

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2341 Strojírenství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská
metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metalografické hodnocení laserových návarů na bázi
kompozitních materiálů

Autor: **Kamila Doležalová**
Vedoucí práce: **Ing. Pavla BARTOŇ KLUFOVÁ, Ph.D**

Akademický rok 2018/2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Kamila DOLEŽALOVÁ**

Osobní číslo: **S16B0034P**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**

Název tématu: **Metalografické hodnocení laserových návarů na bázi kompozitních materiálů.**

Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

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

1. Technologie laserového navařování.
2. Laserové navařování mědi - současný stav poznání.
3. Materiály s vysokým poločasem rozpadu.
4. Experimentální program.
5. Metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů.
6. Diskuse výsledků.
7. Závěr.

Rozsah grafických prací: fotodokumentace, obrázky

Rozsah kvalifikační práce: 30-40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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

ZHANG, Y., TU, Y., XI, M., SHI, L., *Characterization on laser clad nickel based alloy coating on pure copper*, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, Elsevier 2008

LI, N., LUO, J., ZHAO, P., SHA, M., LI, S. & ZHANG, J., *Microstructure and property of laser treated copper cladding on pure iron*, *Materials Research Innovations*, 2014, ISSN: 1432-8917

aktuální odborné články z citačních databází Web of Science a Scopus zaměřené na problematiku laserového navařování mědi (od roku 2010)

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavla Klufová

Centrum energetického výzkumu


Konzultant bakalářské práce:

Ing. Vojtěch Průcha

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání bakalářské práce: 5. října 2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 24. května 2019


Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. října 2018

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: 24.5.2019.....	KATEDRA	ROK	Doležalová.....
			podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Doležalová	Jméno Kamila	
STUDIJNÍ OBOR	Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Bartoň Klufová, PhD.	Jméno Pavla	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Metalografické hodnocení laserových návarů na bázi kompozitních materiálů		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	48	TEXTOVÁ ČÁST	48	GRAFICKÁ ČÁST	-
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS	Bakalářská práce se skládá ze dvou částí, a to teoretické a experimentální. Teoretická část zahrnuje popis technologie laserového navařování a popis materiálů s vysokou korozní a biodegradabilní odolností. Experimentální část obsahuje metodiku přípravy metalografických výbrusů a metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič a měď-sklo na substrátu z oceli C45.
KLÍČOVÁ SLOVA	Laserové navařování, laser, metalografické hodnocení, kompozitní laserový návar,

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Doležalová	Name Kamila		
FIELD OF STUDY	Materials Engineering and Engineering Matallurgy			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Bartoň Klufová, PhD.	Name Pavla		
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Metallographic evaluation of laser clad based on composite materials			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2019
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	48	TEXT PART	48	GRAPHICAL PART	-
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION	<p>This bachelor thesis is composed of two parts. One of them is theoretical and the other experimental. The theoretical part consists of a description of laser cladding technology and description of materials with high corrosion and biodegradability resistance. The experimental part focuses on the methodology of preparation metallographic specimens and metallographic evaluation of composite laser clad based on copper-basalt and copper - glass on the substrate of steel C45.</p>
KEY WORDS	Laser cladding, laser, metallographic evaluation, composite based laser clad,

Poděkování

Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucí této bakalářské práce Ing. Pavle Bartoň Klufové, PhD. a konzultantům Ing. Vojtěchu Průchovy a Haně Pasiarové za trpělivost, cenné rady a pomoc při zpracování bakalářské práce.

Dále bych ráda poděkovala Ing. Marku Vostřákovi, PhD. a týmu lidí z NTC při ZČU v Plzni za přípravu vzorků pro experimentální program.

Obsah

Přehled použitých zkratk	8
Úvod	9
1 Laser	11
1.1 Princip laseru	11
1.2 Geometrie laserového paprsku	11
1.3 Lasery pro laserové navařování	12
2 Technologie laserového navařování s přídavným materiálem ve formě prášku	13
2.1 Geometrie laserového návaru	14
2.2 Zařízení pro laserové navařování	14
2.2.1 Povlakovací hlava	14
2.3 Vstupní, procesní a výstupní charakteristiky laserového návaru	15
2.4 Využití technologie laserového navařování	15
3 Laserové navařování mědi	18
3.1 Laserové navařování mědi na substrát z oceli	18
3.2 Parametry ovlivňující geometrii laserového návaru	19
4 Materiály s extrémně vysokou korozní a biodegradabilní odolností	21
4.1 Měď	21
4.2 Čedič	23
4.3 Sklo	24
5 Popis experimentálního programu	26
5.1 Cíle experimentálního programu	26
5.2 Použité stroje, přístroje, zařízení	26
5.3 Specifikace zařízení pro laserové navařování	27
5.4 Procesní podmínky laserového navařování experimentálních vzorků	27
6 Charakteristika základního a přídavných materiálů	28
6.1 Základní materiál	28
6.2 Přídavné materiály	29
6.2.1 Měděný prášek	30
6.2.2 Čedičový prášek	30
6.2.3 Ultrajemný sklářský písek	31
7 Metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů	33
7.1 Příprava metalografických vzorků	34
7.2 Kompozitní laserový návar na bázi měď-čedič (5 hm. % čediče)	35
7.3 Kompozitní laserový návar na bázi měď-čedič (10 hm. % čediče)	35
7.4 Kompozitní laserový návar na bázi měď-čedič (15 hm. % čediče)	39
7.5 Kompozitní laserový návar na bázi měď-sklo (10 hm. % skla)	42
8 Diskuze výsledků	43
9 Závěr	45
Použitá literatura	46

Přehled použitých zkratk

VP	vyhořelé (jaderné) palivo
SÚRAO	Správa úložišť pro radioaktivní odpad
LASER	Laser Amplification by Stimulated Emission of Radiation
λ	vlnová délka [nm]
θ	úhel divergence [rad]
r_{01}	průměrem svazku v ohnisku [mm]
r	poloměr radiálně symetrického svazku [mm]
z	osa laserového paprsku
Z_0	místo ohniska vzhledem k libovolné souřadnici podél osy laserového svazku
$r(z)$	poloměr svazku v závislosti na místě vzhledem k libovolné souřadnici podél osy laserového svazku
$I(r)$	intenzita laserového paprsku v závislosti na poloměru svazku
HPDL	vysokovýkonový diodový kontinuální laser (High Power Diode Laser)
Nd:YAG	pevnolátkový laser, kde aktivní prostředí tvoří krystal Yttrium Aluminium Granátu dopovaný ionty neodymu
h	výška návaru [mm]
w	šířky návaru [mm]
θ	smáčivost [°]
b	hloubky závaru [mm]
CNC	číslicové řízení počítačem (Computer Numeric Control)
CAD/CAM	programy pro design komponent (Computer-Aided Design – „počítačem podporované navrhování“ a Computer-Aided Manufacturing – „počítačová podpora obrábění“)
EDX	energieově disperzní elektronová mikroanalýza (Energy – Dispersive Analysis of X-rays)
E	Youngův model pružnosti v tahu [MPa]
P	měrná hmotnost [kg/m^3]
R_a	střední aritmetická úchylka povrchu
HV	tvrdost dle Vickerse
F	zatěžující síla [N]
OP-U	suspenze koloidního křemíku pro finální leštění materiálů

Úvod

Ukládání vyhořelého radioaktivního paliva do hlubinných úložišť patří v současnosti k celosvětově diskutované problematice. Vyhořelé jaderné palivo (dále jen VP) vzniká jako vedlejší produkt činnosti jaderně-energetických a výzkumných reaktorů. I přesto, že VP z jaderných reaktorů tvoří méně než 1 % objemu všech jaderných odpadů na světě, obsahuje přes 90 % veškeré radioaktivity. Jeden reaktor s výkonem kolem 1000 MW produkuje ročně cca 30 tun VP, což díky vysoké hustotě VP představuje objem cca 1,5 m³. Palivo vyňaté z reaktoru obsahuje stále ještě 95 % nespotřebovaného uranu, z toho 1 % štěpitelného ²³⁵U a 1 % štěpitelného izotopu plutonia ²³⁹Pu. V důsledku radioaktivního rozpadu VP postupně ztrácí svou radioaktivitu a četné radioizotopy přecházejí na neaktivní prvky, jejichž oddělení z odpadu by v budoucnu mohlo být zajímavé. Jedná se např. o platinu, ruthenium, rhodium, paladium, stříbro, prvky vzácných zemin atd. [1]

Skladování VP po vyvezení z reaktoru je realizováno v bazénech umístěných v těsné blízkosti reaktoru. VP je v bazénech uloženo po dobu 3 – 4 let, během kterých dochází k poklesu radioaktivity VP na cca 50 % z původní hodnoty. Následně je VP přemístěno do meziskladů (tzv. suché skladování), kde je bezpečně uloženo po dobu několika desítek let. [2]

V meziskladu je VP skladováno pro případ možného následného přepracování k dalšímu průmyslovému či vědeckému využití nebo ke konečnému uložení.

Bezpečnou likvidaci radioaktivních odpadů garantuje stát prostřednictvím Správy úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO). Základním požadavkem SÚRAO je zabezpečit trvalé oddělení radioaktivních odpadů od životního prostředí, a to po celou dobu, po kterou mohou pro člověka a jeho životní prostředí představovat riziko. Je to proces sestávající z mnoha kroků, který se řídí legislativními opatřeními a děje se pod dohledem státních kontrolních institucí. [3]

V současné době není znám efektivní a ekonomicky rentabilní postup pro přepracování radioaktivního paliva, resp. pro zastavení štěpné reakce radionuklidů. Česká republika se připojila k celosvětovému řešení problematiky nakládání s VP, jímž je ukládání VP do hlubinných úložišť.

V České republice probíhá vyhledávání vhodné lokality pro hlubinné úložiště VP již od 80. let minulého století, nicméně v roce 2025 budou vládě České republiky doporučeny SÚRAO dvě nejvhodnější lokality (hlavní a záložní). Finální rozhodnutí o výstavbě hlubinného úložiště bude záležet na politické reprezentaci České republiky. V roce 2018 bylo prostřednictvím SÚRAO zkoumáno celkem devět lokalit vytipovaných pro umístění hlubinného úložiště. [4]

Uvedení hlubinného úložiště do provozu je podle SÚRAO plánováno na rok 2065. [5] Do té doby je nutné navrhnou koncepci obalového souboru, vyrobit a otestovat prototyp a následně zahájit sériovou výrobu obalových souborů pro ukládání VP do hlubinných úložišť.

Na funkční vlastnosti obalového souboru pro ukládání VP jsou kladeny extrémně vysoké nároky, a to zejména v oblasti korozní odolnosti obalového souboru. SÚRAO stanovil plánovanou životnost obalového souboru v hlubinném úložišti na 100 000 let. Z tohoto důvodu je nezbytné zaměřit aktuální i budoucí vědecký výzkum na vývoj koncepce obalového souboru, jehož vnější korozivzdorná vrstva bude odolná i působení biodegradabilní procesů v hlubinném úložišti.

Předložená bakalářská práce je zaměřena na metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič a měď-sklo. Navržené materiály mají díky svým vlastnostem vysoký potenciál pro uplatnění v aplikačně biodegradabilním a korozním prostředí. Kompozitní laserové návary na bázi měď-čedič a měď-sklo jsou tedy teoreticky vhodné pro použití na vnější korozivzdornou vrstvu obalového souboru pro ukládání VP.

Cílem bakalářské práce je zdokumentovat a popsat vnitřní strukturu výše uvedených kompozitních laserových návarů a charakter případných vnitřních vad návarů.

1 Laser

V 21. století došlo ke značnému rozvoji vědy v oblasti fyziky laserů a laserových technologií. Právě díky nově získaným poznatkům je možné využívat lasery ke stále se rozšiřujícímu portfoliu aplikací. Vysoká koherence a monochromaticnost laserového svazku předurčují laser k následujícím použití: laserové navařování, „laser peening“ (zpevňování povrchů pomocí pulzního laseru), svařování laserem, laserové povrchové kalení, popouštění a obrábění materiálů laserem. [6] [7]

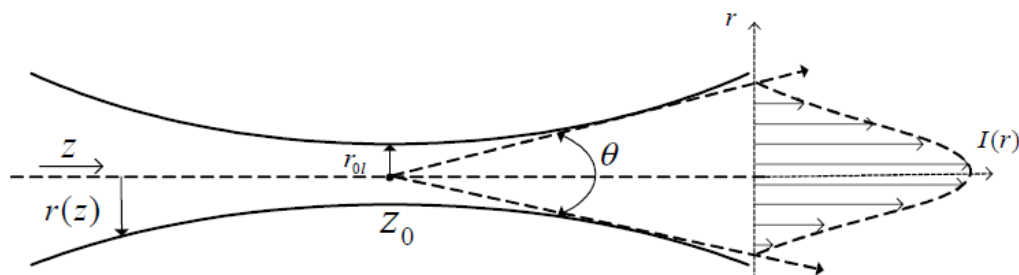
Slovo „LASER“ je akronymem anglického sousloví „Laser Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což v českém překladu znamená „zesílení světla stimulovanou emisí záření“. Laser obecně představuje generátor a optický zesilovač elektromagnetického záření. Princip fungování laseru je založen na Albertem Einsteinem popsaném kvantovém jevu, který je obecně známý pod označením „stimulovaná emise“. [7]

1.1 Princip laseru

Princip fungování laseru je založen na stimulované emisi fotonů, ke které dochází v aktivním prostředí laseru. „Elektrony pevných, kapalných nebo plyných látek jsou excitovány (buzeny) na vyšší energetické hladiny a při jejich opětovném přeskočení zpět na nižší energetickou hladinu je vyzářen foton. V dané látce pak dochází k exponenciálnímu nárůstu emitovaných fotonů, které se kumulují mezi dvěma zrcadly a při překročení stanovené mezní energie jedno ze zrcadel – polopropustné, vyzáří laserový paprsek či impulz.“ [8]

1.2 Geometrie laserového paprsku

Důležitým parametrem při použití laseru je kvalita svazku laseru. Kvalita svazku je určena mírou schopnosti svazku být fokusován. Laserový svazek má své ohnisko, které se při laserovém navařování fokusuje na rovinu povrchu substrátu. Lasery, používané pro technologii laserového navařování, se v naprosté většině případů vyznačují Gaussovským rozložením energie laserového svazku. Maximální energie laserového svazku je tedy soustředěna do úzkého kužele, paprsek se také vyznačuje vlnovou délkou λ [nm], úhlem divergence θ [rad] a průměrem svazku v ohnisku r_0 [mm] (viz obr. 1-1). Na obrázku 1-1 jsou dále vyznačeny: r – poloměr radiálně symetrického svazku [mm], z – osa laserového svazku, Z_0 – místo ohniska vzhledem k libovolné souřadnici podél osy laserového svazku, $r(z)$ - poloměr svazku v závislosti na místě vzhledem k libovolné souřadnici podél osy laserového svazku a $I(r)$ – intenzita laserového paprsku v závislosti na poloměru svazku. Poloměr svazku v ohnisku je úměrný vlnové délce laseru. Čím menší je vlnová délka generovaného laserového svazku, tím snazší je jeho fokusace. [9] [10]

