



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Mikroplazmové navařování 3D součástí

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Sára Příkladková

VEDOUcí PRÁCE: Ing. Pavel Rohan, Ph.D., EWE

STUDIJNÍ PROGRAM: Výrobní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: Bez specializace

Praha 2023

I. Personal and study details

Student's name: **Přádková Sára** Personal ID number: **470184**
Faculty / Institute: **Faculty of Mechanical Engineering**
Department / Institute: **Department of Manufacturing Technology**
Study program: **Production Engineering**
Specialisation: **No specialization**

II. Master's thesis details

Master's thesis title in English:

Microplasma overlay welding of 3D parts

Master's thesis title in Czech:

Mikroplazmové navařování 3D součástí

Guidelines:

Carry out a literature search on the topic of microplasma welding and in the field of repairs of metal molds for casting aluminum alloys in the automotive industry (in cooperation with Škoda-Auto, a.s.)
To verify the functionality of the workplace for microplasma welding by welding test shapes
Perform basic characterization of welded parts

Bibliography / sources:

FAUCHAIS, Pierre a Armelle VARDELLE. Thermal Plasmas Surface Treatment. Materials Surface Processing by Directed Energy Techniques. Elsevier, 2006, s. 311-344.
ALBERTI, E. A., B. M. P. BUENO a A. S. C. M. D'OLIVEIRA. Additive manufacturing using plasma transferred arc. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2016, 83(9-12), 1861-1871 [cit. 2020-02-05]. ISSN 0268-3768.
JHAVAR, Suyog, N.K. JAIN a C.P. PAUL. Development of micro-plasma transferred arc (μ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications. Journal of Materials Processing Technology [online]. 2014, 214(5), 1102-1110 [cit. 2016-11-16]. ISSN 09240136

Name and workplace of master's thesis supervisor:

Ing. Pavel Rohan, Ph.D. Department of Manufacturing Technology FME

Name and workplace of second master's thesis supervisor or consultant:

Date of master's thesis assignment: **28.10.2022** Deadline for master's thesis submission: **11.08.2023**

Assignment valid until: **31.12.2023**

Ing. Pavel Rohan, Ph.D.
Supervisor's signature

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Head of department's signature

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
Dean's signature

III. Assignment receipt

The student acknowledges that the master's thesis is an individual work. The student must produce her thesis without the assistance of others, with the exception of provided consultations. Within the master's thesis, the author must state the names of consultants and include a list of references.

Date of assignment receipt

Student's signature

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Pavla Rohana, Ph.D., EWE, 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

Poděkování

Ráda bych poděkovala panu Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D. za odborné vedení, užitečné materiály, cenné připomínky, ochotu a trpělivost při tvorbě této diplomové práce.

Anotace

Název diplomové práce:	Mikroplazmové navařování 3D součástí
Autor práce:	Bc.Sára Přádková
Vedoucí práce:	Ing. Pavel Rohan, Ph.D., EWE
Akademický rok:	2022/2023
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Rozsah práce:	67 stránek, 10 tabulek, 36 obrázků
Klíčová slova:	Mikroplazmové navařování, Stellite 6, Aditivní technologie, Kolaborativní robot, Rychlost posuvu, Mikrotvrдость, Porozita

Annotation

Title of the final thesis: Microplasma overlay welding of 3D parts

Author: Bc.Sára Příkladková

Supervisor: Ing. Pavel Rohan, Ph.D., EWE

Academic year: 2022/2023

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: 67 pages, 10 tables, 36 pictures

Keywords: Microplasma welding, Stellite 6, Additive manufacturing, Collaborative robot, Feed rate, Microhardness, Porosity

Abstrakt

Vytváření obecných prostorových tvarů navařováním jednotlivých vrstev plazmatem slouží jako moderní způsob výroby polotovarů z obtížně zpracovatelných materiálů. I přesto, že s využitím pulzace plazmatu lze úspěšně minimalizovat vnesené teplo, je ohřev materiálu stále příliš vysoký pro navařování drobných součástí. Tenkostěnné součástky a polotovary mohou být úspěšně vytvářeny nánosovým navařováním mikroplazmatem. Předkládaná práce se zabývá návrhem, kompletací a základním odzkoušením pracoviště pro navařování mikroplazmatem. Pro vedení plazmatronu je využitý kolaborativní robot, zajišťující dostatečnou přesnost trajektorie i její opakovatelnost. Testování pracoviště bylo provedeno vytvořením jednoduchých geometrických tvarů.

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Metody svařování.....	12
2.1	Metody svařování elektrickým obloukem	12
2.1.1	MIG/MAG.....	12
2.1.2	TIG	12
2.1.3	SAW	12
2.2	Speciální metody svařování.....	12
2.2.1	Svařování plazmovým obloukem.....	12
2.2.2	Svařování laserem.....	13
2.2.3	Svařování elektronovým svazkem	13
3	Plazmové navařování.....	14
3.1	Plazma.....	14
3.2	Navařování.....	15
3.3	PTA a PAW.....	15
3.3.1	Zapojení hořáku.....	17
3.3.2	Wolframové elektrody	18
3.3.3	Plyny	19
3.3.3.1	Plazmový plyn.....	19
3.3.3.2	Ochranný plyn	19
3.3.3.3	Fokusační plyn.....	19
3.4	Mikro-plazmové navařování.....	20
4	Aditivní technologie výroby.....	20
4.1	Metal additive manufacturing	20
4.1.1	Laser additive manufacturing process	21
4.1.2	Cold spray deposition process	21

4.1.3	WAAM.....	22
4.1.4	Opravy kovových forem.....	23
4.2	Mikro-plazmové navařování jako AM.....	23
4.3	Přídavný materiál.....	24
4.3.1	Slitiny na bázi železa.....	24
4.3.2	Slitiny na bázi niklu.....	24
4.3.3	Slitiny na bázi kobaltu.....	25
4.3.3.1	Stellite 6.....	25
4.3.4	Forma podávání přídavného materiálu.....	27
4.3.5	Výroba kovového prášku.....	28
4.4	Robotem asistované AM.....	29
5	Experiment.....	32
5.1	Použitá zařízení.....	32
5.1.1	Kolaborativní robot ABB YuMi – jednoruký.....	32
5.1.2	Plazmový hořák KSK PHP 140 V.....	33
5.1.3	Balancér Atlas Copco RIL – 1C.....	33
5.1.4	Zdroj plazmového proudu EWM Microplasma 50.....	33
5.1.5	Metalografická pila Struers Labotom 3.....	33
5.1.6	Laboratorní lis Struers CitoPress 1.....	34
5.1.7	Laboratorní bruska a leštička SAPHIR 250 A2-ECO.....	34
5.1.8	Zeiss Axio Observer D1m.....	34
5.1.9	Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1100.....	34
5.2	Výroba vzorků.....	35
5.2.1	Příprava pracoviště.....	35
5.2.2	Program robota.....	36
5.2.3	Základní materiál.....	36
5.2.4	Přídavný materiál.....	36

