

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: Materiálové inženýrství a výrobní technologie

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Využití laserových zdrojů k navařování mědi na substrát  
z oceli W. Nr. 1.4541

Autor: **Bc. Václav Váchal**  
Vedoucí práce: **Ing. Pavla Bartoň Klufová, Ph.D.**

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav VÁCHAL**  
Osobní číslo: **S19N0134P**  
Studijní program: **N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a výrobní technologie**  
Téma práce: **Využití laserových zdrojů k navařování mědi na substrát z oceli W.  
Nr. 1.4541.**  
Zadávající 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 laserových návarů mědi a jejich slitin se zaměřením na popis vad v návarech
7. Nedestruktivní testování laserem navařených vzorků z mědi a jejich slitin
8. Diskuse výsledků
9. Závěr

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

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

Konzultanti diplomové práce: **Ing. Petr Hrbáček**  
Laser Therm  
**Ing. Petr Beneš, Ph.D.**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

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

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



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

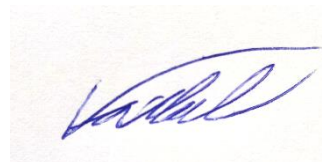
V Plzni dne 6. října 2020

## Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: 28. 05. 2021



.....

podpis autora

## Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval za odborné vedení a poskytování cenných rad své vedoucí práce Ing. Pavle Bartoň Klufové, Ph.D. a konzultantovi diplomové práce Ing. Petrovi Benešovi, Ph. D. za mnoho cenných rad v rámci nedestruktivního testování. Dále mé díky patří také společnosti LaserTherm s. r. o. za poskytnutí experimentálních vzorků.

Diplomová práce vznikla na základně řešení projektu TAČR TREND „*Vývoj technologie laserového navařování speciálních antikoročních kompozitních systémů na bázi neželezných a přírodních anorganických materiálů na vnitřní stěny trubek pro aplikaci v energetickém a chemickém průmyslu*“ (č. p. TW01010369).

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Váchal	<b>Jméno</b> Václav	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	N2301 – Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Bartoň Klufová, Ph.D.	<b>Jméno</b> Pavla	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Využití laserových zdrojů k navařování mědi na substrát z oceli W. Nr. 1.4541		

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

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	87	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	87	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	-
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Diplomová práce řeší problematiku navařování mědi o vysoké čistotě na substráty z oceli. Cílem práce je vyhodnotit vzorky, které byly navařeny laserovými zdroji emitujícími záření o krátké vlnové délce (<math>\lambda \approx 450-1100</math> nm). K hodnocení byla použita metalografická analýza a nedestruktivní testování za účelem stanovení vnitřních a povrchových vad laserových návarů.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Technologie laserové navařování, laser, laserový zdroj, přídavný materiál ve formě prášku, měď, metalografická analýza, světelná mikroskopie, řádkovací elektronová mikroskopie, NDT</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Váchal	Name Václav	
<b>STUDY PROGRAMME</b>	N2301 – Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Bartoň Klufová, Ph.D.	Name Pavla	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Lasers and its use for cladding copper and its alloys on a W.Nr. 1.4541 steel substrate		

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

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

<b>TOTALLY</b>	87	<b>TEXT PART</b>	87	<b>GRAPHICAL PART</b>	-
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This thesis is focused on the issues of laser cladding of high-purity copper on steel substrate. The aim of this work is to assessment the quality of samples that were claded by laser sources emitting short wavelength radiation ( $\lambda \approx 450-1100$ nm). Metallographic analysis and nondestructive testing were used to evaluate the laser clads todetermine internal and surface defects.
<b>KEY WORDS</b>	Laser cladding technology, laser, laser source, powder additional material, copper, metallographic analysis, light microscopy, scanning electron microscopy, nondestructive testing

## Prohlášení o realizaci experimentálního programu

Vypracování experimentálního programu předložené diplomové práce probíhalo za značně ztížených podmínek, kdy byla v období letního semestru z důvodu celosvětové pandemie COVID-19 zakázána účast studentů na laboratorní výuce na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Náplň experimentálního programu diplomové práce byla oproti původnímu návrhu uzpůsobena dané situaci a v rámci praktické části tak nebyly připraveny a hodnoceny původně plánované experimentální vzorky laserových návarů ze slitin mědi.

V Plzni dne: 28. 5. 2021



.....  
Ing. Josef Odehnal, Ph.D.

Vedoucí Katedry materiálu a strojírenské metalurgie



## Obsah

<b>Obsah</b> .....	<b>9</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>11</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>15</b>
<b>Seznam použitých zkratk</b> .....	<b>16</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>17</b>
<b>1 Technologie laserového navařování s přídavným materiálem ve formě prášku</b> .....	<b>18</b>
1.1 Historie laserového navařování .....	19
1.2 Vybavení používané při laserovém navařování s přídavným materiálem ve formě prášku.....	20
1.2.1 Trysky pro podávání přídavného prášku.....	20
1.3 Geometrické charakteristiky laserového návaru.....	21
1.4 Vstupní, procesní a výstupní charakteristika laserového návaru.....	21
1.5 Základní pozitiva a negativa procesu laserového navařování .....	22
1.6 Aplikace laserových návarů.....	22
1.6.1 Navařování povrchů s požadovanými vlastnostmi .....	23
1.6.2 Opravování a repase strojních dílů.....	23
1.6.3 Aditivní výroba tzv. rapid prototyping .....	25
<b>2 Laser</b> .....	<b>26</b>
<b>3 Problematika laserového navařování mědi o vysoké čistotě</b> .....	<b>29</b>
3.1 Vliv chemických nečistot .....	29
3.1.1 Vliv kyslíku.....	29
3.1.2 Vliv vodíku .....	30
3.1.3 Vliv ostatních nečistot.....	30
3.2 Vliv dalších faktorů na svařitelnost mědi .....	31
3.3 Problematika svařování technické mědi .....	31
3.3.1 Problematika svařování technické mědi laserem .....	32
<b>4 Druhy laserových zdrojů používaných pro navařování mědi a jejich slitin</b> .....	<b>35</b>
4.1 Zelenolátkové lasery .....	35
4.2 Modrolátkové lasery .....	36
4.3 Infračervené lasery .....	38
<b>5 Experimentální program</b> .....	<b>40</b>
5.1 Stroje, přístroje a zařízení používané pro laserové navařování a vyhodnocení vzorků .....	40
5.2 Specifikace zařízení pro laserové navařování .....	42

5.2.1	Diodový laser – laserline LDMblue 1800-60 .....	42
5.2.2	Diodový laser YAG – laserline LDF 10000-100 .....	42
5.3	Procesní podmínky a parametry laserového navařování .....	43
<b>6</b>	<b>Specifikace použitých materiálů .....</b>	<b>45</b>
6.1	Specifikace substrátu pro laserové navařování.....	45
6.2	Specifikace přídavného prášku pro laserové navařování.....	46
<b>7</b>	<b>Metalografické hodnocení laserových návarů z mědi se zaměřením na popis vad v návarech .....</b>	<b>47</b>
7.1	Příprava metalografických vzorků.....	48
7.2	Makroskopické hodnocení laserových návarů .....	48
7.2.1	Makroskopické hodnocení vzorků navařených diodovým laserem laserline LDMblue 1800-60.....	48
7.2.2	Makroskopické hodnocení vzorků navařených infračerveným diodovým laserem YAG laserline LDF 10000-100.....	50
7.3	Mikroskopické hodnocení laserových návarů .....	51
7.3.1	Mikroskopické hodnocení vzorků navařených diodovým laserem laserline LDMblue 1800-60.....	51
7.3.2	Mikroskopické hodnocení vzorků navařených infračerveným diodovým laserem YAG LDF 10000-100 .....	66
<b>8</b>	<b>NDT .....</b>	<b>73</b>
8.1	Vizuální zkoušení .....	73
8.2	Radiografické zkoušení .....	76
<b>9</b>	<b>Diskuse výsledků .....</b>	<b>80</b>
9.1	Diskuse výsledků vzorků navařených modrolátkovým diodovým laserem LDMblue 1800-60 .....	80
9.2	Diskuse výsledků vzorků navařených infračerveným diodovým laserem YAG LDF 10000-100 .....	82
<b>10</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>83</b>
<b>11</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>85</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1: Princip metody laserového navařování [3] .....	18
Obr. 2: Umístění trysek pro podávání přídavného prášku a) koaxiální b) boční [1].....	20
Obr. 3: Základní geometrické charakteristiky laserového návaru [1].....	21
Obr. 4: Povlakování olejového vrtacího nástroje [28] .....	23
Obr. 5: Poškozený díl otočného jeřábu před a po laserovém navařování [29].....	24
Obr. 6 Opotřebovaná těsnicí oblast hřídele turbodmychadla před a po laserovém navařování [29] .....	24
Obr. 7: Výroba šnekového ozubení aditivní technologií laserového navařování [30].....	25
Obr. 8: Interakce záření a hmoty při a) absorpci b) spontánní emisi a c) stimulované emisi [1] .....	27
Obr. 9: a) rovnovážné rozdělení elektronů mezi základním a excitovaným stavem b) populační inverze [1] .....	28
Obr. 10: Závislost absorpce mědi na vlnové délce použitého laserového záření [16].....	33
Obr. 11: Schéma vícepaprskového diodového laseru k navařování mědi [23].....	37
Obr. 12: Laserové navařování mědi na substrát z oceli pomocí diodového laseru s vlnovou délkou 450 nm od společnosti Laserline GmbH [24].....	38
Obr. 13: Infračervený laser YAG laserline LDF 10000-100.....	43
Obr. 14: Přídavný prášek Metco55; SEM [36] .....	46
Obr. 15: Vzorok A1; A2; A3 navařené modrolátkovým diodovým laserem LDMblue 1800-60 .....	47
Obr. 16: Vzorok A4 navařené modrolátkovým diodovým laserem LDMblue 1800-60.....	47
Obr. 17: Vzorok A5 navařené modrolátkovým diodovým laserem LDMblue 1800-60, oblast A5 .....	47
Obr. 18: Vzorok B1 a B2 navařené infračerveným diodovým laserem YAG – laserline LFD 10000-100.....	47
Obr. 19: Vzorok A1; makrosnímek laserového návaru z modrolátkového laseru; leptáno; zvětšeno 25x.....	49
Obr. 20: Vzorok A2; makrosnímek laserového návaru z modrolátkového laseru; leptáno; zvětšeno 25x.....	49
Obr. 21: Vzorok A3; makrosnímek laserového návaru z modrolátkového laseru; leptáno; zvětšeno 25x.....	49
Obr. 22: Vzorok A4; makrosnímek laserového návaru z modrolátkového laseru; leptáno; zvětšeno 25x.....	50
Obr. 23: Vzorok A5; makrosnímek laserového návaru z modrolátkového laseru; leptáno; zvětšeno 25x.....	50
Obr. 24: Vzorok B1; makrosnímek laserového návaru z IR laseru; leptáno; zvětšeno 25x.....	50
Obr. 25: Vzorok B2; makrosnímek laserového návaru z IR laseru; leptáno; zvětšeno 25x.....	50
Obr. 26: Vzorok A1; měď na povrchu vzorku; částice mědi; leptáno; zvětšeno 200x .....	51
Obr. 27: Vzorok A2; nedokonale natavená částice měděného prášku; leptáno; zvětšeno 500x .....	51

Obr. 28: Vzorek A4; povrch laserového návaru; strukturní heterogenita a póry v laserovém návaru; povrch vzorku; leptáno; zvětšeno 100x.....	52
Obr. 29: Vzorek A4; heterogenita a trhлина v návaru v oblasti hranice ztavení; leptáno; zvětšeno 200x.....	52
Obr. 30: Vzorek A4; póry vzniklé oddělením nezačleněných částic .....	52
Obr. 31: Vzorek A5; rozhraní mezi substrátem a měděným návarem; leptáno; zvětšeno 200x .....	53
Obr. 32: Vzorek A5; povrchová oblast laserového návaru; leptáno; zvětšeno 500x .....	53
Obr. 33: Vzorek A1; hranice ztavení mezi substrátem a laserovým návarem; červené šipky označují mikrotrhliny na hranici ztavení; zelená šipka směřuje na pór ve struktuře laserového návaru leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x .....	54
Obr. 34: Vzorek A1; částice přídavného prášku METCO 55; středová oblast laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x.....	54
Obr. 35: Vzorek A1; středová oblast laserového návaru; leptáno; zelené šipky odkazují na fázové oblasti s dominantním obsahem železa; SEM; SE; zvětšeno 1000x .....	55
Obr. 36: Vzorek A1; povrchová oblast laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x .....	55
Obr. 37: Vzorek A1; měření A1_EDX1; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; středová oblast laserového návaru.....	55
Obr. 38: Vzorek A1; měření A1_EDX2; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru .....	56
Obr. 39: Vzorek A2; zeleně vyznačená hranice ztavení mezi substrátem a laserovým návarem; červené šipky označují mikrotrhliny na hranici ztavení; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x.	57
Obr. 40: Vzorek A2; středová oblast laserového návaru; zelené šipky odkazují na fázové oblasti s dominantním obsahem železa; červené šipky označují oxidické částice; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 1000x.....	57
Obr. 41: Vzorek A2; povrch laserového návaru; zelené šipky poukazuje na fázově.....	57
Obr. 42: Vzorek A2; měření A2_EDX1; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; středová oblast laserového návaru .....	58
Obr. 43: Vzorek A2; měření A2_EDX2; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru.....	58
Obr. 44: Vzorek A3; hranice ztavení mezi substrátem a laserovým návarem; síť mikrotrhlin na hranici ztavení; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x .....	59
Obr. 45: Vzorek A3; středová oblast laserového návaru; leptáno; zelená šipka poukazuje na nedokonale natavenou částici přídavného materiálu; červená šipka poukazuje na fázově odlišnou oblast od okolní základní matrice; SEM; SE; zvětšeno 500x.....	59
Obr. 46: Vzorek A3; povrchová oblast laserového návaru; zelená šipka poukazuje na nedokonale natavenou částici přídavného materiálu; červená šipka označuje póry; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x.....	60

Obr. 47: Vzorek A3; měření A3_EDX1; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; středová oblast laserového návaru.....	60
Obr. 48: Vzorek A3; měření_EDX2; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru .....	61
Obr. 49: Vzorek A4; hranice ztavení mezi substrátem a laserovým návarem; síť mikrotrhlin šířících se kolmo na hranici ztavení; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x .....	62
Obr. 50: Vzorek A4; středová oblast laserového návaru; zeleně jsou vyznačeny fázově odlišné oblasti od okolní základní matrice; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x .....	62
Obr. 51: Vzorek A4; povrch laserového návaru; .....	62
Obr. 52: Vzorek A4; měření A4_EDX1; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; středová oblast laserového návaru.....	63
Obr. 53: Vzorek A4; měření A4_EDX2; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru .....	63
Obr. 54: Vzorek A5; hranice ztavení mezi substrátem a laserovým návarem; leptáno; síť mikrotrhlin šířících se kolmo na hranici ztavení; SEM; SE; zvětšeno 500x.....	64
Obr. 55: Vzorek A5; středová oblast laserového návaru; zeleně jsou vyznačeny nedokonale natavené částice přídavného měděného prášku METCO 55; SEM; SE; zvětšeno 1000x .....	64
Obr. 56: Vzorek A5; povrch laserového návaru; červená šipka poukazuje na fázově odlišnou oblast od okolní základní matrice; červenou šipkou je vyznačena nedokonale natavená částice přídavného měděného prášku METCO 55; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x.....	64
Obr. 57: Vzorek A5; měření A5_EDX1; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; středová oblast laserového návaru .....	65
Obr. 58: Vzorek A5; měření A5_EDX2; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru .....	65
Obr. 59: Vzorek B1; hranice zrn; leptáno; zvětšeno 200x .....	66
Obr. 60: Vzorek B1; hranice ztavení; trhlna nad hranicí ztavení; leptáno; zvětšeno 200x.....	66
Obr. 61: Vzorek B1; pór ve struktuře laserového návaru; základní měděná matrice laserového návaru; leptáno; zvětšeno 200x .....	67
Obr. 62: Vzorek B1; trhliny ve struktuře laserového návaru; leptáno; zvětšeno 200x .....	67
Obr. 63: Vzorek B2; zoxidovaný povrch; leptáno; zvětšeno 200x .....	67
Obr. 64: Vzorek B2; oxidická vrstva na povrchu laserového návaru; leptáno; základní matrice měděného návaru; zvětšeno 500x .....	67
Obr. 65: Vzorek B2; oxidické síťový; leptáno; zvětšeno 200x .....	68
Obr. 66: Vzorek B2; oxidické řádky kopírující fázově odlišné oblasti; leptáno; zvětšeno 200x .....	68
Obr. 67: Vzorek B1; hranice ztavení mezi substrátem a laserovým návarem, na kterou odkazují zelené šipky; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 1000x .....	69

Obr. 68: Vzorek B1; středová oblast laserového návaru; chemicky i strukturně odlišné oblasti od okolní měděné matrice; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 1000x .....	69
Obr. 69: Vzorek B1; středová oblast laserového návaru; ředina; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 1500x .....	69
Obr. 70: Vzorek B1; povrchová laserová vrstva; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 1500x .....	69
Obr. 71: Vzorek B1; povrchová oblast laserového návaru; zeleně vyznačená oblast je oblast bez .....	69
Obr. 72: Vzorek B1; měření B1_EDX1; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru .....	70
Obr. 73: Vzorek B2; povrchová struktura laserového návaru; zelené šipky odkazují na mikropóry ve struktuře; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 2500x .....	71
Obr. 74: Vzorek B2; povrchová oblast laserového návaru; zelené šipky odkazují na mikropóry ve struktuře leptáno; SEM; SE; zvětšeno 2000x .....	71
Obr. 75: Vzorek B2; měření B2_EDX1; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru .....	71
Obr. 76: Vzorek B2; měření B2_EDX2; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru .....	72
Obr. 77: Makrosnímek laserových návarů A1; A2; A3 navařené modrolátkovým .....	74
Obr. 78: Makrosnímek vzorku A4 navařené modrolátkovým diodovým laserem LDM blue 1800-60 .....	74
Obr. 79: Vzorek A5 navařené modrolátkovým diodovým laserem LDM blue 1800-60; makrosnímek .....	75
Obr. 80: Vzorky B1 a B2 navařené infračerveným diodovým laserem YAG – LASERLINE LFD 10000-100; makrosnímek .....	76
Obr. 81: Vzorky A1; A2; A3 navařené modrolátkovým diodovým laserem LDM blue 1800-60, radiografická zkouška; makrosnímek .....	77
Obr. 82: Vzorky A1; A2; A3 navařené modrolátkovým diodovým laserem LDM blue 1800-60, radiografická zkouška; makrosnímek .....	77
Obr. 83: Vzorky A4; A5 navařené modrolátkovým diodovým laserem LDM blue 1800-60, radiografická zkouška; makrosnímek .....	78
Obr. 84: Vzorky B1; B2 navařené infračerveným diodovým laserem YAG – LASERLINE LFD 10000-100; makrosnímek .....	79

## Seznam tabulek

Tab. 1: Chemické složení a základní mechanické vlastnosti technické mědi vhodné ke svařování [14] .....	29
Tab. 2: Hodnoty spektrální absorpce pro měď, hliník, nerezovou ocel a titan pro různé vlnové délky $\lambda$ [16] .....	35
Tab. 3: Stroje, přístroje a zařízení použité v rámci realizace experimentálního programu;....	41
Tab. 4: Specifikace modrolátkového diodového laseru laserline LMDblue 1800-60 [33] .....	42
Tab. 5: Specifikace infračerveného diodového laseru YAG laserline LDF 10000-100 [34]...	42
Tab. 6: Výstupní výkon použitý při navařování experimentálních vzorků A1; A2; A3; A4; A5; B1; B2 .....	43
Tab. 7: Chemické složení oceli W. Nr. 1.4541 deklarované výrobcem; obsah prvků v hm. % [35] .....	45
Tab. 8: Mechanické a fyzikální vlastnosti oceli W. Nr. 1.4541 stanovené při teplotě 20 °C [37] .....	45
Tab. 9: Základní informace o přídavném prášku METCO 55 deklarované výrobcem [36] ....	46
Tab. 10: Chemické složení leptadla Robin.....	48

## Seznam použitých zkratk

**CAD** – Computer Aided Design (počítačem podporované navrhování)

**CAM** – Computer Aided Manufacturing (počítačová podpora obrábění)

**CNC** – Computer Numerical Control (číslicové řízení počítačem)

**IR** – Infrared Radiation (infračervené záření)

**NIR** – Near-Infrared Radiation (blízké infračervené záření)

**MTU** – Maximum Transmission Unit (maximální přenosná jednotka)

**TOO** – Tepelně ovlivněná oblast

**LMD** – Laser Metal Deposition (laserové nanášení kovů)

**LASER** – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilování světla stimulovanou emisí záření)

$v_c$  – rychlost navařování [m/min]

$\lambda$  – vlnová délka [nm]

$P$  – výkon laseru [W]

$I_e$  – intenzita záření [ $W/m^2$ ]

$F$  – rychlost podávání prášku [g/min]

$S$  – velikost spotu [ $mm \times mm$ ]

**W. Nr.** – Werkstoffnummer (německá norma pro číslování materiálu)

**ČSN** – Česká soustava norem

**ISO** – International Organization for Standardization

**GmbH** – Gesellschaft mit beschränkter Haftung (Společnost s ručením omezeným)

**LDM** – (označení společnosti LaserLine GmH pro přímé diodové lasery)

**LDF** – (označení společnosti LaserLine GmH pro vysoce výkonné diodové lasery)

**YAG** – Yttrium Aluminium Garnet (aktivní krystal tvořící prostředí pevnolátkových laserů)

**WD** – Width (šířka)

**EDX** – Energy Dispersive analysis of X-rays (Energeticky disperzní analýza rentgenových paprsků)

**HVOF** – High Velocity Oxygen Fuel (vysokorychlostní žárový nástřik)

**APS** – Atmospheric Plasma Spraying (atmosférický plazmový nástřik)

**SEM** – Scanning Electron Microscopy (řádkovací elektronová mikroskopie)

ref. č. – referenční číslo

**NDT** – NonDestructive Testing (nedestruktivní zkoušení)

**VT** – Visual Testing (vizuální zkoušení)

**RT** – Radiographic Testing (radiografické zkoušení)

**RTG** – Radioisotope Thermoelectric Generator (radiografické záření)



## Úvod

Předložená diplomová práce, která byla vypracovaná na téma využití laserových zdrojů k navařování mědi na substrát z oceli W. Nr. 1.4541, se skládá ze dvou částí. V první části je pojednáno o technologii laserového navařování s přídavným materiálem ve formě prášku, principech laseru, problematice navařování mědi o vysoké čistotě a druzích laserových zdrojů, které se k navařování mědi v současné době používají. Druhá část diplomové práce je věnována experimentálnímu programu, který byl zaměřen na využití různých laserových zdrojů k navařování mědi vysoké čistotě na ocelový substrát a následnému vyhodnocení návarů pomocí metalografické analýzy a NDT.

Podstatou technologie laserového navařování je vytvoření pevných metalurgických vazeb mezi laserovým návarem a substrátem. Vytvoření jakostního laserového návaru bez vad při navařování čisté mědi však představuje obtížný technologický proces, jehož výsledek závisí zejména na druhu použitého laserového zdroje. Při navařování mědi pomocí laseru je nutné se vypořádat se třemi základními problémy. Jedná se o vysokou odrazivost laserového svazku od povrchu měděného materiálu, nestabilitu procesu a tvorbu odstříků.

Studiem výsledků vědy a výzkumu v oblasti navařování mědi na světových vědecko-výzkumných pracovištích bylo zjištěno, jaké druhy laserů a procesní parametry jsou v současné době pro navařování mědi používány. Ve většině případů se s výhodou využívají krátkovlnné lasery, při jejichž vlnových délkách má měď přijatelné hodnoty spektrální absorpce. Například pro vlnovou délku  $\lambda = 450$  nm činí hodnota spektrální absorpce mědi přibližně 45 %, kdežto při vlnové délce  $\lambda = 1\ 100$  nm je spektrální absorpce mědi pouhá 4 %. Mezi zástupce laserů, se kterými lze efektivně navařovat měď, patří tzv. lasery modrolátkové ( $\lambda \approx 450$  nm), zelenolátkové ( $\lambda \approx 520$  nm) a infračervené ( $\lambda \approx 750$  až 1100 nm). Ve vazbě na použité druhy laserových zdrojů jsou v diplomové práci uvedeny výsledky dosažené při navařování mědi na světových vědecko-výzkumných pracovištích.

V druhé experimentální části byly zkoumány a vyhodnocovány vzorky dodané v rámci řešené diplomové práce. Konkrétně se jednalo o dvě série celkem sedmi vzorků při jejichž zhotovování byly využity některé laserové zdroje, které byly popsány v rešeršní části. První série vzorků byla navařena ve společnosti LaserLine GmbH za pomoci modrolátkového laseru laserline LDMblue 1800-80 emitujícího záření  $\lambda = 445$  nm. Druhá série vzorků byla připravena v rámci spolupráce Katedry materiálu a strojírenské metalurgie Západočeské univerzity v Plzni s průmyslovou společností LaserTherm spol. s r. o., kde navařování jednotlivých vzorků proběhlo na infračerveném diodovém laseru YAG laserline LDF 10000-100.

Předložená diplomová práce je zaměřena na metalografické hodnocení a nedestruktivní testování laserových návarů na bázi čisté mědi s orientací na popis vad.

Cílem diplomové práce je výsledky zkoušek zdokumentovat, popsat vnitřní strukturu a charakter případných vad laserových návarů a v návaznosti na dosažených výsledcích porovnat jakost laserem navařených vzorků v závislosti na výrobních parametrech a použitým druhu laseru.

## 1 Technologie laserového navařování s přídavným materiálem ve formě prášku

Technologie laserového navařování využívá vysoké hustoty energie laserového svazku k nanášení vrstvy požadovaného materiálu na substrát. Při procesu laserového navařování je přídavný materiál ve formě prášku taven laserovým svazkem a navařen na povrch substrátu. Zároveň dochází k natavení tenké vrstvy povrchu substrátu, čímž je dosaženo vytvoření metalurgických vazeb mezi laserovým návarem a substrátem. Přídavný materiál lze na substrát nanášet několika způsoby. Prvním, v současnosti již nevyužívaným, způsobem je nanášení pasty předem na substrát. Druhým způsobem je podávání přídavného drátu do místa návaru. Třetím způsobem je přivádění přídavného materiálu ve formě prášku. Předložená diplomová práce je věnována technologii laserového navařování s přídavným materiálem ve formě prášku, jejíž princip je znázorněn na Obr. 1. S využitím technologie laserového navařování ve formě prášku lze na substrát nanášet široké spektrum materiálů. Pro příklad je zde uveden sortiment přídavných prášků běžně využívaných průmyslovou společností LaserTherm spol. s.r.o:

- nerezové oceli (AISI 304 a 403),
- konstrukční oceli (ISO EN 42CrMo4),
- nástrojové oceli (M2, M35, H13, H100),
- kobaltové slitiny (Stellit, CoNiCrAl, Tribaloy),
- niklové slitiny (NiCrSiB, Nimonic, Inconel, Hastelloy),
- bronzové slitiny,
- cermety (WC-Co, WC-Co-Cr, CrC-NiCr). [3]

Tloušťka laserových návarů se u výše uvedených materiálů pohybuje v rozmezí od 0,05 do 2 mm s šířkou stopy cca 0,4 mm. [1, 3, 7]



Obr. 1: Princip metody laserového navařování [3]

Cílem laserového navařování je vytvořit návar s požadovanými vlastnostmi a chemickým složením na daném substrátu, přičemž by nemělo dojít k výraznému promíšení mezi oběma kovy. Stupeň promíšení, jakožto jedna ze základních jakostních charakteristik, by neměl přesáhnout hranici 10 %. [1, 2]

Pro zajištění ochrany tavné lázně se při laserovém navařování s přídavným materiálem ve formě prášku používají ochranné plyny (Ar, He, N). Ochranný plyn unáší proud prášku z podavače prášku do místa návaru. Během této cesty dochází k protnutí laserového paprsku s kovovými částicemi a k následnému roztavení prášku. Kontinuálně s roztavováním prášku probíhá i natavování základního materiálu. Výsledkem je promíšení obou materiálů po dopadu roztaveného prášku na povrchu substrátu. Vzniklá tavná lázeň je rovněž chráněna ochranným plynem, aby nedocházelo k oxidaci lázně. [1, 4]

Kromě zmíněné interakce, kdy zkapalněné částice prášku reagují s nataveným povrchem, mohou nastat i další dopadové jevy jako:

- Pevné nenatavené částice prášku dopadají na pevný povrch a od povrchu se odrazí.
- Pevné nenatavené částice prášku dopadají na kapalnou taveninu, na kterém se zachytí.
- Kapalně natavené částice prášku dopadají na pevný nenatavený povrch substrátu, na kterém se zachytí.

Zmíněné tři jevy jsou nežádoucí, a je důležité zvolit optimální procesní podmínky navařování tak, aby se minimalizovalo zastoupení těchto dopadových jevů. [1]

## 1.1 Historie laserového navařování

Princip laseru fyzikálně popsal už v roce 1917 Albert Einstein, ale první funkční laser byl sestaven až v roce 1960. Jeho vynálezcem byl americký fyzik Theodore H. Maiman a zasloužil se tak o velký pokrok ve vědě.

Zásadou vývoje vysoce výkonných plynových laserů (např. CO<sub>2</sub> laserů) v 70. letech 20. století bylo již možno laserovou technologií využít pro průmyslové procesy laserového svařování, řezání a povrchového kalení kovů. První zmínka o aplikaci laserového navařování je datována rokem 1983, kdy společnost Rolls Royce úspěšně navařila ochrannou vrstvu na spoje lopatek turbín s rotorem. Tento úspěch podnítl zájem o technologii laserového navařování u řady dalších společností. Následně technologii přejímali zejména přední výrobci motorů, jako byli General Electric, Pratt & Whitney, Allied Signal, Rolls-Royce, Allison, Solar a MTU. [1]

Velkou pozornost si laserové navařování získalo v 80. letech v oblasti opravárenství, kdy bylo laserové navařování využito k renovaci povrchů opotřebovaných lopatek turbín.

V 90. letech byl vývoj laserového navařování nově zaměřen na tzv. rapid prototyping. Jedná se o způsob výroby strojních dílů. Principem této technologie je postupné navařování vrstev prášku, obdobně jako u technologie 3D tisku.

