

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2024

**RICHARD
POLIAK**



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

**Obloukové svařování 3D tištěných dílů
korozivzdorných ocelí**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Richard Poliak

VEDOUcí PRÁCE: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika
strojírenství

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Poliak** Jméno: **Richard** Osobní číslo: **509154**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Obloukové svařování 3D tištěných dílů korozivzdorných ocelí

Název bakalářské práce anglicky:

Arc welding of 3D printed stainless steel parts

Pokyny pro vypracování:

- Rozbor aditivních technologií pro 3D tisk kovových materiálů (s užším zaměřením na metodu DMLS)
- Svařitelnost korozivzdorných ocelí a rozbor vlastností tištěných dílů z korozivzdorných ocelí
- Návrh experimentu a vytvoření zkušebních vzorků svarových spojů
- Vyhodnocení kvality svarových spojů a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Brandt, M. Laser Additive Manufacturing Materials, Design, Technologies, and Application, Woodhead Publishing, 2017
- [2] Peyre, P., Charkaluk, E. Additive Manufacturing of Metal Alloys 1 – Processes, Raw Materials and Numerical Simulation, Published by ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2022
- [3] McDonald, S. Tig Welding Secrets: An In-Depth Look At Making Aesthetically Pleasing TIG Welds, Independently Published, 2017

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **05.04.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2024**

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

Podpis autora

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval doc. Ing. Ladislavovi Kolaříkovi, Ph.D., IWE, za venovaný čas, trpezlivosť a cenné rady počas vypracovania tejto bakalárskej práce. Poďakovanie taktiež patrí doc. Ing. Marií Kolaříkovej, Ph.D., IWE, Ing. Miroslavovi Sahulovi Ph.D, IWE, Ing. Adamovi Novotnému a Ing. Jakubovi Karmáčekovi za pomoc a odborné rady pri vypracovaní experimentálnej časti práce. Taktiež by som rád poďakoval prof. Dr. Ing. Antonínovi Křížovi, IWE, za vyhotovenie snímok vzoriek metódou elektrónovej mikroskopie.

Anotácia

Táto bakalárska práca sa venuje vyhodnocovaniu kvalít a porovnaniu zvarových spojov vysokolegovanej nehrdzavejúcej austenitickej ocele. Vzorky boli vyrobené z totožného materiálu AISI 316L. Následne boli porovnané vzorky zvarovaných spojov valcovaných trubiek so zvarovými spojmi 3D tlačných dielov vyrobených metódou DMLS. Všetky zvarové spoje boli vyhotovené metódou TIG (boli vytvorené tupé obvodové zvary). Po zváraní nasledovala makroskopická a mikroskopická kontrola zvarových spojov. Bola vykonaná aj analýza chemického zloženia pomocou elektrónovej mikroskopie a meranie tvrdosti metódou podľa Vickersa. Pozornosť bola venovaná aj správaniu jednotlivých zvarovaných materiálov počas procesu zvárania. Cieľom bolo zistiť či je metóda TIG vhodná pre zváranie 3D tlačných dielov a popísať, aké rozdiely vznikli v mechanických vlastnostiach od zvárania bežných valcovaných polotovarov z austenitickej nehrdzavejúcej ocele.

Názov bakalárskej práce:	Obloukové svařování 3D tištěných dílů korozivzdorných ocelí
Autor práce:	Richard Poliak
Vedúci práce:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Akademický rok:	2023/2024
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedúci ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Rozsah práce:	72 stránok, 14 tabuliek, 37 obrázkov
Kľúčové slova:	DMLS, 3D tlač, AM, TIG, 316L, zváranie, vyhodnocovanie kvality zvarových spojov

Annotation

This bachelor's thesis is devoted to the evaluation of the qualities and comparison of welded joints of high-alloy stainless austenitic steel. The samples were made of the same material, AISi 316L. Subsequently, samples of welded joints of rolled pipes were compared with welded joints of 3D-printed parts produced by the DMLS method. All welding joints were made using the TIG method (butt circumferential welds were created). The welding was followed by a macroscopic inspection of the weld joints. An analysis of the chemical composition using electron microscopy and hardness measurement using the Vickers method was also carried out. Attention was also paid to the behavior of individual welded materials during the welding process. The goal was to find out if the TIG method is suitable for welding 3D-printed parts and to describe what differences in mechanical properties will arise from welding ordinary rolled semi-finished products from austenitic stainless steel.

Title of the final thesis:	Arc welding of 3D printed stainless steel parts
Author:	Richard Poliak
Supervisor:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Academic year:	2023/2024
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. IWE
Extent:	72 pages, 14 tables, 37 pictures
Keywords:	DMLS, 3D printing, AM, TIG, 316L, welding, evaluation of the quality of welded joints

Obsah

Obsah.....	8
1. Úvod.....	13
2. Aditívne technológie 3D tlačných kovových dielov	14
2.1. Powder Bed Fusion (PBF).....	15
2.2. Direct Energy Deposition (DED)	17
2.3. Binder Jetting BJ	18
3. Popis metódy DMLS.....	19
3.1. Princíp metódy Direct Metal Laser Sintering.....	20
3.2. Výhody a nevýhody DMLS.....	21
4. Materiály pre metódu DMLS	22
4.1. Výroba prášku.....	23
4.1.1. Plynová atomizácia.....	23
4.1.2. Plazmová atomizácia	24
4.1.3. Atomizácia vodou.....	24
4.2. Popis vybraných práškov pre AM	25
4.2.1. Hliníkové zliatiny	25
4.2.2. Titánové zliatiny	25
4.2.3. Zliatiny niklu	26
4.2.4. Zliatiny kobalt chrómové.....	26
5. Nehrdzavejúca oceľ AISI 316L	26
5.1. Zvariteľnosť.....	27
6. Použitie jednotlivých metód zvarovania na 3D diely vytlačené metódou DMLS	28
6.1. Metóda MAG.....	28
6.2. Metóda SAW	29

6.3.	Laserové zváranie	30
7.	Metóda TIG	31
7.1.	Princíp metódy TIG	32
7.2.	Volfrámové netaviace sa elektródy	33
7.3.	Ochranné plyny	33
7.3.1.	Argón	34
7.3.2.	Hélium	34
7.3.3.	Zmes argón + hélium	34
8.	Hodnotenie kvality zvarových spojov	35
8.1.	Deštruktívne skúšky zvarových spojov	35
8.2.	Nedeštruktívne skúšky zvarových spojov	36
9.	Experimentálna časť	37
9.1.	Príprava vzoriek a zvaracieho procesu	38
9.2.	Zváranie vzoriek	40
9.3.	Príprava vzoriek k vyhodnoteniu kvality	43
9.4.	Analýza chemického zloženia elektrónovým mikroskopom	46
9.5.	Makroskopická a mikroskopická analýza	50
9.6.	Skúška tvrdosti	54
10.	Záver	58
	Zoznam použitých literárnych zdrojov	60
	Zoznam tabuliek	64
	Zoznam grafov	64
	Zoznam obrázkov	65
	Prílohy	67

Zoznam skratiek

CAD	Computer-aided design (dizajn podporovaný počítačom)
CAM	Computer-aided manufacturing (výroba podporovaná počítačom)
AM	Additive manufacturing (aditívna výroba)
FS	Fakulta strojní
MMA	Manual Metal Arc Welding (ručné oblúkové zváranie spojov)
MIG	Metal Inert Gas (Oblúkové zváranie taviacou sa elektródou v inertnom plyne)
SAW	Submerged Arc Welding (zváranie pod tavidlom)
TOO	Teplom ovplyvnená oblasť
ZM	Základný materiál
ZK	Zvarový kov
HN	Hrana natavenia
PM	Prídavný materiál
TIG	Tungsten Inert Gas (Oblúkové zváranie netaviacou sa elektródou v inertnom plyne)
EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Energetická disperzná rtg spektroskopia)
EBS	Electron Backscatter Diffraction (Elektrónová spätnorozptylová difrakcia)
SEM	Scanning Electron Microscopy (skenovací elektrónový mikroskop)
PBF	Powder Bed Fusion (Fúzia práškovej vrstvy)
SLS	Selective Laser Sintering (Selektívne laserové spekanie/sintrovanie)
SLM	Selective Laser Melting (Selektívne laserové tavenie)
EBM	Electron Beam Melting (Tavenie elektrónovým lúčom)
DMLS	Direct Metal Laser Sintering (Priame laserové spekanie)

DED	Direct Energy Deposition (Priama depozícia energie)
LENS	Laser Engineered Net Shaping (Tvarovanie pomocou laserového inžinierstva)
DMD	Direct Metal Deposition (Priama depozícia kovu)
EBFFF	Electron Beam Free Form Fabrication (Voľná tvárová výroba pomocou elektrónového lúča)
RPD	Rapid Plasma Deposition (Rýchla plazmová depozícia)
BJ	Binder Jetting (Tryskanie pojiva)
MKK	Medzi kryštalická korózia

Zoznam použitej symboliky

K/s	kelvin/sekunda
cm/s	centimeter/sekunda
mm	milimeter
g/h	gram/hodina
μm	mikrometer
W	Wat
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celzia
eV	Elektronvolt
N	Newton
A	Amper
V	Volt
s	Sekunda
MPa	Megapascal
R_e	Medza klzu
R_m	Medza pevnosti
E	Modul pružnosti v ťahu
A [%]	Ťažnosť (pomerné trvalé predĺženie)
Z [%]	Kontrakcia (pomerné trvalé zúženie)
$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$	Joule na centimeter štvorcový

1. Úvod

Aditívna technológia sa v súčasnosti rozrastá vysokou rýchlosťou do rôznych odvetví, ako automobilový, letecký či medicínsky priemysel. Dovoľuje vyrábať geometricky zložitejšie výrobky a nahrádza staršie konvenčné technológie, ktoré nie sú schopné takéto diely vyrobiť. Značnou výhodou u AM výroby je šetrenie a recyklovateľnosť materiálov. Jednou z nevýhod u 3D tlačiarň na kov je malý pracovný priestor, čo obmedzuje výrobu rozmerovo. To je však riešiteľné zvarením viacerých menších dielov do jedného, a tak vytvoriť väčšiu súčiastku. Vzhľadom na to, že 3D tlačiarne využívajú kvalitné kovové práškové materiály, pri ktorých je potrebné dbať na zvýšenú ochranu pri ich zvaraní, je najvhodnejšie tento proces zvarovania uskutočniť metódou TIG (tungsten inert gas). Táto metóda patrí medzi tavné oblúkové zvaranie a realizuje sa za pomoci netaviacej sa wolfrámovej elektródy v inertnom plyne. Tá má široké použitie u rôznych materiáloch. Zvaranie je proces, pri ktorom môže dôjsť k chybám, ktoré sa detegujú buď deštruktívne, alebo nedeštruktívne. Výsledkom týchto skúšok vieme určiť kvalitu zvarového spoja.

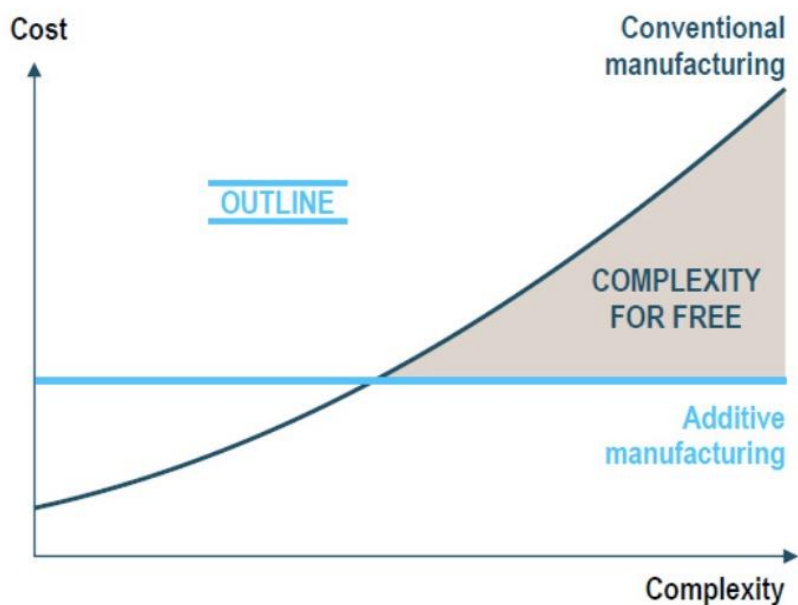
V prvej časti sa táto bakalárska práca venuje teoretickému popisu procesu DMLS, ktorý bol použitý pre výrobu vzoriek v praktickej časti. Ďalej sa práca venuje výrobe a druhom kovových práškov, popisuje metódy zvarovania a hodnotenie kvality zvarových spojov.

Experimentálna časť je venovaná príprave vzoriek k zvaraciemu procesu. Následne boli pripravené zvarové spoje pre zistenie vplyvu zvarovania na štruktúru 3D tlačených dielov v porovnaní tohoto vplyvu pri zvaraní bežných polotovarov (trubky). A to za pomoci makroskopickej a mikroskopickej analýzy. Ďalej bol overený vplyv na mechanické vlastnosti zvarových spojov: merania tvrdosti (HV) zvarového spoja a overenie chemického zloženia vzoriek elektrónovou mikroskopiou (SEM), vrátane vzájomného porovnania.

Cieľom tejto práce bolo zanalyzovať kvalitu a porovnať zvarové spoje, u ktorých bol základný materiál vyrobený dvoma odlišnými technológiami. Technológiou 3D tlače z kovového práškového materiálu a konvenčným procesom výroby trubky valcovaním.

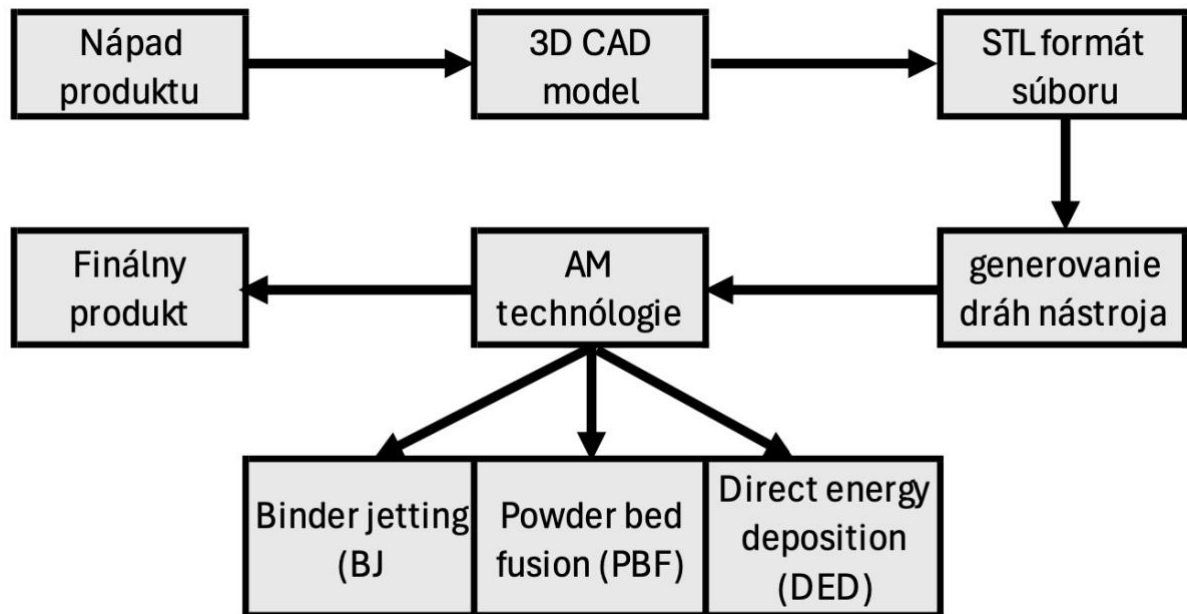
2. Aditívne technológie 3D tlačných kovových dielov

Výroba pomocou aditívnych technológií (additive manufacturing) prináša u rôznych kovových materiálov a zliatin výrobu udržateľným spôsobom. Tie majú široké zastrešenie využitia v rôznych priemyselných odvetviach (kozmonautický, biomedicínsky a automobilový priemysel, v strojárstve či letectve, ale aj v klenotníctve). 3D tlač ide rýchlo do popredia vďaka metode výroby dielov z digitálneho prostredia CAM/CAD systémov, kde rozdiely vyplývajú z rozmerov, voľby materiálu, spôsobu 3D tlače a ako vznikajú vrstvy na vytvorenie komponentov. Napríklad vrstva po vrstve vo fúzii v práškovom lôžku, kde dochádza k selektívnemu spájaniu vrstiev pomocou zdroja energie z laseru či elektrónového lúča. Je to spôsob výroby, kde sa nepoužívajú nástroje na uber materiálu a za pomerne krátky čas dokážu vyrobiť zložité a nízko objemové súčiastky. Návrhári a technológovia majú voľnú ruku v dizajne dielov. Môžu znižovať hmotnosť a hrúbku stien, určovať štruktúru, šetriť čas a energiu. Pri AM sú najväčšie náklady práve na výrobný materiál, kovový prášok, ktorý sa používa ako vstupná surovina. No kompenzuje sa to tým, že zložité diely sa dajú vyrobiť v jednom procese, kdežto pri konvenčných metódach sa musí použiť množstvo ďalších technológií, pri ktorých je potrebné používať drahé nástroje a uber materiálu. [1];[2];[4];[5]



Obrázok 1: graf nákladov (cost) vs. zložitosti výroby (complexity) medzi konvenčnými (conventional M.) a aditívnymi metódami (additive M.) [3]

Proces aditívnej technológie sa podľa americkej normy (American Society for Testing and Materials standard F2792) rozdeľuje do jednotlivých skupín. Powder bed fusion (PBF), direct energy deposition (DED), materiál jetting (MJ), binder jetting (BJ), vat photopolymerization (VP). Vzhľadom na to, že sa táto bakalárska práca zaoberá 3D tlačou kovových materiálov, ďalej stručne popíšem metódy, ktoré sú pre túto tlač vhodné. Jedna sa o metódy: PBF, DED a BJ. [5]



Obrázok 2: AM procesný tok [2]

2.1. Powder Bed Fusion (PBF)

Táto technológia je založená na tepelnej energii, kde sa selektívne spája pomocou laseru alebo elektrónového lúča v oblasti práškoveho lôžka vrstva po vrstve. Dokáže pracovať s plastovým, keramickým a kovovým práškovým materiálom.

