

# **ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

## **FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** B0715A270013 – Strojní inženýrství

**Studijní specializace:** Strojírenské materiály a technologie

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Popis materiálových struktur měď-čedičového kompozitního laserového návaru**

**Autor:** Marek Sedláček

**Vedoucí práce:** Ing. Pavla Bartoň Klufová, Ph.D.

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Marek SEDLÁČEK**  
Osobní číslo: **S19B0646P**  
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenské materiály a technologie**  
Téma práce: **Popis materiálových struktur měď-čedičového kompozitního laserového návaru**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

### Zásady pro vypracování

1. Technologie laserového navařování s přídavným materiálem ve formě prášku
2. Druhy laserů pro aplikaci navařování mědi o vysoké čistotě
3. Současný stav poznání – laserové navařování mědi
4. Experimentální program
5. Specifikace použitých materiálů
6. Metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič
7. Diskuse výsledků
8. Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

HEMMATI, I. , *Laser-deposited metallic coatings.Ph.D.. Thesis*. Zernike Institute: 2013-17.ISBN 978-90-77172-94-0

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

ION, J. C. *Laser processing of engineering materials: Principles, procedure and industrial application*, Elsevier: Boston, 2005. ISBN 9780750660792

*aktuální odborné články z citačních databází Web of Science a Scopus zaměřené na problematiku laserového navařování mědi o vysoké čistotě (od roku 2015).*

PŘIBIL, E. a kol., *Nástrojové oceli POLDI a jejich použití* – I. díl. Praha: SNTL, 1986

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavla Bartoň Klufová, Ph.D.**  
Centrum energetického výzkumu

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

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



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



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

## **Prohlášení o autorství**

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

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

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Marek	Jméno Sedláček	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	B0715A270013 Strojní inženýrství		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Bartoň Klufová, Ph.D.	Jméno Pavla	
<b>PRACOVNÍŠTĚ</b>	ZČU - FST – KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Popis materiálových struktur měď-čedičového kompozitního laserového návaru		

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

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

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

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>	<p>Předložená bakalářská práce je zaměřena na metalografické vyhodnocení měď-čedičových laserových návarů. V rámci práce byla použita konfokální mikroskopie, světelná mikroskopie a řádkovací elektronová mikroskopie. Cílem práce bylo zhodnocení možnosti aplikace měď-čedičových laserových návarů pro povrchovou úpravu kontejnerů, sloužících k uskladnění vyhořelého jaderného paliva v hlubinných úložištích.</p>
<b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	<p>Laser, laserové navařování, měď-čedič, metalografické hodnocení, popis struktur</p>
<b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	

**SUMMARY OF BACHELOR SHEET**

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Marek	<b>Name</b> Sedláček	
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715A270013 Mechanical Engineering		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Bartoň Klufová, Ph. D.	<b>Name</b> Pavla	
<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>	Description of material structures of copper-basalt composite laser clad		

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

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

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

<b>BRIEF DESCRIPTION</b> <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The presented bachelor thesis is focused on the metallographic evaluation of copper-basalt laser clads. Confocal microscopy, light microscopy and scanning electron microscopy were used within this bachelor thesis. Its aim was to evaluate the possibility of the application of copper-basalt laser clads for surface treatment of containers used or storage of spent nuclear fuel in deep repositories
<b>KEY WORDS</b>	Laser, laser cladding, copper-basalt, metallographic evaluation, description of structures

## Poděkování

Tímto bych velmi rád poděkoval vedoucí této bakalářské práce Ing. Pavle Bartoň Klufové, Ph. D. za velkou dávku trpělivosti, cenné rady a pomoc při vypracování předložené práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Vojtěchovi Průchovi, který mi pomohl s realizací praktické části experimentálního programu mé bakalářské práce. Poté bych rád poděkoval doc. Ing. Ludmile Kučerové, Ph. D. za realizaci EDS map chemického složení experimentálních vzorků.

Dále patří mé díky průmyslové společnosti LaserTherm spol. s.r.o. za dodání vzorků pro experimentální část předložené práce.

Experimentální program byl navržen v rámci řešení projektu TAČR TREND „*Vývoj technologie laserového navařování speciálních antikorozních kompozitních systémů na bázi neželezných a přírodních anorganických materiálů na vnitřní stěny trubek pro aplikaci v energetickém a chemickém průmyslu*“ (č. p. TW01010369).

## Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	9
Seznam obrázků.....	10
Seznam tabulek.....	13
Úvod .....	14
1 Technologie laserového navařování s přídavným materiálem ve formě prášku.....	15
1.1 Laser a jeho princip.....	15
1.2 Technologie laserového navařování .....	15
1.3 Princip technologie laserového navařování s přídavným materiálem ve formě prášku .....	16
1.4 Základní geometrické charakteristiky laserového návaru.....	17
1.5 Přídavné materiály používané při laserovém navařování .....	17
1.6 Aplikace technologie laserového navařování .....	18
2 Druhy laserů pro aplikaci navařování mědi o vysoké čistotě.....	20
3 Současný stav poznání problematiky laserového navařování mědi .....	22
3.1 Vědecké články věnující se problematice laserového navařování mědi o vysoké čistotě .....	22
4 Souhrn poznatků.....	30
5 Experimentální program.....	31
6 Specifikace použitých materiálů .....	32
6.1 Základní materiál .....	32
6.2 Přídavné materiály .....	32
6.3 Specifikace zařízení pro laserové navařování.....	34
7 Metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič... 35	
7.1 Použité přístroje, stroje a zařízení .....	35
7.2 Popis experimentu.....	35
7.3 Hodnocení měď-čedičových kompozitních návarů pomocí konfokální mikroskopie .....	36
7.4 Hodnocení měď-čedičových laserových návarů pomocí světelné mikroskopie.. .....	37
7.5 Hodnocení měď-čedičových návarů pomocí řádkovací elektronové mikroskopie .....	42
8 Diskuse výsledků.....	51
9 Závěr.....	53



## Přehled použitých zkratk a symbolů

Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (světlo zesílené stimulovanou emisí záření)
SÚRAO	Správa úložišť pro radioaktivní odpad
CAD	Computer-aided design (počítačem podporované navrhování)
NTC	Nové technologie - výzkumné centrum
h	Výška návaru [mm]
w	Šířka návaru [mm]
$\theta$	Úhel smáčení [°]
b	Hloubka závaru [mm]
P	Výkon [W]
NIR	Near infrared (blízká infračervená oblast)
$E_{in}$	Výkon [W]
$E_{pow}$	Energie potřebná k natavení prášku [W]
$E_{sub}$	Energie potřebná k natavení substrátu [W]
$E_{ref}$	Ztráty energie odrazem světla [W]
$E_{dis}$	Ztráty energie přenosem tepla [W]
EDS	Energiově disperzní spektrometrie
EDX	Energeticky disperzní rentgenová spektroskopie
SEM	Řádkovací elektronový mikroskop
ASTM	Americká společnost pro testování a materiály
EBSD	Difrakce elektronového zpětného rozptylu
HB 30	Tvrдость dle Brinella odpovídající zatížení 30 kp
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu [MPa]
$R_m$	Napětí v tahu [MPa]
HVOF	High velocity oxygen fuel (vysokorychlostní nástřik)
RTG	Rentgen
YAG	Yttrito-hlinitý granát
PA	Poloha svařování - vodorovná shora

## Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma laseru [1].....	15
Obr. 2: Schéma laterálního (A) a koaxiálního (B) typu konstrukce laserové hlavy [11] 16	
Obr. 3: Příčný řez jednostopým laserovým návarem [16].....	17
Obr. 4: Graf závislosti absorpce mědi na vlnové délce [18] .....	20
Obr. 5: Graf závislosti efektivity procesu a ploše příčného řezu návaru na intenzitě laserového paprsku [26].....	23
Obr. 6: Makrosnímek 10 -ti vrstvého návaru mědi (a); příčný metalografický řez 10 -ti vrstvého laserového návaru mědi (b) [20].....	24
Obr. 7: Schematické zobrazení laserové hlavy [27] .....	25
Obr. 8: Graf závislosti plochy příčných řezů návarů na použitých výkonech laserů [27] .....	25
Obr. 9: Snímky příčných řezů měděných návarů na substrátech z mědi(i), hliníku(ii), oceli(iii) a slitiny titanu (iv) [28] .....	27
Obr. 10: Měděný přídavný prášek o velikostech částic $\leq 63\mu\text{m}$ (a) a velikostech částic $>63\mu\text{m}$ (b); SEM [21].....	28
Obr. 11: Naměřený difraktogram použitého čedičového prášku.....	33
Obr. 12: Vzorek CE5_01; zobrazení povrchu návaru .....	36
Obr. 13: Vzorek CE5_02; zobrazení povrchu návaru .....	36
Obr. 14: Vzorek CE5_03; zobrazení povrchu návaru .....	36
Obr. 15: Vzorek CE5_01; zobrazení výškového profilu návaru .....	36
Obr. 16: Vzorek CE5_02; zobrazení výškového profilu návaru .....	36
Obr. 17: Vzorek CE5_03; zobrazení výškového profilu návaru .....	36
Obr. 18: Vzorek CE5_01; výškový profil měděných kapek zachycených na povrch laserového návaru.....	37
Obr. 19: Vzorek CE5_01; zobrazení měděných kapek zachycených na povrch laserového návaru.....	37
Obr. 20: Vzorek CE5_01; makrosnímek laserového návaru; leptáno; zvětšeno 25x.....	37
Obr. 21: Vzorek CE5_02; makrosnímek laserového návaru; leptáno; zvětšeno 25x.....	38
Obr. 22: Vzorek CE5_03; makrosnímek laserového návaru; leptáno; zvětšeno 25x.....	38
Obr. 23: Vzorek CE5_01; dendritická struktura s epitaxními a kolumnárními dendrity první laserem navařené housenky; leptáno; zvětšeno 500x.....	39
Obr. 24: Vzorek CE5_01; interkrystalické trhliny orientované kolmo na hranici ztavení laserového návaru a substrátu; leptáno; zvětšeno 200x.....	39
Obr. 25: Vzorek CE5_02; hranice ztavení; iniciační oblast trhliny (žluté šipky); leptáno; zvětšeno 200x .....	40

Obr. 26: Vzorek CE5_02; první laserem navařená housenka; žluté šipky ukazují na přítomnost oxidu (čediče); modré šipky poukazují na trhliny na hranici ztavení; leptáno; zvětšeno 200x .....	40
Obr. 27: Vzorek CE5_02; čedič na povrchu laserového návaru (viz. žlutá šipka); leptáno, zvětšeno 200x .....	40
Obr. 28: Vzorek CE5_03; heterogenita laserového návaru; čedič na povrchu laserového návaru; natavené částice přídavného měděného prášku na povrchu návaru; leptáno; zvětšeno 200x .....	41
Obr. 29: Vzorek CE5_02; čedič (žlutá šipka) na povrchu laserového návaru; leptáno; zvětšeno 200x .....	41
Obr. 30: Vzorek CE5_03; interkrystalické trhliny v základním materiálu – v těsné blízkosti hranice ztavení; leptáno; zvětšeno 200x .....	41
Obr. 31: Vzorek CE5_03; trhlina vycházející z povrchu laserového návaru vyplněná natavenou mědí; leptáno; zvětšeno 500x .....	41
Obr. 32: Vzorek CE5_01; tenká čedičová vrstva (žlutá šipka) na povrchu laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 2500x .....	43
Obr. 33: Vzorek CE5_01; čedič vyplňující prostor mezi laserem navařenou housenkou a kapkou mědi; žlutý obdélník vyznačuje oblast pro náběr energetického spektra EDX analýzy chemického složení; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x .....	43
Obr. 34: Vzorek CE5_01; disperzně rozmístěné částice čediče ve struktuře návaru (viz. žluté šipky); dendritická mikrostruktura měď-čedičového laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x .....	43
Obr. 35: Vzorek CE5_01; EDX energetické spektrum naměřených chemických prvků v dané lokalitě měření (viz. žlutý obdélník obr. 33).....	44
Obr. 36: Vzorek CE5_01; oblast měření EDS analýzy; SEM; leptáno; zvětšeno 500x .	45
Obr. 37: Vzorek CE5_01; EDS mapa výskytu jednotlivých chemických prvků nacházejících se v měřené oblasti obrázku 36; SEM; leptáno; zvětšeno 500x .....	45
Obr. 38: Vzorek CE5_01; EDS mapa výskytu jednotlivých chemických prvků nacházejících se v měřené oblasti obrázku 36; SEM; leptáno; zvětšeno 500x .....	46
Obr. 39: Vzorek CE5_01; energetické spektrum detekovaných chemických prvků obsažených ve vyznačené oblasti obr. 36; hmotnostní podíl naměřené koncentrace chemických prvků.....	46
Obr. 40: Vzorek CE5_02; detailní snímek čediče; žlutý obdélník vyznačuje oblast pro náběr energetického spektra EDX analýzy chemického složení; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 800x .....	47
Obr. 41: Vzorek CE5_02; kolumnární dendrity měď-čedičového laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 650x .....	47
Obr. 42: Vzorek CE5_02; čedič zformovaný během tuhnutí (žlutá šipka) pod kapkou mědi (modrá šipka) na povrchu laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x	47
Obr. 43: Vzorek CE5_02; trhliny na hranici ztavení laserového návaru a substrátu směřující z laserového návaru směrem do substrátu; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 250x .....	47

Obr. 44: Vzorek CE5_02; EDX energetické spektrum naměřených chemických prvků v dané lokalitě měření (viz. žlutý obdélník obr. 40).....	48
Obr. 45: Vzorek CE5_03; čedič(modrá šipka) formovaný pod kapkami mědi(žluté šipky) na povrchu laserového návaru; žlutý obdélník vyznačuje oblast pro náběr energetického spektra EDX analýzy chemického složení; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x .....	49
Obr. 46: Vzorek CE5_03; mikrostruktura tenké čedičové vrstvy nacházející se na povrchu laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 2000x.....	49
Obr. 47: Vzorek CE5_03; trhлина na hranici ztavení laserového návaru a substrátu; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 650x .....	49
Obr. 48: Vzorek CE5_03; EDX energetické spektrum naměřených chemických prvků v dané lokalitě měření (viz. žlutý obdélník obr. 45).....	50

## Seznam tabulek

Tab. 1: Laserové systémy použité k navařování experimentálních vzorků [20].....	23
Tab. 2: Energetická bilance tvorby vrstev [27] .....	26
Tab. 3: Substráty použité v rámci experimentálního programu [28].....	26
Tab. 4: Minimální požadovaný výkon nutný pro formování laserového návaru při dané rychlosti posuvu a rychlosti navařování. [28] .....	26
Tab. 5: Výsledky dosažené v experimentálním programu [26].....	27
Tab. 6: Chemické složení základního materiálu; uvedeno v hm. %. [29].....	32
Tab. 7: Mechanické vlastnosti oceli W. Nr. 1.4541 při teplotě 20 °C [29].....	32
Tab. 8: Fyzikální vlastnosti oceli W. Nr. 1.4541 při teplotě 20 °C [29] .....	32
Tab. 9: Vlastnosti přídavného prášku METCO 55 [31] .....	33
Tab. 10: Krystalické fáze obsažené v použitém čedičovém prášku; uvedeno v hm. % .	33
Tab. 11: Seznam použitých přístrojů, strojů a zařízení .....	35
Tab. 12: Chemické složení leptadla ROBIN [32].....	36
Tab. 13: Naměřené hodnoty drsnosti povrchů laserových návarů CE5_01, CE5_02 a CE5_03 .....	36
Tab. 14: Chemické složení čediče naměřené u vzorku CE5_01; uvedeno v hm. % .....	43
Tab. 15: Hmotnostní podíl prvků čediče vzorku CE5_02; uvedeno v hm. % .....	48
Tab. 16: Hmotnostní podíl prvků čediče vzorku CE5_03; uvedeno v hm. %.....	50

## Úvod

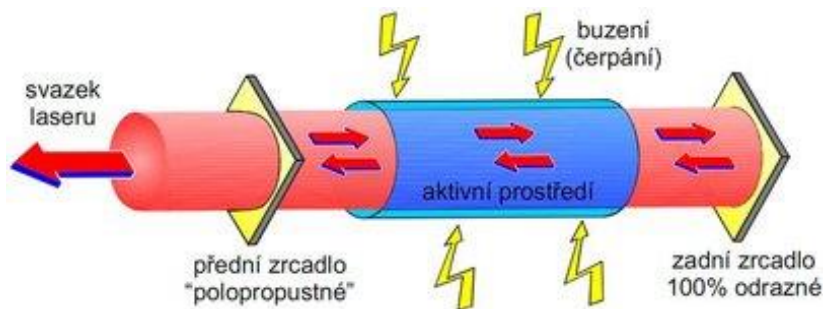
Problematika ukládání vyhořelého radioaktivního paliva do hlubinných úložišť je již mnoho let celosvětovým diskutovaným tématem. Jednou ze zemí využívající jaderné technologie je také Česká republika, která, stejně tak jako ostatní země světa, je odpovědná za bezpečné uložení vyprodukovaných radioaktivních odpadů. Kvůli povinnosti zabezpečit uložení jaderných odpadů byla v České republice zřízena státní organizace Správa úložišť radioaktivního odpadu (SÚRAO). Použité jaderné palivo zůstává radioaktivní ještě desítky tisíc let po vyjmutí z jaderného reaktoru, takže je nutno palivo uskladnit tak, aby radioaktivita neunikala do biosféry ani litosféry. V České republice jsou pro uskladnění vyhořelého jaderného paliva používány kontejnery typu CASTOR.