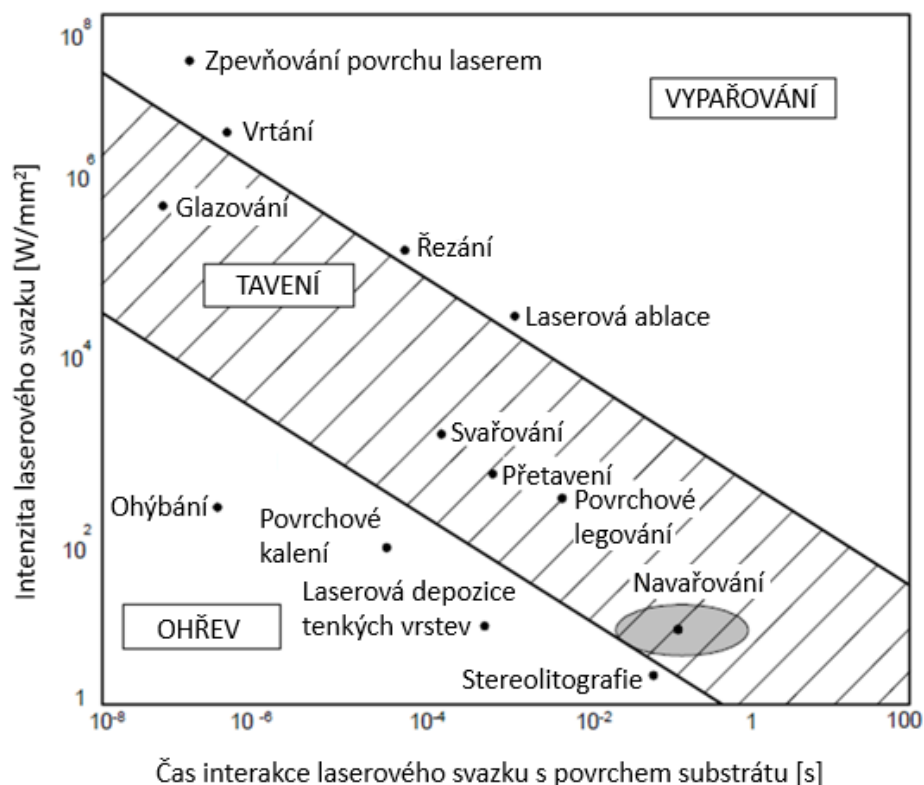


Obrázek 1-1 Geometrie laserového paprsku [7]

1.3 Lasery pro laserové navařování

K laserovému navařování jsou nejčastěji používány vysoce výkonové diodové lasery známé pod označením HPDL lasery (high-power diode laser) a dále pak vláknové lasery a pevnolátkové Nd:YAG lasery (aktivní prostředí tvoří krystal Yttrium Aluminium Granátu dopovaný ionty neodymu). [7]

Laserový paprsek generovaný typem a konstrukcí použitého laseru se vyznačuje intenzitou laserového svazku, která v kombinaci s interakčním časem působení laserového svazku na povrch materiálu předurčuje daný typ laseru k vybraným průmyslovým aplikacím (viz obr. 1-2). Pro technologii laserového navařování jsou obvykle využívány hodnoty intenzity laserového svazku $70 - 100 \text{ W/mm}^2$ a interakční čas $0,01 - 1 \text{ s}$, který v praxi představuje procesní rychlost navařování.



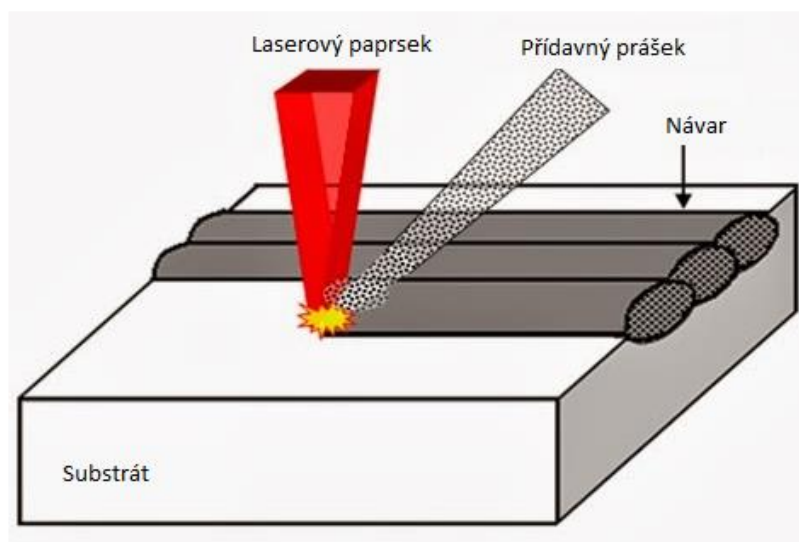
Obrázek 1-2 Vztah mezi intenzitou laserového svazku a interakčním časem pro jednotlivé druhy aplikace laserových technologií [7]

2 Technologie laserového navařování s přídavným materiálem ve formě prášku

Laserové navařování je technologie, která využívá energii laserového svazku k natavení jak přídavného materiálu ve formě prášku, tak povrchu substrátu, čímž je dosaženo vytvoření kompaktního návaru na povrchu substrátu.

Během procesu laserového navařování (technologie laserového navařování je v zahraniční literatuře známá pod označení „*laser cladding*“) dochází ke vzniku tavné lázně svarového kovu, který je tvořen nataveným přídavným materiálem a substrátem (viz obr. 2-1). Úzká oblast, ve které se oba materiály metalurgicky spojí, je nazývána promíšením (promíšení bývá nejčastěji označováno „D“ – z anglického slova „*dilution*“). Promíšení mezi laserovým návarem a substrátem by dle dostupné vědecké literatury nemělo přesáhnout hodnotu $D > 10\%$. [11]

Výsledkem procesu laserového navařování je vytvoření kompaktního návaru na povrchu substrátu s minimálním podílem vnitřních vad a s definovanými vlastnostmi návaru jako je např. vysoká odolnost proti korozi, odolnosti proti abrazivnímu opotřebení, vysoká tvrdost návaru atd.



Obrázek 2-1 Schematické znázornění principu technologie laserového navařování [12]

„Mezi základní výhody laserového navařování patří:

- Množství přídavného materiálu je možné plynule regulovat,
- lze použít více než jeden druh prášku při navařování – dle aplikace součásti je možné přizpůsobit chemické složení návaru jeho použití,
- metalurgické spojení návaru se základním materiálem,
- tloušťka návaru od 0,2 mm do desítek mm,
- jedná se o automatizovaný proces.“ [11]

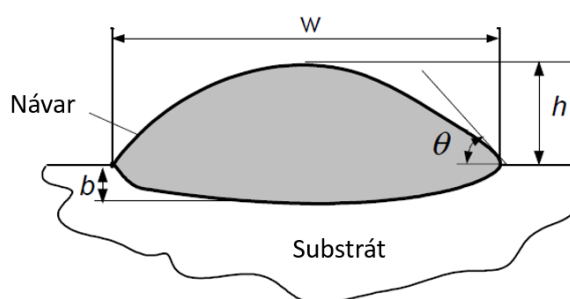
Díky výše zmíněným výhodám nachází laserové navařování uplatnění v praxi při opravách opotřebovaných nebo jinak poškozených součástí, dále při navařování ochranných povrchů a v neposlední řadě také při výrobě nových dílů.

„S technologií laserového navařování jsou spojeny tyto nevýhody:

- Vysoké investiční náklady nezbytné k pořízení zařízení pro navařování laserem (laser, manipulátor, úprava pracoviště, školení personálu atd.),
- tepelné ovlivnění základního materiálu,
- změna struktury základního materiálu v oblasti hranice ztavení,
- vysoká energetická náročnost procesu,
- zbytková napětí v navařené vrstvě,
- možnosti výskytu vnitřních vad při nesprávném nastavení procesu.“ [11]

2.1 Geometrie laserového návaru

Geometrie laserového návaru je zobrazena na příčném řezu jednostopým laserovým návarem (viz obr. 2-2). Geometrické charakteristiky laserového návaru jsou definovány pomocí: výšky návaru h [mm], šířky návaru w [mm], smáčivosti dané úhlem θ [°] a hloubky závaru b [mm]. [7]



Obrázek 2-2 Příčný řez jednostopým laserovým návarem; základní geometrické charakteristiky laserového návaru [7]

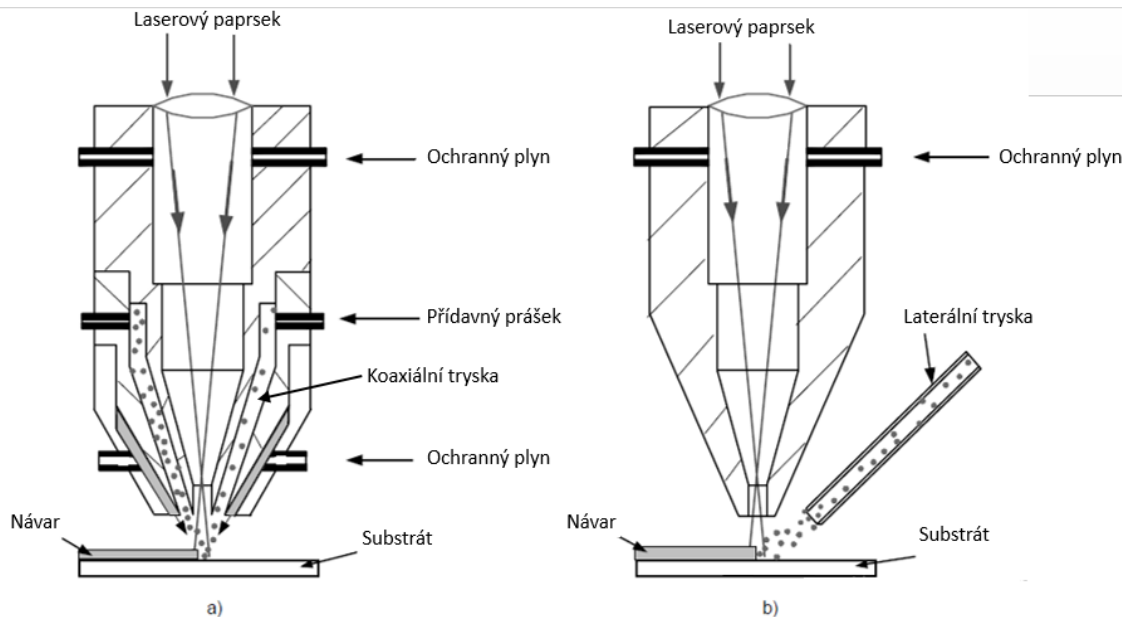
2.2 Zařízení pro laserové navařování

Přístrojové vybavení pracoviště pro laserové navařování s přídavným materiálem ve formě prášku zahrnuje: laser, povlakovací hlavu, podavač prášku, průmyslový robot, rotační polohovadlo nebo CNC pracoviště zajišťující sekundární pohyb navařovaného strojního dílu. [7]

2.2.1 Povlakovací hlava

Pro laserové navařování se používají dva druhy povlakovacích hlav, a to koaxiální a laterální. Schematické znázornění povlakovacích hlav je zobrazeno na obr. 2-3.

- Laterální – prášek je do tavné lázně přiváděn boční tryskou, která je separovaná od laserové hlavy,
- koaxiální – prášek je přiváděn tryskou v podobě mezikruží, která je umístěna v ose laserového svazku, navařování koaxiální tryskou je v praxi používáno pro tvarově složitější povrchy, protože pohyb navařovací hlavy není limitován přítomností trysky z boku laseru. [13] [7]



Obrázek 2-3 Umístění trysky pro podávání přídavného prášku; a) koaxiální, b) laterální [7]

2.3 Vstupní, procesní a výstupní charakteristiky laserového návaru

Parametry, procesy a vlastnosti, ovlivňující výslednou jakost laserového návaru, lze rozdělit do několika skupin:

- Parametry, vlastnosti a veličiny vstupující do procesu laserového navařování:
 - chemické složení substrátu a jeho tepelné zpracování; chemické složení přídavného materiálu; měrná tepelná kapacita přídavného prášku; zrnitost prášku; termo-fyzikální a optické vlastnosti substrátu a přídavného prášku; drsnost povrchu základního materiálu atd.,
 - typ laseru; výkon laseru; vlnová délka laseru; energetické rozložení paprsku; ohnisková vzdálenost atd.,
 - příčná a podélná procesní rychlost laseru; relativní zrychlení laseru atd.,
 - množství přidaného prášku na jednotku délky návaru; koaxiální/laterální způsob přivádění prášku; rychlost proudění ochranného plynu atd.,
 - předehřev základního materiálu; směr kladení housenek a jejich průřev; teplota a vlhkost okolního prostředí atd.,
- procesy během laserového navařování:
 - absorpce laserového svazku substrátem; difúze prvků; solidifikace; interakce mezi inertním plynem a tavnou lázní; interakce mezi laserem a substrátem atd. [7]

2.4 Využití technologie laserového navařování

Od 90. let minulého století, díky vývoji laserů a pokročilé robotice, nachází technologie laserového navařování stále širší možnosti uplatnění. Využití technologie laserového navařování v praxi je možné rozdělit do tří oblastí. První oblastí je navařování povrchů, které mají ochrannou funkci. Druhou oblastí jsou opravy opotřebených součástí a třetí oblastí je výroba nových dílů.