Medzi hlavné reprezentatívne procesy PBF patria :

- Selektívne laserové spekanie (sintrovanie)/tavenie (*Selective Laser Sintering (SLS)/ Selective Laser Melting (SLM)*):

Obe metódy majú podobný princíp, ktorého základom je použitie laseru na zahriatie a spracovanie práškoveho materiálu. Metóda SLS speká materiál tesne pod teplotu tavenia a používa vstupný materiál mimo zliatiny kovov aj plasty, keramiku alebo kompozitné materiály. Naopak metóda SLM sa používa pri výrobe kovových dielov, kde dochádza k úplnému roztaveniu prášku. [5]

- Priame laserové spekanie (*Direct Metal Laser Sintering*):

Na rozdiel od metódy SLS, ktorý je používaný prevažne na 3D tlač plastov, DMLS sa využíva pre 3D tlač z kovových práškových materiáloch. [5]

- Tavenie elektrónovým lúčom (*Electron Beam Melting (EBM)*):

Tavenie elektrónovým lúčom používa vysokovýkonný lúč k roztaveniu vodivých práškových materiálov vrstvu po vrstve. Oproti metóde DMLS, proces EBM prebieha vo vákuu, aby nedošlo k rozptylu elektrónového lúča, ktorý je rýchlejší a dá sa rozdeliť. Teplota stavebného priestoru sa môže zohriať až na 1000 °C. Hlavnou výhodou u EBM je, že nepotrebuje podpery a samotné diely sa môžu pri tlačením ukladať na seba, čo zvyšuje produktivitu a šetrí materiál. Taktiež u mnoho dielov nie je potrebné ďalšie tepelné spracovanie. Metóda EBM pracuje predovšetkým s materiálmi ako je titán. Ma horšiu kvalitu povrchu a presnosť tlače. Je to spôsobené tým, že elektrónový lúč je väčší, používa sa hrubší prášok a hrubšie vrstvy nanášania. [6]

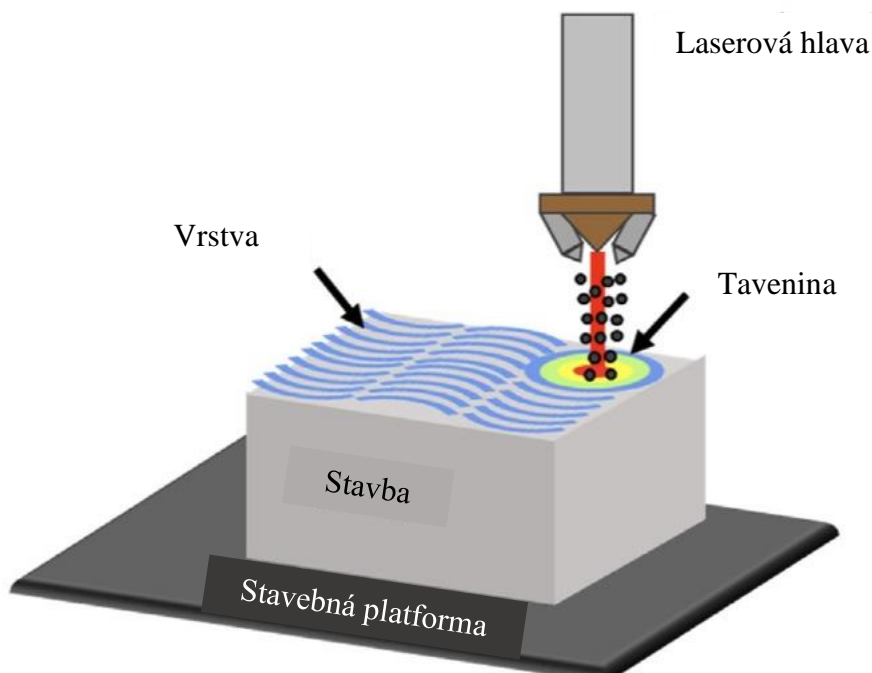
Týmito metódami sa dajú vyrobiť veľmi husté diely, ktoré často potrebujú dodatočné úpravy pre dosiahnutie tlakovej tesnosti. Požívajú sa pri potrebe rýchleho vývinu prototypu alebo pri priamej výrobe funkčných dielov, tam kde je to z ekonomického hľadiska výhodné. Avšak pri sériovej výrobe sa AM veľmi nevyužívajú. [5]

Tabuľka 1: Vlastnosti PBF metódy [5]

Kritéria	PBF
Rýchlosť tlače	5 – 20 cm/h (40 – 160 g/h)
Presnosť tlače	0,02-0,05/25 mm
Schopnosť detailov	0,04-0,2 mm
Kvalita povrchu	Ra 4-10 μm
Maximálna veľkosť dielu	500 x 280 mm x 325 mm

2.2. Direct Energy Deposition (DED)

V tomto spôsobe tlače sa sústredená tepelná energia vo forme laseru používa na tavenie pokročilých funkčných zliatin, ktoré sú buď v práškovej alebo drôtovej forme. Dochádza k roztaveniu prášku/drôtu, ktorý vychádza z dýz a dopadá do roztaveného kúpeľa taveniny. Oproti metóde PBF majú vytlačené diely horšiu kvalitu povrchu, schopnosť detailov a presnosť, no zato majú väčšiu rýchlosť tlače a veľkosť zastavovacej komory. Touto metódou sa dajú vyrábať komplexné výrobky alebo opravovať existujúce diely. [5];[7];[8]



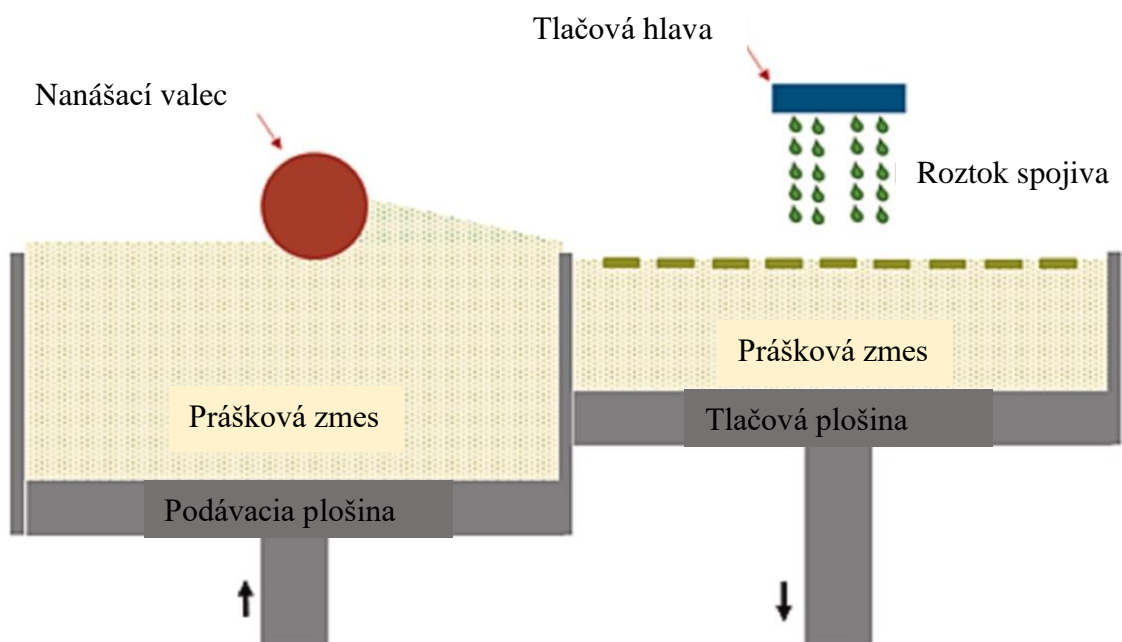
Obrázok 3: Princíp metódy DED [6]

Patria sem tieto metódy:

- Laser Engineered Net Shaping (LENS): tavenie kovového prášku alebo drôtu laserom.
- Direct Metal Deposition (DMD): tavenie kovového prášku alebo drôtu laserom
- Electron Beam Free Form Fabrication (EBFFF): tavenie kovového drôtu elektrónovým lúčom
- Rapid Plasma Deposition (RPD): tavenie kovového drôtu plazmovým oblúkom

2.3. Binder Jetting BJ

Proces, pri ktorom sa diel vyrába vrstva po vrstve, kde medzi jednotlivými vrstvami je roztok spojiva vstrekaný z tlačovej hlavy. Stroj s princípom BJ sa skladá zo zásobníka spojivového roztoku, ktorý je pripojený k tlačovej hlave. Ďalej obsahuje zásobník práškoveho materiálu a stavebný priestor. Metóda BJ používa kovové materiály alebo polyméry. Roztok je väčšinou vo forme lepidla a k jeho vytvrdzovaniu dochádza pomocou tepla alebo chemických reakcií. [8];[9]



Obrázok 4: princíp metódy BJ [8]

3. Popis metódy DMLS

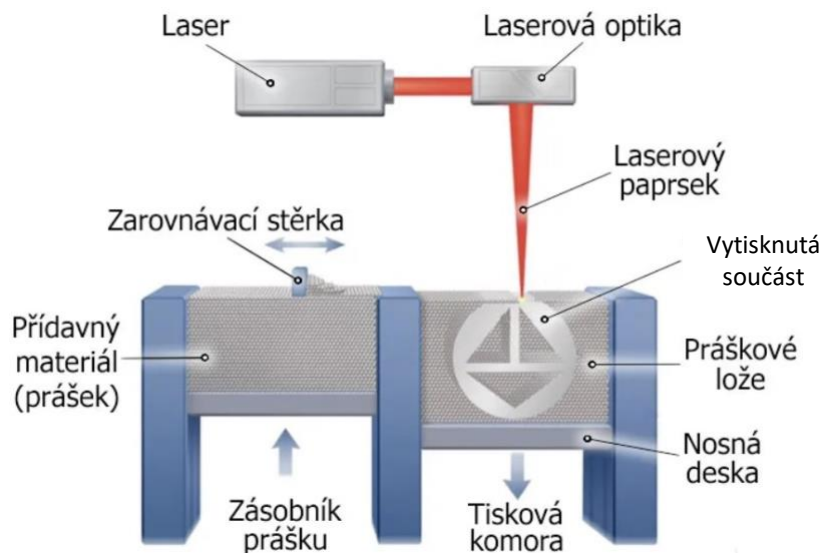
Pre potreby priemyselnej praxe a aj vzhľadom na vybavenie FS, bude v praktickej časti práce použitá metóda DMLS. Preto bude popísaná detailnejšie.

Za posledné tri desaťročia sa tejto metóde venovala väčšina pozornosti, a to vďaka nemeckej spoločnosti EOS GmbH, ktorá zaviedla prvý stroj s DMLS technológiou EOSINT M 250 v roku 1995. Metóda má prvé začiatky komercializácie práškovej AM techniky už v polovici 80. rokov. Priame laserové spekanie kovov (DMLS) je najbežnejšia technika, ktorá používa proces PBF a vyrába kovové súčiastky priamo z 3D CAD prostredia. Je to dôležitý proces pri výrobe zložitých prototypov a prototypov sieťových tvarov. Spôsobom vrstva po vrstve sa pri tejto technike spekania alebo čiastočného roztavenia kovového prášku s hrúbkou vrstvy 0,1-0,3 mm, ktorá nanesením na pracovnú dosku prejednením nanášacím ramenom vyrába diel alebo komponent. Nedávne vývoje vylepšili výkon lasera a vláknovú optiku, a to má za zásluhu efektívnejšie spracovanie kovového prášku. Väčšina komerčných strojov s metódou DMLS už ponúka recykláciu prášku a predpokladá sa, že nemá žiadny, alebo len minimálny práškový odpad. Pri metóde DMLS je pri tlači problémom vznik pórov a taktiež vysoké zvyškové napätie. Výrobok má rôzne hodnotenie mechanických vlastností, chovanie výrobkov v ťahu a tlaku, drsnosť povrchu či opotrebenie. Vďaka rýchlosti ochladzovania, ktorá sa pohybuje okolo 103-1011 K/s, majú diely vyrobené metódou DMLS jedinečné mikroštruktúrne znaky, ktoré sa konvenčnými metódami nedajú dosiahnuť.[10];[11];[12];[13]

Vo väčšine prípadov automatizácie sa množstvo spotrebovanej energie znižuje na jednotku hmotnosti spracovaného materiálu, ktorá je menšia v porovnaní s konvenčnými metódami. Kvôli nízkej rýchlosti spracovania materiálu je pri metóde DMLS vysoká spotreba energií, čo zapríčiňuje výkonný laser. Avšak väčšina strojov na spekanie laserom ponúka kroky spracovania, ktoré sú spojené do jedného zariadenia. Ako napríklad predohrev pracovného priestoru a pracovnej dosky, ale aj iné podsystémy. [13]

3.1. Princíp metódy Direct Metal Laser Sintering

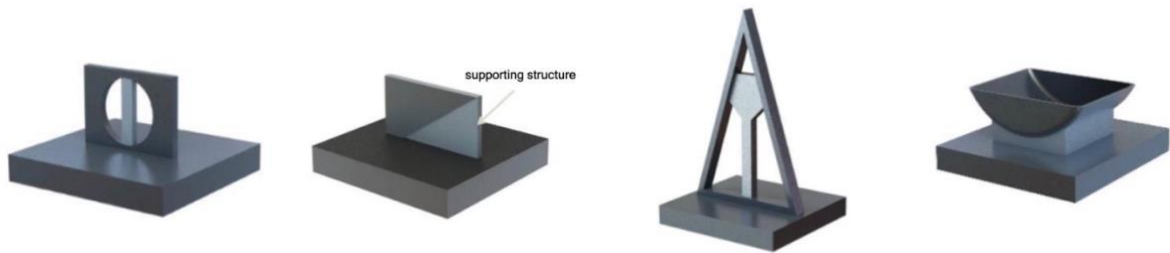
(Vid'. obrázok 2). Pred samotnou tlačou je potrebné, aby nosná platforma bola čistá a rovná. Tá je následne upnutá do pracovnej komory. Obsluha musí naplniť zásobník práškom, ktorý bol vopred preosiaty cez sitko, aby sa zaistila požadovaná veľkosť zrn. Povinnosťou obsluhy je mať pri naplňovaní oblečený špeciálny oblek a nasadenú ochranu horných dýchacích ciest, aby nedošlo k inhalácii do pľúc. Z 3D CAD systémov sa importujú dáta dielu do riadiaceho systému prístroja. Obsluha podľa požadovaných parametrov nastaví hrúbku vrstvy. Čím tenšia vrstva, tým vyššia presnosť. To však predlžuje dobu procesu. Ďalšou úlohou obsluhy je nastaviť výhodné polohovanie súčiastky. Softvér následne súčiastku rozdelí na jednotlivé tenké vrstvy. Pracovný priestor sa uzavrie a naplní inertným plynom, aby nedošlo k oxidácii prášku/dielu. [14]



Obrázok 5: Princíp metódy DMLS [30]

Nasleduje tlač dielu, ktorá začína nahrnutím tenkej vrstvy práškového materiálu na stavebnú platformu. Nanášanie sa prevádza za pomoci ramena, ktoré je vybavené keramickým britom. To slúži na rovnomerné naniesie vrstvy. Prebytočný prášok presype do prepadovej diery a rameno sa vracia späť na počiatok. Potom laserový lúč začne obchádzať trajektóriu dielu v osiach X a Y. Laserový lúč lokálne taví alebo sintruje (speká) prášok a tým sa pretaví k podkladovej vrstve. Laser môže byť jeden alebo štyri, a to o výkone 200 až 400 W. Akonáhle laser dokončí obchádzanie dielu, stavebná platforma sa posunie v osi Z dole o predom určenú hodnotu. Riadiaci systém určí zdvih práškového zásobníka, aby to bolo postačujúce na pokrytie celej stavebnej platformy a proces sa ďalej opakuje. [5]; [14]

Po dokončení tlače sa diel nechá vychladnúť a nasleduje odsávanie prášku, ktorý sa očistí a pretriedi podľa veľkosti. Ďalej dochádza k jeho kontrole zloženia a sféricity, potom sa použije pri ďalšej tlači. Stavebná platforma sa vyberie z pracovného priestoru a oddelí sa od súčiastky. Podpery, ktoré sa tlačili spolu s dielom sa musia odstrániť buď manuálne, alebo konvenčne. Podpery slúžia k fixácii dielu, aby nedošlo k zdeformovaniu tvarov alebo zhoršeniu povrchu. Po ich odstránení sa diel môže ďalej obrábať a spracovávať podľa požiadaviek. [5];[14]



Obrázok 6: Typy podpier pri 3D tlači. Z ľava: vnútorná podpera, podpora povrchu, vnútorná stromová podpera, podpora nosnej konštrukcie [15]

3.2. Výhody a nevýhody DMLS

Výhody:

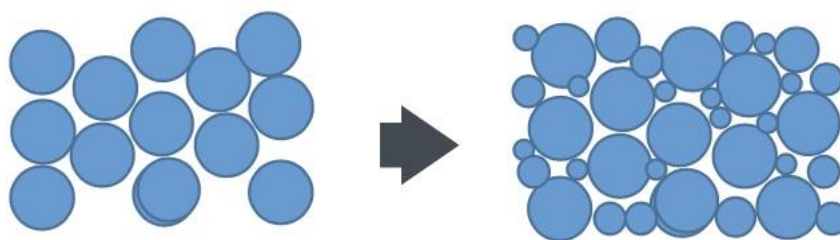
- Flexibilita pri geometrii dielu (možnosť výroby tvarovo zložitých dielov, ktoré sa tradičnými metódami vyrobiť nedajú)
- Rýchlosť prototypovania
- Efektívna spotreba materiálu
- Zníženie hmotnosti dielov

Nevýhody:

- Veľkosť pracovnej platformy
- Investičné a prevádzkové náklady
- Nevyhnutnosť dokončovacích operácií
- Potreba podpier
- Čas výroby dielu

4. Materiály pre metódu DMLS

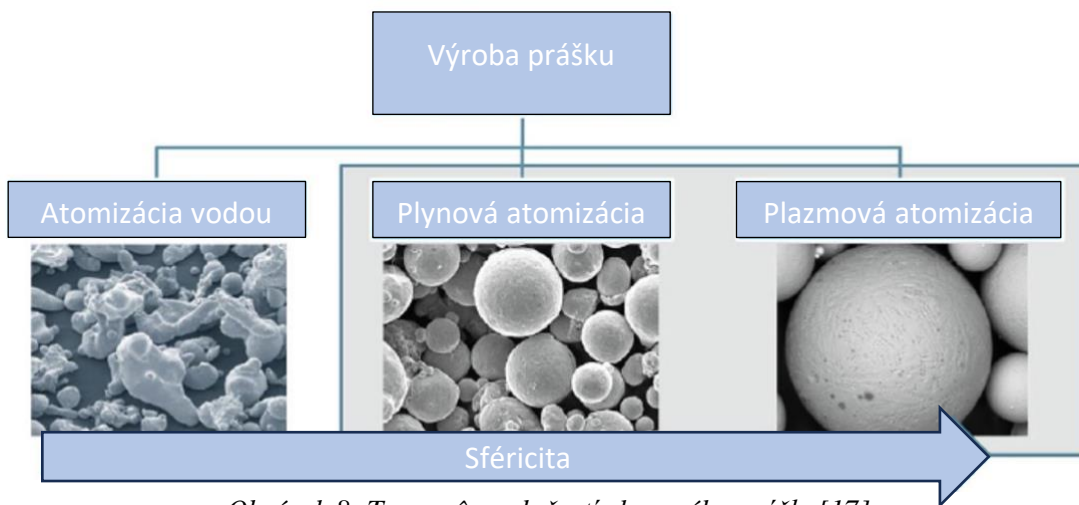
Výber vhodného materiálu je pre metódu DMLS veľmi dôležitý a zohráva veľkú rolu vo výkone a výsledných vlastnostiach finálneho dielu. Laser DMLS prístroja musí mať dostatočný výkon, aby dokázal selektívne spájať kovový prášok, ktorého teplota tavenia musí byť vhodná pre tento proces. Dôležitá je aj tepelná vodivosť materiálu, ktorá pomáha k odvádzaniu tepla z dielu do stavebnej platformy, znižuje deformácie, prispieva k rovnomernému taveniu a tuhnutiu prášku. Podľa použitia dielu je potrebné, aby chemické zloženie a mechanické či fyzikálne vlastnosti materiálu, boli vhodné v závislosti od aplikácie. Mal by mať možnosť dodatočného tepelného a povrchového spracovania po dokončení 3D tlače. Prášok musí mať určitý rozsah zrnitosti, aby sa lepšie vyplnil objem pracovného priestoru (viď. obrázok 5). Pri procese tlače je nanášanie vrstvy na stavebnú platformu dôležitý pohyb. Materiál musí byť v správnom množstve nanesený za minimálnych prebytkov, aby sa nádoba s práškom rýchlo nevyprázdnila a nedošlo tak k prerušeniu procesu 3D tlače. Materiál nesmie byť nanášaný veľkou silou, aby sa nanášacie rameno nestretlo s predošlou vrstvou. [7];[16];[17];



Obrázok 7: znázornenie objemového vyplnenia prášku[16]

4.1. Výroba prášku

Pre produkciu prášku sú k dispozícii rôzne typy výroby. Najpopulárnejšia metóda je atomizácia, ktorá sa môže prevádzať ako atomizácia plynom, atomizácia vodou, odstredivá atomizácia alebo plazmová atomizácia. Ďalšie metódy sú mechanické brúsenie, zvlákňovanie taveniny, proces rotačnej elektródy, alebo výroba pomocou chemických procesov. Výsledný produkt je kovový prášok, ktorý sa líši svojou morfológiou, tvarom a veľkosťou. Častice sú sférické s nepravidelným povrchom. Hlavnými požiadavkami AM je sférický tvar a úzka distribúcia veľkosti častíc kovového prášku, aby sa dali opakovateľne a spoľahlivo dosahovať dané výsledky. [17]



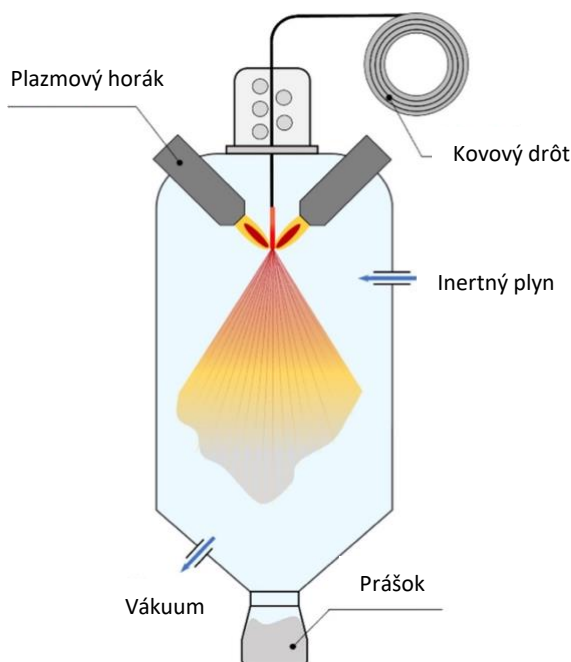
Obrázok 8: Tvary rôznych častíc kovového prášku[17]