Tato bakalářská práce je zaměřena na laserové navařování měď-čedičových kompozitních návarů a zhodnocení možnosti aplikace těchto návarů pro povrchovou úpravu kontejnerů, sloužících k uskladnění vyhořelého jaderného paliva v hlubinných úložištích. Teoretická část bakalářské práce je věnována technologii laserového navařování, možnosti využití a kombinace různých druhů přídavných prášků k dosažení specifických vlastností výsledných návarů a problematice laserového navařování mědi o vysoké čistotě. V současné době se navařování mědi o vysoké čistotě věnují vědecko-výzkumná pracoviště po celém světě. Podnět k navařování mědi v průmyslových aplikacích vznikl díky jedinečným vlastnostem mědi, jako jsou např. vysoká odolnost vůči korozi či výborná tepelná a elektrická vodivost.

# 1 Technologie laserového navařování s přídavným materiálem ve formě prášku

## 1.1 Laser a jeho princip

Laser je zařízení, které generuje elektromagnetické záření pomocí procesu stimulované emise fotonů. Schéma laseru je zobrazeno na obr. 1. Laser se skládá ze čtyř hlavních částí: aktivní prostředí (může být tvořeno plynem, tekutinou či pevnou látkou), buzení, odrazné zrcadlo a polopropustné zrcadlo (propouští zhruba 5 % záření). [1]



Obr. 1: Schéma laseru [1]

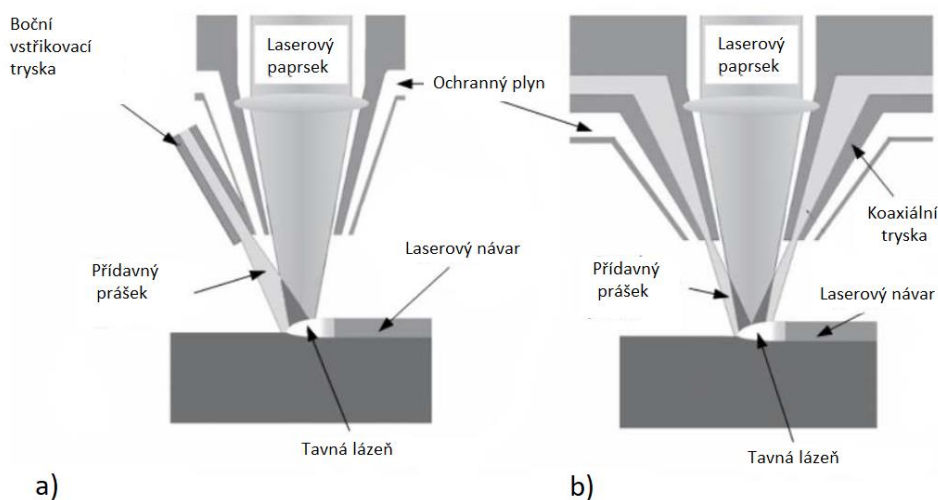
Základem každého laseru je aktivní prostředí, ve kterém dochází k vybuzení elektronů na vyšší energetické hladiny, přičemž potřebná energie je dodána výbojkami, diodami, či dalšími způsoby. Aktivní prostředí laseru mohou tvořit pevné látky, kapaliny či plyny. Vybuzený elektron se sráží s fotonem nacházejícím se v jeho okolí. Výsledkem srážky elektronu s fotonem je vznik nového fotonu s totožnými vlastnostmi, jako měl foton původní. Vzniká tak lavinový jev, při kterém se nově utvořené fotony dále srážejí s dalšími vybuzenými elektrony a dochází tak ke stimulované emisi. Aby došlo ke zvýšení účinnosti, je aktivní prostředí obklopeno rezonátorem, který je tvořen polopropustným a odrazným zrcadlem. Úkolem těchto zrcadel je zpětné odrážení fotonů, které vyletěly z aktivního prostředí, a jejich usměrnění do určitého směru. V určitý moment je energie v rezonátoru dostatečně velká, aby došlo k převýšení všech ztrát způsobených nedokonalostmi rezonátoru a vzniká tak laserové záření, které je polopropustným zrcadlem vypuštěno ven. Vzniklé laserové záření je charakteristické tím, že je koherentní a monochromatické. [1, 2, 3, 4]

## 1.2 Technologie laserového navařování

Laserové navařování je tavný proces, ve kterém se využívá laserového paprsku k natavení tenké vrstvy substrátu. Vznikne tak tavná lázeň, do níž se následně přivádí přídavný materiál roztavený laserem. Přídavný materiál je možné nanášet dvěma různými metodami. První metodou je nanesení přídavného materiálu pomocí drátu. Při tomto procesu laserový paprsek roztaví drát a tenkou vrstvu substrátu. Materiály se promísí, ztuhnou a vznikne tak tenká vrstva návaru. Druhou metodou je přivádění prášku do místa návaru unášecím plynem. V současné době se ve výzkumu více používá přídavný materiál ve formě prášku, neboť je možné s chemickým složením prášku variovat jeho legováním. Jako přídavný prášek anebo drát je možné použít např. čisté kovy, slitiny či keramiku. [5, 6, 7, 8]

### 1.3 Princip technologie laserového navařování s přídavným materiálem ve formě prášku

Laserové navařování s přídavným materiálem ve formě prášku patří mezi široce používané metody navařování, a to díky široké škále materiálů a slitin dostupných ve formě prášku. Hlavní výhodou technologie laserového navařování ve formě prášku je snazší manipulace s laserovou hlavou do místa návaru, než v případě použití přídavného materiálu ve formě drátu. Nevýhodou této technologie je nízká účinnost zachycování částic prášku. Při použití prášku se účinnost pohybuje v rozmezí 40-80 % (při použití drátu se účinnost blíží k 100 %). Při procesu technologie laserového navařování je přídavný materiál ve formě prášku přiváděn do místa návaru unášecím plynem. Jako unášecí a zároveň ochranný plyn se většinou používá argon 5.0. Jedná se o nejčistší komerčně dostupný argon s čistotou 99.999 %. V některých případech je také možno použít helium nebo dusík. Přídavný prášek je při procesu navařování směřován do laserového svazku, který částice navařovaného kovu či slitiny nataví. Množství energie absorbované práškem je dáno chemickým složením prášku, zrnitostí prášku, jeho hustotou a měrnou tepelnou kapacitou. Zbytek energie laserového svazku je pak využit k natavení tenké vrstvy povrchu substrátu. Výsledný návar je ve výsledku tvořen směsí roztaveného přídavného prášku a materiálu substrátu. Běžná tloušťka jedné vrstvy návaru se pohybuje v rozmezí od 50  $\mu\text{m}$  do 2,5 mm. Přídavný materiál je možno nanášet pomocí boční (laterální) nebo přímé (koaxiální) trysky, viz. obr. 2. [5, 9, 10]



Obr. 2: Schéma laterálního (A) a koaxiálního (B) typu konstrukce laserové hlavy [11]

V případě laterálního typu konstrukce laserové hlavy je přídavný prášek přiváděn do tavné lázně boční tryskou, která je umístěna z boku a zcela odděleně od laserové hlavy. V případě koaxiálního typu konstrukce laserové hlavy obklopuje prášková tryska v podobě mezikruží laserový paprsek, čímž je proud prášku přiváděn přímo přes laserový paprsek k tavné lázni. [12]

#### Výhody technologie laserového navařování

- tvorba metalurgické vazby mezi základním a přídavným materiálem,
- úzká teplotně ovlivněná oblast základního materiálu v okolí návaru,



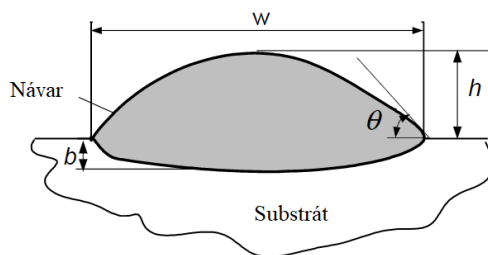
- přídavné prášky lze mezi sebou mísit, a tím uzpůsobit chemické složení návaru jeho použití,
- snadná automatizace a začlenění procesu navařování do produkčních prostředí CAD,
- při správném nastavení procesu je výsledný laserový návar bez povrchových a vnitřních vad (trhlin, pórů, ředin atd.). [13, 14]

#### Nevýhody laserového navařování

- vysoké investiční náklady spojené s nákupem zařízení pro laserové navařování,
- komplikovaná instalace zařízení,
- komplikovanější manipulace se samotným laserovým zdrojem a příslušenstvím
- nesprávné nastavení procesu navařování může vést ke vzniku vad ve struktuře laserového návaru. [16]

### 1.4 Základní geometrické charakteristiky laserového návaru

Geometrii laserového návaru lze definovat pomocí základních měřitelných charakteristik, které jsou zachyceny na obr. 3. Jedná se o výšku návaru  $h$  [mm], šířku návaru  $w$  [mm], úhel smáčení  $\theta$  [°] a hloubku závaru  $b$  [mm]. [12, 16]



Obr. 3: Příčný řez jednostopým laserovým návarem [16]

### 1.5 Přídavné materiály používané při laserovém navařování

Při laserovém navařování jsou zřídka kdy aplikovány čisté kovy. V naprosté většině případů jsou pro laserové navařování využívány směsi přídavných prášků, které svým chemickým složením odpovídají komerčně využívaným slitinám kovů. Mezi nejpoužívanější přídavné materiály patří slitiny na bázi kobaltu, niklu a železa. Prášky také mohou obsahovat karbidy některých kovů, jako jsou wolfram, titan nebo křemík. [5, 17, 18]

Přídavné materiály používané pro laserové navařování musí efektivně pohlcovat vlnovou délku laserového záření, aby došlo k jejich tavení, avšak zároveň nesmí dojít k jejich odpařování. Koeficient tepelné roztažnosti přídavného materiálu a substrátu musí být stejný nebo velmi podobný, aby nedocházelo ke vzniku trhlin. Dalším důležitým požadavkem je komerční dostupnost přídavného materiálu ve formách, jako je prášek či drát. Nejpoužívanější formou přídavného materiálu používaného ve výzkumu je prášek. Výhoda prášku spočívá v možnosti modifikovat jeho chemické složení např. vytvořením směsi různých prášků, za účelem dosažení požadovaných vlastností povrchu laserového návaru. Velikost částic přídavných prášků používaných

při laserovém navařování by se měla optimálně pohybovat v rozmezí od 20 do 200  $\mu\text{m}$ . Konkrétní požadovaná zrnitost přídavných prášků je dána použitým typem podavače prášku a velikostí (vnitřního průměru) trysek laserové navařovací hlavy. [5, 17, 18]

### **Prášky na bázi kobaltu**

Kobaltové prášky jsou navařovány zejména v aplikacích, kde je součástí kluzně či abrazivně namáhána při působení vyšších teplot a korozivního prostředí. Jejich výborné vlastnosti, jako je tvrdost při vysokých teplotách či odolnost vůči otěru a korozi, jsou dány alotropickou povahou kobaltu. Přídavné prášky na bázi kobaltu také obsahují mnoho legujících prvků jako je C, Cr, Mo, W, Ni, Si. Nejznámější skupinou slitin kobaltu jsou tzv. „stellity“. [5]

### **Prášky na bázi niklu**

Niklové prášky jsou používány v aplikacích, kde jsou kladeny nároky na vysokou pevnost a výbornou odolnost vůči korozi za vysokých teplot. Z niklových slitin jsou využívány materiály jako je Monel, Inconel, Nimonic, Incoloy, Hastelloy. Velkou nevýhodou těchto přídavných prášků je relativně vyšší cena. [19]

### **Prášky na bázi železa**

Do této kategorie prášků patří austenitické, martenzitické či feritické nerezové oceli, speciální materiály na bázi železa, jako je např. Norem, Tristelle či Nanosteel, prášky z nástrojové oceli a v neposlední řadě také prášky, jejichž chemické složení odpovídá Hadfieldově oceli. [19]

### **Ostatní prášky**

Existuje celá řada dalších materiálů vhodných k laserovému navařování. Těmito materiály jsou např. slitiny hliníku, titanu, hořčíku, mědi a niobu, popř. je možné navařovat také keramiku. [5]

## **1.6 Aplikace technologie laserového navařování**

Původně bylo laserové navařování vyvinuto za účelem navařování nových ochranných povlaků na strojních součástech. Postupně se však laserovým navařováním začaly čím dál více opravovat povrchy poškozených součástí. Dnes se tato technologie stává stále používanější, díky relativní ekonomické dostupnosti laserového zdroje, vyšší spolehlivosti laseru a rozvoji v oblasti konstrukce laserů (vyvíjí se nové zdroje o vyšších výkonech a rozdílných vlnových délkách a zvyšuje se kvalita laserových svazků). Jen v Plzni jsou nejméně 3 průmyslové společnosti (LaserTherm spol. s r.o., MATEX PM s.r.o., RAPTECH s.r.o.), které pomocí technologie laserového navařování vytvářejí ochranné vrstvy. Dále technologii laserového navařování používá pro výzkumné účely také Nové technologie – výzkumné centrum (NTC) Západočeské univerzity v Plzni. [16]

### **Laserové navařování ochranných povlaků**

Laserové navařování ochranných povlaků se používá za účelem dosažení optimálních vlastností povrchů u vysoce namáhaných součástí či povrchů, které jsou vystaveny korozivnímu prostředí. Těmito vlastnostmi jsou např. odolnost vůči korozi v daném expozičním prostředí nebo odolnost vůči adhezivnímu či abrazivnímu

opotřebení. Povrch základního materiálu je při technologii laserového navařování povlakován vrstvou přídavného materiálu. Vzniká tedy směs přídavného a základního materiálu, která má požadované vlastnosti zcela odlišné od vlastností základního materiálu. Technologie laserového navařování se v praxi využívá především v energetice (navářování lopatek turbín), důlním průmyslu (navářování nástrojů důlní techniky), leteckém inženýrství (navářování částí leteckých turbín), automobilovém průmyslu (navářování ventilů spalovacích motorů) a medicíně (navářování kloubních implantátů). [16]

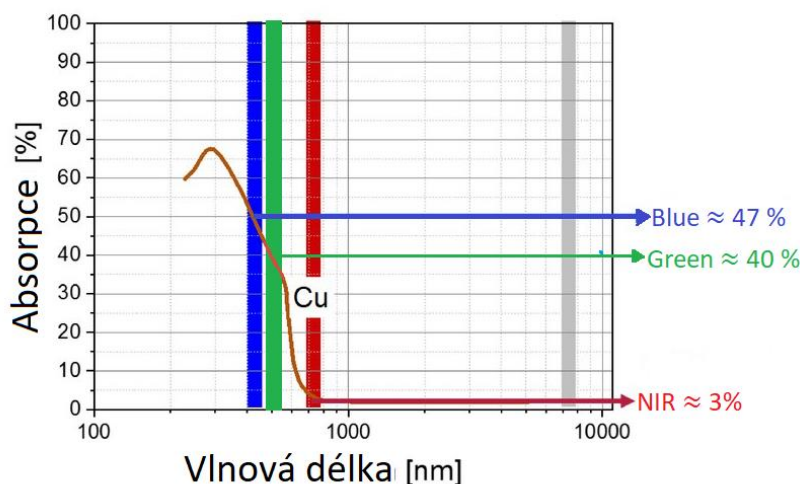
### **Opravy a renovace dílů**

Každá součást po určité době používání vyčerpá svou životnost a stane se tak nefunkční. Tyto součásti je pak potřeba nahradit. Některé součásti jsou však velmi nákladné na výrobu kvůli jejich složitému tvaru či nadměrné velikosti a je tak ekonomicky výhodnější jejich oprava. V tuto chvíli je pak možno využít technologii laserového navařování k renovaci poškozeného povrchu. Laserovým navařováním se dá efektivně doplnit materiál do opotřebovaných míst součástí a je tak možno součást znovu použít. Dále je také možno technologií laserového navařování opravit takzvané „zmetky“ z výroby, které vznikly např. chybou návrhu či obrábění. Vhodnost laserového navařování k opravě dílů je dána také tím, že vytváří minimální teplotně ovlivněnou oblast v základním materiálu. Laserového navařování se často využívá např. k opravě pinčovacích hran pro vstřikování plastů, lopatek turbín, nástrojů důlního průmyslu (rypadla, vrtáky) a vojenské techniky (podvozky letounů). [16]

## 2 Druhy laserů pro aplikaci navařování mědi o vysoké čistotě

Laserové navařování mědi je specifické hlavně díky fyzikálním vlastnostem mědi, kterými jsou vysoká tepelná a elektrická vodivost. Velmi důležitou vlastností mědi je korozní odolnost. Mnoho korozních studií ukázalo, že si měděné návary dokáží udržet odolnost vůči korozi v aktivních korozních podmínkách po mnoho let (řádově miliony let), což je velmi žádoucí např. u vnější ochranné vrstvy kontejnerů určených pro skladování vyhořelého jaderného paliva v hlubinných uložistiích. Nicméně, navařování čisté mědi je však velmi náročné kvůli její vysoké tepelné vodivosti a nízké absorptivitě infračerveného záření. Například, absorpce čisté mědi navařované na měděný substrát, se při působení infračerveného paprsku pohybuje okolo 3 %. Aby tedy bylo možné navařovat měď o vysoké čistotě infračerveným laserem, je potřeba použít vysoce výkonný laser (řádově jednotky kW).