5.2.5	Rychlost podávání prášku	38
5.2.6	Navařovací parametry	38
5.3	Metalografie vzorků	39
5.3.1	Řezání a lisování	39
5.3.2	Broušení a leštění.....	39
5.3.3	Leptání	40
5.3.4	Měření mikrotvrdomosti	40
6	Výsledky a diskuze	41
6.1	Průběh mikrotvrdomosti	41
6.2	Diskuze.....	43
6.2.1	Růst zrn na rozhraní mezi ZM a návarem	43
6.2.2	Změna rychlosti posuvu.....	45
6.2.3	Interakce mezi vrstvami a kolísání tvrdosti	49
6.2.4	Pík tvrdosti navařených stěn	50
7	Závěr	51
8	Literatura	52
9	Seznam tabulek.....	60
10	Seznam obrázků	61
11	Přílohy	63

1 Úvod

2 Metody svařování

2.1 Metody svařování elektrickým obloukem

2.1.1 MIG/MAG

Principem MIG/MAG neboli svařování v ochranné atmosféře je přídavný drát, který je skrz hořák automaticky posouván do oblouku a odtavován. Drát tak slouží zároveň jako elektroda i jako přídavný materiál. Elektrická energie pro oblouk je zajišťována svařovacím zdrojem. Oblouk a svarová lázeň jsou chráněny ochranným plynem, který je buď aktivní nebo inertní. Inertní plyn je takový, který neinteraguje s přídavným materiálem (např. helium a argon). Aktivní plyny se naopak procesu v oblouku a svarové lázni účastní (např. argon s oxidem uhličitým nebo kyslíkem). Výhodou je možnost automatizace a robotizace. [1]

2.1.2 TIG

Při svařování metodou TIG je oblouk udržován v inertním plynu mezi wolframovou elektrodou hořáku a základním materiálem. V závislosti na přípravě a tloušťce základního materiálu je možné pracovat se základním materiálem i bez něj. Základní materiál se na rozdíl od MIG/MAG přidává zvlášť. [2]

2.1.3 SAW

Stejně jako u MIG/MAG používá metoda svařování pod tavidlem jako přídavný materiál odvíjející se drát. Ochranná atmosféra je zde zajištěna prostřednictvím práškového tavidla, které má podobné složení i funkci jako obal elektrody u ručního svařování. Metoda SAW je automatizovaná, vhodná pro provádění dlouhých svarů ale použitelná pouze pro polohu svařování shora. [3]

2.2 Speciální metody svařování

2.2.1 Svařování plazmovým obloukem

Plazmové svařování poskytuje lepší kontrolu nad obloukem, vynikající kvalitu svaru a je rychlejší, a tedy efektivnější než jiné tradiční svařovací procesy.

Plazmový oblouk prochází tryskou, která jej zužuje. V důsledku zúžení oblouku se plocha jeho průřezu zmenší a hustota energie, rychlost plazmatu a teplota se dramaticky zvýší na přibližně 25 000 °C. Mezi wolframovou elektrodou a základním kovem se vytvoří zúžené plazma. Svařování plazmovým obloukem využívá netavící se wolframové elektrody a ochranný plyn stejně jako při svařování metodou TIG. Rozdíl je ale ve wolframové elektrodě zapuštěné v trysce, plazmovém plynu a ve speciálně navrženém hořáku. Teplo se přenáší na velmi malou plochu základního materiálu v důsledku zúžení plazmového oblouku, což vytváří vysokou hustotu energie, hlubší průnik a menší TOO. [4]

2.2.2 Svařování laserem

Proces laserového svařování se obvykle provádí pod proudem inertního plynu jak s tak bez přidání materiálu do tavné lázně. Velikost této lázně, která je v řádu 1 mm, je ovlivněna mnoha proměnnými, jako je materiál, výkon laseru a rychlost svařování. [5]

Svařování laserem ve vakuu lze dosáhnout výrazně lepších výsledků než při svařování v atmosférickém tlaku za použití inertního plynu. Výhodami jsou například hlubší průvar, zvýšená stabilita procesu, menší znečištění polotovaru rozstříkem nebo svary bez porozity. Vakuová zařízení zvyšují cenu procesu, a i přes to, že jsou jednodušší a levnější než ta pro svařování elektronovým svazkem, je velikost polotovaru stále limitována velikostí vakuové komory. [6]

2.2.3 Svařování elektronovým svazkem

Svařování elektronovým paprskem je proces tavného svařování, který ke spojení materiálů využívá elektronový paprsek. Proces funguje tak, že ve vakuové komoře je generován svazek vysokoenergetických elektronů. Tento paprsek je zaměřen a směřován ke spoji, který má být svařen. Když se elektrony srazí se svařencem, jejich kinetická energie se přemění na teplo, které roztaví materiál a vytvoří svar.

Klíčovou výhodou EBW je jeho schopnost produkovat vysoce kvalitní, vysoce čisté svary s minimálními tepelně ovlivněnými zónami. To je způsobeno vysokou hustotou energie elektronového paprsku, která umožňuje přesnou kontrolu nad svařovacím procesem. Kromě toho, protože proces probíhá ve vakuu, zabraňuje oxidaci a kontaminaci z okolního prostředí. Díky tomu je EBW zvláště vhodný pro svařování reaktivních kovů a slitin a pro aplikace vyžadující vysokou přesnost a čistotu, jako je typické v leteckém a jaderném průmyslu. [7] [8]

3 Plazmové navařování

3.1 Plazma

Jako první název plazma pro ionizovaný plyn použil Irving Langmuir. Přenos částic v ionizovaném sloupci a v krevní plazmě mu připadal podobný.

Plazma Langmuir chápal jako oblast výboje plynu, která není ovlivněna stěnami nebo elektrodami a má následující vlastnosti:

1. V plazmatu jsou volné nosiče elektrického náboje.
2. Plazma vykazuje kolektivní chování.
3. Plazma je kvazineutrální. [9] [10]

Se zvyšující se teplotou získávají částice větší volnost. V plynu se částice na rozdíl od pevného skupenství a tekutiny mohou pohybovat volně, elektrony se však pohybují pouze po svých orbitalech uvnitř atomu, podle pravidel kvantové mechaniky. V plazmatu jsou ale elektrony osvobozeny z atomů a nabývají tak naprostou volnost pohybu.

V důsledku ztráty některých elektronů získávají atomy pozitivní elektrický náboj a jsou nazývány ionty. Plazma je tedy plyn skládající se z pozitivně a negativně nabitých částic v takovém poměru, že celkový náboj je roven nule. Volně se pohybující elektrony mohou vést elektrický náboj, plazma je tudíž elektricky vodivý plyn.

Pro přeměnu plynu v plazma je z atomů nezbytné vytrhnout alespoň některé elektrony, a tím tyto atomy změnit v ionty. Toto oddělení se nazývá ionizace.