1) Navařování povrchů s ochrannou funkcí

Díky laserovému navařování je možné vytvořit funkční povrchový návar, který bude mít požadované vlastnosti definované uživatelem (např. odolnost proti korozi, otěruvzdornost, tvrdost, vysokoteplotní stabilita), zatímco jádro součásti bude mít vlastnosti substrátu. Nejčastěji se navařování povrchů s ochrannou funkcí uplatňuje u strojních dílů užívaných v energetice, v těžebním průmyslu a v hutnictví. Konkrétními příklady jsou lopatky turbín, vrtací nástroje, hřídele, ozubená kola, nože, formy, atd. [7]

2) Opravárenství

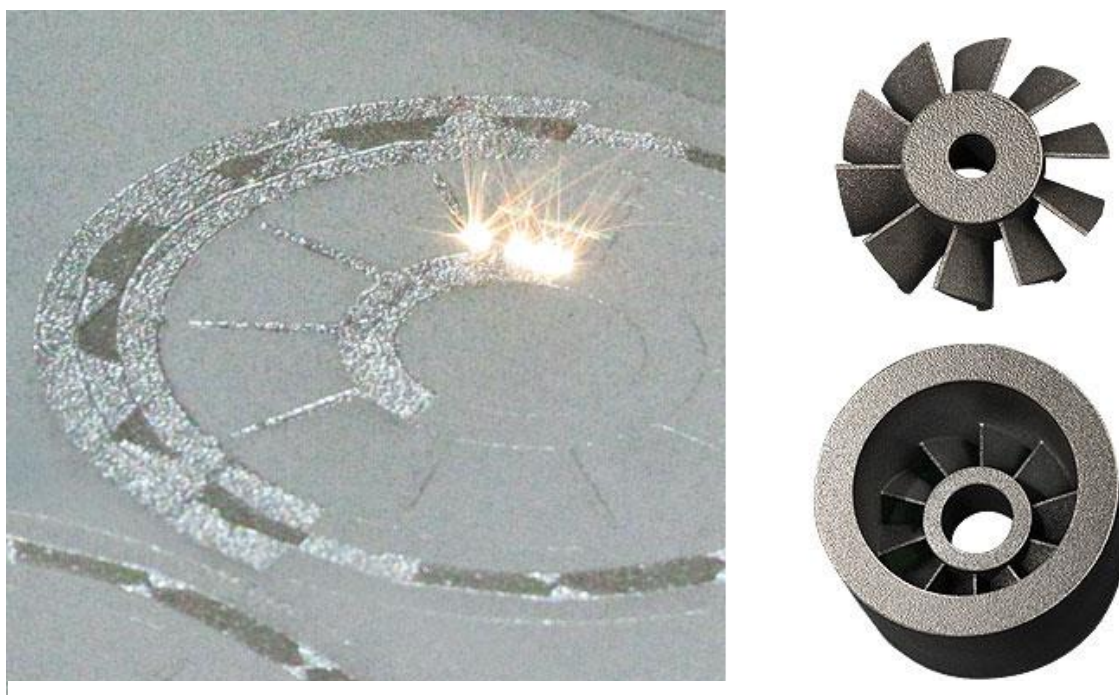
Laserovým navařováním je možné opravovat poškozené a opotřebované, konvenčním způsobem neopravitelné díly (viz obr. 2-4). Při opravě je nejprve součást obrobena a následně pískována pro zdrsnění povrchu. Vyšší drsnost povrchu zvyšuje absorptivitu laserového záření povrchem materiálu. Po pískování následuje očištění součásti a samotné laserové navařování. Finální úpravou bývá v naprosté většině případů broušení povrchu návaru na jeho užitnou výšku. [7] [11]



Obrázek 2-4 Vysoce opotřeбенý trn na výrobu trubek po 8 hodinách práce. Repasovaný trn s návarem na bázi karbidu wolframu a kobaltu. [14]

3) Rapid prototyping

Rapid prototyping je způsob výroby nových strojních dílů (viz obr. 2-5). Principem této technologie je postupné navařování vrstev prášku. Při této metodě výroby komponent se užívá CAD/CAM softwarů, které jsou přímo spojeny s výrobním zařízením. Mezi hlavní výhody rapid prototypingu patří vysoká přesnost výroby tvarově složitých součástí, zvýšení rychlosti jejich produkce, snížení času následného obrábění a tím i snížení nákladů na produkci. Využití této technologie nachází uplatnění především při výrobě řezných nástrojů a strojních dílů, které by jinak byly vyráběny složitější a časově náročnější cestou (např. odléváním, svařováním). [7] [15]



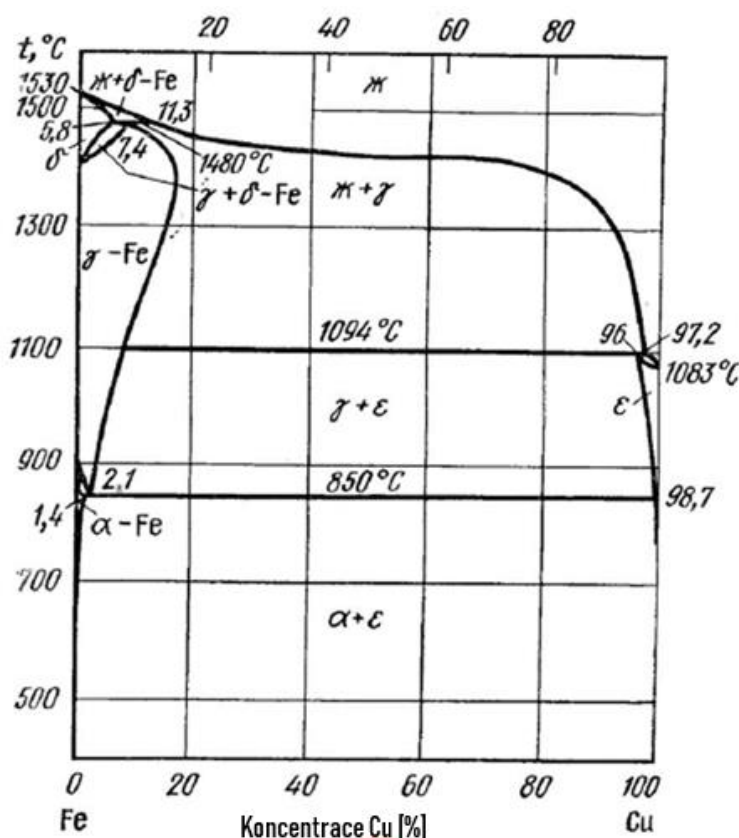
Obrázek 2-5 Příklad Rapid prototypingu komplexní geometrie [43]

3 Laserové navařování mědi

Tato kapitola byla vypracována za účelem zmapování současného stavu poznání vědy v oblasti technologie laserového navařování mědi o vysoké čistotě, případně slitin mědi. Z citačních databází Scopus a Web of Science byly vybrány aktuální vědecké publikace zaměřené na laserové navařování mědi a jejich slitin.

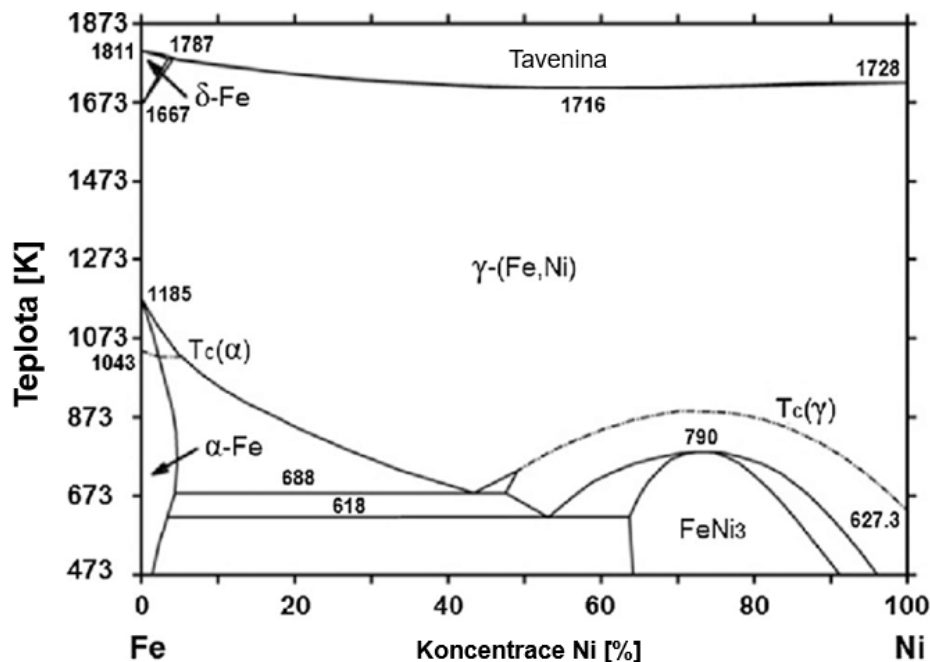
3.1 Laserové navařování mědi na substrát z oceli

Měď je kovový prvek načervenalé barvy. Pro binární slitinu měď-železo je typická oboustranná nerozpustnost v tuhém stavu (viz obr. 3-1). Přítomnost kyslíku a jeho interakce s měděným práškem pro laserové navařování je vysoce nežádoucí, neboť dochází k tvorbě oxidů CuO_2 a CuO , které výrazně ovlivňují následnou navařitelnost mědi. „Oxid měďný je v lité oceli téměř nerozpustný a vylučuje se na hranicích zrn v podobě křehkého eutektika ($\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$). Právě toto eutektikum může být příčinou krystalizačních a likvačních trhlin a zhoršuje mechanické vlastnosti spoje.“ Také přítomnost vodíku v měděném prášku pro laserové navařování je nežádoucí, neboť způsobuje následnou pórovitost a vznik trhlin v laserovém návaru. Dále dochází k reakci vodíku s CuO_2 na hranicích zrn. [16]

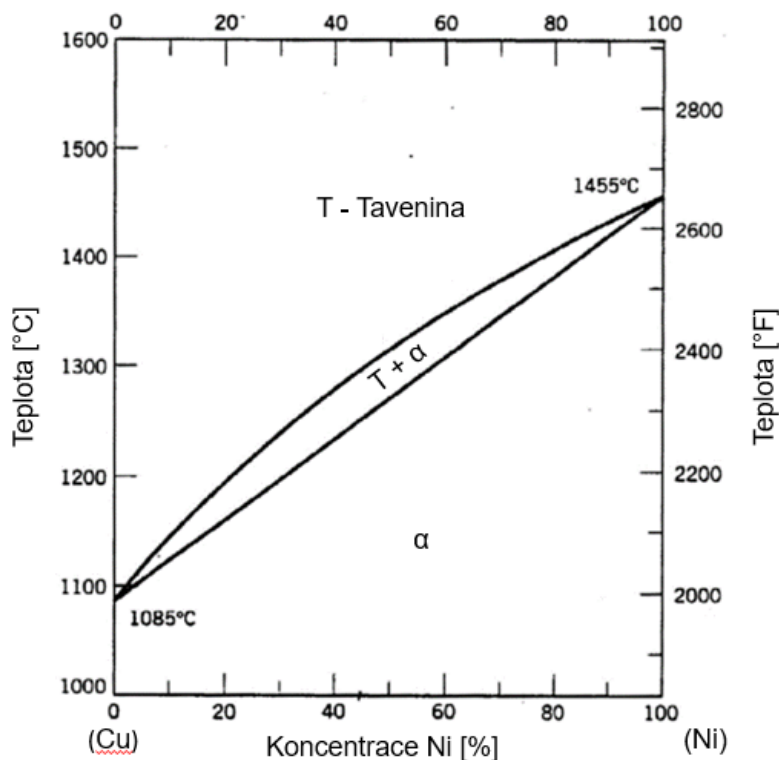


Obrázek 3-1 Binární diagram Fe-Cu [17]

Pro laserové navařování mědi a jejich slitin na ocelový substrát je nezbytné (díky vzájemné nerozpustnosti mědi a železa v tuhém stavu) využít mezivrstvy z materiálu, který bude v tuhém stavu rozpustný jak v mědi, tak v železe. Dlouholetou praxí osvědčeným způsobem je využití niklu a jeho slitin, který, jak dokládají binární diagramy Fe-Ni a Cu-Ni, se v tuhém stavu rozpouští s oběma kovy (viz obr. 3-2 a 3-3). [18]



Obrázek 3-2 Binární diagram Fe-Ni [19]



Obrázek 3-3 Binární diagram Cu-Ni [20]

3.2 Parametry ovlivňující geometrii laserového návaru

Výška návaru je ovlivněna rychlostí posuvu laserového svazku neboli procesní rychlostí navařování a množstvím přidaného prášku na jednotku délky návaru. Když je použita nízká hodnota množství přidaného prášku na jednotku délky, výška návaru je nízká, přilnavost prášku je vysoká díky značnému natavení substrátu. Pokud se množství přidaného prášku na jednotku délky zvyšuje, tvoří se vyšší návar. Avšak při příliš velkém zvýšení množství přidaného prášku na jednotku délky se méně prášku

nataví a je obtížnější vytvořit navařovanou vrstvu. Na druhou stranu zvýšením procesní rychlosti je snížena výška návaru. [21]

Šířka návaru je ovlivněna především průměrem laserového paprsku. Vliv má také zvýšení množství přidaného prášku a procesní rychlosti, díky čemuž se šířka snižuje, protože energie laserového svazku je spotřebována na tavení prášku. [21]

Hloubka závaru je snižována zvýšením množství přidaného prášku na jednotku délky návaru. Pro malé hodnoty množství přidaného prášku na jednotku délky a zvyšující se hodnotu procesní rychlosti se zvyšuje hloubka závaru. Zvýšením procesní rychlosti je možné snížit hloubku závaru. [21]

4 Materiály s extrémně vysokou korozní a biodegradabilní odolností

Pro výběr vhodného materiálu vnější vrstvy obalového souboru pro ukládání VP do hlubinných úložišť je nezbytné nejprve specifikovat požadavky na jeho vlastnosti:

- Extrémně vysoká korozní odolnost v daném expozičním prostředí po dobu > 100 000 let,
- houževnatost,
- technologická proveditelnost spojení povrchové úpravy se sendvičovou konstrukcí obalového souboru,
- jakost materiálu (bez přítomnosti povrchových a vnitřních vad). [22]

Předložená bakalářská práce je zaměřena na metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič a měď-sklo. Vybrané materiály (měď, čedič, sklo) se vyznačují extrémně vysokou dobou rozkladu v biodegradabilním prostředí, čímž se teoreticky zařazují mezi vhodné kandidáty pro aplikaci na vnější korozivzdornou vrstvu obalového souboru pro ukládání VP do hlubinných úložišť.

V níže uvedené kapitolách jsou popsány základní fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti mědi, čediče a skla. Dále jsou v příslušných podkapitolách 4.1 až 4.3 uvedeny informace o degradabilních procesech jednotlivých materiálů s důrazem na jejich korozní odolnost v různých expozičních prostředích.

4.1 Měď

Měď je žlutočervený kovový materiál s vysokým leskem, který je pozorovatelný jen v naleštěném stavu nebo čerstvě po procesu řezání materiálu. Při expozici mědi v okolní atmosféře vzduchu dochází působením přirozené vlhkosti vzduchu k rychlé ztrátě lesku vlivem oxidace povrchu. Vysoce čistá měď se vyznačuje relativně vysokou hustotou a dále pak elektrickou vodivostí (měď má po stříbru druhý nejmenší elektrický odpor, viz tabulka 1). Čistá měď je měkká, tvárná a také disponuje vysokou tepelnou vodivostí společně s dobrou odolností proti korozi.

Tabulka 1 Základní fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti mědi [23]

Relativní atomová hmotnost [-]	63,54
Hustota [g/cm³]	8,93
Teplota tavení [°C]	1084,88
Měrná tepelná kapacita [J/(kg·K)]	379,7
Tepelná vodivost [W/(m·K)]	401
Elektrická vodivost [S/m]	$6,07 \cdot 10^7$
Měrný elektrický odpor [$\Omega \cdot m$]	$0,0169 \cdot 10^{-6}$
Mez pevnosti tahu [MPa]	220 - 240
Mez kluzu v tahu [MPa]	140 - 180
Tvrdość dle Brinella [MPa]	874
Tažnost [%]	50

Poměrný obsah mědi na zemském povrchu je 50 mg/kg (4%), což je méně než zastoupení niklu a zinku. Přírodní měď se vyskytuje ve dvou izotopech, a to ^{63}Cu (69,17%) a ^{65}Cu (30,83%) především ve formě minerálů:

- Cu_2O (kuprit),
- CuCO_3 (malachit),
- $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (azurit),
- Cu_2S (chalkocit),
- CuFeS_2 (chalkopyrit).