Na grafu na obr. 4 je možno sledovat, jak absorpce mědi závisí na vlnové délce laserového záření. Z grafu vyplývá, že je pro navařování čisté mědi výhodné použít lasery emitující záření o vlnové délce kratší než 550 nm. Takovou vlnovou délku dokáží vyzářit tzv. modré a zelené lasery. [20, 21]



Obr. 4: Graf závislosti absorpce mědi na vlnové délce [18]

### Modrolátkový laser

Modrolátkový laser emituje záření o vlnové délce v rozmezí od 380 do 460 nm. Takové záření dokážou produkovat lasery, které mají např. galium-arsenové diody. Použití technologie vysoce výkonného modrého laseru nabízí mnoho výhod oproti klasickým infračerveným laserům. Výhody vyplývají z toho, že některé materiály (měď, zlato, nikl) mají při použití modrého paprsku mnohem větší absorptivitu než při použití paprsku červeného. To výrazně ovlivňuje např. rychlost procesu navařování nebo množství spotřebované energie k natavení kovu, čímž dochází ke snížení výrobních nákladů na straně výrobce. Velkou nevýhodou těchto laserů byla komplikovanost jejich výroby. Dlouho trvalo, než byly zkonstruovány modré a zelené lasery s dostatečným výkonem pro použití v průmyslové výrobě. V dnešní době si však technologii výroby těchto laserů osvojilo určité množství firem, a jsou tak již dostupné. Těmito

průmyslovými společnostmi jsou např. Laserline GmbH, OSRAM Opto Semiconductors GmbH., NUBURU® Inc., či Panasonic Corporation. [20, 22, 23, 24]

### **Zelenolátkový laser**

Zelenolátkový laser emituje záření o vlnové délce v rozmezí od 500 do 540 nm. Stejně jako v případě laseru modrolátkového, fotony emitované zeleným laserem jsou mědi absorbovány mnohem lépe než fotony laserového IR svazku. Zvýšená absorpce (cca 45 %) výrazně ovlivňuje kvalitu vzniklých návarů a rychlost procesu navařování. Z průmyslových společností se vývoji a konstrukci zelenolátkových laserů věnuje zejména společnost TRUMPF Laser - und Systemtechnik GmbH, která v roce 2020 vyvinula ve světovém měřítku nejvýkonnější zelenolátkový laser, TruDisk Pulse 421, jehož instalovaný výkon dosahuje 4 kW. [24]

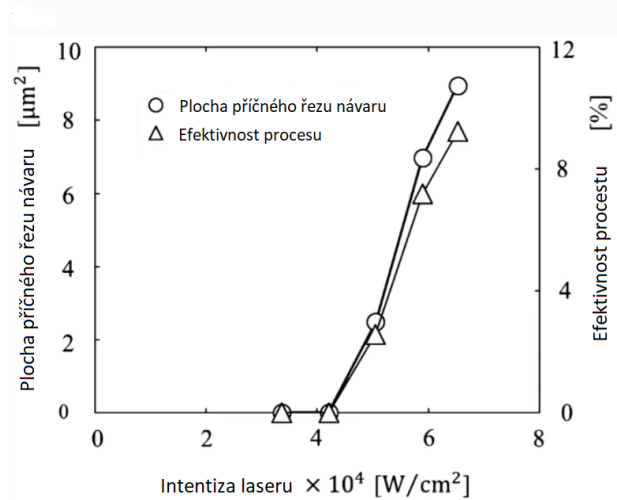
### **3 Současný stav poznání problematiky laserového navařování mědi**

Tato část bakalářské práce je zaměřena na analýzu současného stavu poznání problematiky laserového navařování mědi o vysoké čistotě ve světě. Následující kapitola byla vypracována na základě publikačních výstupů z citačních databází Scopus, Web of Science a Science direct. Bylo zjištěno, že se problematice laserového navařování mědi věnují vědecko-výzkumné instituty po celém světě. Z těchto citačních databází bylo pro účely rešeršní části bakalářské práce vybráno 5 článků, které se zaměřením svého výzkumu nejvíce přibližují tématu bakalářské práce. Z článků bylo zjištěno, že současné výzkumy předních vědeckých pracovišť jsou výhradně orientovány na využití modrolátkového a zelenolátkového laseru k navařování mědi a jejích slitin. Použití zelenolátkových a modrolátkových laserů pro navařování je naprostou novinkou a v České republice zatím není jediné pracoviště, které by tyto krátkovlnné lasery využívalo. Dle výsledků z experimentů popsanych níže, je použití krátkovlnných laserů pro navařování čisté mědi zcela zásadní, protože měď dokáže absorbovat až 50 % krátkovlnného záření, což je značný rozdíl oproti záření infračervenému, které je mědí absorbováno jen z 5 %.

#### **3.1 Vědecké články věnující se problematice laserového navařování mědi o vysoké čistotě**

##### **Tvorba návaru z čisté mědi na substrátu z čisté mědi za pomoci dvoupaprskového systému s modrými diodovými lasery**

Takahiro Hara a kol. zkoumali v [24] procentuální účinnost procesu navařování mědi ve formě prášku pomocí systému využívajícího dva lasery (každý o  $P = 100 \text{ W}$ ) s modrými diodami. Schematické znázornění dvoupaprskového systému je zachyceno na obr. 7. V rámci experimentálního programu Takahiro Hara a kol. využili odlišných intenzit laserových svazků k navařování mědi o vysoké čistotě na substrát z čisté mědi. Ostatní parametry procesu laserového navařování byly v rámci experimentu konstantní. Pro návary byl použit měděný prášek s čistotou 99,999 %, připravený metodou atomizovaného plynu. Tvar částic prášku byl sférický a velikost částic prášku byla od 10 do 60  $\mu\text{m}$ , přičemž průměrná velikost částic přídavného prášku mědi byla 34  $\mu\text{m}$ . Jako substrát byly použity měděné desky z materiálu C10200 o rozměrech 10x7x0,5 mm. Laserový svazek byl fokusován na povrch substrátu do bodu o rozměrech 534 x 480  $\mu\text{m}$ . Výsledkem tohoto experimentu je graf zaznamenaný na obr. 5. [26]



Obr. 5: Graf závislosti efektivity procesu a ploše příčného řezu návaru na intenzitě laserového paprsku [26]

Na grafu na obr. 5 je zobrazeno, jak plocha příčného řezu návarem a efektivnost procesu navařování mědi ve formě prášku závisí na intenzitě laserového svazku. Při použití intenzity laserového svazku nižší než  $4.2 \times 10^4$  W/cm<sup>2</sup> nebyl vytvořen celistvý návar. Se zvyšující se intenzitou laserového svazku pak již k formování návaru došlo, avšak výsledný návar byl se substrátem spojený jen lokálně. Spojení laserového návaru se substrátem v celé šířce návaru nastalo až při použití intenzity laserového svazku  $6.5 \times 10^4$  W/cm<sup>2</sup>. [26]

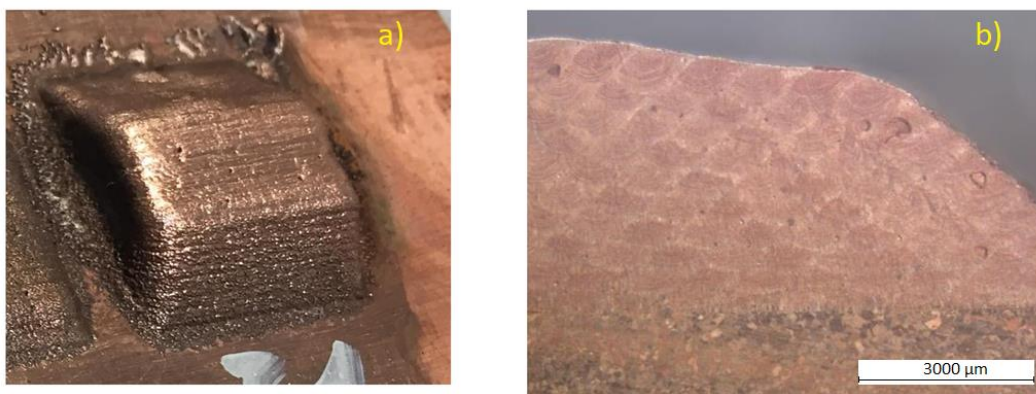
### Využití modrolátkového laseru ( $\lambda = 450\text{nm}$ ) pro navařování mědi

Simon W. Britten a Sörn Ocylok zkoumali v [18] kvalitu návarů z čisté mědi na substrátu z oceli a čisté mědi. Při experimentu byly použity dva typy laserů. Prvním byl systém LDMblue1000-100 a druhým byl systém LDF12000-100. Parametry laserů jsou zaznamenány v tab. 1. Bylo použito koaxiální vedení laserových paprsků o vlnových délkách 450 nm a 940 nm. Dávkování prášku bylo zajištěno prostřednictvím multistreamové trysky. Jako ochranný a hnací plyn sloužil argon. Rychlost nanášení prášku byla 0,5 kg/h s rychlostí posuvu 600 mm/min. Pro navařování byl použit měděný prášek o čistotě 99,95 %. Průměrná velikost prášku byla od 40 do 60  $\mu\text{m}$ . Laserové návarů byly aplikovány na dva plechy o tloušťce 10 mm z oceli C45 a z mědi C10200 o vysoké čistotě 99,95 %. [20]

Tab. 1: Laserové systémy použité k navařování experimentálních vzorků [20]

Typy laserových systémů	LDMblue 1000-100	LDF1200-100
Vlnová délka	450 nm	940nm
Použitelný výkon	1000 W	3000 W
Průměr laserového svazku v ohnisku	2000 $\mu\text{m}$	2000 $\mu\text{m}$

V první části experimentu autoři navařovali na substrát z oceli C45 návary z čisté mědi. Nejdříve vytvořili jednu vrstvu návaru, poté počet vrstev zvyšovali. K tavení měděného přídavného prášku využili laser LDMblue1000-100. Zjistili, že čím více vrstev pokládají na sebe, tím větší musí být použitý výkon laseru, aby zamezili vzniku pórů v navařené vrstvě. V druhé části experimentu byl vytvářen návar z čisté mědi na substrátu ze slitiny mědi C10200. Nejprve byl k navařování použit infračervený laser o výkonu dosahujícím až 1500 W. Na substrátu však nevznikla tavná lázeň a proces navařování byl tak neúspěšný. Poté byl použit modrolátkový laser o výkonu 1000 W. Při tomto procesu již došlo k vytvoření měděného návaru, který však nebyl konzistentní. Bylo tak nutné zapojit do procesu oba dostupné lasery (modrý laser o výkonu 1000 W, infračervený laser o výkonu 1500 W) a zařadit přehřev substrátu na 250 °C. Výsledkem bylo formování strukturně homogenního návaru bez přítomnosti výrazných povrchových a vnitřních vad. Pro validaci testu bylo na sebe nanášeno 10 vrstev housenek (viz. obr. 6). Po pozorování pod mikroskopem bylo zjištěno, že většina vrstev je dostatečné kvality. V některých částech návaru se však vyskytla přítomnost pórů. Dle závěru autorů nejsou tyto póry způsobeny nedostatkem v oblasti konstrukce laserů, ale kontaminací laserového návaru oxidy. [20]

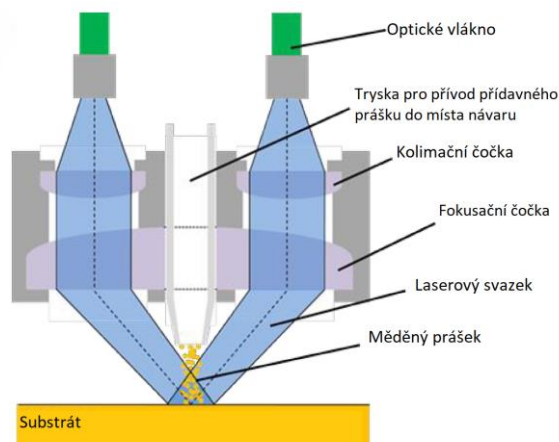


Obr. 6: Makrosnímek 10 -ti vrstvého návaru mědi (a); příčný metalografický řez 10 -ti vrstvého laserového návaru mědi (b) [20]

### Laserové navařování čisté mědi na substráty z chemicky rozdílných slitin s použitím 100 W modrolátkového laseru

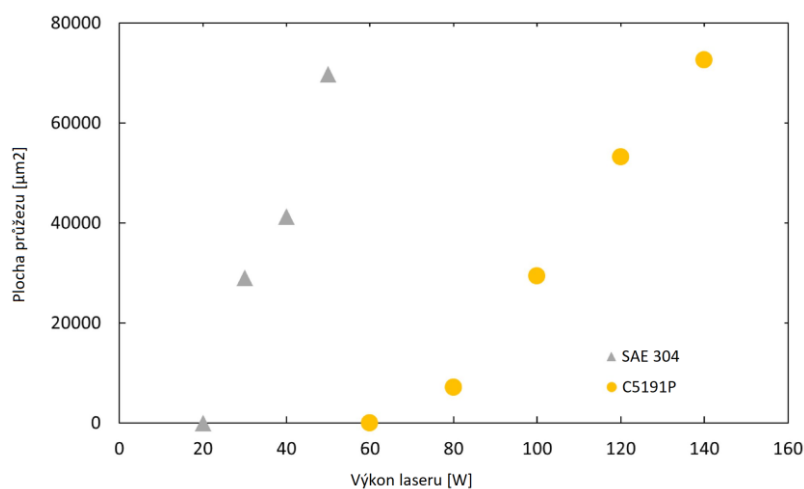
Takahiro Hara a kol. zkoumali v [27] jaký vliv má absorpce světla a tepelná vodivost substrátu na tvorbu návaru z čisté mědi. K tvorbě návaru byly použity dva modrolátkové lasery, které emitovaly záření o vlnové délce 445 nm. Maximální výkon každého laseru byl 100 W. Schematické znázornění speciálně upravené dvousvazkové laserové hlavy je zobrazeno na obr. 7. Laserové svazky byly fokusovány na povrch substrátu do bodu o rozměrech 534 x 480 μm. V rámci experimentálního programu Takahiro Hara a kol. využili odlišných výkonů laserů pro navařování jednotlivých vrstev měděného návaru. Jako přídavný materiál k tvorbě návarů byl použit měděný prášek s čistotou 99,999 %, připravený metodou atomizovaného plynu. Tvar částic prášku byl sférický a velikost částic prášku byla od 10 do 60 μm, přičemž průměrná velikost částic přídavného prášku mědi byla 34 μm. Jako substráty byly použity dva plechy z oceli SAE 304 a z měděné slitiny C5191P. [27]





Obr. 7: Schematické zobrazení laserové hlavy [27]

V první části experimentu byl měděný návar tvořen na desce z materiálu C5191P. Bylo zjištěno, že při výkonu  $P \leq 60$  W nebyl formován žádný návar. Při použití výkonu  $P \geq 60$  W již vznikl konzistentní návar. V druhé části experimentu byl měděný návar tvořen na desce z materiálu SAE 304. Návar byl úspěšně formován až při použití výkonu  $P \geq 20$ . Závislost použitých výkonů při navařování na výsledné plochy návarů (plochy návarů měřeny na příčných řezech návarů) popisuje graf zaznamenaný na obr. 8. Z grafu vyplývá, že k navařování mědi na substrát ze slitiny mědi je potřeba cca trojnásobně vyššího výkonu laseru, aby bylo dosaženo srovnatelné plochy laserového návaru jako v případě použití substrátu z oceli. [27]



Obr. 8: Graf závislosti plochy příčných řezů návarů na použitých výkonech laserů [27]

Výsledky experimentálního programu byly sumarizovány do tab. 2. V této tabulce jsou zaznamenány hodnoty vstupního výkonu ( $E_{in}$ ), energie potřebné k natavení prášku ( $E_{pow}$ ) a substrátu ( $E_{sub}$ ), ztráty energie odrazem světla ( $E_{ref}$ ) a přenosem tepla ( $E_{dis}$ ). Z výsledků je patrné, že naprostá většina energie vyprodukované lasery je spotřebována na ztráty, a nikoliv na samotný proces laserového navařování. [27]

Tab. 2: Energetická bilance tvorby vrstev [27]

Substrát	$E_{in}$ [W]	$E_{pow}$ [W]	$E_{sub}$ [W]	$E_{ref}$ [W]	$E_{dis}$ [W]
C5191P	140	1,6	0,2	33,5	104,7
SAE 304	50	1,5	0,4	22,5	27,8

### Laserové navařování čisté mědi na substráty z různých materiálů s použitím zelenolátkového laseru

Himani Siva Prasad a kol. zkoumali pomocí vysokorychlostní kamery v [28] dynamiku proudění tavné lázně a způsob zachycování nataveného přídavného prášku na povrchu návaru. Při experimentu byly vytvářeny laserové návary z čisté mědi o čistotě 99,9 % na substráty blíže specifikované v tab. 3. Velikost částic přídavného měděného prášku byla od 50 do 90  $\mu\text{m}$  a pro jeho přívod byla použita koaxiální tryska. Jako ochranný a hnací plyn byl použit argon. K natavení byl použit zelenolátkový laser o výkonu 1 kW, který emitoval záření o vlnové délce 515 nm. Laserový svazek byl fokusován na kruhovou plochu o průměru 1,7 mm. Proces byl zaznamenáván vysokorychlostní kamerou s frekvencí 10 000 fps. [28]

Tab. 3: Substráty použité v rámci experimentálního programu [28]

Materiál substrátu	Specifikace dle normy materiálů
Měď	99,9 % měď (C11000)
Hliník	99,6 % hliník (EN-AW 1100)
Ocel	1.2343 (X37CrMoV5-1)
Slitina titanu	TiAl4V

V první části experimentu byl výkon laseru přizpůsobený tak, aby byl vytvořen měděný návar na každém typu substrátu, tzn. použitý výkon laseru byl u různých druhů substrátu odlišný. Tabulka č. 4 uvádí minimální požadovaný výkon nutný pro formování laserového návaru při dané rychlosti posuvu a rychlosti navařování. [28]

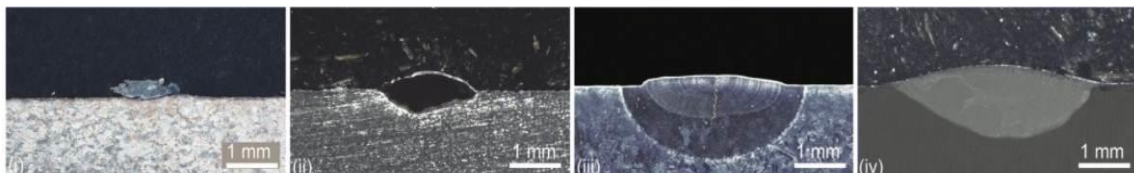
Tab. 4: Minimální požadovaný výkon nutný pro formování laserového návaru při dané rychlosti posuvu a rychlosti navařování. [28]

Označení substrátu dle normy	C11000	EN-AW 1100	X37CrMoV5-1	TiAl4V
Výkon laseru [kW]	1	0,6	0,2	0,2
Rychlost posuvu [m/min]	0,1	0,5	0,5	0,5
Rychlost podávání prášku [g/min]	1,3	1,3	2,6	3,9

V druhé části experimentu byly parametry procesu navařování nastaveny u všech typů substrátů totožně (výkon laseru 1 kW; rychlost navařování 0,5 m/min a rychlost podávání prášku 2,6 g/min). Výsledky z této části experimentu byly shrnuty do tab. 5. Příčné řezy jednotlivých laserových návarů jsou zobrazeny na obr. 9.