Ionizace může být dosaženo několika metodami, těmi nejdůležitějšími jsou:

- a) ionizace teplem,
- b) ionizace radiací,
- c) ionizace elektrickým nábojem.

Všechny látky ionizují, dosáhnou-li dostatečně vysoké teploty. [11]

3.2 Navařování

Metoda navařování je založena na metalurgickém spojení základního a přídavného materiálu. Technika tohoto procesu je velmi podobná té, která se používá při spojování materiálu svařováním. Povrch základního materiálu je v procesu tavení přídavného materiálu zahřát a v důsledku se natavuje a spojuje s přídavným materiálem. [12]

Navařovací metody jsou odvozeny od metod svařovacích a jsou nejlepší pro aplikace tlustých povlaků (1–50+ mm) z kovových materiálů. Povlak může být na povrchu základního materiálu zformován jakoukoli svařovací metodou (MMA, MIG, TIG, PTA atd.) Alternativně se dá jako zdroj tepla použít i laser, který se pak používá pro nanášení povlaků o tloušťce mezi 0,5 a 3 mm. [12]

Při navařování se povrch základního materiálu nataví a spojí s přídavným materiálem. Složení návaru se tedy do jisté míry liší od přídavného materiálu a tato odchylka může ovlivnit mechanické vlastnosti návaru. Stupeň promísení vrstev se liší podle použité metody navařování, ale může být až 30%. Například při navařování pomocí laseru se, díky vysoké síle zdroje a krátkého času procesu, může promísení násobně snížit. [12]

3.3 PTA a PAW

Metody navařování tvrdých povrchových vrstev (hardfacing) plazmatem lze rozdělit podle formy přídavného materiálu. Je-li přídavný materiál přiváděn ve formě kovového drátu, jedná se o PAW (Plasma Arc Welding), pokud se používá prášek, je pak metoda známá jako PTA (Plasma Transferred Arc). [13]

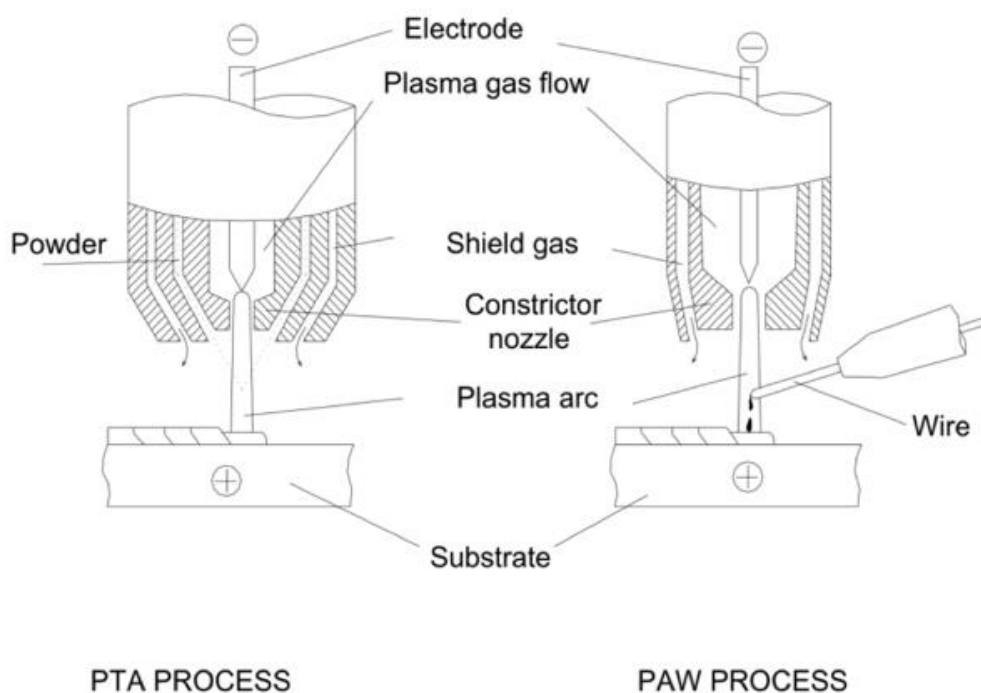
Oba procesy používají netavící se wolframovou elektrodu umístěnou uvnitř hořáku, chlazenou trysku, ochranný plyn pro ochranu svarové lázně a plazmový plyn. Plasma transferred arc je metoda využívající k ohřevu materiálu koncentrovaný proud plazmatu. Plazma je tvořeno v plazmatronu z plazmového plynu. Jednou z hlavních charakteristik PTA je způsob přidávání materiálu, prášek místo drátu, což vyžaduje použití podávacího plynu. Pro vytvoření návaru je tedy potřeba speciálního podavače přídavného materiálu, který prášek dopraví do oblouku. [13]

Jako ochranný plyn, který se používá pro ochranu místa navařování se používá stejně jako pro plazmový a podávací plyn nejčastěji argon technické čistoty (4.8).

Návary vytvořené metodou PTA se vyznačují minimálním závarem. Díky nízkému promísení (mezi 6 až 10 %) vykazují vlastnosti bližší návarovému materiálu než obdobné návary vzniklé použitím metody PAW (promísení mezi 20 až 25 %). Lepší rozměrová stálost, menší tepelně ovlivněná oblast a jemnější mikrostruktura jsou dalšími nezanedbatelnými přednostmi této metody. [13] [14]

V průmyslové praxi se běžně využívají navařovací proudy mezi 80 a 100 A. Pro drobnější součásti se jeví výhodnější užití navařování mikroplazmatem, které charakterizováno proudy do 50 A (pro μ -PAW).

Při PTA navařování je plazma zapáleno uvnitř hořáku mezi wolframovou elektrodou a tryskou prostřednictvím nízkoproudého pilotního oblouku, který ionizuje plazmový plyn proudící hořákem. Při zapálení navařovacího, přeneseného oblouku dojde k uzavření elektrického obvodu. Kovový prášek je pak přiváděn do plazmového paprsku. [14]



Obrázek 1 Princip plazmatronu pro proces PTA a PAW [13]

3.3.1 Zapojení hořáku

Pro procesy využívající plazma se používají plazmové hořáky s elektrickým obloukem napájeným stejnosměrným proudem. Existují tři základní druhy hořáků dle druhu zapojení:

- přenesený oblouk (PTA)
- nepřenesený oblouk (nezávislé zapojení pro nevodivé materiály)
- kombinované zapojení přeneseného i nepřeneseného oblouku

Závislé zapojení hořáku (přenesený oblouk)

Závislé zapojení funguje na základě vytvoření elektrického oblouku mezi elektrodou uvnitř hořáku a samotným obrobkem. Tento obrobek účinně působí jako druhá elektroda. Tento typ hořáku se často používá v procesech, jako je svařování a řezání plazmovým obloukem. Jednou z hlavních výhod závislého zapojení je vysoká koncentrace tepla a účinnost, což vede k rychlejšímu zpracování materiálu. Aby však proces fungoval, musí být obrobek elektricky vodivý. [15]