Měď je získávána z výše uvedených minerálů. Vytěžená ruda s obsahem mědi se nejprve drtí na segmenty o velikosti 10 – 15 cm. Takto velké části se dále zpracovávají mletím na jemný prášek. Po rozemletí je odplavena hlušina procesem zvaným flotace pěnou, při kterém hlušina klesá ke dnu. Podle druhu, tedy zda se jedná o sulfid nebo oxid mědi, se následně měď zpracovává. U oxidů je to hydrometalurgický proces a u sulfidů pyrometalurgický. [24] [25]

Degradace mědi

Je-li měď vystavena okolní atmosféře vzduchu, dochází k oxidaci a ke vzniku tzv. patiny. Ve vodném prostředí vzniká na povrchu mědi tzv. měděnka ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$), která má modrozelenou barvu a není rozpustná ve vodě (viz obr. 4-1). V suchém prostředí se na povrchu tvoří oxid měďný – kuprit (Cu_2O). Měděné materiály odolávají korozi způsobené vodou a vodní párou, koncentrovanou kyselinou chlorovodíkovou a fluorovodíkovou a zředěnou kyselinou sírovou. Měď však velice bouřlivě reaguje s běžnými kyselinami jako je kyselina octová, dusičná, koncentrovaná kyselina sírová, lučavka královská nebo kyselina amonná. Vrstva oxidů, která se tvoří na povrchu mědi, slouží jako bariérová ochrana proti další korozi, avšak jen tak dlouho, dokud není oxidační vrstva mechanicky porušena. [24] [26]



Obrázek 4-1 Koroze měděných trubek ústředního topení v podlaze [27]

4.2 Čedič

Čedič neboli bazalt je černá nebo černošedá vyvřelá hornina (viz obr. 4-1), která vzniká rychlým ochlazováním lávy bohaté na hořčík a železo. Čedičová láva má díky nízkému obsahu oxidu křemičitého malou viskozitu, což způsobuje, že se při rozlévání lávy tvoří velké tenké čedičové plochy. Více než 90 % všech vulkanických kamenů na Zemi je čedič. Čedič vzniká přímým tavením zemského pláště. Oblast zemského pláště se vyskytuje v hloubce 30 – 50 km pod povrchem. Průměrné chemické složení čediče (získané z 3594 vzorků čedičových hornin) je uvedeno v tabulce 2.

Tabulka 2 Průměrné chemické složení čediče v hm. % [28]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄ , Fe ₂ O ₃ , FeO	CaO	MgO	(K ₂ O + Na ₂ O)	TiO ₂
46,67	15,99	11,9	9,62	6,84	4,8	1,87

Čedič disponuje tvrdostí dle Mohsovy stupnice 5,5–6, provozní teplota čediče je do 500 °C. Čedič není toxický, je elektromagneticky stálý, má vysokou tepelnou vodivost a je odolný vůči kyselinám a agresivním chemikáliím. Výjimku tvoří kyselina fluorovodíková, široká škála zásad a solí. Čedič se používá v konstrukci, ve stavebnictví nebo při stavbě silnic a cest, konkrétně jako rozdrčený kámen, betonový agregát, dlažba, ochranný povlak nebo tepelně izolační materiál z čedičových vláken. [24] [29] [30] [31]

Tabulka 3 Základní vlastnosti čediče [24]

Hustota [g/cm³]	2,9 – 3,1
Pevnost v tlaku [MPa]	180 - 400
Tvrdost dle Mohsovy stupnice [-]	5,5- 6
Teplota tavení [°C]	1300



Obrázek 4-2 Čedič [30]

Degradace čediče

Čedič v přírodních podmínkách podléhá degradaci vlivem povětrnostních podmínek. Degradace se projevuje načervenalým nebo nazelenalým odstínem a žilkováním, které je způsobené rozkladnými produkty. Dalším stadiem degradace čediče je stav, kdy se z čediče stává volně rozpadavý materiál. [32]

Samotný proces doby rozpadu čediče záleží na jeho chemickém složení. Čedič je primárně tvořen minerály zvanými olivín, pyroxen a plagioklas. Tyto minerály mají

poměrně malou odolnost vůči povětrnostním vlivům. Čedič má tedy tendenci se rozpadat rychleji než jiné žulové a vyvřelé horniny. [33] [34]

4.3 Sklo

Sklo je amorfni anorganická pevná látka vyrobená z křemičitanu. Komerčně prodávaná skla disponují následujícími vlastnosti: vysoká tvrdost, křehkost, citlivost vůči výrazným změnám teploty, nízká tepelná vodivost, optická transparentnost. Skla jsou obecně odolná vůči působení většiny chemických látek. Výjimku tvoří pouze kyselina chlorovodíková, fluorid amonný a hydroxidy alkalických kovů. Díky kombinaci výše uvedených vlastností, nachází sklo využití v optice a sklářství. Korozi odolná skla se používají pro výrobu kuchyňského nádobí a laboratorního vybavení. Základní surovinou pro výrobu skla je oxid křemičitý - SiO_2 , oxid vápenatý - CaO a oxid sodný - Na_2O . [24]

Tabulka 4 Základní fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti křemičitého skla [35]

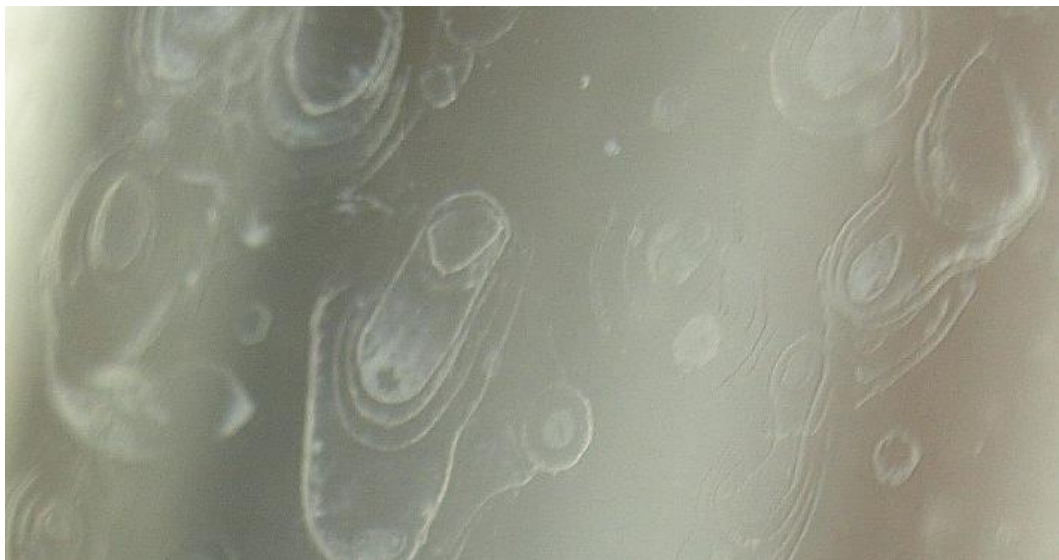
Hustota [g/cm^3]	2,2
Pevnost v tlaku [MPa]	1108
Tvrdost [kg/mm^2]	600
Teplota tavení [$^\circ\text{C}$]	1700
Maximální provozní teplota [$^\circ\text{C}$]	1100
Tepelná vodivost [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	1,38

Degradace skla

Korozivzdornost skla je zásadně ovlivněna množstvím přísad, které jsou do skla přidány při jeho výrobě. Se vzrůstajícím podílem přísad dochází ke snižování odolnosti skla vůči korozi. Pro sklo je typická amorfni struktura, která výrazně zvyšuje odolnost skla proti korozi. Koroze skla se projevuje snížením transparentnosti, vznikem povrchových trhlin a dalšími méně častými projevy degradace. [36]

Sklo je odolné vůči působení většiny kyselin a méně koncentrovaných zásad. Koroze způsobená vlivem zásaditých látek je tím rychlejší, čím je zásada koncentrovanější, tedy čím vyšší je pH zásady nebo čím vyšší je expoziční teplota, které je sklo vystavené. Teplota hraje roli i u dalších chemikálií, které za normálních okolností se sklem nereagují. Zahřátím některých málo koncentrovaných kyselin může stejně tak jako u kyseliny fluorovodíkové dojít k porušení povrchu skla. [36]

Sklo může být opakovaně recyklováno, aniž by ztratilo na své kvalitě, ovšem degradaci v přírodě nepodléhá. [37]



Obrázek 4-3 Chemická koroze skla [38]

5 Popis experimentálního programu

Unikátní myšlenka vytvoření kompozitního laserového návaru na bázi měď-čedič a měď-sklo nebyla doposud ani v celosvětovém výzkumu nikde zpracována. V rámci experimentálního programu byly vytvořeny tři laserové návary na bázi měď-čedič a jeden vzorek laserového návaru na bázi měď-sklo. Plocha laserem navařených vzorků byla 65 x 90 mm. Jako substrát byla použita ocel C45 o tloušťce 20 mm. Před laserovým navařováním byla ocel C45 oboustranně broušená na magnetické brusce.

Přídavnými prášky pro laserové navařování byly měď o vysoké čistotě, komerčně distribuovaná společností Oerlikon Metco pod označením METCO 55, a dále čedičový prášek. Čedičový prášek byl pro experimentální program předložené bakalářské práce zakoupen v kamenné prodejně se specializací prodeje potřeb pro ruční a modelářskou tvorbu. Nicméně prodejce/výrobce poskytl při nákupu čediče jeho datasheet s údaji o chemickém složení (viz kapitola 6.2.2).

Pro laserové navařování kompozitního návaru měď-čedič byly připraveny tři druhy práškových směsí z 5, 10 a 15 hmotnostních procent (dále jen hm. %) čediče v měděném prášku METCO 55. Mísení přídavných prášků bylo provedeno ručně. Laserový návar na bázi měď-sklo byl proveden z předem připravené přídavné směsi prášku obsahující 10 hm. % sklářského ultrajemného písku a měděného prášku METCO 55.

Předložená bakalářská práce obsahuje kompletní metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič a měď-sklo. V rámci experimentálního programu byla z připravených kompozitních návarů provedena metalografická analýza dosažených materiálových struktur. Experimentální program rovněž zahrnuje metodiku přípravy metalografických výbrusů laserových návarů na bázi měď-čedič a měď-sklo.

Metalografické hodnocení bylo v případě návaru na bázi měď-čedič provedeno v pěti různých oblastech návarů na každém z připravených vzorků. V případě kompozitního laserového návaru na bázi měď-sklo bylo metalografické hodnocení zaměřeno pouze na středovou oblast vzorku. Cílem bylo zachytit strukturní odlišnosti laserového návaru, ke kterým dochází v rámci navařování jednotlivých vzorků pomocí optického světelného mikroskopu Carl Zeiss ZIM a řádkovacího elektronového mikroskopu Philips XL30 ESEM s EDX analyzátozem.

5.1 Cíle experimentálního programu

Cílem experimentálního programu byla analýza materiálových struktur kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič a měď-sklo. Další cílem předložené bakalářské práce bylo identifikovat a popsat případné vnitřní vady návaru (trhliny, póry, atd.). V rámci experimentálního programu byla rovněž připravena a otestována metodika přípravy metalografických výbrusů výše uvedených kompozitních laserových návarů.

5.2 Použité stroje, přístroje, zařízení

- Metalografická pila – Struers Discotom 6,
- metalografický lis – Struers Citopress 10,

- metalografická bruska a leštička – Struers LaboForce-100 ,
- metalografická leštička – Struers LaboPol-1,
- laboratorní váhy – RADWAG AS 220/C/2,
- tvrdoměr Struers DuraScan 70 G5 ,
- řádkovací elektronový mikroskop Philips XL30 ESEM s EDX analyzátozem,
- optický mikroskop Carl Zeiss Z1M,
- ultrazvuková čistička,
- přenosný drsnoměr – MarSurf M 300.

5.3 Specifikace zařízení pro laserové navařování

Pro laserové navařování kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič a měď-sklo byl použit diskový laser Trumpf TruDisk 8002 s vlnovou délkou $\lambda = 1030$ nm a výkonem v rozmezí 160 – 5300 W. Povlakovací hlava použitá v tomto experimentálním programu byla Precitec YC52, která disponuje čtyřcestným koaxiálním podáváním prášku a elektronicky řízeným kolimátorem s nastavitelnou velikostí laserového spotu v ohnisku 1,3 – 3,4 mm. Pro podávání prášku byl použit podavač prášku GTV PF 2/2.

5.4 Procesní podmínky laserového navařování experimentálních vzorků

Pro přípravu experimentálních vzorků kompozitních laserových návarů byly použity procesní podmínky technologie laserového navařování uvedené v tabulce 5. Jako ochranný a hnací plyn byl použit argon o vysoké čistotě. Laserový svazek byl fokusován na rovinu povrchu substrátu.

Tabulka 5 Procesní podmínky technologie laserového navařování kompozitních návarů na bázi měď-čedič a měď-sklo

Výkon laseru [W]	1100
Procesní rychlost [cm/min]	30
Množství přídavného prášku na jednotku délky návaru [g/m]	40
Průměr laserového svazku [mm]	2
Překryv mezi housenkami [%]	50
Objemový průtok ochranného plynu [l/min]	18
Průtok hnacího plynu [l/min]	5

6 Charakteristika základního a přídatných materiálů

6.1 Základní materiál

Jako základní materiál pro laserové navařování byla zvolena uhlíková ocel k zušlechťování a povrchovému kalení C45 (dle ČSN 41 2050). Ocel C45 je charakterizována jako uklidněná obtížně svařitelná ocel, která se používá na hřídele těžebních strojů, na větší ozubená kola, ozubené věnce, čepy, upínací a stavebnicové části nástrojů, vrtací tyče, frézovací trny apod. [39]

Chemické složení, mechanické a fyzikální vlastnosti substrátu z oceli C45 jsou uvedeny v tabulce 7, 8, 9.

Tabulka 6 Chemické složení základního materiálu; obsah prvků v hm. % [39]

Chemické složení (rozbor tavby)	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
	0,42 – 0,50	0,50 – 0,80	0,17 – 0,37	max. 0,25	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,40	max. 0,40
Dovolené úchytky složení v hotovém výrobku	±0,03	-0,05 +0,10	-0,03 +0,05	-	-	-	-	-

Tabulka 7 Mechanické vlastnosti základního materiálu [39]

Mez kluzu [MPa]	min. 355
Pevnost v tahu [MPa]	min. 600
Nejnižší tažnost [%]	15
Tvrdość dle Brinella	max. 207

Tabulka 8 Změna Youngova modulu pružnosti v tahu a měrné hmotnosti oceli C45 v závislosti na teplotě [39]

Teplota [°C]	20	100	200	300	400	500	600	700
Modul pružnosti v tahu E·10 ⁻³	211	208	202	194	185	173	160	141
Měrná hmotnost ρ·10 ⁻³ [kg/m ³]	7,87	7,85	7,82	7,79	7,75	7,72	7,68	7,64

Před realizací experimentálního programu byla ocel oboustranně zbrošněná na magnetické brusce, z důvodu rovinnosti povrchu, nutné pro laserové navařování. Tloušťka substrátu byla 20 mm. Drsnost povrchu substrátu byla před navařováním měřena přenosným tvrdoměrem MarSurf M 300 ve dvou na sebe kolmých směrech (viz Tabulka 6). Naměřené hodnoty drsnosti Ra jsou uvedeny v tabulce 6. Směrodatná odchylka měření byla kvantifikována dle níže uvedeného vzorce (1).

