

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Testování korozní odolnosti kompozitních laserem navařených materiálů  
s vysokým poločasem rozpadu

Autor: **Bc. Jan Tittel**

Vedoucí práce: **prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**

Akademický rok 2018/2019

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan TITTEL**  
Osobní číslo: **S17N0110P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**  
Název tématu: **Testování korozní odolnosti kompozitních laserem navařených materiálů s vysokým poločasem rozpadu.**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod.
2. Technologie laserového navařování.
3. Současný stav poznání.
4. Potenciodynamická korozní zkouška.
5. Experimentální program.
6. Testování korozní odolnosti laserových návarů.
7. Diskuse výsledků.
8. Závěr.

Rozsah grafických prací: fotodokumentace, obrázky

Rozsah kvalifikační práce: 30-40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

**TOYSERKANI, E., KHAJEPOUR, A., CORBIN, S.** *Laser cladding*. CRC Press LLC: 2005. ISBN 0-8493-2172-7

**JONES, A. D.** *Principles and Prevention of Corrosion*. Pearson Education Limited 2014. ISBN 978-1292042558

**VŠCHT v Praze.** *Stanovení korozní rychlosti elektrochemickými polarizačními metodami* (<http://old.vscht.cz/document.php?docId=9567>)

**ROBERGE, P. R.** *Handbook of Corrosion Engineering*. The McGraw-Hill Companies 2012. USA. ISBN 0-07-076516-2

*aktuální odborné články z citačních databází Web of Science a Scopus zaměřené na problematiku testování korozní odolnosti slitin na bázi mědi (od roku 2010)*

Vedoucí diplomové práce:

**Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž**

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce:

**Ing. Pavla Klufová**

Centrum energetického výzkumu

Datum zadání diplomové práce:

**5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce:

**24. května 2019**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž  
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. října 2018

## **Prohlášení o autorství**

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

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

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Tittel	Jméno Jan		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“			
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) prof. Dr. Ing. Kříž, IWE.		Jméno Antonín	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KMM			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Testování korozní odolnosti kompozitních laserem navařených materiálů s vysokým poločasem rozpadu			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2019
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	66	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	65	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	1
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Předložená diplomová práce se zabývá laserovým navařováním kompozitní vrstvy na bázi měď-čedič. Dále se zabývá testováním korozní odolnosti a vlivu množství přidaného prášku čediče do prášku mědi.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>technologie laserového navařování; korozní odolnost; korozní zkoušky; čedič-měď</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Tittel	Name Jan
<b>FIELD OF STUDY</b>	3911T016 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy“	
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) prof. Dr. Ing. Kříž, IWE.	Name Antonín
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b> <b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Corrosion resistance testing of composite laser cladded materials with long half-lives	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2019
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

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

<b>TOTALLY</b>	66	<b>TEXT PART</b>	65	<b>GRAPHICAL PART</b>	1
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The diploma thesis deals with laser cladding of copper-basalt composite layer. It also deals with testing the corrosion resistance and with the influence of the amount of added basalt powder to the copper powder.
<b>KEY WORDS</b>	laser cladding; corrosion resistance; corrosion tests; basalt-copper

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu přiložené diplomové práce panu prof. Dr. Ing. A. Křížovi, IWE a paní konzultantce Ing. P. Bartoň Klufové, Ph.D a všem dalším, kteří mi pomohli při řešení zadané problematiky.

Dále bych chtěl poděkovat průmyslové společnosti LaserTherm spol. s.r.o. a NTC ZČU v Plzni za umožnění realizace laserových návarů.

Níže uvedené výstupy a výsledky experimentálního programu byly realizovány díky finanční podpoře aplikovaného výzkumu projektu TAČR Zéta TJ01000316.

Diplomová práce vznikla na základě řešení studentského projektu SGS – 2018-051 „Aplikace nových postupů úpravy a testování povrchu i objemových materiálů za účelem zvýšení uplatnitelnosti konstrukčního celku nebo pracovního nástroje v průmyslové praxi“.

## Obsah

Úvod.....	10
1 Ukládání vyhořelého jaderného paliva do hlubinných úložišť .....	11
1.1 Expoziční prostředí.....	12
1.2 Hlubinná úložiště.....	13
2 Technologie laserového navařování.....	14
2.1 Popis technologie .....	14
2.1.1 Geometrické charakteristiky jednostopého laserového návaru .....	15
2.2 Lasery.....	17
2.2.2 Pevnolátkové lasery .....	18
2.3 Přívod přídavného materiálu.....	19
2.4 Přídavné prášky.....	20
3 Technologie laserového navařování – současný stav poznání .....	22
3.1 Laserové navařování vrstvy mědi na ocel AISI SS316L .....	22
3.2 Mikrostruktura a vlastnosti laserem navařené vrstvy mědi na čisté železo .....	23
3.3 Laserové navařování fosforového bronzu.....	24
4 Koroze .....	26
4.1 Korozní zkoušky .....	27
4.1.1 Potenciodynamická korozní zkouška .....	28
4.1.2 Korozní zkouška solnou mlhou .....	31
5 Experimentální program.....	32
5.1 Popis experimentálního programu .....	32
5.1.1 Cíle experimentálního programu .....	32
5.1.2 Použité stroje, přístroje a zařízení.....	33
5.1.3 Specifikace zařízení laserového navařování.....	34
5.1.4 Značení vzorků .....	34
5.2 Charakteristika základního a přídavných materiálů.....	36
5.2.1 Základní materiál .....	36
5.2.2 Měď .....	37
5.2.3 Čedič.....	38
5.2.4 Hliníkový bronz.....	40
6 Potenciodynamická korozní zkouška.....	41
6.1 Návrh a výroba korozní cely pomocí 3D tisku .....	44
6.2 Potenciodynamická korozní zkouška (korozní cela 1,77 <b>cm<sup>2</sup></b> ) .....	46
6.3 Potenciodynamická korozní zkouška (korozní cela 0,28 <b>cm<sup>2</sup></b> ) .....	48
6.4 Porovnání výsledků potenciodynamické korozní zkoušky.....	49
7 Korozní zkouška v solné mlze .....	50
8 Metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů.....	52
8.1 Metalografické hodnocení pomocí optického světelného mikroskopu .....	53
8.2 Metalografie na ŘEM .....	56
9 Diskuse výsledků.....	59
10 Závěr.....	61
11 Seznam použité literatury.....	62
12 Seznam obrázků .....	65
13 Seznam tabulek .....	66



## Seznam použitých zkratk

SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
CASTOR	Cask for storage and transport of radioactive material
ADTT	Averator driven transmutation technologies
TOO	Tepelně ovlivněna oblast
EDX	energieově disperzní mikroanalýza
SEM	řádovací elektronový mikroskop
$v_{corr}$	korozní rychlost [ $\mu\text{m}/\text{rok}$ ]
M	molární hmotnost [ $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]
n	látkové množství [mol]
F	Faradayova konstanta [ $\text{C}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]
NSS	roztok chloridu sodného
AASS	okyselený roztok chloridu sodného
CASS	okyselený chlorid sodný a chlorid měďnatý
OM	optický mikroskop
Re	mez kluzu
Rm	mez pevnosti
A	tažnost
KV	nárazová práce
WE	pracovní elektroda
RE	referenční elektroda
CE	protielektroda
Rp	polarizační odpor
$i_{corr}$	korozní proud [ $\mu\text{A}$ ]
$E_{corr}$	smíšený elektrochemický potenciál [mV vs. Ref]
ABS	Akrylonitril Butadien Styren
PLA	Polylaktidová vlákna
PVC	Polyvinylchlorid

## Úvod

Ukládání vyhořelého radioaktivního paliva do hlubinných uložišť patří aktuálně k diskutovaným problémům na celém světě. Z tohoto důvodu se v ČR, ale také dalších zemích využívajících jaderné technologie, stává stále aktuálnějším předmětem debat ukládání vyhořelého radioaktivního paliva. Za skladování použitého jaderného paliva v dočasných skladech a bazénech zodpovídá v ČR dle zákona provozovatel jaderné elektrárny. Za následné ukládání do hlubinných uložišť bude zodpovídat Správa uložišť radioaktivních odpadů (dále SÚRAO). Hlavním kontrolním orgánem, který dozoruje dodržování správných postupů při nakládání s palivem, je Státní úřad pro jadernou bezpečnost (dále SÚJB).

Tato diplomová práce je zaměřena na testování korozní odolnosti kompozitních laserových návarů na bázi měď – čedič a zhodnocení možnosti aplikace tohoto návaru pro povrchovou úpravu kontejnerů v hlubinných uložistiích. Aplikace těchto materiálů proběhne technologií laserového navařování s přídatným materiálem ve formě prášku. Cílem korozních zkoušek je stanovení korozní rychlosti návarů a predikce korozní rychlosti za časové období 100 000 let. Tato hodnota časového období byla stanovena SÚJB jako časový úsek srovnatelný s geologickými časovými obdobími bez tektonických zlomů a seismické aktivity.

## 1 Ukládání vyhořelého jaderného paliva do hlubinných úložišť

Na konci každého palivového cyklu v jaderné elektrárně se palivové články vyjmou z aktivní zóny a jsou následně pod vodou převezeny do tzv. bazénu. Bazén je umístěn v blízkosti reaktoru a palivové články zde zůstávají po dobu 5 až 10 let. Za toto období klesne jejich radioaktivita a teplota přibližně na polovinu a je tak umožněna další manipulace s palivovými články do meziskladů nacházejících se v prostorách jaderné elektrárny. Zde je vyhořelé palivo skladováno ve speciálních kontejnerech CASTOR (Cask For Storage and transport of radioactive material) přibližně 50 let. Model kontejneru CASTOR – 440/84 je zobrazen na Obr. 1 [1, 2].

V současné době se předpokládá ukládání obalových souborů do hlubinných úložišť. V ČR je naplánováno vybudování a uvedení těchto úložišť do provozu do roku 2065 z důvodu končící životnosti již naplněných kontejnerů. Současně s budováním hlubinných úložišť probíhá výzkum pro opakované využití již použitého jaderného paliva technologií transmutace ADTT (Accelerator Driven Transmutation Technologies). Jedná se o vývoj technologií směřujících k dalšímu využití potenciálu vyhořelého jaderného paliva přeměnou radionuklidů za účelem podstatně zkrátit dobu, po kterou jsou odpady nebezpečné pro životní prostředí svou radioaktivitou. Princip ADTT spočívá v roztavení radioaktivního odpadu v těžké vodě a jeho následné ostřelování neutrony. Neutrony vznikají v olověném terčíku, na který dopadá svazek protonů urychlených mohutným lineárním urychlovačem. Neutrony tak rozloží radioaktivní izotopy buď na radioizotopy s krátkým poločasem rozpadu, nebo na neaktivní izotopy. Pozůstatky odpadů z reaktoru používajícího technologii ADTT poté postačí uložit do hlubinného úložiště na 10 až 50 let. Během této doby se stanou neškodnými. Současnému průmyslovému využití ADTT brání nízká účinnost dodávky neutronů prostřednictvím urychlovače protonů a vysoká cena výstavby tohoto zařízení [3, 4].



Obrázek 1 - Kontejner CASTOR – 440/84  
[5]

## 1.1 Expoziční prostředí

Jako vhodné geologické podloží pro výběr lokality hlubinného úložiště bylo ve světě zkoumáno několik typů hornin: krystalinické (především žuly nebo ruly) a usazené (jíly, tuf, solná ložiska). Ve všech těchto horninách byla zjištěna možnost výstavby a bezpečného provozu úložiště. Krystalinické horniny byly již tamní vládou schváleny ve Finsku, Švédsku a Japonsku. Pevné jílovcovité horniny byly naopak vybrány ve Švýcarsku a Francii. Na území České republiky se předpokládá vybudování hlubinného úložiště v krystalinických horninách, jako jsou žuly, ruly a další podobné [6].

Myšlenku na vznik hlubinného ukládání použitého radioaktivního paliva lze zařadit již do roku 1990. V současné době se v ČR vybírá několik lokalit vhodných pro hlubinná úložiště vyhořelého radioaktivního paliva. Z geologického hlediska se hledají vhodné stabilní horninové oblasti, jejichž vývoj byl geology sledován po dobu desítek až stovek let a naznačuje relativně neměnnou seismickou aktivitu a geologické zlomy po dobu 100 000 let. Na těchto místech se provádí geofyzikální průzkum skládající se z odběru půdy v hloubkách 1-2 metrů. Následovat bude vrt do hloubky 500-1000 metrů, který prokáže geologickou stavbu podloží. Z vyhodnocení získaných údajů doporučí SÚRAO v roce 2025 dvě nejvhodnější lokality vládě ČR, která následně rozhodne o definitivním umístění hlubinného úložiště [1, 4].



Obrázek 2 - Vhodné lokality jaderných úložišť [7]

## 1.2 Hlubinná úložiště

Koncepce hlubinného úložiště v ČR se podobá obdobným projektům v zahraničí. Konečná podoba úložiště bude koncipována s ohledem na konkrétní lokalitu. Plocha aktivních provozů v povrchové části úložiště bude sloužit pro administrativní budovy a manipulaci s dovezeným vyhořelým radioaktivním odpadem. Tyto prostory budou propojeny s podzemními prostory svislými přístupovými šachtami [6].

Koncepce uložení vyhořelého radioaktivního paliva bude složena z geologické, zcela přírodní a člověkem vytvořené inženýrské bariéry. Inženýrskou bariérou bude vícevrstvý ukládací kontejner zajišťující dlouhodobou ochranu před zbytkovou radiací. Tyto kontejnery musí zároveň vykazovat dlouhodobou těsnost a chemickou stálost v expozičním prostředí hlubinného úložiště. Jednotlivé materiály, ze kterých budou kontejnery vyrobeny, musí spolehlivě plnit specifické požadavky na vlastnosti, jakými jsou např. odolnost vůči všem typům koroze nebo 100 % bariéra proti zbytkové radioaktivitě uloženého jaderného paliva. Ukládací kontejnery budou obklopeny jílovitým materiálem (bentonitem), který je ochrání před kontaktem s vodou. Bentonit ve vlhkém prostředí nabobtná a utěsňuje kontejner v uloženém vrtu. Jako přírodní bariéra bude sloužit horninový masív tvořený krystalinickými horninami. Mezi tyto horniny patří vyvřelé (granit) a metamorfované horniny (migmatit a granulit). Přírodní bariéra bude tím nejstabilnějším prvkem bezpečnosti celého úložného systému. Bude zabraňovat nejen úniku radionuklidů, ale také poškození úložných prostor vnějšími vlivy. Procesy, které mohou v úložišti nastat, lze zkoumat již v existujících přírodních ložiscích. Jedním z nich je ložisko uranu v lokalitě Ruprechtov v západních Čechách, kde byl zkoumán pohyb uranu v jílech. Výzkum neprokázal žádný pohyb uranu v podloží [6].

## 2 Technologie laserového navařování

Počátky této technologie zasahují do 70. let 20. století. První větší rozvoj laserového navařování na skutečných strojních součástech však proběhl až 90. letech. Díky laseru má tvorba laserových návarů obrovský ekonomický význam pro snižování výrobních nákladů u oprav a údržby nástrojů. Technologie laserového navařování (laser cladding) využívá vysoké hustoty energie laserového paprsku k natavení jak základního, tak přídavného materiálu ve formě prášku nebo drátu. Během procesu navařování dochází mezi přídavným a základním materiálem k vytvoření úzké oblasti, ve které se oba natavené materiály metalurgicky spojí. Solidifikace kovů má za následek vytvoření pevných vazeb předurčujících navařenému povlaku dobrou adhezi k základnímu materiálu a kohezi. Cílem laserového navařování je vytvořit návar požadovaných vlastností a chemického složení na výchozím substrátu tak, aniž by došlo k výraznému promíšení ( $> 10 \%$ ) mezi oběma kovy. Tepelně ovlivněnou oblast (TOO) lze obecně považovat za minimální a tak lze navařovat také menší a tvarově složitější součásti bez vzniku výrazných tvarových a rozměrových deformací [8, 9, 10].

### 2.1 Popis technologie

Základem technologie laserového navařování je vytvoření funkční vrstvy přídavného návaru na povrchu substrátu. Využita je vysoká hustota energie laserového svazku pro natavení přídavného materiálu a povrchu základního materiálu. Spojením přídavného materiálu se základním vznikne laserový návar, který má veškeré atributy heterogenního svarového spoje. Přídavný materiál je přiveden na základní materiál jednofázovým procesem povlakování, nicméně podmínkou jednofázového procesu navařování je úplná rozpustnost materiálu substrátu a prášku v tuhém stavu. V případě oboustranné vzájemné nerozpustnosti materiálů v tuhém stavu je nutné do procesu laserového navařování zařadit aplikaci tzv. „bonding layer“ (mezivrstvy). Základní vlastností použitého materiálu mezivrstvy musí být schopnost vytvářet tuhý roztok jak s materiálem substrátu, tak se samotným materiálem laserového návaru. Následné promíšení obou kovů je pouze částečné a tak vzniká nový povrch odpovídající svými vlastnostmi přídavnému materiálu [8, 10, 11].

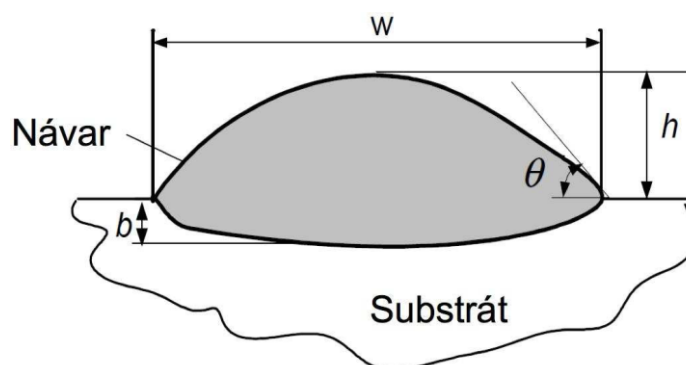
Technologie laserového navařování je využívána pro opravy opotřebovaných součástí, pro tvorbu návarů požadovaných vlastností a pro rapid prototyping. Laserové navařování umožňuje také zlepšení vlastností výrobků jako je korozivzdornost, tvrdost nebo otěruvzdornost. Další z předností této metody je univerzálnost. Laserový paprsek je schopen

natavit široké spektrum materiálů vhodných k navařování. Po navařování dochází k obrábění povrchů na užitnou výšku návaru nejčastěji broušením. Laserové navařování je technologie vhodná k automatizaci díky snadné robotizaci laserové hlavy. Pohyb povlakovacích hlav je v tomto případě zajištěn robotickým ramenem nebo CNC zařízením [8, 11].

Návary vytvořené technologií laserového navařování se obecně vyznačují nízkou pórovitostí. Při správném nastavení technologie procesu navařování je vzniklý návar bez trhlin a dalších vnitřních vad. Rychlé tuhnutí a vysoká ochlazovací rychlost mají za důsledek vytvoření jemné dendritické struktury. Vysoká rychlost ochlazování a rozdílná tepelná roztažnost materiálů zvyšuje citlivost tepelně ovlivněné oblasti i samotného návaru ke vzniku prasklin. Tuto problematiku řeší zařazení předehřívání a dohřívání místa návaru [8, 11].

### 2.1.1 Geometrické charakteristiky jednostopého laserového návaru

Jednostopý laserový návar je možné charakterizovat pomocí základních geometrických charakteristik. Na Obr. 3 je schematicky znázorněn příčný řez jednostopým laserovým návarem, který je možné popsat pomocí šířky návaru  $w$  [mm], hloubky závaru  $b$  [mm], výšky návaru  $h$  [mm] a úhlu smáčivosti  $\theta$  [°] [8, 11].



Obrázek 3 - Příčný řez geometrie návaru [8]

Jedním z ukazatelů jakosti laserem navařené vrstvy je stupeň promíšení laserového návaru a substrátu. Promíšení bude v dalším průběhu práce označováno jako **D** z anglického slova dilution. Základní vzorec geometrické definice výpočtu promíšení byl popsán kolektivem autorů Wu, D., Guo, M., Ma, G., Niu, F. v [12]. Výpočet je založen na základních geometrických charakteristikách návaru. Matematicky se jedná o poměr mezi hloubkou závaru **b** a celkovou výškou návaru **b+h** vyjádřen vztahem (1) [8, 12].

$$D = \frac{b}{b+h} [-] \quad (1)$$

Dále geometrickou definici výpočtu promíšení formuloval G. Bruck v [13]. Výpočet je založen na podílu mezi natavenou plochou substrátu a součtem plochy návaru nad rovinou substrátu a natavenou plochou substrátu. Výpočet geometrické definice promíšení je uveden ve vztahu (2) [13].