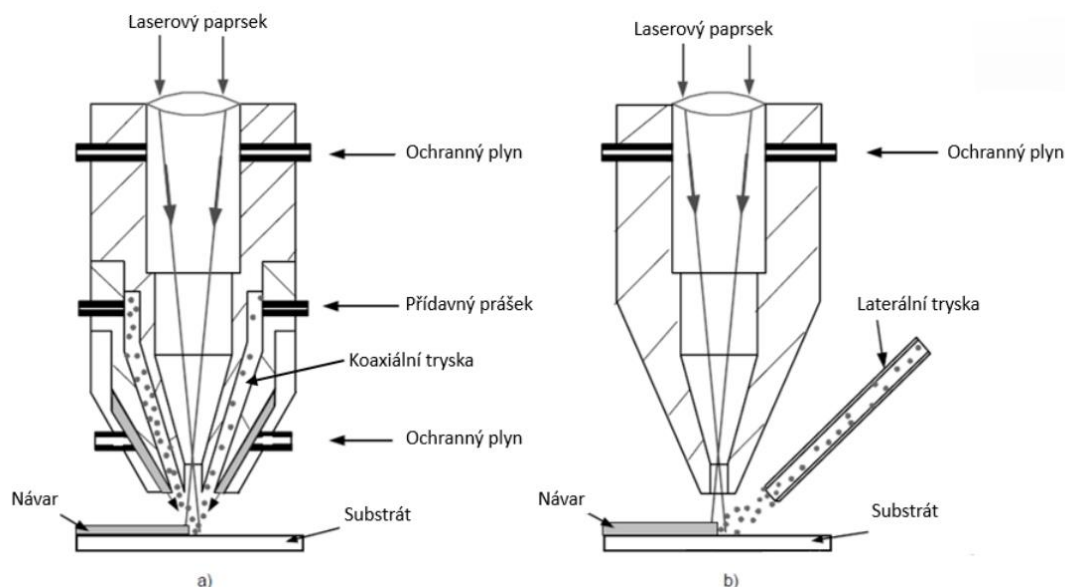
Využitelnost a význam laserového navařování začíná pronikat do celé řady průmyslových odvětví a vědecko-výzkumných pracovišť, a proto má také tato technologie stále nová a nová uplatnění. [1, 4]

## 1.2 Vybavení používané při laserovém navařování s přídavným materiálem ve formě prášku

Pracoviště, na kterém je prováděno práškové laserové navařování by mělo být vybaveno laserem, povlakovací hlavou s tryskou pro přívod přídavného prášku do místa návaru, podavačem prášku a dále průmyslovým robotem a polohovacím zařízením, které zajišťuje případný další nezbytný pohyb substrátu. [1, 27]

### 1.2.1 Trysky pro podávání přídavného prášku

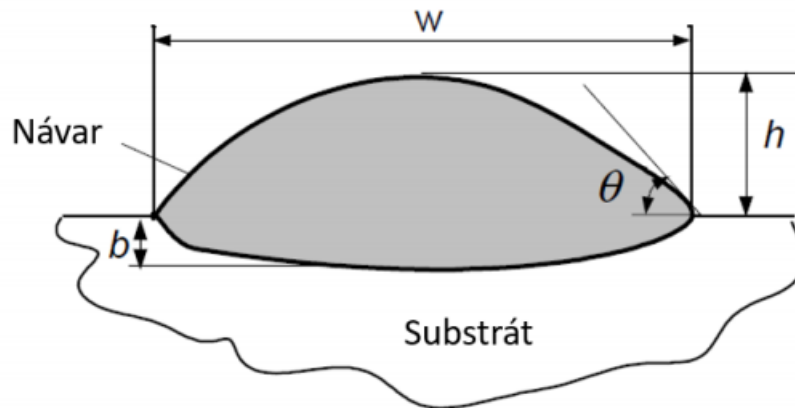
Pro laserové navařování s přídavným materiálem ve formě prášku mohou mít trysky pro dodávání prášku do místa návaru různé umístění, vůči poloze laserového svazku, a to koaxiální a boční (laterální). Obr. 2 ukazuje základní rozdělení umístění trysek vůči laserovému svazku. V bočním (laterálním) uspořádání je tryska pro přívod podávaného prášku do místa návaru umístěna z boku a je zcela oddělena od laserové hlavy. Koaxiálním způsobem je prášek přiváděn tryskou, nejčastěji ve tvaru mezikruží, která je umístěna v ose laserového paprsku do místa vznikajícího návaru. Obecně je koaxiální navařování vhodnější pro navařování tvarově složitých povrchů, protože pohyb navařovací hlavy není limitován přítomností tryšky z boku laseru. [1, 2, 9].



Obr. 2: Umístění trysek pro podávání přídavného prášku a) koaxiální b) boční [1]

### 1.3 Geometrické charakteristiky laserového návaru

Základní geometrické charakteristiky spojené s laserovým návarem jsou zobrazené na Obr. 3. Návar je charakteristický svojí: výškou  $h$  [mm], šířkou  $w$  [mm], úhlem smáčení  $\theta$  [°] a hloubkou návaru  $b$  [mm], která byla roztavena na substrátu během navařování. [1]



Obr. 3: Základní geometrické charakteristiky laserového návaru [1]

### 1.4 Vstupní, procesní a výstupní charakteristika laserového návaru

O kvalitě laserového návaru rozhoduje velké množství parametrů a fyzikálních jevů. Obecně lze charakteristiky laserového návaru rozdělit na vstupní, procesní a výstupní:

- **Vstupní parametry:**
  - **Parametry laseru:** Výkon, velikost spotu, vlnová délka, energetické rozdělení laserového svazku, pulzní/kontinuální režim, typ laseru apod.
  - **Materiál:** Geometrie substrátu, povrchové napětí, chemické složení přídavného prášku a substrátu, drsnost povrchu substrátu, termo-fyzikální a optické vlastnosti prášku a substrátu, zrnitost prášku apod.
  - **Pohybové zařízení:** Příčná a podélná rychlost pohybu laserového paprsku, přesnost systému, relativní zrychlení apod.
  - **Podávání přídavného prášku:** Koaxiální/laterální přivádění prášku, rychlost podávání přídavného prášku do místa návaru, rychlost průtoku inertního plynu, množství podávaného prášku apod.
  - **Ostatní:** Předehřívání, druh ochranného plynu, relativní vlhkost okolního prostředí apod.
- **Procesní parametry:**
  - **Fyzikální děje:** Absorpce laserového záření, difúze prvků, interakce inertního plynu s tavnou lázní, interakce laseru se substrátem, tepelná vodivost substrátu, dynamika tavné lázně, solidifikace apod.
- **Výstupní parametry:**
  - **Jakost laserového návaru:** Geometrie, mikrostruktura, tvrdost, vady návaru (trhliny, pórovitost, rozstřík), drsnost povrchu, promíšení, hloubka TOO, napěťové charakteristiky apod. [1, 2]

## 1.5 Základní pozitiva a negativa procesu laserového navařování

Laserové navařování nabízí mnoho výhod oproti konvenčním povlakovacím procesům, jako je obloukové svařování, plazmové nástřiky apod. Mezi základní pozitiva procesu laserového navařování patří:

- nízká deformace substrátu a malá TOO,
- vysoká ochlazovací rychlost, která zajistí jemnou mikrostrukturu,
- velká materiálová flexibilita navařovaných materiálů – kovy, keramika, polymery, cermety,
- vytvoření návaru bez trhlin a defektů,
- tloušťka návaru v rozmezí 0,2 až desítek mm,
- snadná automatizace a integrace do produkčních prostředí CAD/ CAM a CNC,
- možnost plynulé regulace množství přídavného prášku přiváděného do místa návaru,
- možnost použití více než jednoho druhu prášku při navařování za účelem vytvoření chemicky i strukturně specifického návaru s požadovanými vlastnostmi,
- vhodnost technologie k navařování malých a tvarově složitých součástí,
- možnost navařování vnitřních dutin a obtížně dostupných míst (s ohledem na limity laserové navařovací hlavy),
- metalurgické spojení laserového návaru se substrátem, která zajišťuje návaru vysokou adhezi. [1, 10, 11]

Mezi negativa, která jsou spojena s laserovým navařováním lze zařadit:

- zbytková napětí v navařené vrstvě,
- změny struktury základního materiálu v TOO,
- vznik povrchových a vnitřních vad v návarech (při nesprávně zvolených procesních podmínkách navařování),
- vysoké investiční náklady na vybavení a instalaci zařízení pro laserové navařování. [1, 10, 11]

## 1.6 Aplikace laserových návarů

V průmyslové praxi je technologie laserového navařování využívána v následujících oblastech výroby:

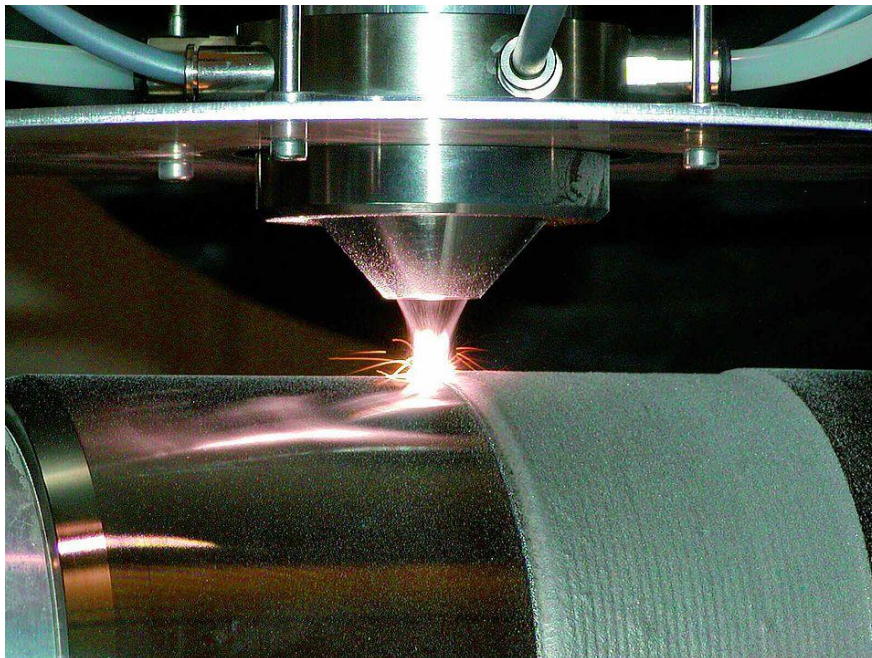
- povlakování s cílem poskytnout povrchu součásti speciální vlastnosti, popř. zvýšit stávající funkční vlastnosti,
- opravování a repase strojních dílů,
- výroba nových strojních dílů – aditivní výroba tzv. rapid prototyping.

Technologie laserového navařování se s výhodou používá v leteckém průmyslu, kde je kladen požadavek na povlakování tvarově složitých dílů s nízkou hmotností a pevností. Dále se technologie laserového navařování uplatňuje v automobilovém průmyslu, petrochemickém průmyslu, zemědělství a v neposlední řadě v samotném strojírenství. [1, 13]



### 1.6.1 Navařování povrchů s požadovanými vlastnostmi

Do kategorie povlakování spadá navařování vrstev poskytujících součástkám ochranou funkci, zlepšení mechanických vlastností, popř. zlepšení funkčních vlastností. V průmyslu jsou navařené vrstvy např. odolné proti abrazivnímu, adhezivnímu a eroznímu opotřebení nebo proti korozi. Ve strojním průmyslu jsou technologií laserového navařování zpracovávány např. součásti vrtných zařízení, ventilů, části hydraulických čerpadel, turbíny proudových motorů, ozubená kola, čepy, rypadla, vodící lišty apod. Zajímavá je aplikace laserového navařování v oblasti medicíny, kde byl například vytvořen biokeramický povlak z fosforečnanu vápenatého na ortopedický implantát, jehož funkcí bylo podpořit růst kostí po vložení implantátu do lidského těla. [1, 12]

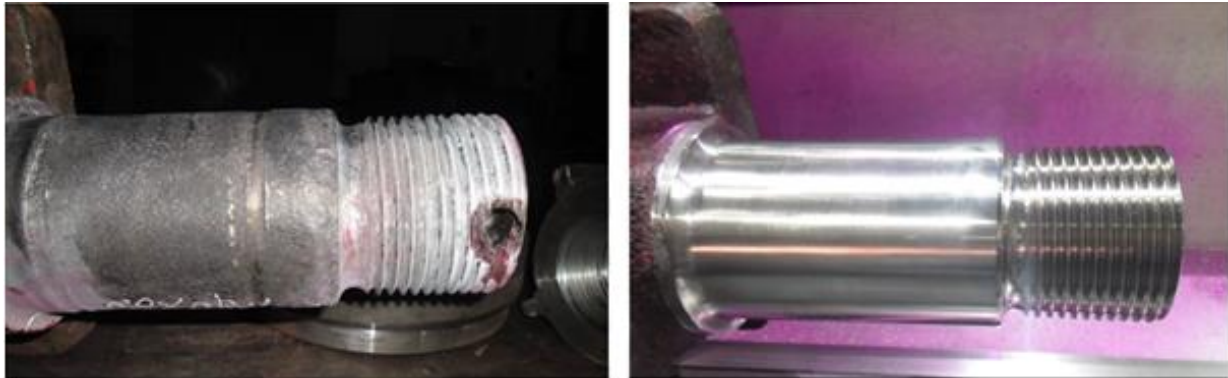


Obr. 4: Povlakování olejového vrtacího nástroje [28]

### 1.6.2 Opravování a repase strojních dílů

Opravování a repase opravitelných strojních dílů poškozených opotřebením či korozí představuje další část aplikace laserových návarů. Oproti konvenčním metodám jako je například laserové svařování, je teplo vnesené do součásti při laserovém navařování minimální a nedochází tak ke vzniku pórů, trhlin nebo zkrácení životnosti. Oprava probíhá tak, že je součást nejprve obrobena a poté pro zvýšení drsnosti povrchu pískována. Zvýšením drsnosti povrchu se zvyšuje absorptivita laserového záření. Po pískování následuje očištění součásti a laserové navařování. Finální operací může být v případě potřeby broušení povrchu návaru na požadovaný přesný rozměry vyráběné součásti. Takto mohou být opraveny vysoce hodnotné součásti, jako například lopatky turbín, hliníkové kryty zbraní na podmořských plavidlech,

které by se konvenčními způsoby nedaly opravit v požadované kvalitě. Repasováním poškozeného strojního dílu je dosaženo značné ekonomické úspory na straně provozovatele součásti, neboť finanční náklady spojené s výrobou nového strojního dílu jsou nesrovnatelně vyšší. [1, 2]



*Obr. 5: Poškozený díl otočného jeřábu před a po laserovém navařování [29]*

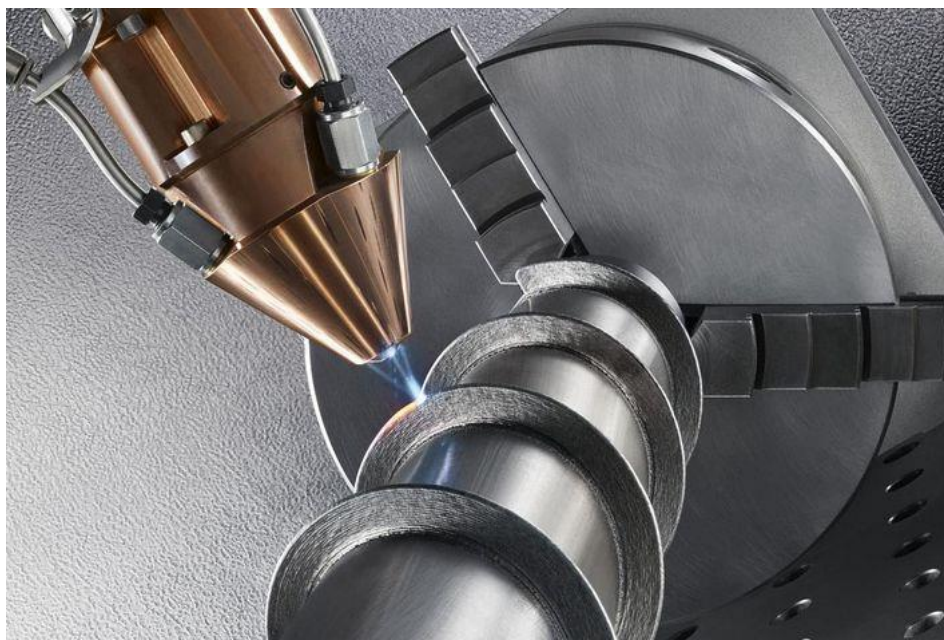


*Obr. 6 Opatřovaná těsnicí oblast hřídele turbodmychadla před a po laserovém navařování [29]*



### 1.6.3 Aditivní výroba tzv. rapid prototyping

Pojmem rapid prototyping se označuje soubor nekonvenčních technologií, jejichž cílem je vytvářet trojrozměrné objekty. Principem této technologie je postupné navařování vrstev prášku. Výsledná součást je pak tvořena z několika laserem navařených vrstev, podobně jako např. při 3D tisku. Výhodou této technologie je rychlost produkce, vysoká přesnost, ekonomičnost a ekologičnost. Součást vyrobená technologií rapid prototyping se prakticky nemusí obrábět, a tím pádem jsou sníženy náklady na její výrobu i samotný čas výroby. [13]



*Obr. 7: Výroba šnekového ozubení aditivní technologií laserového navařování [30]*

## 2 Laser

Předložená diplomová práce je zaměřena na porovnání jakosti laserových návarů z mědi o vysoké čistotě, které byly laserem navařeny s pomocí 2 různých druhů laserových zdrojů.

Slovo **LASER** je akronym z anglického názvu **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (zesilování světla stimulovanou emisí záření). Jedná se o optický zdroj elektromagnetického záření, který vyzařuje generované, opticky zesílené světlo ve formě úzkého svazku. Světlo vyzařované laserem se obecně liší od běžných světelných zdrojů, jako jsou žárovky, obloukové lampy apod., neboť se laserový svazek vyznačuje specifickými vlastnostmi, kterými jsou:

- **Vysoká monochromaticita svazku** – Na rozdíl od běžných světelných zdrojů se laserový svazek vyznačuje jednou vlnovou délkou.
- **Vysoká koherence** – laserový svazek je optický zdroj emitující fotony o stejné frekvenci, stejného směru kmitání a stejné fázi.
- **Minimální divergence** – Minimální míra rozbíhavosti laserového svazku.
- **Fokuse svazku** – Laserový svazek lze zaostřit na velmi malý bod, čímž je možné v daném bodě docílit velmi vysoké koncentrace energie. Například laserem je možno dosáhnout intenzity  $1017 \text{ W/cm}^2$ , která je mnohem vyšší i než jakýkoliv jiné konvenčně užívané zdroje energie (např. acetylenový plamen má intenzitu pouze  $103 \text{ W/cm}^2$ ). [1, 6]

K pochopení fungování principu laseru je třeba definovat, jakým způsobem se může elektron pohybovat z jednoho energetického stavu do druhého:

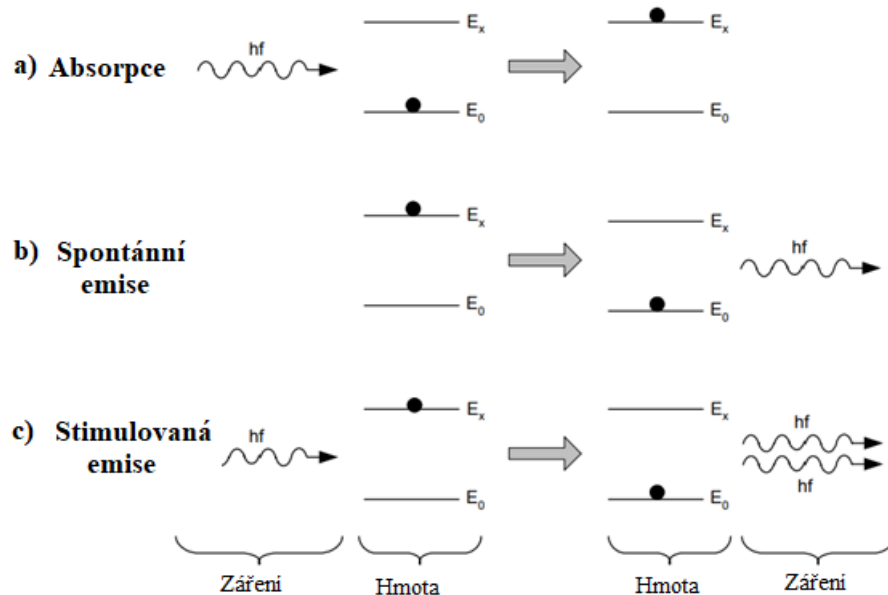
1. **Absorpce** – Je-li atom umístěn v elektromagnetickém poli, které rezonuje na frekvenci  $f$ , může elektron atomu absorbovat určité množství energie  $h f$  a přejít tak do stavu s vyšší energií (obr. 8 a), jak popisuje následující rovnice:

$$h f = E = E_x - E_0 \quad [J] \quad (1),$$

kde:  $f$  je frekvence vyzařování,  
 $h$  Planckova konstanta ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ),  
 $E_x$  vyšší energetická hladina elektronu,  
 $E_0$  základní energetická hladina elektronu. [1, 31]

2. **Spontánní emise** (samovolná emise) – Elektron z vyšší energetické hladiny se po určité době sám od sebe přemístí na původní, nižší energetickou hladinu a při tom vyzáří foton, jehož energie je  $h f$  (Obr. 8 b). Tento proces je nazýván spontánní emise, protože děj není ovlivněn žádnými vnějšími vlivy. [1, 32]
3. **Stimulovaná emise** – Při tomto jevu foton s frekvencí  $f$  dopadá na atom (resp. molekulu) ve vyšším energetickém stavu  $E_x$  a přiměje jeho elektron k přechodu do nižšího stavu  $E_0$  za vyzáření dalšího fotonu (Obr. 8 c). Původní foton však zůstane nepohlcen a oba fotony se pohybují společně dále ve stejném směru jako foton, který

emisi vyvolal. Tyto fotony jsou charakteristické stejnou frekvencí a stejnou fází. Jedná se tedy o koherentní záření. Záření se tak zesiluje a proces se může lavinovitě opakovat s dalšími atomy, resp. jejich elektrony. [32]



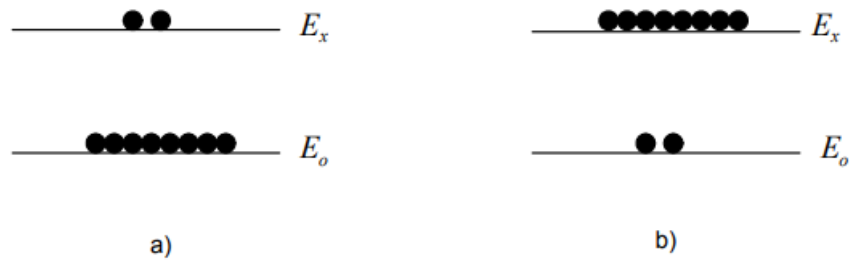
Obr. 8: Interakce záření a hmoty při a) absorpci b) spontánní emisi a c) stimulované emisi [1]

V praxi je generování laserového paprsku způsobeno interakcí velkého počtu atomů v excitačním poli. Ludwik-Boltzmannova rovnice ukazuje, že počet atomů ve stavu s vyšší energií  $N_x$  je funkcí počtu atomů v jejich základním stavu  $N_0$  a jejich odpovídajících energií (rovnice 2):

$$N_x = N_0 e^{-(E_x - E_0)/\sigma T} \quad (2),$$

kde:  $\sigma$  je Boltzmannova konstanta,  
 $E_0$  je energie elektronu základního stavu,  
 $E_x$  je energie elektronu v excitovaném stavu,  
 $T$  je teplota tepelné rovnováhy.

Z rovnice (2) vyplývá, že  $N_x < N_0$ , protože  $E_x > E_0$ . Výsledkem je menší obsah elektronů v excitovaném stavu než ve stavu základním (Obr. 9 a). Pro formování laserového svazku by měl být počet emitovaných fotonů vyšší než počet fotonů absorbovatelných. Z tohoto důvodu se uplatňuje proces stimulované emise elektronů. Jedním ze způsobů, jak dosáhnout, aby byl počet emitovaných fotonů vyšší než počet fotonů absorbovatelných, je začít s více elektrony v excitovaném stavu (Obr. 9 b). Tento jev se nazývá populační inverze, která však není v souladu s tepelnou rovnováhou. Je nutné tedy zvážit vhodné způsoby, jak fenomén inverzní populace zlepšit, a proto dochází k neustálému zkoumání a vývoji laserových zdrojů. [1]



Obr. 9: a) rovnovážné rozdělení elektronů mezi základním a excitovaným stavem b) populační inverze [1]

### 3 Problematika laserového navařování mědi o vysoké čistotě

Měď jako chemický prvek má teplotu tavení  $T_t = 1083$  °C, kubickou plošně centrovanou mřížku a hustotu  $\rho = 8\,960$  kg/m<sup>3</sup>. Mechanické vlastnosti mědi závisí také na jejím způsobu zpracování. Pevnost v tahu mědi v litém stavu je  $R_m = 160$  MPa a ve stavu válcovaném za tepla je pak přibližně  $R_m = 210$  MPa. Měď je tažná, odolná proti oxidaci a deformaci za studena, lze ji zpevnit například deformačním zpevněním nebo precipitačním vytvrzováním, a to téměř na pevnost měkké oceli. [14]

Vysoká elektrická a tepelná vodivost spolu s dobrou korozivzdorností činí měď zajímavým materiálem pro použití v oblasti povrchových úprav strojních dílů. Proto je měď široce využívána v automobilovém, leteckém a elektrotechnickém průmyslu při výrobě součástek jako jsou například břitové destičky, chladicí a elektrické součásti apod.

Hlavními nečistotami, které se v mědi a jejích slitinách vyskytují, jsou kyslík, fosfor a železo. V Tab. 1. jsou uvedeny základní technické slitiny mědi vhodné ke svařování a dále jejich vybrané mechanické vlastnosti a chemické složení. [14]

Označení technické mědi	Obsah chemických prvků v hm. %			Pevnost v tahu $R_m$ [MPa]	Tvrdość [HB]
	Obsah Cu	Nečistoty			
		celkem	Z toho O <sub>2</sub>		
Cu 99,9	99,9	0,1	-	200	40–65
Cu 99,75	99,75	0,25	0,02 – 0,04	210	40–65
Cu 99,5	99,5	0,5	0,1	210	40–65

Tab. 1: Chemické složení a základní mechanické vlastnosti technické mědi vhodné ke svařování [14]

Technologie laserového navařování mědi vykazuje stejně tak jako svařování mědi řadu podobností, které mají zásadní vliv na proces navařování a výslednou kvalitu a vlastnosti návaru. K těmto vlivům patří:

- chemické nečistoty (kyslík, vodík, síra, fosfor, olovo),
- fyzikální vlastnosti mědi a substrátu, na který je měď navařována (tepelná vodivost, teplotní roztažnost, objemová smršťivost, rozpustnost plynů v tekuté mědi apod.),
- změna plastických vlastností za tepla,
- stav materiálu před svařováním,
- množství přivedeného tepla a rychlost ochlazování. [14]

#### 3.1 Vliv chemických nečistot

##### 3.1.1 Vliv kyslíku

Na svařitelnost mědi a jejich slitin má významný vliv kyslík. S kyslíkem měď tvoří dva oxidy – oxid měďný Cu<sub>2</sub>O a oxid měďnatý CuO.

Oxid měďný je v tuhé formě téměř nerozpustný. V lité struktuře se oxid měďný vylučuje ve formě křehkého eutektika ( $\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$ ) na hranicích zrn alfa. Obecně platí, že s rostoucí koncentrací kyslíku roste v mědi objem křehkého eutektika. Experimentálně bylo zjištěno, že již při obsahu 0,04 % kyslíku může eutektikum  $\text{Cu}-\text{Cu}_2\text{O}$  vyplnit celý prostor hranic zrn. Zmíněné eutektikum zhoršuje mechanické vlastnosti svarového spoje a může být metalurgickou příčinou krystalizačních trhlin. Eutektikum lze odstranit z hranic zrn tavením a rekrystalizačním žíháním. Oxid měďný se poté vyskytuje ve formě samostatných oxidických zrn, orientovaných převážně uvnitř rekrystalizovaných zrn alfa. Rekrystalizačně vyžíhaná měď má velmi dobré plastické vlastnosti i při vyšším obsahu  $\text{O}_2$ . [14]

Druhým zmíněným oxidem je oxid měďnatý, tvořící se výhradně na povrchu mědi a jejích slitin. Je stabilní pouze při nižších teplotách. Při teplotách vyšších se rozkládá na  $\text{Cu}_2\text{O}$ . [14]

### 3.1.2 Vliv vodíku

Vodík může ve svarových spojích mědi vyvolávat vady typu bublin, pórů a případně i trhlin. Tyto vady vznikají z důvodu charakteristického průběhu rozpustnosti vodíku v mědi při vyšších teplotách. Vodík je nežádoucí nečistotou v mědi a jejích slitinách ze 2 důvodů. Prvním důvodem je vznik vodních páry na hranici zrn a neúplné rozpustnosti mědi v tuhém stavu. Vlivem vysoké rozpustnosti vodíku v mědi při zvýšených teplotách (28 ml/100 g Cu) a s ohledem na vysokou rychlost tuhnutí svarového spoje nedojde k úplnému vyloučení vodíku podle křivky rozpustnosti. Část vodíku ve fázi krystalizace poté zůstane v přesyceném roztoku a vyloučí se až při teplotách pod teplotou solidu. Vylučující se vodík v tuhé fázi vyvolává tvorbu bublin. Druhým problémem je vznik vodní páry, která je výsledkem chemické reakce při styku vodíku s  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Jak vodík, tak  $\text{Cu}_2\text{O}$  difundují na hranice zrn, kde poté dochází k jejich slučování. Vady tohoto typu způsobují křehkost a lámavost spojů na hranici ztavení kov – základní materiál. Tlak vodní páry může v některých případech dosáhnout kritické hodnoty, která vede ke vzniku trhlin. Jedná se o tzv. vodíkovou nemoc, která je typickým nežádoucím jevem u svarových spojů mědi. [14]

### 3.1.3 Vliv ostatních nečistot

Kromě kyslíku a vodíku mají negativní vliv na technickou měď také další prvky:

- Olovo způsobuje křehkost za vyšších teplot.
- Síra tvoří s mědí eutektikum a působí na svařitelnost mědi podobně jako kyslík (podstatně mírněji).
- Fosfor při obsahu větším než 0,1 % snižuje plastické vlastnosti svarového spoje, způsobuje křehkost a snižuje tepelnou a elektrickou vodivost.
- Bizmut při obsahu vyšším než 0,003 % může způsobit křehkost spoje.
- Selen a telur se v malém množství používají na zlepšení obrobitelnosti mědi, ale také snižují její tažnost. [14]

Vliv chemických nečistot a jejich nežádoucí efekt na jakost svarového spoje z technicky čisté mědi lze snížit následujícími opatřeními:

- „obsah kyslíku v základním a přídatném materiálu musí být limitován (max. 0,02 hm. %),
- zajistit desoxidaci svarové lázně v průběhu svařování desoxidacími prvky (Si, Mn, B),
- svařovat vhodně volenými parametry, které mají za cíl dosažení minimální šířky TOO (výhoda laser cladding),
- zpracovat svarové spoje po svařování tvářením za tepla,
- aplikovat metody, které nevyžadují natavení základního materiálu,
- minimalizovat zdroje vodíku před svařováním,
- použít vhodné plynové nebo tavidlové ochrany svarové lázně.“ [14]

### 3.2 Vliv dalších faktorů na svařitelnost mědi

Na svařitelnost mědi má vliv především její velká tepelná vodivost, která zhoršuje podmínky natavení mědi při svařování, a proto je nutné dodávat do spoje větší množství tepla. Tepelnou vodivost mědi lze snížit legováním. [14]

Jiným faktorem, který má vliv na vnitřní napětí v materiálu, je tepelná roztažnost. S rostoucí hodnotou tepelné roztažnosti jsou i objemové změny výraznější a dochází tak v oblasti svarového spoje k nárůstu nežádoucího vnitřního tahového zbytkového napětí. [14]

Stav materiálu před svařováním je jedním z nejdůležitějších faktorů pro vytvoření kvalitního svarového spoje. Při svařování mědi je nutné počítat i s možnou rekrytalizací svařovaného materiálu v oblasti TOO. [14]

Dalším důležitým faktorem je správná volba přídatného materiálu. Při nevhodné volbě kombinace přídatný materiál – substrát může dojít ke vzniku křehkých struktur, špatnému přilnutí, tvorbě prasklin apod. [14]

Množství přivedeného tepla do svaru a rychlost ochlazování jsou další faktory, které významným způsobem ovlivňují jakost svarového spoje. Při větším množství přivedeného tepla a pomalém ochlazování vzniká ve svarovém spoji hrubozrnná struktura. Naopak při malém množství tepla a rychlém ochlazování vzniká ve spojích napětí, které může vést až ke vzniku a rozvoji trhlin ve svarovém spoji. [14]

### 3.3 Problematika svařování technické mědi

Protože v současné chvíli nejsou k dispozici žádné ucelené publikace, které by pojednávaly o problematice navařování mědi o vysoké čistotě, byly pro popis této problematiky použity publikace řešící problematiku svařování technické mědi (tj. literatura 14, 15, 16), která vykazuje řadu podobností s problematikou laserového navařování čisté mědi.