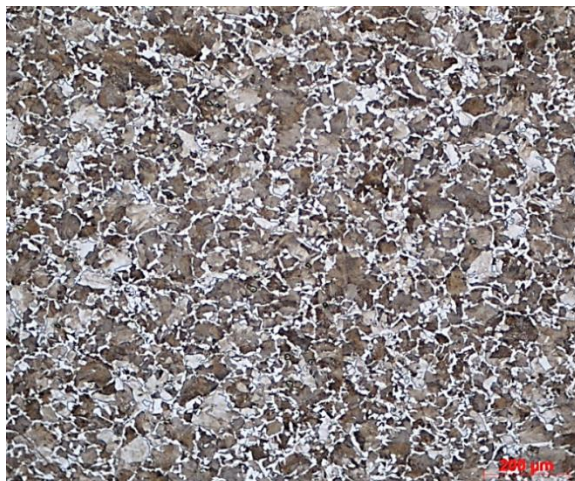
$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Ra_i - \overline{Ra})^2} \quad (1)$$

Tabulka 9 Naměřené a vypočtené hodnoty drsnosti základního materiálu

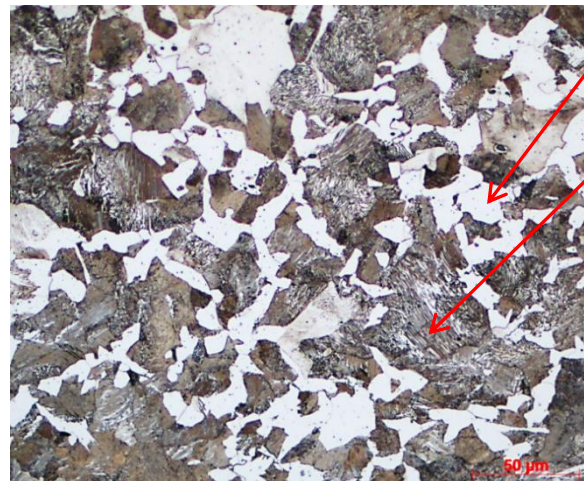
Měření	1	2	3	4	5	\overline{Ra}	Směrodatná odchylka měření	Výsledná drsnost
Ra_x [μm]	2,383	2,442	2,719	2,639	2,863	2,609	±0,198	2,609 ±0,198
Ra_y [μm]	11,58	13,04	14,84	13,71	14,32	13,50	±1,28	13,50±1,28

Hodnota drsnosti povrchu substrátu z oceli C45 byla měřením stanovena na $R_{ax} 2,609 \pm 0,198$ a $R_{ay} 13,50 \pm 1,28$.

Na dodané oceli C45 bylo provedeno metalografické hodnocení. Na obrázcích 6-1 a 6-2 jsou zachyceny perliticko-feritické struktury pro vzorek C45. Podíl perlitu ku feritu byl stanoven obrazovou analýzou na 60:40.



Obrázek 6-1 Ocel C45, perliticko-feritická struktura, leptáno Nital 3%, zvětšení 100x



Obrázek 6-2 Ocel C45, vyznačení feritických a perlitických oblastí, leptáno Nital 3%, zvětšení 500x

Tvrdość základního materiálu HV30 byla měřena na tvrdoměru Struers DuraScan 70 G5 při zatížení $F = 294$ N. Celkem bylo provedeno 5 vtisků měření tvrdosti. Výsledná hodnota tvrdosti byla stanovena aritmetickým průměrem a směrodatnou odchylkou měření viz tabulka 10.

Tabulka 10 Naměřené hodnoty tvrdosti základního materiálu

Vtisk	1	2	3	4	5	Průměr	Směrodatná odchylka	Výsledná tvrdost HV30
HV30	297	285	289	288	289	290	± 7	290 ± 7

Tvrdość základního materiálu oceli C45 byla měřením stanovena na 290 ± 7 HV30.

6.2 Přídavné materiály

Přídavným materiálem pro laserové navařování kompozitních návarů na bázi měď-čedič byly tři druhy směsí prášku na bázi měď-čedič. Jednotlivé směsi se lišily poměrem měděného prášku a čediče:

- 95 hm. % měděného prášku, 5 hm. % čediče,
- 90 hm. % měděného prášku, 10 hm. % čediče,
- 85 hm. % měděného prášku, 15 hm. % čediče.

Pro laserové navařování kompozitního návaru na bázi měď-sklo byla použita směs měděného prášku s 10 hm. % ultra jemného sklářského písku. Prášky byly odvažovány na laboratorní váze RADWAG AS 220/C/2 s chybou měření 0,1 mg a promíseny ručně v předem připravených plastových nádobách.

6.2.1 Měděný prášek

Měděný prášek použitý pro laserové navařování kompozitního návaru na bázi měď-čedič a měď-sklo byl pořízen od společnosti Oerlikon Metco pod obchodním označením METCO 55.

Měděný prášek METCO 55 se vyznačuje vysokou čistotou s minimálně 99 hm. % Cu a je běžně používán pro žárové nástřiky. Základní vlastnosti prášku jsou uvedeny v tabulce 11. [40]

Tabulka 11 Základní vlastnosti měděného prášku METCO 55 [40]

Obsah mědi [hm. %]	Zrnitost prášku [μm]	Tvar částic	Teplota tavení [$^{\circ}\text{C}$]	Měrná hmotnost [g/cm^3]
min. 99	45 - 90	kulový	1083	3,0 – 4,0

6.2.2 Čedičový prášek

Vzhledem k ojedinělosti myšlenky kompozitního laserového návaru na bázi měď-čedič nelze u specializovaných distributorů přídavných prášků pro laserové navařování nebo termální nástřiky pořídit čedičový prášek. Pro experimentální program předložené bakalářské práce byl čedičový prášek (viz obrázek 6-3) zakoupen v kamenné prodejně se specializací prodeje potřeb pro ruční a modelářskou tvorbu. Nicméně prodejce/výrobce poskytl při nákupu čediče jeho datasheet s následujícími údaji o chemickém složení: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , TiO_2 , Cr_2O_3 , CoO , NiO . Výrobce rovněž deklaroval globulární tvar částic o zrnitosti menší než $250 \mu\text{m}$.

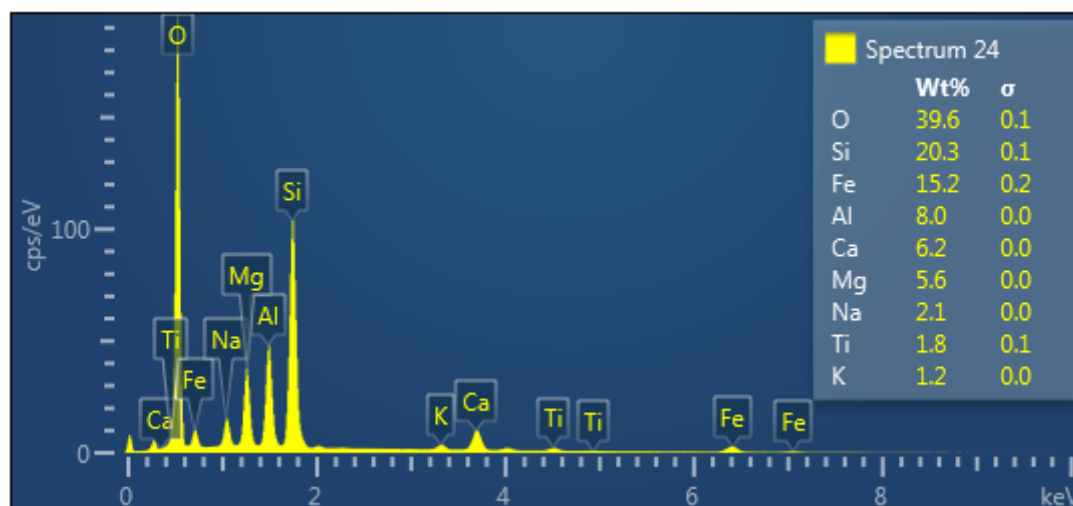


Obrázek 6-3 Čedičový prášek

Chemické složení čedičového prášku bylo ověřeno EDX analýzou na řádkovacím elektronovém mikroskopu Philips XL30 ESEM (viz tabulka 12, obrázek 6-4). Celkem byla provedena čtyři měření chemického složení, jejichž výsledky jsou sumarizovány v tabulce 12. Na obrázku 6-4 je znázorněno energetické spektrum čedičového prášku, naměřené EDX analýzou při Měření 1.

Tabulka 12 Chemické složení čedičového prášku v hm. %

Měření	O	Si	Fe	Al	Ca	Mg	Na	Ti	K	P
1.	39,6	20,3	15,2	8,0	6,2	5,6	2,1	1,8	1,2	-
2.	39,3	18,6	13,0	12,5	6,4	5,8	2,0	1,8	0,6	-
3.	40,9	20,6	10,5	10,4	7,3	5,2	2,0	1,6	1,0	0,5
4.	39,3	18,6	13,0	12,5	6,4	5,8	2,0	1,8	0,6	-



Obrázek 6-4 Energetické spektrum čedičového prášku

6.2.3 Ultrajemný sklářský písek

Pro laserové navařování kompozitního laserového návaru na bázi měď-sklo byly použity ultrajemné sklářské písky od společnosti Sklopísek Střelec s obchodním označením ST 2 a STJ 25 (viz obrázek 6-5). Jedná se o mikromleté písky vyráběné suchým mletím v nezelezném prostředí. Surovinou pro výrobu těchto písků byl křemičitý písek s obsahem SiO_2 vyšším než 99 %. Chemické složení písků je uvedeno v tabulce 13, základní vlastnosti sklářských písků ST 2 a STJ 25 poskytnuté výrobcem a dodavatelem jsou uvedeny v tabulce 14. [41] [42]

Vzhledem k nevhodné zrnitosti sklářského písku ST 2 a STJ 25 pro technologii laserového navařování byla z dodaných vzorků písků oddělená frakce 0,1 – 0,2 mm přesypáním přes slévarenská síta. Výše uvedená frakce byla použita pro přípravu směsi pro laserové navařování kompozitního návaru na bázi měď-sklo. Poměr měděného prášku ku sklářskému písku byl:

- 10 hm. % sklářského písku, 90 hm. % měděného prášku

Tabulka 13 Průměrné chemické složení ultrajemných sklářských písků v hm. % [42], [41]

	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	$\text{CaO} + \text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	TiO_2
ST 2	99,6	0,05	0,2	0,1	0,1	-
STJ 25	99,3	0,025	0,3	-	-	0,15

Tabulka 14 Základní vlastnosti ultrajemných sklářských písků [42], [41]

	Zrnitostní rozsah [mm]	Velikost středního zrna [μm]	Hustota [g/ml]	Tvrdost podle Mohse	Vlhkost	pH
ST 2	0 – 0,090	27	2,65	7	max. 0,2	6,4
STJ 25	0,063 – 0,315	180	2,65	7	max. 0,2	7,3



Obrázek 6-5 Ultrajemný sklářský písek ST 2 a STJ 25

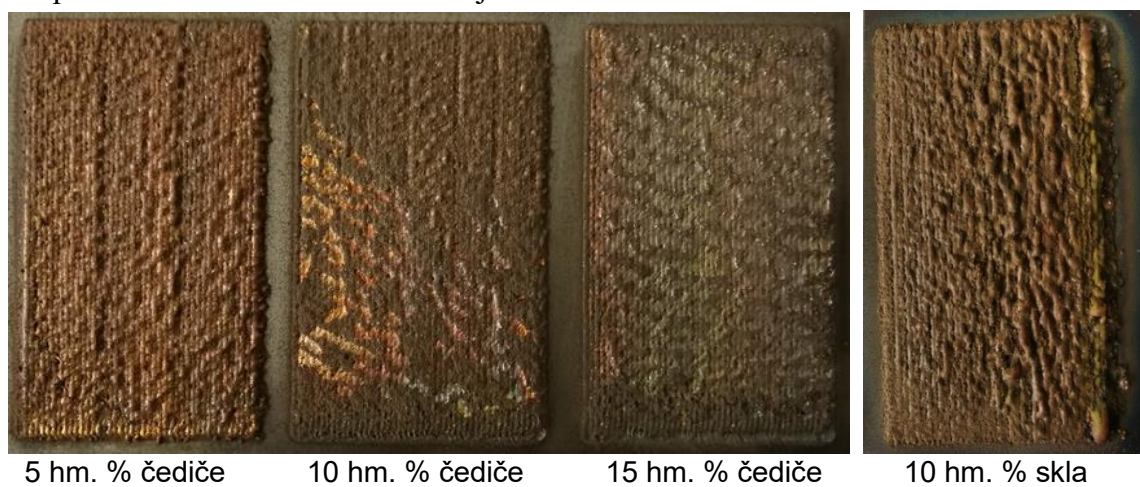
7 Metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů

Metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič (s 5, 10 a 15 hm. % čediče v měděném prášku METCO 55) a měď-sklo (s hm. % sklářské písku) bylo provedeno celkem na čtyřech vzorcích.

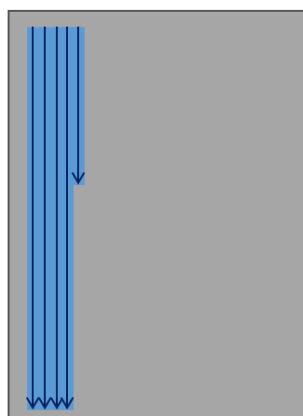
Makro snímky návarů na bázi měď-čedič a měď-sklo jsou zobrazeny na obrázku 7-1. Kompozitní laserové návary byly navařeny na ploše o rozměrech 65 x 90 mm na substrátu z oceli C45 o tloušťce 20 mm. Schematické znázornění směru navařování je zobrazeno na obrázku 7-2. Z každého kompozitního laserového návaru na bázi měď-čedič bylo vybráno pět oblastí, ze kterých byl vyříznut vzorek pro metalografické hodnocení. Jednotlivé oblasti jsou schematicky znázorněny na obrázku 7-3 a jejich význam je následující:

- Oblast 1 – začátek navařování prvních housenek,
- oblast 2 – konec navařování prvních housenek,
- oblast 3 – střed laserového návaru,
- oblast 4 – začátek posledních housenek,
- oblast 5 – konec posledních housenek.

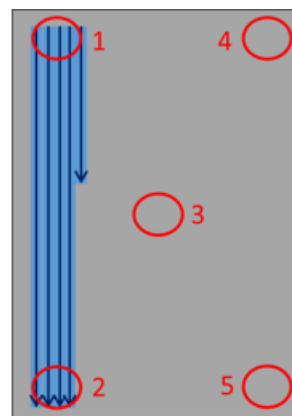
Pro vzorek laserového návaru na bázi měď-sklo byla metalografie provedena pouze na jednom vzorku z oblasti 3 (viz obrázek 7-3). Laserový návar se sklem obsahoval velké množství vnitřních vad, tudíž bylo hodnocení v pěti oblastech bezpředmětné. Místa odběru vzorků jsou znázorněna na obrázku 7-3.