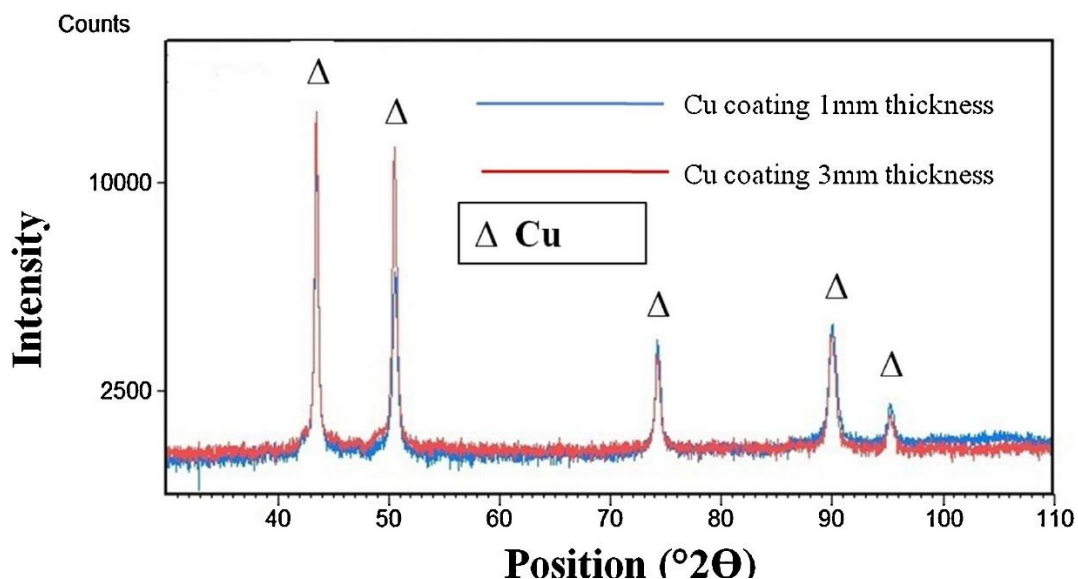
$$D = \frac{\text{plocha 2}}{\text{plocha 1} + \text{plocha 2}} [-] \quad (2)$$

Další metoda výpočtu dle G. Brucka v [13] uvádí výpočet promíšení pomocí kompoziční definice chemického složení návaru. Hodnota  $\rho_c$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] odpovídá měrné hmotnosti práškové slitiny,  $\rho_s$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] je hustota materiálu substrátu,  $X_{c+s}$  [%] je hmotnostní procento prvku X v oblasti návaru,  $X_c$  [%] je hmotností procento prvku X v práškové slitině a  $X_s$  [%] odpovídá hmotnostnímu procentu prvku X v substrátu [8, 13].

$$D = \frac{\rho_c(X_{c+s} - X_c)}{\rho_s(X_s - X_{c+s}) + \rho_c(X_{c+s} - X_c)} [-] \quad (3)$$

Hodnota promíšení je závislá na řadě faktorů, mezi které lze zařadit rychlost posuvu laseru, výkon laseru, chemické složení substrátu a přídavného materiálu. Údaje o hmotnostním procentuálním zastoupení chemických prvků v laserovém návaru jsou dle [13] získávány pomocí EDX (Energy-Dispersive X-ray spectroscopy) analýzy chemického složení. Na Obr. 3 je znázorněno energetické spektrum EDX chemické analýzy laserového návaru mědi na substrátu z oceli SS316L. Principem EDX analýzy chemického složení je detekce sekundárních elektronů, které se uvolňují z povrchu materiálu měřeného vzorku. Zasažením primárních elektronů jsou z vnitřních slupek atomů vyraženy elektrony, které jsou nahrazeny atomy z vyšších energetických hladin. Rozdíl této energie se projeví ve formě záření. Každý chemický prvek dosahuje specifických hodnot vyzářené energie, podle které se následně určuje zastoupení prvků v ozářeném vzorku [8, 11, 14].





Obrázek 3 - Příklad EDX analýzy [15]

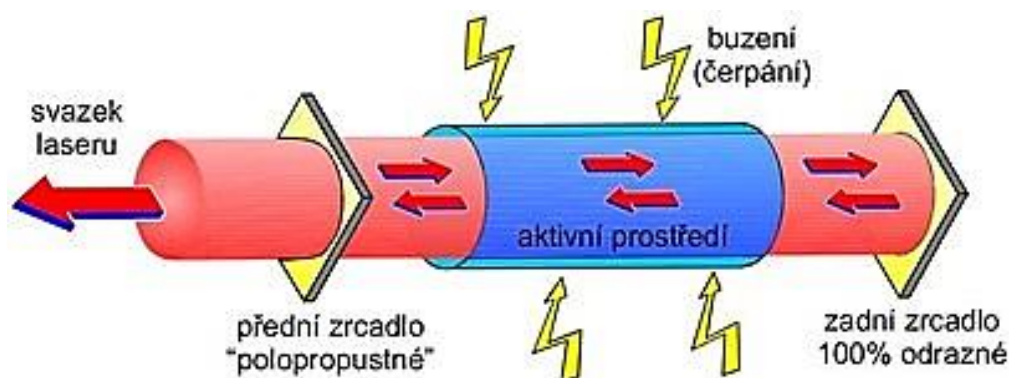
## 2.2 Lasery

V roce 1951 byl Charlesem H. Townesem vynalezen Maser pracující na principu stimulované emise, kterou na začátku 20. století popsal Albert Einstein. První funkční Pevnolátkový laser sestrojil Theodore Maiman v roce 1960. Laser zaznamenal od svého vynalezení velký vývoj. Jeho vlastnosti se dnes využívají v několika odvětvích jako například v medicíně, astronomii, energetice, ve výpočetní technice a samozřejmě ve strojírenství. V oblasti strojírenství nachází laser své využití při obrábění, tepelném zpracování, měření, navařování materiálů, spojování a dělení součástí. Slovo LASER je akronymem slovního spojení Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Definován je jako kvantový generátor a zesilovač koherentního optického záření, které je silně monochromatické, dosahuje nízké divergence svazku a vyznačuje se vysokou generovanou energií [8, 16].

Existuje několik základních typů laserů, které lze rozdělit podle druhu aktivního prostředí laseru, ve kterém dochází k vyzáření fotonu a jeho následné stimulované emisi. Dále lasery obsahují zdroj čerpání pro excitaci aktivního prostředí a rezonátor, který slouží k usměrnění proudu fotonů. Základní schéma laseru je na Obr. 4. Nejběžnější způsob dělení laserů je na základě aktivního prostředí [8, 16].

Dle této varianty se dělí následovně:

- Plynové lasery
- Pevnolátkové lasery
- Polovodičové lasery
- Kapalinové lasery
- Excimerové lasery
- Vláknové lasery

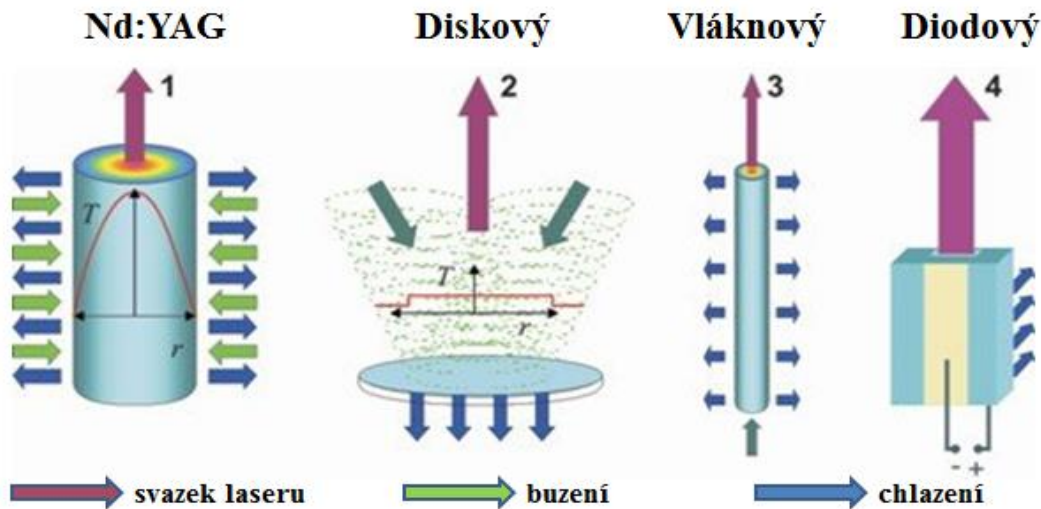


Obrázek 4 - Schéma laseru [17]

Pro laserové navařování velkých ploch o tloušťce několika milimetrů se nejčastěji používá CO<sub>2</sub> laser patřící mezi skupinu plynových laserů. Pro navařování tvarově složitějších součástí o tloušťce návaru kolem jednoho milimetru jsou využívány polovodičové a vláknové lasery. V experimentální části diplomové práce bude využit pevnolátkový diskový laser, který je popsán v kapitole 2.2.2 [8, 16].

### 2.2.2 Pevnolátkové lasery

Mezi hlavní zástupce pevnolátkových laserů v průmyslu lze zařadit Nd:YAG laser, vláknový laser a diskový laser. Rozdíly mezi těmito typy lze pozorovat především v geometrii aktivního prostředí. Pro tyčový Nd:YAG laser je aktivním prostředím tyčinka (průměr několik mm, délka 15 – 20 cm), pro vláknový laser je to optické vlákno (průměr 50 – 300  $\mu\text{m}$ , délka v řádu metrů) a pro diskový laser tenký disk (tloušťka 0,25 mm). Samotné aktivní prostředí je tvořeno maticí umělého YAG (ytrium aluminium granát) krystalu dopovaného ionty neodymu (Nd) nebo yterbia (Yb) [17].



Obrázek 5 - Pevnolátkové lasery [17]

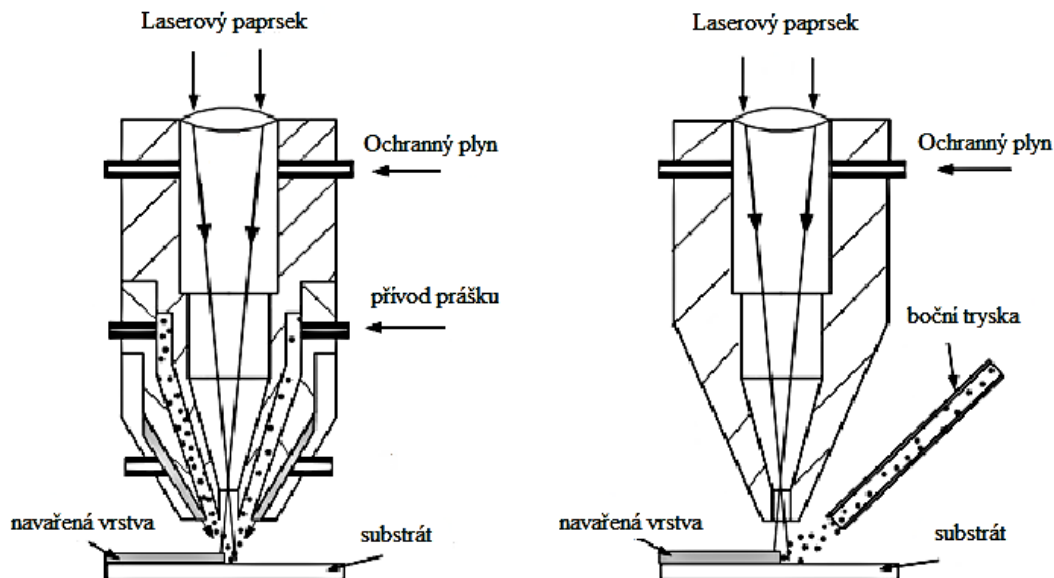
Pevnolátkové lasery buzené diodou mají vysokou účinnost s výkonem až 16 kW. Díky tomu jsou vhodné pro svařování a řezání s požadavkem na vysoký výkon a velmi dobrou kvalitu paprsku. Nevýhodou diskových laserů je nižší účinnost pohybující se v rozmezí 15 – 20 % a nižší životnost než u laserů vláknových [17].

Vláknový laser patří mezi technologicky nejmodernější typy pevnolátkových laserů. Aktivním prostředím je zde dlouhé optické vlákno dopované yterbiem. Výhodou je zde jednoduchost, protože laser je tvořen převážně optickým vláknem. Další výhodou je jeho modularita a účinnost pohybující se v rozmezí 30 – 35 %. Spojováním jednotlivých modulů lze dosáhnout výkonu až 80 kW [17].

### 2.3 Přívod přídavného materiálu

Přídavný materiál je do místa návaru přiváděn kontinuálně v průběhu procesu navařování. Prášek může být do místa návaru dopraven pomocí koaxiální nebo laterální povlakovací hlavy pro laserové navařování. Pro experimentální část diplomové práce bude využita koaxiální povlakovací hlava a v této kapitole bude porovnána s laterální povlakovací hlavou jako alternativou pro použití. Přídavný prášek je unášen proudem hnacího, kterým je nejčastěji argon případně helium. Tavná lázeň vznikajícího laserového návaru je chráněna ochranným plynem nejčastěji stejného druhu, jako je plyn hnací. Koaxiální povlakovací hlava je vhodnější pro navařování tvarově složitějších povrchů díky přívodu prášku vnitřní tryskou v podobě mezikruží, která je umístěna v ose laserového svazku. Laterální povlakovací hlava dosahuje nejvyšší efektivity využití prášku, pokud je boční tryska směřována ze směru, kterým se pohybuje povlakovací hlava. Prášek se tak zachytává v části mezi již vytvořeným

navarem a volným povrchem součástí. U obou typů hlav však může být prášek předehříván pro zvýšení účinnosti zachycení nataveného prášku na povrch substrátu [8, 11]. Základní schéma povlakovacích hlav je znázorněno na Obr. 6.



Obrázek 6 - Schéma koaxiálního a laterálního přívodu prášku [8]

## 2.4 Přídavné prášky

Pro technologii laserového navařování s přídavným materiálem ve formě prášku jsou běžně využívány různé směsi práškových materiálů v širokém rozsahu velikosti kulovitých částic od 0,002 do 0,25 mm. Mezi přední dodavatele přídavných prášků pro laserové navařování se řadí společnosti Sandvik, Höganäs a Sulzer.

Uživatelem požadované funkční vlastnosti laserového návaru jsou nejprve zhodnoceny technologem a na jejich základě je navržen konkrétní druh přídavného prášku včetně chemického složení a granulometrie prášku. Aby bylo dosaženo natavení přídavného materiálu, musí částice prášku účinně absorbovat vlnovou délku laserového záření. Na hodnocení technologa laserového navařování je také analýza celého systému substrát-návar neboť se nesmí na hranici ztavení tvořit žádné nežádoucí fáze, které by mohly zásadně oslabit adhezi laserového návaru a substrátu. Nezbytná je také rovněž přibližně shodná tepelná roztažnost materiálu substrátu a vzniklého laserového návaru aby nedocházelo během procesu chlazení ke vzniku trhlin [4, 18].

Přídavné prášky pro laserové navařování lze rozdělit do čtyř různých kategorií: slitiny na bázi železa, kobaltu, niklu a speciální slitiny. Běžně používané přídavné materiály pro laserové navařování jsou uvedeny v Tab. 1 [8, 11].

% hm	Cr	C	Si	Mo	Fe	Ni	Co	Sn	Mn	W	Al	Cu	Nb
<b>Cu10Al</b>	-	-	-	-	1,5-3,5	1,0	-	1,0	1,0	-	8,5-10,5	Bal.	-
<b>316L</b>	16,0-18,0	0,03	1,0	2,0-3,0	Bal.	10,0-14,0	-	-	2,0	-	-	-	-
<b>904L</b>	19,0-23,0	0,02	1,0	4,0-5,0	Bal.	23,0-28,0	-	-	2,0	-	-	-	-
<b>440C</b>	16,0-18,0	0,95-1,2	1,0	0,75	Bal.	-	-	-	1,0	-	-	-	-
<b>17-4 PH</b>	15,5-17,5	0,07	1,0	-	Bal.	3,0-5,0	-	-	1,0	-	-	3,0-5,0	0,15-0,45
<b>Stellite 6</b>	29,0	1,2	1,4	0,6	2,0	2,0	Bal.	-	1,0	4,5	-	-	-
<b>Inconel 625</b>	22,46	0,02	-	8,84	0,14	Bal.	-	-	-	-	0,26	-	3,46

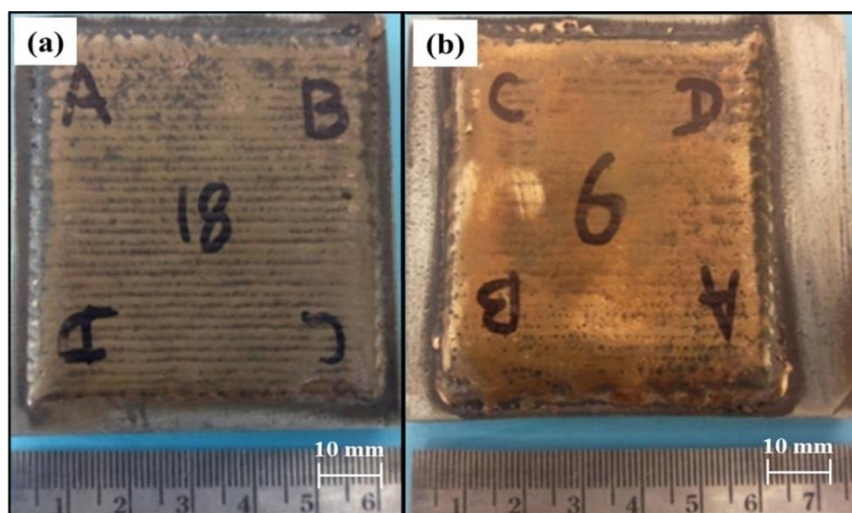
Tabulka 1 - Příklady přídavných materiálů firmy Sandvik [19]

### 3 Technologie laserového navařování – současný stav poznání

Laserového navařování se v současné době řadí mezi velice progresivní technologie. Kapitola 3 předložené diplomové práce reflektuje současný stav poznání vědy v oblasti laserového navařování.

#### 3.1 Laserové navařování vrstvy mědi na ocel AISI SS316L

Autoři S. SINGH a M. KUMAR se ve svém experimentálním programu v [15] věnovali technologii laserového navařování mědi o celkové výšce návaru 1 a 3 mm na substrátu z oceli AISI SS316L. Aplikačním potenciálem laserových návarů na bázi mědi by dle výše uvedených autorů mohly být součástí jaderných reaktorů nebo nádoby se zvýšenou korozní odolností. Na Obr. 7 jsou znázorněny laserové návary o tloušťce a) 1 mm b) 3 mm [15].



Obrázek 7 - Laserový návar Cu na substrát z oceli SS316 [15]

Laserové návary byly navařeny  $CO_2$  laserem TRUMPF s výkonem 4 kW. Přívod přídavného materiálu probíhal koaxiální povlakovací hlavou. Přídavným materiálem byl prášek mědi o dvou rozdílných velikostech kulovitých částic do  $0,063 \mu m$  a nad  $0,063 \mu m$ . Veškeré parametry procesu jako velikost kulovitých částic, výkon laseru, procesní rychlost navařování a množství přídavného prášku byly optimalizovány pro vytvoření požadovaného kvalitního návaru. Bylo zjištěno, že výkon laseru nad 3 kW vedl k úplnému roztavení prášku, což mělo za následek tvorbu pórů v navařené vrstvě. Naopak výkon laseru pod 3 kW vedl k nesprávnému tavení prášku a tím ke špatné vazbě mezi substrátem a navařenou vrstvou. Některé další studie ukázaly, že vstupující teplo potřebné pro tvorbu návaru se snižuje s nižší velikostí kulovitých částic prášku. Při zahrnutí výše uvedených optimalizací bylo pro experiment rozhodnuto o vytvoření návaru o tloušťce 1 mm s použitím prášku o velikosti

kulovitých částic  $< 0,063 \mu\text{m}$  a výkonem laseru 3 kW. Pro vytvoření návaru o tloušťce 3 mm bylo zvoleno vytvoření první vrstvy o tloušťce 0,7 mm s velikostí kulovitých částic prášku  $> 0,063 \mu\text{m}$  a následující dvě vrstvy o tloušťkách 1 mm a 1,3 mm. Optimální rychlost navařování byla stanovena na 50 cm/min, množství přidaného prášku bylo 10 g/min a hnacím plynem byl argon [15].

Korozní zkouška byla provedena pouze na zkušebním vzorku s tloušťkou návaru 1 mm, což dokazuje stabilitu měděné vrstvy. Vzorky byly testovány potenciodynamickou korozní zkouškou. Expozičním prostředím byl zvolen roztok NaCl v demineralizované vodě s pH 7. Druhým korozním testem byla kontrola úbytku hmotnosti vzorku v korozní nádobě s médiem v podobě roztoku NaCl s demineralizovanou vodou. Změna hmotnosti vzorku byla měřena v pravidelném intervalu 24 hodin po dobu 3 týdnů. Výsledky korozních zkoušek byly analyzovány pomocí XRD, SEM a EDX analýz [15].

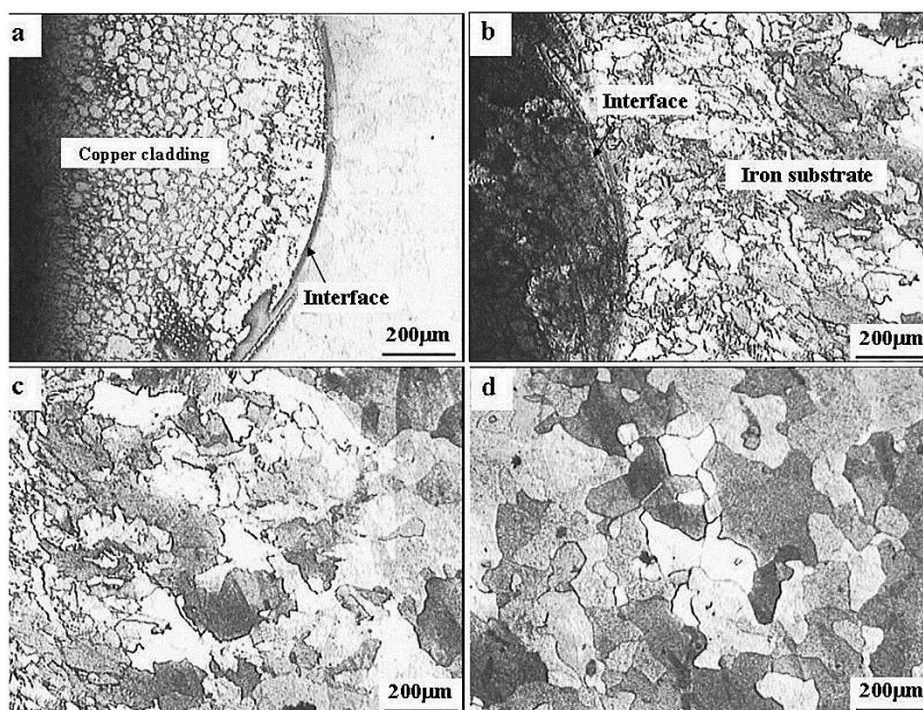
Tímto experimentálním programem byla prokázána možnost využití technologie laserového navařování pro vytvoření měděných návarů o tloušťce 1 a 3 mm. Výsledky korozních zkoušek prokázaly schopnost návarů na bázi mědi odolat působení koroze v daném expozičním prostředí po miliony let. Z toho vyplývá, že laserové navařování mědi by mohlo být řešením pro vývoj návarů na jaderných reaktorech [15].