Při svařování mědi je nutné zohlednit vysokou odrazivost laserového svazku od povrchu měděného materiálu. Hlavní výzvou při svařování mědi je vytvořit spoj s vysokou kvalitou a s minimální tvorbou odstříků. Ke svařování mědi jsou tak často využívány speciální

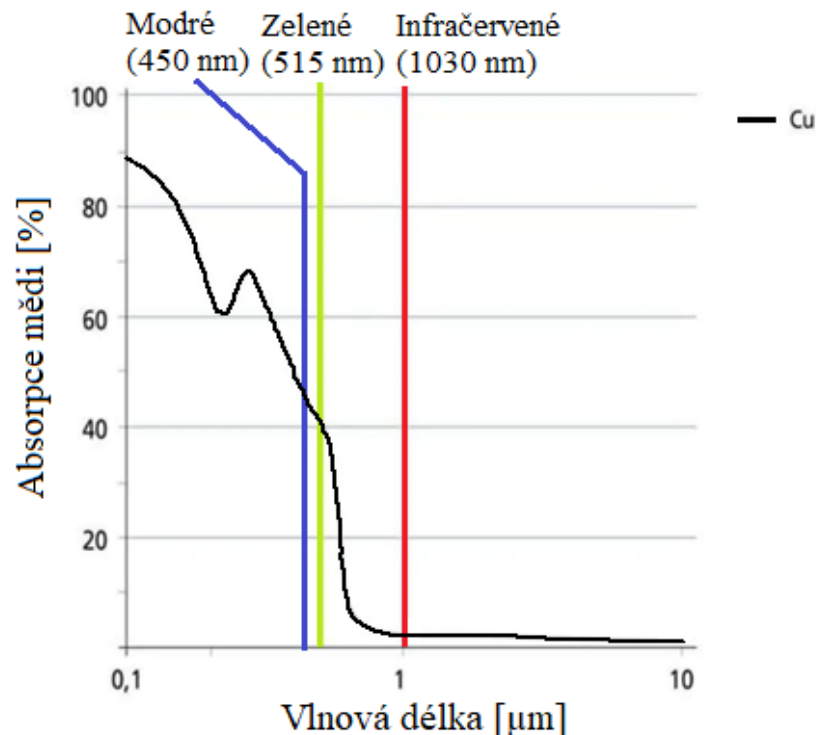
technologie, jako např. laserové svařování pomocí zelenolátkového laseru. Se svařováním technické mědi jsou dále spojené technologické problémy, které vyplývají z fyzikálních vlastností mědi. Mezi hlavní úskalí lze zařadit:

- intenzivní sálání tepla z povrchu vyhřátého svaru do okolí vlivem vysoké tepelné vodivosti,
- výrazný pokles plastických vlastností v intervalu teplot 300 až 650 °C,
- pokles pevnosti a tuhosti při teplotách nad 600 °C,
- vysoká tekutost natavené mědi. [14]

### 3.3.1 Problematika svařování technické mědi laserem

Při svařování čisté mědi laserem je nutné se vypořádat se třemi základními problémy. Jedná se o vysokou odrazivost povrchu (pro většinu průmyslově využívaných typů laserů), vysokou tepelnou vodivost a nestabilitu procesu způsobující rozstřík svarové lázně. Absorpce mědi v závislosti na vlnové délce použitého laserového záření je znázorněna na Obr. 10. Experimentálně bylo zjištěno, že se snižující se vlnovou délkou použitého laserového záření roste odrazivost laserového svazku od povrchu měděného materiálu. Dle současných poznatků a výsledků výzkumů je vhodné pro svařování a navařování mědi využívat lasery emitující záření v oblasti viditelného světla, například zelenolátkové (jejich vlnová délka se pohybuje v oblasti 530 nm). Problémem u těchto laserů je jejich pořizovací cena a omezená dostupnost. Existuje pouze malé množství světových výrobců krátkovlnných laserů, kterými jsou například průmyslové společnosti Tumpf Group GmbH a Laserline GmbH. [14, 16]





Obr. 10: Závislost absorpce mědi na vlnové délce použitého laserového záření [16]

Při použití běžně dostupných laserů s vlnovou délkou v oblasti infračerveného světla ( $\lambda \approx 1000 \text{ nm}$ ) je dosahováno nízké absorptivity laserového záření povrchem měděného materiálu (v pevné fázi). Neporušený povrch mědi absorbuje méně než 4 % infračerveného laserového záření. Je-li však měď dostatečně natavena, dochází k nárůstu absorptivity laserového svazku. „Neporušený povrch mědi absorbuje méně než 4 % infračerveného laserového záření, u měděných par v případě metody svařování klíčovou dírkou (keyhole welding) však tato hodnota dosahuje již více než 60 %.“ [15]).

Další překážka při svařování mědi laserovým svazkem je rozstřík tavné lázně svaru. Ten je způsobený nestabilitou procesu při nízkých svařovacích rychlostech ( $V_{sv} < 5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Rozstřík svarové lázně může následně způsobit vznik pórů či nepravidelný tvar svaru. Tyto problémy lze částečně eliminovat zvýšením rychlosti svařování. Již v rozmezí rychlostí 5 až  $15 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  dosahuje kvalita spojů akceptovatelné úrovně a nad rychlostí  $15 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  jsou svary obvykle bez vad. [15, 16]

Stabilizovat proces laserového svařování lze i jinými způsoby, než je pouze zvýšení svařovací rychlosti. Například firma IPG Photonics s. r. o. vyvinula k tomuto účelu tzv. rozmítací svařovací hlavy – wobble head. Tyto hlavy dynamicky vychylují laserový svazek a tím zvyšují stabilitu procesu. „Od základních svařovacích hlav se rozmítací hlavy odlišují integrovanou skenovací optikou umožňující rychlý dodatečný pohyb laserového svazku ve dvou směrech – vytvořit lze tvar kruhový, symboly „8“ a „∞“, nebo je možno aplikovat jednoduchý lineární pohyb.“ [15]

Při určování velikosti tavné lázně a geometrie nataveného návaru (melt pool) hraje roli nejen řada fyzikálních faktorů související se substrátem a práškovým materiálem, ale také jejich povrchové vlastnosti. Stejně tak jako u svařování mědi laserem je u technologie laserového navařování mědi o vysoké čistotě zcela zásadní absorptivita vlnové délky použitého laserového svazku navařovanou mědí. Absorpce materiálu je také závislá na teplotě a skupenství. Bergström pozoroval lineární zvyšování absorpce v závislosti na zvyšující se teplotě v pevné fázi. Při přechodu mezi pevnou látkou a kapalnou dochází k nárůstu absorpce řádově o 150 až 200 %, poté se absorpce lineárně zvyšuje. [17, 18]

Absorpci laserového záření lze také zvýšit zdrsňením povrchu. Pískované povrchy absorbují více záření než povrchy leštěné. Oxidické vrstvy nacházející se na většině kovových povrchů mohou také pomoci zvýšit absorpci. Práškové materiály absorbují více záření než materiály pevné kvůli vícenásobným odrazům. Teplota částic přídavného prášku výrazně rychleji narůstá při kontaktu částic s laserovým svazkem než v případě pevného přídavného materiálu, kvůli jejich menšímu objemu. Dalším důležitým faktorem při laserovém navařování je tepelná vodivost, která určuje rychlost odvodu tepla z tavné lázně do studenějšího materiál. Měď má při pokojové teplotě vysokou tepelnou vodivost (385 W/mK). Přídavný měděný prášek se běžně přehřívá na teplotu blízkou bodu tání, aby laser využil veškeré své energie k natavení materiálu. [19]

## 4 Druhy laserových zdrojů používaných pro navařování mědi a jejich slitin

Dle dostupných výsledků a publikovaných článků ve vědeckých citačních databázích ScienceDirect, Scopus a Web of Science, se v praxi k navařování mědi nejčastěji používají krátkovlnné lasery s vlnovou délkou v rozmezí 400 až 1100 nm. Krátkovlnné lasery pomalu nahrazují dříve používané plynové CO<sub>2</sub> lasery, které jsou pro navařování mědi nevhodné z důvodu vysoké odrazivosti mědi, při vyšších vlnových délkách laserového záření (Obr. 10). Mezi zástupce krátkovlnných laserů, se kterými lze efektivně navařovat měď, se řadí modrolátkové lasery ( $\lambda \approx 450$  nm), zelenolátkové lasery ( $\lambda \approx 520$  nm) a infračervené lasery ( $\lambda \approx 750$  až 1100 nm).

### 4.1 Zelenolátkové lasery

Se zelenolátkovými lasery je možné navařovat měď nezávisle na vlastnostech povrchu materiálu nejen efektivně, ale i produktivně, a to při zachování vysoké jakosti laserového návaru. Moderní zelenolátkové lasery jsou vhodné pro použití zejména v aplikacích navařování mědi, a to z důvodu minimální tvorby rozstříků (ve srovnání s IR lasery). [16]

Hlavní výhodou u laserů se zelenou vlnovou délkou je zvýšená absorpce mědi ve srovnání s jinými běžně dostupnými lasery, jako jsou například lasery infračervené (Obr. 10).

Hamani a spol. ve své vědecké publikaci [17] nanášeli měď zeleným laserem na substráty ze slitin mědi, hliníku, oceli a titanu. V publikaci jsou uvedeny vazby mezi použitými procesními parametry, jako je výkon laseru, rychlost navařování, rychlost podávání prášku a vlastností materiálu jako je absorpce, povrchové vlastnosti a tepelná vodivost, aby demonstrovali velikost a geometrii tavné lázně v závislosti na výkonu laseru a použitém materiálu. Autoři ve své publikaci uvedli orientační hodnoty spektrální absorpce laserového záření pro různé materiály s vysokou odrazivostí povrchu (měď, hliník, nerezová ocel, titan). Tab. 2 uvádí spektrální absorpci pro různé kovy pro vlnové délky 457 nm, 525 nm a 1085 nm, které jsou blízké vlnovým délkám modrých, zelených a infračervených laserů.

Vlnová délka $\lambda$ [nm]	Spektrální absorpce pro materiál [%]			
	Cu	Al	Nerezová ocel	Ti
457 (modrý laser)	45,2	13,6	43,2	80,8
525 (zelený laser)	40,2	13,5	40,2	78,6
1085 (IR laser)	4,0	5,2	30,1	65,2

Tab. 2: Hodnoty spektrální absorpce pro měď, hliník, nerezovou ocel a titan pro různé vlnové délky  $\lambda$  [16]

Z Tab. 2 je patrný nárůst absorptivity mědi v závislosti na snižující se vlnové délce použitého laserového záření.

Hamani a spol. [17] jako navařovací materiál použili čistou 99,9% měď se zrnitostí prášku 50 až 90  $\mu\text{m}$ . K nanášení prášku byla použita koaxiální tryska s kruhovým otvorem. Jako nosný i ochranný plyn byl použit argon o vysoké čistotě. Laserové navaření jednotlivých experimentálních vzorků bylo realizováno na frekvenčně zdvojeném (frequency-doubled)

diskovém laserovém zdroji s efektivní vlnovou délkou  $\lambda = 515$  nm a maximálním výkonem  $P = 1$  kW na velikost bodu 1,7 mm. K vytvoření návaru byly použity různé procesní podmínky laserového navařování, které se lišily zejména výstupním výkonem laseru ( $P = 200$  W až 1000 W), rychlostí pohybu substrátu  $v_c = 0,1$  až 0,5 m/min a rychlostí podávání prášku  $F = 0,65$  až 3,9 g/min.

K roztavení měděného substrátu bylo potřeba většího výkonu a pomalejší rychlosti navařování, aby došlo k vytvoření souvislého návaru. Začlenění zrn prášku mědi do taveniny bylo velmi rychlé. Pro substráty z hliníku a titanové slitiny nastalo začlenění prášku mědi do taveniny během 0,1 ms, pro slitinu mědi a nerezové oceli pak během 0,2 až 0,3 ms.

Lasery se zelenou vlnovou délkou jsou komerčně vyráběny a distribuovány společnostmi IPG Photonics s. r. o. či Trumpf GmbH. Společnost Trumpf GmbH nabízí řadu zelenolátkových laserů speciálně určených pro navařování mědi. Jedná se o diskové lasery z řady TruDisk pracující v kontinuálním režimu (TrueDisk 1020, TrueDisk 1021 a TruDisk 2021) a pulsní lasery z řady TrueDisk Pulse (221 a 421). [16]

## 4.2 Modrolátkové lasery

Další skupinou laserů, které jsou průmyslově využívány k navařování mědi, jsou lasery s modrou vlnovou délkou. Jejich výhodou je v dobré absorpci modrého spektra záření u mědi podobné, jakou mají lasery zelenolátkové (viz Tab. 2). Měď absorbuje spektrum modrého světla sedmkrát až dvacetkrát lépe ve srovnání s laserovým zářením v infračervené oblasti (viz Obr. 10). V porovnání s lasery se zelenou vlnovou délkou měď absorbuje modré spektrum přibližně o 5 % lépe.

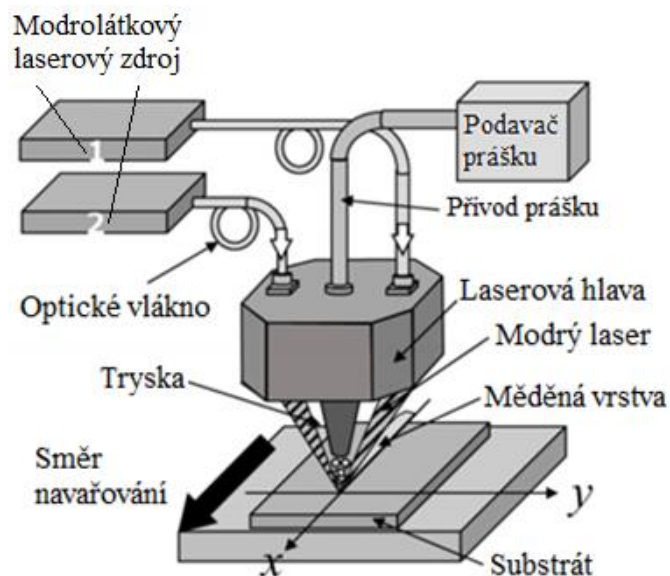
Nejčastěji používaným modrolátkovým laserem v průmyslu a výzkumu je diodový laser s vlnovou délkou 450 nm. R. Higashino a spol. ve své publikaci „*Development of blue diode laser for additive manufacturing*“ [20] (Vývoj laseru s modrou diodou pro aditivní výrobu) vyvinuli několik modrodiodových laserů pro aplikaci laserového nanášení kovu v oblasti aditivní výroby. Laserový systém se skládal ze dvou laserových modulů, fokusovací hlavy, podavače prášku a pohyblivého stolku. Přímý diodový laserový modul s dvojicí vláken byl veden k fokusovací hlavě optickým vláknem, jehož průměr jádra byl 400  $\mu\text{m}$ . Pro případ vytvoření vrstvy z čisté mědi byl výstupní výkon laseru  $P = 80$  W a rychlost nanášení  $v_c = 10$  mm/s. Rychlost dávkování prášku  $F$  se pohybovala od 14 do 80 mg/s. Těmito parametry nanášená měď byla postupně vrstvena na sebe, až došlo k vytvoření „tyče“. Létající prášek nejprve přilnul k povrchu a až poté se roztavil. Výsledná tyč z čisté mědi neobsahovala žádné póry. [20]

V další publikaci „*Blues skies for copper cladding with 450 nm*“ [21] (Modrolátkové lasery s vlnovou délkou 450 nm pro navařování mědi) autoři Simon W. Britten a Sörn Ocylok využili vysoce výkonný modrolátkový laser k navaření čisté mědi ve formě prášku na substrát z oceli a mědi. Výstupní výkon laseru byl zvolen  $P = 1$  kW v kontinuálním režimu. Autoři zde opět uvádějí podobné důvody, které je vedly k volbě laseru s modrou vlnovou délkou, jako je vysoká absorpce modrého záření u mědi, nižší energetická náročnost procesu navařování a celkově vyšší stabilita procesu oproti laserům s vlnovou délkou blízkou infračervené (NIR – near-infrared). Nestabilita procesu je způsobena vysokou odrazivostí mědi a kolísáním rozptylu

teplot během tavení mědi při použití NIR laserů. Výsledné navařené vrstvy NIR laserem jsou charakteristické odchylkou v hloubce závarů a tvorbou pórů. [21]

V publikaci s názvem „*Developments of high power blue diode laser systems for laser metal deposition and welding of pure copper materials*“ [22] (Vývoj vysoce výkonných laserových systémů s modrou diodou pro laserovou depozici kovů a svařování materiálů z čisté mědi) prof. Masahiro Tsukamoto referuje o vývoji vysoce výkonných laserů s modrou diodou pro svařování a aditivní výrobu včetně navařování. Autor dále uvádí, že dosud (publikace vyšla v březnu roku 2020) nebylo provedeno vysoce kvalitní svařování a navařování lasery s vlnovou délkou blízkou infračervené (NIR), jako jsou lasery vláknové, diskové a diodové, a to z důvodu právě nízké absorpční rychlosti čisté mědi, která je pro tyto vlnové délky blízké infračerveným pod 10 %. [22]

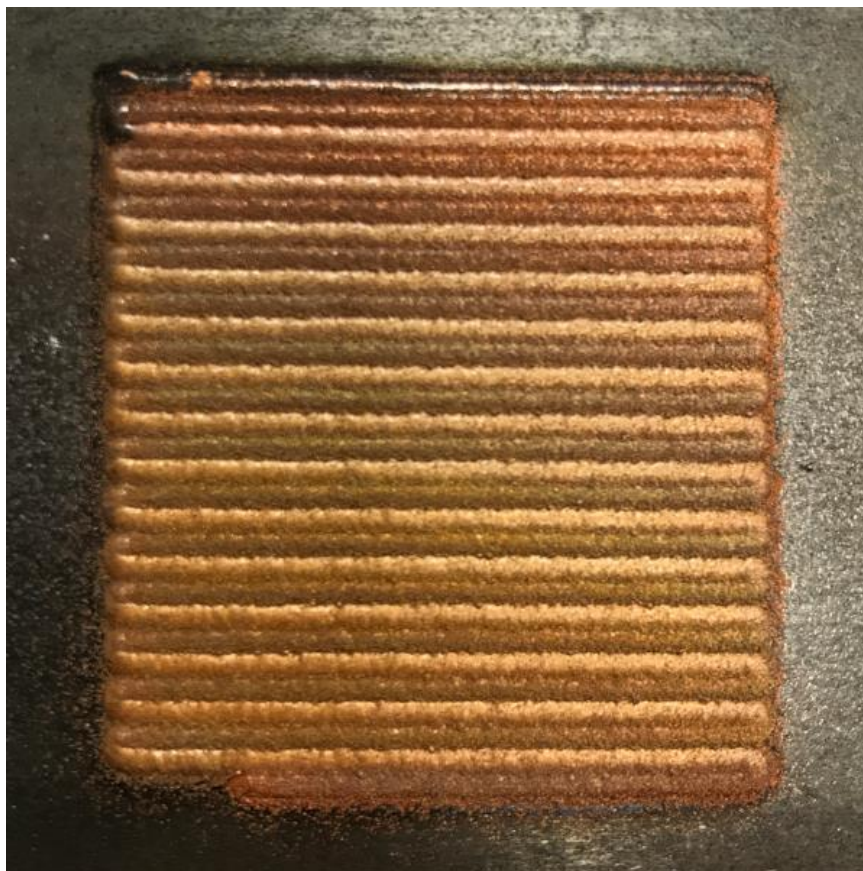
T. Hara a spol. [23] se ve své publikaci věnují dalšímu potenciálnímu zlepšení procesu laserového navařování, konkrétně využití vícepaprskového laserového systému (ang. multi-beam) k navařování čisté mědi. K navaření mědi na substrát, který byl z téhož materiálu, použili dva diodové lasery s vlnovou délkou 450 nm. Schéma zařízení je znázorněné na Obr. 11. Pro experiment zvolili následující parametry: navařovací rychlost  $v_c = 1,5$  mm/s, průtok prášku  $F = 13$  mg/s a intenzitu laseru  $I_e$  od 4,2 do  $6,5 \times 10^4$  W/cm<sup>2</sup>.



Obr. 11: Schéma vícepaprskového diodového laseru k navařování mědi [23]

Cílem jejich experimentu bylo mimo jiné určit i při jaké intenzitě záření dojde ke spojení prášku s návarem. K úplnému spojení měděného prášku se substrátem došlo až při intenzitě  $I_e = 5,9 \times 10^4$  W/cm<sup>2</sup> a vyšší. [23]

Lasery s modrou vlnovou délkou jsou dostupné například u společnosti LaserLine GmbH, která nabízí pro potřeby svařování a navařování moderní diodový laser s vlnovou délkou  $\lambda = 450$  nm a výkonem  $P = 2000$  W. Jejich laser LMD 2000-60 blue dosáhl také obzvláště dobrých výsledků při navařování mědi na substrát z oceli (Obr. 12). [24]



Obr. 12: Laserové navařování mědi na substrát z oceli pomocí diodového laseru s vlnovou délkou 450 nm od společnosti Laserline GmbH [24]

### 4.3 Infračervené lasery

Poslední uvedenou skupinou jsou lasery vyzařující krátkovlnné infračervené záření ( $\lambda = 750$  až  $1100$  nm). Tyto lasery byly již zmiňovány výše v souvislosti s porovnáváním s lasery s modrou a zelenou vlnovou délkou. Jak již bylo v předchozí kapitole uvedeno, tak měď absorbuje infračervené záření až dvacetkrát hůře než záření modré, a proto je požadavek na výkon těchto laserů mnohem vyšší. Díky nestabilitě procesu laserového navařování nedosahují při použití IR laserů návary srovnatelné jakosti (porovnání s lasery modrolátkovými a zelenolátkovými). Přesto se infračervené lasery dále využívají pro aplikaci laserového navařování mědi díky své dostupnosti a nižší pořizovací ceně.

Aktivní prostředí, které infračervené lasery používají může být různorodé. Infračerveného záření využívají často například lasery polovodičové, diskové, vláknové a plynové.

Z publikací, které se věnovaly laserovému navařování mědi stojí za zmínku například „*Phase separation and enhanced wear resistance of Cu88Fe12 immiscible coating prepared by laser cladding*“ [25] (Fázová separace a zvýšení odolnosti proti opotřebení s využitím povlaku Cu88Fe12 připraveného laserovým navařováním). Autoři S. Zhao a spol. použili polovodičový laser s vlnovou délkou 800 nm k navaření prášku Cu88Fe12 (Chemické složení přidavného prášku Cu = 88 hm. % Cu a Fe = 12 hm. %) na substrát z nízkouhlíkové oceli, s cílem zvýšit odolnost proti opotřebení povrchu oceli. Procesní parametry byly optimalizovány



pro vytvoření návaru o tloušťce 2 mm následovně: výkon laseru  $P = 2$  kW, šířka spotu  $S = 8$  mm x 4 mm a rychlost navařování  $v_c = 8$  mm/s. Cílem kolektivu autorů bylo najít optimální poměr chemického složení prášku mezi mědí a železem, aby si výsledný návar zachoval pozitivní vlastnosti mědi, jako je dobrá tepelná a elektrická vodivost, a zároveň měl vyšší tvrdost způsobenou rozptýleným železem. Experimentálně byl nejlépe vyhodnocen prášek se složením 88 % Cu a 12 % Fe. [25]

V další publikaci „*Formation mechanism and improved properties of Cu95Fe5 homogeneous immiscible com-posite coating by the combination of mechanical alloying and laser cladding*“ [26] (Mechanismus tváření a zlepšení vlastností homogenního nemísitelného kompozitní povlaku Cu95Fe5 kombinací mechanického legování a laserového navařování) stejní autoři tentokrát v čele s Xiaoqin Dai navařovali mletý kompozitní prášek s označením Cu95Fe5 na substrát z nízkouhlíkové oceli. Mechanické legování probíhalo tak, že při procesu výroby prášku byly do mlecí nádoby přidány kuličky z nerezové oceli o průměru 5 mm. Laserové navařování experimentálních vzorků bylo provedeno ve dvou fázích. V první fázi byl materiál ve formě pasty o tloušťce 2 mm předem nanesen na povrch substrátu. Ve druhé fázi byl nanesený prášek roztaven pomocí polovodičového laseru s vlnovou délkou 800 nm za vzniku nemísitelného kompozitního návaru Cu95Fe5. Aby se zabránilo oxidaci návaru, byl do laserem taveného místa vháněn také ochranný plyn (čistý Ar). Parametry navařování byly následující: velikost spotu  $S = 8$  mm x 4 mm, výkon laseru  $P = 3$  kW a posuvová rychlost  $v_c = 8$  mm/s. [26]

M. Mueller a spol. se ve své práci s názvem „*Copper Circuit Traces by Laser Cladding with Powder Injection for Additive Manufactured Mechatronic Devices*“ [26] (Navařování měděných obvodů s přídavným materiálem ve formě prášku pro aditivně vyráběná mechatronická zařízení) věnují navařování mědi na polymery. K navařování použili diskový laser od firmy Trumpf (TruDisk 1000) s maximálním výkonem 1000 W a vlnovou délkou 1030 nm. Jejich výsledkem bylo úspěšné navaření mědi na polymer Trogamid. Hlavními výhodami při použití laserového navařování je zde proveditelnost ve vysokých depozičních rychlostech a realizace vodivých stop s velmi dobrými elektrickými vlastnostmi. [27]

## 5 Experimentální program

Na základě informací uvedených v přechozích kapitolách byl experimentální program věnován problematice navařování mědi o vysoké čistotě. Jednotlivé vzorky navařené na substráty z oceli W. Nr. 1.4541 (ČSN 41 7248) byly podrobeny metalografickým analýzám a nedestruktivním zkouškám se zaměřením na popis vad v návarech. S ohledem na charakter navařených vrstev (vysoká povrchová drsnost, tvar a reliéf svarových housenek) byla z nedestruktivních zkoušek vybrána vizuální zkouška pro kontrolu stavu a jakosti povrchu laserem navařených vzorků a radiografická zkouška pro kontrolu se zaměřením na vnitřní vady. Protože v současné chvíli nejsou k dispozici žádné ČSN normy řešící jakékoliv NTD metody laserových návarů, byly pro vyhodnocení návarů použity normy pro tavné svařování, tj. ČSN EN ISO 17637 pro vizuální zkoušení (VT), ČSN EN 444 ČSN EN ISO 17636 pro radiografické zkoušení (RT) a ČSN EN ISO 6520-1 pro klasifikaci geometrických vad kovových materiálů. Experimentální program byl navržen v rámci řešení projektu TAČR TREND „*Vývoj technologie laserového navařování speciálních antikoročních kompozitních systémů na bázi neželezných a přírodních anorganických materiálů na vnitřní stěny trubek pro aplikaci v energetickém a chemickém průmyslu*“ (č. p. TW01010369). Celkem se jednalo o dvě série laserových návarů, které byly připraveny navařením přídavného prášku z mědi o vysoké čistotě na kruhovou trubku substrátu z oceli W. Nr. 1.4541 o průměru 60,3 mm a tloušťce stěny 2,77 mm s využitím dvou laserových zdrojů.

První série návarů byla připravena ve společnosti LaserLine GmbH. K laserovému navařování byl použitý modrolátkový diodový laser laserline LDMblue 1800-60 s vlnovou délkou emitujícího záření  $\lambda = 445$  nm. Série vzorků připravená za pomoci modrolátkového laseru byla v rámci experimentálního programu předložené diplomové práce pro zjednodušení značena písmenem **A** s příslušným číslem vzorku, např. A1 (pro vzorek jedna z modrolátkového laseru). Druhá série návarů byla připravena v průmyslové společnosti LaserTherm s. r. o. Zde byl k navaření použit přímý diodový laser YAG laserline LDF 10000-100 s vlnovou délkou  $\lambda = 940-1020$  nm. Vzorky, které byly navařeny diodovým infračerveným laserem, jsou značeny písmenem **B**.