Nezávislé zapojení hořáku (nepřenesený oblouk)

Při nezávislém zapojení hoří plazmový oblouk mezi tryskou plazmového hořáku (anoda, + pól) a wolframovou elektrodou (katoda, - pól). Oblouk je nezávislý na navařovaném materiálu, proto se toto zapojení využívá především při pokovení a řezání nevodivých materiálů. Hubice hořáku je velmi tepelně namáhána, a proto musí být intenzivně chlazena. Kvůli životnosti trysky se používají pouze inertní plyny. [16]

Kombinované zapojení hořáku

Plazmový oblouk hoří mezi navařovaným základním materiálem (anoda, + pól) a wolframovou elektrodou (katoda, - pól). Pro zapálení přeneseného oblouku (transferred arc) se však využívá pomocného oblouku. Ten je zapalován vysokofrekvenčním výbojem mezi měděnou tryskou a wolframovou elektrodou, kdy v kanálu dýzy dochází k ionizaci plazmového plynu, a vzniká pilotní (pomocný) oblouk. Hlavní přenesený plazmový oblouk se zapaluje přiblížením součásti nebo spuštěním plazmového proudu. Při kombinovaném zapojení je tryska hořáku méně tepelně namáhána a má větší životnost než tryska hořáku při nezávislém zapojení. Toto zapojení se využívá pro svařování, řezání a navařování. [16]

3.3.2 Wolframové elektrody

Wolframové elektrody se používají při obloukovém svařování metodou TIG a PAW. V obou procesech jsou elektroda, oblouk a svarová lázeň chráněny před atmosférickou kontaminací inertním plynem. Wolframová elektroda se používá, protože snese velmi vysoké teploty při minimálním odtavení nebo erozi. Wolframové elektrody obvykle obsahují malá množství jiných oxidů kovů, které mohou nabídnout některé výhody, jako je usnadnění spouštění oblouku, zvýšení stability oblouku, snížení rizika kontaminace svaru a zvýšení životnosti elektrody. [15]

WP - čisté wolframové elektrody

Jsou vhodné pro svařování slitin hliníku střídavým (AC) proudem, naopak nevhodná je pro svařování stejnosměrným (DC) proudem. Vyniká dobrou stabilitou oblouku. Protože je určena výhradně pro střídavý proud, nikdy se nebrousí do špičky. [16]

WT(h) - elektrody legované thoriem

Se stoupajícím obsahem thoria se zlepšují zapalovací vlastnosti, trvanlivost a proudová zatížitelnost elektrod WT(h). Hlavní použití těchto elektrod je při svařování vysoce legovaných a nerezových ocelí stejnosměrným (DC) proudem, kde vykazují výborné vlastnosti. Thorium je však radioaktivní prvek a s jeho stoupajícím obsahem roste i radioaktivita elektrod. Nebezpečí thoriovaných elektrod je v záření alfa. Radioaktivní částice se usazují v plicích a mohou způsobit rakovinu. Při svařování s těmito elektrodami je nutné důkladné odsávání, použití filtračně-ventilačních (PAPR) jednotek, při broušení by měly být používány výhradně brusky se systémem broušení za mokra apod. Z tohoto důvodu jsou již thoriované elektrody na ústupu. [16]

WL(a) - elektrody legované lanthanem

Elektrody WL(a) jsou elektrody univerzální pro téměř všechna použití, ať již při svařování střídavým (AC) či stejnosměrným (DC) proudem. Lanthanované elektrody jsou dobře využitelné zejména v oblasti nízkých proudů a jsou tak vhodné i pro svařování plazmatem a mikroplazmatem. Vyšší podíl lanthanu usnadňuje zapalování a elektrody jsou tak vhodné zejména pro automatizované svařování - orbitální, robotické, polohovací stoly apod. [16]

3.3.3 Plyny

Při svařování plazmatem se dají použít různé plyny, a právě podle druhu použitého plynu dosahuje plazma různých teplot:

- (i) dusíkové plazma – do 9 000 K
- (ii) vodíkové plazma – do 10 000 K
- (iii) argonové plazma – do 16 000 K
- (iv) heliové plazma – do 20 000 K
- (v) plazma stabilizované vodou – až 35 000 K [17]

Plyny pro svařování plazmatem se dělí na plazmové, ochranné a fokusační.

3.3.3.1 Plazmový plyn

Vnitřní proud plynu kolem wolframové elektrody je nazýván plazmový (pilotní) plyn. Nejčastěji se jedná o argon, který díky své nízké ionizační energii dosahuje vysokého ionizačního stupně. Při svařování chromniklových ocelí nebo slitin na bázi niklu je používána směs argonu a vodíku. Při shodné délce oblouku důsledku umožňuje vyšší energie, která je důsledkem vyšší tepelné entalpie vodíku, zvýšit rychlost svařování ve srovnání s použitím čistého argonu. K tomu přispívá také vyšší součinitel tepelné vodivosti této směsi. Podobný efekt lze dosáhnout při svařování titanu a zirkonu přimísením helia do plazmového plynu. [18]

3.3.3.2 Ochranný plyn

Ochranný plyn nesmí negativně ovlivňovat vlastnosti základního materiálu. Volba ochranného plynu se řídí v první řadě základním materiálem. Jako ochranný plyn je používána u nelegovaných a nízkolegovaných ocelí, stejně jako u austenitických ocelí a slitin na bázi niklu, zpravidla směs argon/vodík. Pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí je možné použít i směs argon/CO₂ nebo argon/O₂. Pro svařování hliníku je vhodná směs argon/helium. [18]

3.3.3.3 Fokusační plyn

Jako fokusační plyn se používá buď čistý argon, směs argon/helium nebo argon/vodík. Fokusační plyn pro zúžení proudu plazmatu je přiváděn do svařovacího hořáku separátním okruhem mezi plazmovým a ochranným plynem. [18]

Množství plazmového plynu je, např. pro mikroplazmové svařování 0,2 až 1 l/min, pro svařování tenkých plechů podle velikosti proudu 1 až 6 l/min. Standardně

se používá průtok plazmového plynu 5 až 10 l/min popř. 15 až 25 l/min, podle konstrukce hořáku. [18]

3.4 Mikro-plazmové navařování

μ -PTA proces pracuje s ještě nižším proudem plazmatu než μ -PAW (obecně do 20 A) což v porovnání vede k malé energetické hustotě a nízké rychlosti plazmatu. Princip generování plazmatu u μ -PTA procesu je v podstatě stejný jako u PTA procesu. Základní rozdíl je v množství a kontrole používaného proudu, který může být nízký až 0,1 mA. Toto umožňuje procesu generovat přesně zaměřený a kontrolovaný mikro-plazmový oblouk, který zajišťuje téměř zanedbatelnou tepelně ovlivněnou oblast, malé zakřivení materiálu, hlubší průvar, depozice bez pórů, a lepší vzhled, bez znečištění od rozstříku. [19]