Tab. 5: Výsledky dosažené v experimentálním programu [26]

Označení substrátu dle normy	Šířka návaru [mm]	Výška návaru [mm]	Hloubka přetavení substrátu [mm]	Promísení [%]	Využití výkonu laseru k natavení přídavného prášku a substrátu [%]	Doba začlenění natavené částice přídavného prášku do tavné lázně [ms] <sup>1</sup>
C11000	1,04	0,26	0	0	0,73	0,3
EN-AW 1100	1,4	0,24	0,306	53,2	2,94	0,1
X37CrMoV5-1	2,34	0,14	0,382	77,5	5,15	0,2
TiAl4V	2,96	0,26	0,706	76,2	9,78	0,1



Obr. 9: Snímky příčných řezů měděných návarů na substrátech z mědi(i), hliníku(ii), oceli(iii) a slitiny titanu (iv) [28]

Z výsledků experimentálního programu byly formulovány následující závěry:

- pro tvorbu měděného návaru je nezbytné použití maximálního výkonu laseru a minimální rychlosti procesu navařování,
- doba začlenění natavené částice přídavného prášku do tavné lázně je u navařování na použité substráty velmi krátká. U navařování na substráty z hliníkové a titanové slitiny byla doba začlenění 0,1 ms. U laserového navařování na substrát z oceli a mědi byla doba začlenění 0,25 ms,
- při navařování čisté mědi na substráty ze slitiny hliníku, slitiny titanu a oceli se na površích vzniklých návarů vytvořily tenké oxidické vrstvy,
- pravděpodobnost zachycení natavené částice prášku mědi na substrátu z materiálu C11000 se snižuje se zvyšujícím se úhlem smáčení a se snižujícím se objemem tavné lázně,

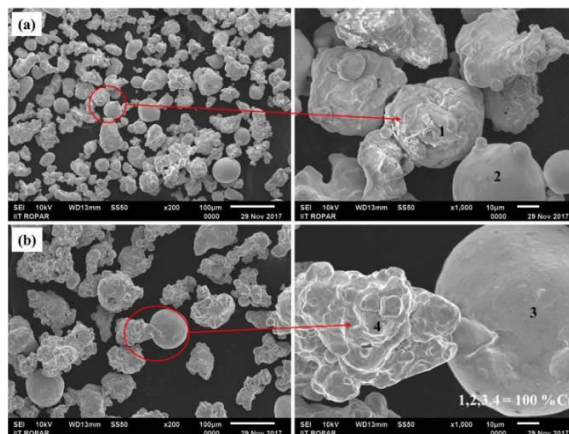
<sup>1</sup> Za dobu začlenění je považován čas, který uplyne od okamžiku přichycení natavené částice přídavného prášku na povrch tavné lázně, až do okamžiku úplného pohlcení těže částice tavnou lázní.

- procentuální využití výkonu laseru k natavení materiálu substrátu bylo u jednotlivých použitých slitin substrátů následující:

- měděný substrát: 0,73 %,
- substrát z hliníku: 2,94 %,
- substrát z oceli: 5,15 %,
- substrát ze slitiny titanu: 9,78 %. [28]

### Vývoj měděných návarů na substrátu z oceli SS316L pro aplikaci komponentů použitých v nádobách fúzních reaktorů

Surinder Singh a kol. v [21] zkoumali vhodnost použití laserem navařených vrstev z čisté mědi o tloušťkách 1 mm a 3 mm na substrát z oceli SS316L, který se často používá v pokročilých fúzních reaktorech. Jako substrát byly zvoleny desky z oceli SS316L o rozměrech 60x60x10 mm. Pro navařování byl využit CO<sub>2</sub>-laserový systém o maximálním výkonu 4 kW. Jako přídatný materiál byl použit komerčně dostupný měděný prášek (bližší specifikace prášku nebyla autory uvedena) s průměrnou velikostí částic 120 μm. Tento přídatný prášek byl rozdělen dle zrnitosti na dvě části. První část prášků měla velikost částic ≤ 63 μm, druhá skupina prášků měla velikost částic > 63 μm (viz. obr. 10). Pomocí EDX analýzy chemického složení na SEM bylo zjištěno, že je prášek tvořen pouze čistou mědí. Jako ochranný a hnací plyn pro proces laserového navařování byl použit argon. [21]



Obr. 10: Měděný přídatný prášek o velikostech částic ≤ 63 μm (a) a velikostech částic > 63 μm (b); SEM [21]

V první části experimentu byla na ocelovém substrátu vytvořena jedna vrstva návaru o výšce návaru  $h = 1$  mm. Experimentálně bylo zjištěno, že k vytvoření vrstvy o výšce  $h = 1$  mm musí být použit přídatný prášek s velikostí částic ≤ 63 μm. V druhé části experimentu byl na ocelový substrát navařen třívrstvý měděný návar o celkové výšce  $h = 3$  mm. Během experimentu bylo rozhodnuto, že na vytvoření první vrstvy návaru o výšce  $h_1 = 0,7$  mm bude použit přídatný prášek s velikostí částic > než 63 μm. K navaření zbývajících dvou vrstev o tloušťce  $h_2 = 1$  mm a  $h_3 = 1,3$  mm byl použit přídatný prášek s velikostí částic ≤ než 63 μm. Vzniklé návary byly podrobeny následujícím zkouškám a analýzám: rentgenové radiografii; zkoušce tahem; zkoušce koroze; zkoušce adheze; zkoušce mikrotvrdosti. Výsledkem experimentu bylo poznání, že technologii laserového navařování lze použít pro navařování měděných vrstev o tloušťce v rozmezí od 1 do 3 mm na substrát z oceli SS316L, aniž by zde proběhla

významná oxidace laserem navařované mědi. Z výsledků adhezivní zkoušky provedené dle normy ASTM C633 bylo zjištěno, že adhezivní pevnost měděných návarů k substrátu byla 48 MPa, což se blíží hodnotám požadovaným pro použití v pokročilých fúzních reaktorech (56 MPa). Zkoušky koroze prokázaly, že si navařená vrstva mědi zachovává své charakteristické oxidační vlastnosti po dobu mnoha let. Experiment tak poukazuje na možnost využití technologie laserového navařování mědi pro aplikaci ochranných povrchových vrstev pokročilých fúzních reaktorů či kontejnerů určených pro skladování vyhořelého jaderného paliva v hlubinných uložistích. [21]

## 4 Souhrn poznatků

Bylo zjištěno, že pro navařování měděných vrstev je optimální použití laserů emitujících záření o vlnových délkách menších než 550 nm, a to zejména díky vysoké schopnosti mědi absorbovat krátkovlnné záření. Použití krátkovlnných laserů pro navařování mědi je však naprostou novinkou, jelikož v minulosti nebyla dostupná technologie výroby těchto laserů. Měděné návary bylo možné vytvářet s pomocí laserů infračervených, avšak měď infračervené záření odráží až z 95 %, což dělá proces navařování značně nestabilní a neekonomický. Naprostou novinkou v oblasti konstrukce laserů a laserových navařovacích hlav jsou speciální dvousvazkové laserové hlavice, které umožňují připojení dvou laserových zdrojů do jednoho funkčního celku. Výhodou dvousvazkových laserových hlavice je možnost laserem navařovat měděné vrstvy o větších tloušťkách než v případě použití klasické jednosvazkové hlavice.

Přestože výsledky vědeckých článků uvedených v kapitole 3 „Současný stav poznání problematiky laserového navařování mědi“ jednoznačně prokázaly přínos použití krátkovlnných laserů pro navařování mědi, bude v rámci experimentálního programu využít pro navařování pouze infračervený laser. V České republice dosud neexistuje pracoviště, které by zeleno nebo modrolátkový laser pro laserové navařování mělo k dispozici. Celosvětově již existují výzkumné instituty, které disponují krátkovlnnými lasery, avšak jedná se o naprostou novinku, kde zařízení pro laserové navařování, navařovací hlava a podavač prášku jsou velmi citlivé a nikdo si tak nechce poškodit vlastní vybavení experimentálním programem zaměřeným na navařování čediče.

## 5 Experimentální program

Problematika tvorby měď-čedičových kompozitních laserových návarů, které mají potenciál k využití pro povrchovou úpravu kontejnerů sloužících k uskladnění vyhořelého jaderného paliva v hlubinných úložištích, nebyla doposud zpracována žádným světovým výzkumným pracovištěm. Cílem experimentální části této bakalářské práce je zanalyzovat dostupné vzorky měď-čedičových kompozitních laserových návarů pomocí metalografických metod a vyhodnotit tak jejich materiálovou strukturu a predikovat výsledné vlastnosti měď-čedičového návaru.

V rámci bakalářské práce budou zkoumány měď-čedičové laserové návary, jejichž základní matrice byla tvořena mědí o vysoké čistotě a jako plnivo byl použit čedičový prach. Měď-čedičové kompozitní laserové návary byly deponovány na vnější průměr polotovaru z nerezové trubky z oceli W. Nr. 1.4541. Z navařené trubky byly poté preparovány vzorky, které bylo možné podrobit analýze drsnosti na konfokálním mikroskopu. Dalším krokem bylo pozorování vzorků pomocí světelné optické mikroskopie, kde byla vyhodnocována mikrostruktura laserových návarů a substrátu. Vzorky bylo dále nutné zkoumat pomocí řádkovacích elektronových mikroskopů Phillips XL 30 ESEM a Zeiss EVO MA25, kde bylo zapotřebí při odpovídajícím zvětšení lokalizovat částice čediče a způsob zapojení čediče do celkové struktury návaru. Pro detekci měď-čedičových útvarů v laserových návarech byla v daných lokalitách provedena EDX a EDS analýza chemického složení.

## 6 Specifikace použitých materiálů

### 6.1 Základní materiál

Jako základní materiál pro laserové navařování byla použita ocel W. Nr. 1.4541 v polotovaru trubky o průměru 60,3 mm s tloušťkou stěny 2,77 mm. Ocel W. Nr. 1.4541 je austenitická chrom-niklová nerezová ocel stabilizovaná titanem. Mezi speciální vlastnosti této oceli patří výborná odolnost vůči mezikrystalové korozi a zachování pevnosti při zvýšených teplotách. Ocel W. Nr. 1.4541 si také dokáže udržet svoje mechanické vlastnosti při teplotách nižších než 0 °C, díky čemuž je tato ocel používána v různých aplikacích, od ropných rafinérských zařízení až po výrobu výfukových systémů používaných v automobilovém průmyslu. [29, 30]

Chemické složení a fyzikální a mechanické vlastnosti oceli W. Nr. 1.4541 jsou uvedeny v tabulkách č. 6, 7 a 8.

Tab. 6: Chemické složení základního materiál; uvedeno v hm. %. [29]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti
≤ 0,08	≤ 1	≤ 2	≤ 0,045	≤ 0,015	17,00-19,00	9,00-12,00	≤ 5 x C

Tab. 7: Mechanické vlastnosti oceli W. Nr. 1.4541 při teplotě 20 °C [29]

Tvrdost HB 30 [HB]	Mez kluzu $R_p 0,2 \geq$ [MPa]	Napětí v tahu $R_m$ [MPa]	Modul pružnosti v tahu [kN/mm <sup>2</sup> ]
215	190	500-700	200

Tab. 8: Fyzikální vlastnosti oceli W. Nr. 1.4541 při teplotě 20 °C [29]

Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Měrná tepelná kapacita [j/kg*K]	Tepelná vodivost [W/ m*K]	Elektrický odpor [Ω mm <sup>2</sup> /m]
7,9	500	15	0,73

### 6.2 Přídavné materiály

Jako přídavný materiál pro laserové navařování byl použit měď-čedičový prášek. Složení tohoto prášku odpovídalo: 95 hm. % měděného prášku Oerlikon Metco (METCO 55) + 5 hm. % čedičového prášku. Prášková směs pro laserové navařování byla vytvořena odvážením obou druhů prášků na laboratorních vahách, smícháním obou druhů prášků a následným ručním promísením v laboratorní nádobě.

#### Měděný prášek Metco 55

Přídavný prášek Metco 55 byl dodán společností Oerlicon Metco. Metco 55 je čistý měděný prášek, atomizovaný v inertním plynu. Prášek Metco 55 je určený pro technologii vysokorychlostního nástřiku HVOF vhodnou pro použití v aplikaci elektroprůmyslu, kde je vyžadován povrch s velmi dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí. Atomizace plynem zajišťuje vynikající chemickou homogenitu a vysokou



čistotu prášku ( $\text{Cu} > 99,3 \%$ ). Výsledný sferoidizovaný tvar částic umožňuje dobré dávkování prášku během procesu navařování (či nanášení technologií HVOF). [31]

Tab. 9: Vlastnosti přídavného prášku METCO 55 [31]

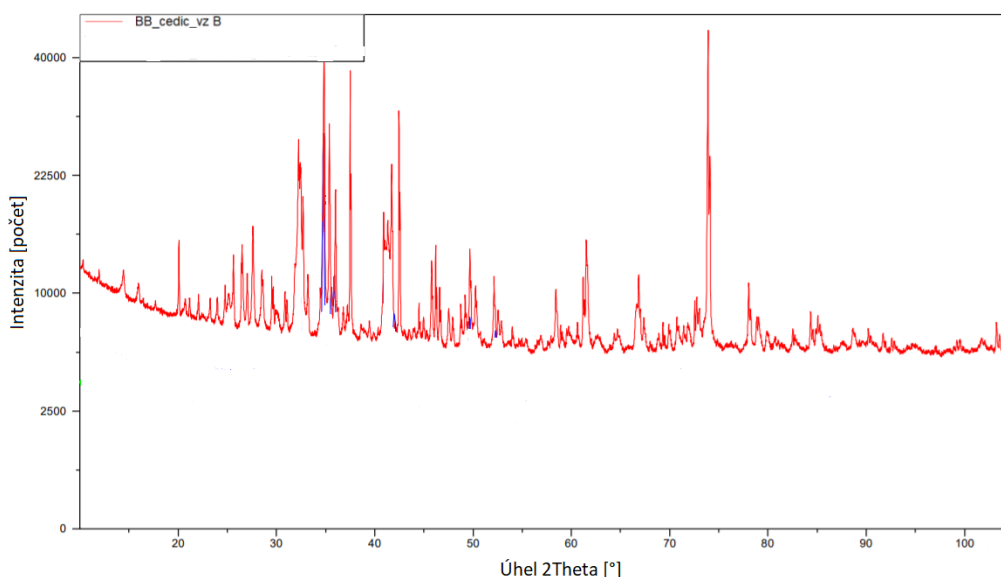
Velikost částic [ $\mu\text{m}$ ]	Hustota [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	Výrobní metoda	Morfologie
90-38	3,0-4,0	atomizováno plynem	sferoidický

### Čedičový prášek

Čedič potřebný pro účely experimentálního programu byl dodán společností EUTIT s.r.o. Dodaný čedič byl získán přímou těžbou z čedičové žíly. Vytěžený čedičový kámen byl následně namlet ve spolupráci s Univerzitou Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem. Výsledná zrnitost mletí se pohybovala v rozmezí od 45 do 90  $\mu\text{m}$ . Následně byla v laboratořích Českého vysokého učení technického v Praze provedena fázová analýza čedičového prášku pomocí RTG difrakce. Difrakční měření na práscích bylo prováděno na přístroji X'Pert Pro MPD. Fázovou analýzou bylo zjištěno následující složení prášku: clinopyroxen (přesná chemická analýza nebyla dodána), olivín  $((\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4])$ , nephelín  $((\text{Na,K})\text{AlSiO}_4)$ , anortit  $(\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$  + pravděpodobně hlinokřemičitan sodný  $(\text{AlNa}_2\text{Si}_2\text{O}_7)$ . Poté byl Rietveldovou analýzou následně stanoven hmotnostní podíl zastoupených krystalických fází. Výsledky analýzy jsou zaznamenány v tab. 10. Celkový difraktogram čedičového prášku je uveden na obr. 11.