Cíle experimentální části diplomové práce byly následující:

1. laserem navařené vzorky podrobit nedestruktivnímu testování za účelem stanovení vnitřních a povrchových vad návarů,
2. metalografická analýza laserem navařených vzorků,
3. porovnání jakosti laserem navařených vzorků v závislosti na použitém druhu laseru.

### 5.1 Stroje, přístroje a zařízení používané pro laserové navařování a vyhodnocení vzorků

K realizaci experimentálního programu byly použity stroje, přístroje a zařízení uvedené v Tab. 3, jejíž součástí je také označení stroje, přístroje či zařízení dle výrobce a bližší specifikace použití.



Oblast použití	Stroj, přístroj, zařízení	Označení stroje, přístroje, zařízení dle výrobce	Bližší specifikace – použití stroje přístroje, zařízení
<b>Metalografie</b>	Metalografická pila	Struers Discotom-6	Řezání metalografických vzorků
	Lis metalografických vzorků	Struers CitoPress-10	Lisování metalografických vzorků
	Metalografická bruska/leštička	Struers LaboForce-100	Broušení a leštění metalografických vzorků
<b>Světelná mikroskopie</b>	Světelný optický mikroskop	Carl Zeiss Z1M se softwarem AxioVision pro obrazovou analýzu	Makroskopické a mikroskopické zachycení laserových návarů
<b>Elektronová mikroskopie, měření chemického složení pomocí EDX analýzy</b>	Řádkovací elektronový mikroskop	Philips XL 30 ESEM	Mikroskopické zachycení laserových návarů, EDX analýza chemického složení laserových návarů
<b>Radiografické zkoušení</b>	Kabinový rentgenový systém	Rentgenová lampa Seifert ERESKO MF4	Zdroj RTG záření
		Plošný detektor GE DXR 250c-w	Detekce plošného obrazu
<b>Laserové navařování série vzorků A</b>	Laser	Laserline LMDblue 1800-60	*/ <sup>1</sup>
	Navarovací laserová hlava	3-Jet nozzle (WD=16 mm) by FHG ILT	Systém pro laserové povlakování s tříproudovou tryskou, koaxiální
	Podavač prášku	GTV PF 2/2	Zařízení realizující přenos přidavného prášku ze zásobníku do navařovací hlavy
<b>Laserové navařování série vzorků B</b>	Laser	Laserline YAG LDF 10000-100	*/
	Navarovací laserová hlava	LaserTherm – LT CLAD	Systém pro laserové povlakování, koaxiální
	Podavač prášku	Neuvedeno výrobcem	-

Tab. 3: Stroje, přístroje a zařízení použité v rámci realizace experimentálního programu;

<sup>1</sup> \*bližší specifikace laserových zařízení je uvedena v kapitole 5.2

## 5.2 Specifikace zařízení pro laserové navařování

### 5.2.1 Diodový laser – laserline LDMblue 1800-60

Pro první sérii vzorků byl k laserovému navařování využit diodový laser emitující záření o vlnové délce  $\lambda = 450$  nm. Lasery ze série LMD blue jsou využívány pro práci s vysoce reflektivními kovy, kterým je také v diplomové práci použitý přídavný měděný prášek METCO 55 navařený na substrát z oceli W. Nr. 1.4541 (ČSN 41 7248). Bližší specifikace modrolátkového laserového zdroje laserline LMDblue 1800-60 jsou uvedeny v Tab. 4.

Maximální výstupní výkon	1 800 W
Kvalita svazku	60 mm.mrad
Optické vlákno	600 $\mu$ m [NA 0.2]
Délka optického vlákna	až 20 m
Vlnová délka emitujícího záření	445 nm $\pm$ 20 nm

Tab. 4: Specifikace modrolátkového diodového laseru laserline LMDblue 1800-60 [33]

### 5.2.2 Diodový laser YAG – laserline LDF 10000-100

Druhá série vzorku byla připravena s využitím diodového laseru YAG laserline LDF 10000-100. Jedná se o laser emitující záření v rozmezí vlnové délky  $\lambda = 940$  až  $1020 \pm 10$  nm. Diodové lasery ze série LDF jsou zejména známe svou vysokou flexibilitou. Řadu LDF lze individuálně přizpůsobovat měnícím se požadavkům uživatele jako například:

- Laserový systém je k dispozici s inertním nebo externím chlazením.
- Prostřednictvím interní sítě lze diagnostikovat poruchy v reálném čase a okamžitě je vyřešit, díky zabudované operační jednotce.
- Kvůli mobilní operační jednotce lze lasery ze série LDF flexibilně ovládat i na dálku.
- Připojovací oblasti a rozhraní jsou lehce přístupné, a proto lze snadno vyměňovat jednotlivé komponenty.

Navaření přídavného měděného prášku METCO 55 na substrát z oceli W. Nr. 1.4541 s využitím infračerveného laseru LDF 10000-100 proběhlo v plzeňské průmyslové společnosti LaserTherm spol. s. r. o. Bližší specifikace použitého diodového laseru laserline LDF 10000-100 jsou uvedeny v Tab. 5.

Maximální výstupní výkon	10 750 W
Kvalita svazku	40 mm.mrad
Optické vlákno	600 $\mu$ m [NA 0.2]
Délka optického vlákna	až 100 m
Vlnová délka emitujícího záření	940–1020 nm $\pm$ 20 nm

Tab. 5: Specifikace infračerveného diodového laseru YAG laserline LDF 10000-100 [34]

Laserové zařízení laserline LDF 10000-100, kterým disponuje LaserTherm spol. s. r. o., a které bylo použité při navařování laserových vzorků B1; B2 je zobrazené na Obr. 13.



Obr. 13: Infračervený laser YAG laserline LDF 10000-100

### 5.3 Procesní podmínky a parametry laserového navařování

Použité procesní podmínky a parametry laserového navařování nemohou být v rámci řešení diplomové práce uvedeny všechny, protože se jedná o citlivé údaje dodavatelů experimentálních vzorků – průmyslových společností LaserTherm spol. s r. o. a Laserline GmbH. Výše uvedené společnosti souhlasily pouze se zveřejněním výkonu laseru, který byl použit pro navaření jednotlivých experimentálních vzorků (viz Tab. 6).

Číslo vzorku	Použitý výkon $P$ [W]
A1	1400
A2	1400
A3	1400
A4	625
A5	1040
B1	950
B2	950

Tab. 6: Výstupní výkon použitý při navařování experimentálních vzorků A1; A2; A3; A4; A5; B1; B2

U vzorků A1 až A5 připravených na laserovém zařízení laserline LDMblue 1800-60 byly dále sledovány následující parametry:

- rychlost navařování –  $v_c$  [mm/min],
- překryvu mezi jednotlivými housenkami –  $s$  [mm],
- rychlost podávání prášku –  $F$  [g/min].

Rychlost laserového navařování  $v_c$  byla pro vzorky A2 a A3 totožná. Pro vzorek A1 byla hodnota rychlosti navařování zvýšena o třetinu a pro vzorky A4 a A5 naopak o třetinu snížena.

Překryv mezi jednotlivými laserem navařenými housenkami byl u série vzorků A (připravených za pomoci laseru laserline LDMblue 1800-60) konstantní.

Posledním sledovaným parametrem byla rychlost podávání přídatného měděného prášku  $F$ . Nejvyšší hodnota podávání přídatného prášku byla použita na vzorky A1 a A2. U vzorků A3 došlo ke snížení hodnoty rychlosti podávání prášku o 25 %. Snížení rychlosti podávání prášku o dalších 25 %, oproti vzorku A3, následovalo u vzorků A4 a A5.

Parametry laserového navařování vzorků B1 a B2 dodané výrobcem zahrnovaly pouze údaje o výkonu, který je uvedený v Tab. 6. K navaření vzorků B1 a B2 byly použity totožné procesní podmínky navařování, avšak po navaření vzorku B2 následovalo ještě přetavení povrchu návaru, za účelem zvýšení jakosti stavu povrchu laserového návaru.

## 6 Specifikace použitých materiálů

Pro provedení experimentální části diplomové práce byla jako substrát použita ocel W. Nr. 1.4541, na kterou byl technologií laserového navařování deponován měděný prášek o vysoké čistotě komerčně distribuovaný společností Oerlikon Metco pod označením METCO 55. Bližší specifikace, v rámci experimentálního programu diplomové práce použitých materiálů, včetně jejich charakteristických fyzikálních a mechanických vlastností, jsou zpracovány v níže uvedených podkapitolách 6.1 a 6.2.

### 6.1 Specifikace substrátu pro laserové navařování

Pro provedení experimentálního programu diplomové práce byla jako substrát použita nerezová ocel W. Nr. 1.4541 (EN ISO X6CrNiTi18-10, ČSN 41 7247), na kterou byly navařeny jednotlivé vzorky. Použitá ocel měla polotovar kruhové trubky o průměru 60,3 mm a tloušťce stěny 2,77 mm. Jedná se o žáruvzdornou austenitickou, svařitelnou ocel stabilizovanou titanem a odolnou vůči mezikrystalové korozi. Ocel W. Nr. 1.4541 se používá na součásti energetických a tepelných zařízení. Lze ji využít také v chemickém a potravinářském průmyslu např: u výroby tlakových nádob do teplot 800 °C. Používat ji lze rovněž na vysokotlaká zařízení. Chemické složení oceli W. Nr. 1.4541 je uvedeno v Tab. 7. [35]

Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	P	S	N
Bal.	0,05	0,35	1,15	17,76	9,44	0,56	0,038	0,003	0,014

Tab. 7: Chemické složení oceli W. Nr. 1.4541 deklarované výrobcem; obsah prvků v hm. % [35]

Doporučené teploty pro tepelné zpracování oceli W. Nr. 1.4541 jsou následující:

- Tváření za tepla – 850 až 1150 °C s ochlazováním na vzduchu,
- rozpouštěcí žíhání – 1020 až 1080 °C s ochlazováním v závislosti na tloušťce buď na vzduchu nebo ve vodě. [35]

Mechanické a fyzikální vlastnosti oceli W. Nr. 1.4541 jsou uvedeny v Tab. 8.

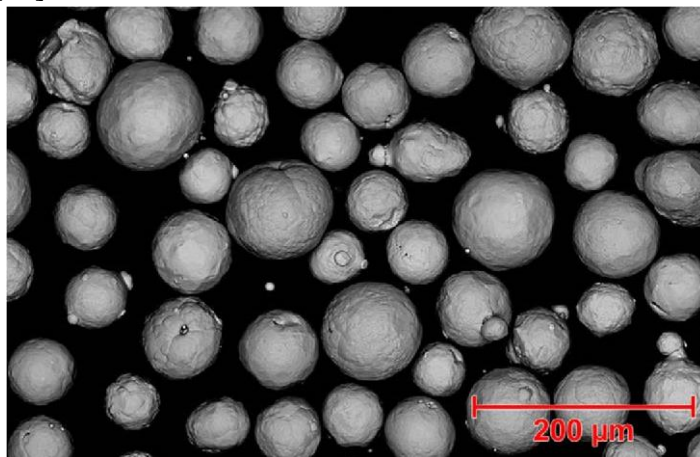
Mechanické vlastnosti	
Tvrdość [HB 30]	max. 215
Nejmenší mez $R_{p0,2}$ [MPa]	190
Pevnosť v tahu $R_m$ [MPa]	500-700
Nejnižší tažnosť $A_5$ [%]	30-40
Modul pružnosti v tahu $E$ [GPa]	200
Fyzikální vlastnosti	
Hustota $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	7,9
Měrná tepelná kapacita $C$ [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	500
Tepelná vodivost $\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	15
Měrný elektrický odpor [ $\Omega$ ·mm <sup>2</sup> ·m <sup>-1</sup> ]	0,73

Tab. 8: Mechanické a fyzikální vlastnosti oceli W. Nr. 1.4541 stanovené při teplotě 20 °C [37]

## 6.2 Specifikace přídavného prášku pro laserové navařování

Jako přídavný prášek pro laserové navařování byl zvolen měděný prášek o vysoké čistotě s označením METCO 55. Tento přídavný prášek je komerčně distribuován společností OERLIKON METCO. METCO 55 je čistý měděný prášek atomizovaný inertním plynem. Tento prášek má vynikající elektrickou i tepelnou vodivost a je vhodný pro aplikaci např. vysokoteplotními žárovými nástřiky pomocí technologie HVOF. Přídavný prášek METCO 55 lze aplikovat na širokou škálu materiálů, avšak primárně na substráty ze slitin mědi. Laserové navařování přídavného prášku METCO 55 nachází své uplatnění zejména v elektrotechnice, kde je vyžadována aplikace povlaků s velmi dobrou elektrickou vodivostí.

Atomizace plynem (tzn. dezintegrace proudu taveniny inertním plynem na malé částice, které se dále ochlazují a tuhnu ve sběrové komoře) zajišťuje vynikající homogenitu vyrobeného prášku a má pozitivní dopad i na následnou plynulost dávkování přídavného prášku z podavače do místa návaru. Sférický tvar částic přídavného prášku METCO 55 je zobrazen na Obr. 14 (Obr. 14). [36]



Obr. 14: Přídavný prášek Metco55; SEM [36]

Základní informace o přídavném prášku Metco55 jsou sumarizovány v Tab. 9.

<b>Klasifikace</b>	čistý kov, měděný základ
<b>Chemický vzorec</b>	Cu 99,0+
<b>Výroba</b>	Fyzikálně-mechanická (atomizace plynem)
<b>Morfologie</b>	sféroidní
<b>Hustota</b>	3,0-4,0 g/cm <sup>3</sup>
<b>Bod tání</b>	1083 °C
<b>Velikost částic</b>	38-90 μm
<b>Zpracování</b>	vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF), atmosférické plazmové nástřiky (APS)

Tab. 9: Základní informace o přídavném prášku METCO 55 deklarované výrobcem [36]

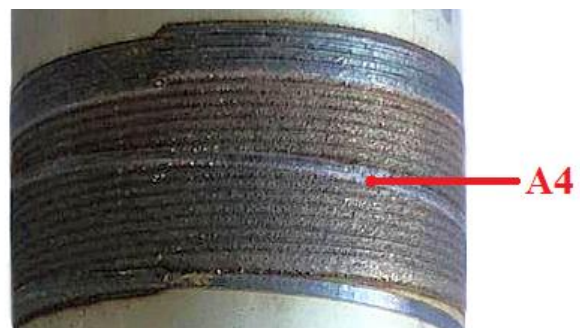


## 7 Metalografické hodnocení laserových návarů z mědi se zaměřením na popis vad v návarech

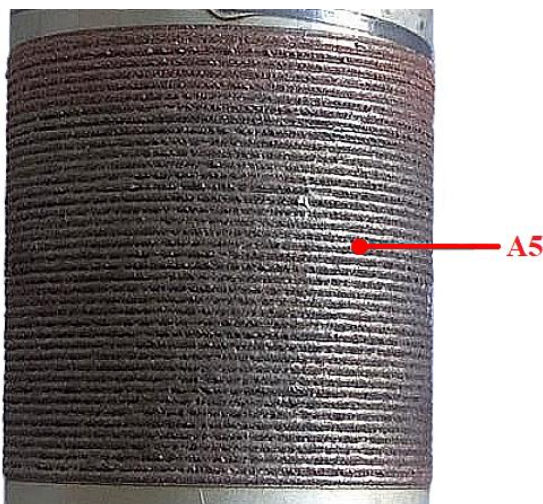
Metalografické hodnocení laserových návarů na bázi mědi bylo provedeno celkem na pěti vzorcích navařených modrolátkovým laserem a dvou vzorcích navařených laserem infračerveným. Vyhotovené metalografické výbrusy byly následně podrobeny mikroskopické analýze na světelném mikroskopu Carl Zeiss Z1M a elektronovém mikroskopu Philips XL 30 ESEM, na kterém byla zároveň provedena i EDX analýza chemických prvků, přítomných ve vybraných oblastech laserových návarů. Navařené vzorky s vyznačenými lokalitami, na kterých bylo metalografické hodnocení realizováno, jsou znázorněny na Obr. 15÷18.



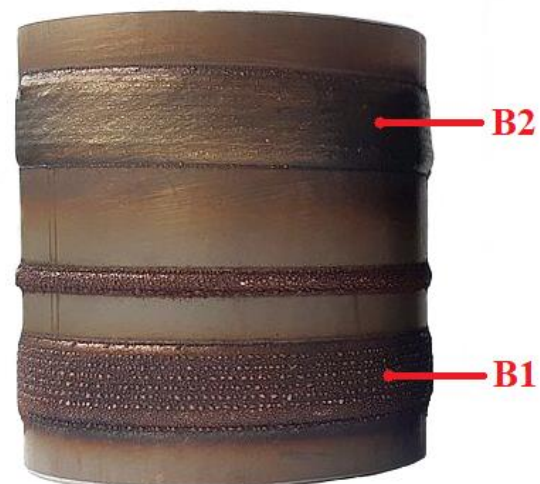
Obr. 15: Vzorky A1; A2; A3 navařené modrolátkovým diodovým laserem LDMblue 1800-60



Obr. 16: Vzorek A4 navařený modrolátkovým diodovým laserem LDMblue 1800-60



Obr. 17: Vzorek A5 navařený modrolátkovým diodovým laserem LDMblue 1800-60, oblast A5



Obr. 18: Vzorky B1 a B2 navařené infračerveným diodovým laserem YAG – laserline LFD 10000-100

## 7.1 Příprava metalografických vzorků

Příprava metalografických vzorků probíhala v laboratořích Katedry materiálu a strojírenské metalurgie Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni. Kruhové trubky o průměru 60,3 mm a tloušťce stěny 2,77 mm, na kterých se nacházely jednotlivé návary, byly nejprve naděleny metalografickou pilou. Výbrusy byly orientovány kolmo na směr navařování, aby byla zviditelněna geometrie návaru kolmá na směr navařování. Následně bylo provedeno zalisování nařezaných vzorů do lisovací hmoty v metalografickém lisu Struers Citopress 10. Broušení a leštění vzorků bylo provedeno na poloautomatické brusce/leštičce Struers LaboForce-100. Na přístroji bylo nutné pouze měnit po ukončení operace příslušný brusný nebo leštící kotouč. Po dokončení leštění na metalografických plátnech následovalo leptání vzorků. Pro naleptání struktury měděného návaru bylo použito leptadlo s označením Robin, které se obecně používá pro zviditelnění struktury mědi a jejích slitin. Chemické složení leptadla je uvedeno v Tab. 10. Aplikace leptadla vedla ke zviditelnění struktury u všech zkoumaných měděných laserových návarů.

Chemické složení leptadla Robin			
H <sub>2</sub> O	FeCl <sub>3</sub>	HCl	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH
5 ml	5 g	25 ml	37 ml

Tab. 10: Chemické složení leptadla Robin

## 7.2 Makroskopické hodnocení laserových návarů

Makroskopické vyhodnocení bylo provedeno na světelném optickém mikroskopu Carl Zeiss Z1M při zvětšení 25x. Hodnoceny byly nejprve návary připravené na modrolátkovém laseru LDMblue 1800-60 (Vzorky A1 až A5) a následně návary zhotovené na infračerveném laseru LDF 10000-100 (Vzorky B1; B2).

### 7.2.1 Makroskopické hodnocení vzorků navařených diodovým laserem laserline LDMblue 1800-60

Na níže uvedených snímcích (Obr. 19÷23) jsou znázorněny makrosnímky deponované diodovým laserem LMD blue 1800-60 při zvětšení 25x.

Z makrostruktury jednotlivých oblastí návarů bylo zjištěno, že většina laserových návarů obsahuje velké množství pórů, s výjimkou vzorku A4 (Obr. 22), na kterém byl makroskopickým hodnocením zjištěn pouze minimální obsah pórů. Nalezené póry na vzorku A4 se nacházejí primárně v počáteční oblasti formování laserového návaru.

Na vzorcích A1 (Obr. 19) a A2 (Obr. 20) byla zaznamenána nadměrná hloubka závaru  $b$  (viz Obr. 3 geometrie návaru). Příliš velká hloubka natavení ocelového substrátu během procesu navařování měla za důsledek nadměrné promíšení mezi laserovým návarem a substrátem, které se u daných vzorků následně projevilo výraznou chemickou a strukturní heterogenitou.

Makrostruktura vzorku A3 zobrazeného na Obr. 21 obsahuje kromě viditelné pórovitosti také nedostatečný překryv mezi laserem navařenými housenkami. Nesprávný překryv byl na



vzorku A3 způsoben nesprávným nastavením technologických podmínek procesu laserového navařování. V tomto případě se jedná o vadu neodstranitelnou. Obrobením povrchu návaru na jeho užitnou výšku by povrch laserového návaru ztratil své funkční vlastnosti (kvůli malé užité výšce návaru h).

Nejvyšší jakosti z pohledu makroskopického hodnocení bylo dosaženo při laserovém navařování u vzorku A4 (porovnávána pouze série vzorků A), na kterém byla indikována přítomnost pouze minimálního množství pórů. Makroskopickou analýzou nebyly u vzorku A4 odhaleny žádné další povrchové ani vnitřní vady.

Naopak nejnižší jakosti z pohledu makroskopického hodnocení bylo dosaženo při laserovém navařování u vzorku A5 (Obr. 23). Na vzorku byl pozorován, vedle vysoké porozity návarů také „záporný“ překryv. Jednotlivé laserem navařené housenky jsou od sebe vzdáleny natolik, že se jejich jednotlivé plochy nepřekrývají, ba naopak jsou od sebe odděleny mezerami. „Záporný“ překryv u vzorku A5 byl vyhodnocen jako vada nepřijatelná v jakémkoli rozsahu. Mezery mezi jednotlivými housenkami vznikly na substrátu nesprávně nastavenou hodnotou překryvu mezi jednotlivými laserem navařenými housenkami.



Obr. 19: Vzorek A1; makrosnímek laserového návaru z modrolátkového laseru; leptáno; zvětšeno 25x



Obr. 20: Vzorek A2; makrosnímek laserového návaru z modrolátkového laseru; leptáno; zvětšeno 25x



Obr. 21: Vzorek A3; makrosnímek laserového návaru z modrolátkového laseru; leptáno; zvětšeno 25x



Obr. 22: Vzorek A4; makrosnímek laserového návaru z modrolátkového laseru; leptáno; zvětšeno 25x



Obr. 23: Vzorek A5; makrosnímek laserového návaru z modrolátkového laseru; leptáno; zvětšeno 25x

### 7.2.2 Makroskopické hodnocení vzorků navařených infračerveným diodovým laserem YAG laserline LDF 10000-100

Makroskopické vyhodnocení vzorků, navařených diodovým laserem YAG laserline LDF 10000-100 emitující laserové záření v oblasti infračerveného spektra ( $\lambda = 940-1020$  nm), bylo hodnoceno celkem na dvou vzorcích označených B1 a B2 (viz Obr. 24, 25).

V porovnání s předchozími vzorky navařenými laserem modrolátkovým, dosahují vzorky připravené pomocí infračerveného laseru viditelně vyšší jakosti. Vzorky B1 a B2 neobsahují z makroskopického pohledu dle normy ČSN EN ISO 5817 (norma pro mezní hodnoty vad svarů) žádné nepřijatelné vady, jejich porozita je minimální a ani na hranici ztavení nebyly nalezeny žádné vady. Pouze u vzorku B1 byly na povrchu samotného návaru identifikovány kapičky mědi, které se vlivem rozstříku tavné lázně přednostně zachytily na povrchu návaru v místě překryvů mezi jednotlivými laserem navařenými housenkami. Na Obr. 24 a 25 je možné rovněž zachytit vysoký stupeň promíšení laserových návarů B1 a B2 se substrátem a nadměrnou velikost hloubky závaru  $b$ .



Obr. 24: Vzorek B1; makrosnímek laserového návaru z IR laseru; leptáno; zvětšeno 25x



Obr. 25: Vzorek B2; makrosnímek laserového návaru z IR laseru; leptáno; zvětšeno 25x



### 7.3 Mikroskopické hodnocení laserových návarů

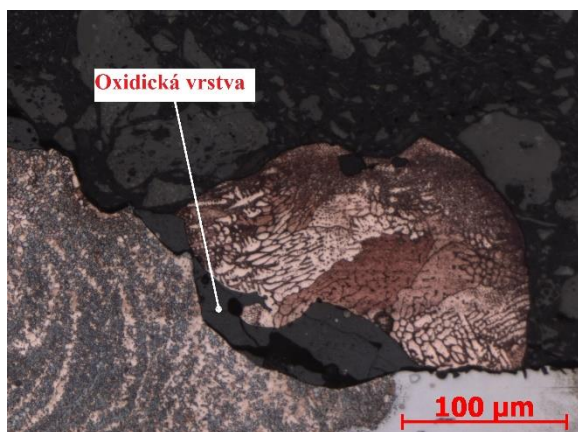
Metalografická analýza mikrostruktury byla provedena na vzorcích A1 až A5 deponovaných laserem modrolátkovým a na vzorcích B1 a B2 deponovaných laserem infračerveným. K zachycení mikrostruktur měděných laserových návarů byly použity dva mikroskopy – světelný optický mikroskop Carl Zeiss Z1M a elektronový mikroskop Philips XL 30 ESEM.

#### 7.3.1 Mikroskopické hodnocení vzorků navařených diodovým laserem laserline LDMblue 1800-60

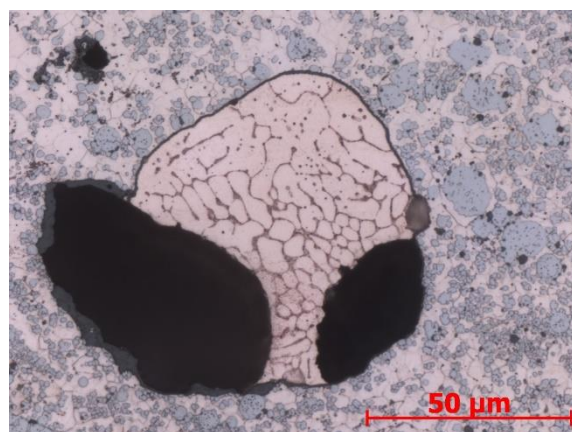
Mikroskopické hodnocení laserových návarů série vzorku A bylo realizováno celkem na pěti odebraných vzorcích A1 až A5. Na uvedených vzorcích byla pozorována mikrostruktura při použitím zvětšení mikroskopu 100x až 500x. Cílem metalografické analýzy bylo vyhodnotit podíl a charakter povrchových a vnitřních vad v návarech a zaměřit se na homogenitu návarů ve všech jeho dílčích oblastech (hranice ztavení laserového návaru a substrátu, středová oblast návaru, povrch laserového návaru).

Na Obr. 26 je znázorněna povrchová oblast laserového návaru vzorku A1. Vedle první laserem navařené housenky se nachází částice mědi, pod kterou byla identifikována oxidická vrstva (vyznačena na Obr. 26). Tato vada byla vyhodnocena z hlediska opravitelnosti jako neodstranitelná, protože kapka mědi by zůstala na povrchu návaru i po dodatečném obrobení.

Na dalším Obr. 27 je zachycena mikrostruktura podpovrchové oblasti vzorku A2, na které byla nalezena částečně natavená kapka mědi přídatného prášku METCO 55, která se do návaru sice začlenila, ale nebyla úplně roztavená, aby se s okolní matricí návaru spojila. Kolem nedokonale natavené částice přídatného prášku se dále nacházejí dva póry (viz Obr. 27).



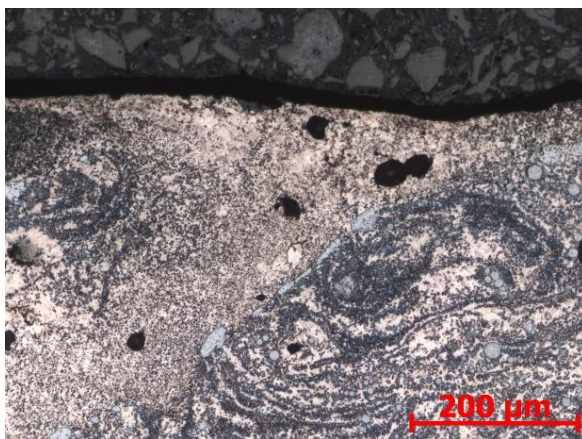
Obr. 26: Vzorek A1; měď na povrchu vzorku; částice mědi; leptáno; zvětšeno 200x



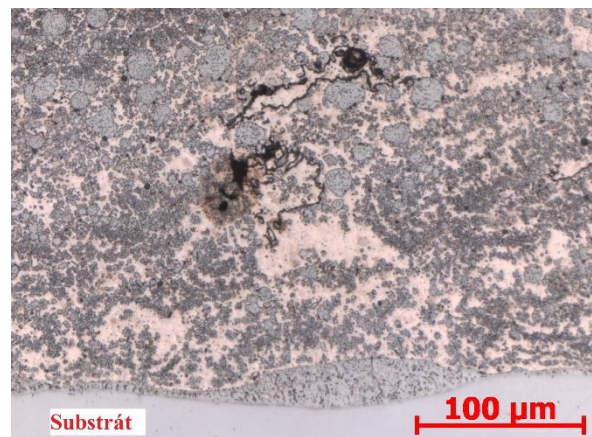
Obr. 27: Vzorek A2; nedokonale natavená částice měděného prášku; leptáno; zvětšeno 500x

Mikrostruktura vzorku A4 je zobrazena na Obr. 28; 29; 30. Na prvním snímku (Obr. 28) je zachycena oblast povrchu laserového návaru, na kterém je jasně patrné Marangoniho proudění v tuhnoucí svarové lázni laserového návaru. Mikrostruktura povrchové oblasti laserového návaru zachycená na Obr. 28 je strukturně a chemicky heterogenní. Ve struktuře v blízkosti povrchu laserového návaru A4 byly rovněž pozorovány póry o průměru 15–35 μm. V další

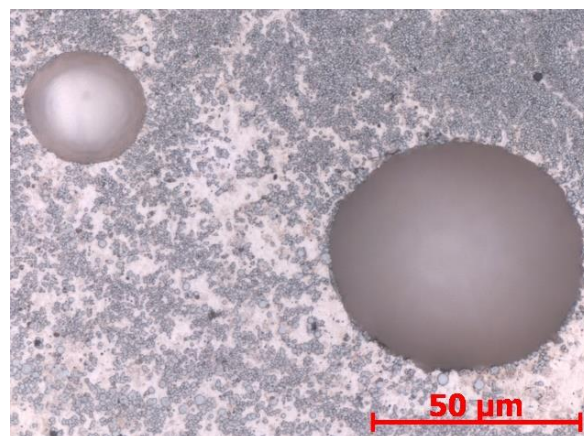
zkoumané oblasti vzorku A4 je na Obr. 29. zobrazena hranice ztavení mezi laserovým návarem a substrátem. V lokalitě nad hranicí ztavení byl zaznamenán výskyt trhlin. Tyto trhliny se šířily přednostně po hranici fázově odlišných oblastí, jejichž výskyt souvisí s vysokou heterogenitou laserového návaru. V ideálním případě by měl být laserový návar homogenní a tvořený čistě pouze přídavným měděným materiálem. Snímek pořízený z oblasti hranice stavení vzorku A4 (Obr. 30) zachycuje dvě kulovité plochy, ve kterých se původně nacházely nenatavené částice mědi. Tyto plochy dosahují šířky o průměru 30–55  $\mu\text{m}$ , což odpovídá velikosti zrn měděného přídavného prášku METCO 55. Tyto nedokonale natavené částice mědi byly z materiálu odstraněny pravděpodobně během metalografického broušení vlivem abrazivní síly, kterou brusný kotouč působil na návar.