Práškové nanášení materiálů velmi výhodné při nanášení FGM a kompozitních materiálů. Je však nevýhodné z hlediska využití energie a materiálu. Depoziční materiály ve formě drátu mají téměř 100% účinnost depozice a jsou méně zdraví škodlivé než práškový materiál. [19]

Práškový μ -PTA proces může velmi snížit výrobní čas díky využití CAD, robotů atp. Lze pomocí něj vyrobit finální nebo skoro finální geometricky složité součásti z vysoce kvalitních kovových materiálů bez nutnosti dalšího obrábění a má tak potenciál stát se alternativou již existujících AM procesů. [19]

4 Aditivní technologie výroby

Aditivní technologie výroby (AM) je automatizovaná výroba na bázi vrstev, pro vytváření trojrozměrných objektů přímo z 3D-CAD souboru. Nejprve byla tato technologie nazývána jako 3D tisk a dodnes se tento termín často používá. [20]

4.1 Metal additive manufacturing

Typ zdroje energie je u AM procesů používajících kovové materiály hlavním rozlišujícím kritériem. (i) AM procesy využívající elektrického oblouku se vyznačují spíše vyšším depozičním výkonem, a to v rozmezí 50 až 130 g/min a nabízejí výhody levnějšího a jednoduššího vybavení. Proto jsou používány hlavně pro depozice o velkém objemu. Jejich nevýhodou je vysoké promísení se základním materiálem, velká tepelně ovlivněná oblast a porozita; (ii) Procesy využívající

vysokoenergetického svazku (laser nebo elektronový svazek) mají velmi nízký depoziční výkon, a to od 2 do 10 g/min, zato nabízejí výhody jako přesně kontrolovatelný zdroj energie, lokální natavení, vyšší rychlost tuhnutí, jež má za následek nižší promísení materiálů, menší tepelně ovlivněnou oblast a kvalitnější nanesenou vrstvu. Nevýhodou těchto procesů je nízký výkon a vysoká cena operace, údržby a vybavení. Z těchto důvodů se využívají pouze pro vytváření součástí miniaturních rozměrů; (iii) pro překlenutí propasti mezi těmito dvěma procesy bylo vyvinuto mikro-plazmové navařování za použití drátu jako přídavného materiálu (μ -PTAWD), které se ukázalo být cenově dostupnou a kvalitní metodou při použití běžných materiálů. [21]

4.1.1 Laser additive manufacturing process

Použití laseru zajišťuje produkty s lepšími vnitřními i vnějšími povrchy a přesným tvarem při kratší době výroby. Má schopnost poskytovat části s jednotnou strukturou ve srovnání s různými AM technikami. Přesnost a nízký tepelný příkon šetří spotřebu energie a minimalizují vznik deformací. Laserová aditivní výroba je rozdělena do dvou typů – metody na bázi prášku a metody používající drát. Prášek je buď předem nanesen, nebo kontinuálně přiváděn do tavné zóny laserového povrchu a v případě drátové metody se provádí kontinuální tavení drátu. Hlavními omezeními této technologie jsou pomalá depozice materiálu, velikostní omezení, delší doba procesu a vyšší výrobní náklady. [22] [23]

4.1.2 Cold spray deposition process

Jedná se o metodu, při které se využívá kinetická energie materiálu i přes využití tepelné energie k depozici, nazývá se proces depozice za studena. Tento proces je založen na kritické plastické deformaci částic o velikosti v mikronech ($<100 \mu\text{m}$), přičemž částice se přichytí k podložce kombinací difúze kovu s kovem a fyzického spojení. Hlavními rysy procesu studeného nástřiku jsou omezený vývoj napětí a tepelně indukovaná změna fáze během depozice. Pro účinné nanášení je třeba udržovat rychlost dopadajících práškových částic. Je však třeba dávat velký pozor, když dojde ke kolísání pod kritickou rychlostí, prášek ztrácí přilnavost. Eroze částic prášku se stává nevyhnutelnou, když jejich rychlost překročí prahovou mez. Celá metoda depozice za studena počítá s faktory, jako je průtok plynu, velikost zrna a rychlost. Tato technologie má některé nevýhody, jako je, že deponovaný povlak nemá téměř žádnou tažnost a další tepelné zpracování je nezbytné. [24] [25] [26]

4.1.3 WAAM

Proces WAAM využívá oblouk, který je zdrojem tepla, a drát na cívce jako surovinu pro depozici trojrozměrných vrstev. První patent související s touto metodou pochází z roku 1920. Tato technika se ukazuje jako užitečná ve srovnání s ostatními technikami AM kvůli nízkým nákladům na vybavení a snížené spotřebě materiálu. V závislosti na modelu CAD se kapky roztaveného kovu neustále přesouvají na základní materiál. WAAM má v mnoha ohledech navrch ve srovnání s jinými AM procesy díky vyšší rychlosti výroby, sníženým nákladům, téměř 100% využití materiálu a lepšímu spojení vrstev dílu. Tato technika usnadňuje výrobu velkých dílů, které mají méně složitostí, se zkrácenou dobou trvání a struktura získaná procesem WAAM je srovnatelná s těmi, které jsou vyráběny tradičními způsoby. Přestože kvalita povrchu dílu není tak dobrá jako u těch vyráběných tradičními způsoby, výhody, jako je rychlost, úspora materiálu a schopnost vytvářet velké komponenty, často nad těmito nedostatky převažují. Problémy jako zbytkové napětí, nečistota povrchu, deformace v důsledku přehřátí a menší přesnost při napojování jednotlivých vrstev jsou hlavními problémy stabilizace procesu WAAM. [27] [28] [29] [30]

Podle zdroje tepla se formy WAAM dělí na obloukové navařování (GMAW/GTAW) a plazmové navařování (PAW). Tyto procesy mají různé vlastnosti a pracují s odlišnými materiály. Je třeba zajistit optimalizaci parametrů svařování podle použitého procesu, protože i malá odchylka může způsobit významné vady, jako je špatný vnější vzhled, fyzikální vlastnosti, nebo mikrostruktura. V GMAW jsou svařovací hořák a drát vzájemně koaxiální, což usnadňuje proces generování trajektorie. Nejvyšší rychlost nanášení nabízí GMAW, ta je přibližně 2–3krát vyšší než u jiných procesů, zatímco jemnější návary jsou získány pomocí oblouku s vysokou hustotou PAW. WAAM na bázi GMAW je vynikající pro hliník a ocel, ale v případě titanu způsobuje kolísání oblouku a získaný povrch je drsný. GTAW a PAW jsou vhodné i pro titanové díly, ale kvalitní díly vyžadují otáčení hořáku, protože přenos materiálu a kvalita nanášení závisí na orientaci podávání drátu při procesu. Vzhledem k externímu systému podávání drátu je v případě GTAW a PAW generování dráhy nástroje a programování robota mnohem komplikovanější. Dalším problémem spojeným s PAW je omezení velikosti pracovního prostoru, nelze jej zpravidla použít pro výrobu velmi velkých dílů. Podmínky zpracování a rychlost výroby pro specifikovaný díl ovlivňují volbu techniky WAAM. [27]