### **3.2 Mikrostruktura a vlastnosti laserem navařené vrstvy mědi na čisté železo**

Kolektiv autorů N. LI, J. LUO, P. ZHAO, M. SHA, S. LI a J. ZHANG se v rámci svého výzkumu v [20] zabývali laserovým navařováním mědi na čisté železo. Byly pozorovány povrchové struktury a vlivy různých výkonů laseru na mikrotvrdost měděného návaru [20].

Laserové návary byly navařeny laserem HGL-6000 o maximálním výkonu 6 kW. Přídavný materiál v podobě měděného prášku o velikosti kulovitých částic  $75 \mu\text{m}$  byl unášen argonem, který sloužil i jako ochranný plyn. Výkon laseru byl nastaven na 2,8 kW pro vzorek č. 1 a 3,5 kW pro vzorek č. 2. Optimální rychlost navařování byla stanovena na 24 cm/min. Měření mikrotvrdosti bylo provedeno na příčném řezu substrátu, měděného návaru a oblasti promíšení [20].

Makroskopické pozorování návarů mědi na železném substrátu ukázalo, že laserový návar mědi na vzorku č. 1 je více rovnoměrný než na vzorku č. 2. Obr. 8 znázorňuje řez vzorkem č. 1 [20].



*a-návar a rozhraní    b-rozhraní    c-tepelně ovlivněná oblast    d-substrát*  
Obrázek 8 - Příčný řez laserového návaru na bázi mědi vzorku č. 1 [20]

Výsledné hodnoty mikrotvrdomosti jsou u vzorku č. 1 vyšší v porovnání se vzorkem č. 2 a to konkrétně o 34 % v oblasti měděného návaru a o 74 % v oblasti promíšení. S rostoucím výkonem laseru se tudíž snižuje mikrotvrdomost materiálu [20].

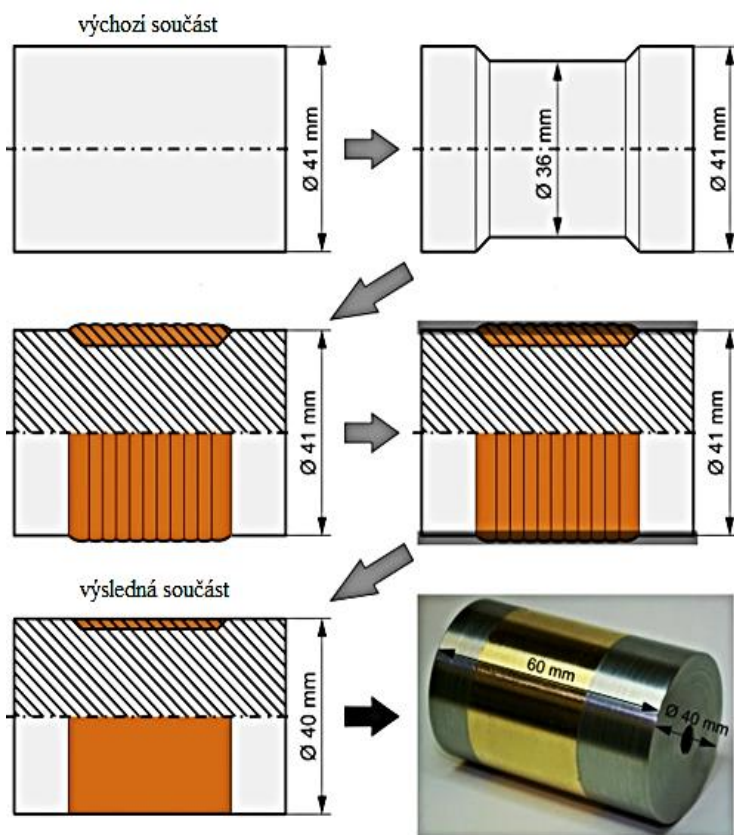
### 3.3 Laserové navařování fosforového bronzu

Kolektiv autorů F. A. GONZÁLEZ, J.del VAL, R. COMESANA, a další se v rámci svého výzkumu v [21] zabývali problematikou laserového navařování fosforového bronzu. Jako substrát byla zvolena legovaná ocel AISI 4340. Fosforový bronz je aplikačně zajímavým materiálem z důvodu dobré únavové pevnosti, výborné odolnosti proti koroznímu opotřebení, odolnosti proti vysokým teplotám a vysokému zatížení. Fosforový bronz je slitina mědi, cínu a fosforu. Zvýšený obsah cínu zvyšuje pevnost v tahu. Malé množství fosforu se přidává pro zlepšení korozních vlastností. Vrstva fosforového bronzu slouží především pro vytvoření bronzového povrchu v oblasti hřídele místo běžně používaných bronzových pouzder [21].

K laserovému navařování byla využita povlakovací hlava s laterální tryskou pro přívod přidavného prášku. Jako laser byl využit diodový laser DILAS s maximálním výkonem 1,6 kW. Celkem bylo laserem navařeno 10 vzorků, přičemž výkon laseru se pohyboval od 0,5 kW do 1 kW, procesní rychlost navařování (15 cm/min, 30 cm/min, 60 cm/min, 120 cm/min) a množství přidavného prášku na jednotku délky návaru (12 g/min, 24 g/min).



Jeden ze vzorků je znázorněn na Obr. 9. Následné studie metalografických výbrusů neprokázaly přítomnost vnitřních a povrchových vad (trhlin, pórů) v laserovém návaru [21].



Obrázek 9 - Laserový návar fosforového bronzu [20]

Kolektiv výše uvedených autorů prokázal v [21] aplikovatelnost zvoleného technologického postupu laserového navařování fosforového bronzu na substrát z oceli AISI 4340. Laserový návar na bázi měď-fosfor-cín vykazoval nárůst tvrdosti o 56 % oproti čistému bronzu používanému pro výrobu pouzder [21].

## 4 Koroze

Slovo koroze je odvozeno z latinského *corode*, které znamená rozhlodávat. Koroze představuje jeden z možných způsobů degradace povrchu. Při korozním procesu dochází k samovolné vzájemné reakci mezi expozičním prostředím a povrchem. Následkem je postupné porušování integrity povrchu materiálu, jehož důsledkem je výsledné znehodnocení strojní součásti. Charakter korozního procesu závisí na expozičním prostředí, druhu materiálu, jeho složení, materiálové struktuře a dalších vlastnostech. Může se jednat o změny mechanických vlastností, vzhledu, rozměrů nebo hmotnosti zapříčiněné tvorbou korozních produktů. Mezi vizuální vady je možno zařadit degradaci barvy, lesku nebo odstínu. Za mechanické vlastnosti se považuje změna pevnosti a tažnosti [22, 23, 24].

Ke korozi dochází nejen u kovů a jejich slitin, ale také u anorganických, organických a dalších materiálů. Mnoho nekovových materiálů, jako je keramika, se skládá z oxidu přechodových kovů, které mají svou chemickou reaktivitu naplněnou tvorbou vazeb s jinými reaktivními ionty. Takové materiály jsou chemicky nereaktivní a degradují fyzickým rozkladem při vysoké teplotě nebo mechanickým opotřebením [22, 23, 24].

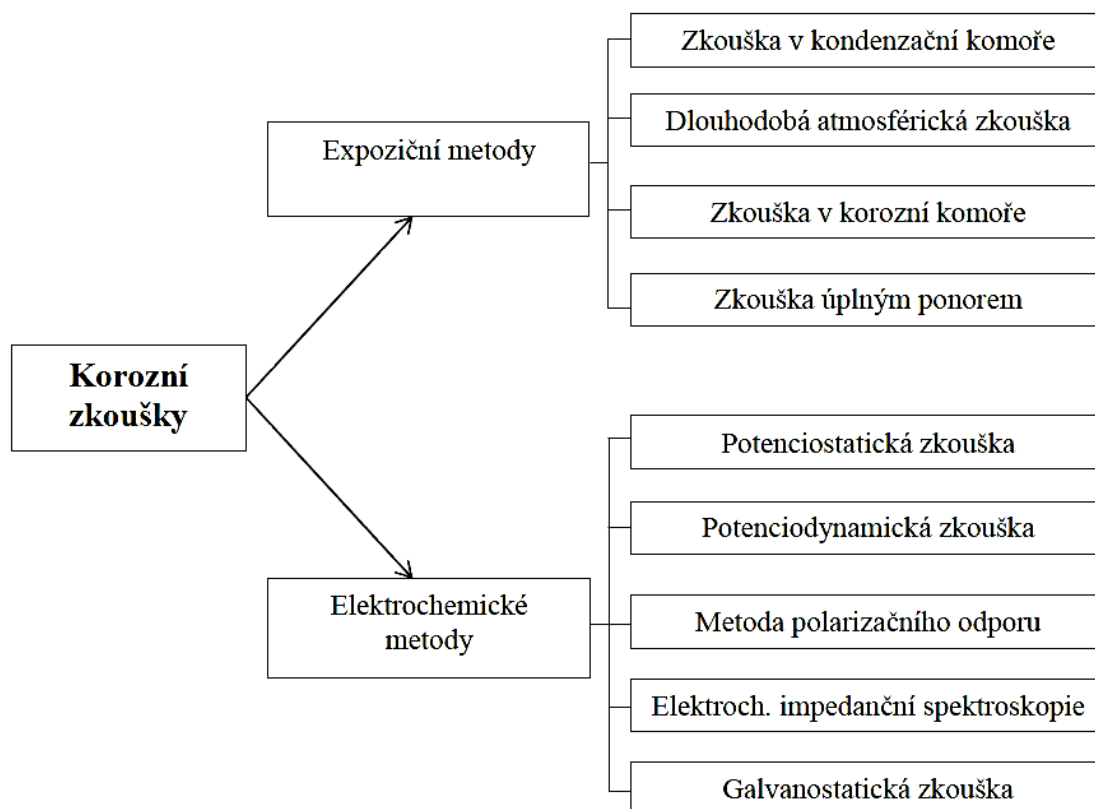
Specifickým vědním oborem v oblasti koroze je koroze v kapalinách. Vodní prostředí je možno dělit na sladké a mořské. Průmyslové vody je možné klasifikovat na odpadní, technologické, chladicí a pro energetické účely. Průmyslové vody se znečišťují přidanými látkami během výroby ať už záměrně nebo ne. Přidané příměsi mohou obsahovat plyny, soli a jiné organické látky. Korozní rychlost je zvyšována přítomností tuhých částic nebo zvýšenou teplotou a hodnotou pH. Během koroze v kapalinách dochází k uplatňování všech fyzikálních principů elektrochemické koroze. Je-li jako elektrolyt využita voda a roztoky na bázi vody nesmí být opomenuta ani mikrobiální a chemická koroze [22, 23, 25].

Převážně elektrochemická koroze probíhá v prostředí půdy. Elektrolyt je rozmístěn v půdě v podobě kapalně iontově vodivé složky. Vodné roztoky obsahují směs kyslíku, dusíku, oxidu uhličitého a dalších plynů. Elektrochemický článek je vytvořen mezi elektrolytem a elektrodou průchodem vnějšího proudu za přítomnosti elektrod. Elektrodou může být fáze, která je částečně elektronově vodivá. Na přenášení nábojů v elektrolytu se podílí záporné anionty a kladné kationty. Tento proces může být zprostředkován migrací, difuzí nebo konvekcí. [22, 23, 25].

## 4.1 Korozní zkoušky

K získání výstupních informací o korozi materiálu slouží korozní zkoušky. Korozní zkoušky je možné rozdělit například podle druhu expozičního prostředí, ve kterém jsou prováděny. První možností je tedy laboratorní prostředí, které slouží především k testování korozních procesů u malých vzorků za přesně stanovených laboratorních podmínek. Tyto zkoušky jsou většinou řízeny normou, což umožňuje vzájemné porovnání výsledků korozních testů. Výhodou laboratorních zkoušek je možnost urychlení procesu koroze což umožňuje získání výsledků korozních testů ve zkráceném časovém období. Doba trvání laboratorních korozních zkoušek je v řádech hodin, dnů, týdnů nebo maximálně měsíců. Druhou možností jsou korozní zkoušky prováděné v expozičním prostředí reálného provozu. Testované vzorky jsou součástí strojních konstrukcí či jejich částí a korozní procesy tímto probíhají samovolně. Jelikož je testovaný materiál vystaven působení skutečného expozičního prostředí jsou dosažené výsledky snadno aplikovatelné do praxe [26, 27].

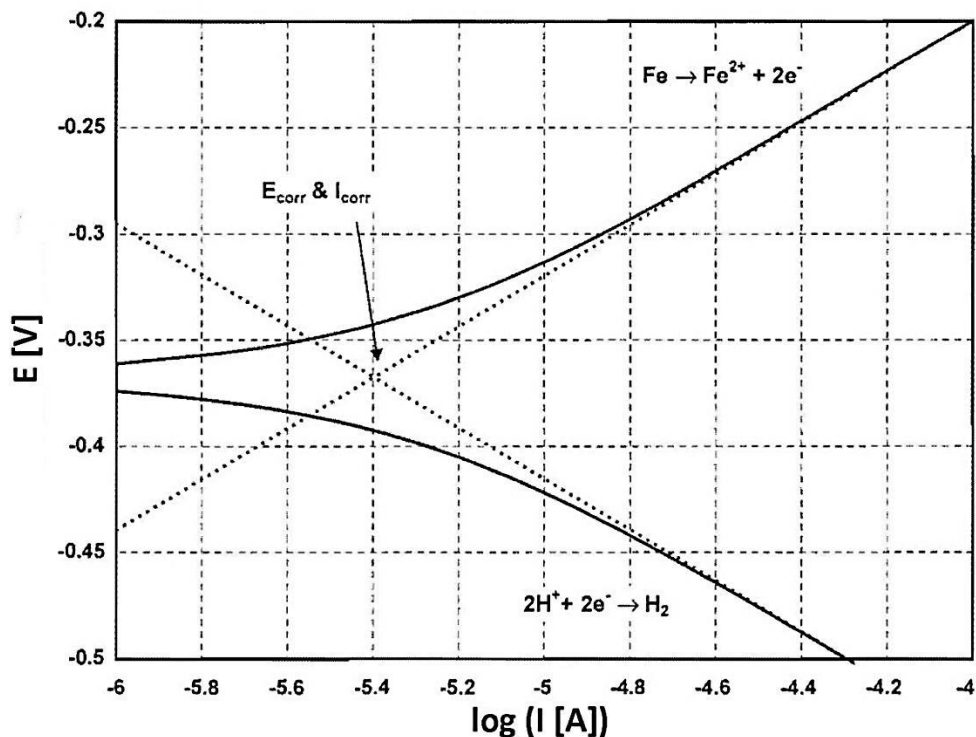
Druhým způsobem klasifikace korozních zkoušek může být na elektrochemické a expoziční. U elektrochemických zkoušek je využita závislost korozního potenciálu na průchozím proudu přes elektricky vodivý povrch v závislosti na čase. V expozičních zkouškách se vzorky vystavují působení předem definovaného expozičního prostředí [26, 27].



Obrázek 10 - Rozdělení korozních zkoušek na expoziční a elektrochemické metody testování koroze

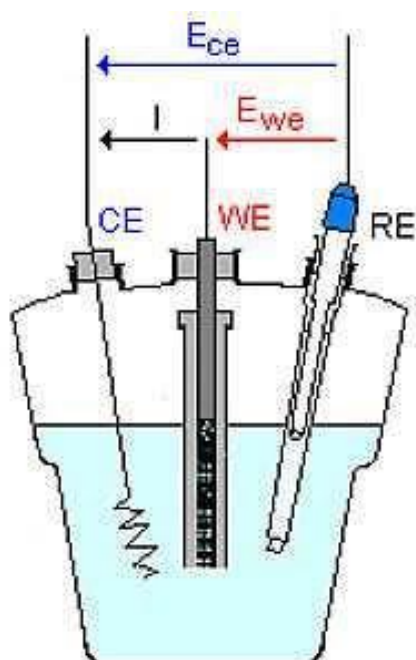
#### 4.1.1 Potenciodynamická korozní zkouška

Při této metodě zkoušení je měřena závislost proudové hustoty na korozním potenciálu testovaného vzorku vůči referenční neboli kalomelové elektrodě. Ta se používá jako referenční elektroda z důvodu stálého elektrodového potenciálu. Proudová hustota odpovídá velikosti náboje, který prošel rozhraním kov – elektrolyt o jednotkové ploše během reakce v korozním systému za časovou jednotku. Tato hodnota náboje tedy informuje o rychlosti průběhu korozní reakce. Elektrodový potenciál vzorku se postupně mění anodickým a katodickým směrem. Elektrodový potenciál je měřítkem oxidace testovaných vzorků v korozním prostředí. Oxidační schopnost prostředí je možno ovlivňovat a zvyšovat přidáním látky snižující svůj oxidační stav do elektrolytu. Potenciodynamická korozní zkouška je využívána k testování vzorků bez povrchových úprav ve vysoce vodivých elektrolytech. Zde je totiž zabezpečena dostatečná elektrická vodivost a tím i nízké hodnoty polarizačních odporů. Charaktery korozních procesů jsou graficky vyjádřeny potenciodynamickou polarizační křivkou. Poloha a tvar polarizační křivky jsou závislé na chemickém složení, struktury materiálu a stavu povrchu měřeného vzorku. Pro vzájemné porovnání výsledků korozních testů je nezbytné připravovat vzorky stejným postupem [24, 28, 29].



Obrázek 11 - Polarizační křivka železa [29]

Když je kovový vzorek ponořen do elektrolytu, jeho korozní potenciál  $E_r$  se ustálí na určité hodnotě vůči referenční elektrodě. Další důležitou veličinou je tzv. korozní potenciál  $E_{corr}$ , který je potenciálem smíšeným. Nejčastějším případem smíšeného potenciálu je tzv. samovolný korozní potenciál, který se ustavuje, probíhá-li současně anodická reakce (oxidace kovu) a reakce katodická (redukce některé složky nebo složek prostředí). Pokud vzorek mírně polarizujeme v kladném směru, zvýší se anodický proud na úkor katodického. Polarizace probíhá za použití regulovatelného potenciostatu, který docílí přesunutí potenciálu na odlišný od  $E_{corr}$ . Výsledný proud je poté součtem anodického a katodického proudu. Pokračováním polarizace vzorku v kladném směru má za důsledek eliminaci probíhajících katodických reakcí na zanedbatelnou hodnotu vůči reakcím anodickým. V případě opačně probíhajícího korozního procesu se stane zanedbatelnou anodická složka vůči katodické [10, 30, 31].



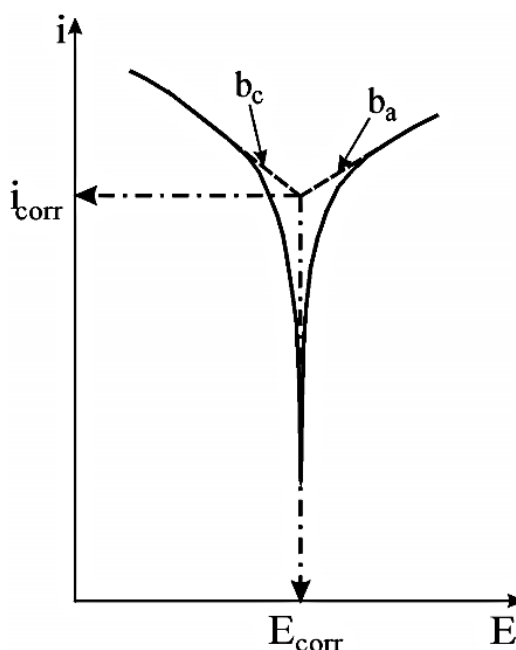
- $E_{CE}$  Smíšený korozní potenciál
- $E_{WE}$  Ustálený korozní potenciál
- $I$  Proud
- CE Protielektroda – platinový drát
- WE Pracovní elektroda
- RE Referenční kalomelová elektroda

Obrázek 12 - Schéma zapojení potenciodynamické korozní zkoušky [32]

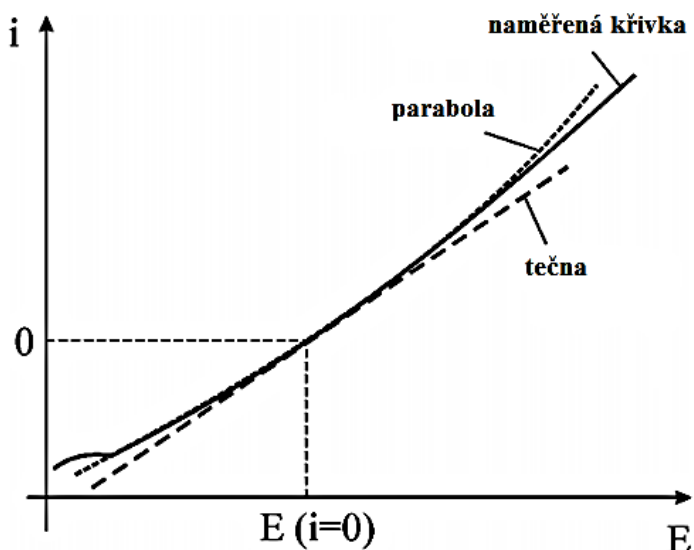
Experimentálně se polarizační křivky graficky zobrazují vynesemím proudové hustoty v závislosti na smíšeném korozním potenciálu. Pokud se při měření mohou proudy měnit o několik řádů, tak se proud vynáší v logaritmických souřadnicích a potenciál v lineárních. Celá křivka znázorněna na Obr. 11 se nazývá Polarizační křivka a je tak vykreslena v semilogaritmických souřadnicích. Na získaných polarizačních křivkách znázorněných Obr. 13 je určován sklon anodické ( $b_a$ ) a katodické ( $b_c$ ) části křivky (tzv. Tafelových oblastí).