Obr. 28: Vzorek A4; povrch laserového návaru; strukturní heterogenita a póry v laserovém návaru; povrch vzorku; leptáno; zvětšeno 100x



Obr. 29: Vzorek A4; heterogenita a trhlina v návaru v oblasti hranice ztavení; leptáno; zvětšeno 200x

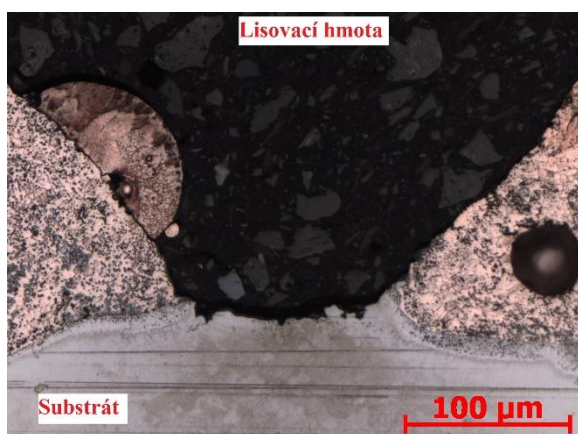


Obr. 30: Vzorek A4; póry vzniklé oddělením nezačleněných částic přídavného prášku METCO 55 do struktury návaru; leptáno; zvětšeno 500x

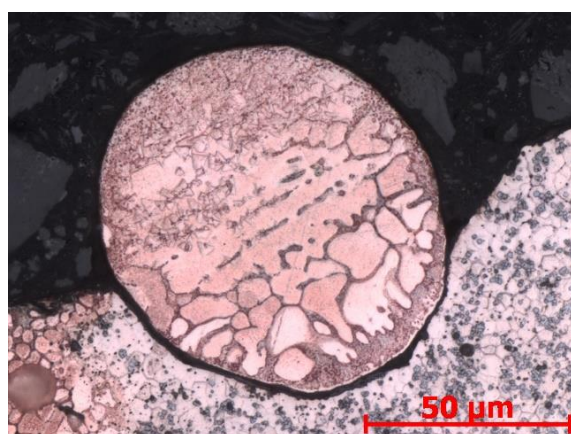


Na Obr. 31 je zachycena mezera mezi laserem navařenými housenkami, nacházející se na vzorku A5. Pro tento vzorek byly nastaveny špatně technologické podmínky procesu navařování (nesprávně zvolená hodnota překryvu), které způsobily mezery vzniklé mezi jednotlivými laserem navařenými housenkami. Výsledný návar v této lokalitě nemá požadované funkční vlastnosti. Takto připravený návar nedokáže ochránit substrát před působením koroze, ba naopak měděný návar, který má vyšší elektronový potenciál, bude působit v korozním procesu jako katoda a ocelový substrát, který má elektronový potenciál nižší než měděný návar, naopak jako anoda, což povede k celkovému urychlení korozních reakcí na ocelovém substrátu.

Na Obr. 32 je na povrchu laserového návaru vzorku A5 zachycena částice měděného přídavného prášku nezačleněná v návaru, pod kterou se vytvořila oxidická vrstva. Nezačlenění měděné částice do laserového návaru bylo způsobeno rozstříkáním tavné lázně.



Obr. 31: Vzorek A5; rozhraní mezi substrátem a měděným návarem; leptáno; zvětšeno 200x

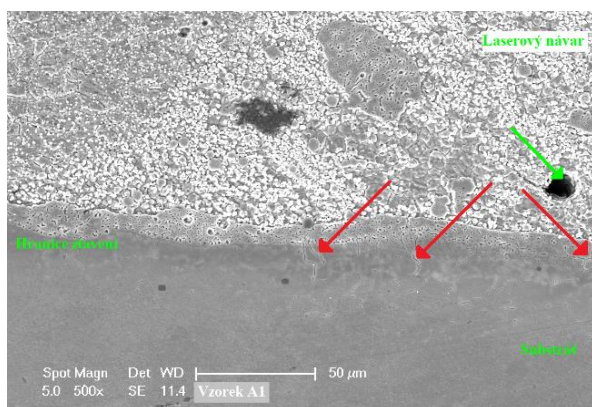


Obr. 32: Vzorek A5; povrchová oblast laserového návaru; leptáno; zvětšeno 500x

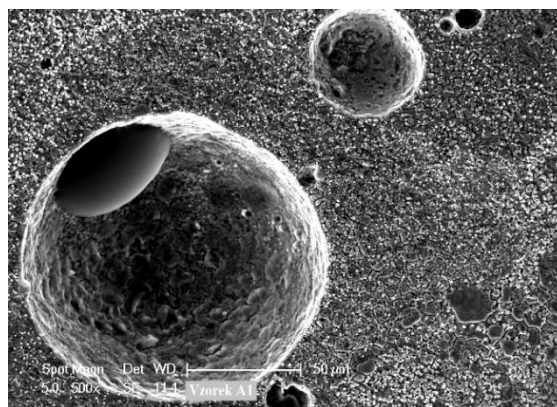
Vzorky A1 až A5 byly dále zkoumány na elektronovém řádkovacím mikroskopu Philips XL 30 ESEM, na kterém byla zároveň provedena EDX analýza chemických prvků.

Na Obr. 33 je zachycena hranice ztavení mezi laserovým návarem a substrátem vzorku A1. Červené šipky v obrázku odkazují na mikrotrhliny, které se vytvořily v oblasti ztavení mezi substrátem a laserovým návarem. Nad hranicí ztavení byl ve struktuře laserového návaru identifikován pór (zeleně vyznačen na Obr. 33).

Na dalším snímku (Obr. 34) je zachycena středová oblast vzorku A1, ve které se nacházejí dvě částice mědi. Tyto částice byly nedokonale nataveny laserovým paprskem, a tudíž se nezúčastnily formování tavné lázně.



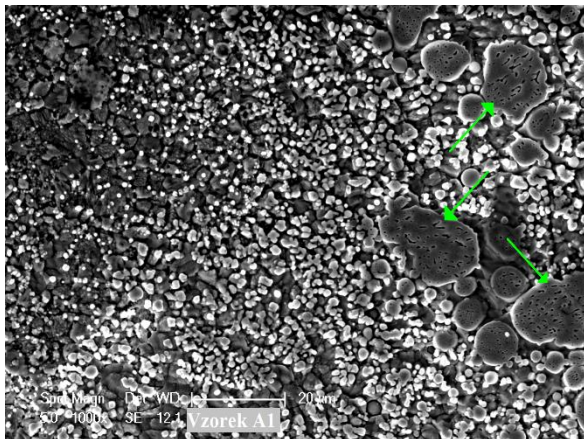
Obr. 33: Vzorek A1; hranice ztavení mezi substrátem a laserovým návarem; červené šipky označují mikrotvrhliny na hranici ztavení; zelená šipka směřuje na pór ve struktuře laserového návaru leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x



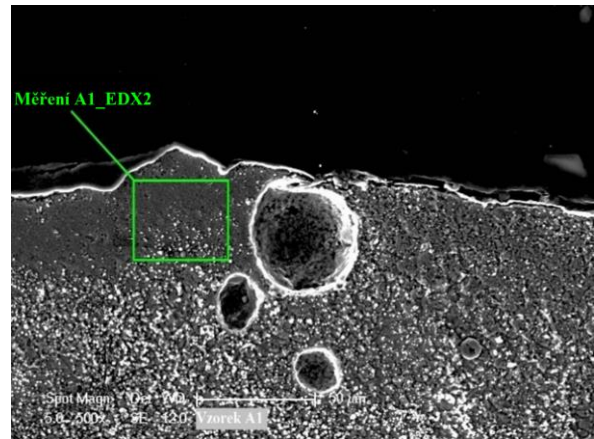
Obr. 34: Vzorek A1; částice přídavného prášku METCO 55; středová oblast laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x

Oblast středu návaru vzorku A1 byla provedena na Obr. 35. Z celé plochy snímku byla stanovena analýza chemického složení EDX (Obr. 37), ze které vyplynulo, že měřená oblast, vlivem přítomnosti částic (zeleně vyznačeny na Obr. 35) bohatých na prvky ocelového substrátu (Fe, Cr, Ni), obsahuje pouze 66,5 hm. % Cu. Energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně hmotnostního podílu detekovaných chemických prvků je zobrazeno na Obr. 37 (A1\_EDX1).

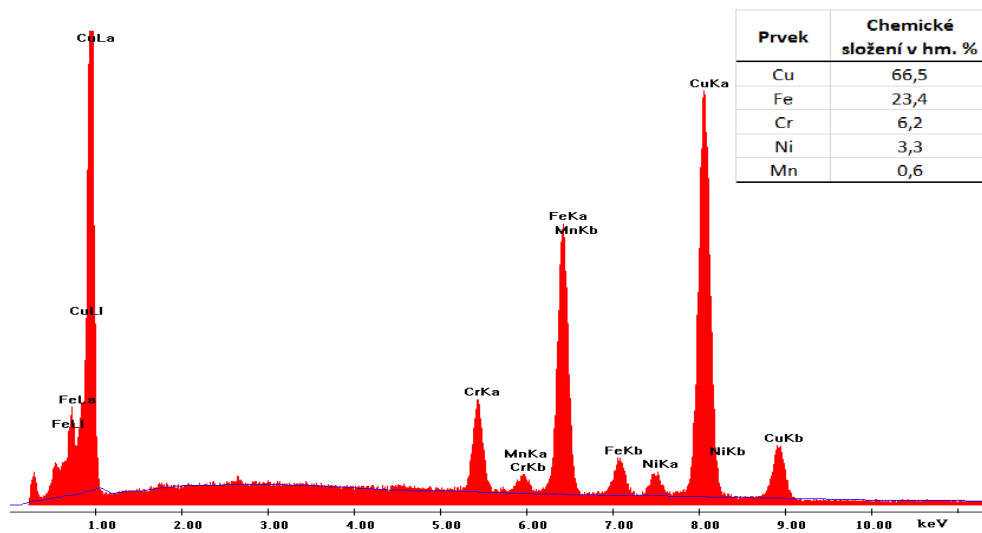
Povrchová oblast laserového návaru vzorku A1 je zachycena na Obr. 36. V oblasti zachycené na Obr. 36 se nacházejí, stejně jako na Obr. 34, nedokonale natavené částice měděného prášku. Na Obr. 36 je dále vyznačena oblast, ze které bylo naměřeno chemické složení prvků za účelem stanovení koncentrace chemických prvků v podpovrchové oblasti laserového návaru vzorku A1. Z analýzy chemického složení A1\_EDX2 (Obr. 38) je viditelné, že měřená povrchová oblast obsahuje více mědi (79,2 hm. %) než střed laserového návaru. Dále byla EDX analýzou povrchové oblasti odhalena přítomnost 5,1 % kyslíku, který indikuje, že povrchová oblast laserového návaru je částečně zoxidovaná.



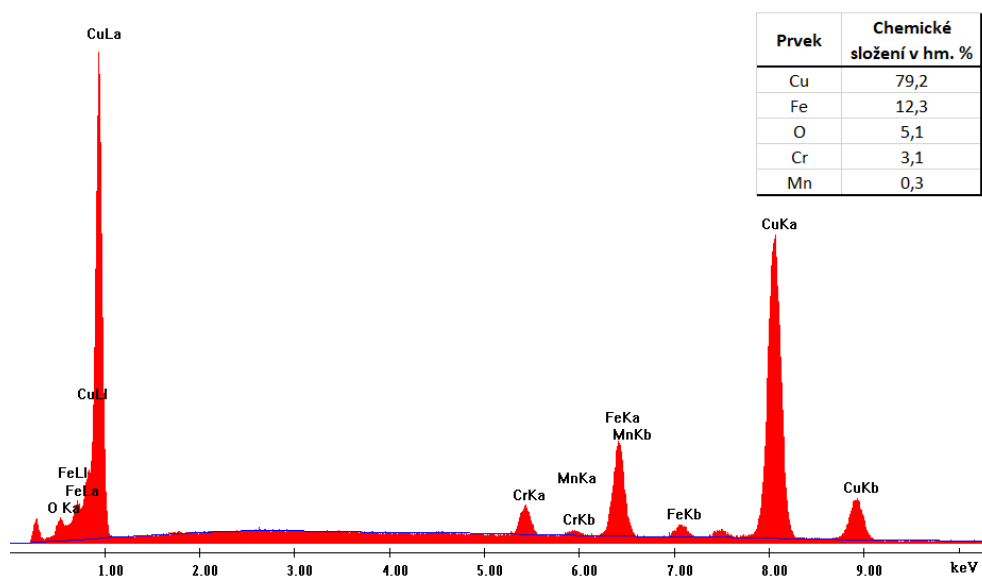
Obr. 35: Vzorek A1; středová oblast laserového návaru; leptáno; zelené šipky odkazují na fázové oblasti s dominantním obsahem železa; SEM; SE; zvětšeno 1000x



Obr. 36: Vzorek A1; povrchová oblast laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x



Obr. 37: Vzorek A1; měření A1\_EDX1; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; středová oblast laserového návaru



Obr. 38: Vzorek A1; měření A1\_EDX2; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru

Na Obr. 39; 40; 41 jsou zachyceny snímky z řádkovacího elektronového mikroskopu vzorku A2.

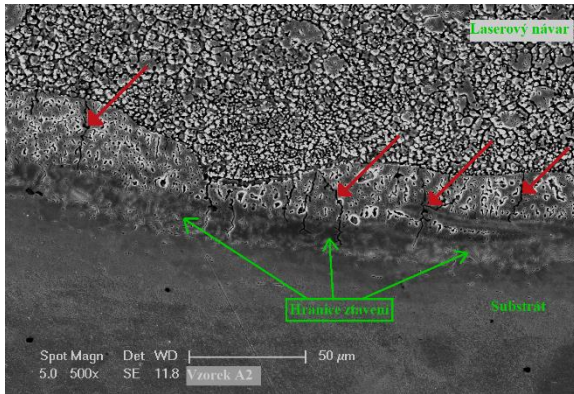
První Obr. 39 zobrazuje hranici ztavení mezi substrátem a laserovým návarem. Na hranici ztavení se stejně jako na vzorku A1 vyskytují mikrotrhliny, směřující kolmo na hranici ztavení (mikrotrhliny jsou v Obr. 39 vyznačeny červenými šipkami).

Snímek středové oblasti laserového návaru vzorku A2 je vyobrazený na Obr. 40. Z celé plochy snímku byla zhotovena EDX analýza chemického složení prvků (měření A2\_EDX1 Obr. 42). EDX analýzou chemického složení prvků byl ve struktuře laserového návaru v měřené oblasti A2\_EDX1 identifikovaný kyslík, jehož koncentrace byla 6,5 hm. %. Lze tedy predikovat oxidický charakter částic, vyznačených na Obr. 40 červenými šipkami. Obsah mědi v naměřené struktuře dosáhl hodnoty Cu = 46,2 hm. %, tudíž v Obr. 40 zeleně označené oblasti budou formovány fázovými oblastmi s chemickým složením podobným substrátu a okolí kolem nich bude naopak tvořit matrice laserového návaru bohatá na Cu. Obecně by materiál substrátu z oceli W. Nr. 1.4541 a přídatný prášek z čisté mědi měly mít jen minimální rozpustnost, a tudíž spolu nebudou tvořit tuhý roztok.

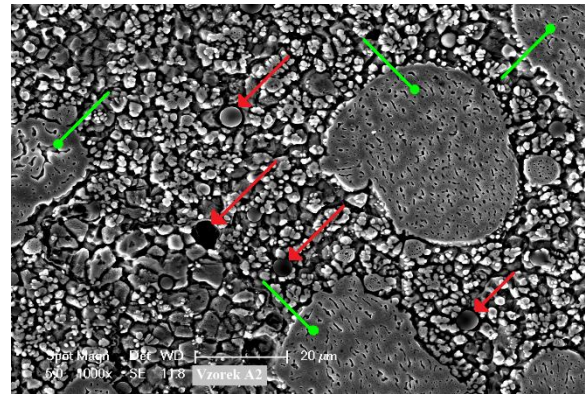
Na Obr. 41, který byl pořízen z povrchové oblasti laserového návaru, bylo stanoveno chemické složení prvků z celé plochy (měření A2\_EDX2, Obr. 43). Chemické složení prvků na povrchu laserového návaru, jehož energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně hmotnostního podílu naměřených chemických prvků v dané lokalitě, prokázalo obdobné výsledky měření jako měření A2\_EDX1. Oproti měření A2\_EDX1 obsahuje mikrostruktura povrchové oblasti vzorku A2 (měření A2\_EDX2) 49,0 hm. % Cu, obsah kyslíku vzrostl z 6,5 hm. % na 7,4 hm. % a obsah železa naopak klesl z 32,9 hm. % na 30,2 hm. %. Na povrchu laserového návaru se vyskytují podobné shluky fázově odlišných oblastí od základní měděné matrice jako ve středové oblasti vzorku, které budou bohaté na prvky substrátu. Opět se jedná o chemické prvky, které se na povrch laserového návaru dostaly vlivem roztavení substrátu



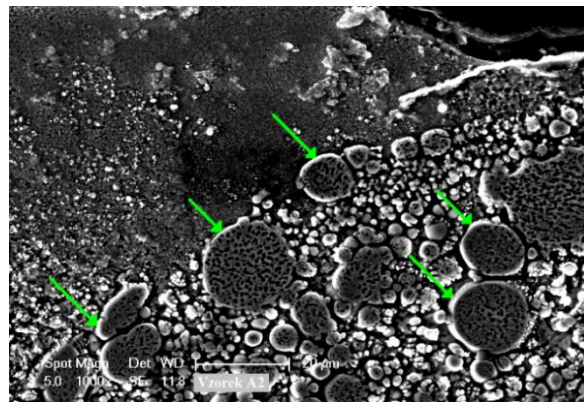
a následným promíšením s tavnou lázní měděného laserového návaru. Zelenou šipkou jsou v Obr. 41 označené oxidické obálky, které se utvořily kolem výše popisovaných fázově, od okolní základní matrice laserového návaru, odlišných oblastí.



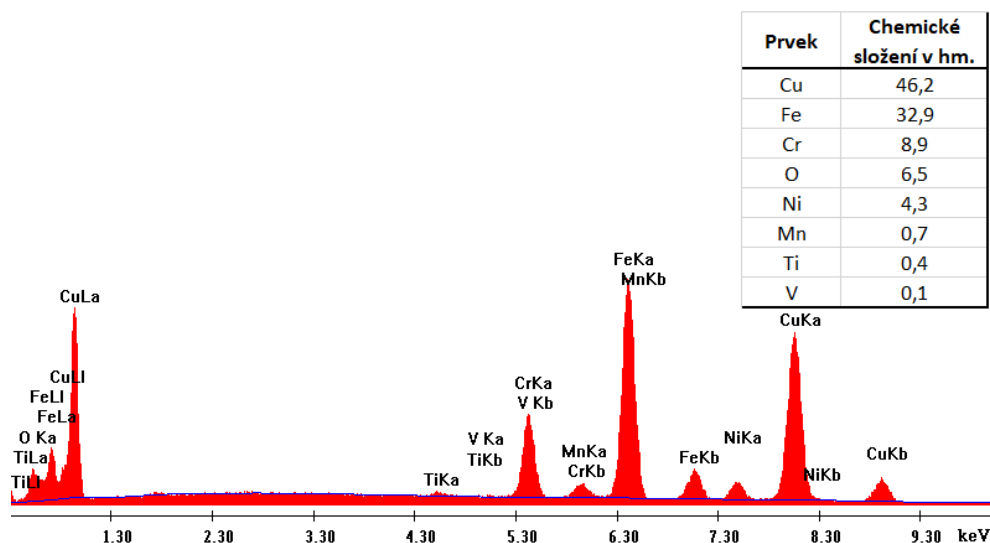
Obr. 39: Vzorek A2; zeleně vyznačená hranice ztavení mezi substrátem a laserovým návarem; červené šipky označují mikrotrhliny na hranici ztavení; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x



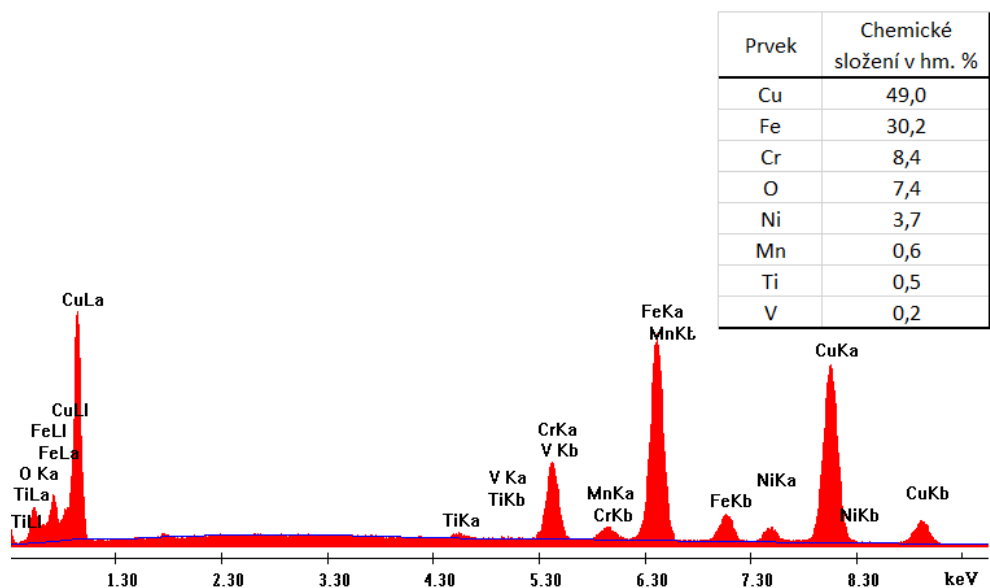
Obr. 40: Vzorek A2; středová oblast laserového návaru; zelené šipky odkazují na fázové oblasti s dominantním obsahem železa; červené šipky označují oxidické částice; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 1000x



Obr. 41: Vzorek A2; povrch laserového návaru; zelené šipky poukazuje na fázově odlišnou oblast od okolní základní matrice; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 1000x



Obr. 42: Vzorek A2; měření A2\_EDX1; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; středová oblast laserového návaru



Obr. 43: Vzorek A2; měření A2\_EDX2; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru

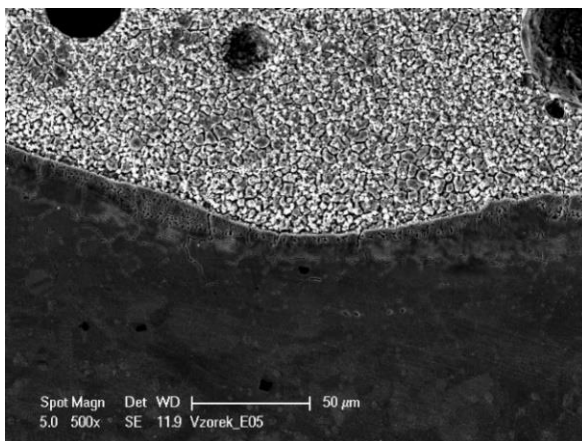
Snímky, zachycující oblasti laserového návaru vzorku A3, jsou zachyceny na Obr. 44; 45; 46.

Na Obr. 44 je zobrazena hranice ztavení mezi substrátem a laserovým náwarem, na které byla detekována jemná síť mikrotrhlin orientovaných kolmo k hranici ztavení.

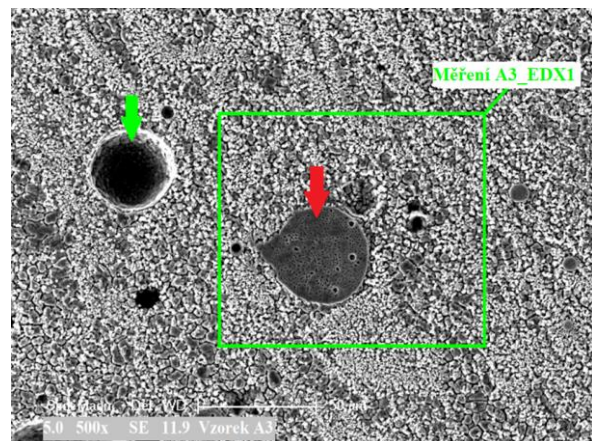
Středová oblast laserového návaru vzorku A3 je zobrazena na Obr. 45. V mikrostruktuře byla zachycena nedokonale natavená částice mědi (označena zelenou šipkou) a oblast bohatá na prvky substrátu (označena šipkou červenou). Kolem těchto oblastí se nachází jemnozrnná struktura, která je tvořena převážně mědí. V oblasti vyznačené zeleným obdélníkem na Obr. 45

byla provedena EDX analýza chemického složení (měření A3\_EDX1), která je společně s tabulkou chemického zastoupení naměřených prvků znázorněna na Obr. 47. V měřené oblasti byl kromě mědi, které bylo v dané ve lokalitě středu laserového návaru naměřeno 66,4 hm. %, také hojně zastoupený obsah železa (23,9 hm. %).

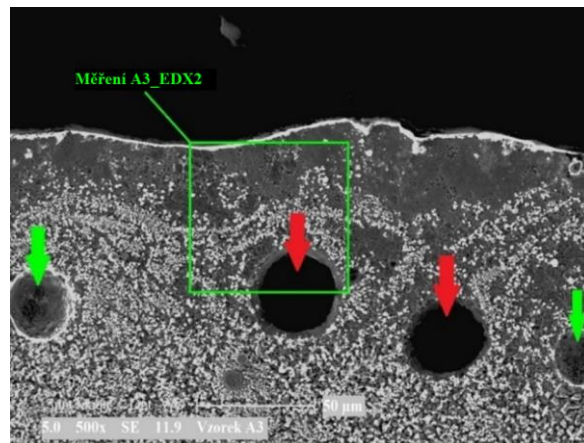
Snímek z povrchu laserového návaru vzorku A3 je zachycen na Obr. 46. Ve struktuře se opět vykytují, zelenou šipkou vyznačené, nedokonale natavené částice měděného prášku METCO 55. Ve struktuře byla dále objevena přítomnost pórů, které jsou na Obr. 46 označené červenou šipkou. V povrchové oblasti laserového návaru byla provedena EDX analýza chemického složení (viz zelený obdélník na Obr. 46). Výsledná naměřená koncentrace chemických prvků v dané lokalitě, včetně energetického spektra EDX analýzy, je uvedena na Obr. 48. V měřené oblasti povrchu laserového návaru bylo detekováno oproti středové oblasti (měření A3\_EDX1) více mědi (o 3,3 hm. %), a navíc byl v měřené povrchové struktuře (měření A3\_EDX2) zaznamenán výskyt kyslíku, který bude pravděpodobně obsažený v povrchové vrstvě ve formě oxidů nebo jím může být také ohraničena obálka vyznačených pórů a částic.



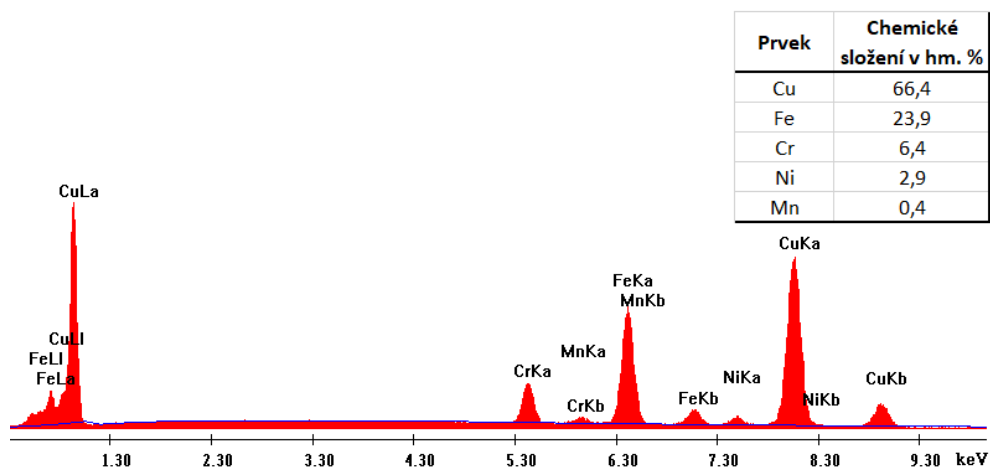
Obr. 44: Vzorek A3; hranice ztavení mezi substrátem a laserovým návarem; síť mikrotrhlin na hranici ztavení; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x



Obr. 45: Vzorek A3; středová oblast laserového návaru; leptáno; zelená šipka poukazuje na nedokonale natavenou částici přídavného materiálu; červená šipka poukazuje na fázově odlišnou oblast od okolní základní matrice; SEM; SE; zvětšeno 500x

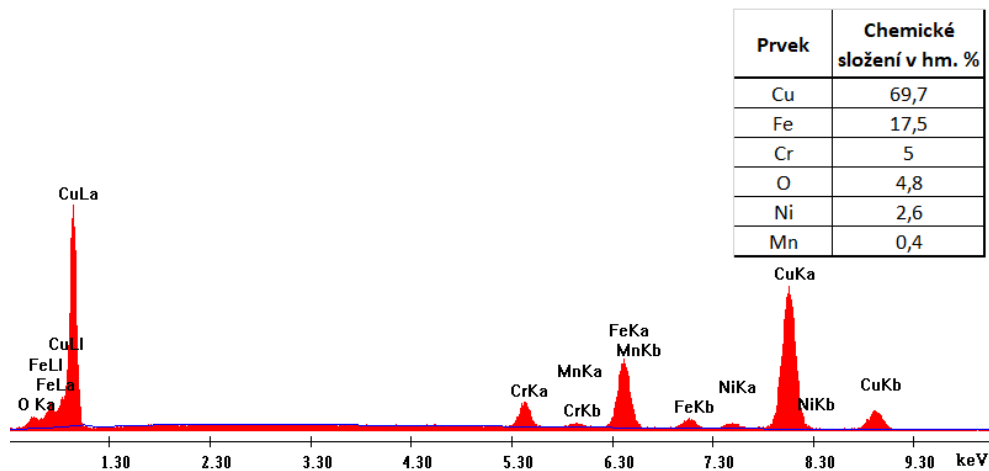


Obr. 46: Vzorek A3; povrchová oblast laserového návaru; zelená šipka poukazuje na nedokonale natavenou částici přídavného materiálu; červená šipka označuje póry; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x



Obr. 47: Vzorek A3; měření A3\_EDX1; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; středová oblast laserového návaru





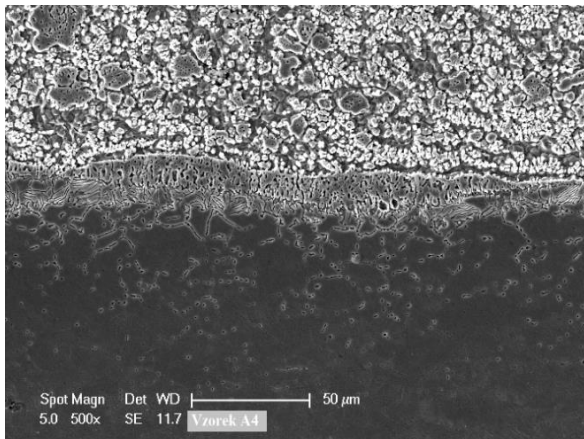
Obr. 48: Vzorek A3; měření\_EDX2; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru

Mikrostruktura vzorku A4 je zachycena na Obr. 49 až 51. Z Obr. 50 a 51 byly z celé plochy snímků zhotoveny EDX analýzy chemického složení (viz měření A4\_EDX1 a A4\_EDX2).

