duben 2021.] <https://www.element.com/more-sectors/medical-device/pin-on-disk-wear-testing>.
41. Kříž, Antonín. TRIBOLOGICKÉ ANALÝZA PIN-ON-DISC. *opi.zcu.cz*. [Online] 2004. [Citace: 10. Duben 2021.] [https://www.opi.zcu.cz/TRIBOLOGICKA\\_ANALYZA\\_PIN-ON-DISC.pdf](https://www.opi.zcu.cz/TRIBOLOGICKA_ANALYZA_PIN-ON-DISC.pdf).
42. Fořt, Tomáš. CHARAKTERIZACE NANOSTRUKTUR DEPONOVANÝCH PVD A CVD TECHNOLOGIEMI. *vutbr.cz*. [Online] 2009. [Citace: 10. Duben 2021.]  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=20276](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=20276). ISBN 80-214-.
43. Horník, Jakub, Hájková, Pavlína a Anisimov, Evgeniy. VYUŽITÍ PVD POVLAKŮ PRO FUNKČNĚ GRADOVANÉ MATERIÁLY. *dk.upce.cz*. [Online] [Citace: 10. Duben 2021.]  
[https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/48762/HornikJ\\_VyuzitiPVD\\_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/48762/HornikJ_VyuzitiPVD_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
44. Novotný, Tomáš. Studium mechanických. *is.muni.cz*. [Online] 2012. [Citace: 10. Duben 2021.] [https://is.muni.cz/th/b2ea3/Novotny\\_Diplomova\\_prace.pdf](https://is.muni.cz/th/b2ea3/Novotny_Diplomova_prace.pdf).
45. Novák, Pavel. Koroze kovů. *ukmki.vscht.cz*. [Online] [Citace: 16. Květen 2021.]  
<https://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze%20kov%C5%AF.pdf?redirected>.
46. Brenner, Otakar. Využití titanu a jeho slitin v protikorozi ochraně. *engineering.sk*. [Online] [Citace: 16. Květen 2021.] <https://www.engineering.sk/clanky2/povrchove-upravu/3974-vyuziti-titanu-a-jeho-slitin-v-protikorozi-ochrane>.