Takto získané Tafelovy křivky se protínají v hodnotě korozního potenciálu  $E_{corr}$  a korozní proudové hustoty  $i_{corr}$ . Sternovou analýzou potenciodynamické křivky je zjišťován polarizační odpor  $R_p$  jako sklon křivky při nulové hodnotě proudové hustoty. V praxi je využito parabolické korelace na Obr. 14 a hodnota  $R_p$  je zjištěna ze sklonu tečny k parabole v bodě E ( $i=0$ ). Korozní proudová hustota  $i_{corr}$  je poté vypočtena využitím matematického vzorce (4) [30, 31].

$$i_{corr} = \frac{1}{2,303 R_p} * \frac{b_a |b_c|}{b_a + |b_c|} \quad (4)$$



Obrázek 13 - Tafelova analýza potenciodynamické křivky [31]



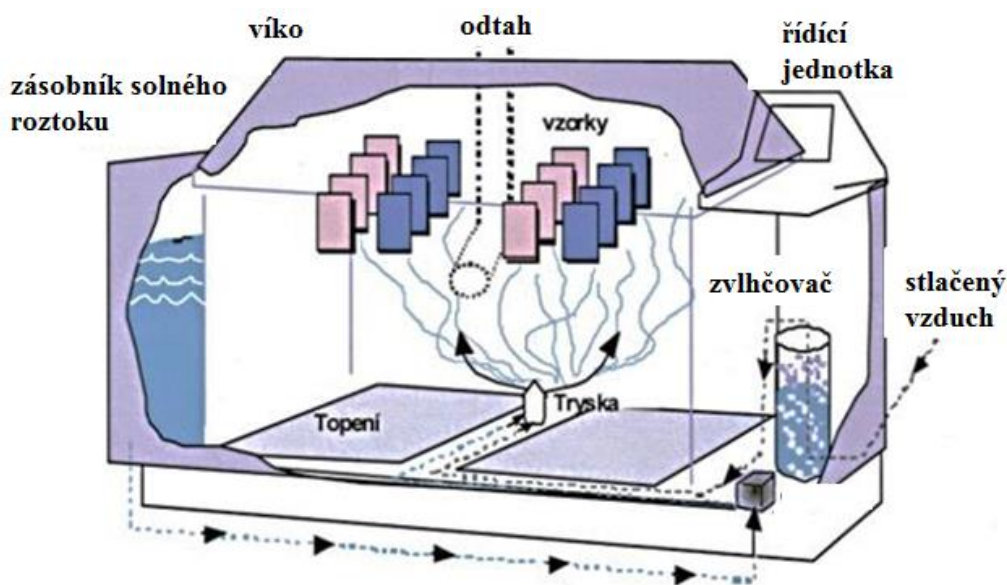
Obrázek 14 - Sternova analýza potenciodynamické korozní křivky[31]

Na základě experimentálně zjištěné korozní proudové hustoty je možné pomocí Faradayova zákona (5) vypočítat korozní rychlost  $v_{corr}$ , kde je  $M$  – molární hmotnost [ $g \cdot mol^{-1}$ ],  $n$  – látkové množství [ $mol$ ] a  $F$  – Faradayova konstanta [ $C \cdot mol^{-1}$ ] [31].

$$v_{corr} = \frac{i_{corr} \cdot M}{n \cdot F} \quad (5)$$

#### 4.1.2 Korozní zkouška solnou mlhou

Zkouška solnou mlhou v korozní komoře je řízena normou ČSN EN ISO 9227. Zkušebním zařízením je korozní komora o minimálním objemu  $0,4 m^3$  pro zajištění podmínek homogenity a rovnoměrné distribuce solné mlhy. Horní část komory musí být konstruována tak, aby kapky kondenzujícího roztoku nestékaly na zkoušené vzorky. Doba trvání zkoušky odpovídá požadovaným specifikacím zkoušeného materiálu. Běžné doby zkoušení se pohybují od 2 do 1000 hodin. Rozprašování solné mlhy nesmí být během probíhající zkoušky přerušeno. Norma připouští pouze krátkodobé otevření komory pro rychlou vizuální kontrolu bez změny polohy vzorků [28].



Obrázek 15 - Schéma korozní komory [28]

Nejčastěji používané druhy expozičních prostředí:

- v mlze neutrálního roztoku chloridu sodného (NSS)
- v mlze okyseleného roztoku chloridu sodného (AASS)
- v mlze okyseleného chloridu sodného a chloridu měďnatého (CASS)

## 5 Experimentální program

Experimentální program předložené diplomové práce byl založen na testování korozní odolnosti kompozitních laserových návarů na bázi měď – čedič. Jednotlivé kompozitní materiály byly laserem navařeny na ocel C45 a jejich korozní odolnost byla testována potenciodynamickou korozní zkouškou v expozičním prostředí uměle připravené důlní vody z důvodu možného budoucího uplatnění laserových návarů na obalový soubor pro ukládání vyhořelého jaderného paliva do hlubinných úložišť. Dále byla na laserových návarech provedena korozní zkouška solnou mlhou. Korozní testy byly doplněny metalografickým hodnocením vybraných kompozitních laserových návarů. Experimentální část diplomové práce byla realizována na pracovišti NTC (Nové technologie-výzkumné centrum) Západočeské univerzity v Plzni a v průmyslové společnosti LaserTherm spol. s.r.o.

### 5.1 Popis experimentálního programu

V rámci experimentálního programu byly připraveny celkem 4 série kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič. Celkem bylo navařeno 9 experimentálních vzorků laserových návarů. Pro porovnání dosažených výsledků v oblasti korozního testování byl dále připraven jeden laserový návar hliníkového bronzu a dále byl použit jeden vzorek měděného plechu o vysoké čistotě, který sloužil jako etalon. Dále byl etalonem jeden plech chromniklové austenitické oceli AISI 304. Jako substrát pro laserové navařování byla použita oboustranně broušená ocel C45 o tloušťce 20 mm. Plocha každého z laserem navařených vzorků byla 65 x 90 mm. Přídavnými materiály pro laserové navařování byly měděný prášek o vysoké čistotě komerčně distribuovaný Metco55 a dále pak čedičový prášek (bližší popis základního a přídavných materiálů je uveden v kapitole 5.2). Korozní odolnost kompozitních laserových návarů byla testována potenciodynamickou korozní zkouškou a dále korozní zkouškou v solné mlze. Dále bylo provedeno metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič pomocí světelného optického mikroskopu (OM) a řádkovacího elektronového mikroskopu (SEM). Chemické složení laserových návarů bylo měřeno pomocí EDX analýzy na SEM.

#### 5.1.1 Cíle experimentálního programu

Cíle experimentálního programu odpovídají cílům stanoveným pro řešení diplomové práce a byly stanoveny následovně:



- Testovat a vyhodnotit korozní odolnost laserových návarů na bázi měď – čedič potenciodynamickou korozní zkouškou.
- Testovat a vyhodnotit korozní odolnost laserových návarů na bázi měď – čedič korozní zkouškou v solné mlze.
- Vyhodnotit vliv množství čediče obsaženého v kompozitním návaru na výslednou korozní odolnost.
- Popsat metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů.

### 5.1.2 Použité stroje, přístroje a zařízení

K vypracování experimentální části diplomové práce byly použity stroje, přístroje a zařízení uvedené v Tab. 2.

Použití	Název	Označení	Specifikace
<b>Obrábění povrchů vzorků</b>	Magnetická bruska rovinná	BRH 20A	Broušení povrchu laserových návarů
<b>Laserové navařování</b>	Laser	Trumpf TruDisc	Pevnolátkový diskový laser s vlnovou délkou $\lambda=1030\text{nm}$ a výkonem 160 – 5300 W
	Povlakovací hlava	Peritec YC52	Koaxiální povlakovací hlava s 4-cestným vedením prášku
	Podavač prášku	GTV PF 2/2 MH	Přenos prášku ze zásobníku do povlakovací hlavy
<b>Metalografie</b>	Metalografická pila	Struers Discotom-6	Rozřezání metalografických vzorků
	Automatická bruska/leštička	Struers Tegramin-20	Broušení a leštění metalografických vzorků
<b>Měření hmotnosti</b>	Laboratorní váha	DL-501	Vážení prášku
<b>Světelná mikroskopie</b>	Optický světelný mikroskop	Carl Zeiss Z1M	Fotodokumentace metalografických vzorků
<b>Elektronová mikroskopie</b>	Řádkovací elektronový mikroskop	Tescan MIRA3	EDX analýza chemického složení čedičového prášku
		Philips XL30 ESEM	Fotodokumentace kompozitních laserových návarů plus EDX analýza chemického složení
<b>Měření drsnosti</b>	Drsnoměr	MarSurf M300	Měření drsnosti substrátu před laserovým navařováním.
<b>Měření tvrdosti</b>	Tvrdoměr	Struers DuraScan 70 65	Měření tvrdosti substrátu dle Vickerse
<b>3D tisk</b>	3D tiskárna	Felix 3.0 printers	Tisk nové korozní cely
<b>Korozní zkoušky</b>	Potenciostat	BioLogic SP-150	Testování korozní odolnosti laserových návarů
	Korozní komora	Q-FOG CCT 600	Testování korozní odolnosti laserových návarů solnou mlhou

Tabulka 2 - Stroje, přístroje a zařízení použité v experimentální části diplomové práce

### 5.1.3 Specifikace zařízení laserového navařování

Laserové návary byly připraveny na pracovišti NTC ZČU v Plzni. Pro laserové navařování byl zdrojem energie pevnolátkový diskový laser Trumpf TruDisk 8002 s průměrem laserového svazku 3,4 mm a vlnovou délkou  $\lambda = 1030$  nm. Podavač prášku GTV PF 2/2 MH přivedl přídavný prášek ze zásobníku do koaxiální povlakovací hlavy Peritec YC52. Hnacím a ochranným plynem zároveň byl použit argon o čistotě 99,99 %. Konstantními parametry byl průtok hnacího a ochranného plynu. Průtok ochranného plynu byl stanoven na 18 l/min, průtok hnacího plynu byl 5 l/min. Byl zvolen konstantní překryv mezi jednotlivými housenkami a to 50 % z celkové šířky housenky.

Jedna série vzorků byla připravena v průmyslové společnosti LaserTherm spol. s r.o., která neposkytla o použitém zařízení a procesních parametrech technologie laserového navařování bližší informace. Procesní podmínky laserového navařování experimentálních vzorků připravených na pracovišti NTC jsou uvedeny v Tab. 3.

Procesní podmínky laserového navařování na pracovišti NTC					
Série vzorků	Značení vzorků	Výkon laseru [W]	Procesní rychlost navařování [cm/min]	Průměr laserového svazku [mm]	Posun [mm]
2	S2_CuAl	800	80	2	1
	S2_10c_CuAl				
	S2_10c				
3	S3_5c	1500	30	2,2	1,4
	S3_10c				
	S3_15c				
4	S4_5c	1100	30	2	1,2
	S4_10c				
	S4_15c				

Tabulka 3 - Procesní podmínky laserového navařování experimentálních vzorků

### 5.1.4 Značení vzorků

Pro experimentální část předložené diplomové práce bylo zavedeno následující označování vzorků. Značení vzorků bylo zvoleno dle chemického složení jednotlivých návareů a rozděleno do čtyř sérií. Označení vzorků obsahuje následující:

- S1 - 1. série navařených vzorků.
- 5c - 5 hmotnostních % čedičového prášku (zbylých 95 hm. % bylo tvořeno měděným práškem Metco 55)

- 2v - navařování 2 vrstev přídavného materiálu.
- CuAl – přídavný materiál v podobě prášku hliníkového bronzu.

Příklad značení laserových návarů:

**S1\_5c\_2v** - Vzorek byl připraven v první sérii laserového navařování na pracovišti firmy LaserTherm spol. s.r.o. Substrátem byla ocel C45 a přídavný materiál byl prášek na bázi měď – čedič v poměru 95/5 hm. %. Navařování proběhlo ve dvou vrstvách.

**S2\_10c\_CuAl** - Vzorek byl připraven ve druhé sérii laserového navařování na pracovišti NTC v Plzni. Substrátem byla ocel C45 a přídavný materiál byl prášek hliníkového bronzu v první navařené vrstvě. Jako druhá vrstva byl navařen prášek na bázi měď – čedič v poměru 90/10 hm. %.

**S3\_15c** - Vzorek byl připraven ve třetí sérii laserového navařování na pracovišti NTC v Plzni. Substrátem byla ocel C45 a přídavný materiál byl prášek na bázi měď – čedič v poměru 85/15 hm. %.



Obrázek 16 - Laserový návar měď - čedič, vlevo vzorek č. S3\_5c, uprostřed vzorek č. S3\_10c, vpravo vzorek č. S3\_15c

## 5.2 Charakteristika základního a přídatných materiálů

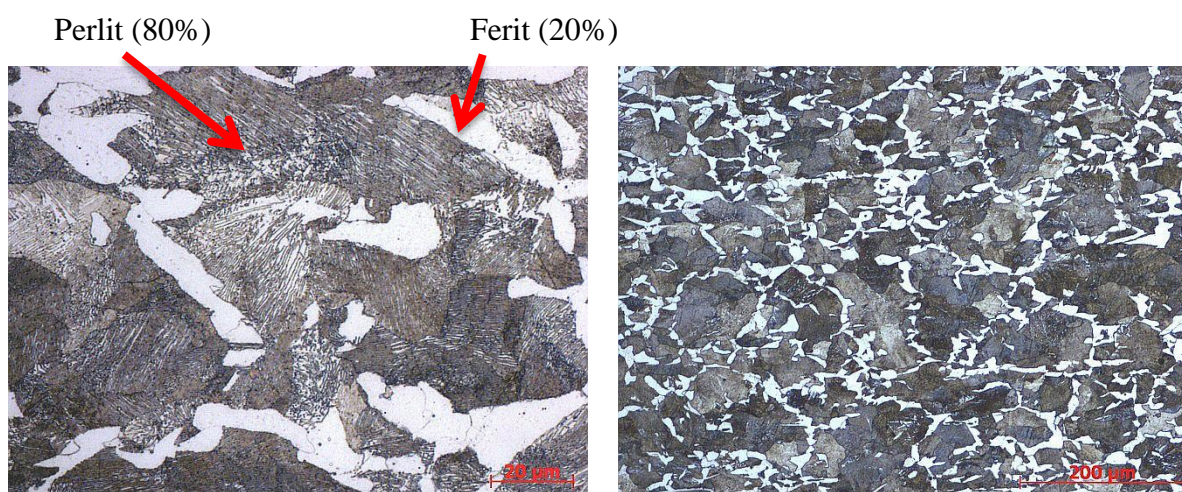
### 5.2.1 Základní materiál

Jako substrát pro laserové navařování byla zvolena ocel C45 (Wr.N. 1.1201; ČSN 41 2050). Ocel C45 byla dodána dodavatelem hutního materiálu VH-Projekt s.r.o. v 16 kusech kartáčovaného plechu o rozměrech 100 x 100 x 20 mm a 22 kusech o rozměrech 200 x 100 x 20 mm. Tento materiál se řadí mezi nelegované ušlechtilé oceli vhodné pro výrobu méně namáhaných strojních dílů ve stavu zušlechtěném nebo normalizačně žíhaném. Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli C45 jsou uvedeny v Tab. 4.

Obsah chemických prvků [hm. %] oceli C45							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0,42-0,50	max. 0,40	0,50-0,80	max. 0,03	max. 0,035	max. 0,40	max. 0,10	max. 0,40
Mechanické vlastnosti oceli C45							
R <sub>e</sub> [MPa]		R <sub>m</sub> [MPa]		A <sub>min</sub> [%]		KV [J]	
430		650 - 800		16		25	

Tabulka 4 - Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli C45 [33]

Před laserovým navařováním byla provedena vstupní kontrola materiálové struktury dodané oceli C45 pomocí metalografického hodnocení. Na Obr. 17 a 18 je znázorněna perliticko-feritická struktura oceli C45 s podílem perlit/ferit 80/20 %.



Obrázek 17 - Ocel C45 perliticko-feritická struktura, leptáno Nital 3 %, zv. 500x

Obrázek 18 - Ocel C45 perliticko-feritická struktura, leptáno Nital 3 %, zv. 100x

V dalším kroku vstupní kontroly materiálu byla změřena tvrdost dodaného polotovaru. Na substrátu bylo provedeno měření tvrdosti dle Vickerse (ČSN 42 0374) při zatížení 30 kgf (294 N). Naměřené hodnoty včetně vypočtené směrodatné odchylky jsou znázorněny v Tab. 5. Výsledná hodnota tvrdost oceli C45 byla měřením stanovena na  $275 \pm 5$  HV30 .

	HV30
1. měření	268
2. měření	273
3. měření	277
4. měření	278
5. měření	281
směrodatná odchylka měření	5
<b>Aritmetický průměr + směrodatná odchylka</b>	<b><math>275 \pm 5</math></b>

Tabulka 5 - Tvrdost HV30 základního materiálu C45

Následně bylo provedeno oboustranné broušení povrchu oceli C45 na magnetické brusce pro získání rovnoběžných ploch substrátu. Tím byl minimalizován negativní vliv nerovnosti povrchu na výslednou kvalitu laserem navařených vzorků.

Jako další hodnocení vstupního materiálu byla měřena drsnost povrchu před laserovým navařováním na přístroji MarSurf M300. Měření bylo provedeno v pěti oblastech a ve dvou na sebe kolmých směrech. Naměřené hodnoty jsou v Tab. 6. Výsledná drsnost ve směru X byla stanovena na  $2,61 \pm 0,2$  a drsnost ve směru Y byla stanovena na  $2,61 \pm 0,4$ .

	směr X Ra [ $\mu\text{m}$ ]	směr Y Ra [ $\mu\text{m}$ ]
1. měření	2,38	2,79
2. měření	2,44	2,95
3. měření	2,72	2,78
4. měření	2,64	1,95
5. měření	2,86	2,57
směrodatná odchylka měření	0,2	0,4
<b>Aritmetický průměr + směrodatná odchylka</b>	<b><math>2,61 \pm 0,2</math></b>	<b><math>2,61 \pm 0,4</math></b>

Tabulka 6 - Drsnost Ra základního materiálu C45

### 5.2.2 Měď

Jedná se o jemný prášek od společnosti Oerlicon Metco distribuovaným pod názvem Metco 55 s minimálním obsahem mědi 99 % a velikosti kulovitých částic 45 – 90  $\mu\text{m}$ . Teplota tavení prášku je přibližně 1083 °C a měrná hmotnost prášku v sypkém stavu 3 – 4  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Aplikace laserových návarů přídavným materiálem Metco 55 je využívána především pro opravy opotřebovaných součástí, samomazná ložiska a pro potřebu využití tepelné nebo elektrické vodivosti [34].

### 5.2.3 Čedič

Čedič neboli bazalt je hornina sopečného původu. Čedičové magma vzniká tavením zemského pláště. Z velké části tvoří zemskou kůru. Je to velice odolný a tvrdý materiál s jemnozrnnou strukturou. Nejčastěji má čedič šedou nebo černou barvu. Pro své vlastnosti je čedič nejčastěji využíván ve stavebnictví ve formě dlažby, cihel a žlabů [35].

Laserové navařování kompozitu složeného z prášku mědi a čediče je velice unikátní myšlenka. Z tohoto důvodu nelze sehnat čedičový prášek ve specializovaných prodejnách zaměřujících se na distribuci přídatných materiálů pro laserové navařování nebo plazmové nástřiky. Čedičový prášek, který byl pro experimentální program předložený diplomové práce zakoupen v prodejně se specializací modelářských potřeb. Velikost jednoho balení dodaného čediče byla 200 g. Čedičový prášek je znázorněn na Obr. 19.