Tab. 10: Krystalické fáze obsažené v použitém čedičovém prášku; uvedeno v hm. %

Clinopyroxen	Olivín	Nephelín	Anortit	Hlinokřemičitan sodný
40	23	6	28	3



Obr. 11: Naměřený difraktogram použitého čedičového prášku

### 6.3 Specifikace zařízení pro laserové navařování

Navářování zkoumaných vzorků bylo provedeno svařovací metodou 523 (dle ČSN EN ISO 4063). K navařování bylo použito zařízení YAG – LASERLINE LDF 10000-100. Laserovým zdrojem byl přímý diodový laser, kde byl přenos paprsku zajištěn optickým vláknem. Všechny vzorky byly navařovány v poloze navařování PA. Jako ochranný plyn i hnací plyn byl použit argon 5.0. Plochy návaru byly před navařováním očištěny a odmaštěny. Procesní parametry laserového navařování patří ke know-how společnosti LaserTherm spol. s.r.o. a v bakalářské práci tak nemohou být zveřejněny. Společnost LaserTherm souhlasila s uvedením navařovacího výkonu laseru u jednotlivých vzorků ( $P_{CE5\_01} = 1200 \text{ W}$ ,  $P_{CE5\_02} = 900 \text{ W}$ ,  $P_{CE5\_03} = 900 \text{ W}$ ).

## 7 Metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič

### 7.1 Použité přístroje, stroje a zařízení

K realizaci experimentálního programu bakalářské práce byly použity stroje, přístroje a zařízení uvedené v tab. 11.

Tab. 11: Seznam použitých přístrojů, strojů a zařízení

Použitý stroj, přístroj, zařízení	Označení stroje, přístroje, zařízení dle výrobce
Metalografická pila	STRUERS Disco-TOM-6
Metalografický lis	STRUERS CITOPRES 10
Automatická metalografická bruska a leštička	STRUERS TEGRAMIN-20
Konfokální mikroskop	OLYMPUS LEXT OLS5000
Světelný mikroskop	Carl Zeiss Z1M
Řádkovací elektronový mikroskop	Phillips XL 30 ESEM
Řádkovací elektronový mikroskop	Zeiss EVO MA25
Rentgen	X'Pert Pro MPD

### 7.2 Popis experimentu

Před realizací experimentálního programu bakalářské práce byly obdrženy tři trubky z austenitické oceli W. Nr. 1.4541 se zhotovenými kompozitními laserovými návarů. Návarů byly navařeny na vnějším průměru trubky. Trubky byly poté označeny pro účely této bakalářské práce jako CE5\_01, CE5\_02 a CE5\_03. Jednotlivé vzorky se lišily použitými procesními parametry technologie laserového navařování měď-čedičového kompozitu, které z důvodu ochrany know-how společnosti LaserTherm spol. s.r.o. nemohou být v bakalářské práci uvedeny. Následně byly z trubek pomocí metalografické pily vyříznuty segmenty laserových návarů, jejichž povrch byl nejprve pozorován pomocí konfokálního mikroskopu (OLYMPUS LEXT OLS5000), za účelem zhodnocení stavu povrchů laserových návarů a měření drsnosti povrchu návarů.

Následně byla provedena metalografická analýza měď-čedičových kompozitních návarů pomocí světelné mikroskopie (Mikroskop Carl Zeiss Z1M) a pomocí řádkovací elektronové mikroskopie s využitím EDX analýzy pro stanovení lokálního chemického složení (Mikroskopy Phillips XL 30 ESEM a Zeiss EVO MA25). Vzorky pro metalografii byly připraveny běžnými metalografickými postupy, které zahrnovaly zalisování vzorků do elektricky vodivé formovací směsi, broušení a leštění povrchu vzorků na automatické brusce a leptání ve směsi chemických látek obecně známých pod označením ROBIN. Chemické složení leptacího roztoku je uvedeno v tab. 12.

Tab. 12: Chemické složení leptadla ROBIN [32]

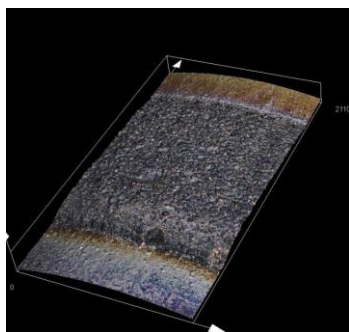
Demineralizovaná H <sub>2</sub> O	FeCl <sub>3</sub>	HCl	Ethanol
5 ml	5 g	25 ml	37 ml

### 7.3 Hodnocení měď-čedičových kompozitních návarů pomocí konfokální mikroskopie

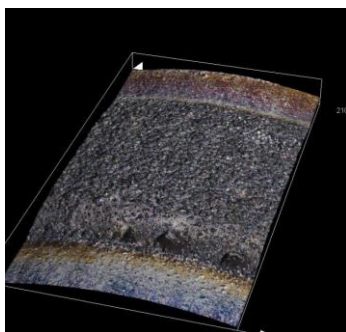
Pomocí konfokálního mikroskopu byly analyzovány povrchy laserem navařených vzorků. Byla stanovena drsnost povrchu u jednotlivých vzorků, která je uvedena v tabulce 13. Z výsledků je patrné, že byly drsnosti povrchů všech vzorků podobné. Ze snímků na obr. 15, 16 a 17 je možno pozorovat částice přídavného prášku Metco 55, které vlivem rozstříku tavné lázně návaru ulpěly na površích laserových návarů.

Tab. 13: Naměřené hodnoty drsnosti povrchů laserových návarů CE5\_01, CE5\_02 a CE5\_03

Označení	CE5_01	CE5_02	CE5_03
Drsnost [ $\mu\text{m}$ ]	36.3	32.4	34.6



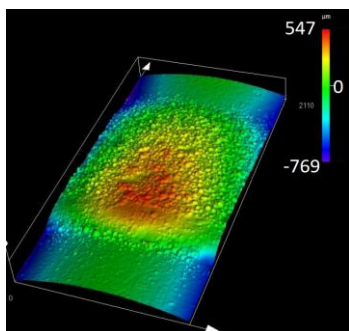
Obr. 12: Vzorek CE5\_01; zobrazení povrchu návaru



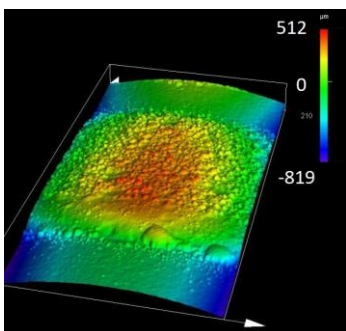
Obr. 13: Vzorek CE5\_02; zobrazení povrchu návaru



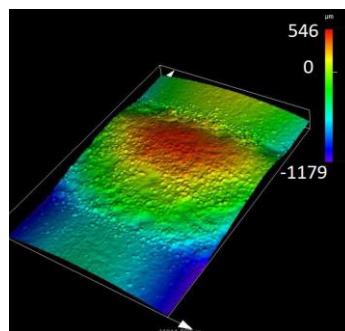
Obr. 14: Vzorek CE5\_03; zobrazení povrchu návaru



Obr. 15: Vzorek CE5\_01; zobrazení výškového profilu návaru

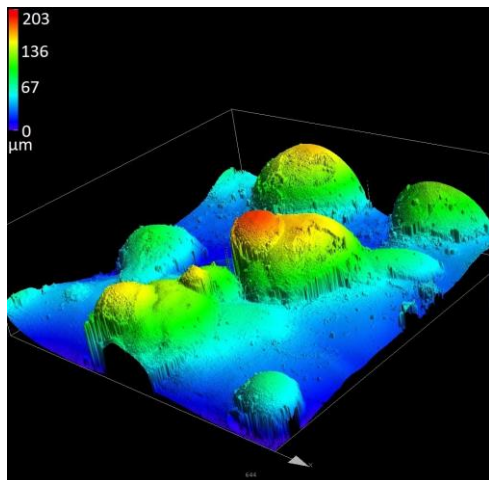


Obr. 16: Vzorek CE5\_02; zobrazení výškového profilu návaru

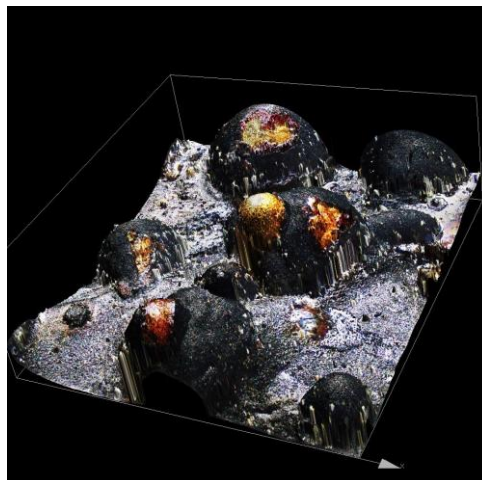


Obr. 17: Vzorek CE5\_03; zobrazení výškového profilu návaru

Na obr. 18 a 19 je možné pozorovat detail měděných kapiček přídavného prášku, které byly zachyceny na povrchu laserového návaru. Měděné kapičky zachycené na vzorku CE5\_01 dosahovaly výšky až 200  $\mu\text{m}$  nad okolní rovinu povrchu návaru. Z obr. 18 a 19 bylo možné zároveň stanovit úhel smáčení měděných kapek, který se pohyboval v rozmezí 75 – 90°.



Obr. 18: Vzorek CE5\_01; výškový profil měděných kapek zachycených na povrch laserového návaru



Obr. 19: Vzorek CE5\_01; zobrazení měděných kapek zachycených na povrch laserového návaru

#### 7.4 Hodnocení měď-čedičových laserových návarů pomocí světelné mikroskopie

Pomocí světelné mikroskopie byly nejdříve vyhodnoceny makrostruktury kompozitních laserových návarů. Hodnocení bylo provedeno na vzorcích CE5\_01, CE5\_02 a CE5\_03, jejichž snímky makrostruktur jsou zobrazeny na obr. 20, 21 a 22. Již při pozorování makrosnímků byly identifikovány trhliny ve strukturách laserových návarů. Trhliny směřovaly zejména od povrchu laserového návaru směrem do substrátu. Ojediněle trhliny postupovaly přes hranici ztavení směrem do substrátu. U vzorku CE5\_01 byl pozorován zvýšený výskyt trhlín. Dalším nežádoucím jevem byl výskyt porozity ve strukturách laserových návarů. Prostým porovnáním hloubky návaru a výšky závaru lze konstatovat, že promíšení laserového návaru a substrátu bylo enormní.



Obr. 20: Vzorek CE5\_01; makrosnímek laserového návaru; leptáno; zvětšeno 25x



Obr. 21: Vzorek CE5\_02; makrosnímek laserového návaru; leptáno; zvětšeno 25x



Obr. 22: Vzorek CE5\_03; makrosnímek laserového návaru; leptáno; zvětšeno 25x

Následně byla pomocí světlené optické mikroskopie hodnocena mikrostruktura měď-čedičových laserových návarů, a to v jednotlivých níže uvedených oblastech návarů:

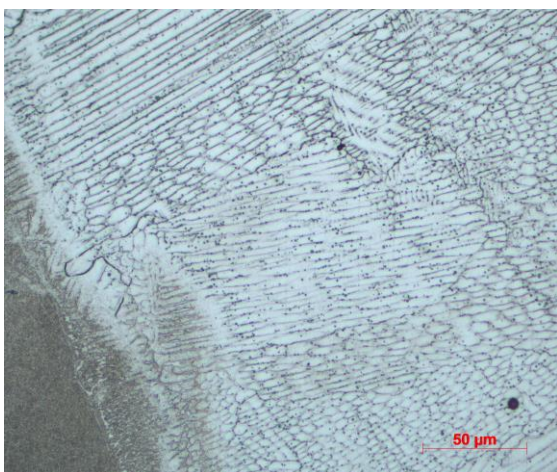
- na hranici ztavení laserového návaru a substrátu,
- ve struktuře laserových návarů,
- na povrchu laserových návarů.

### **CE5\_01**

Na metalografických snímcích na obr. 23 a 24 je možné pozorovat mikrostrukturu kompozitního laserového návaru vzorku CE5\_01.

Část první laserem navařené housenky a její hranici ztavení se substrátem je zobrazena obr. 23. Na obr. 23 je patrná dendritická struktura měď-čedičového laserového návaru s epitaxními a rovněž kolumnárními dendrity, které jsou protáhlé ve směru kolmém ke hranici ztavení.

Na obr. 24 je zobrazena ostrá hranice ztavení u poslední laserem navařené housenky vzorku CE5\_01. Kolmo na hranici ztavení byl na analyzovaném vzorku zaznamenán výskyt trhlin, které směřují z návarové housenky směrem do substrátu. Na obr. 24 je možné rovněž zachytit mezidendritické prostory v laserovém návaru, které byly během procesu tuhnutí vyplňovány mědí. Na povrchu a v okolí laserového návaru byly také zachyceny kapky čisté mědi. Kapky zachycené na povrchu laserového návaru nejsou problémem, protože budou obrobeny. U první a poslední laserem navařené housenky však docházelo k zachycení měděných kapek částečně povrchem laserového návaru a částečně povrchem substrátu (viz. obr. 24). Takové kapky by pak měly negativní dopad, neboť při obrobení povrchu laserového návaru na užitnou výšku by byly částečně zachovány.



*Obr. 23: Vzorek CE5\_01; dendritická struktura s epitaxními a kolumnárními dendrity první laserem navařené housenky; leptáno; zvětšeno 500x*



*Obr. 24: Vzorek CE5\_01; interkrystalické trhliny orientované kolmo na hranici ztavení laserového návaru a substrátu; leptáno; zvětšeno 200x*

## **CE5\_02**

Na metalografických snímcích na obr. 25, 26 a 27 je možné pozorovat mikrostrukturu kompozitního laserového návaru vzorku CE5\_02.

Na obr. 25 je zobrazen přechod mezi dvěma laserem navařenými housenkami. Na rozhraní housenek je možné pozorovat trhlinu (viz. žluté šipky obr. 25). Vznik této trhliny může být dán tím, že se hranici housenek vyloučily přednostně chemické prvky ze substrátu a dále oxidické částice z čediče. Oxidické částice mají několikanásobně vyšší tvrdost, než je tvrdost základní měděné matrice návaru. V okolí oxidů tak dochází k nárůstu lokálního tahového napětí, které následně vede k iniciaci a rozvoji trhliny. Na obr. 26 je vidět jasná hranice ztavení, která může snižovat adhezi laserového návaru k substrátu. Dále jsou na obrázku vidět drobné mikrotrhliny (viz. modré šipky obr. 26), které se šířily z návaru směrem do substrátu - kolmo k hranici ztavení. Na povrchu návaru je také možno pozorovat oxidické útvary. Pomocí EDX analýzy na SEM byly dále tyto oxidické útvary analyzovány v kapitole 7.5 této bakalářské práce. Bylo zjištěno, že se jedná o čedič (viz. žluté šipky obr. 26).

Čedič (viz žlutá šipka obr. 27), formovaný na povrchu laserového návaru pod kapkami čisté mědi je zachycen na obr. 27.



Obr. 25: Vzorek CE5\_02; hranice ztavení; iniciační oblast trhliny (žluté šipky); leptáno; zvětšeno 200x



Obr. 26: Vzorek CE5\_02; první laserem navařená housenka; žluté šipky ukazují na přítomnost oxidu (čediče); modré šipky poukazují na trhliny na hranici ztavení; leptáno; zvětšeno 200x



Obr. 27: Vzorek CE5\_02; čedič na povrchu laserového návaru (viz. žlutá šipka); leptáno, zvětšeno 200x

### CE5\_03

Na metalografických snímcích na obr. 28, 29, 30 a 31 je možné pozorovat mikrostrukturu kompozitního laserového návaru vzorku CE5\_03.

Heterogenní struktura laserového návaru je zobrazena na obr. 28. Těsně pod vyloučeným čedičem je možno zpozorovat souvislou vrstvičku laserového návaru, která je chemicky i strukturně odlišná od typické struktury měď-čedičového laserového návaru.

Na obr. 29 je vidět kapka měděného přídavného prášku, která byla zachycena na povrchu laserového návaru. Pod touto měděnou kapkou byl formován čedič (viz. žlutá šipka obr. 29). Viz. EDX analýza chemického složení v kapitole 7.5.