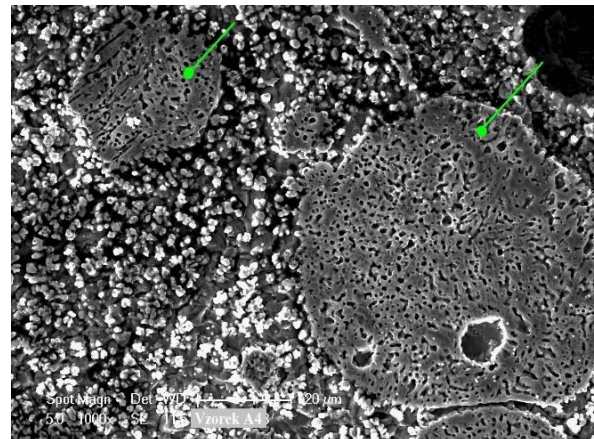
Na Obr. 49 je zdokumentována struktura v oblasti hranice ztavení laserového návaru a substrátu. Ve struktuře se stejně jako na předchozím vzorku A3 nachází síť mikrotrhlín v oblasti hranice ztavení mezi substrátem a laserovým návarem.

Středová oblast laserového návaru vzorku A4 je zachycena na Obr. 50. Na snímku jsou zeleně vyznačeny fázově odlišné oblasti lišící se svým charakterem od základní měděné matrice laserového návaru. Přítomnost fázově odlišné oblasti byla potvrzena EDX analýzou chemického složení (měření A4\_EDX1 na Obr. 52), ve které bylo detekováno pouze 42,1 hm. % Cu a zbytek měřené oblasti byl tvořen prvky Fe, Cr, Ni, Mn, tedy stejnými prvky, jaké jsou obsaženy v substrátu z oceli W. Nr. 1.4541.

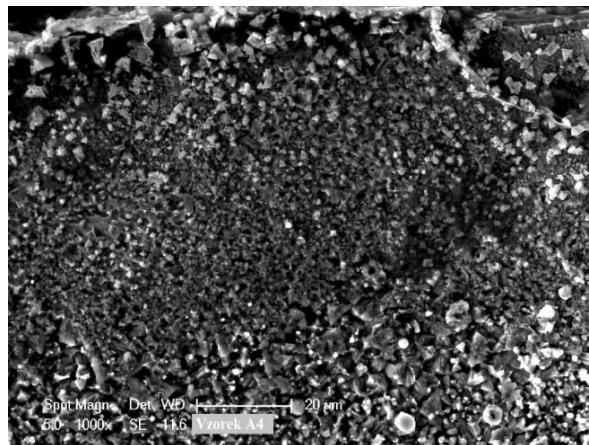
Na snímku (Obr. 51) je zdokumentována oblast povrchu laserového návaru. Pro celou zachycenou oblast byla charakteristická přítomnost vysokého obsahu mědi, která byla ve struktuře uspořádána ve formě jemných zrn. Přítomnost vysokého obsahu mědi také potvrdila EDX analýza chemického složení (měření A4\_EDX2, Obr. 53), kterou byla naměřena koncentrace mědi 85,1 hm. % z celkové měřené plochy Obr. 51. Zbytek struktury byl formován prvky substrátu, které se vlivem natavení substrátu a následným prouděním dostaly až do povrchové oblasti vzorku A4.



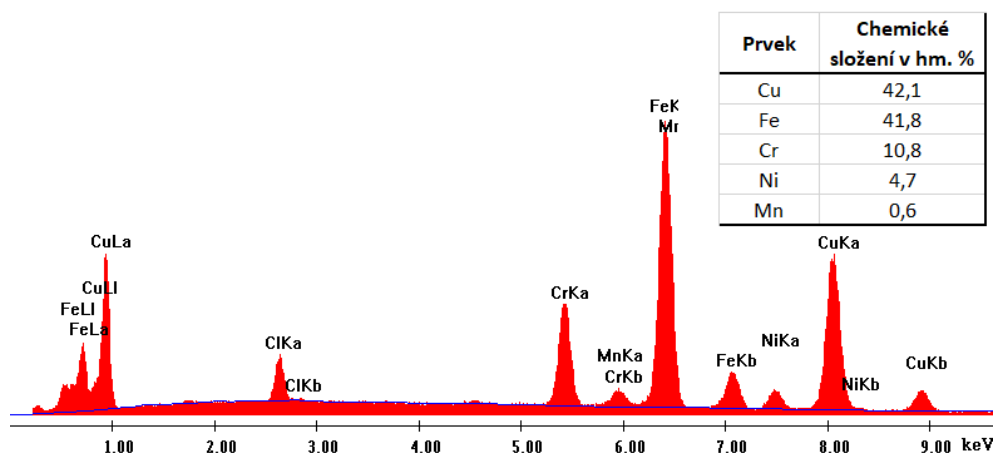
Obr. 49: Vzorek A4; hranice ztavení mezi substrátem a laserovým návarem; síť mikrotrhlin šířících se kolmo na hranici ztavení; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x



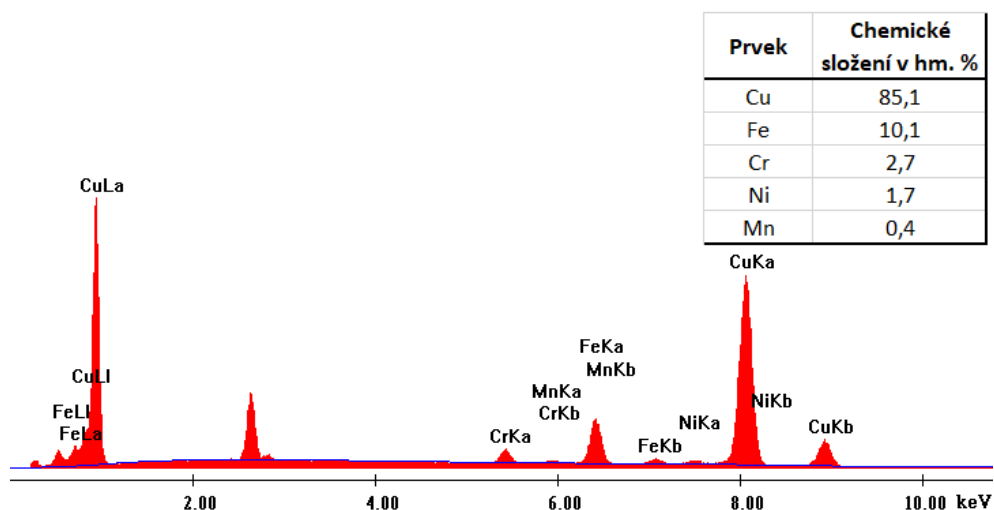
Obr. 50: Vzorek A4; středová oblast laserového návaru; zeleně jsou vyznačeny fázově odlišné oblasti od okolní základní matrice; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x



Obr. 51: Vzorek A4; povrch laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x



Obr. 52: Vzorek A4; měření A4\_EDX1; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; středová oblast laserového návaru



Obr. 53: Vzorek A4; měření A4\_EDX2; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru

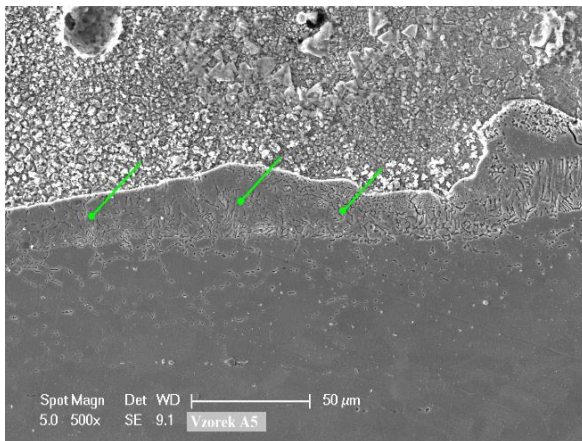
Snímky posledního vzorku A5 z elektronového řádkovací mikroskopu, který byl navařený modrolátkovým laserem, jsou zachyceny na Obr. 54; 55; 56.

Na Obr. 54 je zobrazená oblast hranice ztavení mezi substrátem a laserovým návarem. Na hranici ztavení (v Obr. 54 vyznačena zeleně) byly detekovány stejné vady jako v předchozích vzorcích A1 až A4, v podobě sítě mikrotrhlin. Nad hranicí ztavení jsou v mikrostruktuře viditelná jednotlivá jemná zrna mědi.

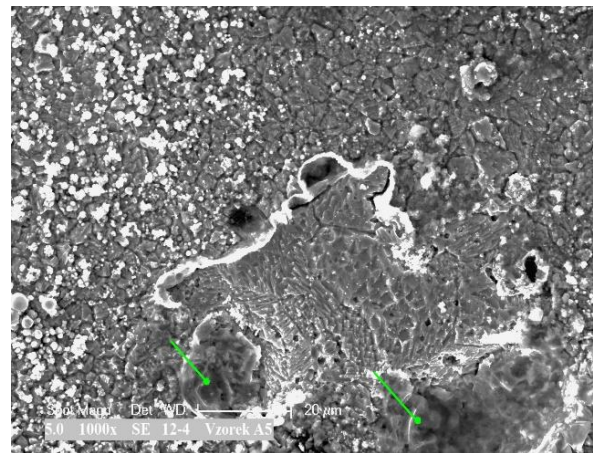
Středová oblast laserového návaru je zdokumentována na Obr. 55, z jehož celé plochy byla změřena EDX chemického složení (Výsledné energetické spektrum včetně hmotnostního podílu naměřených chemických prvků je uvedena na Obr. 57). Na Obr. 55 se vyskytují, nedokonale natavené částice mědi, které byly pro přehlednost vyznačeny zelenými šipkami. EDX analýza chemického složení prokázala v zachycené oblasti středu laserového návaru

přítomnost 76,2 hm. % Cu a dále byly ve struktuře identifikovány prvky Fe, Cr, Ni, Mn, které se do návaru dostaly v důsledku promísení s ocelovým substrátem.

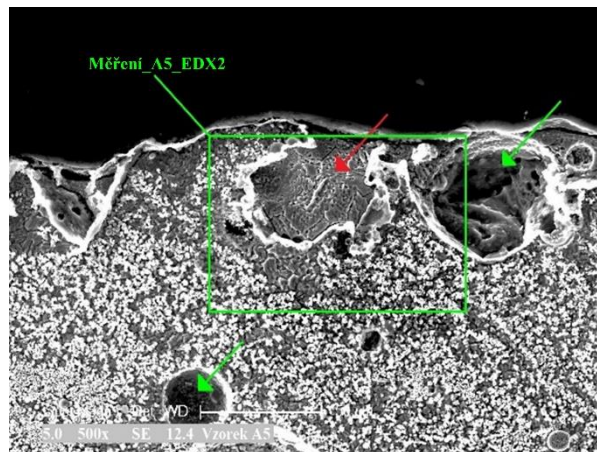
Povrchová oblast vzorku A5 je zobrazena na Obr. 56. Ve struktuře povrchu se nacházejí, zelenou šipkou vyznačené, nedokonale natavené částice přídavného prášku METCO 55. Červenou šipkou je v Obr. 56 označena fázově odlišná oblast na bázi železa. EDX analýzou chemického složení povrchu vzorku (Měření A5\_EDX2 Obr. 58) bylo zjištěno, že v oblasti vyznačené na Obr. 56 se nachází 71,1 hm. % Cu a dále pak 18,8 hm. % Fe.



Obr. 54: Vzorek A5; hranice ztavení mezi substrátem a laserovým návarem; leptáno; síť mikrotrhlin šířících se kolmo na hranici ztavení; SEM; SE; zvětšeno 500x

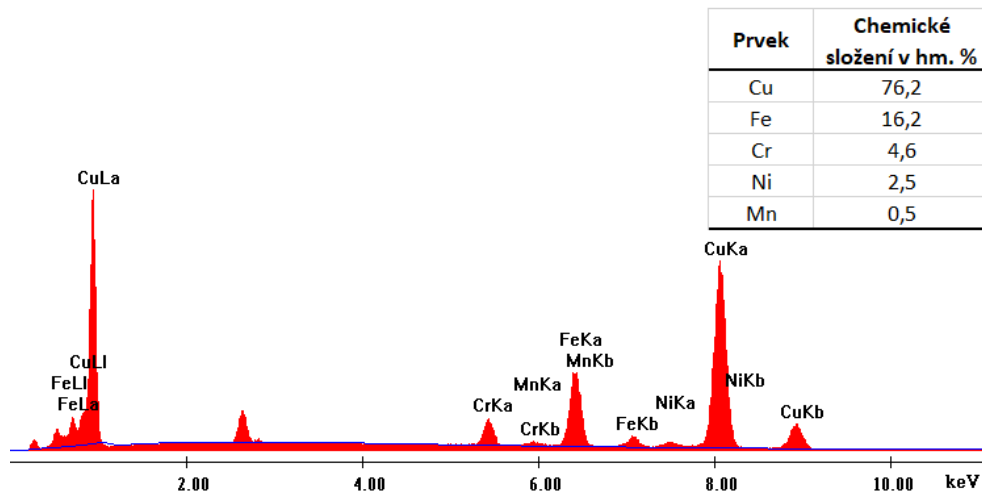


Obr. 55: Vzorek A5; středová oblast laserového návaru; zeleně jsou vyznačeny nedokonale natavené částice přídavného měděného prášku METCO 55; SEM; SE; zvětšeno 1000x

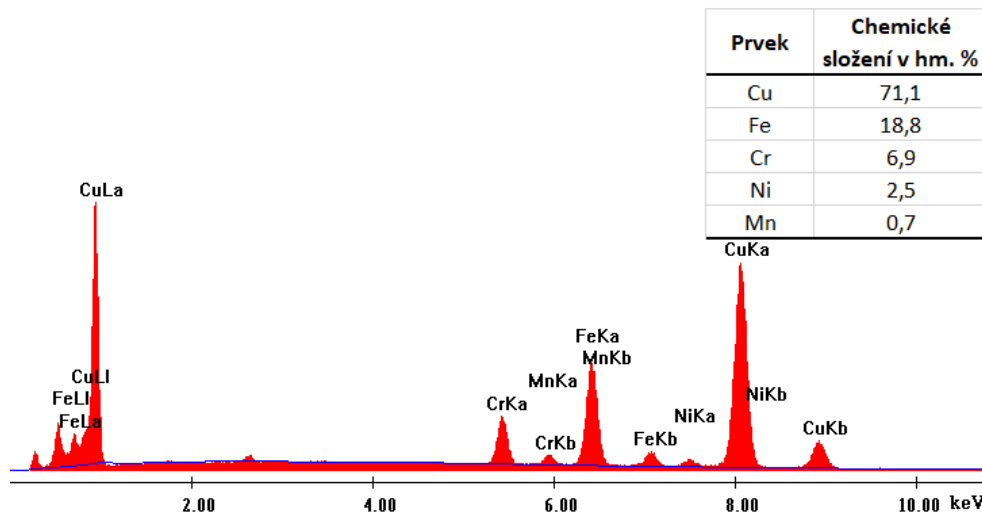


Obr. 56: Vzorek A5; povrch laserového návaru; červená šipka poukazuje na fázově odlišnou oblast od okolní základní matrice; červenou šipkou je vyznačena nedokonale natavená částice přídavného měděného prášku METCO 55; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 500x





Obr. 57: Vzorek A5; měření A5\_EDX1; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; středová oblast laserového návaru



Obr. 58: Vzorek A5; měření A5\_EDX2; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru

### 7.3.2 Mikroskopické hodnocení vzorků navařených infračerveným diodovým laserem YAG LDF 10000-100

Z laserových návarů navařených diodovým laserem YAG laserline LDF 10000-100, který emituje vlnovou délku  $\lambda = 940\text{--}1020\text{ nm}$ , byly odebrány pro bližší metalografickou analýzu 2 vzorky (B1 a B2). Z těchto vzorků byly pořízeny snímky mikrostruktury na světelném optickém mikroskopu Carl Zeiss Z1M a řádkovacím elektronovém mikroskopu Philips XL 30 ESEM, na kterém bylo zároveň měřeno i chemické složení laserového návaru pomocí EDX analýzy.

Na optickém mikroskopu byla mikrostruktura jednotlivých oblastí pořízena při zvětšení 200 až 500x. Z pořízených snímků metalografických výbrusů je patrné, že návary připravené infračerveným laserem dosahují vyšší jakosti než návary připravené laserem modrolátkovým.

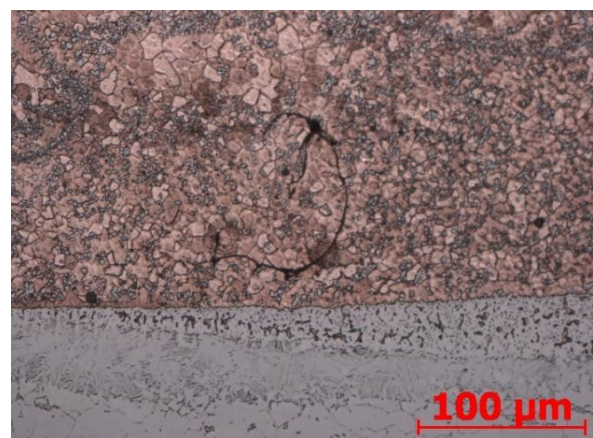
Na Obr. 59 je zobrazena výrazně strukturní heterogenní oblast povrchu laserového návaru vzorku B1. Na heterogenitu návaru odkazují na snímku vyskytující se šedé kulovité oblasti bohaté na chemické prvky ze substrátu, které se na povrch dostaly v rámci promísením nataveného substrátu s roztaveným přídavným materiálem. Tyto fázově odlišné oblasti bohaté na železo by při ideálním procentu promísení laserového návaru (5–10 %) neměly být vůbec přítomny. Bílé šipky v Obr. 59 odkazují na zoxidované tmavé oblasti, které tvoří obálky fázového rozhraní mezi základní měděnou maticí a fázově odlišnými oblastmi na bázi železa.

Mikrostruktura vzorku B1 na hranici ztavení návaru se substrátem je zachycena na Obr. 60. Ve struktuře byla nad oblastí hranicí ztavení laserového návaru identifikována trhlinka, která svým oválným tvarem kopíruje tvar pravděpodobně se vyskytující nedokonale natavené částice přídavného měděného prášku METCO 55.

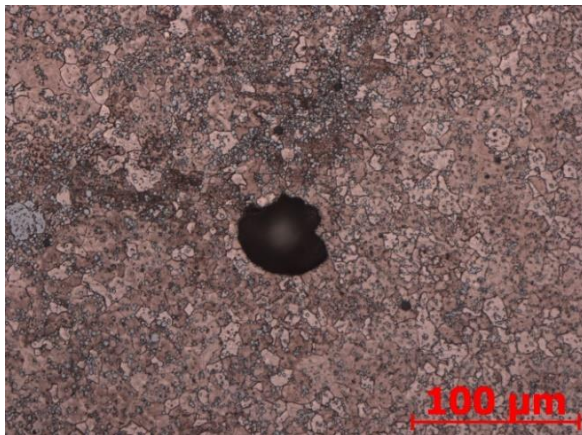
Na Obr. 61; 62 jsou zdokumentovány vady ve strukturách laserového návaru vzorku B1. Na Obr. 61 se nachází pór, zatímco okolní oblast je tvořena základní měděnou maticí laserového návaru. Ve struktuře středu laserového návaru byly na Obr. 62 nalezeny ve struktuře materiálu trhliny (viz bílé šipky). Existuje zde reálné riziko budoucího růstu vyznačených trhlín.



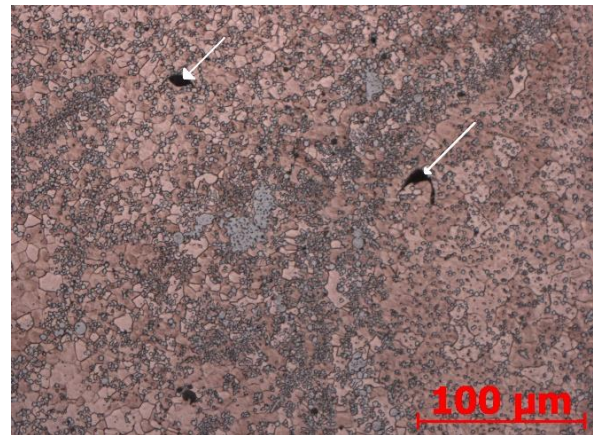
Obr. 59: Vzorek B1; hranice zrn; leptáno; zvětšeno 200x



Obr. 60: Vzorek B1; hranice ztavení; trhlinka nad hranicí ztavení; leptáno; zvětšeno 200x

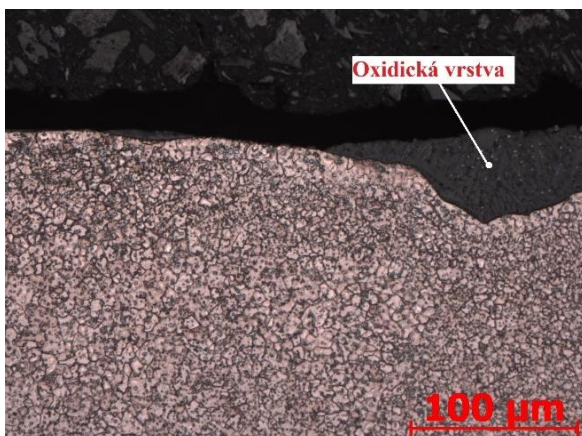


Obr. 61: Vzorek B1; pór ve struktuře laserového návaru; základní měděná matrice laserového návaru; leptáno; zvětšeno 200x

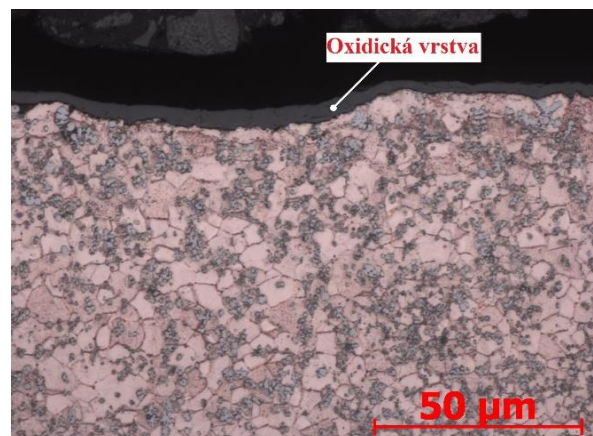


Obr. 62: Vzorek B1; trhliny ve struktuře laserového návaru; leptáno; zvětšeno 200x

Na druhém hodnoceném vzorku B2 je na Obr. 63; 64 zachycen povrch laserového návaru. Obr. 63 odkazuje na zoxidovaný povrch laserového návaru vzorku B2. Jakákoliv oxidická vrstva na povrchu laserového návaru je negativní, avšak zoxidovaný povrch na Obr. 63 zasahuje pouze do malé hloubky laserového návaru, tudíž se jedná o akceptovatelnou vadu, kterou půjde v případě potřeby odstranit obrobením. Oxidická vrstva zachycena na Obr. 64 pokrývá souvisle povrch substrátu. Tato oxidická vrstva oproti předchozí (viz Obr. 63) nezasahuje do takové hloubky, a tedy půjde také v případě potřeby snadno odstranit. Oxidická vrstva vznikla na povrchu návaru z důvodu přetavení tenké povrchové vrstvy laserového návaru, za účelem odstranění kapek mědi z povrchu návaru. Základní matrice laserového návaru vzorku B2 na Obr. 63; 64 jsou jemnozrné (průměr zrna 1–15 μm) a bez výrazné chemické a strukturní heterogenity.



Obr. 63: Vzorek B2; zoxidovaný povrch; leptáno; zvětšeno 200x



Obr. 64: Vzorek B2; oxidická vrstva na povrchu laserového návaru; leptáno; základní matrice měděného návaru; zvětšeno 500x

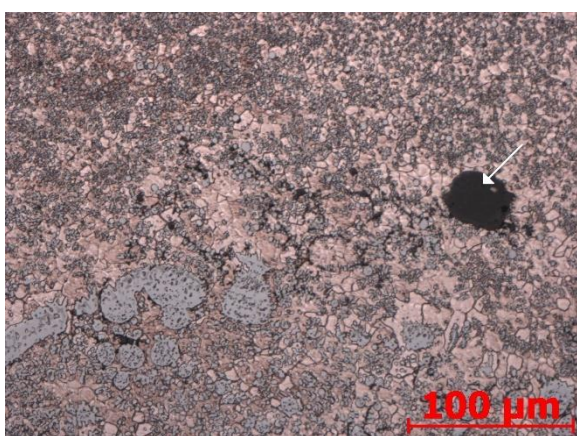
V mikrostruktuře vzorku B2 je na Obr. 65 zachycena a tmavými liniemi reprezentováno oxidické síťoví. Jedná se o malé zoxidované částice, které obalily natavené částice přídatného



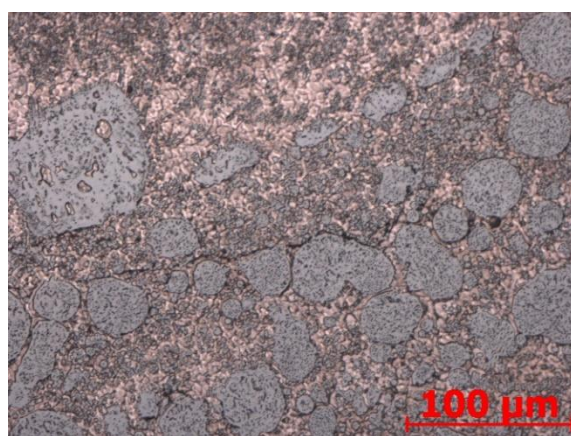
měděného prášku. Dál byl ve struktuře laserového návaru na Obr. 65 pozorovaný oxid kulovitého tvaru, který je na snímku označený bílou šipkou.

Poslední snímek struktury laserového návaru vzorku B2 je uveden na Obr. 66. Na snímku byly identifikovány vyřádkované oxidy, které kopírují fázové rozhraní mezi základní měděnou maticí laserového návaru a oblastmi bohatými na železo. Na Obr. 66 je zachycena výrazná strukturní heterogenita laserového návaru B2. Na snímku je část laserového návaru tvořena základní měděnou maticí, ale převážná část je tvořena oblastmi, které jsou bohaté na prvky substrátu.

Mikrostruktura laserového návaru zachycená na Obr. 66 je výrazně promísená s částicemi substrátu, takže návar je v zachycené oblasti velmi heterogenní.



Obr. 65: Vzorek B2; oxidické síťový; leptáno;  
zvětšeno 200x



Obr. 66: Vzorek B2; oxidické řádky kopírující fázové  
odlišné oblasti; leptáno; zvětšeno 200x

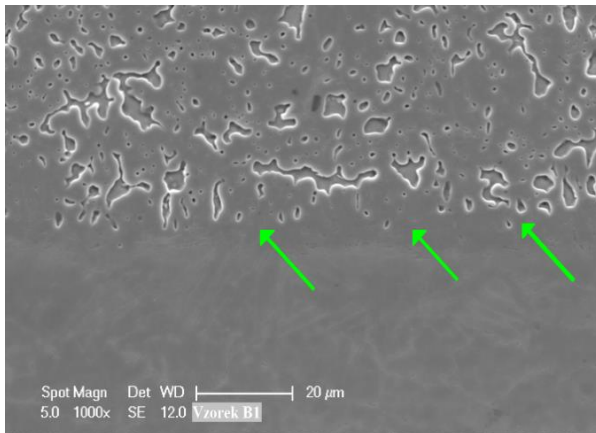
Vzorky B1 a B2 navařené infračerveným laserem byly dále podrobeny analýze na řádkovacím elektronovém mikroskopu Philips XL 30 ESEM.

První snímek vzorku B1 (Obr. 67) zachycuje hranici ztavení (viz zelené šipky) mezi laserovým návarem a substrátem. V oblasti ztavení nebyly identifikovány žádné trhliny ani póry, což poukazuje na vysokou adhezi laserového návaru k substrátu.