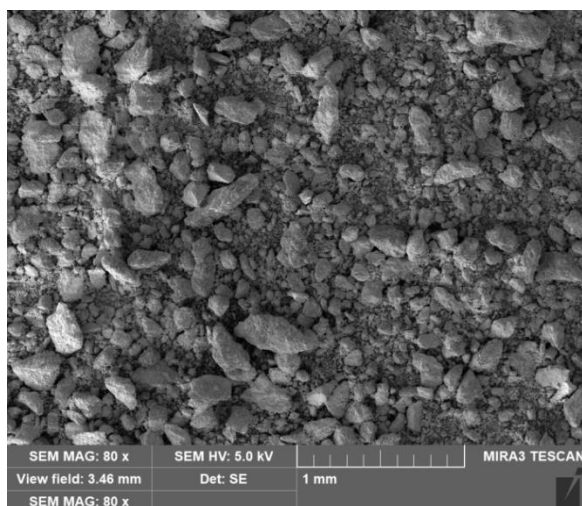
*Obrázek 19 - Čedičový prášek*

Jako vstupní kontrola byla provedena analýza velikosti kulovitých částic čedičového prášku. Prášek byl nejprve rozdělen do 3 frakcí podle velikosti částic čediče. Separace jednotlivých frakcí byla provedena na slévárenských sítích o propustnosti 100 a 200  $\mu\text{m}$ . Následně byly jednotlivé frakce čedičového prášku zváženy na laboratorních vahách (viz. Tab. 7). Zrnitost čedičového prášku dodaného výrobcem byla  $< 250\mu\text{m}$ .

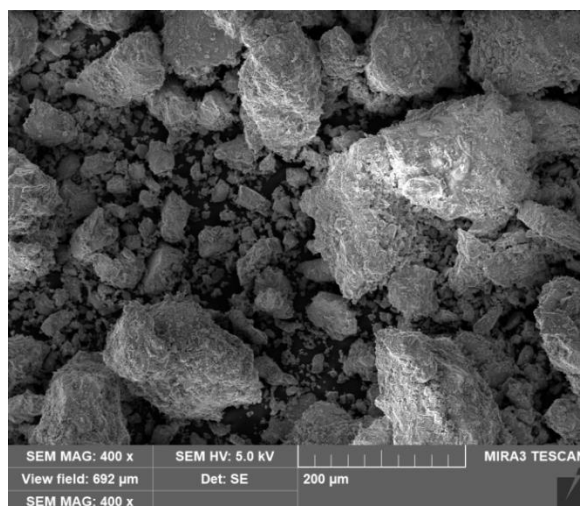
Hmotnostní analýza čedičového prášku	
Velikost kulovitých částic [mm]	Hmotnost [g]
<0,1	106,9
0,1 - 0,2	79,7
>0,2	13,4

Tabulka 7 - Hmotnostní analýza čedičového prášku

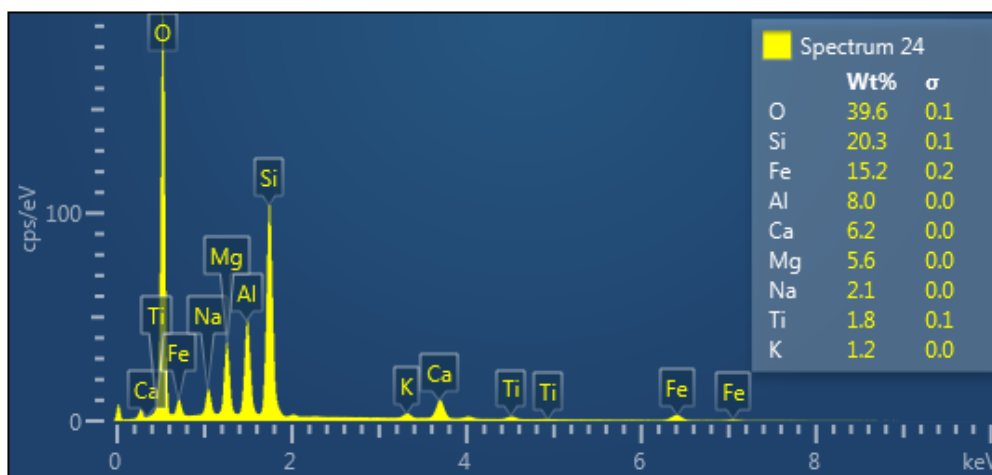
Chemické složení přídatného prášku bylo stanoveno pomocí EDX analýzy chemické analýzy na SEM. Na Obr. 20 a 21 je zachycen čedičový prášek pro laserové navařování. Na Obr. 22 je znázorněno energetické spektrum EDX analýzy čedičového prášku. Dle naměřených hodnot je čedičový prášek složen převážně z oxidů Si, Fe, Al, Ca, Mg, Na, Ti, K či jejich komplexních sloučenin.



Obrázek 20 - Přídatný čedičový prášek pro laserové navařování; SEM zvětšeno 80x



Obrázek 21 - Přídatný čedičový prášek pro laserové navařování; SEM zvětšeno 400x



Obrázek 22 - EDX analýza chemického složení čedičového prášku

#### **5.2.4 Hliníkový bronz**

Hliníkový bronz je jemný prášek zlatavé barvy od společnosti Oerlicon Metco distribuovaným pod označením Metco 51 NS s hlavním legujícím prvkem v podobě hliníku. Přítomnost hliníku pomáhá zlepšit odolnost povlaků proti korozi. Velikost kulovitých částic se pohybuje v rozmezí 45 – 125  $\mu\text{m}$ , teplota tavení prášku je kolem 1040 °C a měrná hmotnost prášku v sypkém stavu je 3,1 – 4,3  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Hliníkový bronz je využíván především pro výrobu trysek vodních turbín, vzduchové těsnění kompresorů a dilatační spáry [34].



## 6 Potenciodynamická korozní zkouška

Měření odolnosti laserových návarů proti koroznímu napadení probíhalo na potenciostatu BioLogic SP-150 vyobrazeném na Obr. 23. Jedná se o zařízení využívané pro měření korozní



odolnosti povrchů a povlaků. Před začátkem měření je nutné zadat hustotu a ekvivalentní hmotnost testovaného povrchu. Pro zkoušení návarů na bázi čedič - měď tak byly tyto hodnoty nastaveny na  $\rho = 8,96 \text{ g/cm}^3$  a  $m_{eq} = 32 \text{ g}$ .

Obrázek 23 - Potenciostat BioLogic SP-150 [36]

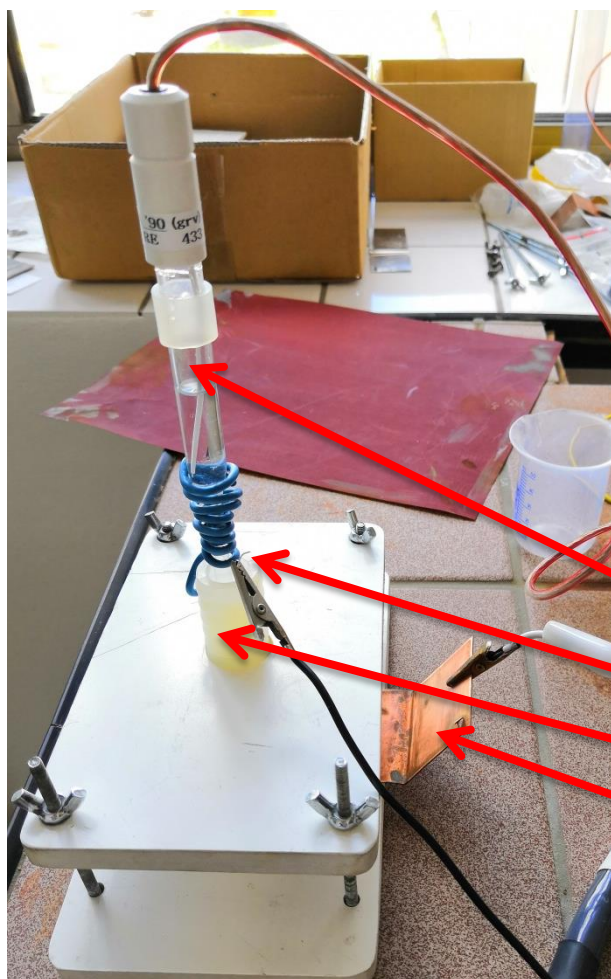
Pro měření korozní odolnosti potenciodynamickou korozní zkouškou byly použity dva typy korozních cel. Plocha první korozní cely v místě styku korozního prostředí a testovaného materiálu byla  $1,77 \text{ cm}^2$ . Druhá korozní cely byla speciálně navržena pro testování korozní odolnosti laserových návarů, které se, jak je obecně známo, vyznačují heterogenitou. Druhá korozní cely byla navržena a vyrobena pomocí technologie 3D tisku. Styčná plocha menší korozní cely byla  $0,28 \text{ cm}^2$ . Bližší podmínky výroby korozní cely metodou 3D tisku jsou uvedeny v kapitole 5.3.1.

Expozičním prostředím pro testování korozní odolnosti potenciodynamickou korozní zkouškou byla uměle připravena důlní voda, která měla reálně simulovat aplikační expoziční prostředí obalových souborů pro ukládání vyhořelého jaderného paliva do hlubinných úložišť. Chemické složení uměle vytvořené důlní vody je uvedeno v Tab. 8. Hodnota pH byla měřena indikátorovým papírkem a byla stanovena na pH 3,5.

Sloučenina	Koncentrace [mg/L]
NaCl	1380
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1237
CaCl <sub>2</sub>	1038
MgSO <sub>4</sub>	199

Tabulka 8 - Chemické složení důlní vody [37]

Před samotným měřením byly vzorky přebroušeny jemným brusným papírem zrnitosti 600, odmaštěny ethanolem, osušeny proudem vzduchu a následně upnuty do měřícího přípravku. Měřící přípravek se skládá z objímek, korozní cely, měděného plíšku pro lepší



vodivost a kalomelové elektrody. Vzorek byl připojen přes měděný plech jako pracovní elektroda (WE). Do korozní cely upevněná kalomelová elektroda byla zapojena pod názvem referenční elektroda (RE). Jako protielektroda (CE) slouží platinový drátek o průměru 0,2 mm, přes který byl do elektrolytu pouštěn proud. Elektrický proud vytváří změnu napětí mezi vzorkem a referenční elektrodou.

**Kalomelová elektroda**

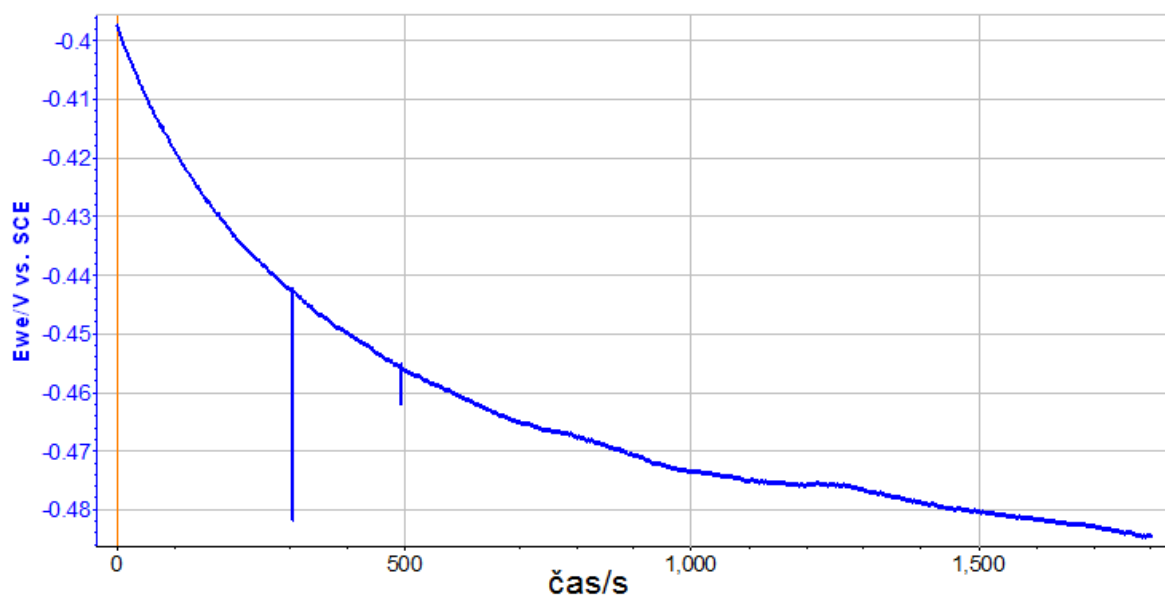
**Platinový drátek**

**Korozní cela**

**Měděný plech**

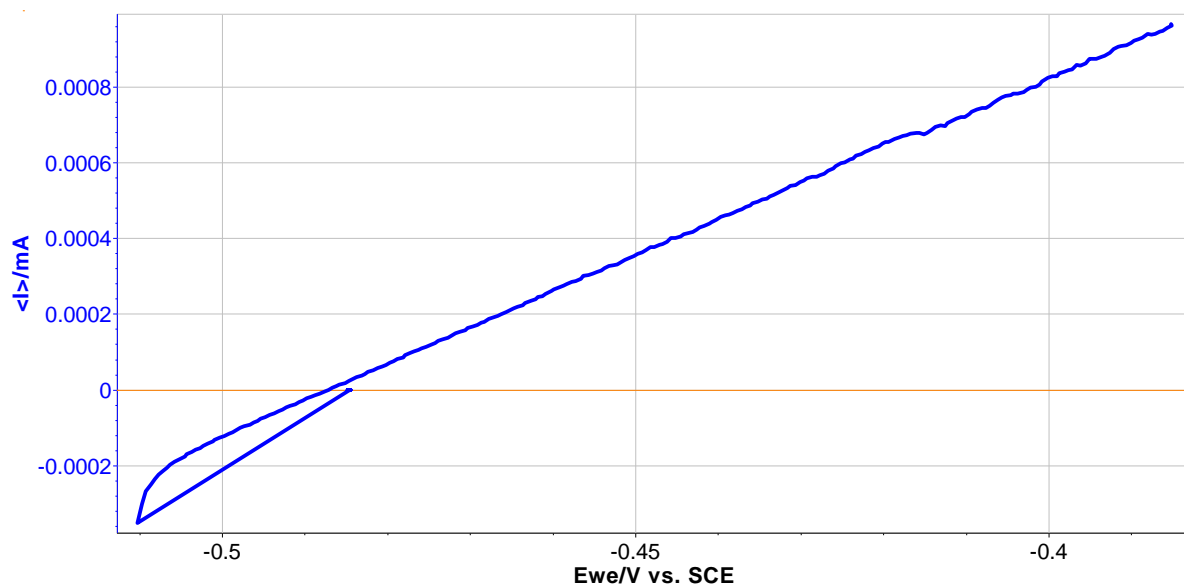
Obrázek 24 - Zapojení potenciodynamické korozní zkoušky

Nejprve bylo provedeno měření samovolného elektrochemického potenciálu po dobu ustalovacího času nastaveného na 30 minut. Během tohoto časového intervalu docházelo k ustavování elektrochemického potenciálu vůči referenční elektrodě. Na Obr. 25 je vyneseno průběh ustavování elektrochemického potenciálu vzorku S3\_10c měřeného malou korozní celou. Na svislé ose je zobrazena hodnota ustálení elektrochemického potenciálu. Na vodorovné ose se nachází čas měření.



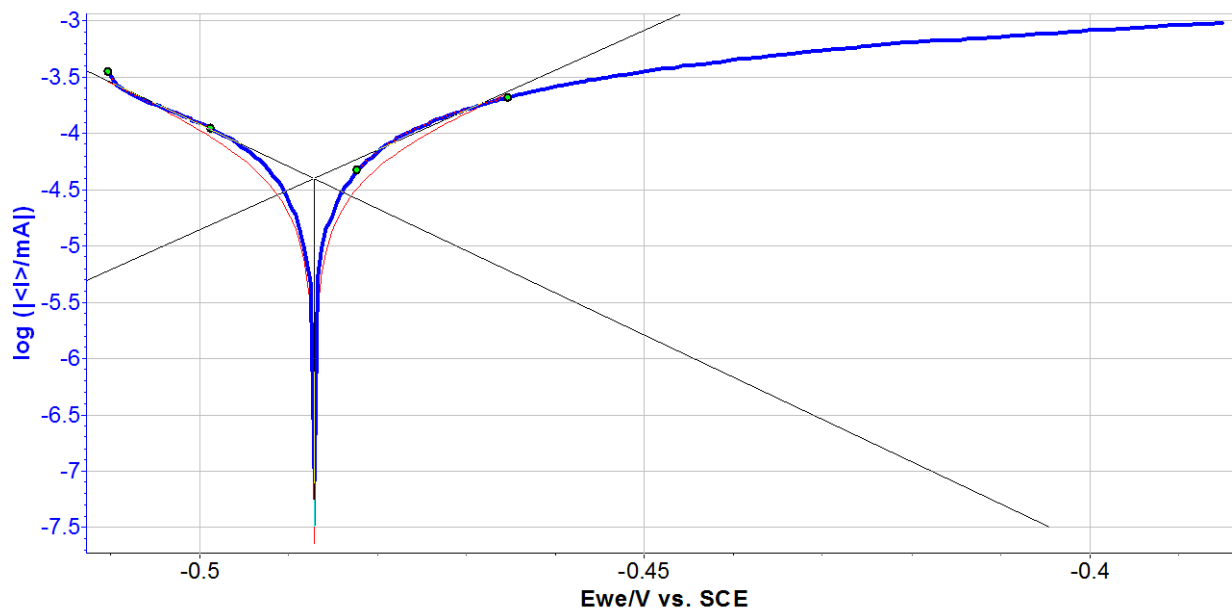
Obrázek 25 - Graf ustálení elektrochemického potenciálu vůči referenční elektrodě vzorku S3\_10c měřeného malou korozní celou

Z Obr. 26 znázorňujícího závislost smíšeného elektrochemického potenciálu na procházejícím elektrickém proudu lze provést výpočet polarizačního odporu  $R_p$ , korozního proudu  $i_{corr}$  a smíšeného elektrochemického potenciálu  $E_{corr}$ .



Obrázek 26 - Graf závislosti smíšeného elektrochemického potenciálu vůči procházejícímu proudu u vzorku S3\_10c měřeného malou korozní celou

Po přepnutí předchozího grafu do logaritmických souřadnic lze za pomoci Tafelových křivek stanovit korozní rychlost vzorku. Na Obr. 27 je zobrazeno měření korozní rychlosti malou korozní celou vzorku S3\_10c.

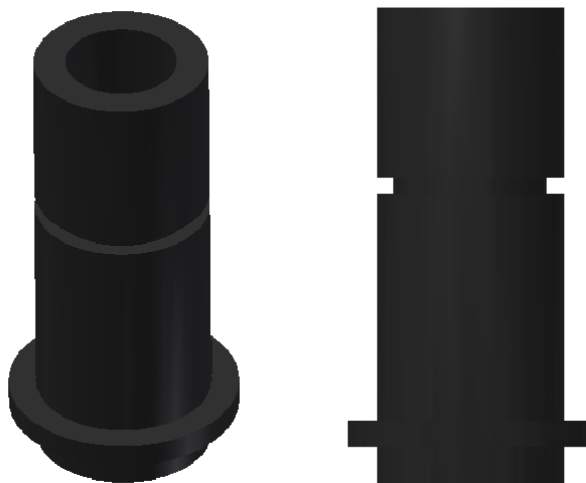


Obrázek 27 - Graf závislosti korozního potenciálu na logaritmu procházejícího proudu vzorku S3\_10c měřeného malou korozní celou s vyznačenými tečnami Tafelových oblastí

## 6.1 Návrh a výroba korozní cely pomocí 3D tisku

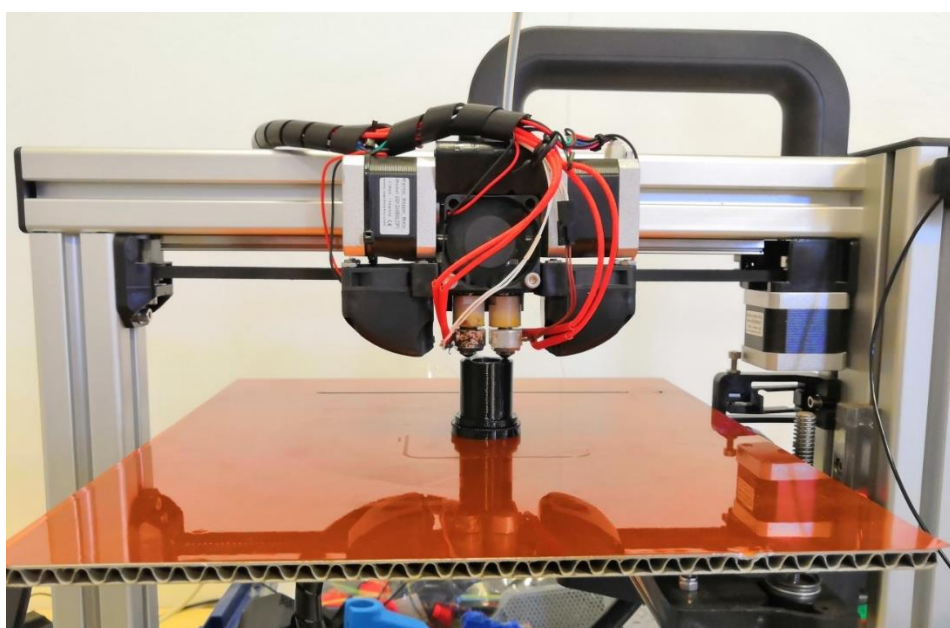
Aby bylo možné co nejlépe zachytit heterogenitu laserových návarů, byla navržena nová korozní cely s menší plochou v místě styku korozního prostředí a povrchu vzorku. Technologie výroby laserových návarů na bázi měď – čedič je velice komplikovaná. Dochází zde k heterogennímu chemickému složení a odlišné vnitřní struktury v rámci jednoho vzorku. Z tohoto důvodu byla navržena korozní cely menšího průměru, která dokáže lépe zachytit odlišné oblasti návaru a nehodnotit návar jako celek.