Síť interkrystalických trhlin, které se šířily po hranicích původních austenitických zrn substrátu je možné zaznamenat na obr. 30. Iniciační oblastí trhliny

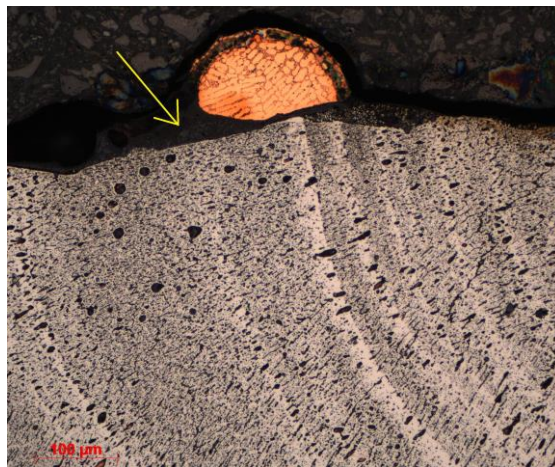


byla hranice ztavení mezi laserovým návarom a substrátem. Jelikož byl na hranici ztavení pozorován zvýšený výskyt čedičových částic, docházelo stejně jako v případě vzorků CE5\_01 a CE5\_02 k iniciaci a rozvoji interkrystalických trhlin vycházejících z laserového návaru a šířících se až do substrátu.

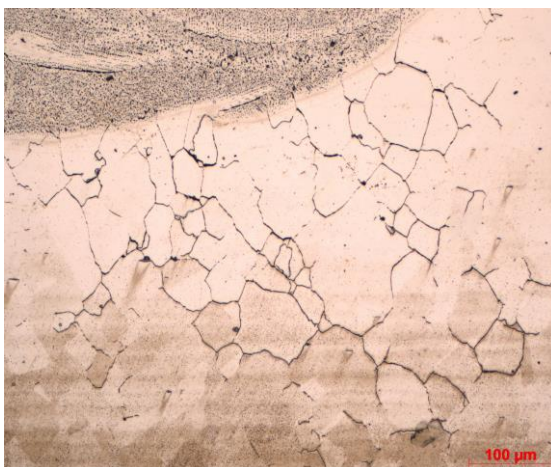
Mikrostrukturou laserového návaru na obr. 31 prochází trhlina šířící se od povrchu laserového návaru směrem k substrátu. Z obrázku je také patrné, že byl vnitřní prostor trhliny během procesu tuhnutí laserového návaru vyplněn mědí.



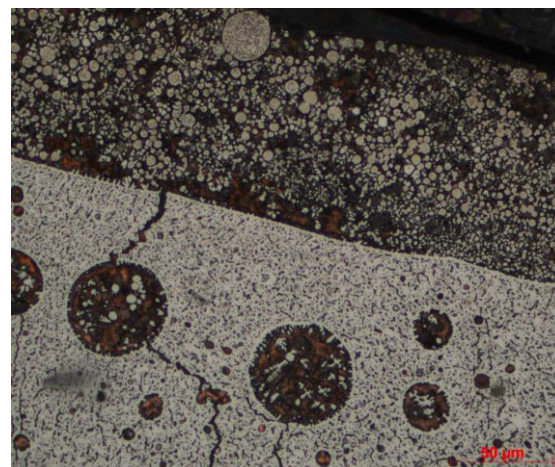
Obr. 28: Vzorek CE5\_03; heterogenita laserového návaru; čedič na povrchu laserového návaru; natavené částice přidavného měděného prášku na povrchu návaru; leptáno; zvětšeno 200x



Obr. 29: Vzorek CE5\_02; čedič (žlutá šipka) na povrchu laserového návaru; leptáno; zvětšeno 200x



Obr. 30: Vzorek CE5\_03; interkrystalické trhliny v základním materiálu – v těsné blízkosti hranice ztavení; leptáno; zvětšeno 200x



Obr. 31: Vzorek CE5\_03; trhlina vycházející z povrchu laserového návaru vyplněná natavenou mědí; leptáno; zvětšeno 500x

## 7.5 Hodnocení měď-čedičových návarů pomocí řádkovací elektronové mikroskopie

Řádkovací elektronová mikroskopie byla využita za účelem stanovení chemického složení oxidických částic nalezených na površích a ve strukturách vzorků CE5\_01, CE5\_02 a CE5\_03. Pro stanovení chemického složení těchto oxidických částic vyskytujících se v laserovém návaru byla ve vybraných lokalitách (oblasti vyznačené žlutými obdélníky na obr. 33, 40 a 45) provedena EDX analýza chemického složení. Výsledky EDX analýzy chemického složení jsou sumarizovány v tabulkách 14, 15 a 16 a na přiložených energetických spektrech zobrazených na obr. 35, 44 a 48. Při EDX analýze oxidických částic byly nalezeny takové chemické prvky, které prokazatelně nemohly pocházet ani ze substrátu, ani z přídavného prášku Metco 55, tím pádem se muselo jednat o částice čedičového prášku. Za pomoci SEM byly také pořízeny snímky hranic ztavení laserového návaru a substrátu, dendritických struktur (v laserovém návaru byly nalezeny kolumnární a epitaxní dendrity), strukturně i chemicky heterogenních oblastí a povrchů laserových návarů. Dále byly zachyceny oblasti, v kterých byly detekovány vady (trhliny a póry).

### CE5\_01

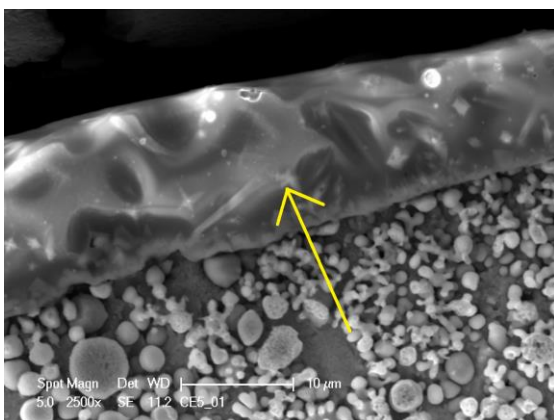
Na metalografických snímcích zobrazených na obr. 32, 33 a 34, které byly pořízeny pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu, je možné pozorovat mikrostrukturu měď-čedičového laserového návaru vzorku CE5\_01.

Na povrchu měď-čedičového laserového návaru byla detekována tenká vrstva čediče o tloušťce cca 10-15  $\mu\text{m}$ , viz. obr. 32. Výskyt těchto vrstev čediče na površích laserových návarů byl zpozorován pouze lokálně, nikoliv jako souvislá vrstva.

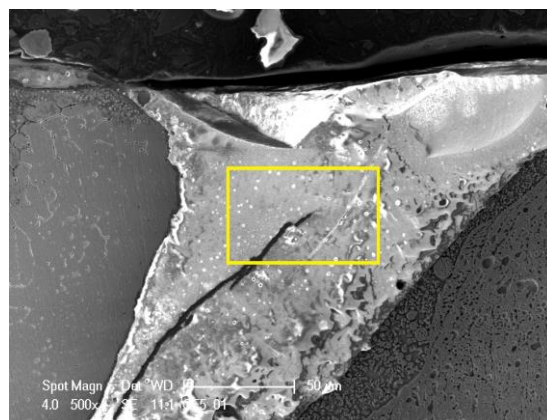
Další oblast výskytu čediče je zobrazena na obr. 33. Zde byl čedič formován při tuhnutí laserového návaru v prostoru, který vznikl mezi laserem navařenou housenkou a kapkou mědi.

Dendritickou mikrostrukturu měď-čedičového laserového návaru je možné zaznamenat na obr. 34. Na snímku je také možné pozorovat disperzně rozmístěné částice čediče (viz. žluté šipky obr. 34), které byly identifikovány ve středové oblasti laserového návaru vzorku CE5\_01.

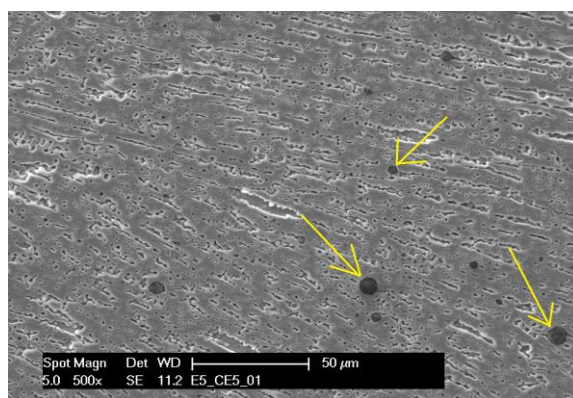
Oblasti vyobrazené na obr. 32, 33 a 34 vypadaly při pozorování pod mikroskopem nejprve jako oxidy. Teprve pomocí EDX analýzy chemického složení bylo možné potvrdit, že se jedná o čedič. Výsledky analýzy chemického složení čedičových lokalit zobrazených snímcích vzorku CE5\_01 byly téměř totožné, proto bude reprezentativně uveden pouze příklad měření v lokalitě vyznačené žlutým obdélníkem na obr. 33.



Obr. 32: Vzorek CE5\_01; tenká čedičová vrstva (žlutá šipka) na povrchu laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 2500x



Obr. 33: Vzorek CE5\_01; čedič vyplňující prostor mezi laserem navařenou housenkou a kapkou mědi; žlutý obdélník vyznačuje oblast pro náběr energetického spektra EDX analýzy chemického složení; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x

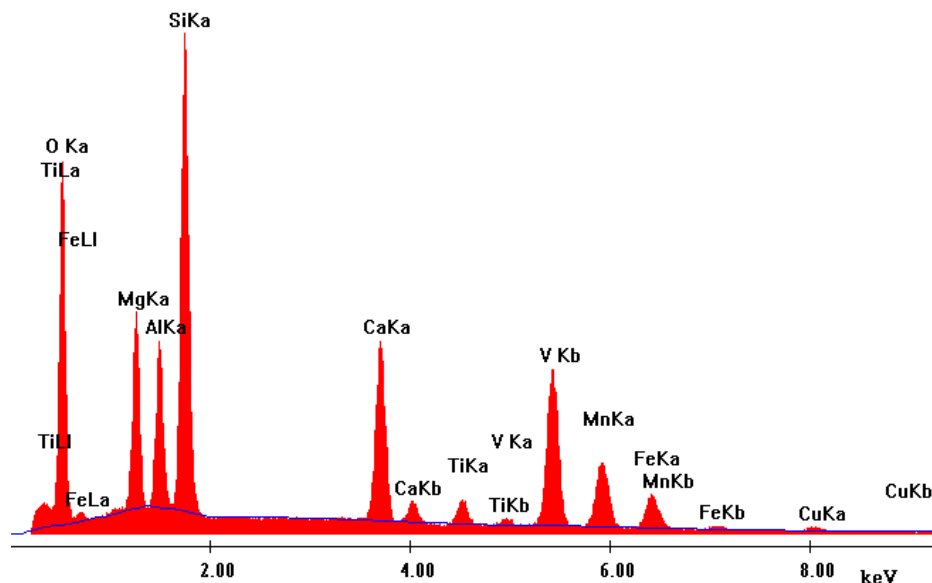


Obr. 34: Vzorek CE5\_01; disperzně rozmístěné částice čediče ve struktuře návaru (viz. žluté šipky); dendritická mikrostruktura měď-čedičového laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x

Pomocí EDX analýzy chemického složení na SEM bylo možné stanovit přesnou koncentraci chemických prvků oxidických částic vyskytujících se ve struktuře vzorku CE5\_01. V tab. 14 jsou zaznamenány EDX analýzou naměřené koncentrace chemických prvků, a to konkrétně v lokalitě definované na obr. 33 (žlutý obdélník). Z naměřených výsledků je průkazné, že je daná lokalita formována komplexními oxidy (kyslík tvoří cca 50 hm. % chemického složení) a tedy pravděpodobně čedičem. Dalším dominantním prvkem v čediči je křemík (cca 25 hm. %). Dále jsou v čediči ve větší míře zastoupeny chemické prvky jako hliník (cca 8 hm. %), mangan (cca 7,5 hm. %) vápník (cca 4,5 hm. %), hořčík (cca 2 hm. %) a sodík (cca 1 hm. %). Výskyt výše zmíněných prvků odpovídá chemickému složení čedičového prášku, které bylo zjištěno pomocí RTG difrakce, viz. kapitola 6. 2 předložené bakalářské práce.

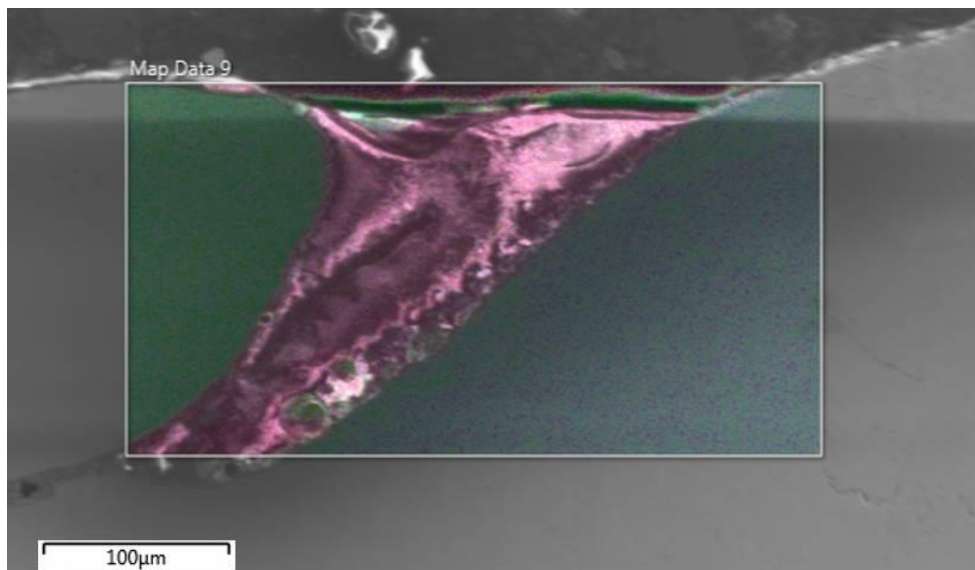
Tab. 14: Chemické složení čediče naměřené u vzorku CE5\_01; uvedeno v hm. %

O	Na	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu
49,5	1,1	2,3	7,7	25,0	4,4	0,4	7,7	1,4	0,5

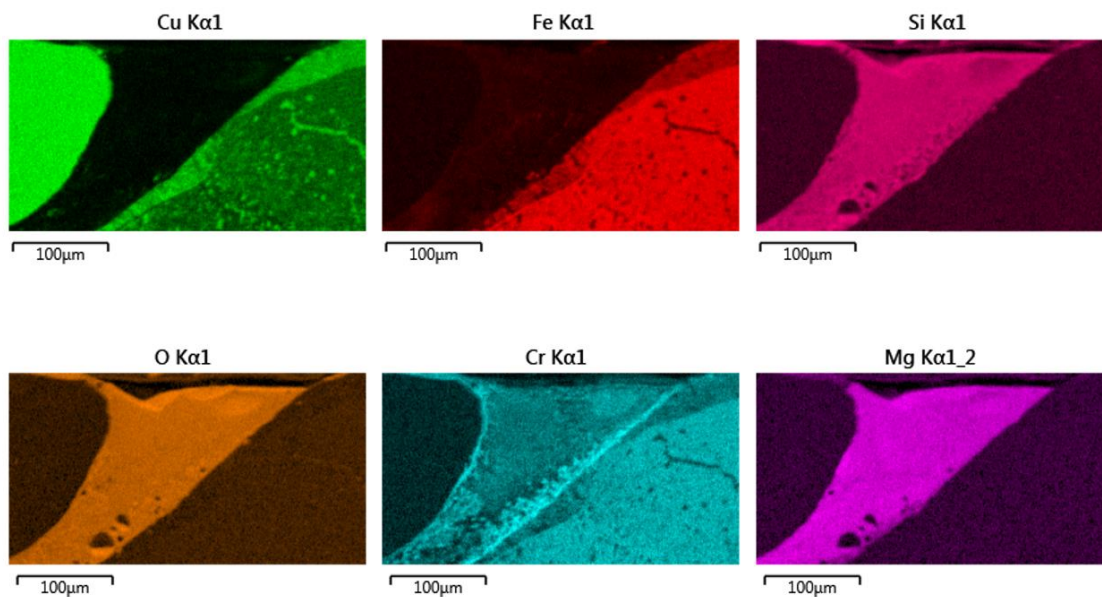


Obr. 35: Vzorek CE5\_01; EDX energetické spektrum naměřených chemických prvků v dané lokalitě měření (viz. žlutý obdélník obr. 33)

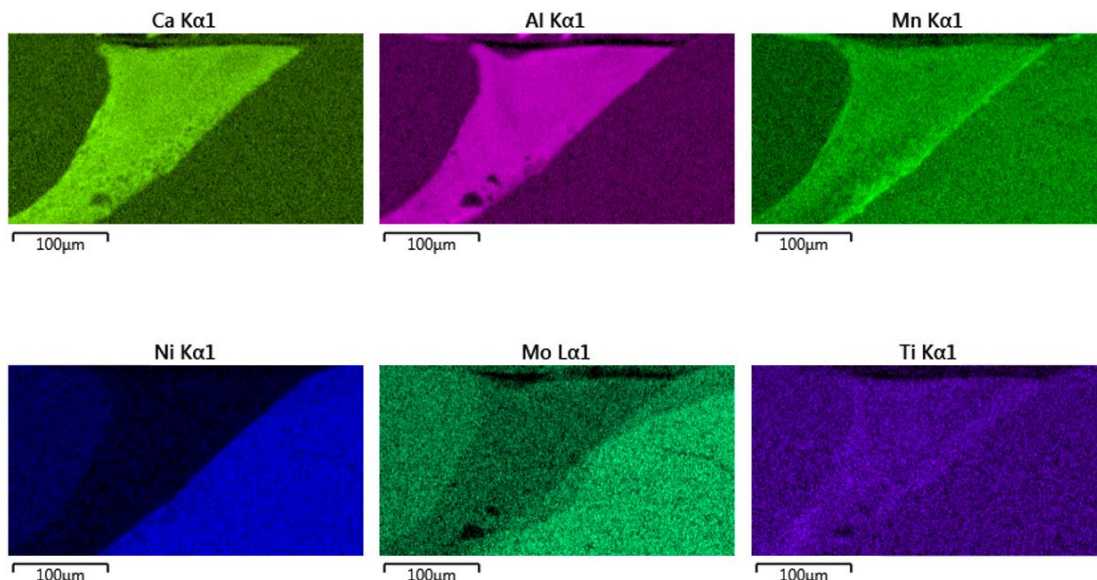
V místě povrchové části návaru v oblasti překryvu mezi dvěma laserem navařenými housenkami, které je zachyceno na obr. 36 (vyznačený obdélník), byla vytvořena EDS mapa výskytu jednotlivých chemických prvků. EDS mapy výskytu jednotlivých chemických prvků jsou zobrazeny na obr. 37 a 38. Z těchto map je patrné, že je oxidická částice nalezená ve struktuře vzorku CE5\_01 formována především chemickými prvky obsaženými v čedičovém přídavném prášku, tzn. kyslíkem, křemíkem, hořčíkem, vápníkem a hliníkem. Dále se do oxidické částice dostalo i stopové množství chemických prvků jako je chrom, mangan, molybden a titan, což jsou prvky, které obsahuje v experimentálním programu použitý substrát (ocel W. Nr. 1.4541). Do tvorby oxidické částice se v minimální koncentraci zapojily chemické prvky měď, železo a nikl. Energetické spektrum detekovaných chemických prvků včetně naměřeného hmotnostního podílu jednotlivých chemických prvků nacházejících se ve zkoumané oblasti je zobrazeno na obr. 39.