4.1.1. Plynová atomizácia

Momentálne je táto metóda najbežnejšou technológiou na výrobu kovových práškov pre AM. Proces je rozdelený do troch krokov. Začína sa tavením základného materiálu pomocou pece, kde roztavený materiál je pretlačovaný cez trysku. To prebieha vo vaku alebo v ochrannej atmosfére. Nasleduje atomizácia, kde tenký prúd roztaveného tekutého kovu je rozptýlený pod vysokým tlakom inertného plynu na malé kvapôčky. Posledným krokom je tuhnutie, ktoré spôsobuje prúd inertného plynu. Následne sa sférické kvapôčky, ktoré stuhli počas letu, hromadia na dne komory. Výsledný produkt má guľovitý tvar, vysokú čistotu, jemnú a homogénnu mikroštruktúru. [17];[18]

4.1.2. Plazmová atomizácia

Tento druh procesu atomizácie sa používa na výrobu kovových práškov vysokej čistoty a s vysokým bodom topenia základného materiálu. Výsledkom je vysoko sférický tvar častíc s nízkym obsahom kyslíka. Pri atomizácii sa prvotný materiál používa vo forme drôtu. Ten sa za pomoci plazmových horákov roztaví na kvapôčky, ktoré sa rozptýlia, tuhnú a vytvoria prášok. Plazmová atomizácia má teda obmedzenia na výrobu práškov len pre tie materiály, ktoré sa dajú vyrábať vo forme drôtu a sú tvárne (titán, nehrdzavejúca oceľ, zliatiny na báze niklu, zliatiny kobaltu a chrómu, zliatiny hliníka). Výsledná distribúcia veľkosti je 0 – 200 μm . Hlavnou výhodou je, že roztavený materiál nenaráža na studené pevné povrchy. Použitie plazmy, ako zdroj tepla umožňuje vysoké prehriate a pri ochladzovaní vzniká úplná sféroidizácia. Tento proces je zložitejší a kvôli potrebe plazmového horáka má vyššie náklady. [17];[18]



Obrázok 9: Výroba kovového prášku plazmovou atomizáciou [31]

4.1.3. Atomizácia vodou

Proces podobný atomizácii plynu, kde sa používa prúd vody spolu s plynom nasmerovaným na roztavený kov. Základný nereaktívny materiál (ako sú napr. ocele), ktorý sa roztavuje v indukčnej peci sa za pomoci vysokotlakového prúdu vody rozpráši. Častice majú nepravidelný tvar, a to v dôsledku vyšších rýchlostí ochladzovania. Nasleduje sušenie kovového prášku a triedenie podľa požadovanej veľkosti. Hlavnou výhodou je, že pri tomto procese sú nižšie náklady v porovnaní s inými atomizáciami. [17];[18]

4.2. Popis vybraných práškov pre AM

Nižšie je uvedený výber najpožívanejších materiálov vo forme kovového prášku pre metódu DMLS. (nehrdzavejúcej ocel 316L je podrobnejšie popísaná v 5. kapitole).



Obrázok 10: Ukážka kovových práškov a výrobkov AM, Z ľava: AlSi10Mg, Ti6Al4V, Incoel 718, CoCrMo [20]

4.2.1. Hliníkové zliatiny

Zliatina AlSi10Mg je ľahký hliníkový prášok pre AM. Má pevnosť a tvrdosť vďaka kombinácii kremíka a horčíka, ktorá je pridaná do zliatiny. Prášok je vhodný pre tenkostenné a tvarovo zložité výrobky. Spolu s vynikajúcim výkonom, dobrými tepelnými vlastnosťami a nízkou mernou hmotnosťou nachádzajú využitie pri prototypovaní a pre diely v leteckom, kozmickom a automobilom priemysle. Ďalej sa vyznačuje vysokou odolnosťou proti korózii zásluhou prirodzenej oxidačnej vrstvy, ktorá sa tvorí na povrchu. [19];[20]

Tabuľka 2: Chemické zloženie AlSi10Mg [%] [19]

Al	Si	Mg	Fe	Ni	O	Ti	Zn	Mn	Cu
Zbytok	9 - 11	0,25 – 0,45	Max. 0,25	Max. 0,20	Max. 0,20	Max. 0,15	Max. 0,10	Max. 0,10	Max. 0,05

4.2.2. Titánové zliatiny

Zliatina Ti6Al4V je titánový prášok s nízkym obsahom kyslíka, ktorá má výbornú húževnatosť, zvariteľnosť a pevnosť v pomere k hmotnosti. Má vysokú sféricitu, hladký povrch a dobrú tekutosť. Je to biokompatibilný materiál odolný proti korózii s využitím v chirurgii a zubnom lekárstve. Využitie má taktiež v ďalších rôznych priemysloch, ako napríklad leteckom, petrochemickom, lodnom, automobilovom a farmaceutickom. [19];[20]

Tabuľka 3: Chemické zloženie Ti6Al4V [%] [19]

Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
Zbytok	5,50 – 6,50	3,50 – 4,50	Max. 0,25	Max. 0,13	Max. 0,08	Max. 0,05	Max. 0,012

4.2.3. Zliatiny niklu

Superzliatina na báze niklu: Inconel 718, ktorá sa používa pre vysokovýkonné aplikácie, ako sú prúdové motory v kozmickom priemysle, ale taktiež pre parogenerátory v jadrovom priemysle. Využitie má aj v obrannom a námornom priemysle. Jeho výborné zváracie a mechanické vlastnosti spolu s odolnosťou proti korózii a praskaniu zabezpečujú ideálny materiál pre aditívnu výrobu. Rozsah pracovných teplôt je od -250 °C do 650 °C. [19];[20]

Tabuľka 4: Chemické zloženie Inconel 718 [%] [19]

Ni	Cr	Nb/Ta	Mo	Ti	Co	Al	Mn	Si	Cu
50 – 55	17 - 21	4,75 – 5,50	2,80 – 3,30	0,65 – 1,15	Max. 1,00	0,20 – 0,80	Max. 0,35	Max. 0,35	0,02 – 0,05

4.2.4. Zliatiny kobalt chrómové

Zliatina s vysokým bodom tavenia (1260 °C – 1480 °C) a stabilitou pri vysokých teplotách. Samozrejmosťou je vysoká odolnosť proti korózii. Zásluhou biologickej kompatibility, pevnosti a odolnosti má široké použitie v ortopédii (kolenné implantáty, bedrové kĺby) a v zubnom lekárstve. [19];[20]

Tabuľka 5: Chemické zloženie CoCrMo [%] [19]

Co	Cr	Mo	Mn	Fe	Ni	W	O	C
Zbytok	27 - 30	5-7	Max. 1,00	Max. 0,75	Max. 0,50	Max. 0,20	Max. 0,10	Max. 0,05

5. Nehrdzavejúca oceľ AISI 316L

Materiál AISI 316L je austenitická zliatina nehrdzavejúcej ocele s obsahom chrómu až 18 hmotnostného %, vďaka ktorému je oceľ nehrdzavejúca. Reakciou medzi chrómom a kyslíkom vzniká submikroskopický film pevne priľnavého a neporézneho oxidu chrómu (pasívačná vrstva). Ďalej obsahuje 3% molybdénu, ktorého prítomnosť vyžaduje dodatočné pridanie niklu

na udržanie ocele v austenitickej fáze. Molybdén ďalej zvyšuje odolnosť proti jamkovej korózii. Oceľ 316L má dobrý výkon pri vysokej teplote a taktiež je nemagnetická. Písmeno „L“ v tejto zliatine značí nízky obsah uhlíka 0,03%, čo má za dôsledok zvýšenie odolnosti proti precipitácii karbidov na hranici zŕn a zvyšuje zvariteľnosť. Ďalšími vlastnosťami tohto materiálu je vysoká tvrdosť a tuhosť, odolnosť proti korózii a dobrá obrobitelnosť. Uplatnenie má vo výrobe foriem na vstrikávanie plastov, na odlievanie a pri tlačených rôznych chirurgických a premyslených nástrojov. [15];[21];[22]

Tabuľka 6: Chemické zloženie 316L [%] [19]

Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	O	P	C	S
16 - 18	10 - 14	2 - 3	Max. 2,00	Max. 1,00	Max. 0,10	Max. 0,10	Max. 0,045	Max. 0,03	Max. 0,03

5.1. Zvariteľnosť

Samotná zvariteľnosť sa definuje ako: „Spôsobilosť materiálu vytvoriť zváraním pri určitých technologických a konštrukčných podmienkach spoje požadovaných vlastností“. Zvariteľnosť je potrebné brať komplexne, nie len ako vlastnosť materiálu. Pri zváraní ocele dochádza k výraznému tepelnému a deformačnému ovplyvneniu materiálu. To nepriaznivo mení jeho fyzikálne, chemické a mechanické vlastnosti.[23]

Pri nehrdzavejúcej oceli 316L vznikajú veľké deformácie a napätia. Na druhú stranu zvarový spoj má výbornú húževnatosť a ťažnosť i pri vysokých teplotách (až 1200 °C). Najväčším problémom pri zváraní sú trhliny. Avšak vo zvarovom kove sa vyskytujú kryštalizačné trhliny. No likvačné a polygonizačné trhliny sa môžu objaviť ako v zváranom kove, tak aj v TOO. Nízky obsah uhlíka (do 0,03%) v 316L minimalizuje tvorbu karbidov chromu pri procese zvárania, ktoré zapríčiňujú tvorbu MKK. Hlavnými legujúcimi prvkami sú chróm, nikel a molybdén. Pridaním chrómu sa dosahuje odolnosť voči korózii, vďaka ochranej oxidačnej vrstve, ktorá vzniká na povrchu materiálu. Nikel udržiava stabilitu mikroštruktúry, zvyšuje celkovú odolnosť materiálu a významne ovplyvňuje zvariteľnosť. Molybdén drží homogénnu mikroštruktúru zvarovej húsenice. Pri zváraní austenitickej nehrdzavejúcej oceli sa nepoužíva predohrev, pretože by vnesené teplo mohlo spôsobiť trhliny v ZK a TOO. PM u tejto oceli môže obsahovať zvýšený obsah Mn s nízkym obsahom nečistôt. Ďalej sa používajú PM s vyššou hodnotou Cr a Mo na rozdiel od ZM zváraného diela a to z dôvodu prepálu prvkov. Maximálna prípustná interpass teplota je 150°C a pomer medzi šírkou a hĺbkou zvarového

spoja by nemala presiahnuť hodnotu 1,5. Je nutné použiť inertné ochranné plyny s možnosťou prídania CO₂ (max. 2,5 hm. %), ktorý potláča nauhličenie. Najvhodnejšou metódou pre zváranie AISI 316L je metóda TIG s jednosmerným prúdom a priamou polaritou. Ďalšie vhodné metódy sú popísané v kapitole 6. [23];[24]

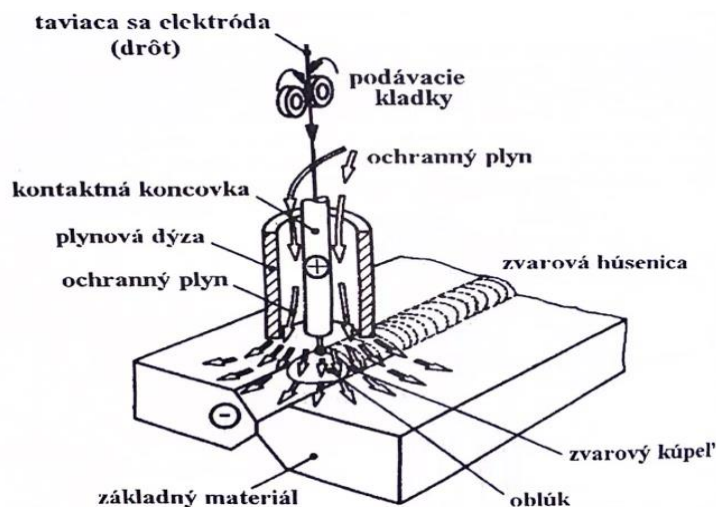
6. Použitie jednotlivých metód zvárania na 3D diely vytlačené metódou DMLS

Vzhľadom na to, že sa v praktickej časti tejto bakalárskej práci budú jednotlivé vzorky zvärať metódou TIG, bude táto metóda bližšie popísaná v 7. kapitole.

Pre diely vyrobené metódou DMLS z materiálu AISI 316L sa dá použiť väčšina metód zvárania. Keďže proces DMLS prebieha v kontrolovanej chránenej atmosfére za určitých teplôt, je nutné pri zváraní chrániť zvärací oblúk, aby nedošlo k zvýšeniu obsahu nežiadúcich a oxidáciu podporujúcich prvkov. Predohrev nie je potrebný, pretože by mohol neprajne ovplyvniť odolnosť voči korózii a kvôli problémom s trhlinami za tepla potrebujeme obmedziť vnesené teplo. Nevhodnými pre túto prácu je metóda MMA, pretože vykazuje nižšiu ochranu zvarového kúpeľa môže dôjsť k vneseniu nečistôt a k ovplyvneniu metalurgických vlastností spoja. [23]

6.1. Metóda MAG

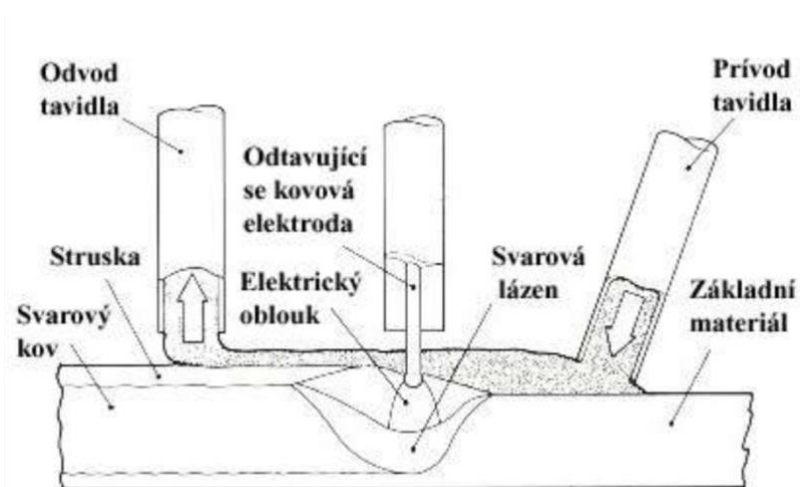
Patrí medzi tavné zváranie, kde dochádza k nataveniu zvarových plôch základného materiálu a súčasne k odtaveniu prídavného materiálu pomocou elektrického oblúka (označenie metódy 135 podľa EN ISO 4063). Tak vzniká zvarový kúpeľ, ktorý s ochladením tuhne a vytvára zvarový spoj. Elektrický oblúk, ktorý horí medzi základným materiálom a taviacou sa elektródou, dodáva teplo procesu potrebné na vytvorenie zvaru. PM je vo forme drôtu, ktorý je navinutý na cievke a podávaný do kúpeľa cez zvärací horák kladkovým mechanizmom umiestneným vo zväracom zdroji (viď. Obrázok 11). Pri metóde MAG sa pre zváranie nehrdzavejúcich ocelí používa zmes ochranných plynov, zmes argónu s malým obsahom CO₂ alebo O₂ (max. 2,5 hm. %). Zmesi ochranných plynov majú za úlohu chrániť zvarový kúpeľ a TOO v blízkosti zvaru, kde je vysoká teplota pred nežiadúcimi účinkami okolitého prostredia. Ochranná atmosféra má ďalšiu funkciu, ktorá stabilizuje elektrický oblúk a pomáha pri tavení elektródy. Výhodou je jednoduchosť a vysoká produktivita procesu. [24];[25]



Obrázok 11: Princíp zvarovania MIG[25]

6.2. Metóda SAW

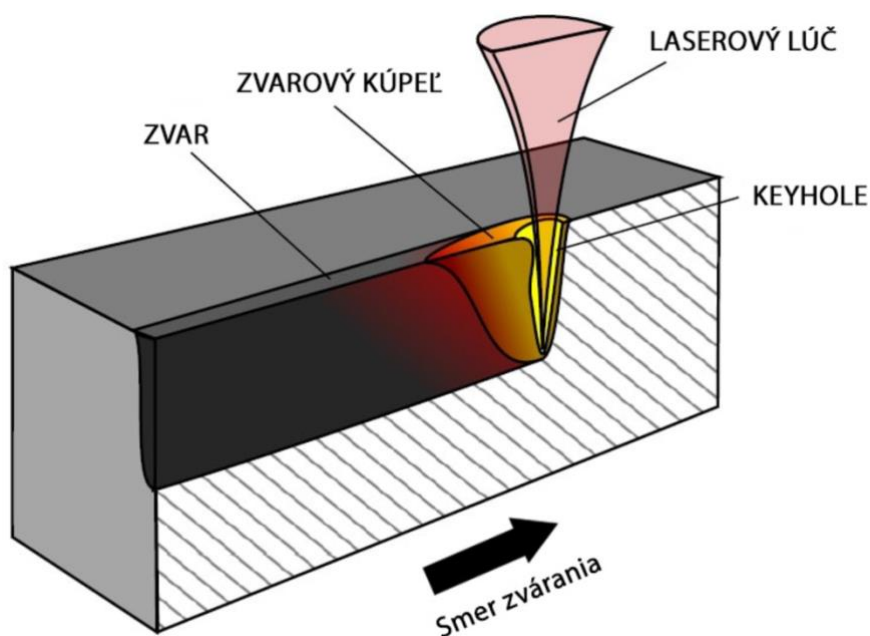
Je to zváranie pod tavivom, jeho proces sa vyznačuje horením elektrického oblúku, ktorý horí pod granulovaným tavivom. Elektrický oblúk vytvára teplo, ktoré taví PM. Ten môže byť vo forme drôtovej (označenie metódy 121 podľa EN ISO 4063) alebo páskovej elektródy (122). Ďalej taví nasýpané tavidlo, ktoré pokrýva zvarový kúpeľ a vytvára strusku. Tá tvorí tepelnú ochranu a ochranu pred odolným prostredím po vytvorení zvaru. Metóda SAW nachádza svoje využitie pre výrobky používané v náročných podmienkach, pre väčšie hrúbky základných materiálov, kde zhotovované zvary sú dlhé a neprerušované. Taktiež sa používa u kruhových výrobkov s väčšími rozmermi. [24];[25]



Obrázok 12: Princíp metódy SAW[32]

6.3. Laserové zváranie

Laserové zváranie je novou, populárnou a vysoko efektívnou metódou oproti bežným typom zvarových procesov, ktoré v niektorých odvetviach spoľahlivo nahrádzuje. Tento proces využíva k spájaniu dvoch materiálov silný svetelný lúč, ktorý je sústredný na malú oblasť na povrchu materiálu. Metódou priechodného lúča sa základný materiál roztaví a vytvorí „kľúčovú dierku“ a vzniká para (plazma), ktorá je vysoko ionizovaná a pomáha zvýšiť efektívnosť procesu s hlbším prievarom. Po zastavení laseru sa kov dostáva naspäť do jamy, stuhne a dôjde k vytvoreniu čistého a estetického zvarového spoja. Hlavnými výhodami je, že nie je potrebné čistenie zvarov a zabezpečuje hlboký prievar spolu s menšou TOO. Počiatočná investícia sa pohybuje okolo 20 000€ a taktiež sa kladú vysoké nároky na prípravu zvaru. [26];[27]

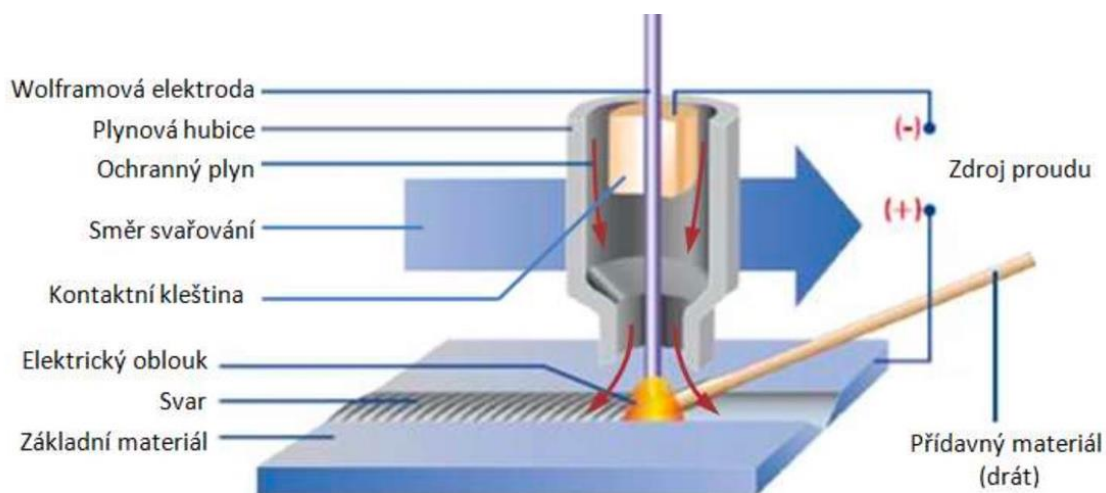


Obrázok 13: Princíp laserového zvárania [26]

7. Metóda TIG

Pre tieto aplikácie zhotovenia zvarových spojov je metóda TIG jednou z najvýhodnejších. Ďalším aspektom je že v experimentálnej časti môžem vyhotoviť zvarové spoje osobne, keďže pracujem ako zvárač metódou TIG.