4.1.4 Opravy kovových forem

Nejsložitější a nejnákladnější součástí procesu vysokotlakého lití je forma. Tato forma musí odolat zvýšeným teplotám a intenzivním uzavíracím silám až do 40 kN. Zároveň musí její povrch odolávat erozi od roztavené licí slitiny, která vstupuje při tlacích až 120 MPa a rychlostech 60 m/s. Tepelná únava způsobená změnami teploty je primárním mechanismem opotřebení, který vede k povrchovým trhlinám. Pro boj s těmito podmínkami jsou formy vyrobeny z vysoce legované oceli, kalené, temperované a často nitrované. Některé mají dokonce povrchovou úpravu. Tyto formy mohou stát až 100 000 EUR, takže výzkum opravárenských technologií je nezbytný pro prodloužení jejich životnosti. [33]

Navzdory všem preventivním opatřením se formy nakonec nevyhnutelně opotřebují. Oblíbenou metodou pro jejich opravu je navařování, zejména za použití metod TIG, plazmového navařování a navařování laserovým paprskem. Opravy obvykle stojí pouhých 30 % ceny nové formy. [34]

4.2 Mikro-plazmové navařování jako AM

Jak bylo zmíněno výše, μ -PAW je dobře použitelné pro běžné materiály. Pro materiály, které je velmi složité nebo nemožné tvářet do formy drátu (funkčně gradované materiály, žáruvzdorné materiály, tvrdé a/nebo křehké materiály, kompozity atd.) jej ovšem nelze použít. Pro takovéto aplikace je možné použití materiálu ve formě prášku (μ -PTAPD), které navíc pomáhá k přesnější kontrole nanášení u tvarově komplexních součástí a k vyšší rychlosti. μ -PTA proces nabízí stabilní a koncentrovaný oblouk i při nižších hodnotách proudu, čímž zajišťuje menší tepelně ovlivněnou oblast. [31]

Kromě výše uvedeného nabízí mikroplazmové navařování výhody, jako je zlepšená směrová stálost oblouku, zvýšená stabilita oblouku a podstatně snížená citlivost na změny délky oblouku a má potenciál být energeticky a materiálově efektivní, ekonomický a šetrný k životnímu prostředí. Zařízení lze automatizovat pomocí počítačově číslicově řízeného stroje (CNC) nebo robotického ramene. Plazma lze provozovat jak v nepřetržitém, tak pulzním režimu. Proces nanášení μ -PTA je nejvhodnější pro miniaturní depozice, jako jsou opravy / renovace vadných / poškozených forem, ozubených kol a podobných dílů. [19]

4.3 Přídavný materiál

Nejčastěji používané slitiny pro AM jsou slitiny železa, slitiny niklu a slitiny kobaltu. [32]

4.3.1 Slitiny na bázi železa

Materiály na bázi železa, zejména korozivzdorné oceli, nástrojové oceli a slitiny železa a niklu, se ukázaly jako klíčoví kandidáti pro aplikace aditivní výroby (AM). Jejich obliba a rozšíření pramení z jejich vynikajících mechanických vlastností, včetně vysoké pevnosti v tahu, houževnatosti a odolnosti proti únavě. Mnohé z těchto slitin navíc vykazují pozoruhodnou odolnost proti korozi a oxidaci, díky čemuž jsou vhodné pro náročná prostředí. Při zpracování pomocí AM technik, jako je selektivní tavení laserem (SLM) apod., mohou tyto materiály prokázat jedinečnou kombinaci tvrdosti, tažnosti a odolnosti proti opotřebení. Schopnost manipulovat s jejich mikrostrukturami prostřednictvím parametrů procesu a následného tepelného zpracování dále zlepšuje jejich vlastnosti. Lze například řídit velikost zrna a morfologii, což ovlivňuje pevnost a tvrdost materiálu. Návary navzdory obrovskému potenciálu mohou vykazovat problémy, jako je pórovitost, zbytková napětí a anizotropie. [33] [34] [35]

Oceli jsou vhodnou volbou v aplikacích, kde jsou požadavky kladeny na:

1. Odolnost proti korozi a celkovou životnost v náročných podmínkách
2. Pevnost, tažnost, tvrdost, houževnatost a odolnost proti opotřebení
3. Nízká cena
4. Bezkonkurenční rozmanitost dosažitelných vlastností mikrostruktury od supertvrdeho martenzitu po vyhovující vícefázové sloučeniny a/nebo
5. Funkce jako feromagnetismus nebo invarové efekty (nízká teplotní roztažnost). [36]

4.3.2 Slitiny na bázi niklu

Vysoce legované slitiny na bázi Ni jsou hlavními materiály používanými například pro výrobu turbín nebo komponent do leteckých motorů, a to díky jejich vynikající pevnosti v tahu a creepu při vysokých teplotách až 800 °C. Superslitiny na bázi Ni se však obvykle vyznačují velmi špatnou obrobiteľností kvůli jejich nízké tepelné

vodivosti a vysoké tvrdosti. Tato nevýhoda se ukázala být důležitou hnací silou pro použití AM technologií k výrobě součástí z niklových slitin. [33]

Například vlastnosti slitiny Inconel 718 zpracované AM procesem jsou lepší než vlastnosti slitiny v odlévané formě, ale ve srovnání s tvářeným produktem mají vzorky takto vyrobené součásti obvykle nižší pevnost v tahu. Aby se tato situace zlepšila, musí být po AM provedeno povýrobní zpracování, včetně HIP a/nebo stárnutí. Je to hlavně proto, že hlavní zpevňující fáze, jemné precipitáty γ_0 (Ni_3Al) a/nebo γ_{00} (Ni_3Nb), které se vyvíjí v tvářeném produktu, nelze, kvůli extrémně vysokým rychlostem ochlazování, v podmínkách zpracování běžnými AM procesy dobře vytvořit. [33] [37]

4.3.3 Slitiny na bázi kobaltu

Kobaltové slitiny pro navařování jsou široce používány hlavně pro svoji dobrou odolnost proti opotřebení, oxidaci a korozi spolu s žárupevností až do teplot kolem 980°C . Nejpoužívanějším typem kobaltových slitin jsou slitiny typu „Stellite“. [32]

4.3.3.1 Stellite 6

Stellite 6 byl vyvinut na začátku 19. století a je běžně používán pro navařování. Je to slitina na bázi kobaltu (Co-Cr-W-C) s velkou tvrdostí a dobrou odolností proti korozi a otěru. [38]