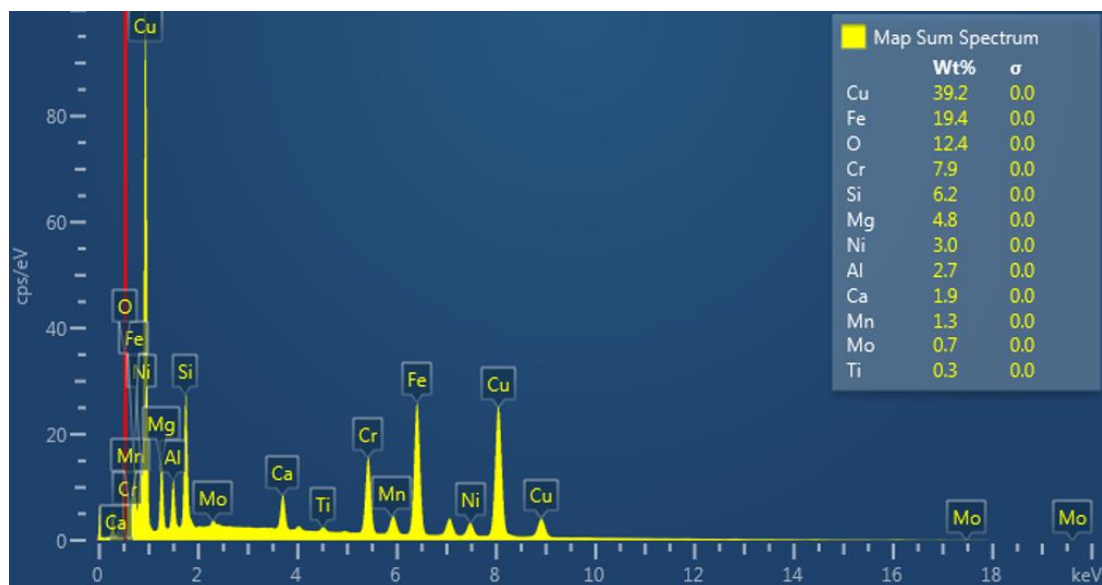
Obr. 36: Vzorek CE5\_01; oblast měření EDS analýzy; SEM; leptáno; zvětšeno 500x



Obr. 37: Vzorek CE5\_01; EDS mapa výskytu jednotlivých chemických prvků nacházejících se v měřené oblasti obrázku 36; SEM; leptáno; zvětšeno 500x



Obr. 38: Vzorek CE5\_01; EDS mapa výskytu jednotlivých chemických prvků nacházejících se v měřené oblasti obrázku 36; SEM; leptáno; zvětšeno 500x



Obr. 39: Vzorek CE5\_01; energetické spektrum detekovaných chemických prvků obsažených ve vyznačené oblasti obr. 36; hmotnostní podíl naměřené koncentrace chemických prvků

## CE5\_02

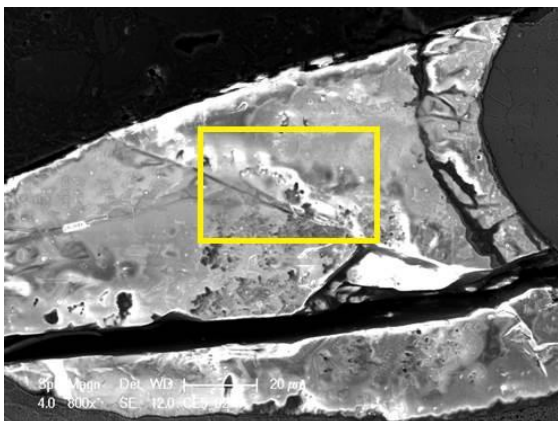
Pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu byly pořízeny metalografické snímky měď-čedičového laserového návaru vzorku CE5\_02, zobrazené na obr. 40, 41, 42 a 43. Na těchto snímcích lze ve struktuře laserového návaru pozorovat místa výskytu čediče, dendritickou strukturu laserového návaru a vzniklé vady (trhliny).

Detailní snímek čediče formovaného během procesu tuhnutí pod měděnou kapkou je pak možno zaznamenat na obr. 40. Vlivem odlišné teplotní roztažnosti čediče od okolní měděné matrice návaru došlo při navařování k popraskání čediče. Na snímku je tak možno v čediči pozorovat trhliny, které vznikaly v horizontálním, vertikálním i diagonálním směru. Žlutý obdélník vyznačený na pořízeném obr. 40 odpovídá oblasti, ve které byla provedena EDX analýza chemického složení čediče.

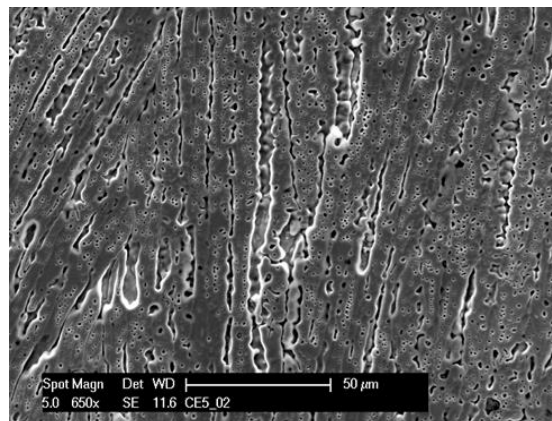
Kolumnární dendritická struktura laserového návaru vzorku CE5\_02 je vyobrazena na obr. 41. Dendrity zachycené na tomto snímku jsou rostlé kolmo na solidifikační frontu.

Na obr. 42 je pak možné zaznamenat kapku měděného přídavného prášku (viz. modrá šipka obr. 42), která přilnula na povrch laserového návaru. Pod kapkou mědi byla během procesu tuhnutí vyloučena tenká čedičová vrstvička (viz žlutá šipka obr. 42).

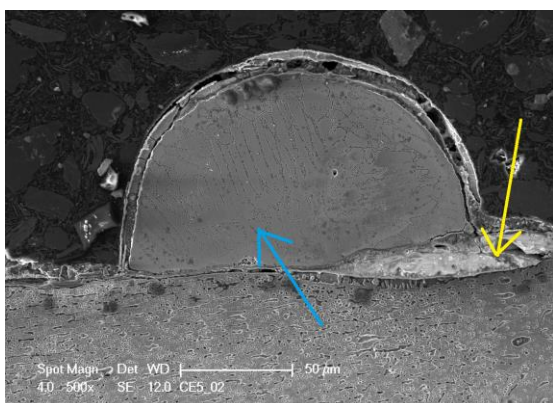
Hranici ztavení laserového návaru se substrátem lze pozorovat na obr. 43. Ze snímku je také patrné, jak se šířily trhliny z laserového návaru směrem do substrátu. Trhliny se šířily kolmo na hranici ztavení.



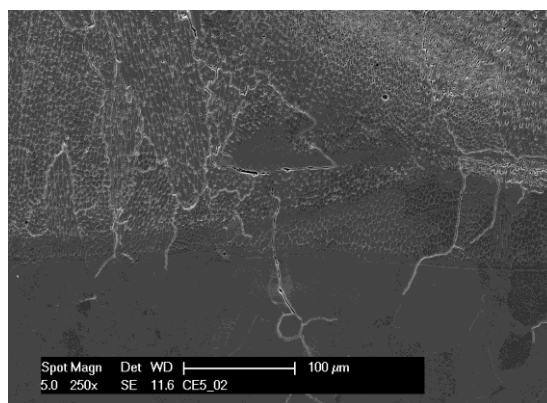
Obr. 40: Vzorek CE5\_02; detailní snímek čediče; žlutý obdélník vyznačuje oblast pro náběr energetického spektra EDX analýzy chemického složení; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 800x



Obr. 41: Vzorek CE5\_02; kolumnární dendrity měď-čedičového laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 650x



Obr. 42: Vzorek CE5\_02; čedič zformovaný během tuhnutí (žlutá šipka) pod kapkou mědi (modrá šipka) na povrchu laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x

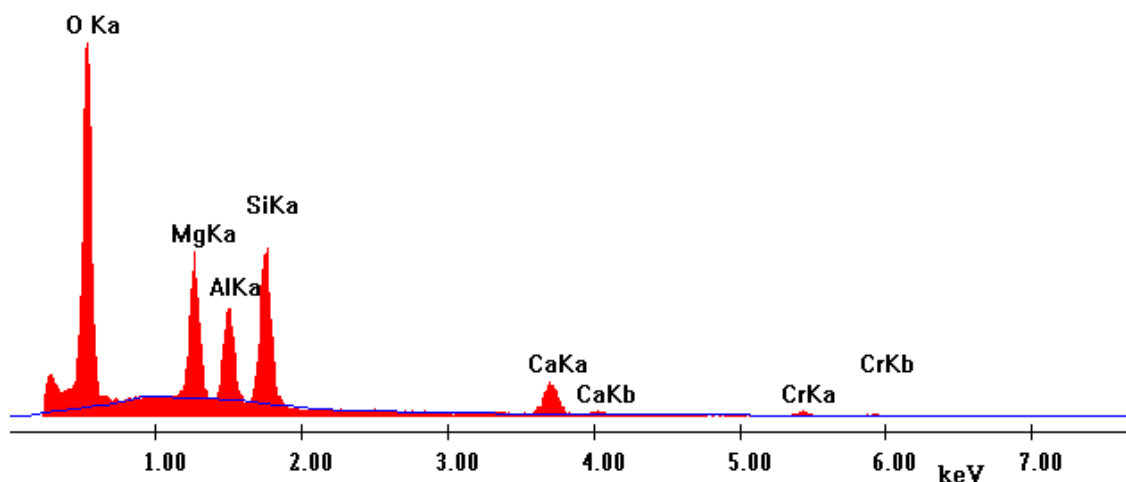


Obr. 43: Vzorek CE5\_02; trhliny na hranici ztavení laserového návaru a substrátu směřující z laserového návaru směrem do substrátu; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 250x

Oxidické částice, vyskytující se ve struktuře laserového návaru vzorku CE5\_02, byly analyzovány pomocí EDX analýzy chemického složení na SEM. V tab. 15 jsou zaznamenány naměřené koncentrace chemických prvků, a to konkrétně v lokalitě definované na obr. 40 (žlutý obdélník.) Z naměřených výsledků je patrné, že jsou tyto částice ve vzorku CE5\_02 formovány komplexními oxidy podobně jako u vzorku CE5\_01. Kyslík zde tvoří cca 42 hm. %. Dalšími převládajícími naměřenými prvky jsou křemík (cca 18 hm. %), hořčík (cca 13 hm. %), hliník (cca 10 hm. %), vápník (cca 11 hm. %) a chrom (cca 6 hm. %). Na základě identifikovaných chemických prvků a jejich hmotnostních podílů v měřené lokalitě lze formulovat závěr, že analyzované chemické složení oxidických částic odpovídá chemickému složení čedičového prášku.

Tab. 15: Hmotnostní podíl prvků čediče vzorku CE5\_02; uvedeno v hm. %

O	Mg	Al	Si	Ca	Cr
42,4	12,7	10,4	17,6	11,2	5,7



Obr. 44: Vzorek CE5\_02; EDX energetické spektrum naměřených chemických prvků v dané lokalitě měření (viz. žlutý obdélník obr. 40)

### CE5\_03

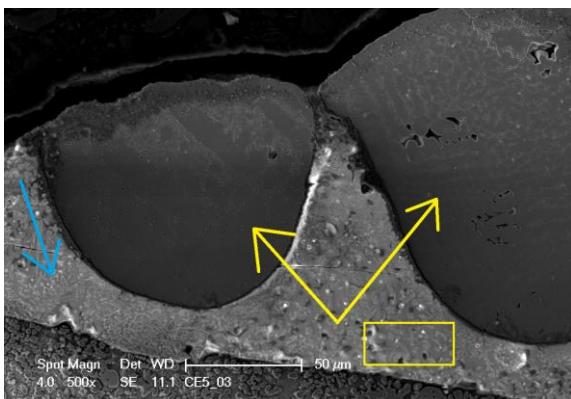
Na metalografických snímcích zobrazených na obr. 45, 46 a 47, které byly pořízeny pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu, je možné pozorovat mikrostrukturu měď-čedičového laserového návaru vzorku CE5\_03.

Dvě měděné kapky (viz. žluté šipky obr. 45), pod kterými byl při solidifikaci formován čedič (viz. modrá šipka obr. 45), je možné pozorovat na obr. 45. Snímek byl pořízen na povrchu návaru.

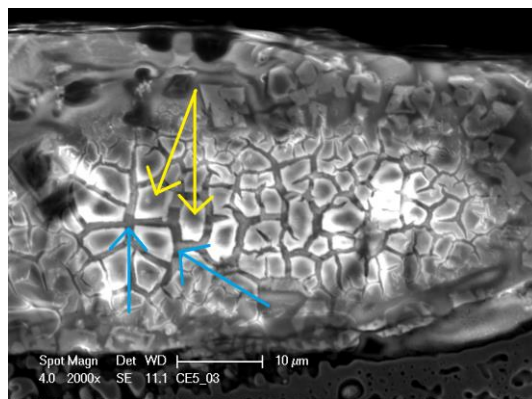
Na obr. 46 je možné zaznamenat ojedinělý jev vyskytující se na povrchu vzorku. Takovýto jev nebyl autorem této práce dosud pozorován. Jedná se o dvě fázově odlišné oblasti čediče, tzv. ostrůvků (viz. žluté šipky obr. 46) a prostorů (viz. modré šipky obr. 46) vyplněných mezi ostrůvky.



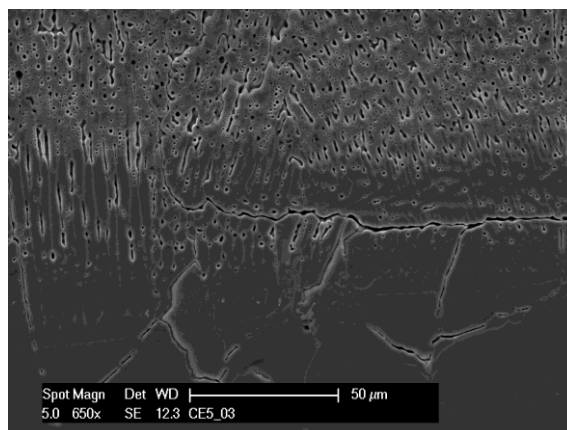
U obr. 47 je možné pozorovat trhlinu, které se šířila podél hranice ztavení laserového návaru a substrátu. Trhlina má zásadní negativní vliv na adhezi laserového návaru k substrátu. Na snímku lze také pozorovat dendritickou strukturu návaru, jejíž dendrity jsou protáhle směrem kolmo na hranici ztavení.