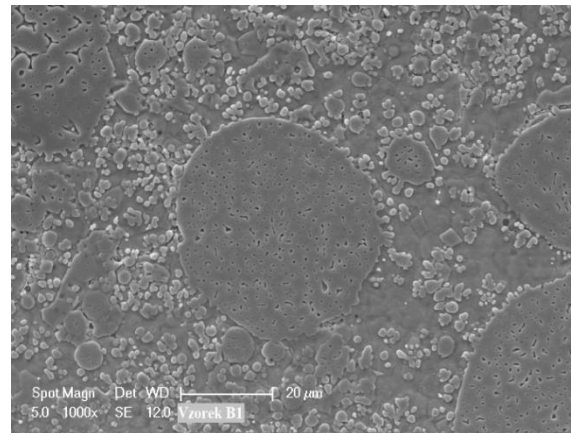
Na Obr. 68 se nachází chemicky i strukturně odlišné oblasti bohaté na prvky obsažené v substrátu (Fe, Cr, Ni, Mn). Kolem těchto globulárních oblastí se nachází jemnozrná měděná struktura laserového návaru.

Ve středové oblasti laserového návaru vzorku B1 (Obr. 69) byla identifikována ředina, kolem které vystupují hranice jednotlivých měděných zrn. Jemné kruhové částice nacházející se ve struktuře budou obsahem chemických prvků odpovídat pravděpodobně chemickému složení substrátu.

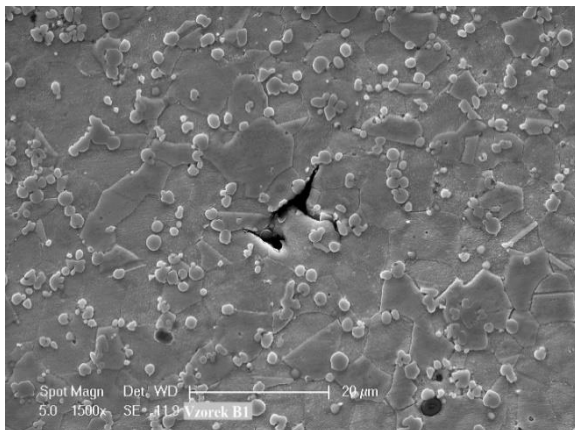
Povrch laserového návaru vzorku B1 je znázorněn na Obr. 70; 71. Na těchto snímcích jsou jasně vidět jednotlivá zrna mědi. Světlé částice ve strukturách jsou oblasti bohaté na prvky substrátu, které se k povrchu dostaly vlivem proudění tuhajícího nataveného substrátu. Na Obr. 71 je dále vyznačena oblast, čisté zrnité mědi. Takováto struktura tvořená pouze jednotlivými zrny mědi by měla být v ideálním případě přítomna v celém objemu laserového návaru.



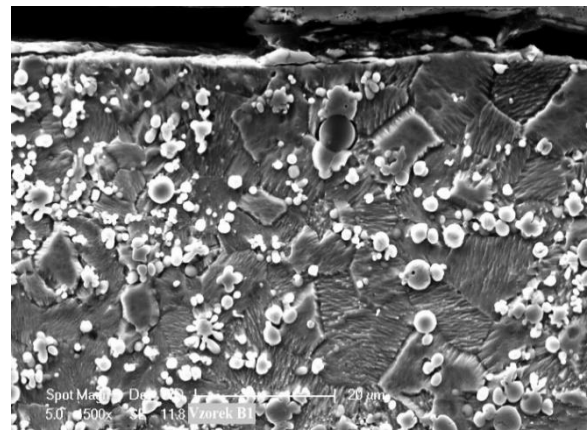
Obr. 67: Vzorek B1; hranice ztavení mezi substrátem a laserovým návaru, na kterou odkazují zelené šipky; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 1000x



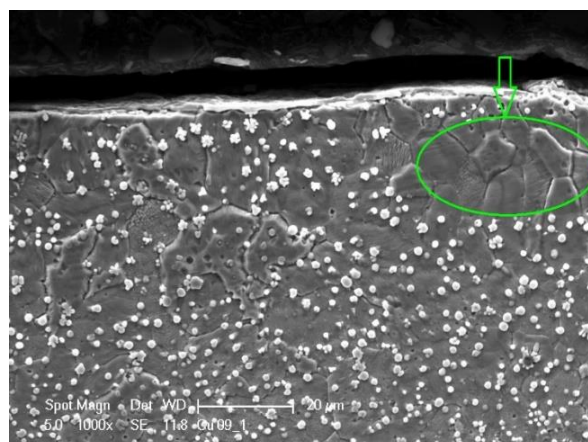
Obr. 68: Vzorek B1; středová oblast laserového návaru; chemicky i strukturně odlišné oblasti od okolní měděné matrice; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 1000x



Obr. 69: Vzorek B1; středová oblast laserového návaru; ředina; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 1500x

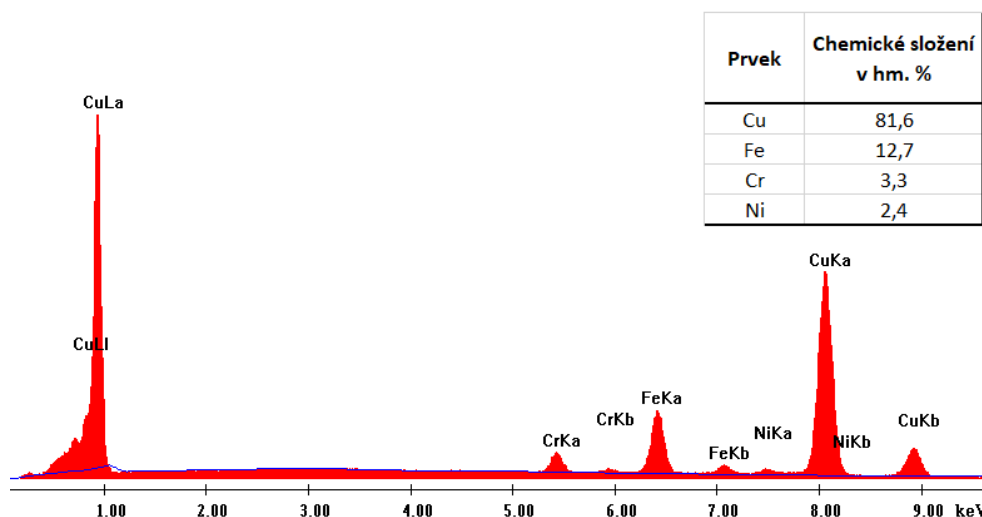


Obr. 70: Vzorek B1; povrchová laserová vrstva; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 1500x



Obr. 71: Vzorek B1; povrchová oblast laserového návaru; zeleně vyznačená oblast je oblast bez příměsi železa tzn. ideální struktura laserového návaru; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 1000x

Na vzorku B1 byla dále měřena EDX analýza chemického složení, jejímž výsledkem bylo energetické spektrum jednotlivých prvků (viz Obr. 72 měření B1\_EDX1) a dále naměřená koncentrace (viz tabulka u Obr. 72). Z naměřené povrchové oblasti laserového návaru byla prokázána přítomnost 81,6 hm. % Cu, 12,7 hm. % Fe, 3,3 hm. % Cr a 2,4 hm. % Ni. Z EDX chemické analýzy vzorku B1 je patrné, že obsah mědi v povrchové oblasti je celkově vyšší než u povrchových oblastí u vzorků A1 až A5.

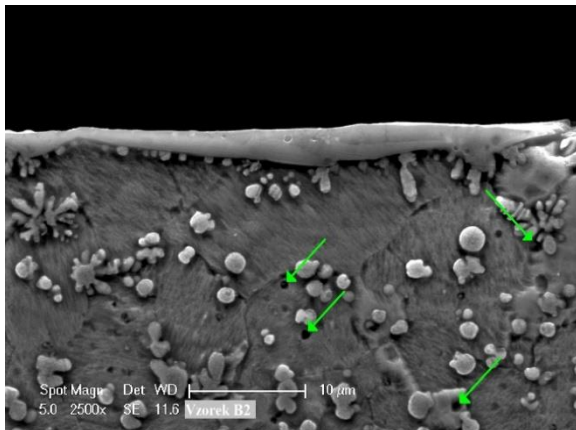


Obr. 72: Vzorek B1; měření B1\_EDX1; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru

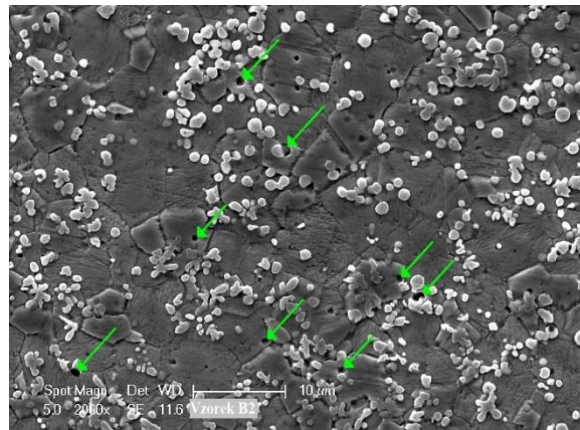
Snímky mikrostruktury vzorku B2 z řádkovacího elektronového mikroskopu jsou zachyceny na Obr. 73; 74.

Na povrchu vzorku B2 (Obr. 73) byla identifikována tenká povrchová oxidická vrstva, pod kterou se nacházejí zrna mědi. Jednotlivá zrna mědi a jejich viditelné hranice jsou vidět také ve struktuře pořízené ze středu laserového návaru na Obr. 74. Kolem měděných zrn jsou na obou snímcích (viz Obr. 73; 74) viditelné světlé částice kulovitěho tvaru – jedná se o částice bohaté na prvky substrátu (Fe, Cr, Ni, Mn). V obou strukturách na Obr. 73; 74 byly objeveny drobné mikropóry, které jsou v mikrostrukturách vyznačeny zelenou šipkou. Mikroporozita uvedeného charakteru je zanedbatelná, neboť podíl pórů ve struktuře nepřesahuje 5 %, což lze hodnotit z hlediska velikosti vad jako vady přípustné.



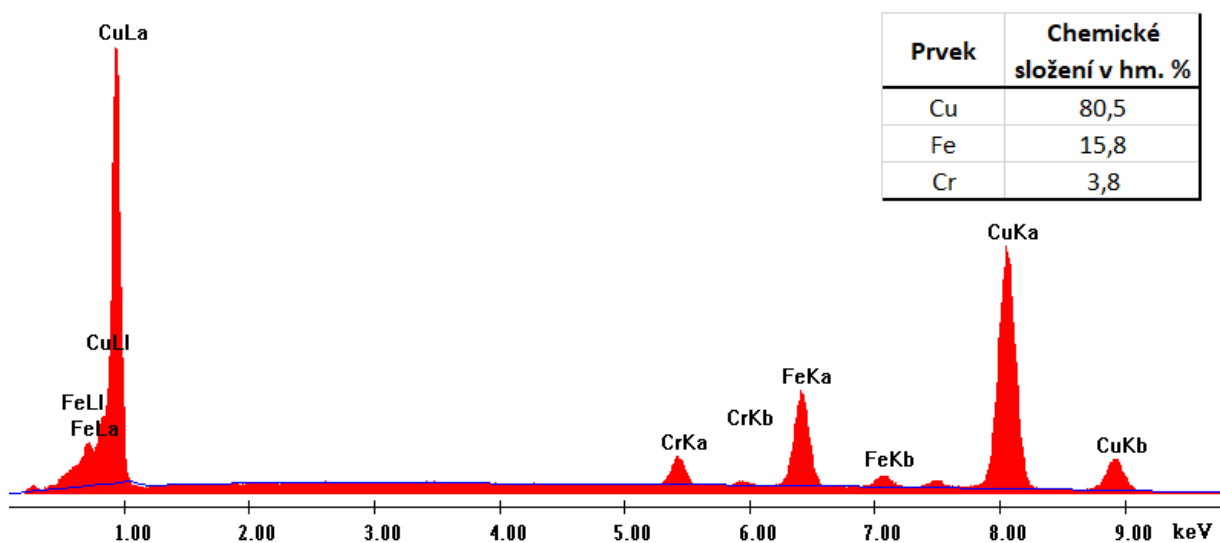


Obr. 73: Vzorek B2; povrchová struktura laserového návaru; zelené šipky odkazují na mikropóry ve struktuře; leptáno; SEM; SE; zvětšeno 2500x

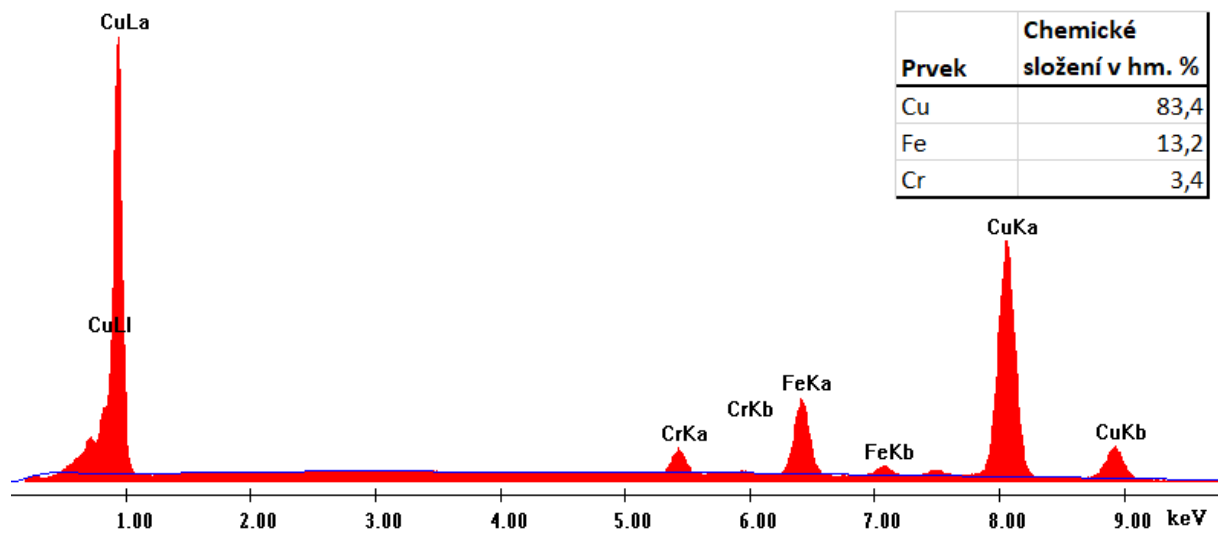


Obr. 74: Vzorek B2; povrchová oblast laserového návaru; zelené šipky odkazují na mikropóry ve struktuře leptáno; SEM; SE; zvětšeno 2000x

EDX analýzou chemického složení povrchové oblasti vzorku B2 bylo naměřeno chemické složení zobrazené na Obr. 75; 76 (měření B2\_EDX1 a B2\_EDX2). Obsah mědi v obou měřených oblastech dosahoval více než 80 hm. %, tudíž nebyl vzorek B2 tak výrazně promísený se substrátem jako vzorky navařené modrolátkovým laserem LDMblue 1800-60.



Obr. 75: Vzorek B2; měření B2\_EDX1; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru



Obr. 76: Vzorek B2; měření B2\_EDX2; energetické spektrum EDX analýzy chemického složení včetně naměřeného obsahu chemických prvků v hm. %; povrchová oblast laserového návaru



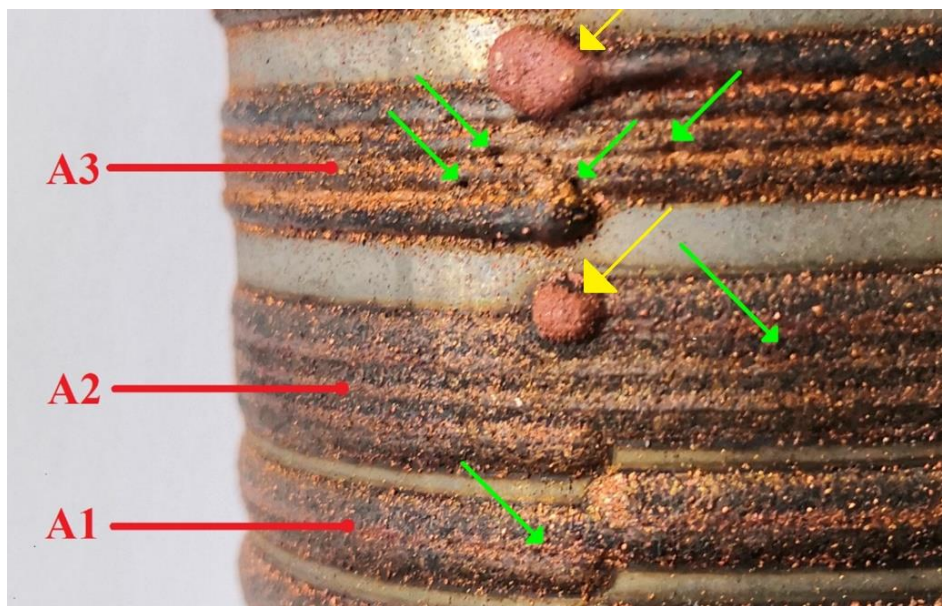
## 8 NDT

Z nedestruktivních zkoušek pro hodnocení vad struktury a jakosti návarů byla vybrána, s ohledem na charakter navařených vrstev (vysoká povrchová drsnost, tvar a reliéf svarových housenek) povrchová vizuální zkouška a radiografická zkouška prozařovací. V rámci řešení diplomové práce byl při hodnocení povrchů vizuální zkouškou kladen důraz zejména na oblast překryvu jednotlivých laserem navařených housenek a na případnou přítomnost povrchových vad (pórovitost, trhliny, rozstřík apod.). U radiografického zkoušení byla snaha odhalit případné podpovrchové vady či jiné odchylky od ideálního stavu. Protože v současné chvíli nejsou k dispozici žádné ČSN normy řešící jakékoliv NDT metody laserových návarů, byly níže uvedené NDT zkoušky provedeny v souladu s normami pro tavné svařování, tj. ČSN EN ISO 17637 pro vizuální zkoušení (VT) a ČSN EN ISO 17636 pro radiografické zkoušení (RT). Pro klasifikaci geometrických vad laserových návarů byla použita norma ČSN EN ISO 6520-1.

### 8.1 Vizuální zkoušení

Vizuální zkouška provedená v rámci řešení experimentální části diplomové práce byla stanovena za účelem vyhodnotit stav povrchu jednotlivých laserem deponovaných návarů na substrát z oceli W. Nr. 1.4541 a popsat výskyt případných povrchových vad.

Vizuální zkouškou bylo zjištěno, že vzorky navařené modrolátkovým laserem LDMblue 1800-60 obsahovaly značné množství povrchových pórů (referenční číslo 2018 dle normy ČSN EN ISO 650-1) a dutin (ref. č. 200), které byly způsobeny primárně nedostatečným překryvem mezi jednotlivými laserem navařenými housenkami. Identifikované vady 2018 (povrchová pórovitost) a 200 (dutiny) byly na Obr. 77, na kterém se nacházejí vzorky A1; A2; A3, vyznačeny zelenými šipkami. Celé povrchy vzorků A1 až A3 jsou pokryty drobnými kapičkami mědi. Jedná se o vadu typu rozstřík (ref. č. 602), který byl na vzorcích způsobený vlivem snížené absorpce mědi laserovým paprskem. Měděné kapičky přídavného materiálu vzniklé vinou rozstříku tavné lázně ulpěly na povrchu substrátu a tuhnutí návaru. U vzorku A2 a A3 bylo detekováno v oblasti ukončení laserového návaru nadměrné množství přídavného materiálu (označené žlutě na Obr. 77). Vzniklá oblast nahromaděného přídavného materiálu byla klasifikována jako vada typu přetečení (ref. č. 506).



Obr. 77: Makrosnímek laserových návarů A1; A2; A3 navařené modrolátkovým diodovým laserem LDMblue 1800-60; zelenými šipkami vyznačeny póry; žlutou šipkou označeno přetečení

Na dalším Obr. 78 je zachycena plocha povrchu laserového návaru vzorku A4. Vizuálním hodnocením bylo zjištěno, že povrch vzorku A4 laserového návaru je pórovitý (ref. č. 2018).



Obr. 78: Makrosnímek vzorku A4 navařené modrolátkovým diodovým laserem LDM blue 1800-60

Rozstřík (ref. č. 602) měděných kapiček po povrchu návaru byl detekován také na vzorku A5 (viz Obr. 79). Na snímku je viditelný nedostatečný překryv mezi jednotlivými laserem navařenými housenkami. Tato vada byla dle normy ČSN EN ISO 650-1 vyhodnocena jako vada typu vadné napojení v krycí housence (ref. č. 5171). Nedostatečné překrytí navařených vrstev by mohlo vést až k narušení kompaktnosti laserového návaru a finální návar by tím ztratil své funkční vlastnosti.

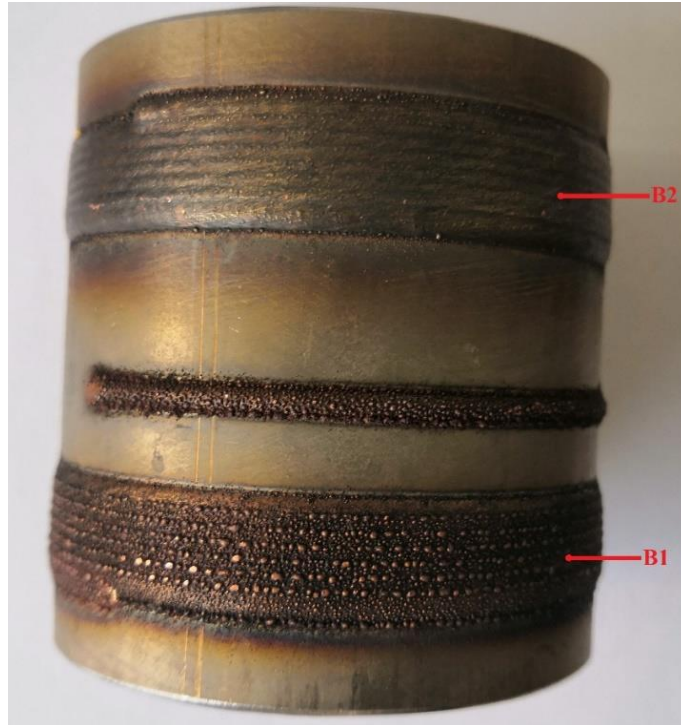


Obr. 79: Vzorek A5 navařený modrolátkovým diodovým laserem LDM blue 1800-60; makrosnímek

Problematika rozstříku se týkala také vzorků B1 a B2 navařených infračerveným laserem YAG LDF 10000-100 (Obr. 80). Na vzorku B1 lze pozorovat kapky mědi, které vznikly na povrchu laserového návaru z důvodu rozstříku.

Zároveň je také na vzorku B2 vidět, že lze kapičky mědi na návaru lehce odstranit. V tomto případě byl vzorek B2 po navaření znovu za pomoci laserového svazku tzv. „přežehlen“, čím došlo k opětovnému, ale jemnému natavení povrchové měděné vrstvy, takže se kapičky mědi, které způsobily rozstřík natavily a začlenily do struktury laserového návaru. Výsledný povrch je po této operaci hladší a vizuálně estetičtější. Povrch laserového návaru by se dal rovněž upravit například mechanickým obrobáním či broušením. Povrchová

vizuální zkouška neodhalila na vzorcích B1 a B2 přítomnost dalších vad, tudíž z pohledu vizuálního zkoušení lze tyto vzorky hodnotit jako velmi kvalitní.



Obr. 80: Vzorky B1 a B2 navařené infračerveným diodovým laserem YAG – LASERLINE LFD 10000-100; makrosnímek

## 8.2 Radiografické zkoušení

Druhou nedestruktivní zkouškou provedenou v rámci diplomové práce, byla zkouška radiografická. Radiografická zkouška proběhla v laboratoři Katedry materiálů a strojírenské metalurgie Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni v kabinovém RTG zařízení tvořeném RTG lampou Seifert ERESKO MF4 a plošným detektorem GE DXR 250 c - w. Parametry a techniky, které byly použité během radiografického zkoušení jsou následující:

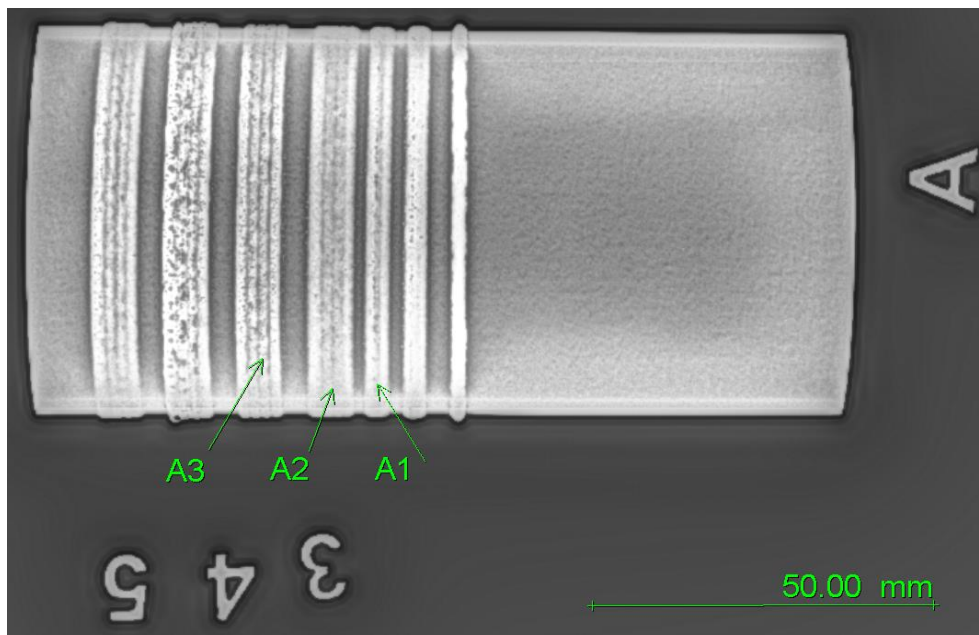
- citlivost zkušební postupu kontrolována pomocí drátové měřky,
- vzdálenost zdroje od detektoru 600 mm,
- žhavicí proud na rentgenu 4,5 mA,
- napětí na rentgenu 95 kV,
- čas jedné expozice 0,3 sekundy,
- na každou expozici pořízeno 6 snímků.

Radiografickou zkouškou bylo zjištěno, že vzorky A1 a A3 navařené modrolátkovým laserem (obr. 81; 82) vykazují vady typu povrchová pórovitost (referenční číslo 2018 dle normy ČSN EN ISO 6520-1). Na vzorku A2 byla identifikována pouze vada typu přetečení (ref. č. 506), která je vidět u ukončení laserového návaru v oblasti vady (Obr. 82). Stejná vada byla identifikována také na vzorku A3.

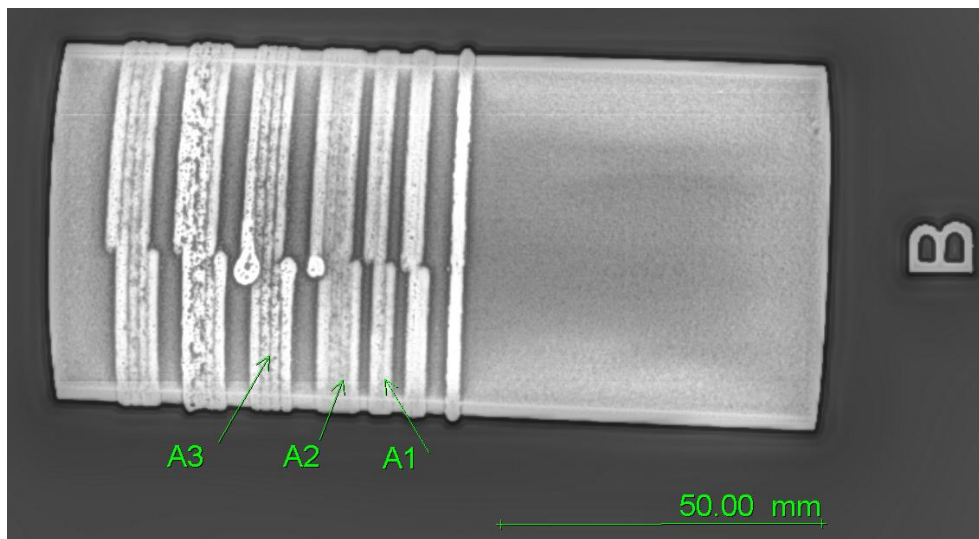


Na dalším snímku (obr. 83) byla detekována pórovitost na vzorku A5 a nedostatečné překrytí jednotlivých návarových housenek přes sebe. Nedostatečné překrytí navařených housenek by odpovídalo vadě 517 – vadné napojení. U vzorku A4 neprokázala radiografická zkouška přítomnost žádných podpovrchových ani vnitřních vad.

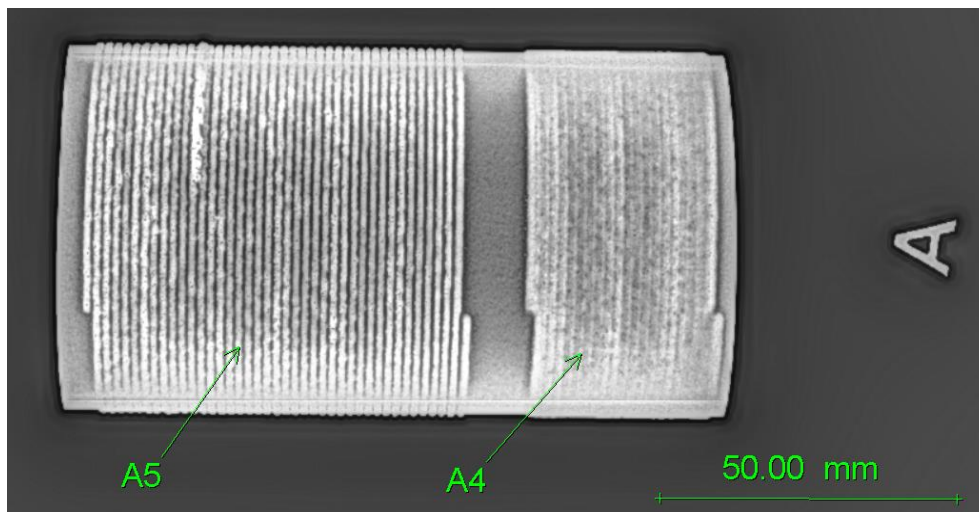
Množství pórů (2018 – povrchová pórovitost) obsažených v návarech A1 a A3 je tak velké, že by z hlediska normy ČSN EN ISO 10675-1 ve stupni přípustnosti 3 byly vyhodnoceny jako nepřijatelné (více než 2,5% obsah z celkové plochy).