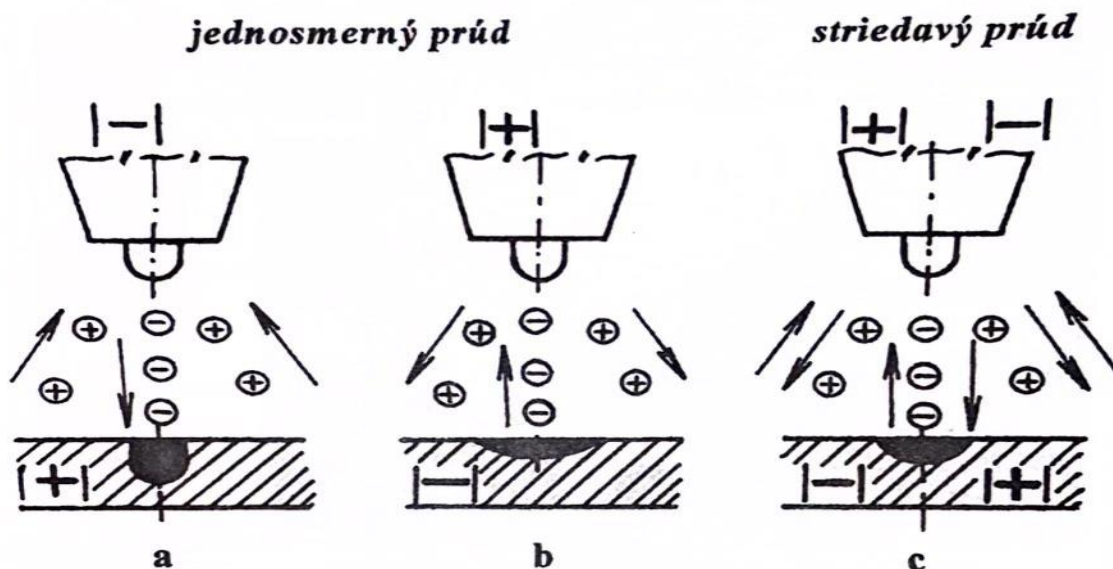
Oblúkové zváranie v inertných plynoch netaviacou sa elektródou (TIG) patrí medzi najbežnejšie metódy zvárania pre austenitické nehrdzavejúce ocele, titán a hliník, ale dajú sa s nimi zvärať aj rôzne druhy železných, či neželezných kovových materiálov. Vďaka vysokej kvalite, precíznosti a čistote zvarového spoja má využitie v rozdielnych priemysloch (leteckom, automobilovom, potravinárskom, atď.). Táto metóda zvárania sa vykonáva manuálne, alebo za pomoci automatizovaných procesoch vo forme orbitálneho zvárania, či za pomoci zváracích robotov. Má viacero značení. Podľa normy EN sa značí TIG (WIG), podľa normy EN ISO 4063 je značená číslom 141 a americkou normou ASME GTAW . [24];[25];[28]



Obrázok 14: Princíp zváraní TIG [32]

7.1. Princíp metódy TIG

Tavné zváranie, kde elektrický oblúk horí medzi netaviacou sa wolfrámovou elektródou a základným materiálom. Elektrický oblúk a oblasť zvaru je chránený inertným plynom. Oblúk zabezpečuje zásluhou vysokej teploty (6500°C - 9000°C) a koncentracii tepla v pomerne krátkom čase tavenie kovov. Elektrický oblúk sa dá meniť a prispôbiť pomocou základných parametrov zvárania, ako je napríklad druh (jednosmerný prúd s priamou alebo nepriamou polaritou, striedavý prúd - viď. obrázok 13) a veľkosť prúdu, oblúku a rýchlosť zvárania. Vlastnosti sa ďalej menia s použitou výtokovou dýzou (tvar, priemer) a netaviacou sa elektródou (druh, priemer a úprava konca elektródy). Zapálenie oblúku sa zabezpečuje pomocou skratového (dotykom netaviacej sa elektródy s povrchom základného materiálu) alebo bezskratového zapalovania (vysokonapäťovým elektrickým výbojom). Zachovanie stabilného oblúku po jeho zalapaní ovplyvňujú ionizačné vlastnosti plynu. Prerúšením obvodu stlačením spínača alebo odtiahnutím zváracieho horáka na väčšiu vzdialenosť sa ukončí elektrický oblúk. Zváranie prebieha s manuálnym alebo automatizovaným prísunom prídavného materiálu, prípadne bez neho. PM ma formu tyči alebo drôtu s priemermi od 0,8 mm až po 4 mm a jeho chemické zloženie musí byť totožné so ZM. [24];[25]



Obrázok 15: Vplyv typu zváracieho prúdu a polarity na formu a rozmery zvaru, jednosmerný prúd: a) priama polarita, b) nepriama polarita, c) striedavý prúd [25]

7.2. Wolfrámové netaviace sa elektródy

Netaviace sa elektródy sú tyčky kruhového prierezu vyrobené z čistého wolfrámu alebo môžu byť pridané legujúce prvky vo forme oxidov kovov vzácnych zemín. Značenie elektród začína písmenom W, pokiaľ za nim je písmeno P značí to čistý wolfrám. Ďalšie písmeno charakterizuje legúry (T – oxid toričitý, L – oxid lantaničitý, Z – oxid zirkoničitý, C – oxid céričitý). Číslo uvedené k značke predstavuje desatinu násobku koncentrácie oxidovej prísady. Elektróda sa priamo podieľa pri oblúkovom procese, ovplyvňuje jeho zapalovanie a stabilné horenie. Prísady oxidov zvyšujú emisiu elektrónov, zvyšujú výdrž elektród a umožňujú použiť väčšie prúdové zaťaženie. [24];[25]

Tabuľka 7: Označenie, zloženie a identifikačná farba wolfrámových elektród [25]

Označenie elektródy	Chemické zloženie oxidické prísady (%)	Identifikačná farba
WP	-	Zelená
WT 4	0,35 – 0,55	Modrá
WT 10	0,80 – 1,20	Žltá
WT 20	1,70 – 2,20	Červená
WT 30	2,80 – 3,20	Fialová
WT 40	3,80 – 4,20	Oranžová
WZ 3	0,15 – 0,50	Hnedá
WZ 8	0,70 – 0,90	Biela
WL 10	0,90 – 1,20	Čierna
WC 20	1,80 – 2,20	Sivá

7.3. Ochranné plyny

Prietokové množstvo, druh a hlavne čistota použitých inertných plynov ovplyvňuje fyzikálne a technologické vlastnosti elektrického oblúku. Prietokové množstvo plynu prúdiaceho z hubice sa pohybuje v rozmedzí 7 l/min až 15 l/min. Dôležitým krokom pred zváraním je správne a dostatočne nastaviť predfuk (doba [s] prúdenia ochranného plynu pred zapálením elektrického oblúku) a dofuk (doba [s] prúdenia ochranného plynu po vypnutí elektrického oblúku, slúži ako chladenie ZK). Nesprávne nastavenie môže viesť k zhoršeniu formovania a kresby zvaru. Pri zváraní austenitických a vysoko legovaných ocelí nestačí len ochranná atmosféra, ktorá vychádza z hubice, ale je potrebná aj sekundárna koreňová ochrana

inertnými a formovacími plynmi (napr. Argón 4.8, 95%N / 5%H). Tá zlepšuje vzhľad, tvar a odolnosť koreňa voči korózii. [24];[25]

7.3.1. Argón

Argón (Ar) patrí medzi jednoatómové bezfarebné plyny, ktoré nemajú žiadnu vôňu ani chuť a nereaguje s inými chemickými prvkami. Malá tepelná vodivosť spolu s relatívne malým ionizačným potenciálom (15,8 eV) priaznivo ovplyvňujú elektrické vlastnosti elektrického oblúka a stabilitu jeho horenia. Zásluhou hustoty (1,784kg/m³), ktorá je ťažšia oproti vzduchu, je ochrana argónom pri zváraní v základných polohách vysoko efektívna. Má malú tepelnú vodivosť, čo sa prejavuje na tvare prierezu zvaru a menším prievarom. Argón sa najčastejšie dodáva v čistote vhodnej pre zváranie Ar 99,996 (4.6), Ar 99,998 (4.8), Ar 99,999 (5.0). Je značený tmavozelenou farbou. [24];[25]

7.3.2. Hélium

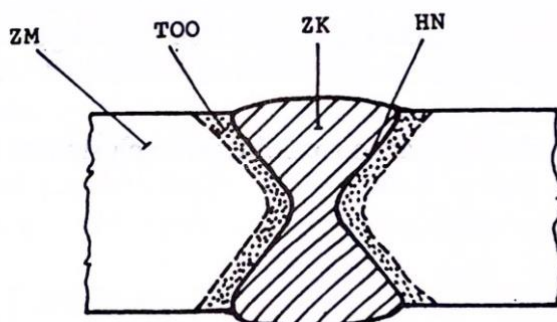
Hélium (He), vzácny jednoatómový plyn bez farby, chuti a vône. Vzhľadom na to, že je až 7-krát ľahší oproti vzduchu, je pri zváraní héliom (0,178 kg/m³) potrebné zvýšiť prietok v porovnaní s argónom až dvojnásobne, preto je menej efektívny. S relatívne vysokým napätím (až 30 V) má oblúk vyšší tepelný výkon, čo zabezpečuje väčšiu hĺbku a lepší profil zvaru. Zapaľovanie a stabilita elektrického oblúku pri TIG zváraní v porovnaní s argónom je horšia. V našich podmienkach sa z ekonomických dôvodoch používa argón, a kvôli tomu sa skôr používajú zmesi argónu s héliom (najčastejšie s 30% He). [24];[25]

7.3.3. Zmes argón + hélium

Táto zmes má použitie pre TIG zváranie hrubých alebo vysoko vodivých materiálov. Prímes héliu do argónu už pri 10% zlepšuje formovanie zvaru. Hélium nad 25% v argóne zvyšuje hĺbku prievaru, zväčšuje sa taktiež šírka zvaru a produktivita zvárania. So stúpajúcim obsahom héliu rastie aj napätie na oblúku. [24];[25]

8. Hodnotenie kvality zvarových spojov

Kvalita zvarov je ovplyvnená viacerými činiteľmi. Najväčší vplyv má kvantita vneseného tepla do oblasti konštrukcie zvaru, ďalej závisí od aplikovanej technológie zvárania a typu prídavného materiálu. Správnou voľbou týchto faktorov sa môžu dosiahnuť vlastnosti blízke základnému materiálu. Zvar má štruktúru liacu, ktorá je na rozdiel od valcovaného základného materiálu heterogénna. Tú štruktúru môžu tvoriť chyby či zhrubnutie zrna v prechodovej TOO. Jednotlivé oblasti sa vyznačujú odlišnými mechanickými vlastnosťami. Za chybu sa považuje každá odchýlka rozmeru, štruktúry od stanovených noriem. Chyby môžu byť vonkajšie a vnútorné. Zisťovanie týchto chýb v zvarovom spoji a v TOO prebieha deštruktívne alebo nedeštruktívne. Jednotlivé typy vad sú stanovené podľa normy EN ISO 6520-1. [23];[29]



Obrázok 16: Zvarový spoj, ZM - základný materiál, TOO - teplo ovplyvnená oblasť, HN - hranica natavenia, ZK - zvarový kov [23]

8.1. Deštruktívne skúšky zvarových spojov

Deštruktívne skúšky slúžia k zisteniu mechanických vlastností zvaru. Jedná sa o skúšky s lokálnym, alebo celkovým prerušením zvarového spoja. Výrobok po vyhotovení deštruktívnych skúšok nie je možné opätovne použiť. Vzorky sú podrobené rôznym manipuláciám a zaťaženiám, kde sa následne analyzuje a vyhodnocuje ich reakcia na tieto podmienky (mechanike vlastnosti). Ďalšími metódami môže byť spravená makroskopická a mikroskopická analýza pri rôznych zväčšeniach, ktorá slúži na zobrazenie štruktúry vzoriek. Pre hodnotenie kryštalografie materiálov a na zistenie chemického zloženia sa používa skenovacia elektrónová mikroskopia (SEM), využíva analýzu EDX, kde elektrónový lúč SEM interaguje s atómami vo vzorke a röntgenové lúče sú emitované zo vzorky. Pri metóde EBSD dopadá elektrónový lúč na vyleštený povrch vzorky pod malým uhlom s následným spätným rozptylom elektrónov. [23]

Medzi deštruktívne skúšky patria [23]:

- **Skúšky ťahom:** Podstatou je ťahové namáhanie skúšobných tyčí až do prerušenia a následným vyhodnotením mechanických vlastností (R_e [MPa], R_m [MPa], E [MPa], A [%], Z [%])
- **Skúšky rázom v ohybe:** Spočíva v prerazení skúšobnej tyče so stanoveným tvarom a rozmerom na kyvadlovom kladive jedným nárazom. Výsledkom je hodnota vrubovej húževnatí [$J \cdot cm^{-2}$].
- **Skúška lámavosti:** slúži na zisťovanie deformačných vlastností materiálov a zvarových spojov.
- **Skúšky tvrdosti:** zaužívané sú skúšky podľa Brinella [HB], Vickersa [HV] a Rockwella [HRC].

8.2. Nedeštruktívne skúšky zvarových spojov

Vzhľadom na ekonomickú stránku a ekologičnosť dnešnej doby majú významné postavenie vo výrobe či údržbe. NDT sa používa pre overenie kvality a integrity zvarového spoja, poprípade zistiť vo zvarovom spoji nedostatky a vady typu necelistvostí. Výrobok, ktorý je vystavený nedeštruktívnej kontrole kvality zvarového spoja, je možné ďalej používať, pretože nedochádza k fyzickému poškodeniu zvaru. Pri zváraní použitia NDT sa musí zvoliť správna metóda, keďže chyby, ktoré sa určia prežiarením, sa nezobrazia napríklad u skúšky ultrazvukom. Preto je potrebné uvažovať nad správnu kontrolou výrobku, pre ktoré sú charakteristické chyby a ich výskyt podľa použitej technológie. [29]

Medzi nedeštruktívne skúšky patria:

- **Pre zisťovanie povrchových vad:** vizuálna skúška (VT), penetračná / kapilárna skúška (PT) , magnetická prášková skúška (MT).
- **Pre zisťovanie vnútorných vad:** skúška prežiarením (RT), skúška ultrazvukom (UT).

9. Experimentálna časť

V experimentálnej časti bakalárskej práci boli zhotovené zvarové spoje nehrdzavejúcej ocele AISI 316L. U dvoch vzoriek bol zhotovený obvodový zvar na rúrke s priemerom 76,1 mm a s hrúbkou steny 2 mm, ktorá bola vyrobená valcovaním. Ďalšie dve vzorky boli vyrobené pomocou AM technológie DMLS z totožného materiálu (ocel AISI 316L). Veľkosť častíc použitého kovového prášku pri proces 3D tlače bol v rozmedzí 15 – 45 μm . Zvary boli urobené za pomoci tavného zvárania metódou TIG. Bol použitý profesionálny vodou chladený zvaráci zdroj Migatronik Pi 320 TIG AC/DC s prúdovým rozsahom 5 – 320A a nastavením jednosmerným či striedavým prúdom. Ďalej umožňuje zváranie metódami TIG a MMA. Použitá ochranná atmosféra argón 4.8 slúžila ako ochrana krycej oblasti a aj pre ochranu koreňovej oblasti. Prívod bol zabezpečený pomocou tlakovej hadice zavedenej do koreňovej oblasti a zachytený pomocou hliníkovej pásky (viď. obrázok 18). Bol použitý PM 316LSi s priemerom 2 mm od značky METALWELD (chemické zloženie viď tabuľka 8). Cieľom experimentálnej práce bolo popísať priebeh zvárania jednotlivých vzoriek a následne ich kvalitatívne vyhodnotiť, zhodnotiť možnosť zvariteľnosti 3D tlačených dielov a porovnať ovplyvnenie materiálov zváraním, oproti zváraniu konvenčných polotovarov. Vzhľadom na dobrú zvariteľnosť nehrdzavejúcej ocele AISI 316L, vyrobenú bežným spôsobom, sa za kvalitného prevedenia očakával zvar bez vady. U diela vyrobeného pomocou AM boli očakávané vady vo forme pórov či vtrúsenín.

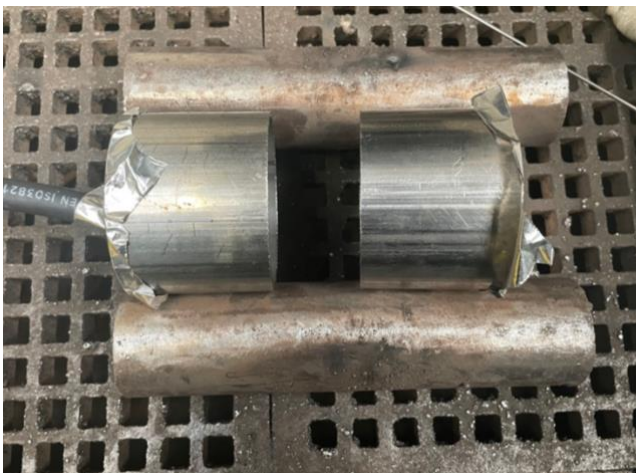
Tabuľka 8: Chemické zloženie PM 316LSi [%]

Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C	S	P
18 – 20	11 – 14	2,5 – 3,0	1,0 – 2,5	0,65 – 1,2	0,03	0,03	0,02

9.1. Príprava vzoriek a zvaracieho procesu

Pri príprave vzoriek sa musel klásť veľký dôraz na čistotu povrchu, rovné delenie materiálov a taktiež na odihlenie hrán po ňom. Nečistoty na povrchu zvaraného materiálu by mohli negatívne ovplyvniť kvalitu zvaru. Nerovné delenie materiálu a nedostatočné odihlenie hrán, by mohlo viesť k chýbam koreňa a krycej vrstvy zvarového spoja. Dôkladne čistý musel byť aj PM.

Pri vzorkách č. 1 a č. 2 (viď. obrázok 17a) sa na delenie použila pásová píla na kov Pilous ARG 260 H. Rúrka sa rozdelila na štyri 5 centimetrové kúsky. Nasledovalo odihlenie hrán po rezaní za pomoci ručného pilníka a potom očistenie povrchu od nečistôt technickým liehom. Vzhľadom na to, že vzorky č. 3 (AM) a č. 4 (AM) (viď. obrázok 17 b), c)) patrili k funkčným vzorkám, použilo sa iba čistenie technickým liehom.



a)



b)



c)

Obrázok 17: vzorky po delení, odihlení a čistení

a) vzorka č. 1,2, b) vzorka č. 3 (AM), c) vzorka č. 4 (AM)

Po príprave plôch nasledovala príprava na stehovanie materiálov jednotlivých vzoriek (viď. obrázok 18). To zahŕňalo zabezpečenie prívodu a odvodu použitého argónu 4.8 na ochranu koreňovej vrstvy. Po zatesnení pomocou hliníkovej pásky sa pokračovalo v nastavení dielov do pozície stehovania. Hrany vonkajšej a vnútornej strany sa museli lícovať.



a)



b)



c)

Obrázok 18: Vzorky pripravené na stehovanie

a) vzorka č. 1,2, b) vzorka č. 4 (AM), c) vzorka č. 3 (AM)

9.2. Zváranie vzoriek

Detailný popis a použité hodnoty procesu zvárania sú znázornené v predbežnej špecifikácii zváracieho postupu (pWPS) (viď. Príloha 1 a 2).