Obrázek 7-1 Vzorky návarů na bázi měď-čedič a měď-sklo



Obrázek 7-2 Schematické znázornění směru navařování



Obrázek 7-3 Schematické znázornění místa odběru vzorků

Jednotlivé vzorky pro experimentální program byly značeny dle následujícího vzoru:

$$CuXX_čedičYY_zZ \quad (CuXX_skloYY_zZ)$$

- XX – hm. % mědi ve směsi prášku pro navařování,
- YY – hm. % čediče (skla) ve směsi prášku pro navařování,
- Z – číslo oblasti odběru vzorku.

Příkladem značení je Cu90_čedič10_z5 – vzorek takto značený byl připraven z přidavného prášku obsahujícího 90 hm. % měděného prášku METCO 55 a 10 hm. % čediče a byl vyříznut z oblasti 5 (konec posledních housenek návaru).

Veškeré metalografické snímky byly pořízeny ve vzdálenosti 50 μm od užité výšky návaru. Za užitnou výšku návaru je obecně považována výška návaru po jeho zbrúšení na funkční rovinu povrchu návaru.

7.1 Příprava metalografických vzorků

Z kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič a měď-sklo byly pro metalografické hodnocení pomocí metalografické pily Struers Discotom 6 vyříznuty vzorky (jednotlivé vzorky definovány na obrázku 7-3). Poté byly vzorky zalisovány do lisovací hmoty v metalografickém lisu Struers Citopress 10.

Broušení a leštění vzorků probíhalo na automatické metalografické brusce/leštičce – Struers LaboForce-100. Metodika přípravy metalografických vzorků, která byla v rámci předložené bakalářské práce ověřena, je uvedena v Tabulce 15. Tabulka 15 rovněž obsahuje detailní popis použitých brusných a leštících plátů pro přípravu metalografických vzorků.

Tabulka 15 Plátina a brousící/leštící médium použité v experimentálním programu

Proces	Plátno	Brousící/leštící médium	Čas [min]
Broušení	Struers MD Piano 500	Voda	7:00
Broušení	Struers MD Piano 1200	Voda	7:00
Broušení	Struers MD Piano 2000	Voda	3:40
Leštění	Struers MD Largo	Struers DiaDuo-2, 9 μm	4:00
Leštění	Struers MD Nap	Struers DiaPro Mol B, 3 μm	3:00
Leštění	Struers MD Nap	Struers DiaPro Nap B, 1 μm	3:00
Leštění	Struers MD Chem	Struers OP-U, 0,04 μm	1:30

Po každém z procesů broušení a leštění byly vzorky opláchnuty ethanolem a osušeny proudem vzduchu. Před každým leštěním byly vzorky dále čištěny v ultrazvukové čističce po dobu minimálně 5 minut, znovu opláchnuty ethanolem a osušeny.

Následně po vyleštění byly povrchy vzorků naleptány. V experimentálním programu byly použity tři druhy leptadel, které jsou uvedeny v tabulce 16. Použití prvního leptadla (roztok peroxidisíranu amonného v denaturované vodě) se neosvědčilo, neboť jím nebyla zviditelněna struktura povrchu laserových návarů. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k druhému leptadlu. Jako druhé leptadlo byla zvolena směs chemických látek, obecně známa pod označením ROBIN, jejíž aplikace vedla ke zviditelnění struktury všech vzorků kompozitních laserových návarů na bázi měď-

čedič a na bázi měď-sklo. Třetí leptadlo (3% roztok Nitalu) bylo v experimentálním programu použito k naleptání struktury základního materiálu.

Tabulka 16 Leptadla použitá v experimentálním programu

1	10 ml H ₂ O, 1 g (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈
2	ROBIN – 5 ml H ₂ O, 5 g FeCl ₃ , 25 ml HCl, 37 ml etanolu
3	Nital – 3 % roztok HNO ₃ v ethanolu

7.2 Kompozitní laserový návar na bázi měď-čedič (5 hm. % čediče)

Laserový návar s 5 hm. % čediče se vyznačoval velmi nízkou adhezí k substrátu. Při procesu řezání návaru pro odběr metalografických vzorků došlo k oddělení laserového návaru od povrchu substrátu (viz obrázek 7-4). Z výše uvedeného důvodu nebyla provedena metalografická analýza tohoto kompozitního laserového návaru.



Obrázek 7-4 Kompozitní laserový návar měď-čedič s 5 hm. % čediče

7.3 Kompozitní laserový návar na bázi měď-čedič (10 hm. % čediče)

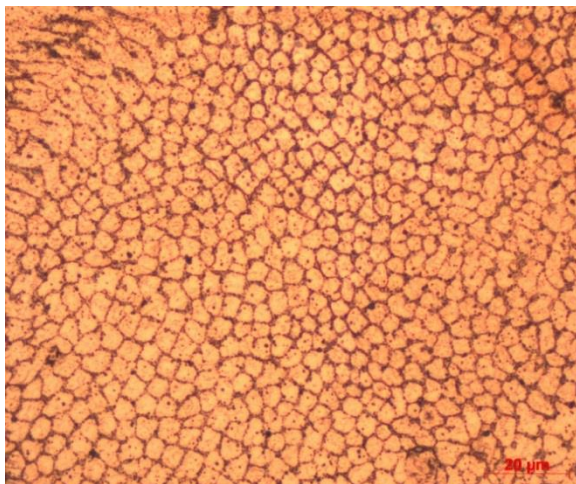
Z kompozitního laserového návaru s 10 hm. % čediče bylo odebráno celkem 5 vzorků z oblastí, které jsou schematicky znázorněny na obrázku 7-3. Z připravených metalografických výbrusů byly pořízeny snímky zobrazující mikrostrukturu ve vzdálenosti 50 μm od užité výšky návaru.

Na metalografických snímcích (obrázek 7-5 až 7-9) pořízených při zvětšení 1000x je možné pozorovat vysoce jemnou strukturu kompozitního laserového návaru.

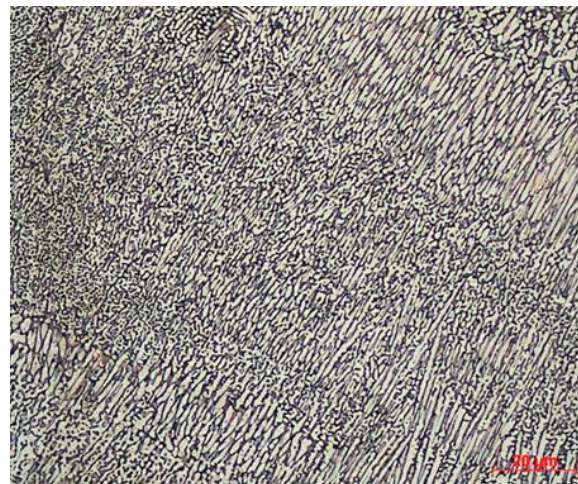
Na obrázku 7-5 je zdokumentovaná celulární struktura kompozitního laserového návaru vzorku číslo Cu90_čedič10_z1. Na snímku 7-6 je patrná vysoce jemná dendritická struktura vzorku Cu90_čedič10_z2 s výraznou primární osou dendritu a s přilehlými sekundárními osami. Mezidendritické prostory jsou vyplněny především mědí.

Oblast středu návaru je vyobrazena na obrázku 7-7. Tento snímek zobrazuje vzorek Cu90_čedič10_z3, který má obdobnou strukturu jako vzorek Cu90_čedič10_z4 (viz obrázek 7-8), tedy oblast začátku posledních housenek kompozitního laserového návaru. Oba vzorky se vyznačují měděnou základní maticí s viditelnými hranicemi zrn a disperzně rozmístěnými oxidickými částicemi čedičového prášku. Rozdíl mezi těmito dvěma oblastmi je ve velikosti, množství a tvaru oxidických částic.

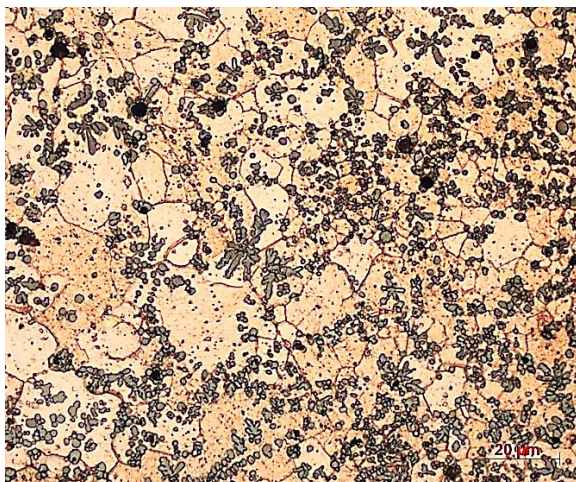
Poslední vzorek z kompozitního laserového návaru na bázi měď-čedič s 10 hm. % čediče byl z oblasti konce posledních housenek návaru. Vzorek číslo Cu90_čedič10_z5 (viz obrázek 7-9) má vysoce jemnou dendritickou strukturu s jasnou primární osou a s viditelnými sekundárními osami. Mezidendritické prostory jsou vyplněny především mědí.



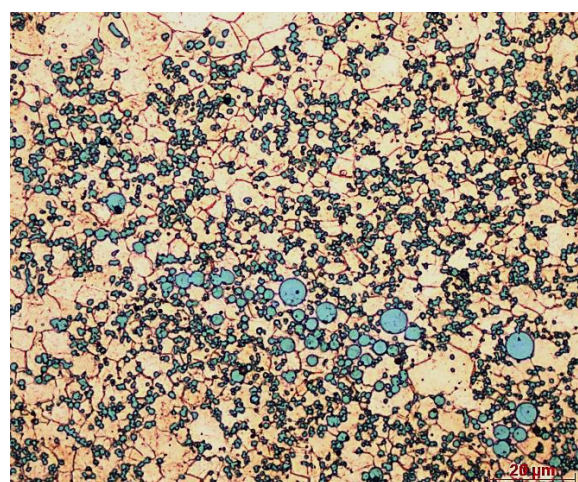
Obrázek 7-5 Vzorek Cu90_čedič10_z1,
leptáno Robin, zvětšeno 1000x



Obrázek 7-6 Vzorek Cu90_čedič10_z2,
leptáno Robin, zvětšeno 1000x



Obrázek 7-7 Vzorek Cu90_čedič10_z3,
leptáno Robin, zvětšeno 1000x

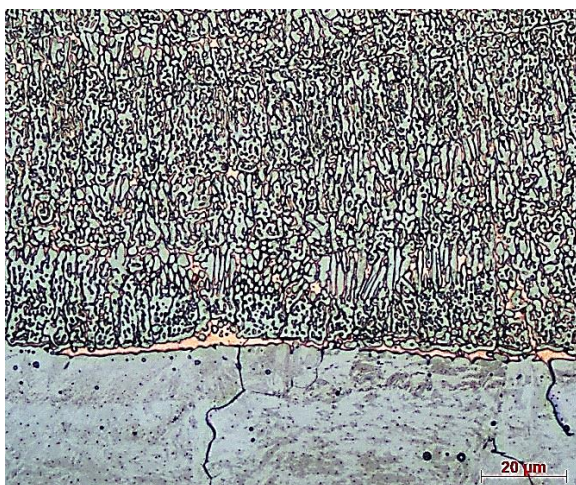


Obrázek 7-8 Vzorek Cu90_čedič10_z4,
leptáno Robin, zvětšeno 1000x



Obrázek 7-9 Vzorek Cu90_čedič10_z5, leptáno Robin, zvětšeno 1000x

Metalografické hodnocení kompozitních laserových návarů odhalilo přítomnost vnitřních vad v návaru u kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič (s 10 hm. % čediče a 90 m. % měděného prášku METCO 55). Na obrázku 7-10 je snímek rozhraní laserového návaru a substrátu vzorku Cu90_čedič10_z4. V oblasti hranice ztavení byly detekovány trhliny směřující od rozhraní směrem do jádra substrátu. Dále byla v kompozitním laserovém návaru vzorku Cu90_čedič10_z4 zaznamenána pórovitost (viz obrázek 7-11).



Obrázek 7-10 Vzorek Cu90_čedič10_z4, leptáno Robin, zvětšeno 1000x



Obrázek 7-11 Vzorek Cu90_čedič10_z4, leptáno Robin, zvětšeno 100x

Na vzorku číslo Cu90_čedič10_z3 byla v neposlední řadě provedena EDX analýza chemického složení pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu. Výsledkem plošné analýzy snímku z EDX (obrázek 7-12) bylo energetické spektrum (viz obrázek 7-13), které prokazuje následující přítomnost chemických prvků v oblasti středu laserového návaru:

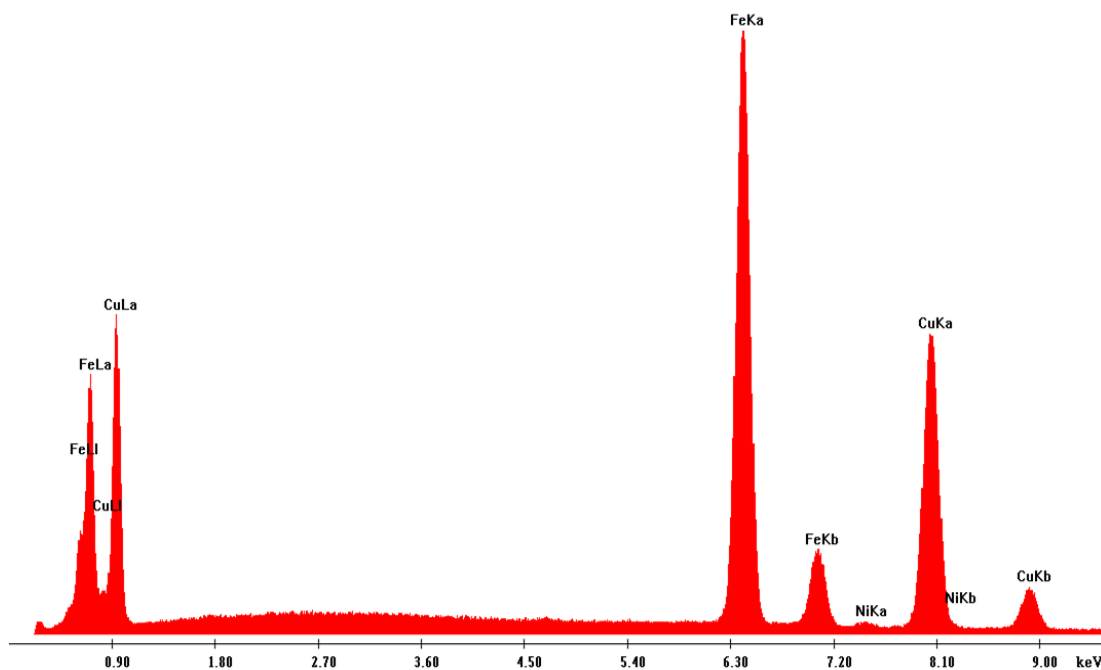
Tabulka 17 Cu90_čedič10_z3, chemické složení stanovené plošnou EDX analýzou, obsah prvků v hm. %

Fe	Cu	Ni
50,3	49,2	0,55

Očekávaným chemickým složením laserového návaru na bázi měď-čedič s 10 hm. % čediče bylo 90 hm. % mědi, avšak výsledky uvedené v Tabulce 17 tomu nenasvědčují. Z analýzy chemického složení je patrné, že v laserovém návaru oproti očekávání bylo méně mědi, více železa a nebyly zde nalezeny znatelné stopy po čediči. Důvodem, proč se tak stalo, byla pravděpodobně malá výška návaru a velká hloubka zavaření. V důsledku těchto okolností se vytvořila slitina železa a mědi. U čedičového prášku mohlo dojít k vyhoření nebo se nepodařilo EDX analýzou zachytit oblast, kde se čedičový prášek vyskytoval.