Model korozní cely na Obr. 28 byl konstruován za pomoci softwaru Autodesk Inventor 2013. Model byl poté převeden do formátu *stl*. pro 3D tisk. Výkresová dokumentace korozní cely je uvedena v Příloze č. 1.



Obrázek 28 - Model korozní cely pro 3D tisk

Tisk 3D modelu byl proveden na tiskárně Felix 3.0 ve spolupráci s KKS FST ZČU v Plzni. Tato tiskárna je vybavena vyhřívanou podložkou s řízenou termoregulací (až 95 °C), zaručující rovnoměrné chladnutí modelu. Díky vyhřívané podložce nedochází k deformacím vytištěného 3D modelu během tisku. Další předností této tiskárny jsou osazené dvě tiskové hlavy zajišťující dvoubarevný 3D tisk. Tisková plocha o rozměrech 255 x 205 x 220 mm umožňuje tisk velkých 3D modelů. Maximální rychlost tisku je uváděna 200 mm/s. Materiál pro tisk je zastoupen především Nylonem, Polykarbonátem, ABS nebo PLA v podobě strun usazených v zásobníku. Materiál pro výrobu modelu o velikosti 5 x 5 x 5 cm stojí přibližně 8 Kč. Provoz a tisk výrobků je tak poměrně levnou záležitostí. Přesnost dosahovaná při tisku je 0,05 mm. Detail probíhajícího 3D tisku korozní cely je zobrazen na Obr. 29 [38].



Obrázek 29 - 3D tisk korozní cely

## 6.2 Potenciodynamická korozní zkouška (korozní celá 1,77 cm<sup>2</sup>)

Pro vyhodnocení korozních vlastností potenciodynamickou korozní zkouškou byly provedeny minimálně dvě měření na každém vzorku. Naměřené hodnoty velkou korozní celou včetně přepočtu korozní rychlosti na dobu 100 000 let jsou uvedeny v Tab. 9.

Značení vzorku	Číslo měření	Korozní potenciál $E_{\text{corr}}$ [mV vs. Ref]	Polarizační odpor $R_p$ [ $\Omega$ ]	Polarizační odpor $R_p \cdot S$ [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]	Korozní rychlost $v_{\text{corr}}$ [ $\mu\text{m}/\text{rok}$ ]	Korozní úbytek za 100 000 let [mm]
S1_5c	1	-84	8 419	14 902	1,333	133,3
	2	-105	8 154	14 433	2,145	214,5
S1_5c_2v	1	-89	4 251	7 524	3,459	345,9
	2	-120	4 111	7 276	3,698	369,8
S2_CuAl	1	-138	3 526	6 241	7,731	773,1
	2	-220	4 256	7 533	6,512	651,2
S2_10c	1	-414	2 422	4 287	8,675	867,5
	2	-490	4 972	8 800	2,978	297,8
	3	-580	6 850	12 125	2,524	252,4
S3_10c	1	-352	82 499	146 023	0,284	28,4
	2	-505	76 917	136 143	0,442	44,2
	3	-402	79 541	140 788	0,332	33,2
S3_15c	1	-491	9 270 000	16 407 900	0,003	0,3
	2	-535	8 120 000	14 372 400	0,003	0,3
	3	-510	9 870 000	17 469 900	0,003	0,3
	4	-506	133 079	235 550	0,231	23,1
	5	-480	1 173	2 076	0,062	6,2
	6	-490	85 402	151 162	0,138	13,8
AISI 304	1	-156	48 609	86 038	1,061	106,1
	2	-166	39 657	70 193	1,135	113,5
C45	1	-647	930	1 646	36,232	3623,2
	2	-648	1 098	1 943	30,366	3036,6
Cu	1	-160	4 576	8 100	2,866	286,6
	2	-160	5 513	9 758	2,032	203,2
	3	-185	3 807	6 738	3,829	382,9

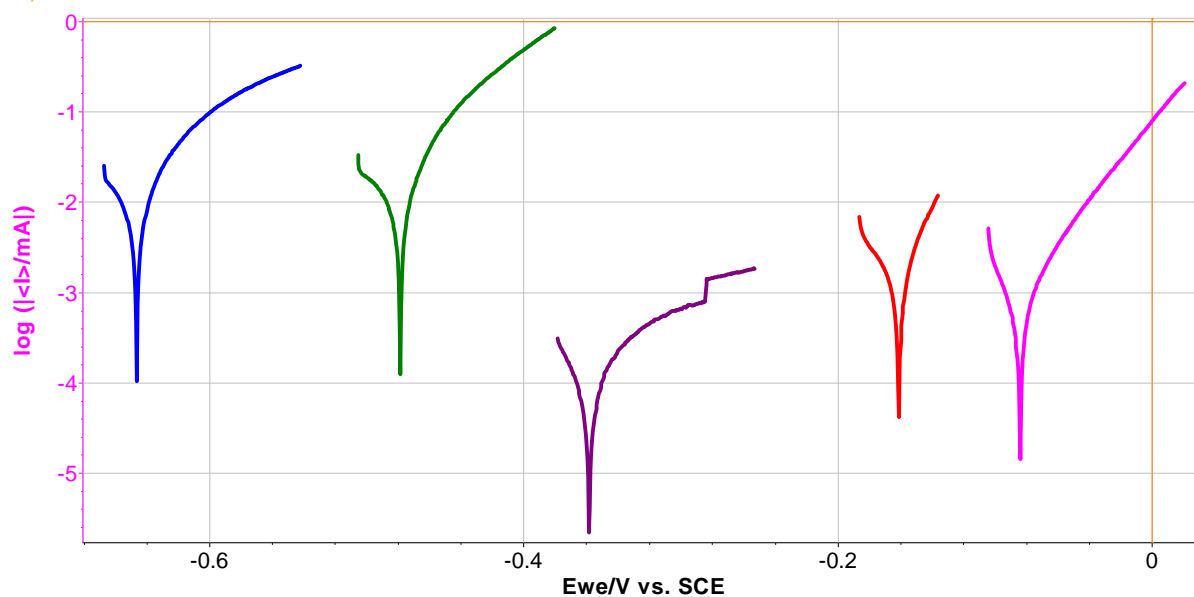
Tabulka 9 - Naměřené a vypočtené hodnoty potenciodynamické korozní zkoušky provedené velkou korozní celou

V následující Tab. 10 jsou uvedeny aritmetické průměry korozní rychlosti  $v_{\text{corr}}$  včetně směrodatné odchylky. Nejnižší korozní rychlosti dosahuje vzorek s 15 % čediče s průměrným korozním úbytkem 7,3 mm / 100 000 let. Naopak nejhorších hodnot korozní rychlosti dosahuje vzorek základního materiálu C45 s korozním úbytkem 3329,9 mm / 100 000 let.

Značení vzorku	Aritmetický průměr a směrodatná odchylka korozní rychlosti $v_{\text{corr}}$ [ $\mu\text{m}/\text{rok}$ ]	Korozní úbytek za 100 000 let [mm]
S1_5c	$1,7 \pm 0,406$	$170 \pm 40,6$
S1_5c_2v	$3,579 \pm 0,119$	$357,9 \pm 11,9$
S2_CuAl	$7,122 \pm 0,610$	$712,2 \pm 61,0$
S2_10c	$4,726 \pm 2,799$	$472,6 \pm 279,9$
S3_10c	$0,353 \pm 0,066$	$35,3 \pm 6,6$
S3_15c	$0,073 \pm 0,445$	$7,3 \pm 44,5$
AISI 304	$1,098 \pm 0,037$	$109,8 \pm 3,7$
C45	$33,299 \pm 2,933$	$3329,9 \pm 293,3$
Cu	$2,909 \pm 0,734$	$290,9 \pm 73,4$

Tabulka 10 - Korozní rychlost vzorků měřených velkou celou za 100 000 let

Tafelovy křivky naměřeny velkou korozní celou na Obr. 30 znázorňují korozní rychlost jednotlivých vzorků. Tafelova křivka červené barvy patří vzorku Cu. Křivka barvy zelené odpovídá vzorku S3\_15c s 15 % čediče a barva fialová vzorku S3\_10c s 10 % čediče. Modrá křivka znázorňuje vzorek C45 základního materiálu.



Obrázek 30 - Tafelovy křivky naměřené velkou korozní celou

### 6.3 Potenciodynamická korozní zkouška (korozní celá 0,28 cm<sup>2</sup>)

Potenciodynamická korozní zkouška malou korozní celou byla měřena minimálně na dvou místech na každém vzorku. Naměřené hodnoty malou korozní celou včetně přepočtu korozní rychlosti na dobu 100 000 let jsou uvedeny v Tab. 11.

Značení vzorku	Číslo měření	Korozní potenciál $E_{\text{corr}}$ [mV vs. Ref]	Polarizační odpor $R_p$ [ $\Omega$ ]	Polarizační odpor $R_p \cdot S$ [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]	Korozní rychlost $v_{\text{corr}}$ [ $\mu\text{m}/\text{rok}$ ]	Korozní úbytek za 100 000 let [mm]
S2_10c-m	1	-214	65 347	18 493	2,932	293,2
	2	-330	51 236	14 500	3,149	314,9
	3	-180	71 453	20 221	2,742	274,2
S2_10c-CuAl-m	1	-108	116 565	32 988	1,404	140,4
	2	-156	86 004	24 339	1,965	196,5
S3_10c-m	1	-288	223 337	63 204	0,743	74,3
	2	-505	5 070 000	1 434 810	0,041	4,1
	3	-484	104 343	29 529	1,899	189,9
S3_15c-m	1	-512	9 042	2 559	14,741	1474,1
	2	-517	12 412	3 513	13,337	1333,7
	3	-324	26 479	7 494	7,945	794,5

Tabulka 11 - Naměřené a vypočtené hodnoty potenciodynamické korozní zkoušky provedené malou korozní celou

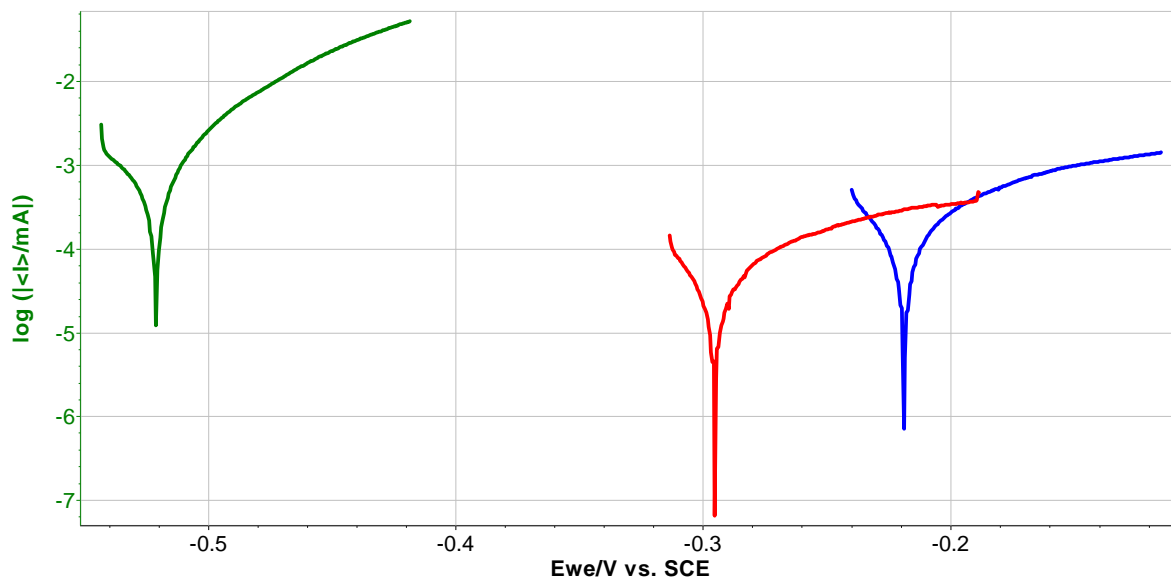
V Tab. 12 jsou zaneseny průměrné hodnoty korozní rychlosti  $v_{\text{corr}}$  naměřené malou korozní celou včetně směrodatné odchylky. Nejnižší korozní rychlosti dosahuje vzorek S3\_10c-m s 10 % čediče s korozním úbytkem 89,4 mm / 100 000 let. Naopak nejhorších hodnot korozní rychlosti dosahuje vzorek S3\_15c-m s 15 % čediče s korozním úbytkem 1200,8 mm / 100 000 let. Naměřené hodnoty malou korozní celou se poměrně liší od hodnot naměřených velkou korozní celou. Příčinou odlišných výsledků korozních testů byla přítomnost vnitřních vad v laserových návarech. To může být zapříčiněno měřením odlišné oblasti daného laserového návaru s odlišnou heterogenitou.

Značení vzorku	Aritmetický průměr a směrodatná odchylka korozní rychlosti $v_{\text{corr}}$ [ $\mu\text{m}/\text{rok}$ ]	Korozní úbytek za 100 000 let [mm]
S2_10c-m	2,941 $\pm$ 0,166	294,1 $\pm$ 0,166
S2_10c-CuAl-m	1,685 $\pm$ 0,281	168,5 $\pm$ 0,281
S3_10c-m	0,894 $\pm$ 0,766	89,4 $\pm$ 0,766
S3_15c-m	12,008 $\pm$ 2,929	1200,8 $\pm$ 2,929

Tabulka 12 - Korozní rychlost vzorků měřených malou celou za 100 000 let

Tafelovy křivky naměřeny malou korozní celou na Obr. 31 znázorňují korozní rychlost jednotlivých vzorků. Tafelova křivka modré barvy patří vzorku S2\_10c-m s 10 % čediče. Červená barva značí Tafelovu křivku vzorku S3\_10c-m s 10 % čediče. Křivka barvy zelené odpovídá vzorku S3\_15c-m s 15 % čediče.

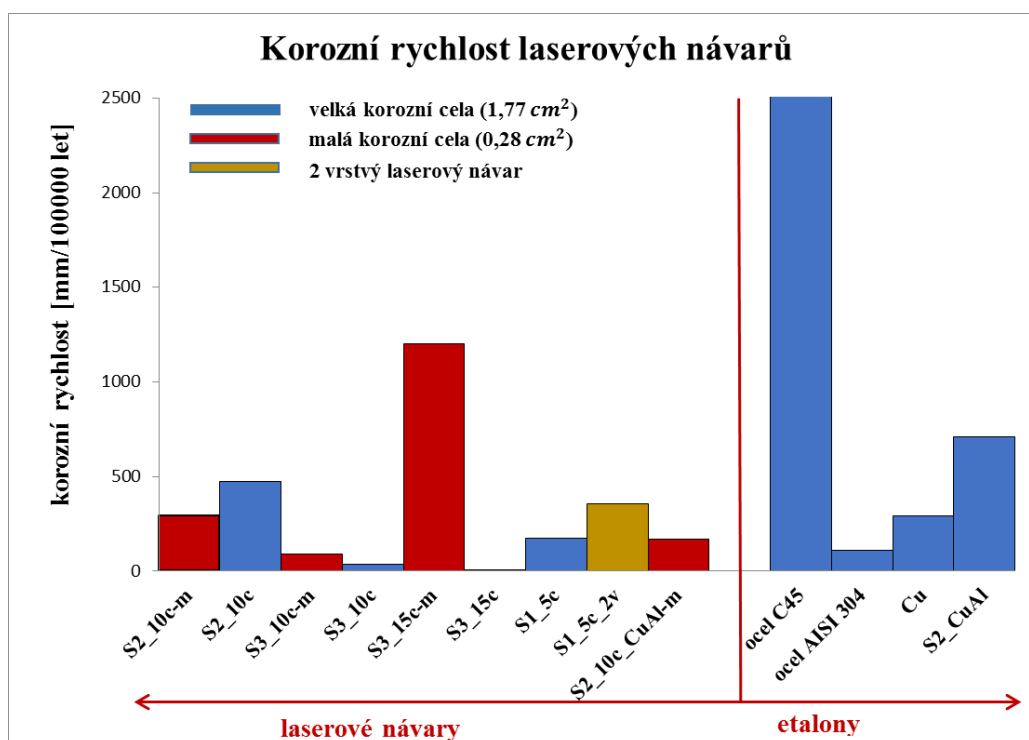




Obrázek 31 - Tafelovy křivky naměřeny malou korozní celou

#### 6.4 Porovnání výsledků potenciodynamické korozní zkoušky

Na Obr. 32 je znázorněn rozdíl korozního úbytku za 100 000 let (mm) jednotlivých kompozitních laserových návarů, substrátu z oceli C45 a etalonových vzorků z měděného plechu a oceli AISI 304. Z výsledků je patrný zlepšující se trend korozní rychlosti s rostoucím obsahem přidaného čediče do laserového návaru měřeným velkou korozní celou. U malé korozní cely tento trend není patrný z důvodu vysoké heterogenity laserového návaru. Nejnižší hodnoty korozní rychlosti znamenají nejlepší korozivzdorné vlastnosti.



Obrázek 32 - Grafické znázornění korozní rychlosti

## 7 Korozní zkouška v solné mlze

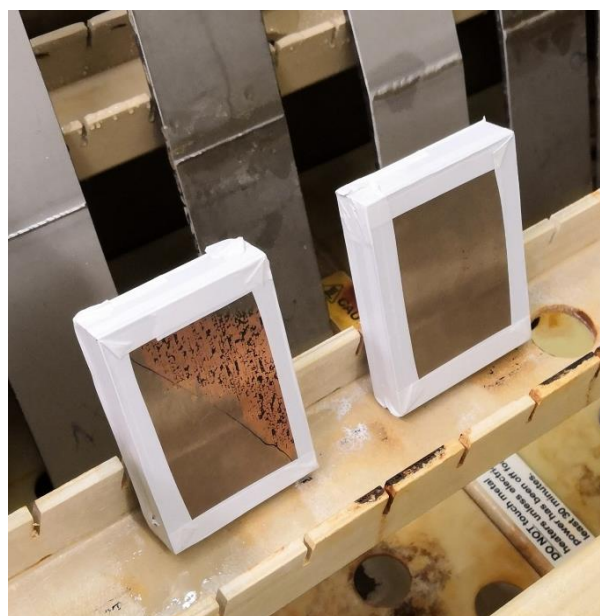
Korozní zkouška solnou mlhou probíhala v korozní komoře Q-FOG CCT 600 dle normy ČSN EN ISO 9227. Testovány byly dva vzorky ze série č. 4 s rozdílným obsahem 10 a 15 hm. % čediče v návaru. Plocha laserových návarů byla 65 x 90 mm. Substrát z oceli C45 měl výšku 20 mm. Pro zabránění podkorodování laserového návaru v oblasti rozhraní mezi laserovým návarem a substrátem, byly boční plochy vzorků opatřeny PVC lepicí páskou. Podmínky korozní zkoušky solnou mlhou jsou uvedeny v Tab. 13.

Parametry korozní zkoušky solnou mlhou	
Koncentrace roztoku chloridu sodného	5±1 %
pH solného roztoku	6,5 – 7,2
Sběrač mlhy	1,5 ml/h
Teplota v solné komoře	35±2 °C
Doba trvání zkoušky	24 hod.

Tabulka 13 - Parametry korozní zkoušky solnou mlhou

Expozičním prostředím v solné komoře byl roztok chloridu sodného v deionizované vodě. Hodnota pH roztoku byla určena indikátorovým papírkem. Expoziční teplota probíhajícího korozního testu, byla  $32 \pm 2$  °C. Vlhkost byla regulována automaticky. Na Obr. 33 jsou vzorky, umístěné v korozní komoře pod úhlem  $30 \div 35$  ° ke svislé ose. V průběhu testování byla prováděna průběžná kontrola a fotodokumentace stavu napadení povrchů vzorků korozi. Po ukončení testu byly testované vzorky vyjmuty, očištěny a osušeny proudem vzduchu.

Následné vyhodnocení korozního napadení laserově navařených vzorků bylo provedeno vizuálně vyjádřením procentuálního podílu korozního napadení dle normy ČSN EN ISO1028 a znázorněné v Tab. 14.



Obrázek 33 - Vzorky před spuštěním testu

Označení vzorku	Vyhodnocení zkoušky dle ČSN EN ISO 10289		
	Podíl plochy vzorku napadené korozi [%]	Stupeň ochrany $R_p$	Zjištěné typy vad
S4_10	25	2	Vznik prasklin, korozní důlky, vznik sítě trhlinek
S4_15	25	2	Vznik prasklin, korozní důlky, vznik sítě trhlinek

Tabulka 14 - Vyhodnocení korozní zkoušky solnou mlhou

Vyhodnocení testu provedené dle normy vykazuje u všech vzorků stupeň ochrany proti korozi 2. Na vzorcích zobrazených na Obr. 34 a 35 jsou patrné korozní důlky, sítě trhlinek a prasklin.