Prietok argónu sa nastavil podľa pWPS za pomoci redukčného ventilu, z ktorého bola vyvedená rozdvojka pre prúdenie do zváracieho horáka a pre ochranu koreňovej vrstvy. Hodnota prietoku sa skontrolovala na manometri umiestnenom na redukčnom ventile a výstupný prietok u zváracieho horáka prietokomerom.

Nastavenie zváracieho zdroja Migatronic Pi 350 TIG AC/DC s následným umiestnením vzoriek do polohovadla a stehovaním, ktoré je zobrazené na obrázku 19, kde nastavenie prúdu bolo navýšene o 15A oproti hodnote uvedenej vo pWPS počas zvárania. Po stehovaní sa vzorka upla do otočného, výškovo nastaviteľného polohovadla (viď. obrázok 20). Nasledovalo nastavenie zváracieho zdroja, pre trubku bol nastavený prúd (60 – 64 A) a napätie (11 – 12 V). Pri 3D výtlaku sa zmenil len zvärací prúd (58 – 62 A). Pokračovalo sa samotným zhotovením jednovrstevných zvarov v polohe PH.



Obrázok 19: Ukážka stehovania vzorky



Obrázok 20: Poloha pri zváraní

Pri samotnom zváraní bol viditeľný rozdiel medzi jednotlivými vzorkami. Vzorky vyrobené pomocou AM mali tendenciu sa rýchlejšie prehriať, následkom čoho došlo k rýchlemu rozšíreniu krycej vrstvy zvaru. Na túto situáciu bolo potrebné reagovať znížením prúdu, aby sa materiál ochladil a až potom sa mohlo pokračovať v procese. Pri začínaní zvárania som postrehol jemné prskanie pri natavovaní ZM, po pridaní prídavného materiálu prskanie prestalo. Výsledné zhotovenia zvarov na jednotlivých vzorkách sú zobrazené na obrázku 21. Po zhotovení zvarových spojov bola spravená vizuálna kontrola, ktorá neodhalila žiadne vady na povrchu ani v koreňovej oblasti.



a)



b)



c)



d)

Obrázok 21: Zvary, a) vzorka č. 1, b) vzorka č. 2, c) vzorka č. 4 (AM), d) vzorka č. 3 (AM)

9.3. Príprava vzoriek k vyhodnoteniu kvality

Po zvarení dielov sa pokračovalo narezaním vzoriek, pomocou metalografickej, intenzívne chladenej píly Struers Labotom – 3 (vid'. obrázok 22) a s rezným kotúčom Struers 46A25 určeným pre stredne tvrdé a nehrdzavejúce ocele. Pomocou tejto píly nedochádza k tepelnému ovplyvneniu rezanej vzorky. Použil sa priečny rez cez zvar zobrazený na obrázku 23, aby boli zachytené všetky oblasti zvarového spoja, a to základný materiál, teplom ovplyvnená oblasť, ktoré sa nachádzajú z oboch strán zvaru a uprostred zvarový kov.

Pretože sa vzorka č. 1 a vzorka č. 3 (AM) zväčala na vyskúšanie procesu a doladenie parametrov, na rozrezanie sa vybrali vzorka č. 2 a vzorka č. 4 (AM).



Obrázok 22: Píla Struers Labotom – 3



Obrázok 23: Ukážka rozrezania zvaru

V rámci prípravy metalografických výbrusov sa rozrezané vzorky nachystali na lisovanie za tepla. Lisovanie prebiehalo na zariadení Struers CityPress – 1 (vid'. obrázok 24), kde sa použila fenolická živica Struers MultiFast pre montáž za horúca.



Obrázok 24: Montážny lis Struers CityPress – 1



Obrázok 25: Vzorky po brúsení a leštení

Prípravné vzorky sa najprv brúsili a následne leštili na prístroji ATM Sapphire 250 A2- Eco (vid'. obrázok 26). Kvôli rúrkovitému tvaru rezaných vzoriek bolo potrebné viacnásobné brúsenie na zarovnanie povrchu s brusným kotúčom o drsnosti FEPA P 180. Brúsenie prebiehalo po dobu 1 minúty, pri prítlačnej sile 30N a 300 ot/min. Po brúsení boli vzorky a hlava držiaka vzoriek opláchnuté pod tečúcou vodou a opäť osadené. Brúsne kotúče s určitou drsnosťou boli použité v nasledovnom poradí: P 180, P 500, P 1200, P 2000 a P 4000. Pokračovalo sa leštením. Pri rovnakej prítlačnej sile ako u brúsenia, zmenila sa doba na 4,5 minúty pri 150 ot/min. Prvé z dvoch leštení začalo pomocou diamant monokryštálu (veľkosť zrna 1 μm), použitý spolu so zmáčadlom. Na finálne leštenie sa použil MasterPrep o veľkosti zrná 0,5 μm spolu s destilovanou vodou (vid'. obrázok 25).

Pre zvýraznenie zŕn a oblastí zvaru sa vzorky elektrolyticky leptali v 10 % kyseline šŕaveľovej pri 10V po dobu 10 sekúnd. Výsledné štruktúry pripravených metalografických vzoriek sú znázornené a popísané v kapitole 9.4.

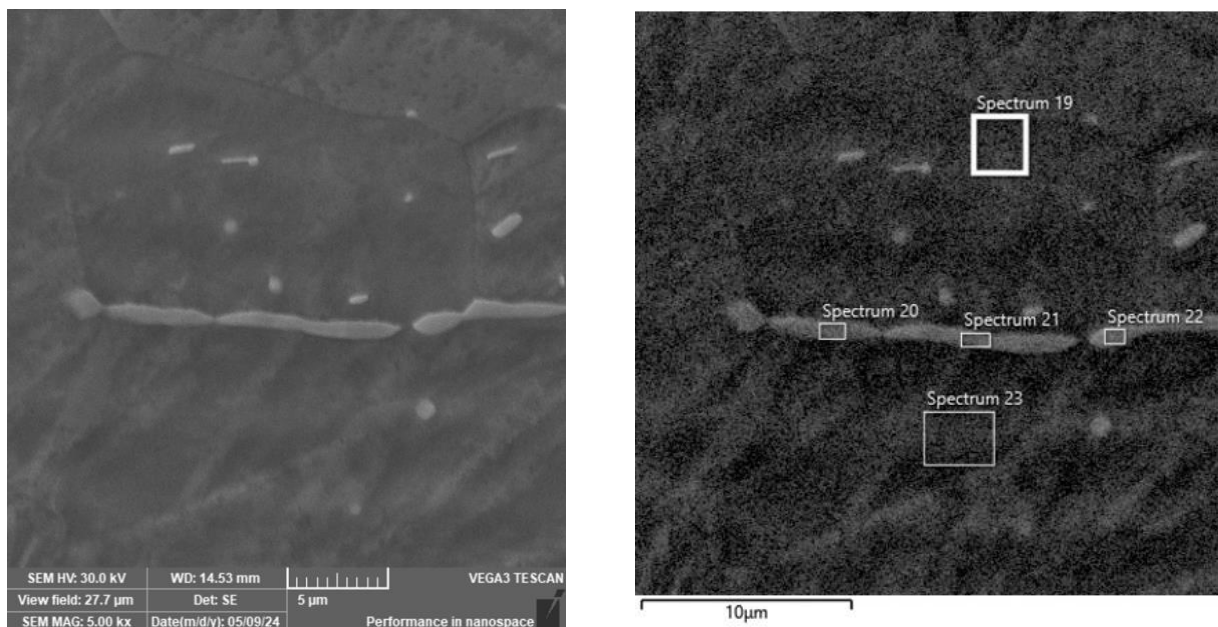


Obrázok 26: Brúska a leštička ATM Sapphire 250 A2 – ECO

9.4. Analýza chemického zloženia elektrónovým mikroskopom

Analýza EDX a EBSD bola prevedená skenovacím elektrónovým mikroskope (SEM) Tescan Vega 3 na fakulte strojního inženýrství, Univezita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem.

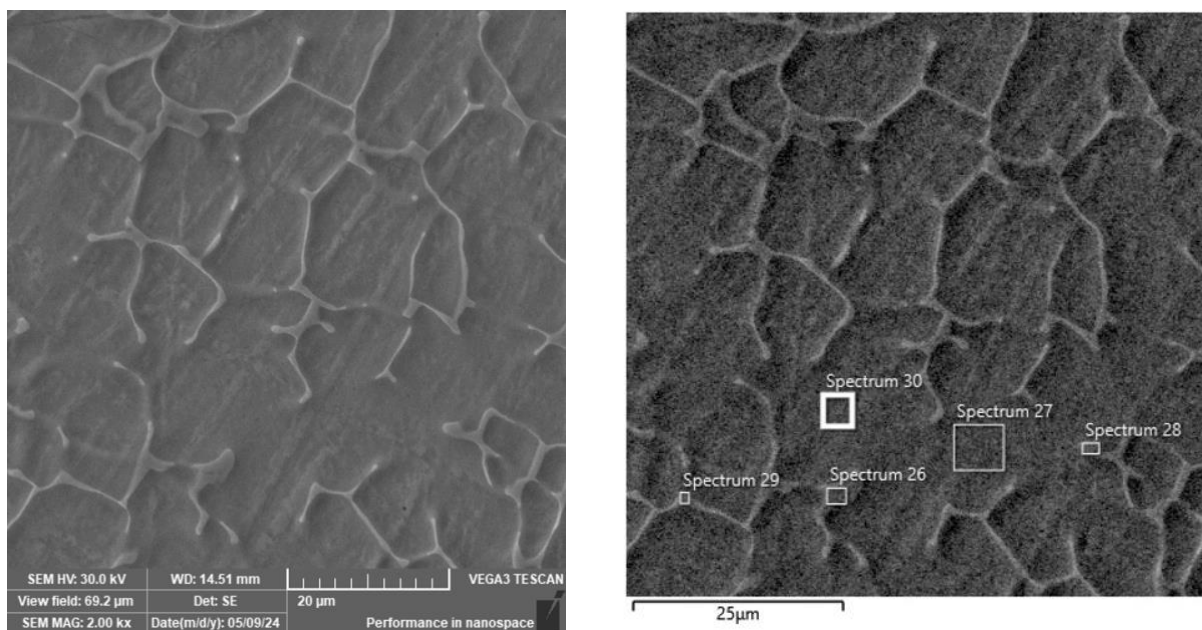
Snímky zhotovené pre bodovú EDS analýzu chemického zloženia vzorky č. 2 sú zobrazená na obrázkoch 27 a 28. Výsledné hodnoty oblasti ZM a ZK sú uvedené v Tabuľkách 9 a 10. Namerané hodnoty sa zhodujú s chemickým zložením nehrdzavejúcej oceli AISI 316L uvedenej v teoretickej časti tejto práce na strane 27 v tabuľke č. 6.



Obrázok 27: ZM vzorka č.2 a spektra bodovej EDS analýzy

Tabuľka 9: Chemické zloženie [%], vzorka č. 2 ZM

Spectrum	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
Celá plocha snímku	18,2	9,0	2,4	1,3	–
19	17,9	9,3	2,3	1,2	0,4
20	20,8	6,5	3,7	1,0	0,5
21	20,5	6,7	3,2	1,2	0,5
22	20,1	6,8	3,6	1,1	0,6
23	18,3	9,2	2,7	1,2	0,4

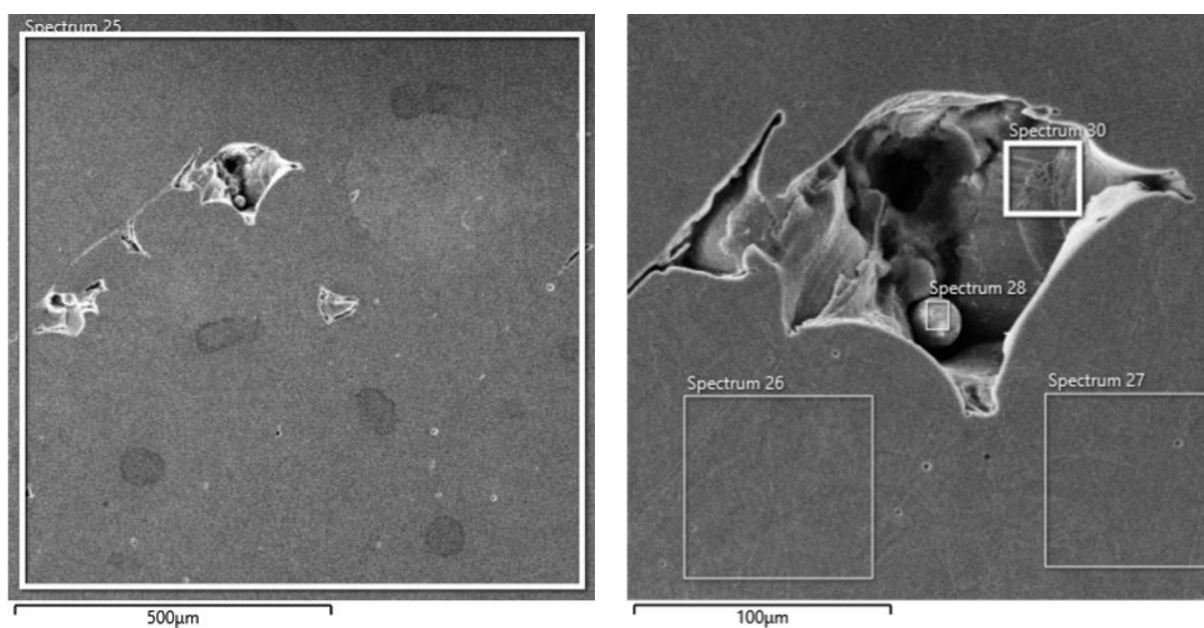


Obrázok 28: ZK vzorka č.2 a spektra bodovej EDS analýzy

Tabuľka 10: Chemické zloženie [%], vzorka č. 2 ZK

Spectrum	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
Celá plocha snímku	18,1	10,1	2,4	1,5	0,7
26	19,0	9,3	2,8	1,4	0,7
27	17,6	11,5	2,0	1,4	0,7
28	19,8	7,8	3,7	1,5	0,7
29	21,7	6,1	4,5	1,4	0,8
30	17,3	11,8	2,2	1,5	0,7

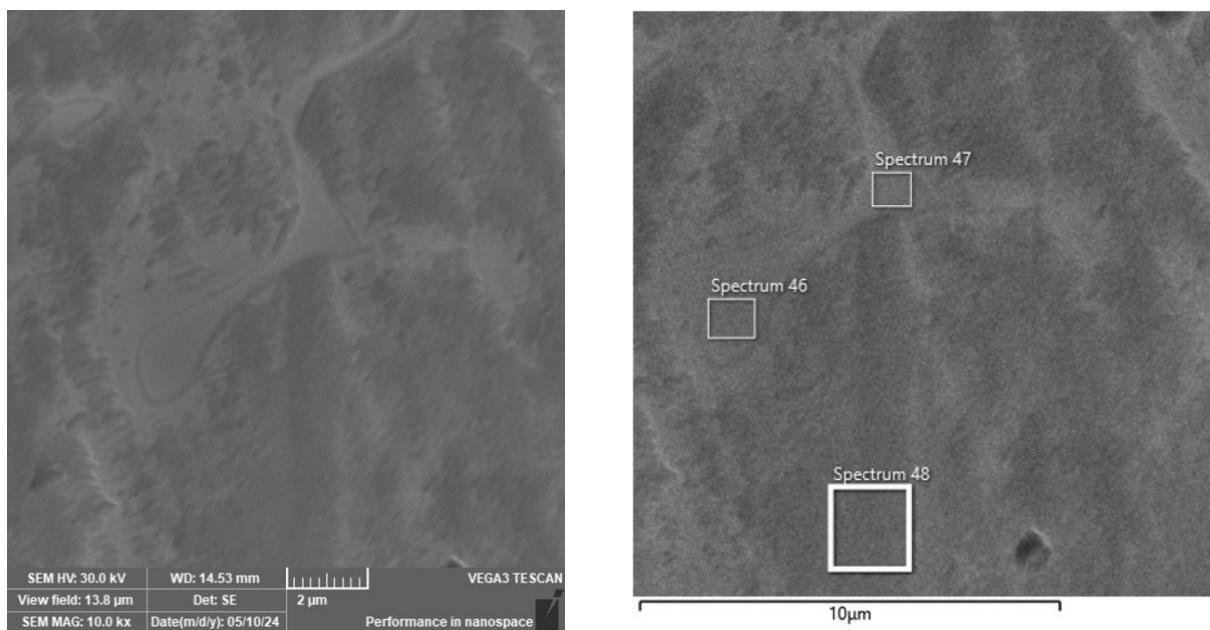
Bodová analýza EDS vzorky č. 4 (AM) je zobrazená na obrázkoch 29 a 30 s uvedenými výsledkami v Tabuľkách 11 a 12. Chemické zloženie spektier 26 a 27 sa zhoduje s chemickým zložením uvedeným v teoretickej časti. V defekte (oxidická vtrúsenina), spektrum 28 a 30, došlo k zmene chemického zloženia spolu s výskytom Al. Analýza spektier zobrazených na obrazovke 30, preukázala vyššiu koncentráciu Cr (spektrum 46 a 47), ktorý je feritotvorným prvkom a teda sa jedna o delta ferit. Okolie ma iné chemické zloženie a je o Cr ochudobnené, preto je viditeľná iná štruktúra a hranice.



Obrázok 29: ZM vzorka č. 4 (AM)

Tabuľka 11: Chemické zloženie [%], vzorka č. 4 (AM) ZM

Spectrum	Cr	Ni	Mo	Al	Mn	Si
25	18,0	10,6	3,1	–	1,1	–
26	17,8	10,7	2,7	–	1,1	–
27	17,8	10,7	2,9	–	1,0	–
28	17,3	9,8	3,0	4,2	0,8	1,2
30	22,3	5,7	–	6,5	2,7	–



Obrázok 30: ZK vzorka č. 4 (AM), spektra bodovej analýzy EDS

Tabuľka 12: Chemické zloženie [%], vzorka č. 4 (AM) ZK

Spectrum	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
46	22,1	5,9	4,9	0,8	–
47	20,5	7,1	4,4	0,9	–
48	17,3	12,0	2,4	1,1	–

9.5. Makroskopická a mikroskopická analýza

Účelom makroskopickej a mikroskopickej analýzy je stanovenie charakteru zvarového spoja a vyhodnotenie zmeny štruktúry vplyvom zvaracieho procesu pomocou vizuálnej a optickej kontroly.