Obr. 81: Vzorky A1; A2; A3 navařené modrolátkovým diodovým laserem LDM blue 1800-60, radiografická zkouška; makrosnímek

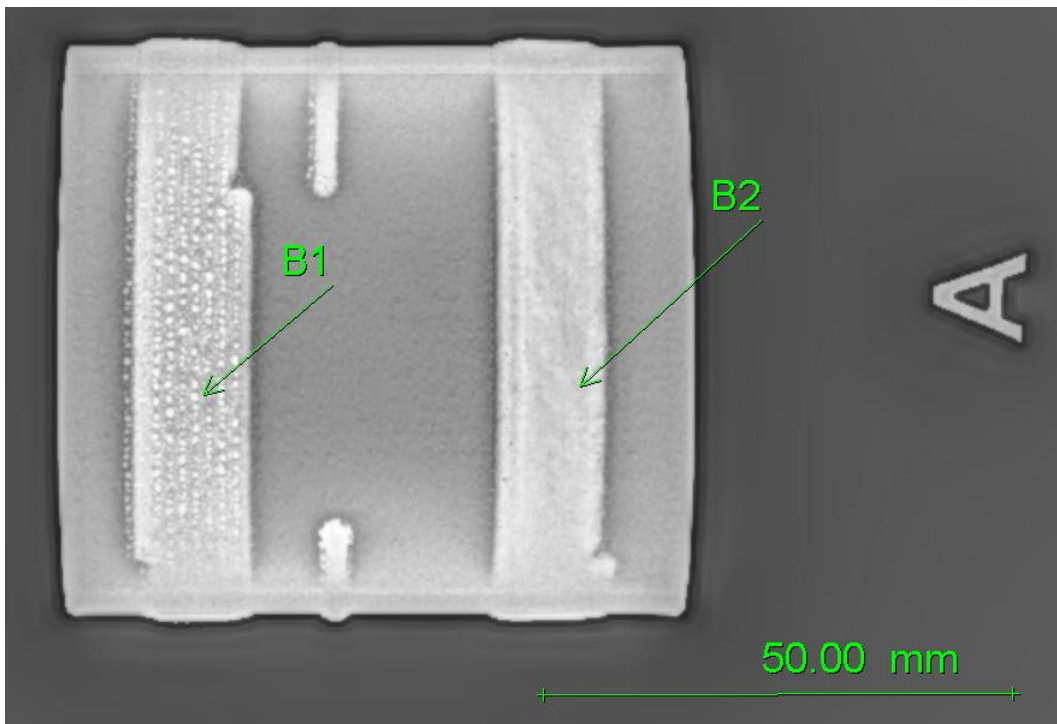


Obr. 82: Vzorky A1; A2; A3 navařené modrolátkovým diodovým laserem LDM blue 1800-60, radiografická zkouška; makrosnímek



Obr. 83: Vzorky A4; A5 navařené modrolátkovým diodovým laserem LDM blue 1800-60, radiografická zkouška; makrosnímek

U vzorků navařených infračerveným laserem bylo vyzorováno, že se na povrchu vzorku B2 (Obr. 84) vyskytují rozptýlené kapičky mědi. Jedná se o kapičky, které vznikly na povrchu laserového návaru vlivem rozstříku tavné lázně. Vzorek B1, jehož povrch byl po primárním navaření znovu přetaven, aby došlo ke zlepšení kvality povrchu, nevykazoval žádné vady.



Obr. 84: Vzorky B1; B2 navařené infračerveným diodovým laserem YAG – LASERLINE LFD 10000-100;  
makrosnímek

Celkovou jakost vzorků navařených infračerveným laserem, v závislosti na výsledcích z rentgenové zkoušky, lze ohodnotit pozitivně. Pouze na povrchu vzorku B2 se utvořil rozstřík, který však lze odstranit obráběním.

Vzorky navařené modrolátkovým laserem vykazovaly výše uvedené vady (povrchová pórovitost, nedostatečné překrytí, přetečení). Prozařovací zkouškou nebyla odhalena žádná přítomnost podpovrchových vad (např. vady typu trhliny, studený spoj, staženiny), které by svědčily o fatálně nezvládnutelné technologii laserového navařování.

## 9 Diskuse výsledků

V rámci experimentálního výzkumu bylo technologií laserového navařování připraveno a hodnoceno celkem 7 vzorků laserových návarů. Vzorky byly rozděleny do 2 skupin podle zdroje navařování, který byl při jejich navařování použit. První skupina vzorků A1 až A5 byla připravena ve společnosti LaserLine GmbH, kde byly vzorky deponovány pomocí diodového modrolátkového laseru laserline LDMblue 1800-60 s vlnovou délkou emitujícího záření  $\lambda = 450$  nm. Jednotlivé vzorky se od sebe lišily rozdílnými procesními parametry technologie laserového navařování (výkon laseru, navařovací rychlost, rychlost podávání přídavného prášku apod.). Druhá série vzorků B1; B2 byla připravena ve společnosti LaserTherm spol. s r. o., kde byl pro jejich navaření použit diodový laser laserline YAG LDF 10000-100.

Jako přídavný materiál byl pro laserové navařování použit přídavný prášek s označením METCO 55. Jedná se o měděný prášek s obsahem mědi více než 99 %, se sféroidním tvarem zrn a zrnitostí 38 až 90  $\mu\text{m}$ . Prášek METCO 55 byl navařen na substrát ze žáruvzdorné austenitické oceli W. Nr. 1.4541, který měl polotovar trubky o průměru 60,3 mm a tloušťce stěny 2,77 mm.

Po ukončení laserového navařování bylo provedeno na vzorcích nedestruktivní testování a metalografické hodnocení se zaměřením na popis vad v návarech. Z NDT zkoušek byla vybrána s ohledem na charakter navařených vrstev (vysoká povrchová drsnost a tvar svarových housenek) zkouška vizuální a radiografická prozařovací.

### 9.1 Diskuse výsledků vzorků navařených modrolátkovým diodovým laserem LDMblue 1800-60

Vzorek A1 byl navařený při výkonu  $P = 1400$  W a jeho navaření proběhlo při nejvyšší rychlosti navařování  $v_c$  a nejvyšší rychlosti podávání prášku  $F$  z hodnocených vzorků. Vzorek A1 se vyznačoval nadměrnou hloubkou závaru, která způsobila výrazné promísení substrátu s nataveným přídavným práškem. Na makroskopickém výbrusu vzorku A1 byla identifikována přítomnost velkého množství pórů, které byly s ohledem na jejich četnost a velikost (5–30  $\mu\text{m}$ ) vyhodnoceny jako nepřijatelné. Mikroskopickým vyhodnocením vzorku A1 byla na hranici ztavení odhalena přítomnost mikrotrhlin. Ve středové a povrchové oblasti návaru se dále vyskytovaly nedokonale natavené částice přídavného měděného prášku METCO 55. Na základě výsledků EDX analýz chemických prvků bylo změřeno, že středová měřená oblast laserového návaru obsahuje 66,5 hm. % Cu a povrchová oblast 79,2 hm. % Cu. Dále byla v povrchové struktuře vzorku odhalena přítomnost kyslíku, která poukazuje na mírné zoxidování povrchové oblasti.

Vzorek A2 byl navařený při výkonu  $P = 1400$  W a stejné rychlosti podávání prášku  $F$  jako vzorek A1. Pouze rychlost navařování  $v_c$  byla snížena o 1/3. Ve struktuře vzorku byla identifikována přítomnost pórů a podobně jako vzorek A1 dosahovala hloubka závaru  $b$  nadměrné velikosti. V případě vzorku A2 se hloubka závaru přibližně rovnala výšce návaru, což mělo za následek výrazné promísení laserového návaru s ocelovým substrátem. Z toho důvodu průměrný obsah mědi v laserovém návaru nepřesáhl hodnotu 50 hm. %. Laserový návar A2 obsahoval zvýšené množství kyslíku (cca. 7 hm. %), takže v laserovém návaru budou



zastoupeny také oxidy, což se negativně odrazí na vlastnostech laserového návaru. V oblasti hranice ztavení byla odhalena stejně jako v předchozím vzorku přítomnost mikrotrhlin.

Vzorek A3 byl navařený při výkonu  $P = 1400$  W. Rychlost navařování  $v_c$  byla zvolena stejná jako pro vzorek A2 a podávání přídavného prášku  $F$  bylo sníženo oproti předchozím hodnotám o 25 %. Vzorek A3 byl charakteristický extrémním obsahem pórů, jak na povrchu návaru, tak i v samotné struktuře návaru (Obr. 21). Pro vzorek A2 byla nesprávně nastavena hodnota překryvu mezi jednotlivými laserem navařenými housenkami. Na hranici ztavení mezi substrátem a laserovým návarem byla u vzorku A3 odhalena jemná síť mikrotrhlin. Ve struktuře laserového návaru byly detekovány nenatavené částice mědi, které se nezúčastnily formování tavné lázně návaru. EDX analýzou chemických prvků bylo zjištěno, že povrchová struktura vzorku byla mírně zoxidována a obsah mědi nepřesáhl hodnotu 70 hm. %.

Vzorek A4 byl navařený při výkonu  $P = 625$  W. Oproti vzorku A1 byla rychlost navařování  $v_c$  snížena na polovinu. Snížení výkonu mělo za následek, že vzorek A4 obsahoval oproti předchozím vzorkům minimální množství pórů a nedošlo zde k tak výraznému promísení mezi laserovým návarem a substrátem. Obsah mědi v povrchové oblasti laserového návaru přesahoval hodnotu 80 hm. %. Snížení výkonu však nezamezilo tvorbě mikrotrhlin, protože stejně jako v předchozím případě u vzorku A3 byla v oblasti hranice ztavení laserového návaru a substrátu detekována síť mikrotrhlin. Přítomnost trhlin ve struktuře laserového návaru byla také zaznamenána v jeho středové oblasti.

Vzorek A5 byl navařený při výkonu  $P = 1040$  W. Ostatní parametry byly zvoleny totožně jako pro vzorek A4. Makroskopickou analýzou vzorku A5 byla ve struktuře objevena přítomnost velkého množství pórů. Makroskopická analýza vzorku rovněž odhalila nedostatečné překrytí mezi jednotlivými laserem navařenými housenkami. Jednotlivé housenky se na povrchu vzorku A5 nepřekrývají, ba naopak jsou od sebe odděleny mezerou (Obr. 23). V oblasti hranice ztavení se stejně jako ve všech ostatních případech nacházela síť mikrotrhlin, nicméně trhliny byly drobnějšího charakteru než v případě vzorku A1 až A4. Analýzou chemického složení návaru A5 bylo zjištěno, že obsah mědi ve vzorku dosáhl hodnoty 76,2 hm. % ve středové oblasti návaru a 71,1 hm. % v oblasti povrchové.

Nedestruktivním testováním bylo stanoveno v souladu s normou ČSN EN IS 17637 pro vizuální zkoušení a normou ČSN EN ISO 17636 pro radiografické zkoušení. Pro klasifikaci geometrických vad laserových návarů byla použita norma ČSN EN ISO 6520-1. Vizuální zkouškou bylo odhaleno, že vzorky A1 až A5 byly pokryty drobnými kapičkami mědi, které na povrchu vznikly rozstříkem (ref. č. 602) tavné lázně. Dále byla na vzorcích A1 až A4 identifikována přítomnost povrchových pórů (2018) a dutin (200). U vzorků A2 a A3 bylo detekováno v oblasti ukončení laserového návaru nadměrné množství přídavného materiálu, které bylo vyhodnoceno jako vada typu přetečení (506). Na vzorku A5 došlo k nedostatečnému překryvu mezi jednotlivými laserem navařenými housenkami. Tato hodnota byla vyhodnocena dle ČSN EN 6520-1 jako vada typu vadné napojení v housence. Radiografickou zkouškou nebyla odhalena žádná přítomnost podpovrchových vad (např. vady typu trhliny, studený spoj,

staženiny), které by svědčily o fatálně nezvládnutelné technologii laserového navařování. Pouze byla potvrzena přítomnost vad popsaných již ve vizuální zkoušce.

## 9.2 Diskuse výsledků vzorků navařených infračerveným diodovým laserem YAG LDF 10000-100

Vzorky B1 a B2 byly navařeny při výkonu  $P = 950$  W. Ostatní parametry s ohledem na citlivost dat a zachování technologického know-how společnosti LaserTherm spol. s r. o. nebyly poskytnuty. Výrobce bylo pouze uvedeno, že k navaření vzorků B1 a B2 byly použity totožné procesní podmínky navařování. Odlišnost technologie výroby vzorků spočívala pouze v tom, že po navaření vzorku B2 následovalo ještě přetavení povrchu návaru, za účelem zvýšení jakosti povrchu laserového návaru.

Na povrchu samotného návaru vzorku B1 byly identifikovány kapičky mědi, které se vlivem rozstříku tavné lázně přednostně zachytily na povrchu návaru v místě překryvů mezi jednotlivými laserem navařenými housenkami. Makroskopická analýza vzorku B1 odhalila nadměrnou hloubku závaru  $b$ . Mikroskopickou analýzou vzorku B1 byla identifikována přítomnost trhlin, ředin a pórů ve struktuře laserového návaru. V oblasti hranice ztavení nebyla na vzorku B1 zaznamenána přítomnost trhlin. Ve struktuře laserového návaru vzorku B1 (stejně jako u vzorku A1 až A5) byla odhalena přítomnost oblastí bohatých na prvky substrátu, které se do struktury dostaly vlivem nadměrného promísení substrátu a přídavného materiálu. Rozhraní jednotlivých oblastí substrátu v laserovém návaru vzorku B1 bylo obklopeno oxidickou vrstvou. Plošnou EDX analýzou chemického složení prvků bylo zjištěno, že obsah mědi v podpovrchové struktuře vzorku B1 přesáhl hodnotu 80 hm. %.

Makroskopickým vyhodnocením vzorku B2 byla, stejně jako na vzorku B1, identifikována nadměrná hloubka závaru. V mikrostruktuře vzorku byla odhalena přítomnost oxidického síťoví a vyřádkování. V povrchové vrstvě byla detekována tenká oxidická vrstva, která v návaru vznikla následkem přetavení povrchové vrstvy. Pomocí rádkovacího elektronového mikroskopu byla ve struktuře laserového návaru vzorku B2 odhalena v neposlední řadě také přítomnost mikropórů. Obsah mědi ve měřené povrchové oblasti návaru přesáhl, stejně jako u vzorku B1, hodnotu 80 hm. %.

Nedestruktivním testováním byla u vzorků ze série B odhalena pouze přítomnost rozstříku (ref. č. 602) na povrchu laserového návaru vzorku B1. U vzorku B2 byl rozstřík odstraněn dodatečným přetavením povrchu po navaření.

Vzorky navařené infračerveným laserem YAG LDF 10000-100 dosahovaly v rámci experimentálního programu obecně vyšší kvality než vzorky připravené modrolátkovým laserem LDMblue 1800-60, zejména protože četnost výskytu vad, s přihlédnutím na jejich ovlivnění funkčních vlastností návarů, byla u vzorků B1 a B2 daleko nižší.

## 10 Závěr

Předložená diplomová práce byla vypracována na téma „Využití laserových zdrojů k navařování mědi na substrát z oceli W. Nr. 1.4541“. V teoretické části byla popsána technologie laserového navařování s přídavným materiálem ve formě prášku, dále byl vysvětlen princip a fungování laseru, a v návaznosti na navařování mědi, kterému se diplomová práce věnuje, byla také popsána problematika jejího navařování. V poslední kapitole č. 5 teoretické části jsou uvedeny laserové zdroje, pomocí kterých lze měď efektivně navařovat, a současně jsou popsány trendy v oblasti laserového navařování, které byly čerpány z publikovaných vědeckých výstupů světových vědecko-výzkumných pracovišť.

Po zpracování rešeršní části, ve které je pojednáno o současném stavu poznání vědy v oblasti laserového navařování mědi, byly navrženy lasery, které jsou k navařování mědi na ocelový substrát vhodné. Jedná se o krátkovlnné lasery pracující v oblasti vlnových délek  $\lambda = 450$  až  $1100$  nm.

Cílem experimentální části bylo využít různých druhů laserových zdrojů k navaření přídavného prášku METCO 55 (měď o vysoké čistotě) na substráty z oceli W. Nr. 1.4541. K navaření bylo využito celkem dvou laserových zdrojů, jejichž odlišnost byla zejména v emitující vlnové délce a použitém vstupním výkonu. První zkoumaná série vzorků byla navařena pomocí modrolátkového diodového laseru LDMblue 1800-60. Navaření proběhlo při vlnové délce  $\lambda = 445$  nm a výkonu  $P = 625$  až  $1400$  W. Druhá zkoumaná série vzorků byla navařena diodovým laserem YAG LDF 10000-100, který emituje záření o vlnové délce v oblasti infračerveného spektra  $\lambda = 940$ – $1020$  nm (navarování vzorků proběhlo při výkonu laseru  $P = 950$  W). Laserové návary byly následně podrobeny nedestruktivnímu testování a metalografickému hodnocení se zaměřením na popis vad. Z nedestruktivních zkoušek použitých pro hodnocení stavu a jakosti laserových návarů byla s ohledem na charakter navařených vrstev (vysoká povrchová drsnost, tvar a reliéf navařených housenek) vybrána zkouška vizuální a radiografická.

Výsledky experimentu ukázaly, že jakost vzorků laserových návarů A1 až A5 navařených modrolátkovým laserem je obecně nižší ve srovnání s jakostí vzorků B1 a B2 připravených za pomoci infračerveného laseru.

Nedestruktivní testování série vzorků A odhalilo, že na povrchu všech zkoumaných vzorků A1 až A5 vzorků se vyskytuje četný výskyt rozstříku a dále velké množství pórů. U vzorků A2 a A3 navíc došlo v oblasti ukončení kladení laserových housenek k nadměrnému přetečení, které se na vzorcích projevilo tvorbou velkých kapek mědi.

Z metalografického zkoumání vzorků A1 až A5, navařených modrolátkovým laserem, byla odhalena přítomnost mikrotrhlin v oblasti hranice ztavení mezi laserovým návarem a substrátem. Na jednotlivých vzorcích bylo také pozorováno výrazné promísení přídavného materiálu se substrátem. Heterogenita vzorků byla pozorována v závislosti na navařovaných parametrech a souvisela zejména s použitým výkonem laseru. EDX analýza chemického složení z povrchové vrstvy ukázala, že u vzorků A1; A2; A3, které byly navařeny při výkonu  $P = 1400$  W, nepřesáhla koncentrace mědi  $80$  hm. %. Zejména u vzorku A2, u kterého se navíc oproti vzorku A1 snížila hodnota navařovací rychlosti  $v_c$ , byla naměřena hodnota obsahu mědi v podpovrchové vrstvě pouhých  $49,0$  hm. %. Kdežto u vzorku A4, při jehož navařování byl

použitý výkon pouhých  $P = 625$  W, dosahoval obsah mědi, změřený z podpovrchové oblasti, 85,1 hm. %. Na základě nízkého promísení a odhalení pouze malého množství vad, byl vzorek A4 vyhodnocen jako vzorek s nejvyšší jakostí z hodnocené série vzorků A. Metalografickou analýzou bylo dále zjištěno, že:

- vzorky A1; A2; A3 a A5 obsahují extrémní množství pórů,
- překrytí jednotlivých navařených housenek u vzorku A3 bylo nedostatečné,
- nedostatečný překryv byl také pozorován u vzorku A5, kde na sebe jednotlivé laserem navařené housenky nenavazovaly.

Na základně výše uvedeného hodnocení, byly vady na vzorcích A1; A2; A3; A5 vyhodnoceny jako nepřijatelné.

Druhá série vzorků B, připravených infračerveným laserem, obsahovala méně povrchových a podpovrchových vad, než série vzorků A navařena modrolátkovým laserem.

Nedestruktivními zkouškami byla odhalena pouze přítomnost kapiček mědi na povrchu laserového návaru B1, který způsobil rozstřík tavné lázně. Tato vada byla pozorována pouze u vzorku B1, neboť u vzorku B2 byly kapičky mědi přítomné na povrchu laserového návaru dodatečnou operací přetaveny, což ale mělo za následek vytvoření povrchové oxidické vrstvy, která byla odhalena na základě metalografického hodnocení. Metalografickou analýzou bylo dále zjištěno, že:

- v laserovém návaru vzorku B1 byla identifikována přítomnost trhlin, pórů a mikroředin,
- fázově odlišné oblasti, které obsahovaly přednostně chemické prvky ze substrátu byly na své hranici pokryty tenkými vrstvami oxidů.

EDX analýzou chemického složení, stanovenou v povrchových oblastech návarů, bylo zjištěno, že obsah mědi neklesl v dané měřené lokalitě pod hranici 80 hm. %.

Z vyhodnocených výsledků zkoušek plyne, že vzorky navařené infračerveným diodovým laserem LDF 10000-100 dosahují daleko lepší jakosti než vzorky připravené na modrolátkovém laseru LDMblue 1800-60, které ve stávající podobě nejsou vhodné k možnému budoucímu využití.

Na problematiku laserového navařování mědi o vysoké čistotě by na základně výsledků předložené diplomové práce mohly navázat i další budoucí výzkumné programy. Do experimentálního programu nebyly zařazeny vzorky navařené zelenolátkovým laserem, který se jako laserový zdroj k navařování čisté mědi rovněž používá a byl též popsán v rešeršní části. Vzorky navařené zelenolátkovým laserem by mohly být v budoucnu stejným způsobem vyhodnoceny a porovnány s výsledky dosaženými v předložené diplomové práci.

Dalším předmětem zkoumání by mohla být snaha o optimalizaci procesních podmínek laserového navařování mědi o vysoké čistotě za pomoci modrolátkového laseru.

## 11 Literatura

- [1] HEMMATI, I. *Laser-deposited metallic coatings*. Ph.D. Thesis. Zernike Institute: 2013-17. ISBN 978-90-77172-94-0
- [2] KLUFOVÁ, P., *Odolnost proti degradaci laserem navařených austenitických vrstev*, Plzeň: Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní., 2018.
- [3] Laserové navařování – LaserTherm. Homepage - LaserTherm [online]. Copyright © [cit. 07.12.2020]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-navarovani-kovu>
- [4] What Is Laser Cladding: Characteristics & Applications / *MachineMfg. MachineMfg.com / Specialized in the metalworking industry* [online]. Copyright © 2020 MachineMfg [cit. 07.12.2020]. Dostupné z: <https://www.machinemfg.com/what-is-laser-cladding/>
- [5] *Skupina ČEZ* [online]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>
- [6] Rozdělení laserů – LASCAM systems. [online]. Copyright © LASCAM systems s.r.o. [cit. 07.12.2020]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
- [7] C. Leyens, E. Beyer, 8 - *Innovations in laser cladding and direct laser metal deposition*, Editor(s): J. Lawrence, D.G. Waugh, In Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Laser Surface Engineering, Woodhead Publishing, 2015, Pages 181-192, ISBN 9781782420743, <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-074-3.00008-8>
- [8] Luisa Quintino, 1 - *Overview of coating technologies*, Editor(s): Rosa Miranda, Surface Modification by Solid State Processing, Woodhead Publishing, 2014, Pages 1-24, ISBN 9780857094681, <https://doi.org/10.1533/9780857094698.1>
- [9] U. de Oliveira, V. Ocelík, J.Th.M. De Hosson, *Analysis of coaxial laser cladding processing conditions*, Surface and Coatings Technology, Volume 197, Issues 2–3, 2005, Pages 127-136, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.06.029>
- [10] *Advantages & Disadvantages | DEGRADATION AND SURFACE ENGINEERING. DEGRADATION AND SURFACE ENGINEERING* [online]. Dostupné z: <https://shusuperblog.wordpress.com/advantages-disadvantages/>
- [11] MRŇA, PH.D., RNDr.Libor. *Navarování laserem: laser cladding* [online]. In: . [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_navarovani\\_laserem\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_navarovani_laserem_mrna.pdf)
- [12] MORGADO, Teresa a Catarina VALENTE. Development status of LASER Cladding and the new metallic alloys [online]. 2018 [cit. 2019-12-06]. DOI: 10.20944/preprints201805.0417.v1. Dostupné z: <https://www.preprints.org/manuscript/201805.0417/v1>
- [13] 3D Tech: Rapid Prototyping [online]. Dostupné z: <https://www.3dtech.cz/rapid-prototyping/>
- [14] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.

- [15] Svařování mědi vysokovýkonnými vláknovými lasery. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. Copyright © 2020 www.mmspektrum.com [cit. 07.12.2020]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svarovani-medi-vysokovykonnymi-vlaknovymi-lasery.html>
- [16] *Svařování mědi – konec odšťiků!* | TRUMPF. [online]. Copyright © 2020 [cit. 07.12.2020]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/reseni/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/svarovani-medi/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/svarovani-medi/)
- [17] Siva Prasad, H., Brueckner, F., Volpp, J. *et al.* Laser metal deposition of copper on diverse metals using green laser sources. *Int J Adv Manuf Technol* **107**, 1559–1568 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05117-z>
- [18] BERGSTRÖM, David. *The absorption of laser light by rough metal surfaces*. Luleå University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Manufacturing Systems Engineering, 2008:08. ISSN: 1402-1544; ISRN: LTU-DT--08/08--Se.
- [19] Tolochko NK, Khlopkov YV, Titov VI, Ignatiev MB, Mozzharov SE, Laoui T (2002) Absorptance of powder materials suitable for laser sintering. *Rapid Prototyp J* 6:155–161. <https://doi.org/10.1108/13552540010337029>
- [20] R. Higashino, Y. Sato, S. Masuno, T. Shobu, Y. Funada, N. Abe, and M. Tsukamoto "Development of blue diode laser for additive manufacturing", *Proc. SPIE 11271, Laser 3D Manufacturing VII*, 1127114 (2 March 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2543119>
- [21] Simon W. Britten and Sörn Ocylok "Blues skies for copper cladding with 450nm", *Proc. SPIE 10909, Laser 3D Manufacturing VI*, 109090C (7 March 2019); <https://doi.org/10.1117/12.2506007>
- [22] Masahiro Tsukamoto "Developments of high power blue diode laser systems for laser metal deposition and welding of pure copper materials", *Proc. SPIE 11262, High-Power Diode Laser Technology XVIII*, 112620M (2 March 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2551900>
- [23] Hara, T., Sato, Y., Higashino, R. *et al.* Pure copper layer formation on pure copper substrate using multi-beam laser cladding system with blue diode lasers. *Appl. Phys. A* **126**, 418 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03559-6>
- [24] *Laser Welding Copper with Blue Diode Lasers* | LASERLINE. 301 Moved Permanently [online]. Copyright © 2020 Laserline GmbH [cit. 07.12.2020]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/laser-welding-copper/>
- [25] Shuzhen Zhao, Shengfeng Zhou, Min Xie, Xiaoqin Dai, Dongchu Chen, Lai-Chang Zhang, *Phase separation and enhanced wear resistance of Cu<sub>88</sub>Fe<sub>12</sub> immiscible coating prepared by laser cladding*, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 8, Issue 2, 2019, Pages 2001-2010, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.12.018>
- [26] M. Mueller, O. Hentschel, M. Schmidt and J. Franke, "Copper circuit traces by laser cladding with powder injection for additive manufactured mechatronic devices," *2016 IEEE 18th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, Singapore, 2016, pp. 602-605, doi: 10.1109/EPTC.2016.7861551



- [27] Dai, Xiaoqin & Xie, Min & Zhou, Shengfeng & Wang, Chunxia & Gu, Menghao & Yang, Jiaoxi & Li, Zhengyang. (2018). *Formation mechanism and improved properties of Cu<sub>95</sub>Fe<sub>5</sub> homogeneous immiscible composite coating by the combination of mechanical alloying and laser cladding*. Journal of Alloys and Compounds. 740. 10.1016/j.jallcom.2018.01.007.
- [28] Coating | Deloro. Home | Deloro [online]. Dostupné z: <https://www.deloro.com/products/engineered-components/coating/>
- [29] Applications – Laser Cladding Singapore. *Laser Cladding Singapore – Laser-Powder-Cladding* [online]. Copyright © 2020 Laser Cladding Singapore Pte Ltd. All rights reserved. Web design by [cit. 07.12.2020]. Dostupné z: <https://laser-clad.com/applications/>
- [30] Press release detail page | TRUMPF. [online]. Copyright © 2020 [cit. 07.12.2020]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/en\\_SG/presse/press-releases-local/press-release-detail-page/release/additive-manufacturing-trumpf-at-the-pro-am-2018/](https://www.trumpf.com/en_SG/presse/press-releases-local/press-release-detail-page/release/additive-manufacturing-trumpf-at-the-pro-am-2018/)
- [31] *Matematická sekce | Matematicko-fyzikální fakulta Univerzita Karlova* [online]. Copyright © [cit. 07.12.2020]. Dostupné z: <https://www2.karlin.mff.cuni.cz/~pposta/azsmart/sobota/prvni.pdf?fbclid=IwAR2Ly-XWLYGEdiKggASKS9EbrDt5tS7fBFgAVu3BPI2bndAwNd84X7KGTm>
- [32] *Emise a absorpce světla :: MEF. Fyzika :: MEF* [online]. Copyright © 2006 [cit. 07.12.2020]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/776-emise-a-absorpce-svetla>
- [33] *Blauer Diodenlaser: Laser bis 2000 W | LASERLINE. 301 Moved Permanently* [online]. Copyright © 2021 Laserline GmbH [cit. 10.05.2021]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/pt-int/ldm-blue-blauer-diodenlaser/>
- [34] *Laserline-LDF-diode-laser-the-benchmark-for-diode-lasers. 301 Moved Permanently* [online]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/fileadmin/Katalog/Produkte/Laserline-LDF-diode-laser-the-benchmark-for-diode-lasers/Laserline-LDF-diode-laser-the-benchmark-for-diode-lasers.html>
- [35] MDT. Ocel 17 247: Cr Ni Ti. Praha: Český normalizační institut, 1974.
- [36] Metco 55 Thermal Spray Powder, *Material Product Data Sheet* Online | myMetco. [online]. Dostupné z: <https://mymetco.oerlikon.com/en-us/product/metco55>
- [37] 1.4541 (AISI 321), S32100 | Datasheet | METALCOR. 301 Moved Permanently [online]. Copyright © Metalcor GmbH [cit. 20.05.2021]. Dostupné z: <http://www.metalcor.de/en/datenblatt/33/>
- [38] ČSN EN ISO 6520-1. *Svařování a příbuzné procesy: Klasifikace geometrických vad kovových materiálů. Část 1: Tavné svařování*. Praha: Český normalizační institut, Leden 2008.
- [39] ČSN EN ISO 17637 (051180). *Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [40] ČSN EN ISO 17636 (051150). *Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení*. Praha: Český normalizační institut, 2013.