Obrázek 34 - Makrosnímek vzorku S4\_10c po provedení korozní zkoušky v solné mlze



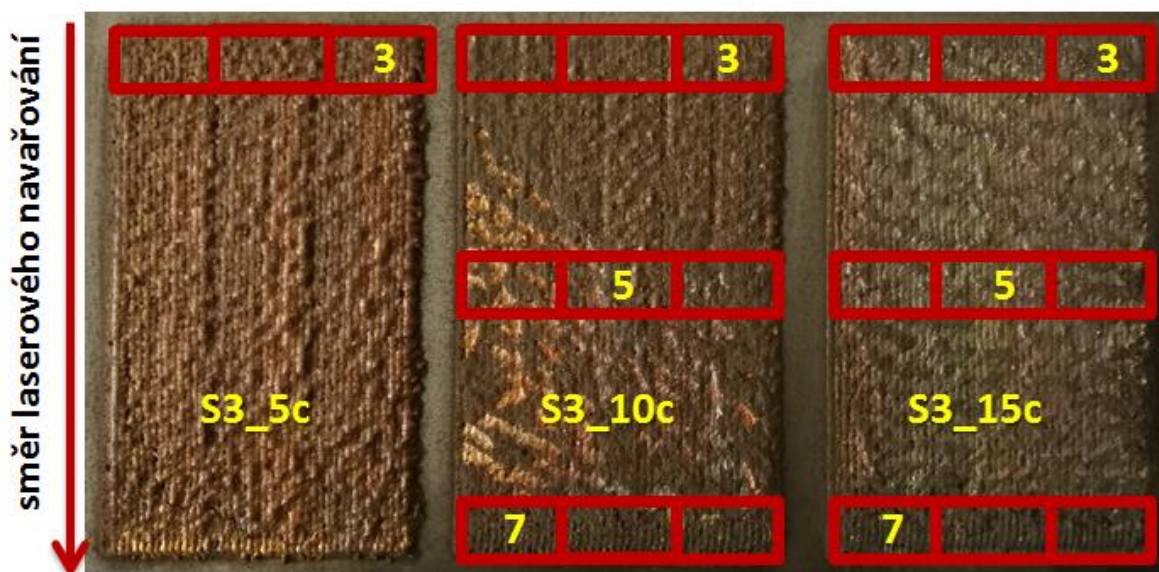
Obrázek 35 - Makrosnímek vzorku S4\_15c po provedení korozní zkoušky v solné mlze

## 8 Metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů

Vzorky pro metalografické hodnocení byly nařezány metalografickou pilou Struers Discotom-6. Odběr vzorků byl proveden dle značení na Obr. 36. Pro srovnání byly pozorovány pouze vzorky z **POZIC 3, 5 a 7** ze vzorků S3\_5c, S3\_10c a S3\_15c. Tyto pozice byly vybrány pro srovnání odlišných oblastí kompozitního laserového návaru. Broušení a leštění proběhlo na brusce Struers Tegramin-20 a následné leptání bylo provedeno v leptadle Robin. Chemické složení leptadla je uvedeno v Tab. 15. Toto leptadlo je určeno především pro měď a její slitiny.

Chemické složení leptadla Robin			
H <sub>2</sub> O	FeCl <sub>3</sub>	HCL	etanol
5 ml	5g	25 ml	37 ml

Tabulka 15 - Chemické složení leptadla Robin

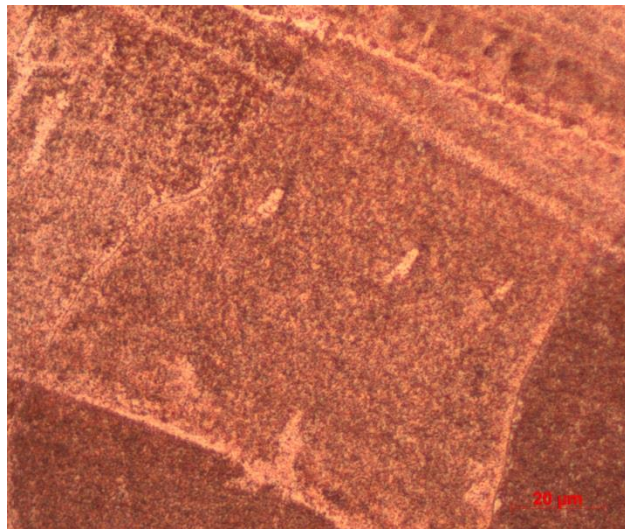


Obrázek 36 - Schéma jednotlivých POZIC odběru vzorků pro metalografii

## 8.1 Metalografické hodnocení pomocí optického světelného mikroskopu

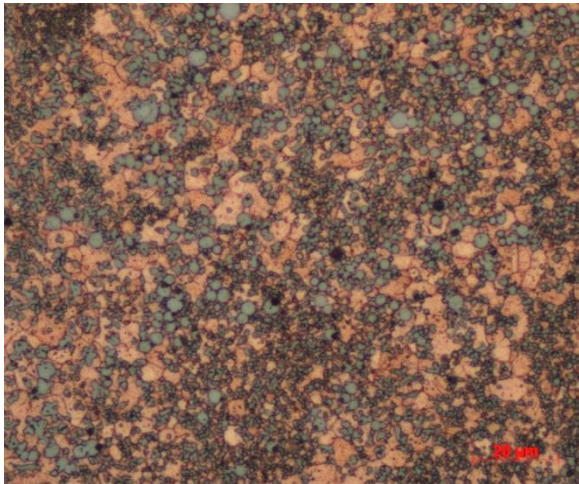
Fotodokumentace kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič byla pořízena na světelném mikroskopu Carl Zeiss 21M. Všechny následující snímky této kapitoly byly pořízeny při totožném zvětšení mikroskopu 1000x. Aby bylo možné jednotlivé snímky laserových návarů vzájemně porovnat, byla u každého vzorku fotodokumentace pořízena ve vzdálenosti 50  $\mu\text{m}$  od užité výšky laserového návaru.

Na Obr. 37 je zachycen vzorek S3\_05c z **POZICE 3**. Na **POZICÍCH 5, 7** nebylo možné metalografické hodnocení provést z důvodu nedostatečné adheze laserového návaru a substrátu.

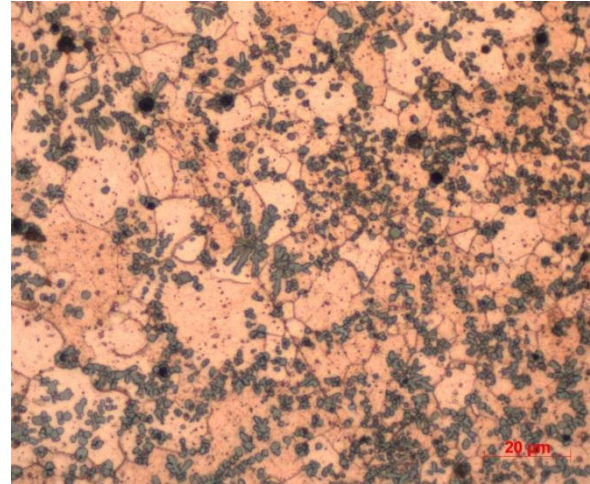


Obrázek 37 - Vzorek S3\_05c, POZICE 3, leptáno, zv. 1000x

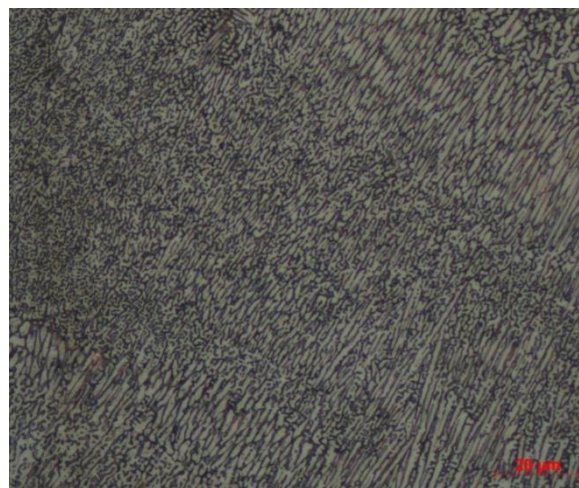
Na Obr. 38, 39 a 40 vztažených k vzorku S3\_10c je patrný pokles obsahu mědi v úhlopříčném směru dle pozic před rozřezáním vzorků. Struktura vzorku S3\_10c z **POZICE 3** a **5** vykazuje základní matici tvořenou mědí o vysoké čistotě. Jsou zde také jasně patrné hranice zrn mědi. Čedič je disperzně rozmístěn v matici mědi. Na Obr. 40 z **POZICE 7** je patrna dendritická struktura tvořena převážně Fe a to z důvodu umístění této pozice na konci laserově navařené housenky.



Obrázek 38 - Vzorek S3\_10, POZICE 3, leptáno,  
zv. 1000x

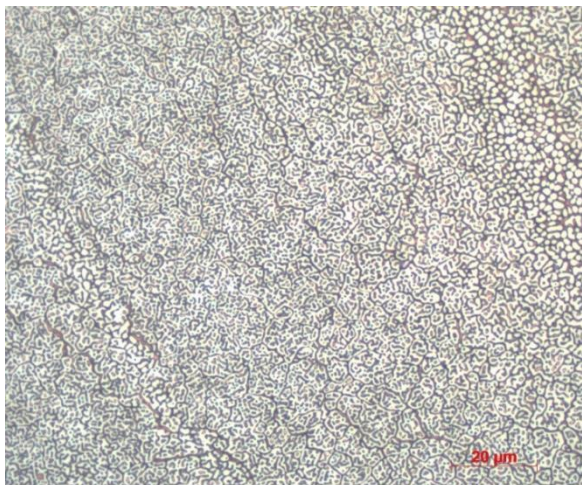


Obrázek 39 - Vzorek S3\_10, POZICE 5, leptáno,  
zv. 1000x

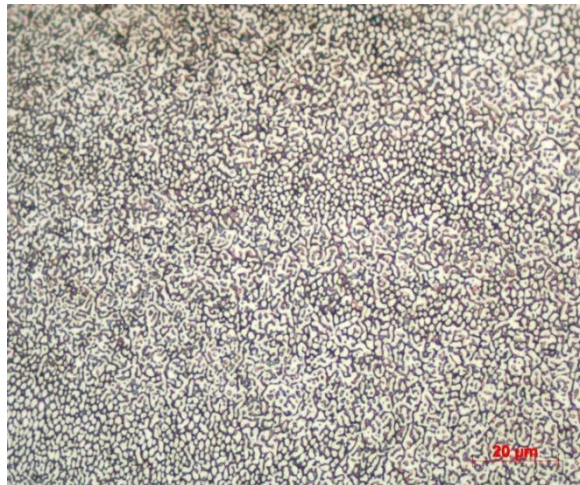


Obrázek 40 - Vzorek S3\_10, POZICE 7, leptáno,  
zv. 1000x

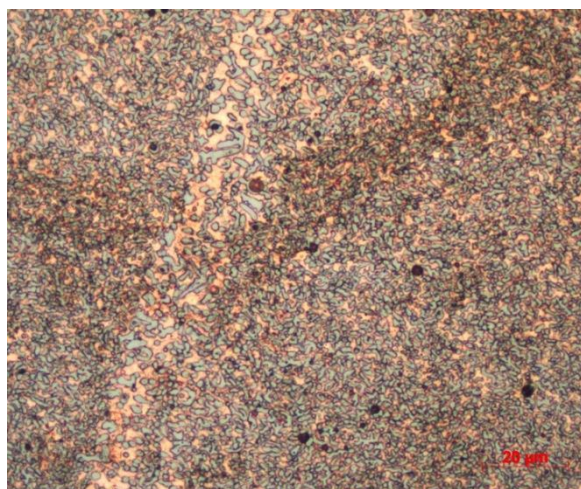
Obr. 41, 42 a 43 ze světelného mikroskopu vzorku S3\_15c vykazují velmi jemnou strukturu, která byla na Obr. 41 a 42 místy identifikována jako celulární. Mezidendritické prostory jsou vyplněny převážně mědí. Obsah mědi a samotná struktura materiálu se znovu mění úhlopříčně dle umístění jednotlivých pozic vzorků.



Obrázek 41 - Vzorek S3\_15, POZICE 3, leptáno,  
zv. 1000x



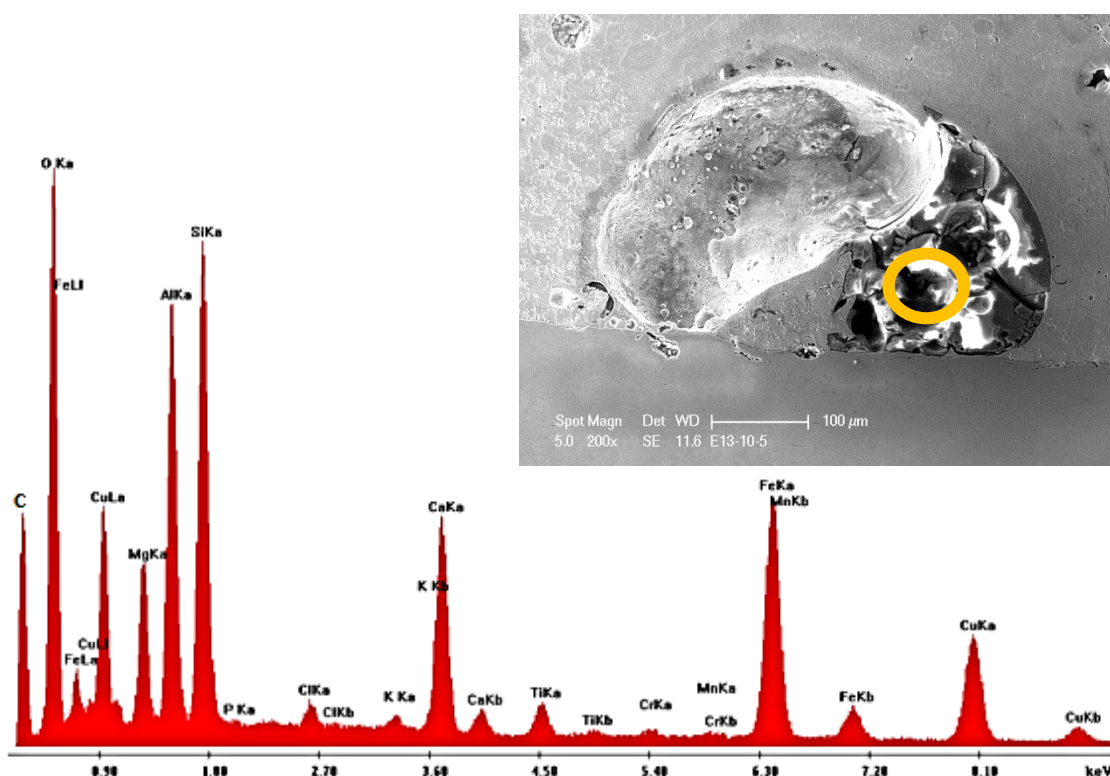
Obrázek 42 - Vzorek S3\_15, POZICE 5, leptáno,  
zv. 1000x



Obrázek 43 - Vzorek S3\_15, POZICE 7, leptáno,  
zv. 1000x

## 8.2 Metalografie na ŘEM

K mikroskopickému hodnocení a analýze chemického složení v jednotlivých částech metalografických výbrusů byl použit řádkovací elektronový mikroskop Tescan MIRA3 GMU. Na Obr. 44A je znázorněno energetické spektrum nerozpuštěné čedičové částice zachycené na Obr. 44B vzorku S3\_10c. Dle výsledného chemického hodnocení z Tab. 16 se jedná o oblast s vyskytující se čedičem. Koncentrace C nebude do celkového výpočtu chemického složení zahrnuta, protože velmi zneprěsí výsledek. Nicméně, jak dokumentuje EDX spektrum, jeho přítomnost je prokazatelná.



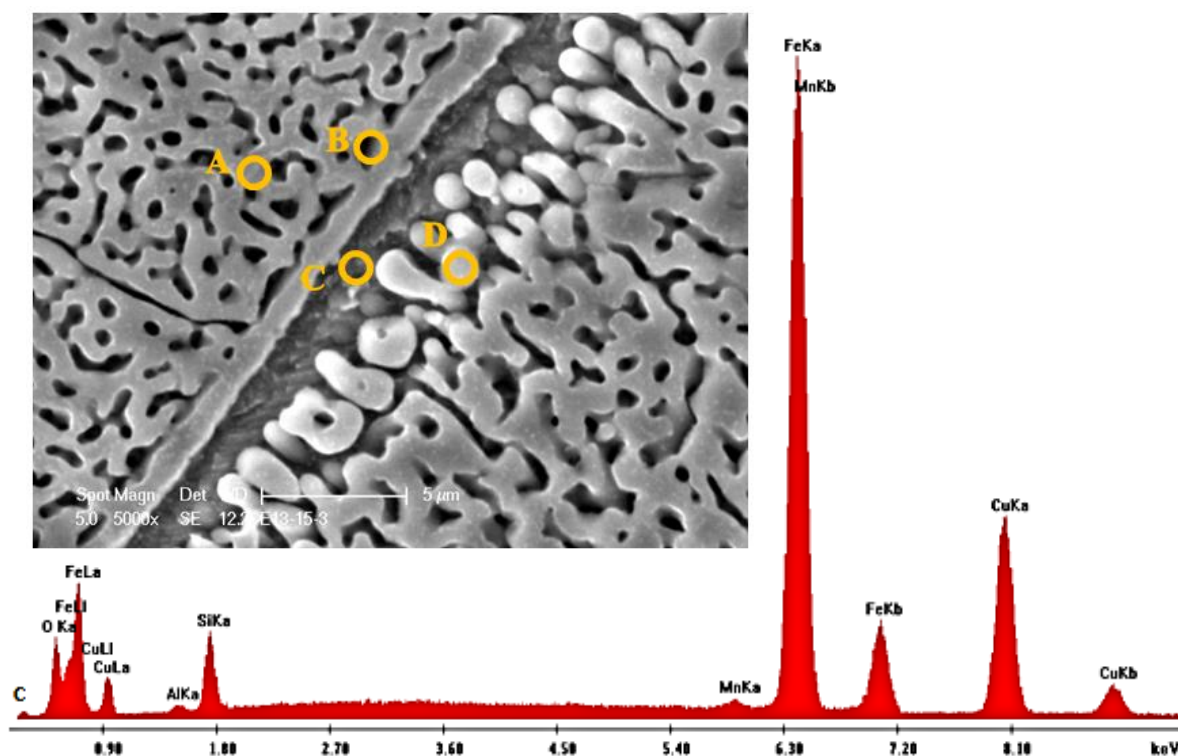
Obrázek 44 - Vzorek S3\_10c; A-EDX analýza chemického složení vyobrazené oblasti; B-měřená oblast

Obsah chemických prvků z EDX analýzy S3_10c z Obr. 36 [hm. %]							
O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Fe	Cu
34,6	5,9	13,1	13,5	5,4	1	14	11

Tabulka 16 - EDX analýza chemického složení vzorku S3\_10c



Obr. 45A znázorňuje chemickou analýzu vzorku S3\_15c. Jednotlivé měřené oblasti jsou zvýrazněny na Obr. 45B a získané hodnoty zaneseny do Tab. 17. Oblast A vyznačuje plochu souvislého dendritu složenou především z Fe a Cu. Oblast B byla měřena v mezidendritickém prostoru a její chemické složení vykazovalo obsah čediče. Meziprostor C obsahuje převážně Cu, zatímco dendritická struktura v oblasti D je obsažena převážně Fe.

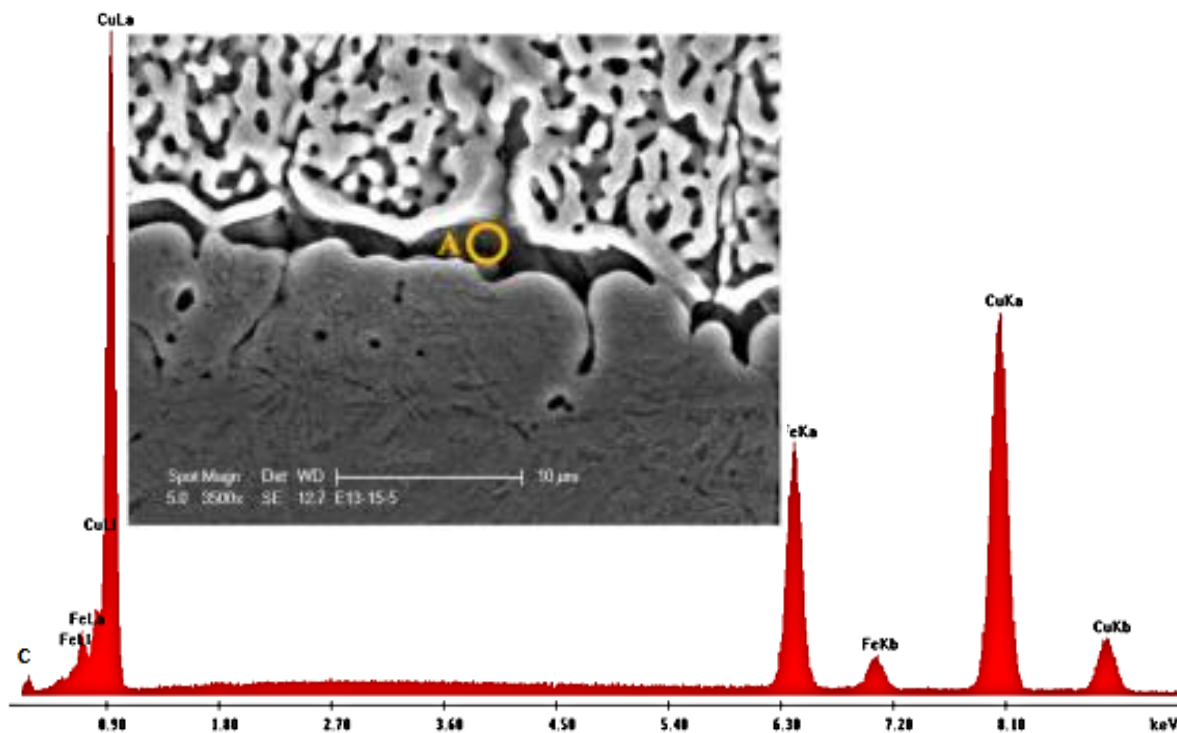


Obrázek 45 - S3\_15c; A-EDX analýza chemického složení vyobrazené oblasti; B-měřená oblast

Obsah chemických prvků z EDX analýzy S3_15c z Obr. 37 [hm. %]						
Oblast	O	Al	Si	Mn	Fe	Cu
A	-	-	-	-	62,8	37,2
B	5,8	0,6	4,2	0,8	55,7	32,9
C	-	-	-	-	30,9	69,1
D	-	-	-	-	72,4	27,6

Tabulka 17 - EDX analýza chemického složení vzorku S3\_15c

Rozhraní laserového návaru znázorněné na Obr. 46B vzorku S3\_15c vykazuje dle Tab. 18 chemické složení s převážujícím obsahem Cu nad Fe. Toto rozhraní je oblastí mezi dendritickou strukturou laserového návaru a substrátem.