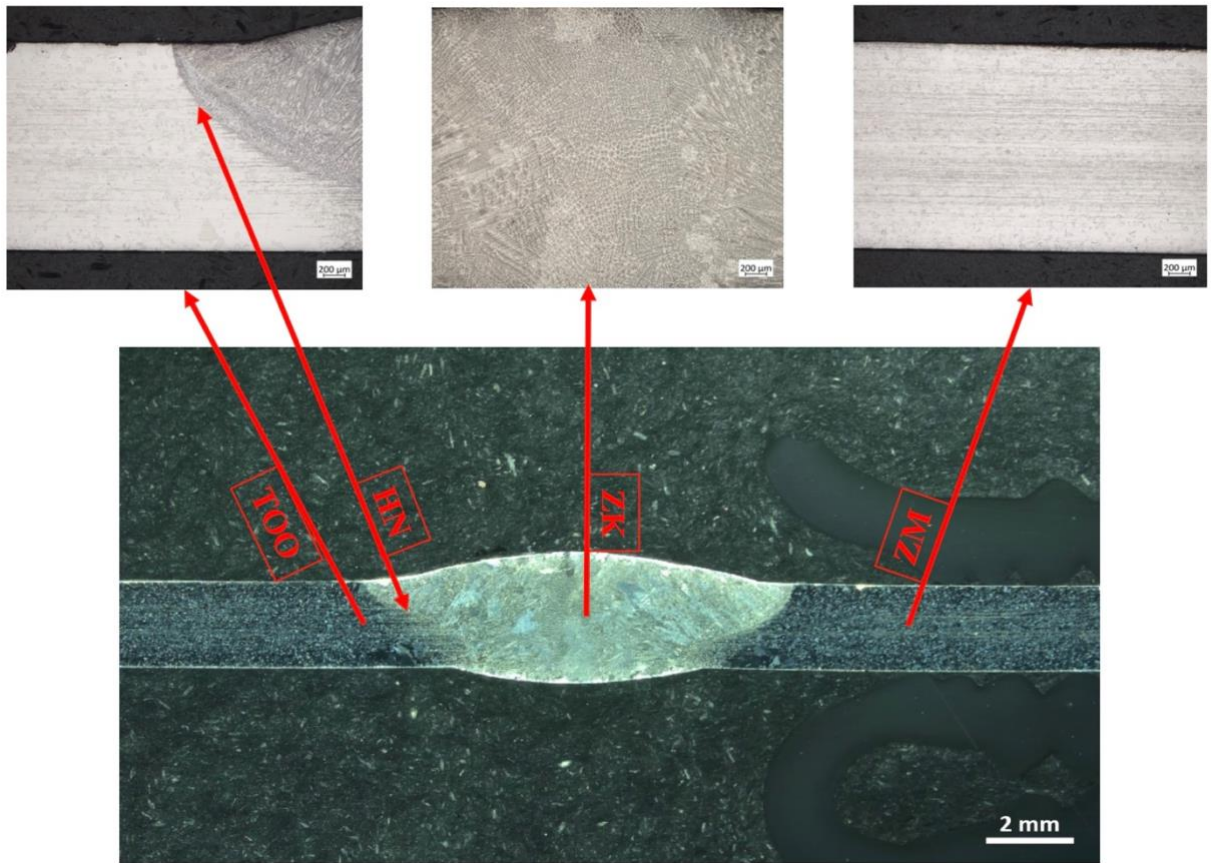
Makroskopická analýza bolo použitá na zobrazenie tvaru prierezu zvarového spoja, veľkosti TOO a k určeniu základných geometrických charakteristík zvaru. Mikroskopická analýza vyleštených vzoriek sa robila na mikroskope C. Zeiss Axio Observer Dm1 (vid'. obrázok 31) k stanoveniu štruktúry a štruktúrnych zmien v jednotlivých oblastiach zvarového spoja. Snímky sa zhotovovali pri zväčšeniach od 25x až po 1000x. Merali sa jednotlivé rozmery zrn.



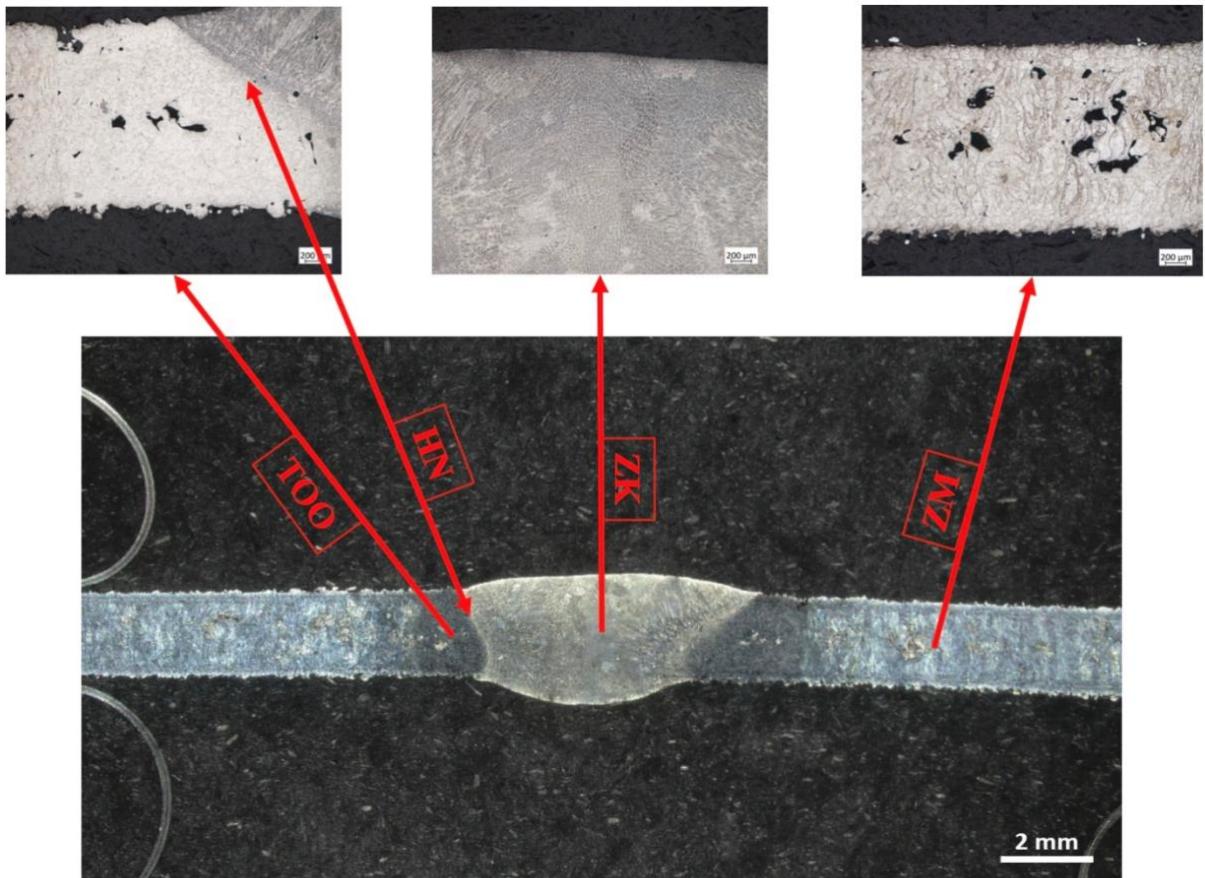
Obrázok 31: Mikroskop Zeiss Axio Observer Dm1

Zo zhotovených snímok je výrazne viditeľný rozdiel medzi zvarovými spojmi jednotlivých vzoriek. U zvaru vzorky č. 2 (vid'. obrázok 32), ktorá bola vyrobená valcovaním, nie je priamo viditeľná TOO, zvarový spoj je pravidelný a rovnomerný s prevýšením krycej vrstvy 745 μm a 488 μm koreňovej vrstvy. V tepelnej ovplyvnenej oblasti bola zmeraná priemerná šírku 1732 μm z jednej strany zvarového spoja.

Pri vzorke vyrobenej pomocou DMLS (vid'. obrázok 33) je rozloženie zvaru nepravidelné s jemne väčším prevýšením koreňovej vrstvy (689 μm) oproti krycej vrstvy (455 μm).



Obrázok 32: zvarový spoj, vzorka č. 2



Obrázok 33: zvarový spoj, vzorka č. 4 (AM)

Na obrázku 33 sú zobrazené makroskopické a mikroskopické snímky, ktoré boli zhotovené pri zväčšení 50x.

Na týchto snímkach je viditeľná štruktúra fáz zvarového spoja a taktiež veľkosť zrn. Obrázok 34 slúži na porovnanie štruktúr medzi zhotovenými vzorkami so zväčšením 200x. V prílohe 3 sú zobrazené snímky jednotlivých oblastí zvarového spoja pri 500x zväčšení.

Vzorka č.2 zobrazená na obrázkoch 34 a), b), c), nepreukázala žiadne vady, a jednalo sa o kvalitný zvarový spoj.

Pri základom materiáli (viď. obrázok 34 a)) je viditeľná čistá austenitická štruktúra s dvojčatením zrn, ktoré je špecifickým znakom práve u austenitu. Ďalej je viditeľné riadkovanie, ktoré vzniklo pri výrobe rúrky valcovaním. Priemerná veľkosť zrn v ZM je 37 μm .

V teplom ovplyvnenej oblasti došlo k zhrubnutiu zrn oproti ZM o priemerne 95 μm na hodnotu 132 μm . K výraznému zhrubnutiu zrna došlo na krajoch koreňovej vrstvy. Teplom sa zmenila charakteristika riadkovania po valcovaní (viď. obrázok 34 b)).

Zvarový kov neobsahoval žiadne póry, trhliny alebo iné vady. Mal čistý, homogénny vzhľad s pravidelným tvarom (viď. obrázok 34 c)).

Vzorka č. 4 (AM) zobrazená na obrázkoch 34 d), e), f), bola špecifická nekvalitným základným materiálom, kde bol pomerne veľký výskyt pórov a rôznych dier zapríčinením nezosintrovaním guľôčok práškoveho materiálu pri procese 3D tlače (viď. obrázok 33 v oblasti ZM). Diery vo zvarovom kove sa minimalizovali vďaka prídavnému materiálu.

Na obrázku 34 a) sú viditeľné vrstvy spekania procesu 3D tlače, v ktorých je jemnozrná štruktúra. Jednotlivé vrstvy sú nerovnomerné a majú odlišné rozmery. Priemerná výška vrstvy je 259 μm a šírka je 67 μm . Ďalej je tam výskyt dier s rôznymi veľkosťami, kde sa nachádza nespečený materiál.

V teplom ovplyvnenej oblasti sa vrstvy spekania vytratili a došlo k homogenizácii pôsobením tepla z procesu zvarovania. Priemerná veľkosť zrn v TOO je 30 μm .

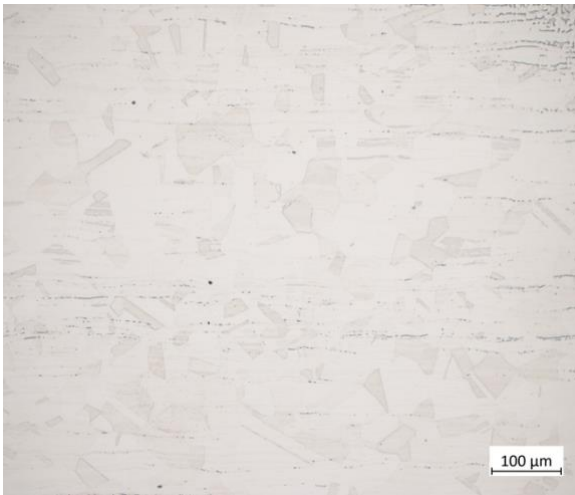
Pri zvarovom kove je v osi viditeľná jemnejšia štruktúra oproti ZK u vzorky č. 2. Zvarový kov obsahuje množstvo mikropórov o priemernej veľkosti 0,98 μm .



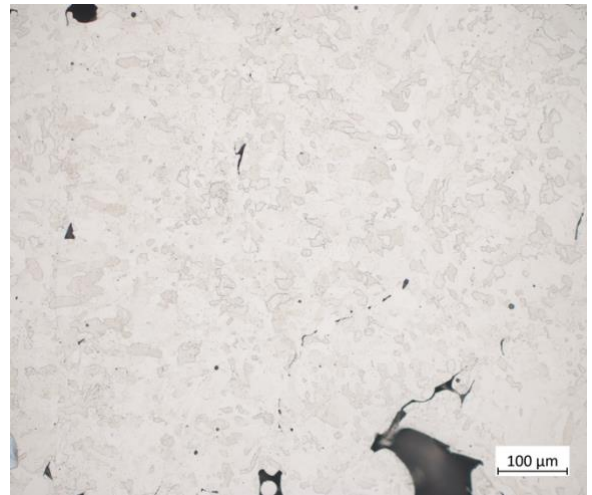
a) ZM vzorka č. 2



d) ZM vzorka č. 4 (AM)



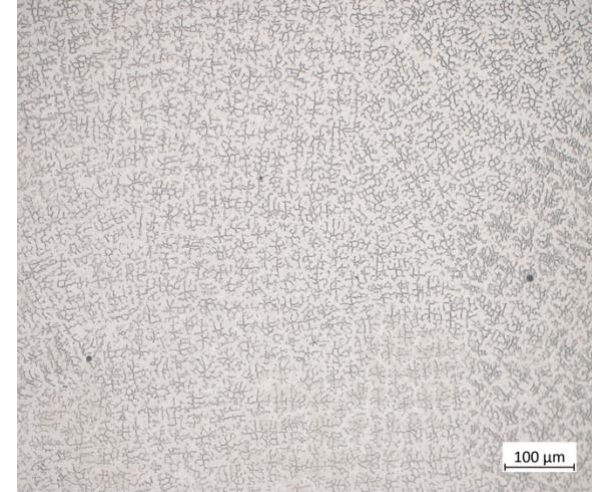
b) TOO vzorka č. 2



e) TOO vzorka č. 4 (AM)



c) ZK vzorka č. 2



f) ZK vzorka č. 4 (AM)

Obrázok 34: Mikroskopické snímky zvarového spoja

9.6. Skúška tvrdosti

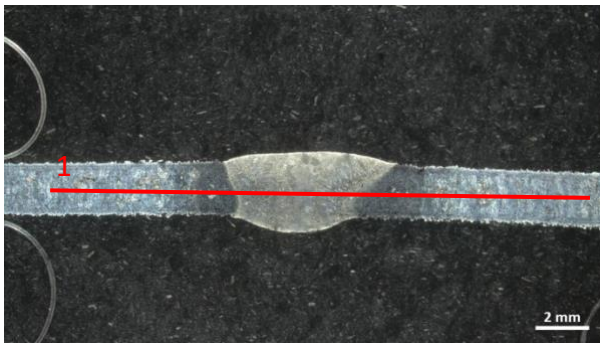
Meranie tvrdosti prebiehalo za pomoci stroja Buehler – IndentaMet 1100 Series (vid'. obrázok 35). Skúška bola vykonaná podľa Vickersa pri zaťažení 9,81 N po dobu dvanástich sekúnd, HV1 (12s), v súlade s normou EN ISO 9015-2. Výsledná hodnota bola priamo vypočítaná prístrojom, kde po vtlačení diamantovým štvorbokým ihlanom sa merali stredné uhlopriečky. Uhlopriečky boli merané pomocou mikroskopu s nastaviteľnými ryskami, ktoré sa umiestnili na vrcholy uhlopriečok. Po zameraní jednej uhlopriečky sa hodnota uložila. Následne sa mikroskop pootočil o 90° a prebehlo nastavenie a nameranie rozmeru druhej uhlopriečky.



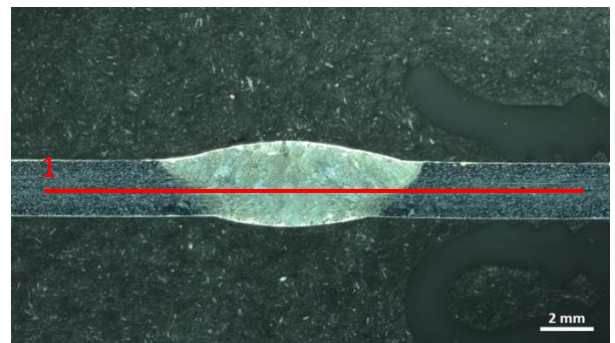
Obrázok 35: Tvrdomer Buehler – IndentaMer 1100 Series

Skúška bola urobená na vybraných vzorkách č. 2 a č. 4 (AM) v jednom rade. Keďže sa jednalo o zvar s jednou vrstvou, bola postačujúca jedna rada vtlačení podľa vyššie uvedenej

normy (viď. obrázok 36 a 37). A to po 3 vtláčenia v ZM a TOO z oboch strán zvaru a 3 vtláčenia boli prevedené v oblasti ZK. Namerané hodnoty sú uvedené v tabuľke 13 a 14.



Obrázok 36: Zobrazenie rady pri skúške tvrdosti vzorky č. 4 (AM)

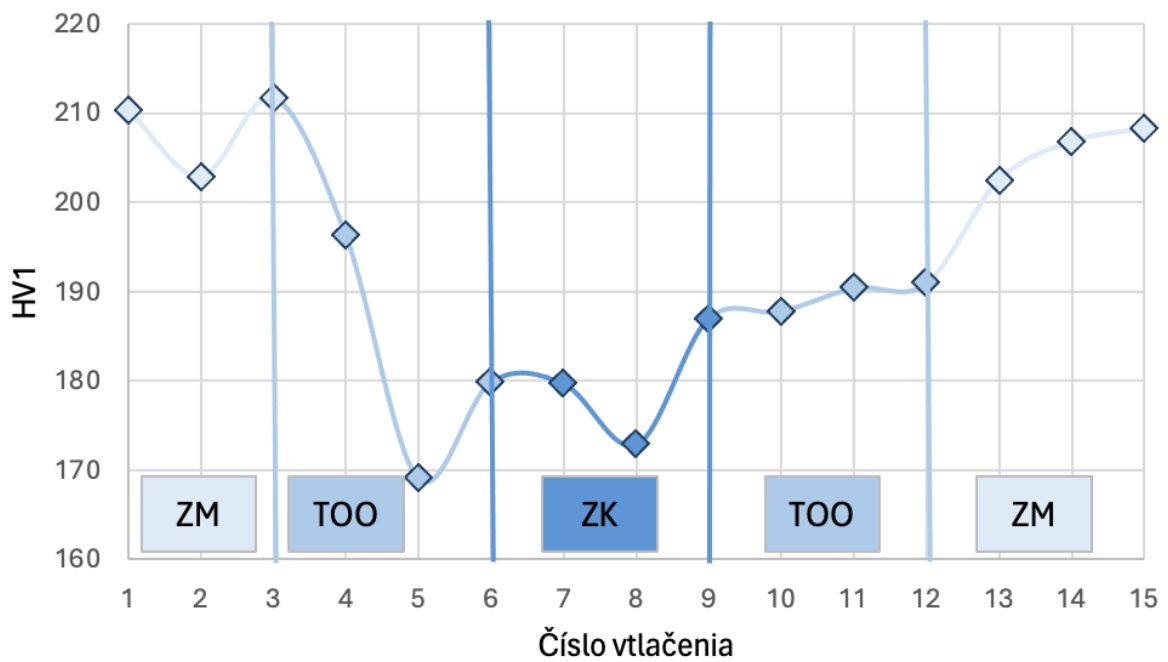


Obrázok 37: Zobrazenie rady pri skúške tvrdosti vzorky č. 2

V tabuľke č. 13 sú znázornené namerané hodnoty vzorky č. 4 (AM) v jednotlivých oblastiach zvaru. Najväčšiu tvrdosť 211,7 HV1 sa pri tejto vzorke podarilo namerať v oblasti ZM, čiže oblasť neovplyvnená teplom zo zvaracieho procesu (viď. graf 1). Ďalej možno konštatovať, že pri vzorke vyrobenej pomocou AM sa tvrdosť znižuje smerom k ZK. Meranie tvrdosti u vzorky AM mohla jemne ovplyvniť nekvalita tlače, a to kvôli nezositrovaným miestam (dierkam) v základnom materiáli, ktoré sa v ZK nevyskytujú vďaka zváraniu s PM.

Tabuľka 13: Namerané hodnoty tvrdosti HV1, vzorka číslo 4 (AM)

Vzorka číslo 4 (AM)			
Oblasť zvaru	Č. Vtlačenia	HV1	priemer
ZM	1	210,3	208,3
	2	202,9	
	3	211,7	
TOO	4	196,3	181,7
	5	169	
	6	179,8	
ZK	7	179,6	179,8
	8	172,8	
	9	186,9	
TOO	10	187,7	189,7
	11	190,4	
	12	190,9	
ZM	13	202,5	205,9
	14	206,8	
	15	208,3	
Celkový priemer			193,06

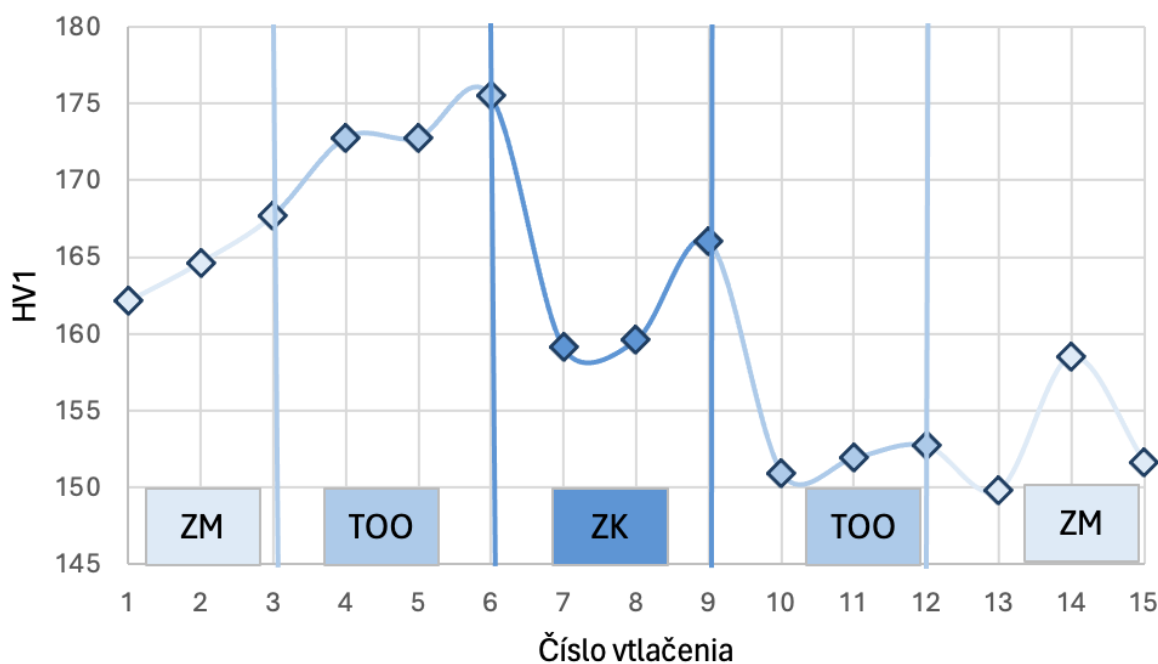


Graf 1: Tvrdosť vzorka č. 4 (AM)

U vzorky č. 2 došlo k miernemu zvýšeniu tvrdosti v TOO po ľavej strane od ZK (vid' graf 2). Pri zvaranej vzorke z materiálu vyrobeného valcovaním nedošlo k veľkým odchýlkam tvrdosti medzi jednotlivými oblasťami zvaru. Rozdiel medzi najväčšou tvrdosťou 175,5 HV1 (oblasť TOO) a najmenšou tvrdosťou 149,8 HV1 (oblasť ZM) činila 25,7 HV1. To vypovedá o kvalitnejšom zhotovení zvarového spoja oproti vzorke č. 4 (AM).