Tabulka 1 Chemické složení slitiny Stellit 6 [39]

Prvek	Co	Cr	W	C	Si	Fe	Ni	Ostatní
Podíl [%]	57	28-32	11-13	2-3	1,2	1	1	1,5

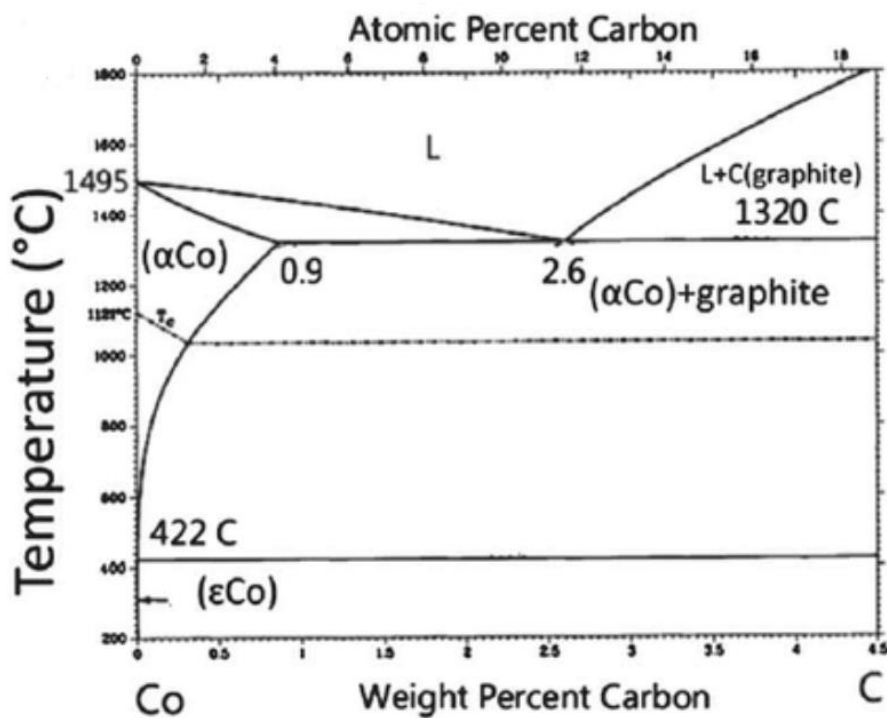
Pro Stellite 6 je typická mikrostruktura skládající se z α -Co dendritů s plošně středěnou kubickou (FCC) mřížkou, která je obklopena mixem lamel fáze bohaté na chrom a fáze karbidové, vznikající z eutektické reakce v interdendritické fázi v průběhu tuhnutí. Legováním různými prvky lze ovlivnit krystalovou strukturu této slitiny (FCC nebo HCP). Ni, Fe, Mn a C stabilizují FCC mřížku a W, Cr, Si a Mo jsou stabilizátory mřížky HCP. [38]

Legování navíc kromě krystalové mřížky ovlivňuje i mechanické a fyzikální vlastnosti slitiny Stellite 6. Přítomnost uhlíku snižuje teplotu tuhnutí v rozsahu podle binárního diagramu Co-C (viz Obrázek 2). Přítomnost Cr zajišťuje odolnost proti oxidaci a korozi. Přidání Mo ovlivňuje chování při tuhnutí kobaltových slitin. Podle [11] se

struktura karbidů bohatých na Cr mění z M_7C_3 na M_23C_6 a morfologie z lamelární na granulární tvar v interdendritických regionech s přidáním 6 hmotnostních procent Mo do slitiny Stellite 6. Wolfram ve Stellite 6 obvykle přispívá k tvrdosti díky precipitačnímu zpevňování formováním WC karbidů a intermetalických fází jako je $Co_3(W)$. Lze tedy říct, že Cr dodává hlavně odolnost proti korozi a oxidaci, zatímco Mo a W zlepšují odolnost proti opotřebení. [38]

Tabulka 2 Mechanické vlastnosti slitiny Stellite 6 [39]

Vlastnost	Hodnota
Teplota tání	1285-1410 °C
Hustota	8.44 g/cm ³
Tvrдость	50-58 HRC (500-680 HV)
Pevnost v tahu	1195 MPa
Mez kluzu	1050 MPa
Modul pružnosti	230 GPa



Obrázek 2 Binární diagram Co-C [40]

4.3.4 Forma podávání přídavného materiálu

AM systémy mohou být kategorizovány z hlediska vstupní suroviny, zdroje energie, stavebního objemu atd. Výrobní systémy mohou být rozděleny do tří širokých kategorií (ačkoli je jich mnohem více): (i) systémy s práškovým ložem, (ii) systémy pro podávání prášku a (iii) systémy pro podávání drátu. Zdroj energie (elektronový paprsek, laser, oblouk atd.) pro tyto systémy je rovněž zajištěn. [41]

Systémy s práškovým ložem

Práškové lože se vytvoří shrabováním prášku přes pracovní plochu. Zdroj energie (elektronový nebo laserový paprsek) je naprogramován tak, aby tavil a spékal prášek na povrchu do požadovaného tvaru. V dalším kroku je přes pracovní plochu shrabována další vrstva prášku a proces se opakuje, aby se vytvořil pevný trojrozměrný komponent. Mezi výhody tohoto systému patří jeho schopnost vytvářet prvky vysoké kvality a vnitřní otvory. [41]

Systémy pro podávání prášku

Stavební objemy těchto systémů jsou obecně větší (např. >1,2 m³ pro jednotku Optomec LENS 850-R). Dále se systémy pro podávání prášku samy o sobě více hodí k vytváření rozměrnějších komponent než systémy s práškovým ložem. V těchto systémech jsou prášky dopravovány tryskou na stavební povrch. Pro roztavení prášku a jeho depozici do požadovaného tvaru se používá laserový paprsek, elektronový paprsek nebo plazmový oblouk. Tento proces se opakuje, dokud se nevytvoří pevný trojrozměrný objekt. Na trhu dominují dva typy systémů. (i) Obrobek zůstává nehybný a tryska se pohybuje. (ii) Tryska zůstává nehybná a obrobek se pohybuje. Mezi výhody tohoto typu systému patří schopnost vytvářet objemné komponenty a možnost použití k renovaci opotřebovaných nebo poškozených součástí. [41]