Obr. 45: Vzorek CE5\_03; čedič(modrá šipka) formovaný pod kapkami mědi(žluté šipky) na povrchu laserového návaru; žlutý obdélník vyznačuje oblast pro náběr energetického spektra EDX analýzy chemického složení; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x



Obr. 46: Vzorek CE5\_03; mikrostruktura tenké čedičové vrstvy nacházející se na povrchu laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 2000x

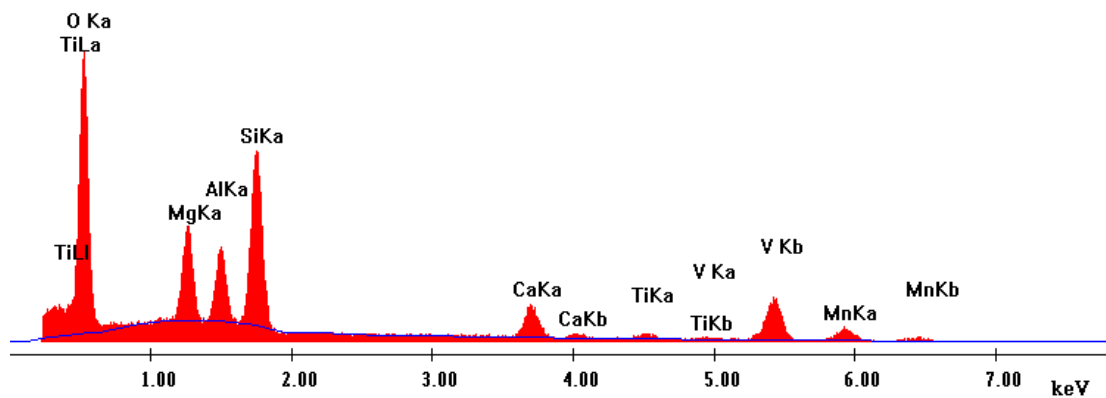


Obr. 47: Vzorek CE5\_03; trhlina na hranici ztavení laserového návaru a substrátu; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 650x

Pro ověření chemického složení oxidických částic vyskytujících se ve struktuře vzorku CE5\_03 bylo potřeba využít EDX analýzu chemického složení. V tab. 16 jsou zaznamenány naměřené koncentrace chemických prvků, a to konkrétně v lokalitě definované na obr. 45 (žlutý obdélník). Z naměřených hodnot je patrné, že vyskytující se oxidické částice na vzorku CE5\_03 byly formovány komplexními oxidy, podobně jako u vzorků CE5\_01 a CE5\_02 a tudíž se jedná o čedič. Kyslík je zde zastoupen cca 48 hm. %. Dalšími převládajícími naměřenými prvky jsou křemík (cca 18 hm. %), hořčík (cca 9.6 hm. %), mangan (cca 7 hm. %), hliník (cca 8 hm. %) a vápník (cca 7 hm. %), tzn. prvky, které byly dle RTG difrakce obsaženy v čedičovém prášku.

Tab. 16: Hmotnostní podíl prvků čediče vzorku CE5\_03; uvedeno v hm. %

O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	V	Mn
47,5	9,6	7,8	18,3	6,8	1,9	0,8	7,3



Obr. 48: Vzorek CE5\_03; EDX energetické spektrum naměřených chemických prvků v dané lokalitě měření (viz. žlutý obdélník obr. 45)

## 8 Diskuse výsledků

Cílem předložené bakalářské práce bylo metalografické hodnocení kompozitního měď-čedičového laserového návaru. Experimentální vzorky laserových návarů byly zhotovené na substrátu z austenitické chrom-niklové nerezové oceli stabilizované titanem, s označením W. Nr. 1.4541. Jako přídatný materiál pro laserové navařování byla použita směs měděného prášku METCO 55 a čedičového prášku. Prášek Metco 55 byl dodán společností Oerlicon Metco a čedič ve formě kamene byl dodán společností EUTIT s.r.o. a následně namletý ve spolupráci s Univerzitou Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem. Hmotnostní podíl mědi a čediče ve směsi přídatného prášku pro laserové navařování byl následující:

- 95 hm. % měděného prášku METCO 55,
- 5 hm. % čedičového prášku.

Laserové návary byly připraveny na pracovišti LaserTherm spol. s.r.o. Pro navaření měď-čedičových laserových návarů byl použit laser YAG – LASERLINE LDF 10000-100, který emitoval infračervené záření o vlnové délce 940 nm. K účelu experimentu byly laserem navařeny tři vzorky, označené jako CE5\_01, CE5\_02 a CE5\_03. Jednotlivé vzorky se od sebe lišily použitými procesními parametry laserového navařování. Vzorek CE5\_01 byl navařován za použití vyššího výkonu 1200 W (u vzorků CE5\_02 a CE5\_03 byl použit výkon laseru 900 W) a vyšší rychlosti posuvu (hodnota nemůže být v bakalářské práci z důvodu ochrany know-how společnosti LaserTherm spol. s.r.o. zveřejněna).

V počáteční fázi experimentálního programu byly zkoumané vzorky pozorovány pomocí konfokálního mikroskopu OLYMPUS LEXT OLS5000 za účelem stanovení drsnosti povrchu a dále zhodnocení stavu povrchu návaru u jednotlivých vzorků. Následně byly vzorky za účelem vyhodnocení mikrostruktur laserových návarů podrobeny metalografickému hodnocení pomocí světelného mikroskopu CARL ZEISS Z1M, rádkovacího elektronového mikroskopu Phillips XL 30 ESEM a rádkovacího elektronového mikroskopu Zeiss EVO MA25. Ve strukturách laserem navařených vzorků byly detekovány oxidické částice, jejichž chemickou povahu bylo nutno ověřit pomocí EDX a EDS analýz.

Pomocí konfokálního mikroskopu byly zkoumány povrchy měď-čedičových laserových návarů. Z pořízených snímků bylo zjištěno, že se částice měděného prášku uchycovaly na površích návarů. Pomocí měření drsnosti bylo zjištěno, že jsou hodnoty drsností povrchů jednotlivých vzorků podobné (pohybují se v rozmezí od 32 do 36  $\mu\text{m}$ ). Úhel smáčení dotyku měděných částic s povrchem laserových návarů se pohyboval v rozmezí od 75 do 90  $^\circ$ . Na snímcích bylo také možné pozorovat povrchové trhliny.

Pomocí světelného mikroskopu byly pořízeny makrosnímky vzorků CE5\_01, CE5\_02 a CE5\_03 laserových návarů. Tyto snímky zachycovaly celou šířku návaru, včetně hranice ztavení mezi laserovým návarem a substrátem a dále podpovrchovou oblast substrátu pod hranicí ztavení. Již z makrosnímků bylo možné ve struktuře všech zkoumaných laserových návarů zaznamenat výskyt trhlín, které směřovaly od povrchu návaru směrem k substrátu, ojediněle pak trhliny pokračovaly přes hranici ztavení do substrátu. Dále byl na všech pořízených makrosnímcích pozorován výskyt porozity laserových návarů.

Při metalografické analýze mikrostruktury laserových návarů byla pozorována dendritická struktura laserem navařených housenek. Ve struktuře návarů byl zaznamenán výskyt epitaxních a kolumnárních dendritů (viz. obr. 23 a 34). Mezidendritické prostory byly často vyplňovány mědí (viz. obr. 24). Dále byl na vzorcích laserových návarů pozorován výskyt oxidických částic. Tyto částice byly nejvíce formovány na površích laserových návarů.

Pro bližší analýzu oxidických částic, které byly identifikovány na površích laserových návarů a dále jako disperzně rozmístěné kulovité částice ve strukturách laserových návarů byla použita řádkovací elektronová mikroskopie s EDX a EDS analýzou chemického složení. Pomocí těchto analýz bylo zjištěno, že se tyto oxidické útvary skládají z chemických prvků typických pro čedič (např. křemík, hořčík, vápník kyslík a hliník). Čedič byl v laserových návarech identifikován ve formě:

- tenkých vrstev, které se vyskytovaly na površích návarů (viz. obr. 32),
- nepravidelných útvarů vyskytujících se na hranicích jednotlivých housenek (viz. obr. 33),
- disperzně rozmístěných kulovitých útvarů vyskytujících se ve strukturách laserových návarech (viz. obr. 34).

Čedič způsobuje značné snížení houževnatosti u měď-čedičového laserového návaru (v porovnání s čistě měděným návarem). Ve struktuře laserových návarů byly zaznamenány oblasti, kdy byly trhliny vzniklé v návarech iniciovány z čedičových lokalit. Za stávajícího stavu jsou návary pro využití v průmyslové praxi nepoužitelné, protože obsahují vysoký podíl vnitřních vad. Nevhodně vysoké natavení základního materiálu způsobilo jeho výrazné promíšení s návarovým materiálem, což mělo za důsledek formování laserového návaru převážně chemickými prvky obsaženými v substrátu oceli W. Nr. 1.4541.

## 9 Závěr

Cílem předložené bakalářské práce bylo metalograficky analyzovat a popsat materiálové struktury v měď-čedičových laserových návarech.

Teoretická část předložené bakalářské práce byla zaměřena na tematiku:

- laseru a laserových zařízení vhodných pro navařování mědi o vysoké čistotě,
- popisu technologie laserového navařování s přídavným materiálem ve formě prášku,
- současného stavu poznání problematiky navařování mědi.

V experimentální části bakalářské práce byly popsány struktury měď-čedičových laserových návarů, dále pak vnitřní vady návarů a v neposlední řadě byla experimentální část práce zaměřena na identifikaci čedičových lokalit v laserových návarech.

Metalografická analýza zkoumaných vzorků CE5\_01, CE5\_02 a CE5\_03 prokázala následující zjištěná fakta a výsledky:

- míra promíšení laserových návarů se substrátem byla enormní,
- laserové návary měly vysoce jemnou dendritickou strukturu,
- mezidendritické prostory laserových návarů byly vyplňovány mědí,
- v laserových návarech vzniklo velké množství vnitřních vad, které mají značný vliv na funkčnost návaru. V laserových návarech byla sledována porozita, trhliny na hranici ztavení návaru a substrátu, trhliny na povrchu návaru, a dále nerozpuštěné částice mědi na povrchu návaru,
- čedič se zapojil do tvorby struktur návarů - byl formován samostatně na povrchu laserových návarů, na rozhraní dvou navařených housenek nebo byl disperzně rozmístěn ve struktuře laserových návarů,
- čedič a jeho okolí formovaný v laserových návarech vykazoval značné známky křehkosti.

Z výsledků metalografického hodnocení vyplývá, že kvůli vysokému podílu zjištěných povrchových a vnitřních vad (zejména kvůli výskytu trhlin a porozity) v měď-čedičových laserových návarech, které byly připraveny pomocí infračerveného laseru YAG – LASERLINE LDF 10000-100, jsou laserové návary za současného stavu pro praxi nepoužitelné. Budoucí výzkum bude dále zaměřen na úpravu technologických podmínek procesu laserového navařování měď-čedičových návarů tak, aby bylo dosaženo návarů o vyšší jakosti.

## 10 Seznam použitých zdrojů

- [1] Lao lasery a optika, 2011. *Seriál na téma lasery – základní princip laseru a jejich dělení*. [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [2] Lawrence Livermore National Laboratory, 2020. *How lasers work*. [cit. 10.12.2020] Dostupné z: [https://lasers.llnl.gov/education/how\\_lasers\\_work](https://lasers.llnl.gov/education/how_lasers_work)
- [3] KACHTÍK, Lukáš, 2020. *Princip laseru*. [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/princip.html>
- [4] Czechlasers.cz vzdělávací web o laseru, 2018. *Historie laserů ve světě*. [cit. 24.5.2021]. Dostupné z: <https://czechlasers.cz/studovna/historie-laseru-ve-svete/>
- [5] ION, John. *Laser processing of engineering materials*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0-7506-6079-1
- [6] BIRGER, E.M. MOSKVITIN, G.V. POLYAKOV, A.N. ARKHIPOV, V.E. Industrial laser cladding: current state and future. *In Welding International*. Vol. (25)3. 2011, p. 234-243. DOI: 10.1080/09507116.2010.540880
- [7] OLIVEIRA, U. OCELÍK, V. DE HOSSON, J.T.H.M. Analysis of coaxial cladding processing conditions. *In Surface and Coating Technology*. Vol. 197(2-3). 2005, p. 127-136. ISSN 0257-8972.
- [8] O.R. Lasertechnologie GmbH, 2017. *Laser cladding*. [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: <https://www.or-laser.com/info/laser-cladding-services>
- [9] Endlas LC, 2020. *Why is Endlas LC Laser Clad the Solution to Your Problem*. [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: <https://www.endlas.com/laser-cladding>
- [10] Westfalen, 2015. *Argon 5.0*. [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: <http://www.westfalen.cz/technicke-plyny/plyny-dle-branze/analyzy-laborator/pouziti/detail/spektroskopie.html>
- [11] OCELIK, V., DE HOSSON, J. T. M. Thick metallic coatings by coaxial and side laser cladding: processing and properties. *In Advances in laser materials processing technology*. 2010, p. 426-458. ISBN 978-1-84569-474-6
- [12] KLUFOVÁ, Pavla. *Odolnost proti degradaci laserem navařených austenitických vrstev*. Plzeň, 2018. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Antonín Kříž.
- [13] KOKKOLA LCC Oy, 2020. *Laser cladding*. [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: <https://lcc.fi/en/laser-cladding/>
- [14] Laser Cladding Repairs for Aero and IGT Applications, 2020. *Solutions Flash*. [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: [https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon\\_SF-0026.0\\_Aero\\_IGT\\_LaserCladding\\_Repairs\\_EN.pdf&download=1](https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_SF-0026.0_Aero_IGT_LaserCladding_Repairs_EN.pdf&download=1)
- [15] Degradation and surface engineering, 2020. *Advantages & Disadvantages* [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: <https://shsuperblog.wordpress.com/advantages-disadvantages/>.
- [16] TOYSEKARY, Ehsan. KHAJEPOUR, Amir. CORBIN, Stephen. *Laser cladding*. 2005: CRC Press LLC. ISBN 0-8493-2172-7.

- [17] FEI, Weng. CHUANZHONG, Chen. HUIJUN, Yu. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review. *In Materials and Design*. Vol. 58. 2014, p. 412-425. DOI:10.1016/j.matdes.2014.01.077
- [18] TORIMS, T. The application of laser cladding to mechanical component repair, renovation and regeneration. *In DAAAM International Scientific Book*. Chapter 32. 2013, p. 587-608. ISSN 1726-9687. DOI: 10.2507/daaam.scibook.2013.32
- [19] TUMIONEN, Jari. *Engeneering coatings by laser cladding – the study of wear and corrosion properties*. 2009: Tampere University of Technology. ISBN 978-952-15-2324-3
- [20] BRITTON, S. SORN, O. Blues skies for copper cladding with 450 nm. *In proceedings of spie*. Vol. 10909. 2019. DOI: 10.1117/12.2506007
- [21] SURINDER, Singh. MANOJ, Kumar. GURVINDER, Pal Singh Sodhi. RAMESH, Kumar Buddu. HARPREET, SINGH. Development of thick copper claddings on SS316L steel for In-vessel components of fusion reactors and copper-cast iron canisters. *In Fusion Engeneering and Design*. Vol. 128, 2018, p. 126-137. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.01.076>.
- [22] Industrial laser solution, 2020. *High-power blue laser improves fabrication throughput*. [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/welding/article/16485196/highpower-blue-laser-improves-fabrication-throughput>
- [23] Laserline GmbH, 2020. *LDMblue: blue diode laser*. [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/ldm-blue-diode-laser/>
- [24] LaserFocusWorld, 2018. *Novel Lasers: Blue direct-diode lasers extend industrial laser capability*. [cit. 24.5.2021]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16555269/novel-lasers-blue-directdiode-lasers-extend-industrial-laser-capability>
- [25] TRUMPF, 2020. *TruDisk with green wavelength*. [cit. 10.12.2020]. [https://www.trumpf.com/en\\_CA/products/laser/disk-lasers/trudisk-with-green-wavelength/](https://www.trumpf.com/en_CA/products/laser/disk-lasers/trudisk-with-green-wavelength/)
- [26] TAKAHIRO, Hara. *Pure copper layer formation on pure copper substrate using multi-beam laser cladding system with blue diode lasers*. In *Applied physics*. 2020, Vol. 126(418). <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03559-6>
- [27] HATA, T. TSUKAMOTO, M. SATO, Y. HIGASINO, R. FUNADA, Y. ABE, N. Pure copper layer formation on copper based alloy substrate with 100 W class blue diode laser. *In Proceedings of spie*. Vol. 109090Y. 2019. DOI: 10.1117/1.2507818
- [28] PRASAD, Himani Siva. BRUECKNER, Frank. VOLPP, Joerg. KAPLAN, Alexander F.H. Laser metal deposition of copper on diverse metals using green laser sources. *In The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 107. 2020, p. 1559-1568. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05117-z>
- [29] Metalcor, 2021. *Datasheet of steel 1.4541*. [cit. 24.5.2021]. Dostupné z: <http://www.metalcor.de/en/datenblatt/33/?fbclid=IwAR1usVExhaiz8DrZ5LCWShgFcnhznIQmaSgREEjRheVv0QpqsNTzMughdR4>

- [30] Nationwide Stainless Ltd. Company No. 03905629, 2021. *321 Stainless Steel (1.4541)* [cit. 24.5.2021]. Dostupné z: [https://www.nationwidestainless.co.uk/materials/321\\_stainless\\_steel/?fbclid=IwAR1pGmaF0Ysh2eYUCDEv7G0fRyB3bHtZM39-aAjZKBZxs1wA6Pj6sxoKlF0](https://www.nationwidestainless.co.uk/materials/321_stainless_steel/?fbclid=IwAR1pGmaF0Ysh2eYUCDEv7G0fRyB3bHtZM39-aAjZKBZxs1wA6Pj6sxoKlF0)
- [31] OC Oerlikon Management AG, 2021. *Metco 55* [cit. 24.5.2021]. Dostupné z: <https://mymetco.oerlikon.com/en-us/category/metco55>
- [32] TITTEL, Jan. *Testování korozní odolnosti kompozitních laserem navařených materiálů s vysokým poločasem rozpadu*. Plzeň, 2019. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Antonín Kříž.