Tabuľka 14: Namerané hodnoty tvrdosti HV1, vzorka č. 2

Vzorka číslo 2			
Oblasť zvaru	Č. vpichu	HV1	priemer
ZM	1	162,1	164,8
	2	164,6	
	3	167,7	
TOO	4	172,8	173,7
	5	172,8	
	6	175,5	
ZK	7	159,1	161,6
	8	159,6	
	9	166	
TOO	10	150,9	151,8
	11	151,9	
	12	152,7	
ZM	13	149,8	153,3
	14	158,5	
	15	151,6	
Celkový priemer			161,04



Graf 2: Tvrdosť vzorky č. 2

10. Záver

V teoretickej časti sa táto bakalárska práca venovala popisu AM technológií, ktoré používajú ako prídavný materiál kovový prášok. Detailnejšie sa venovala metóde DMLS, jej princípu, výhodám a nevýhodám. Nasledovalo popísanie výroby a vlastností materiálov vhodných pre proces DMLS. Medzi výrobné procesy patrila plynová, plazmová atomizácia a atomizácia vodou, ktoré súžia na výrobu kovových práškov. Popis najpoužívanejších zliatin AlSi10Mg, Ti6Al4V, Inconel 718, CoCrMo. Nehrdzavejúcej oceli AISI 316L sa detailnejšie venovalo v samostatnej kapitole, pretože v praktickej časti boli vzorky vyrobené práve z tejto ocele. Ďalej sa nadväzovalo na 3D diely vyrobené metódou DMLS a ich možnosti zvarovania. Metóde TIG bola venovaná samostatná kapitola, kde bol popísaný princíp, netaviace sa elektródy a ochranné plyny, ktoré je možné využívať pri procese TIG zvarovania. Na záver teoretickej časti bolo popísane hodnotenie kvality zvarových spojov.

V praktickej časti tejto práce boli zavarené štyri vzorky tavným procesom zvarovania metódou TIG. Vzorky boli vyrobené z totožného materiálu AISI 316L. Dve vzorky boli vyrobené valcovaním do rúrkového tvaru s priemerom 76,1 mm a hrúbkou steny 2 mm. Ďalšie dve vzorky boli vyrobené pomocou metódy DMLS, ako funkčné vzorky s priemerom 35,6 mm s 2mm hrúbkou steny. Nasledovala príprava a zavarenie podľa parametrov uvedených vo pWPS (viď. príloha 1 a 2). Po zavarení sa pokračovalo v príprave zvarových spojov k vyhodnoteniu kvality pomocou metalografického výbrusu s makroskopickou a mikroskopickou analýzou, následnou kontrolou chemického zloženia za pomoci EDS analýzy a nakoniec overenie vplyvu zvarovania na mechanické vlastnosti, pomocou tvrdosti podľa Vickersa.

Pri kontrole chemického zloženia sa u rúrky zhodovalo zloženie s tabuľkou uvedenou v teoretickej časti práce. Funkčná vzorka vyrobená pomocou DMLS v ZM vykazovala v defekte (oxidická vtrúsenina) zmenu chemického zloženia s výskytom Al. V oblasti ZK výskyt delta feritu s viditeľnými hranicami a inou štruktúrou a chemickým zložením v okolí hraníc delta feritu.

Makroskopická analýza poukazuje na odlišnosti tvaru zvarového kovu. Vzorka č. 2 má pravidelný tvar, rozmery prevýšenia a teplom ovplyvnenú oblasť. Pričom u vzorky č. 4 (AM) je tvar nepravidelný s jemne väčším prevýšením koreňovej vrstvy. Taktiež bolo viditeľné množstvo dier v základnom materiály, ktoré boli zapríčinené nesprávnymi parametrami DMLS tlače. Aj napriek tomu bol zvarový spoj dostatočne kvalitný.

Mikroskopická analýza u vzorky č. 2 v základnom materiáli zobrazovala čistú autentickú štruktúru s dvojčatením zŕn a riadkovanie po výrobe valcovaním. V TOO došlo k zväčšeniu zŕn

o priemernú hodnotu 95 μm . Zvarový kov nepreukázal žiadne vady a bol homogénny. Vzorka č. 4 (AM) má v ZM jemnozrnnú štruktúru s viditeľnými vrstvami po procese 3D tlače. Ďalej obsahovala pomerne veľký počet pórov. V oblasti TOO došlo k homogenizácii štruktúry, kde priemerná veľkosť zŕn bola 30 μm . V porovnaní so zvarovým kovom vzorky č. 2 bola štruktúra jemnejšia bez výskytu pórov, ktoré sa vytratil po procese zvárania.

Meranie tvrdosti podľa Vickersa preukázalo, že u vzorky č. 4 (AM) je väčšia tvrdosť oproti vzorke č. 2, priemerne zo všetkých oblastí zvarového spoja o 32 HV1. V TOO vzorky č. 2 došlo k zvýšeniu tvrdosti oproti ZM. U vzorky č. 4 (AM) sa medzi jednotlivými fázami zvarového spoja, smerom od ZM cez TOO až do ZK, tvrdosť znižovala priemerne o 12,5 HV1.

Uvedené výsledky preukázali, že 3D tlačené diely vyrobené metódou DMLS pomocou kovového prášku o priemere 15 až 45 μm sú dobré zvariteľné a pre zváranie je možné použiť konvenčnú metódu zvárania elektrickým oblúkom neodtavujúcej sa wolframovej elektródy v inertnej ochrannej atmosfére (TIG).

Zoznam použitých literárnych zdrojov

- [1] FOTOVVATI, Behzad, S. Alireza ETESAMI a Ebrahim ASADI. Process-property-geometry correlations for additively-manufactured Ti–6Al–4V sheets. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2019, **760**, 431-447 [cit. 2023-10-25]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2019.06.020
- [2] TAMIR, Tariku Sinshaw, Gang XIONG, Zhen SHEN, et al. 3D printing in materials manufacturing industry: A realm of Industry 4.0. *Heliyon* [online]. 2023, **9**(9) [cit. 2023-10-28]. ISSN 24058440. Dostupné z: doi:10.1016/j.heliyon.2023.e19689
- [3] DUDA, Thomas a L. Venkat RAGHAVAN. 3D Metal Printing Technology. *IFAC-PapersOnLine* [online]. 2016, **49**(29), 103-110 [cit. 2023-10-25]. ISSN 24058963. Dostupné z: doi:10.1016/j.ifacol.2016.11.111
- [4] BRANDT, Milan. *Laser Additive Manufacturing Materials, Design, Technologies, and Applications* [online]. Woodhead Publishing, 2017 [cit. 2024-03-05]. ISBN 978-0-08-100434-0.
- [5] LOTH, Nick. Electron Beam Melting (EBM 3D Printing) – The Complete Guide. In: *ALL3DP* [online]. [cit. 2023-11-30]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/electron-beam-melting-ebm-3d-printing-simply-explained/>
- [6] BALHARA, Himanshu, Bhaskar BOTCHA, Sarah J. WOLFF a Satish T.S. BUKKAPATNAM. Ripple formations determine the heterogeneous microstructure of directed energy deposition (DED)-printed 316L components. *Materials & Design* [online]. 2023, **227** [cit. 2024-01-20]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2023.111756
- [7] PEYRE, Patrice a Éric CHARKALUK. *Additive Manufacturing of Metal Alloys 1 — Processes, Raw Materials and Numerical Simulation* [online]. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, 2022 [cit. 2024-03-05]. ISBN 978-1-78945-054-5.
- [8] OCHOA, Evelyn, Lucia MORELLI, Lucia SALVIONI, et al. Co-processed materials testing as excipients to produce Orally Disintegrating Tablets (ODT) using binder jet 3D-printing technology. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* [online]. 2024, **194**, 85-94 [cit. 2024-01-20]. ISSN 09396411. Dostupné z: doi:10.1016/j.ejpb.2023.11.023

- [9] ANAND, Mukul a Alok Kumar DAS. Issues in fabrication of 3D components through DMLS Technique: A review. *Optics & Laser Technology* [online]. 2021, **139** [cit. 2023-10-29]. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2021.106914
- [10] KUMAR MAURYA, Nagendra, Rohit SHARMA, Nikhil KUMAR, Anubhav KUMAR, Piyush ANAND, Prakhar RAI a Harjeet SINGH. An overview of investigation of Fatigue, tensile strength and hardness of the components fabricated through direct metal laser sintering (DMLS) process. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, **47**, 3979-3984 [cit. 2023-11-08]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.04.131
- [11] LEE, Weng-Hoh, Yi ZHANG a Jing ZHANG. Discrete element modeling of powder flow and laser heating in direct metal laser sintering process. *Powder Technology* [online]. 2017, **315**, 300-308 [cit. 2023-11-08]. ISSN 00325910. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2017.04.002
- [12] NAGARAJAN, Hari P.N. a Karl R. HAAPALA. Environmental Performance Evaluation of Direct Metal Laser Sintering through Exergy Analysis. *Procedia Manufacturing* [online]. 2017, **10**, 957-967 [cit. 2023-11-08]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2017.07.087
- [13] ROZKOŠNÝ, Luboš. Jak funguje 3D tisk metodou Direct Metal Laser Sintering. In: *Konstruktér* [online]. [cit. 2023-12-01]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>
- [14] *Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering (DMLS)* [online]. In: . [cit. 2023-12-01]. Dostupné z: <https://www.crucible.com/design-guidelines-for-direct-metal-laser-sintering/>
- [15] BURGEROVA, Karla a Ales HERMAN. The issue of regeneration of metal powder DLMS 3D printing. *Manufacturing Technology* [online]. 2020, 2020-8-6, **20**(1), 11-17 [cit. 2023-12-31]. ISSN 12132489. Dostupné z: doi:10.21062/mft.2020.014
- [16] HUDEC, Jan. Aditivní technologie - Rozcestník: Kovové aditivní technologie, seminář pro studenty. In: *Misan s.r.o* [online]. [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.misan.cz/aditivni-technologie/obsah-kategorie/aditivni-technologie/rozcestnik/>
- [17] KASSYM, Kazybek a Asma PERVEEN. Atomization processes of metal powders for 3D printing. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, **26**, 1727-1733 [cit. 2024-01-08]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.02.364

- [18] POPOVICH, Anatolij a Vadim SUFIAROV. Metal Powder Additive Manufacturing. In: SHISHKOVSKY, Igor V., ed. *New Trends in 3D Printing* [online]. InTech, 2016, 2016-07-13 [cit. 2024-01-08]. ISBN 978-953-51-2479-5. Dostupné z: doi:10.5772/63337
- [19] Katalogové listy - Aditivní výroba: Katalogové listy materiálů (MDS). In: *Renishaw* [online]. [cit. 2024-01-09]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/katalogove-listy-aditivni-vyroba--17862>
- [20] Additive Manufacturing Powder: PRODUCTS. In: *Mana-Metal* [online]. [cit. 2024-01-09]. Dostupné z: <https://www.mana-metal.com/additive-manufacturing-powder/>
- [21] Spherical 316L Stainless Steel Powder For 3D Printing. In: *Mana-Metal* [online]. [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.mana-metal.com/showroom/spherical-316l-stainless-steel-powder-for-3d-printing.html>
- [22] DEEGAN, Paul. 304, 316 & L-Grade Stainless Steels: What are the Differences? In: *VortexGlobal* [online]. [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.vortexglobal.com/resources/304-316-l-grade-stainless-steels-what-are-the-differences>
- [23] POLÁK, Peter, Peter BERNASOVSKÝ, Alojz BLECHA, Ján BOŠANSKÝ, Vladimír MAGULA, Martin VITÁSEK, Pavel BLAŠKOVITŠ a Jana ORSZÁGOVÁ. *Materiály a ich správanie pri zváraní: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- [24] BARTÁK, Jiří, Václav PILOUS a Rudolf KOVAŘÍK. *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. Ostrava: ZEROSS, 2002. Svařování. ISBN 80-85771-97-7.
- [25] *Zváracie metódy a zariadenia: II. diel učebných textov pre kurzy zvaračských technologov*. Ostrava: ZEROSS, 2000. Sváření. ISBN 80-85771-84-5.
- [26] Ručné laserové zváranie. In: *VAW WELDING, S.R.O* [online]. [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://vaw.sk/rucne-laserove-zvaranie/#>
- [27] PROCHÁZKA, Andrej. Laserové zváranie: Pekné a kvalitné zvary v rekordne rýchlom čase. In: *SOLÍK SK, s. r. o.* [online]. [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://www.solik.sk/blog/laserove-zvaranie-pekne-kvalitne-zvary-v-rekordnom-case/>
- [28] TIG svařování: I - základní principy. In: *SVARINFO* [online]. [cit. 2024-01-29]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008011702>

- [29] *Výroba a inžinierske aplikácie: IV. diel učebných textov pre kurzy zvaračských technológov*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Sváření. ISBN 80-85771-87-x.
- [30] ŠPLÍCHAL, Jan. *3D tisk kovových materiálů* [online]. In: . [cit. 2023-12-01]. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/3d-tisk-kovovych-materialu>
- [31] FENG, Shuo, Dongzhou JIA, Ying FU, Xiangqing KONG, Zhenlin LV, Erjun ZENG a Qi GAO. Preparation of additive manufacturing powder by external field-enabled: a comparative assessment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. [cit. 2024-01-29]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-023-12073-x
- [32] KOLAŘÍK, Ladislav. *TECHNOLOGIE SVAŘOVANÍ: Prezentácie k predmetu*. ČVUT, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, skupina svařování, 2016.

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Vlastnosti PBF metódy [5]	16
Tabuľka 2: Chemické zloženie AlSi10Mg [%] [19]	25
Tabuľka 3: Chemické zloženie Ti6Al4V [%] [19]	26
Tabuľka 4: Chemické zloženie Inconel 718 [%] [19]	26
Tabuľka 5: Chemické zloženie CoCrMo [%] [19]	26
Tabuľka 6: Chemické zloženie 316L [%] [19]	27
Tabuľka 7: Označenie, zloženie a identifikačná farba wolframových elektród [25]	33
Tabuľka 8: Chemické zloženie PM 316LSi [%]	37
Tabuľka 9: Chemické zloženie [%], vzorka č. 2 ZM	46
Tabuľka 10: Chemické zloženie [%], vzorka č. 2 ZK	47
Tabuľka 11: Chemické zloženie [%], vzorka č. 4 (AM) ZM	48
Tabuľka 12: Chemické zloženie [%], vzorka č. 4 (AM) ZK	49
Tabuľka 13: Namerané hodnoty tvrdosti HV1, vzorka číslo 4 (AM)	56
Tabuľka 14: Namerané hodnoty tvrdosti HV1, vzorka č. 2	57

Zoznam grafov

Graf 1: Tvrdosť vzorka č. 4 (AM)	56
Graf 2: Tvrdosť vzorka č. 2	57



Zoznam obrázkov

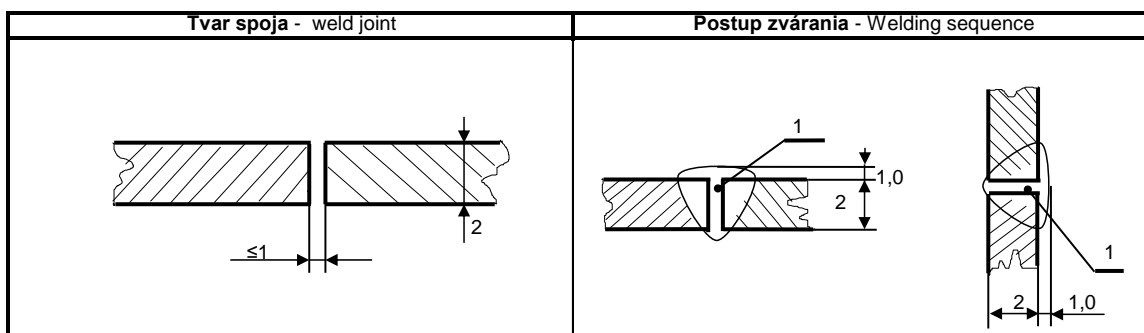
Obrázok 1: graf nákladov (cost) vs. zložitosť výroby (complexity) medzi konvenčnými (convetional M.) a aditívnymi metódam (aditive M.) [3].....	15
Obrázok 2: AM procesný tok [2].....	15
Obrázok 3: Princíp metódy DED [6]	17
Obrázok 4: princíp metódy BJ [8]	18
Obrázok 5: Princíp metódy DMLS [30]	20
Obrázok 6: Typy podpier pri 3D tlači. Z ľava: vnútorná podpera, podpora povrchu, vnútorná stromová podpora, podpora nosnej konštrukcie [15]	21
Obrázok 7: znázornenie objemového vyplnenia prášku[16]	22
Obrázok 8: Tvary rôznych častíc kovového prášku[17].....	23
Obrázok 9: Výroba kovového prášku plazmovou atomizáciou [31].....	24
Obrázok 10: Ukážka kovových práškov a výrobkov AM, Z ľava: AlSi10Mg, Ti6Al4V, Incocel 718, CoCrMo [20]	25
Obrázok 11: Princíp zvarovania MIG[25].....	29
Obrázok 12: Princíp metódy SAW[32]	29
Obrázok 13: Princíp laserového zvarovania [26]	30
Obrázok 14: Princíp zvaraní TIG [32].....	31
Obrázok 15: Vplyv typu zvaracieho prúdu a polarity na formu a rozmery zvaru, jednosmerný prúd: a) priama polarita, b) nepriama polarita, c) striedavá prúd [25]	32
Obrázok 16: Zvarový spoj, ZM - základný materiál, TOO - teplom ovplyvnená oblasť, HN - hranica natavenia, ZK - zvarový kov [23].....	35
Obrázok 17: vzorky po delení, odihlení a čistení	38
Obrázok 18: Vzorky pripravené na stehovanie	39
Obrázok 19: Ukážka stehovania vzorky	41
Obrázok 20: Poloha pri zvaraní	40
Obrázok 21: Zvary, a) vzorka č. 1, b) vzorka č. 2, c) vzorka č. 4 (AM), d) vzorka č. 3 (AM)	42
Obrázok 22: Píla Struers Labotom – 3	43
Obrázok 23: Ukážka rozrezania zvaru.....	43
Obrázok 24: Montážny lis Struers CityPress – 1.....	44
Obrázok 25: Vzorky po brusení a leštení	44
Obrázok 26: Brúska a leštička ATM Sapphire 250 A2 – ECO	45