Obrázek 46 - S3\_15c; A-EDX analýza chemického složení vyobrazené oblasti; B-měřená oblast

Obsah chemických prvků z EDX analýzy S3_15c z Obr. 38 [hm. %]		
Oblast	Fe	Cu
A	23,8	76,2

Tabulka 18 - EDX analýza chemického složení vzorku S3\_15c

## 9 Diskuse výsledků

Cílem experimentálního programu bylo vytvoření kompozitního laserového návaru bázi mědi-čedič.

Základním materiálem pro laserové navařování byla zvolena ocel C45 (Wr.N. 1.1201; ČSN 41 2050) o tloušťce 20 mm. Jedná se o nelegovanou ušlechtilou ocel s dobrou dostupností na trhu s hutními materiály. Přídavným materiálem pro laserové navařování byla měď v podobě (Metco 55) prášku distribuovaná společností Oerlicon Metco s minimálním obsahem mědi 99 % a velikosti kulovitých částic 45 – 90  $\mu\text{m}$ . Do tohoto prášku byl přimíchán prášek čediče v různém procentuálním zastoupení. Laserové navařování kompozitu složeného z prášku mědi a čediče je velice unikátní postup. Z tohoto důvodu nebylo možné sehnat čedičový prášek ve specializovaných prodejnách zaměřujících se na laserové navařování nebo plazmové nástřiky. Čedičový prášek tak byl pro experimentální program zakoupen v prodejně specializující se na prodej modelářských potřeb. Laserové návary tak postupně obsahovaly 5, 10 a 15 hmotnostních % čediče.

Laserové návary byly realizovány na pracovišti NTC ZČU v Plzni. Před samotným navařováním musel být upraven povrch základního materiálu a namíchán přídavný prášek. Základní materiál byl zbroušen magnetickou bruskou po obou stranách. Pro laserové navařování byl zdrojem energie pevnolátkový diskový laser Trumpf TruDisk 8002 s průměrem laserového svazku 3,4 mm a vlnovou délkou  $\lambda = 1030 \text{ nm}$ . Hnacím a ochranným plynem zároveň byl použit argon o čistotě 99,99 %.

Měření korozní odolnosti bylo provedeno na potenciostatu BioLogic SP-150. Pro zachycení menší plochy laserového návaru byla navržena a vyrobena menší korozní cela na 3D tiskárně Felix 3.0 ve spolupráci s KKS FST ZČU v Plzni. Samotné měření korozní odolnosti potenciodynamickou korozní zkouškou bylo provedeno malou (0,28  $\text{cm}^2$ ) a velkou (1,77  $\text{cm}^2$ ) korozní celou minimálně dvakrát na každém vzorku. Měření velkou korozní celou prokázalo zvyšující se korozní odolnost s narůstajícím procentem čediče v přídavném prášku pro laserové navařování. Měření malou korozní celou tyto výsledky nepotvrdilo. Důvodem bylo zasažení vady malou plochou malé korozní cely, kde malá plocha zvýrazní zasaženou vadu mnohem více než plocha větší.

Dále byla korozní odolnost experimentálních vzorků testována korozní zkouškou v solné mlze dle normy ČSN EN ISO 9227. Pro testování byla použita korozní komora Q-FOG CCT 600. Test proběhl pouze na vzorcích ze 4. série (10 a 15 hm. % čediče). Expoziční doba korozního testu byla 24 hodin. Po uplynulé době byly vzorky laserových návarů z korozní

komory vyndány, neboť testované povrchy vykazovaly značné korozní napadení v podobě prasklin a korozních důlků. Tyto výsledky byly zapříčiněny trhlinami v návaru a dále vysokou pórovitostí laserových návarů.

Vzorky pro metalografické hodnocení byly nařezány metalografickou pilou Struers Discotom-6. Odběr vzorků byl proveden úhlopříčně pro zahrnutí celého průřezu vzorku. Broušení a leštění proběhlo na brusce Struers Tegramin-20 a následné leptání bylo provedeno v leptadle Robin. K mikroskopickému hodnocení a analýze chemického složení v jednotlivých částech metalografických výbrusů byl použit řádkovací elektronový mikroskop Tescan MIRA3 GMU. ŘEM prokázal velice heterogenní strukturu v průřezu celého laserového návaru. Metalografické snímky byly vyhotoveny na světelném mikroskopu Carl Zeiss 21M. Každý snímek byl focen s 1000x zvětšením a plocha zaznamenání byla odměřena pro přesné porovnání v totožných oblastech. Struktura laserových návarů byla vyhodnocena jako velice jemnozrná. V závislosti na vybrané pozici se struktura laserových návarů lišila. Prvním typem byla základní matrice tvořena mědí s rozpoznatelnými hranicemi zrn a disperzně rozmístěnými částicemi čediče. Druhým typem byla dendritická struktura, která byla místy popsána jako celulární.

## 10 Závěr

Experimentální program této diplomové práce byl proveden ve spolupráci s NTC ZČU Plzeň a společností LaserTherm s cílem vytvoření kompozitního laserového návaru na bázi měď-čedič. Zkoumána byla především korozní odolnost v závislosti na procentuálním obsahu čediče v měděném prášku Metco 55.

- Testováním korozní odolnosti potenciodynamickou korozní zkouškou byl prokázán výrazný vliv přidaného čediče na výslednou korozní rychlost. Nejlepších hodnot dosahovaly vzorky s obsahem 15 % čediče.
- Testováním odolnosti laserových návarů pomocí korozní zkoušky v solné mlze odhalilo velké množství vnitřních vad návaru zejména trhlin a pórů.
- Metalografickým hodnocením byla identifikována struktura kompozitních laserových návarů jako velice jemná. Byly odhaleny dva zcela odlišné typy vzniklých materiálových struktur. Prvním typem byla základní matrice tvořena mědí s jasně viditelnými hranicemi zrn a s disperzně rozmístěnými částicemi čediče. Druhým typem byla dendritická struktura, která byla místy vyhodnocena jako celulární. EDX analýza prokázala odlišné chemické složení v průřezech jednotlivých vzorků.

## 11 Seznam použité literatury

- [1] HROZEK, Dian. Úložiště radioaktivního odpadu – obecný popis a situace v ČR. *Oenergetice.cz* [online]. 2015 [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/uloziste-jaderneho-odpadu-obecny-popis-situace-v-cr/>
- [2] STEINWARZ, Wolfgang, Roland HÜGGENBERG a Ernst WARNKE. CASTOR® , ein High-tech-Produkt aus duktilem Gusseisen. *Siempelkamp* [online]. 2006, (1), 2-7 [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: [https://www.siempelkamp.com/fileadmin/media/Deutsch/Nukleartechnik/produkte/Hightech-Produkt\\_aus\\_duktilem\\_Gusseisen.pdf](https://www.siempelkamp.com/fileadmin/media/Deutsch/Nukleartechnik/produkte/Hightech-Produkt_aus_duktilem_Gusseisen.pdf)
- [3] *Radioaktivní odpady a skupina ČEZ* [online]. Praha, 1-32 [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/data/web/vzdelavaci-program-cez/tiskoviny/radioaktivni-odpady-a-skupina-cez.pdf>
- [4] Zkoumané lokality. *SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ* [online]. Praha [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/hlubinne-uloziste/zkoumane-lokality>
- [5] DRÁBOVÁ, Dana. *Jaderná energetika-technologie a bezpečnost* [online]. In: . Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, s. 1-67 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2891547/>
- [6] *HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ* [online]. In: . Praha: SÚRAO, 2016, s. 1-16 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/data/original/files/pr/brozury/brozura-hlubinne-uloziste-2016.pdf>
- [7] 9 míst pro jaderné úložiště. In: *IDNES.cz* [online]. 2018, 28. 9. 2018 [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: [https://jihlava.idnes.cz/lipnik-referendum-uloziste-jaderneho-odpadu-vysledek-pp1-/jihlava-zpravy.aspx?c=A180928\\_194218\\_jihlava-zpravy\\_pas](https://jihlava.idnes.cz/lipnik-referendum-uloziste-jaderneho-odpadu-vysledek-pp1-/jihlava-zpravy.aspx?c=A180928_194218_jihlava-zpravy_pas)
- [8] TOYSERKANI, Ehsan, Amir KHAJEPOUR a Stephen CORBIN. *Laser cladding*. Boca Raton, Fl.: CRC Press, 2005. ISBN 0-8493-2172-7.
- [9] LASEROVÉ NAVAŘOVÁNÍ. *Vuts.cz* [online]. Liberec [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: <http://www.vuts.cz/laserove-navarovani.html>
- [10] KLUFOVÁ, Pavla. *Odolnost proti degradaci laserem navařených austenitických vrstev*. Plzeň, 2018. Disertační práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, FAKULTA STROJNÍ, Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž.
- [11] ION, John C. *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application*. Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0-7506-6079-1.
- [12] Wu, D., Guo, M., Ma, G., Niu, F. Dilution characteristics of ultrasonic assisted laser clad yttria-stabilized zirconia coating. In *Materials Letters*. ISSN: 0167-577X

- [13] Bruck, G., Fundamentals and industrial applications of high power laser beam cladding. 1988 Dearborn Symposium. International Society of Optics and Photonics. doi: 10.1117/12.947699
- [14] SOUČEK, Pavel. *Analýza vrstev pomocí elektronové spektroskopie a podobných metod* [online]. In: . s. 12-15 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: [http://physics.muni.cz/~dorian/Soucek\\_Elektronova\\_mikroskopie.pdf](http://physics.muni.cz/~dorian/Soucek_Elektronova_mikroskopie.pdf)
- [15] SINGH, Surinder, Kumar MANOJ, Pal Singh Sodhi GURVINDER, Kumar Buddu REMESH a Singh HARPREET. Development of thick copper claddings on SS316L steel for In-vessel components of fusion reactors and copper-cast iron canisters. *Fusion Engineering and Design* [online]. 2018, , 126-137 [cit. 2019-03-06]. ISSN 0920-3796. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.01.076>
- [16] ZETEK, Miroslav, Ivana ČESÁKOVÁ a Josef SKLENIČKA. Obrábění laserem kaleného povrchu. *Transfer inovací* [online]. 2011, (20), 1-5 [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: <http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/20-2011/pdf/036-040.pdf>
- [17] KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Lasery a Optika* [online]. Praha, 2011, 15.3.2011 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [18] HAN, Tengfei, Meng XIAO, Jie ZHANG, Xiaomei FENG a Yifu SHEN. *Laser cladding composite coating on mild steel using Ni-Cr-Ti-B4C powder* [online]. 2018, 1-8 [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/02670844.2018.1534926>
- [19] *Firemní podklady firmy SANDVIK* [online]. In: . [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.materials.sandvik.cz/>
- [20] LI, N., J. LUO, P. ZHAO, M. SHA, S. LI a J. ZHANG. Microstructure and property of laser treated copper cladding on pure iron. *Materials Research Innovations* [online]. 2014, 18(sup2), S2-310-S2-315 [cit. 2019-03-06]. DOI: 10.1179/1432891714Z.000000000420. ISSN 1432-8917. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1432891714Z.000000000420>
- [21] GONZÁLEZ, F. A., J.del VAL, R. COMESANA, et al. Laser cladding of phosphor bronze. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2017, (313), 248-254 [cit. 2018-11-11]. ISSN 0257-8972. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897217301081>
- [22] ŠULC, Radek. *Koroze* [online]. Praha: Ústav procesní a zpracovatelské techniky, 2008, 1-60 [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: [http://www1.fs.cvut.cz/cz/U218/pedagog/predmety/1rocnik/chemie1r/prednes/Ch\\_predn13-Ko.pdf](http://www1.fs.cvut.cz/cz/U218/pedagog/predmety/1rocnik/chemie1r/prednes/Ch_predn13-Ko.pdf)
- [23] NOVÁK, Pavel. Druhy koroze kovů. *Koroze a ochrana materiálu* [online]. Praha, 2005, 75-82 [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/KPU/koroze%20druhy%20vscht.PDF](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KPU/koroze%20druhy%20vscht.PDF)

[24] JONES, Denny. *Principles and Prevention of Corrosion*. 2.edition. Pearson Education Limited, 2014. ISBN 978-1-29204-255-8.

[25] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000, 218 s. ISBN 80-7082-668-1.

[26] NOVÁK, Pavel. *Koroze kovů* [online]. Praha, 1-63 [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: <https://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze%20kov%C5%AF.pdf?redirected>

[27] ROBERGE, Pierre R. *Handbook of corrosion engineering*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2012. ISBN 978-0-07-175037-0.

[28] NĚMCOVÁ, Aneta a Bohumil PACAL. Korozní zkoušení kovových materiálů. *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. Brno, 2010 [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/>

[29] Stanovení korozní rychlosti elektrochemickými polarizačními metodami [online]. Praha: VŠCHT, , 1-8 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Stanoven%C3%AD%20korozn%C3%AD%20rychlosti%20elektrochemick%C3%BDmi%20metodami.pdf?redirected>

[30] BYSTRIANSKÝ, Václav. *NÁVODY PRO LABORATOŘE ENERGETIKY: Elektrochemické metody stanovení korozní rychlosti* [online]. Praha, 2016, 1-3 [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: <https://uen.vscht.cz/studium/8321>

[31] HADZIMA, Branislav. *KOROZIA ZLIATIN Mg-Al-Zn*. Žilina, 2003. Disertace. ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINĚ. Vedoucí práce Prof. Ing. Peter Palček, PhD.

[32] EcLab – software pro vyhodnocování Potenciodynamických korozních zkoušek

[33] BOHDAN BOLZANO, s.r.o Ocel C45

[34] *OERLIKON: Katalogové listy* [online]. 2014 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.oerlikon.com/en/>

[35] *Nejdůležitější vyvřelé výlevné horniny: ČEDIC* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: [http://prirodopis9.wz.cz/horniny/vylevne\\_vyvreliny\\_prehled.pdf](http://prirodopis9.wz.cz/horniny/vylevne_vyvreliny_prehled.pdf)

[36] BioLogic Sp-150. *BioLogic* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.biologic.net/products/potentiostat-galvanostat-eis/sp-150/>

[37] MACHIO, C. N., D. S. KONADU, J. H. POTGIETER, S. POTGIETER-VERMAAK, a J. VAN DER MERWE. HINDAWI PUBLISHING CORPORATION. *Corrosion of WC-VCCoHardmetal in Neutral Chloride Containing Media* [online]. 2012 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/isrn/2013/506759/>

[38] *FELIX printers* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.felixprinters.cz/popis-3d-tiskarny/>



## 12 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Kontejner CASTOR – 440/84 [5].....	11
Obrázek 2 - Vhodné lokality jaderných uložišť [7].....	12
Obrázek 3 - Příklad EDX analýzy [14] .....	17
Obrázek 4 - Schéma laseru [16] .....	18
Obrázek 5 - Pevnolátkové lasery [16] .....	19
Obrázek 6 - Schéma koaxiálního a laterálního přívodu prášku [8] .....	20
Obrázek 7 - Laserový návar Cu na substrát z oceli SS316 [14] .....	22
Obrázek 8 - Příčný řez laserového návaru na bázi mědi vzorku č. 1 [19].....	24
Obrázek 9 - Laserový návar fosforového bronzu [20] .....	25
Obrázek 10 - Rozdělení korozních zkoušek na expoziční a elektrochemické metody testování koroze.....	27
Obrázek 11 - Polarizační křivka železa [28] .....	28
Obrázek 12 - Schéma zapojení potenciodynamické korozní zkoušky [31].....	29
Obrázek 13 - Tafelova analýza potenciodynamické křivky [30] .....	30
Obrázek 14 - Sternova analýza potenciodynamické korozní křivky[30] .....	30
Obrázek 15 - Schéma korozní komory [27] .....	31
Obrázek 16 - Laserový návar měď - čedič, vlevo vzorek č. S3_5c, uprostřed vzorek č. S3_10c, vpravo vzorek č. S3_15c .....	35
Obrázek 17 - Ocel C45 perliticko-feritická struktura,leptáno Nital 3 %, zv. 500x .....	36
Obrázek 18 - Ocel C45 perliticko-feritická struktura,leptáno Nital 3 %, zv. 100x vlevo .....	36
Obrázek 19 - Čedičový prášek .....	38
Obrázek 20 - Přidavný čedičový prášek pro laserové navařování; SEM zvětšeno 80x .....	39
Obrázek 21 - Přidavný čedičový prášek pro laserové navařování; SEM zvětšeno 400x .....	39
Obrázek 22 - EDX analýza chemického složení čedičového prášku .....	39
Obrázek 23 - Potenciostat BioLogic SP-150 [35] .....	41
Obrázek 24 - Zapojení potenciodynamické korozní zkoušky .....	42
Obrázek 25 - Graf ustálení elektrochemického potenciálu vůči referenční elektrodě vzorku S3_10c měřeného malou korozní celou.....	43
Obrázek 26 - Graf závislosti smíšeného elektrochemického potenciálu vůči procházejícímu proudu u vzorku S3_10c měřeného malou korozní celou.....	43
Obrázek 27 - Graf závislosti korozního potenciálu na logaritmu procházejícího proudu vzorku S3_10c měřeného malou korozní celou s vyznačenými tečnami Tafelových oblastí.....	44
Obrázek 28 - Model korozní cely pro 3D tisk .....	45
Obrázek 29 - 3D tisk korozní cely .....	45
Obrázek 30 - Tafelovy křivky naměřené velkou korozní celou .....	47
Obrázek 31 - Tafelovy křivky naměřeny malou korozní celou.....	49
Obrázek 32 - Grafické znázornění korozní rychlosti .....	49
Obrázek 33 - Vzorky před spuštěním testu .....	50
Obrázek 34 - Makrosnímek vzorku S4_10c po provedení korozní zkoušky v solné mlze.....	51
Obrázek 35 - Makrosnímek vzorku S4_15c po provedení korozní zkoušky v solné mlze.....	51
Obrázek 36 - Schéma jednotlivých POZICE odběru vzorků pro metalografii .....	52
Obrázek 37 - Vzorek S3_05c, POZICE 3, leptáno, zv. 1000x .....	53
Obrázek 38 - Vzorek S3_10, POZICE 3, leptáno, zv. 1000x.....	54
Obrázek 39 - Vzorek S3_10, POZICE 5, leptáno, zv. 1000x.....	54
Obrázek 40 - Vzorek S3_10, POZICE 7, leptáno, zv. 1000x.....	54
Obrázek 41 - Vzorek S3_15, POZICE 3, leptáno, zv. 1000x.....	55
Obrázek 42 - Vzorek S3_15, POZICE 5, leptáno, zv. 1000x.....	55
Obrázek 43 - Vzorek S3_15, POZICE 7, leptáno, zv. 1000x.....	55
Obrázek 44 - Vzorek S3_10c; A-EDX analýza chemického složení vyobrazené oblasti; B-měřená oblast .....	56
Obrázek 45 - S3_15c; A-EDX analýza chemického složení vyobrazené oblasti; B-měřená oblast.....	57
Obrázek 46 - S3_15c; A-EDX analýza chemického složení vyobrazené oblasti; B-měřená oblast.....	58

## 13 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Příklady přídavných materiálů firmy Sandvik [19] .....	21
Tabulka 2 - Stroje, přístroje a zařízení použité v experimentální části diplomové práce.....	33
Tabulka 3 - Procesní podmínky laserového navařování experimentálních vzorků .....	34
Tabulka 4 - Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli C45 [33] .....	36
Tabulka 5 - Tvrdost HV30 základního materiálu C45 .....	37
Tabulka 6 - Drsnost Ra základního materiálu C45 .....	37
Tabulka 7 - Hmotnostní analýza čedičového prášku.....	39
Tabulka 8 - Chemické složení důlní vody [37] .....	41
Tabulka 9 - Naměřené a vypočtené hodnoty potenciodynamické korozní zkoušky provedené velkou korozní celou.....	46
Tabulka 10 - Korozní rychlost vzorků měřených velkou celou za 100 000 let.....	47
Tabulka 11 - Naměřené a vypočtené hodnoty potenciodynamické korozní zkoušky provedené malou korozní celou.....	48
Tabulka 12 - Korozní rychlost vzorků měřených malou celou za 100 000 let.....	48
Tabulka 13 - Parametry korozní zkoušky solnou mlhou .....	50
Tabulka 14 - Vyhodnocení korozní zkoušky solnou mlhou.....	51
Tabulka 15 - Chemické složení leptadla Robin.....	52
Tabulka 16 - EDX analýza chemického složení vzorku S3_10c.....	56
Tabulka 17 - EDX analýza chemického složení vzorku S3_15c.....	57
Tabulka 18 - EDX analýza chemického složení vzorku S3_15c.....	58