Obrázek 7-13 Cu_90_čedič10_z3, EDX analýza chemického složení, SEM, zvětšení 5000X



Obrázek 7-12 Energetické spektrum EDX analýzy vzorku Cu90_čedič10_z3

7.4 Kompozitní laserový návar na bázi měď-čedič (15 hm. % čediče)

Z kompozitního laserového návaru s 15 hm. % čediče bylo odebráno 5 vzorků pro bližší metalografickou analýzu. Z těchto vzorků byly pořízeny snímky zobrazující mikrostrukturu ve vzdálenosti 50 μm od užité výšky povrchu návaru.

Mikrostruktura jednotlivých oblastí je zobrazena na snímcích pořízených při zvětšení 1000x (viz obrázek 7-14 až 7-18). Z metalografických snímků je patrné, že kompozitní laserové návary na bázi měď-čedič s 15 hm. % čediče mají vysoce jemnozrnnou mikrostrukturu.

Na obrázku 7-14 je snímek vzorku Cu_85_čedič15_z1, který se vyznačuje dendritickou strukturou s mezidendritickými prostory vyplněnými mědí. Stejně tak je tomu u vzorku číslo Cu_85_čedič15_z2, který má podobnou strukturu (viz obrázek 7-15). Mezidendritická struktura je zde také tvořena mědí, ale v porovnání se snímkem z oblasti 1 je jí zde větší podíl.

Mikrostruktura vzorku Cu_85_čedič15_z3 a Cu_85_čedič15_z4 je zobrazena na obrázcích 7-16 a 7-17. Oba vzorky mají obdobnou strukturu, jedná se o velice jemnozrnnou dendritickou strukturu, kde tak jako u oblasti začátku a konce prvních housenek je mezidendritický prostor tvořen mědí.

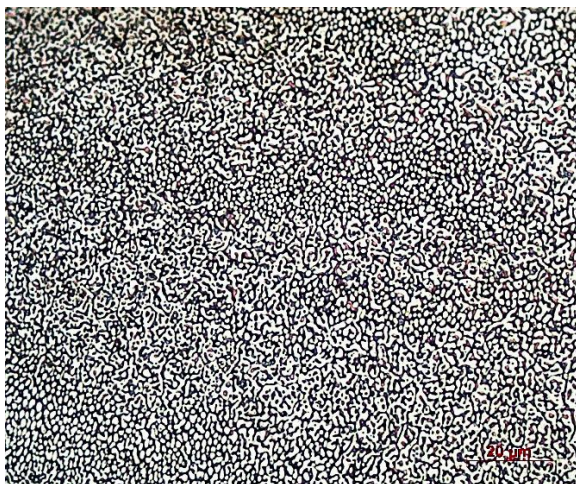
Poslední vzorek číslo Cu_85_čedič15_z5 je z oblasti konce posledních housenek. Tento vzorek má tak jako předešlé vzorky dendritickou strukturu s mezidendritickými prostory vyplněnými mědí. V mikrostrukturu jsou patrné primární dendritické osy (viz obrázek 7-18).



Obrázek 7-14 Vzorek Cu85_čedič15_z1, leptáno Robin, zvětšeno 1000x



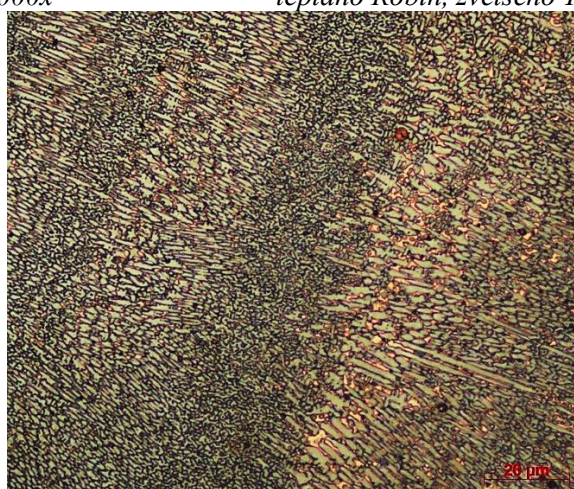
Obrázek 7-15 Vzorek Cu85_čedič15_z2, leptáno Robin, zvětšeno 1000x



Obrázek 7-16 Vzorek Cu85_čedič15_z3, leptáno Robin, zvětšeno 1000x

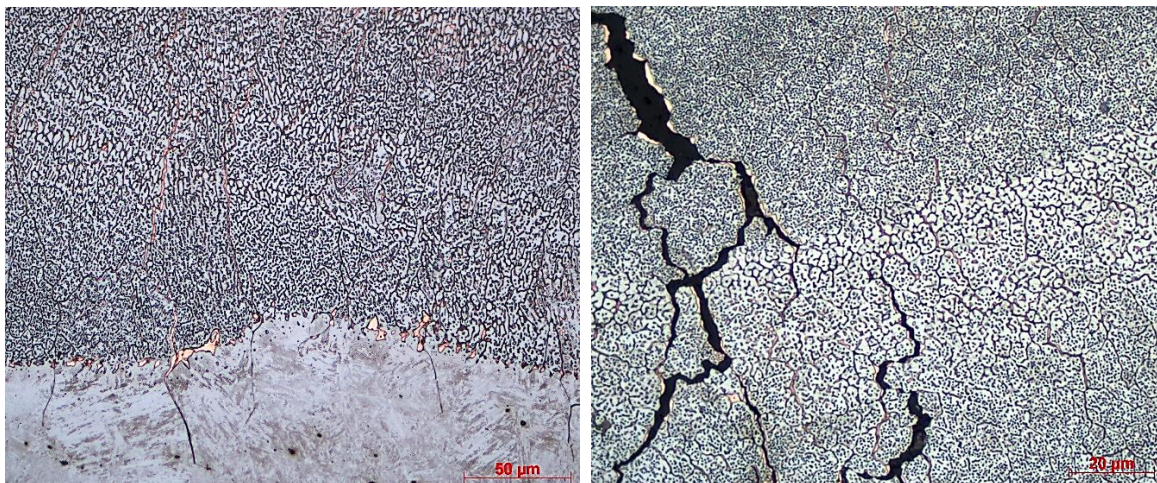


Obrázek 7-17 Vzorek Cu85_čedič15_z4, leptáno Robin, zvětšeno 1000x



Obrázek 7-18 Vzorek Cu85_čedič15_z5, leptáno Robin, zvětšeno 1000x

Dále byly sledová výskyt vnitřních vad kompozitního laserového návaru s 15 hm. % čediče. Na obrázku 7-19 je snímek rozhraní kompozitního laserového návaru a substrátu vzorku číslo Cu_85_čedič15_z4. Na rozhraní je možné pozorovat trhliny zasahující od povrchu substrátu směrem do jádra. Vznik trhlín na hranici ztavení byl pravděpodobně způsoben odlišným součinitelem teplotní roztažnosti materiálu substrátu a laserového návaru. Během solidifikace návaru došlo k vyplnění prostoru trhlín mědí. V neposlední řadě byly na vzorku Cu_85_čedič15_z4 zachyceny trhliny zasahující od povrchu návaru až k hranici ztavení se substrátem. Tyto trhliny se přednostně šířily mezidendritickými prostory tvořenými mědí. Na obrázku 7-20 je snímek stejného vzorku pořízený při zvětšení 1000x.



Obrázek 7-19 Vzorek Cu85_čedič15_z4, leptáno Robin, zvětšeno 500x

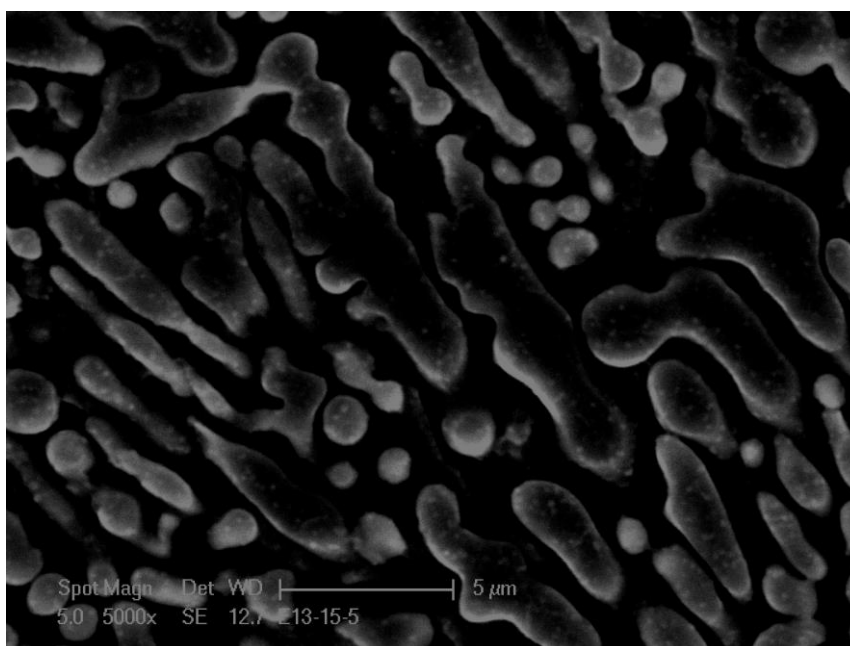
Obrázek 7-20 Vzorek Cu85_čedič15_z4, leptáno Robin, zvětšeno 1000x

Dále byla na vzorku číslo Cu85_čedič15_z3 provedena EDX analýza chemického složení pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu. Výsledkem plošné analýzy snímku z EDX (obrázek 7-21) bylo energetické spektrum (viz obrázek 7-22), které prokazuje následující přítomnost chemických prvků v oblasti středu laserového návaru:

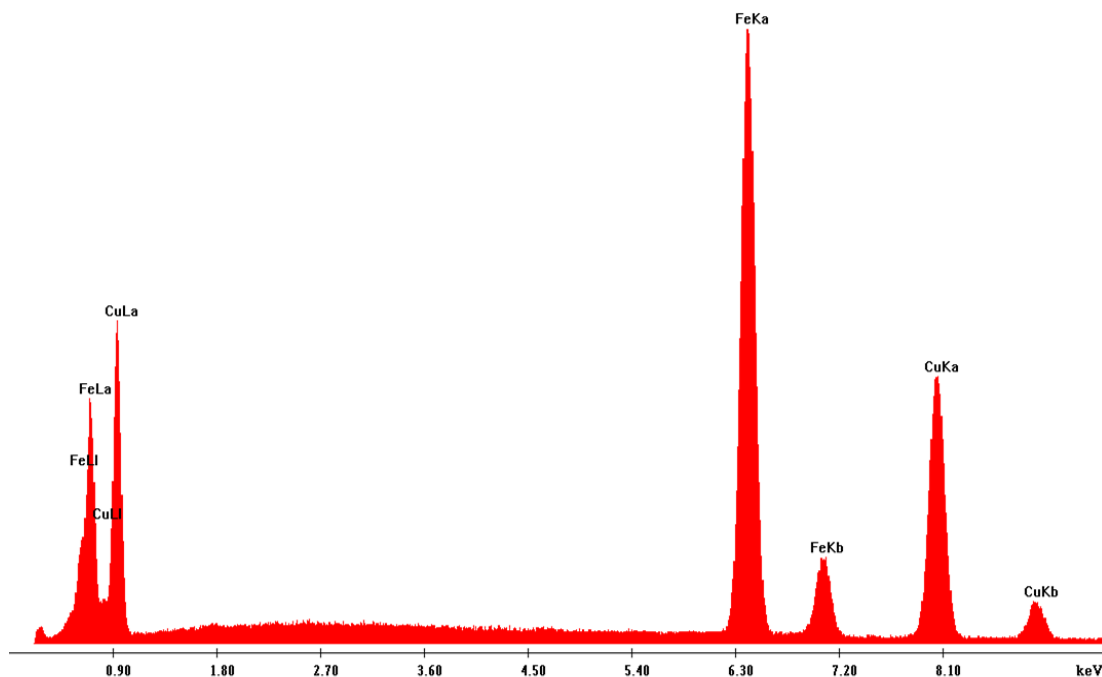
Tabulka 18 Výsledné chemické složení plošné analýzy obrázku 7-22 v hm. %

Fe	Cu
53,7	46,3

EDX analýzou bylo zjištěno, že laserový návar je tvořen pouze ze 46,3 hm. % mědi. Tento výsledek neodpovídal očekávání, které předpokládalo přítomnost mědi v návaru cca 85 hm. %. Příčinou menšího množství mědi byla pravděpodobně malá výška návaru a velká hloubka zavaření, která měla za následek vytvoření slitiny železa a mědi. Při laserovém navařování pravděpodobně také došlo k vyhoření čedičového prášku.



Obrázek 7-21 EDX analýza vzorku Cu85_čedič15_z3

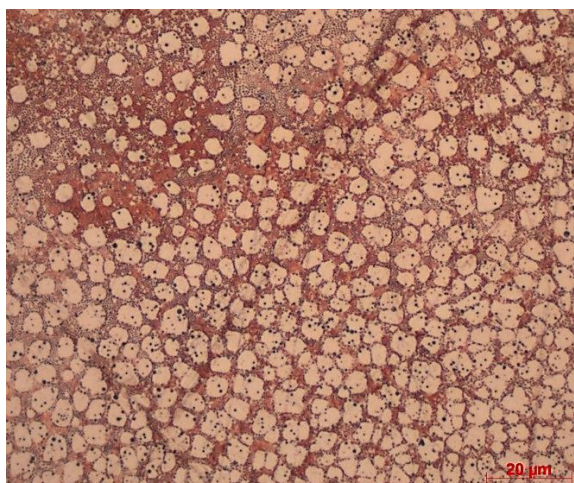


Obrázek 7-22 Energetické spektrum vzorku Cu85_čedič15_z3

7.5 Kompozitní laserový návar na bázi měď-sklo (10 hm. % skla)

Metalografické hodnocení kompozitního laserového návaru na bázi měď-sklo s 10 hm. % ultrajmeného sklářského písku bylo provedeno na jednom vzorku. Vzorek byl odebrán z oblasti středu laserového návaru. Důvodem hodnocení laserového návaru na bázi měď-sklo jen v jedné oblasti, bylo velké množství vnitřních vad.

Na vzorku Cu90_sklo10_z3 není možné pozorovat metalografickou strukturu typickou, pro měď a její slitiny. Na Obr. 7-23 nejsou patrné hranice zrna základní matrice laserového návaru, nicméně struktura obsahuje disperzně rozmístěné kulovité částice. Bližší analýza těchto částic bude předmětem dalšího výzkumu.