Obrázok 27: ZM vzorka č.2 a spektra bodovej EDS analýzy	46
Obrázok 28: ZK vzorka č.2 a spektra bodovej EDS analýzy	47
Obrázok 29: ZM vzorka č. 4 (AM).....	48
Obrázok 30: ZK vzorka č. 4 (AM), spektra bodovej analýzy EDS.....	49
Obrázok 31: Mikroskop Zeiss Axio Observer Dm1	50
Obrázok 32: zvarový spoj, vzorka č. 2	51
Obrázok 33: zvarový spoj, vzorka č. 4 (AM)	51
Obrázok 34: Mikroskopické snímky zvarového spoja	53
Obrázok 35: Tvrdomer Buehler – IndentaMer 1100 Series	54
Obrázok 36: Zobrazenie rady pri skúške tvrdosti vzorky č. 4 (AM).....	55
Obrázok 37: Zobrazenie rady pri skúške tvrdosti vzorky č. 2.....	55

Prílohy

Príloha 1: pWPS vzorka č. 1 a 2



 Stanovenie predbežného postupu zvarovania - pWPS (ČSN EN ISO 15609-1) Preliminary welding procedure specifications - pWPS		Číslo pWPS: BC-1 WPS No: Číslo WPQR: WPQR No:
Miesto: Praha Local:	Prídavný materiál: TIGWELD 316LSi Ø 2.0 mm Filler metal: EN ISO 14343 A: W 19 12 3 Lsi	Ďalšie informácie: REVIZE 0 Other information:
Výrobca:  Manufacturer:	Sušenie elektrod: Electrode baking:	Potrubná trieda: Line Class:
Zvárací proces: 141 Welding process:	Ochranný plyn: EN 14175: I3 Shielding gas: Argon 4.8	Platnosť pre: dielňu a vonkajšiu montáž; Validity for: shop and field
Druh zvaru: BW Kind of weld:	Typ a priem. wolfram. elektrody: WT 30 Tungsten electrode type and diameter: Ø 2,4	Poloha zvarovania: PH Position(s) of groove:
Specif. zákl. materiálu: Base metal(s) specification:	WPQR: 8.1 Real: 1.4404	Ochrana koreňa / podloženie: Treatment of root / underpacking:
Zvar. hrúbka t (mm): Thickness range t (mm):	2 2	Predohrev: Preheat:
Vonkajší priemer D (mm): Outside dia range D (mm):	76,1 76,1	Tepelné spracovanie / časový rozsah: Heat treatment / time range:
Způsob přípr. zvar. ploch a čistenie zv. plôch: Preparat method of weld faces and cleaning of welding edges: Delenie pasovou pilou, brúsenie, kartáčovanie cutting, grinding, brushing	Rychlost ohrevu / chladnutia: Rate of heating / cooling:	Meranie teplôt: Teploměr, krieda Temperature measurement: Thermometer, Tempelis
	Dohrev: After PWHT:	Stehovanie: 141 , dĺžka 10 mm Tacking:
		Poznámka: platí aj pre opravy zvarov Remarks: also for repair welding

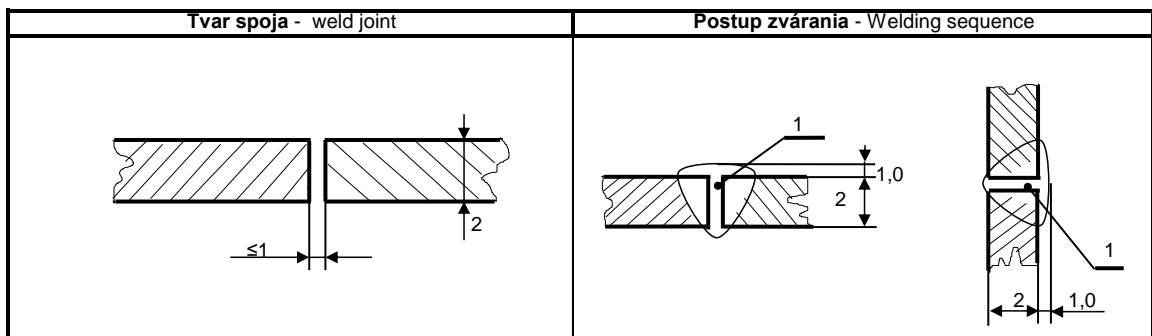


Parametre zvarovania - Welding data							
zvárová husenka (vrstva): Weld layer(s):	1						
Metóda zvarovania: Welding process:	141						
Priemer prídav. drôtu (mm): Diameter of filler metal (mm):	2						
Prúd (A): Current (A):	60-64						
Napätie (V): Voltage (V):	11-12						
Prúd / polarita: Current / polarity:	DC/-						
Vonkajšia ochrana(l/min): External guard (l/min):	12						
Vnútorňa ochrana(l/min): Internal guard(l/min):	9						
Vrstva (husenka): Layer (Bead):	1						
Tepelný príkon (kJ/mm) Heat input (kJ/mm)	0,10 – 0,14						
POZNÁMKA Remark	Vzorka číslo 1 a 2, trúbka Ø 76,1						

	Vypracoval - Prepared by:	Schválil - Approved by:
Meno: Name:	Richard POLIAK	doc. Ing. Ladislav KOLÁRIK, Ph.D., IWE
Dátum: Date:	12.3.2024	12.3.2024
Podpis: Signature:		

Príloha 2: pWPS vzorka č. 3 a 4 (AM)

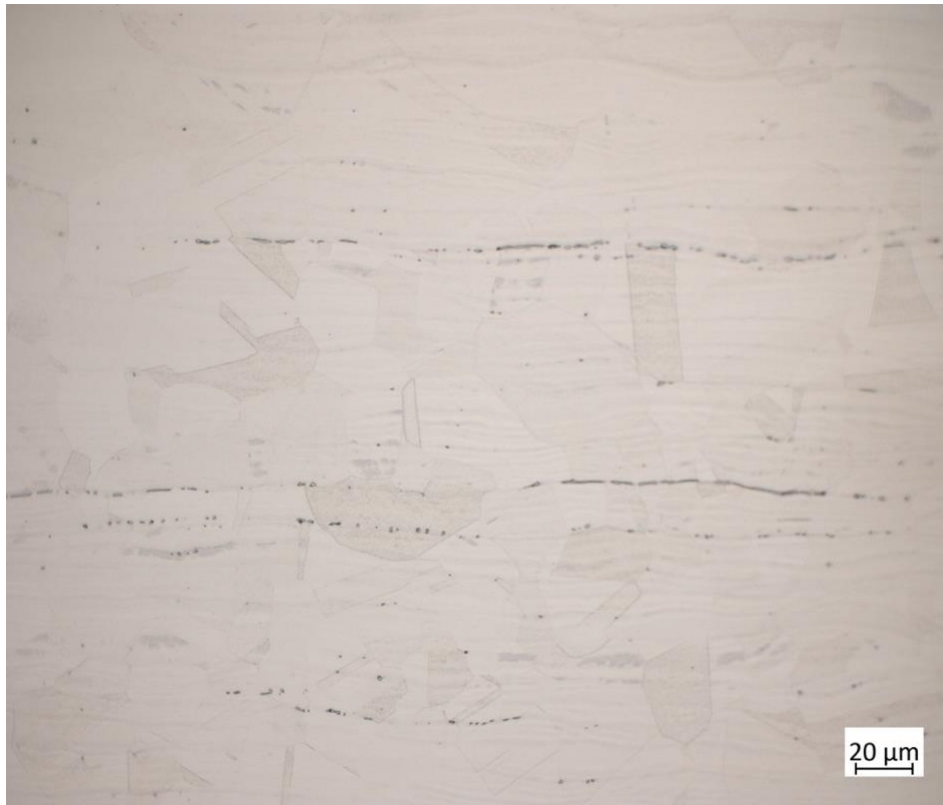
 Stanovenie predbežného postupu zvarovania - pWPS (ČSN EN ISO 15609-1) Preliminary welding procedure specifications - pWPS		Číslo pWPS: BC-2 WPS No: Číslo WPQR: WPQR No:
Miesto: Praha Local:	Prídavný materiál: TIGWELD 316LSi Ø 2.0 mm Filler metal: EN ISO 14343 A: W 19 12.3 Lsi	Ďalšie informácie: REVIZE 0 Other information:
Výrobca:  Manufacturer:	Sušenie elektrod: Electrode baking:	Potrubná trieda: Line Class:
Zvárací proces: 141 Welding process:	Ochranný plyn: EN 14175: I3 Shielding gas: Argon 4.8	Platnosť pre: dielňu a vonkajšiu montáž; Validity for: shop and field
Druh zvaru: BW Kind of weld:	Typ a priem. wolfram. elektrody: WT 30 Tungsten electrode type and diameter: Ø 2,4	Poloha zvarovania: PH Position(s) of groove
Specif. zákl. materiálu: WPQR Real Base metal(s) specification: 8.1 1.4404	Ochrana koreňa / podloženie: Treatment of root / underpacking:	Max. šírka husenky (mm): 10 Maximum width of bead (mm):
Zvar. hrúbka t (mm): 2 2 Thickness range t (mm):	Predohrev: Preheat:	Teplota medzi vrstvami: Interpass temperature:
Vonkajší priemer D (mm): 35,6 35,6 Outside dia range D (mm):	Tepelné zpracovanie / časový rozsah: Heat treatment / time range:	Meranie teplôt: Teplomer, krieda Temperature measurement: Thermometer, Tempilis
Způsob přípr. zvar. ploch a čistenie zv. ploch: Preparat method of weld faces and cleaning of welding edges: Delenie pasovou pilou, brúsenie, kartáčovanie cutting, grinding, brushing	Rychlost ohrevu / chladnutia: Rate of heating / cooling: Dohrev: After PWHT:	Stehovanie: 141, dĺžka 10 mm Tacking: Poznámka: platí aj pre opravy zvarov Remarks: also for repair welding



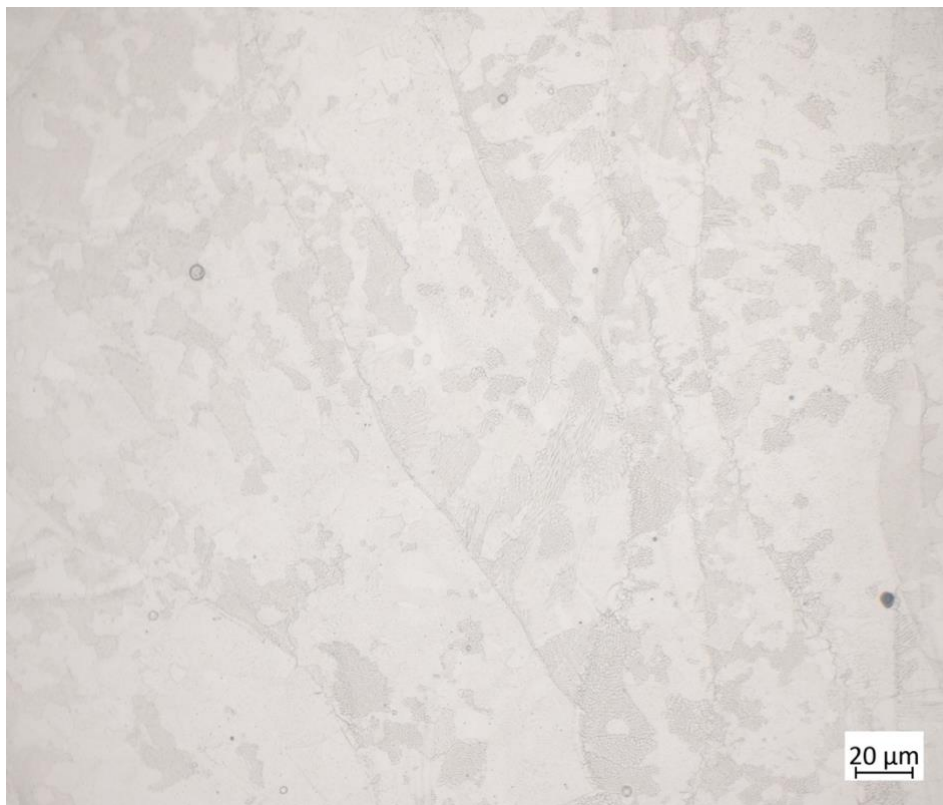
Parametre zvarovania - Welding data							
zvárová husenka (vrstva): Weld layer(s):	1						
Metoda zvarovania: Welding process:	141						
Priemer prídav. drôtu (mm): Diameter of filler metal (mm):	2						
Prúd (A): Current (A):	58-62						
Napätie (V): Voltage (V):	11-12						
Prúd / polarita: Current / polarity:	DC/-						
Vonkajšia ochrana(l/min): External guard(l/min):	12						
Vnútna ochrana(l/min): Internal guard(l/min):	9						
Vrstva (husenka): Layer (Bead):	1						
Tepelný príkon (kJ/mm) Heat input (kJ/mm)	0,09 – 0,13						
POZNÁMKA Remark	Funkčná vzorka č.3 a 4 vyrobená pomocou AM						

	Vypracoval - Prepared by:	Schválil - Approved by:	
Meno: Name:	Richard POLIAK	doc. Ing. Ladislav KOLÁRIK, Ph.D., IWE	
Dátum: Date:	12.3.2024	12.3.2024	
Podpis: Signature:			

Príloha 3: Porovnanie oblasti zvarového spoja pri zväčšení 500x



a) ZM vzorka č. 2



b) ZM vzorka č. 4 (AM)



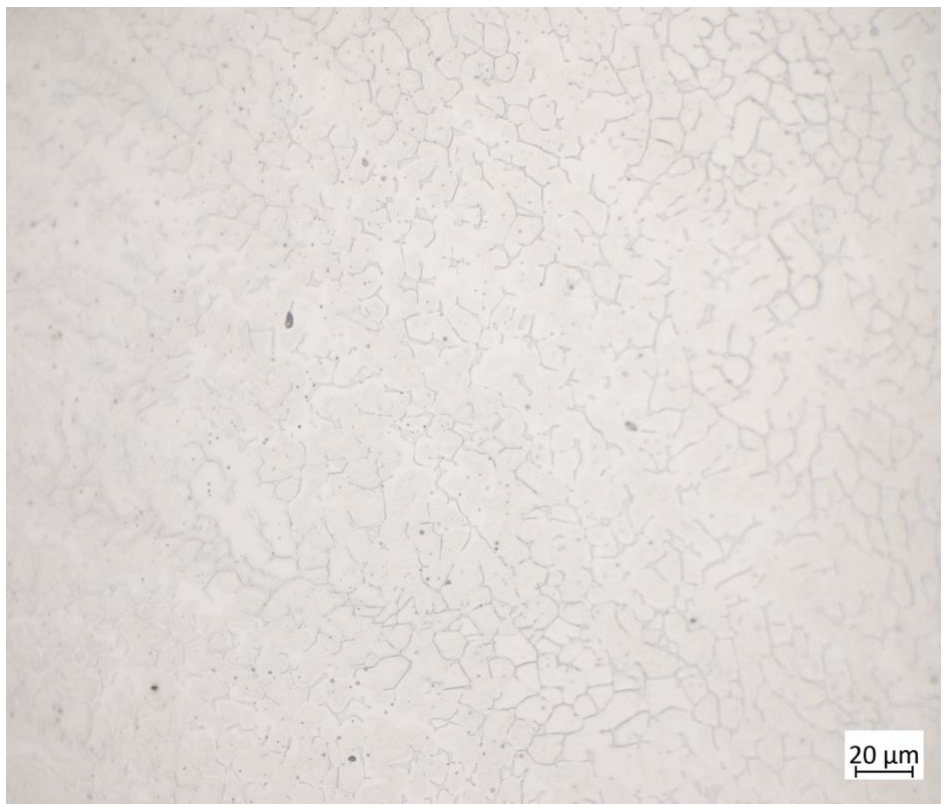
c) TOO vzorka č .2



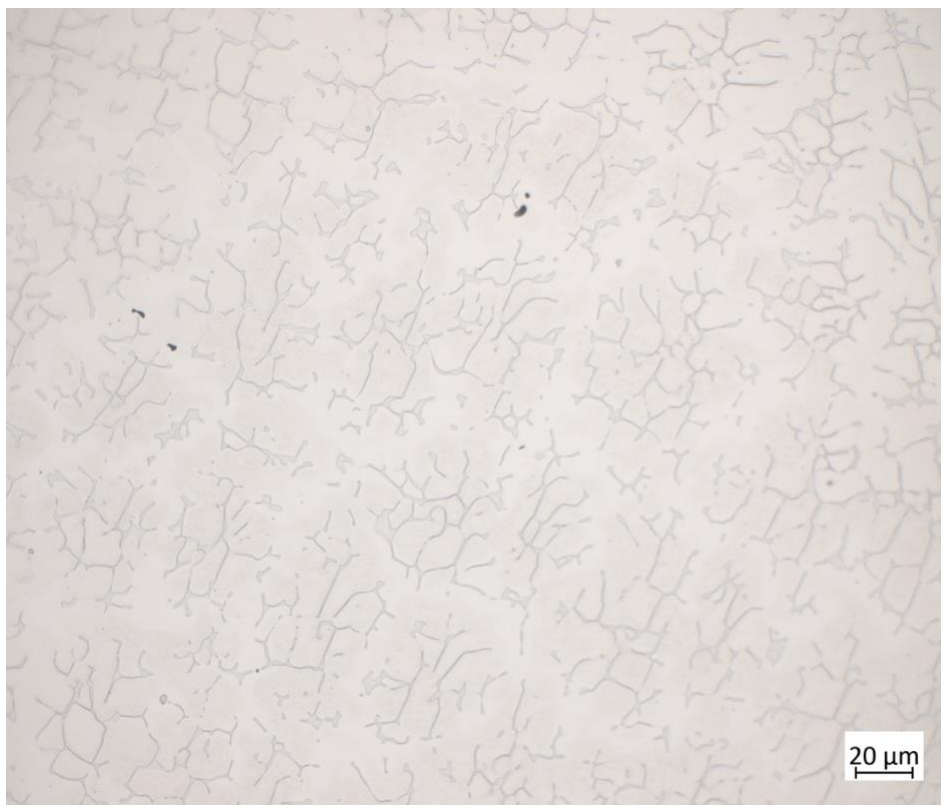
d) TOO vzorka č. 4 (AM)



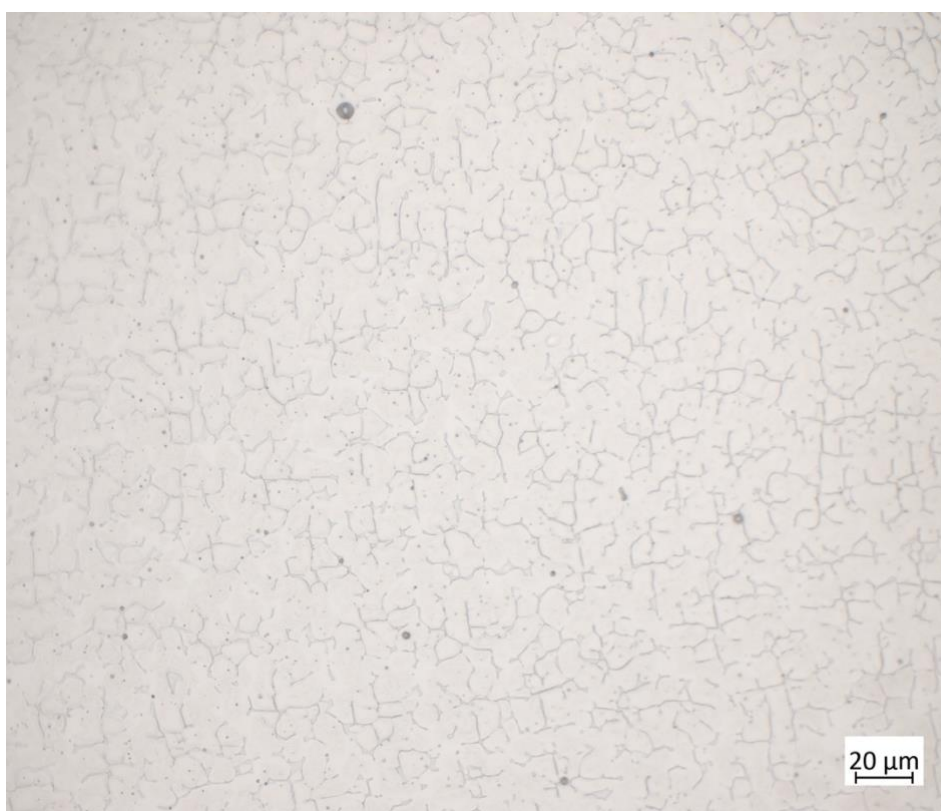
e) Kraj ZK vzorka č. 2



f) Kraj ZK vzorka č. 4 (AM)



g) Stred ZK vzorka č. 2



h) Stred ZK vzorka č. 4 (AM)