Obrázek 7-23 Vzorek Cu90_sklo10_z3, leptáno Robin, zvětšeno 1000x

8 Diskuze výsledků

V předložené bakalářské práci byly metalograficky hodnoceny kompozitní laserové návary na oboustranně zbrošeném substrátu z oceli C45. Jako přídatné prášky byli použity tři různé směsi měděného prášku METCO 55 s čedičovým práškem, které se lišili podílem zastoupení jednotlivých prášků, a jedna směs měděného prášku METCO 55 s ultrajemným sklářským pískem. Podíly prášků v přídatném materiálu byly následující:

- 95 hm. % měděného prášku, 5 hm. % čediče,
- 90 hm. % měděného prášku, 10 hm. % čediče,
- 85 hm. % měděného prášku, 15 hm. % čediče,
- 90 hm. % měděného prášku, 10 hm. % ultrajemného sklářského písku.

Před započítáním experimentálního programu bylo ještě provedeno měření drsnosti substrátu před laserovým navařováním a měření tvrdosti substrátu. Drsnost substrátu vyšla $R_{ax} 2,609 \pm 0,198$ a $R_{ay} 13,50 \pm 1,28$. Tvrdost substrátu vyšla 290 ± 7 HV30.

Prvním ze vzorků kompozitního laserového navařování na bázi měď-čedič byl vzorek s 5 hm. % čediče, který se vyznačoval nízkou adhezí kompozitního laserového návaru k substrátu. V důsledku nedostatečné adheze návaru nebylo možné provést metalografické hodnocení, protože při řezání na metalografické pile došlo k oddělení návaru od substrátu.

Druhým ze vzorků byl kompozitní laserový návar na bázi měď-čedič s 10 hm. % čediče. Na metalografických snímcích uvedených v kapitole 7.3 jsou mikrostruktury všech pěti oblastí, ze kterých byly odebírány vzorky. Všechny oblasti laserového návaru mají vysoce jemnozrnnou strukturu. V průběhu navařování se struktura měnila z celulární struktury na dendritickou strukturu s mezidendritickými prostory vyplněnými mědí, dále na měděnou základní matici, ve které jsou disperzně rozmístěny oxidické částice a nakonec na dendritickou strukturu s jasnými primárními osami a viditelnými sekundárními osami.

Třetím ze vzorků byl kompozitní laserový návar na bázi měď-čedič s 15 hm. % čediče. Stejně tak jako u laserového návaru s 10 hm. % čediče měl návar vysoce jemnozrnnou strukturu. Všechny vzorky toho návaru se vyznačovaly dendritickou strukturou, a však postupem navařování se měnila. Rozdíl mezi jednotlivými oblastmi laserového návaru (viz obr 7-3) je v množství a tvaru mezidendritické mědi. Nejprve byla mezidendritická měď v síťovitém tvaru kolem dendritických útvarů. V druhé oblasti laserového návaru bylo mnohem více mezidendritické mědi v porovnání s první oblastí. Dále v průběhu navařování došlo ke zmenšení množství mezidendritické mědi na menší množství než u oblastí začátku prvních housenek laserového navařování. Nakonec došlo ke změně struktury dendritických útvarů, kdy došlo k jejich růstu. V mikrostruktuře konce posledních housenek jsou tedy patrné primární osy dendritů.

Posledním vzorkem zkoumaným v předložené bakalářské práci byl kompozitní laserový návar na bázi měď-sklo s 10 hm. % skla. Protože se ale návar vyznačoval velkým množstvím vnitřních vad, byl metalograficky hodnocen jen v jedné oblasti a to v oblasti středu laserového návaru. Struktura laserového návaru byla pro slitinu mědi netypická. Nebyly patrné hranice zrna základní matrice a ve struktuře byly přítomny disperzně rozmístěné kulovité částice.

Dále byly detekovány vnitřní a vnější vady kompozitních laserových návarů. U všech metalograficky analyzovaných vzorků bylo patrné poměrně velké množství vnitřních vad. Jednalo se o porozitu, dále se v návarech vyskytovaly trhliny a nerozpuštěné částice čediče a mědi. Trhliny byly nalezeny ve dvou místech návaru a to v místě hranice ztavení přídavného prášku a substrátu a na povrchu laserového návaru. Trhliny na hranici ztavení měly směr do středu substrátu a byly vyplněny mědí.

Jakékoliv povrchové a vnitřní vady laserových návaru představují problém z hlediska aplikovatelnosti návarů a snižují jakost návaru. Přes veškerou snahu laserové návary připravené v experimentálním programu disponují určitým podílem vnitřních vad.

Nakonec byla z oblasti středu laserových návarů s 10 a 15 hm. % čediče provedena plošná EDX analýza chemického složení. Tato analýza prokázala přítomnost mědi a železa. Avšak oproti očekávaným hodnotám 90 a 85 hm. % mědi v laserovém návaru, měl laserový návar jen cca 49 a 46 hm. % mědi, k čemuž došlo pravděpodobně v důsledku velké hloubky zavaření a nízké výšce návaru. Dále chemickou analýzou nebylo detekováno znatelné množství čedičového prášku, k čemuž došlo díky vyhoření čedičového prášku nebo nezachycení oblasti s výskytem čedičového prášku.

9 Závěr

V předložené bakalářské práci bylo zpracováno téma „*Metalografické hodnocení laserových návarů na bázi kompozitních materiálů*“. Teoretická část práce se zabývala popisem technologie laserového navařování a popisem materiálů s vysokou korozní a biodegradabilní odolností, které byly použity v experimentálním programu.

Cílem experimentálního programu bylo hodnocení materiálových struktur kompozitních laserových návarů na bázi měď-čedič a měď-sklo, identifikace a popis vnitřních vad a metodika přípravy metalografických výbrusů.

Z metalografického zkoumání 4 kompozitních laserových návarů navařených na substrátu z oceli C45 bylo dosaženo těchto výsledků:

- 95 hm. % měděného prášku, 5 hm. % čediče
 - o Návar měl nízkou adhezi kompozitního laserového návaru k substrátu, díky čemuž nebylo možné provést metalografické hodnocení.
- 90 hm. % měděného prášku, 10 hm. % čediče
 - o Návar měl vysoce jemnozrnnou strukturu, která se v průběhu navařování měnila z celulární struktury na dendritickou strukturu s mezidendritickými prostory vyplněnými mědí, dále na základní měděnou matici s disperzně rozmístěnými oxidickými částicemi a nakonec na dendritickou strukturu s jasnými primárními a viditelnými sekundárními osami.
- 85 hm. % měděného prášku, 15 hm. % čediče
 - o Návar s vysoce jemnozrnnou dendritickou strukturou s mezidendritickými prostory vyplněnými mědí, jejíž tvar a množství se v průběhu navařování měnilo.
- 90 hm. % měděného prášku, 10 hm. % ultrajemného sklářského písku
 - o Návar s velkým množstvím vnitřních vad s netypickou strukturou pro měď a její slitiny, který bude předmětem dalšího výzkumu.
- vady kompozitních laserových návarů
 - o Velké množství vnitřních vad (porozita, trhliny na hranici ztavení vyplněné mědí, trhliny na povrchu návaru, nerozpuštěné částice mědi a čediče).

Vzhledem k výsledkům metalografického hodnocení nejsou tyto kompozitní laserové návary zatím vhodné k možné budoucímu použití při ukládání vyhořelého jaderného paliva do hlubinných uložišť. Vyšší jakosti laserového návaru by mohlo být dosaženo v budoucím výzkumu úpravou procesních podmínek laserového navařování a směsí přídavných prášků.

Použitá literatura

- [1] ČEZ, „Encyklopedie energetiky - Vyhořelé palivo,“ [Online]. Available: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/palivo_4.html. [Přístup získán 25 2 2019].
- [2] „Státní úřad pro jadernou bezpečnost,“ [Online]. Available: <https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/nakladani-s-vyhorelym-jadernym-palivem/>. [Přístup získán 5 12 2018].
- [3] „Správa úložišť radioaktivních odpadů - Radioaktivní odpady,“ [Online]. Available: <https://www.surao.cz/rao>. [Přístup získán 25 2 2019].
- [4] „Správa úložišť jaderných odpadů - Hlubinné úložiště,“ [Online]. Available: <https://www.surao.cz/hlubinne-uloziste>. [Přístup získán 3 12 2018].
- [5] „Správa úložišť radioaktivních odpadů - Základní informace,“ [Online]. Available: <https://www.surao.cz/zakladni-informace>. [Přístup získán 4 3 2019].
- [6] GIBSON, I., ROSEN, D., STUCKER, B., Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition editor, New York: Springer, 2015.
- [7] TOYSERKANI, E., KHAJEPOUR, A., CORBIN, S., Laser cladding, CRC Press LLC, 2005.
- [8] „Akademie věd České republiky,“ [Online]. Available: <http://www.avcr.cz/cs/pro-media/aktuality/Laser-supernastroj-cloveka-21.-století>. [Přístup získán 3 12 2018].
- [9] „Multimediální učebnice - Elektromagnetické vlny, Mikrovlnná technika,“ [Online]. Available: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=7-1-A>. [Přístup získán 6 12 2018].
- [10] „Laserové technologie v praxi,“ [Online]. Available: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>. [Přístup získán 6 12 2018].
- [11] KLUFOVÁ, P., Odolnost proti degradaci laserem navařených austenitických vrstev, Plzeň: Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní., 2018.
- [12] „Alagan Viswanathan Laser in Surface Engineering,“ [Online]. Available: http://alaganviswa.blogspot.com/2008/12/lasers-in-surface-engineering_31.html. [Přístup získán 30 11 2018].
- [13] SCHNEIDER, M., University of Twente, Enschede, Nizozemsko, 1998. [Online]. Available: <https://ris.utwente.nl/ws/files/6075114/t0000007.pdf>. [Přístup získán 28 11 2018].
- [14] „Laser cladding and handcrafting,“ [Online]. Available: <https://research.csiro.au/metals/add-manufacturing/aus-innovation/laser-cladding/laser-cladding-and-hardfacing/>. [Přístup získán 28 11 2018].
- [15] MAJUMDAR, J. D., MANNA, I., Laser Assisted Fabrication of Materials, Berlín: Springer, 2013.
- [16] „Svařování mědi a jejích slitin,“ [Online]. Available: http://www.hkprerov.cz/upload/image/ablona_materi%C3%A1ly_pro_sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD_pro_hk.pdf. [Přístup získán 6 12 2018].

- [17] „ResearchGate - Phase diagram of the iron-copper system,“ [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Phase-diagram-of-the-iron-copper-system-16_fig1_266851549. [Přístup získán 4 3 2019].
- [18] TRAN, V. N., YANG, S., PHUNG, T. A., „Microstructure and properties of Cu/TiB₂ wear resistance composite coating on H13 steel prepared by in-situ laser cladding,“ [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003039921830598X>. [Přístup získán 2 12 2018].
- [19] „ResearchGate - Fe-Ni phase diagram,“ [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Fe-Ni-phase-diagram-16_fig3_286807012. [Přístup získán 4 3 2019].
- [20] „ResearchGate - Cu-Ni binary phase diagram,“ [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Cu-Ni-binary-phase-diagram-96_fig10_259887707. [Přístup získán 4 3 2019].
- [21] CHRYSSOLOURIS, G., ZANNIS, S., TSIRBAS, K., LALAS, C., „An Experimental Investigation of Laser Cladding,“ [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607614863>. [Přístup získán 27 11 2018].
- [22] „ŠKODA JS a.s.,“ [Online]. Available: <http://www.skoda-js.cz/cs/aktuality-archiv/219-skoda-js-uspela-v-tendru-suraos.html>. [Přístup získán 5 12 2018].
- [23] A. International, ASM Handbook Vol. 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, United States of America: ASM International, 1990.
- [24] CARDARELLI, F., Materials Handbook: A Concise Desktop Reference, Londýn: Springer, 2018.
- [25] „Evropský institut mědi - zpracování,“ [Online]. Available: <https://copperalliance.cz/o-medi/med-slitiny-medi/zpracovani/>. [Přístup získán 8 3 2019].
- [26] „Neželezné slitiny,“ [Online]. Available: https://www.opi.zcu.cz/download/nezelezne_slitiny_2012.pdf. [Přístup získán 24 11 2018].
- [27] „Koroze měděných trubek v UT podlaze,“ [Online]. Available: <https://forum.tzb-info.cz/129727-koroze-mednych-trubek-ut-v-podlaze-prosim-o-radu>. [Přístup získán 22 11 2018].
- [28] „SANDATLAS - Basalt - Igneous rock,“ [Online]. Available: <https://www.sandatlas.org/basalt/>. [Přístup získán 18 3 2019].
- [29] „USGS: Volcano Hazards Program Glossary - Basalt,“ [Online]. Available: <https://volcanoes.usgs.gov/vsc/glossary/basalt.html>. [Přístup získán 19 11 2018].
- [30] „Geology - rock and minerals,“ [Online]. Available: https://flexiblelearning.auckland.ac.nz/rocks_minerals/rocks/basalt.html. [Přístup získán 19 11 2018].
- [31] „Basalt Powder for Industrials and Agriculture,“ [Online]. Available: <http://www.basaltpowder.com/home.htm>. [Přístup získán 19 11 2018].
- [32] „The Basalt Family of Rocks - varieties, uses and mineral make up,“ [Online]. Available: http://nevada-outback-gems.com/Common_rocks/Basalt.htm. [Přístup získán 19 11 2018].
- [33] „Why Does Basalt Weather Faster Than Granite?,“ [Online]. Available: <https://www.hunker.com/13406864/why-does-basalt-weather-faster-than-granite>.

- [Přístup získán 18 11 2018].
- [34] „Basalt - Igenous rocks,“ [Online]. Available: <https://www.sandatlas.org/basalt/>. [Přístup získán 18 11 2018].
- [35] „ACCURATUS - Fused Silica, SiO₂ Glass Properties,“ [Online]. Available: <https://www accuratus.com/fused.html>. [Přístup získán 18 3 2019].
- [36] BATCHELOR, A. W., LAM, L. N., CHANDRASEKRAN, M., Materials Degradation and its Control by Surface Engineering, Second Edition editor, Londýn: Imperial College Press, 2006.
- [37] „What thing will not decompose?,“ [Online]. Available: <https://careertrend.com/info-8540325-things-not-decompose.html>. [Přístup získán 19 11 2018].
- [38] „Chemická koroze skla,“ [Online]. Available: <http://www.znalecnasklo.cz/portfolio/chemicka-koroze-skla-fleky-na-skle/>. [Přístup získán 24 11 2018].
- [39] ČSN 41 2050, Ocel 12 050, Praha: Úřad pro technickou normalizaci a měření, 1976.
- [40] „Materiálový list - Pure Copper Themal Spray Powders,“ 2014. [Online]. Available: https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_DSMTS-0104.2_Pure_Cu_Powders.pdf&download=1. [Přístup získán 20 4 2019].
- [41] „Materiálový list - Mikromleté písky,“ 1 4 2019. [Online]. Available: <https://glassand.eu/getFile/case:show/id:435004??>. [Přístup získán 20 4 2019].
- [42] „Materiálový list - Sklářské písky jemné,“ 1 4 2019. [Online]. Available: <https://glassand.eu/getFile/case:show/id:435002??>. [Přístup získán 20 4 2019].
- [43] „Rapid Prototyping Serviceec - Direct Metal Laser Sintering,“ [Online]. Available: <http://www.aps-tech.com/services/manufacturing/rapid-prototyping> . [Přístup získán 4 12 2018].