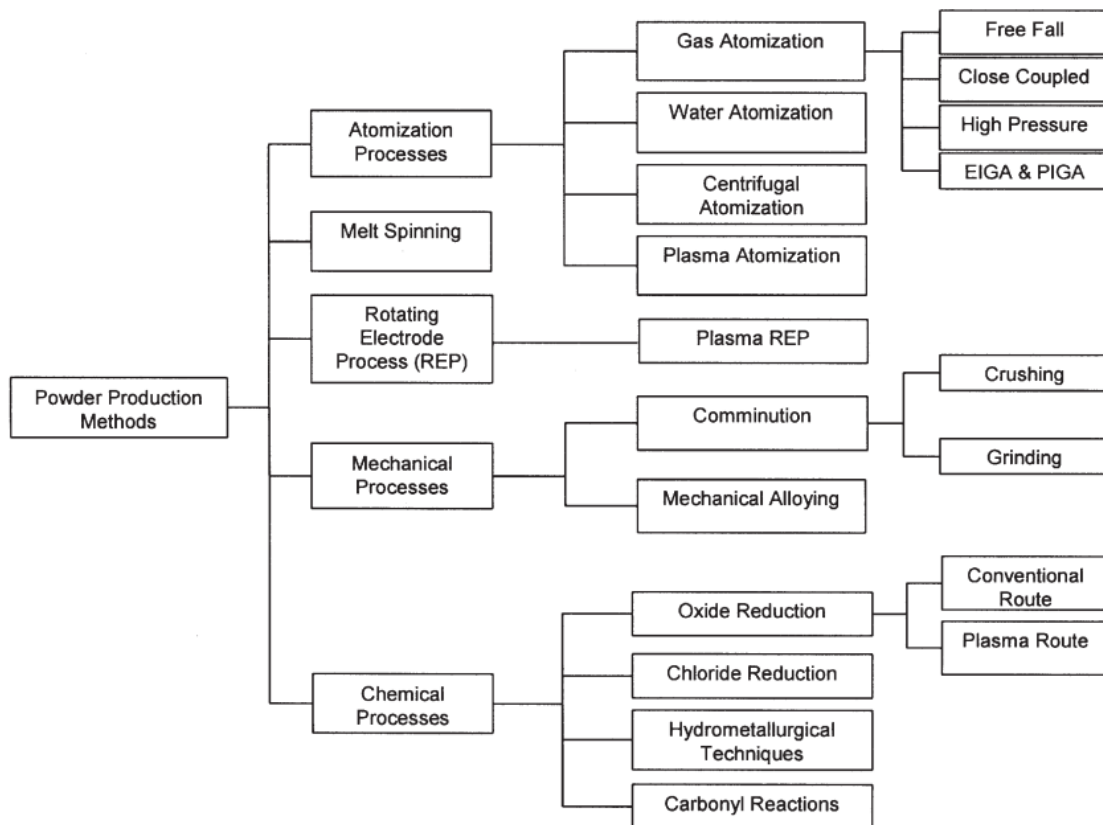
Systémy pro podávání drátu

Zdrojem energie pro tyto systémy může být, stejně jako u systémů pro podávání prášku, elektronový paprsek, laserový paprsek i plazmový oblouk. Vstupní surovinou je drát. Na začátku je nanášena jediná housenka materiálu a při následných průchodech jsou nanášeny další až do vytvoření trojrozměrné struktury. Obecně jsou systémy podávání drátu vhodné pro aplikace s vysokou rychlostí nanášení a jsou schopné vytvářet objemné součásti; vyrobený produkt však obvykle vyžaduje rozsáhlejší obrábění než práškové lože nebo systémy pro podávání prášku. [41]

4.3.5 Výroba kovového prášku

Způsob zpracování práškovou metalurgií je užitečný pro výrobu široké škály vývojových i komerčních materiálů pro průmyslové aplikace. K výrobě kovových prášků se používají techniky, jako je atomizace plynem, atomizace do vody, odstředivá atomizace, plazmová atomizace, mechanické obrušování a legování, zvláknování taveniny, proces rotující elektrody (REP) a řada chemických procesů. [42]

Kovové prášky se vyznačují svou morfologií, kterou lze popsat jako nepravidelnou, blokovou nebo kulovitou, a velikostí prášku. Kovové prášky jsou charakterizovány fyzikálními vlastnostmi, jako je tvrdost a tažnost, chemickými vlastnostmi, jako je reaktivita a nečistoty, a objemovými vlastnostmi, jako jsou vlastnosti toku, zdánlivá hustota, hustota po setřesení, stlačitelnost a pevnost v surovém stavu. Vysoce kvalitní jemné kovové prášky, které neobsahují žáruvzdorné a oxidové kontaminanty s úzkou distribucí velikosti částic, se používají k výrobě plazmových nástřikových terčů a také k výrobě konstrukčních a funkčních materiálů. Cesta práškové metalurgie je často ekonomičtější z hlediska nákladů, přesnosti a produktivity než jiné procesy, jako je lití a kování. [42]



Obrázek 3 Přehled procesů výroby kovového prášku [42]

Příklady procesů výroby kovových prášků:

Atomizace

Atomizace je dvoustupňový proces. Za prvé dochází k rozstříku tekutého kovu a za druhé dochází k rychlému tuhnutí v rozstříkovacím médiu. Energii potřebnou pro rozstřík dodávají zdroje, jako vysokorychlostní plynové paprsky, vodní paprsky, odstředivé působení a plazmové paprsky. Podle toho se procesy atomizace dělí na atomizaci plynem, atomizaci vodou, odstředivou atomizaci a atomizaci plazmatem. Ve druhém kroku se roztavené kapičky vytvořené během rozstříku snaží minimalizovat svou povrchovou energii vytvářením kuliček a poté tuhnou. Rychlost a účinnost procesu závisí na povrchovém napětí roztaveného kovu a teplotě přehřátých roztavených kapiček. [42] [43]

Mechanické procesy

Při mechanických metodách výroby prášků se malé částice vyrábějí z větších částic mechanickými silami v procesu zvaném rozmělnování. Tyto metody zahrnují techniky, jako je drčení a mletí. Zde jsou suroviny obvykle předzpracovány, aby byly křehčí, a tím se zvýšila účinnost procesu a splnily se požadavky na specifické vlastnosti prášku. [42]

4.4 Robotem asistované AM

Díky AM je možné produkovat objekt prakticky jakéhokoli tvaru bez nutnosti rozsáhlých dokončovacích operací. Komplexní objekty mohou být vyráběny v jediném procesním kroku, což eliminuje výrobní operace a tím snižuje čas výroby při pouze nepatrném zvýšení výrobní ceny. AM bylo úspěšně aplikováno v mnoha odvětvích včetně módy, kosmonautiky, letectví, obrany, zdravotnictví a konstruování. Přestože nedávný vývoj ukazuje vrůst užití AM systémů pro výrobu velkých struktur, většina komerčně dostupných AM zařízení využívá tříosé kartézské souřadnicové roboty nebo portálové systémy s omezenými rozměry pracovních plošin. V závislosti na tvaru a rozměrech výrobku může být potřeba podpěrných struktur, což zvyšuje výrobní čas, spotřebu materiálu a v neposlední řadě cenu. Tříosá AM zařízení jsou navíc spojována s vrstvením a vytvářením výrobků s typickým schodovým efektem. [44]

Více osé robotem manipulované výrobní metody, které jsou široce využívány pro svařování, nabízejí lepší kvalitu, [44]

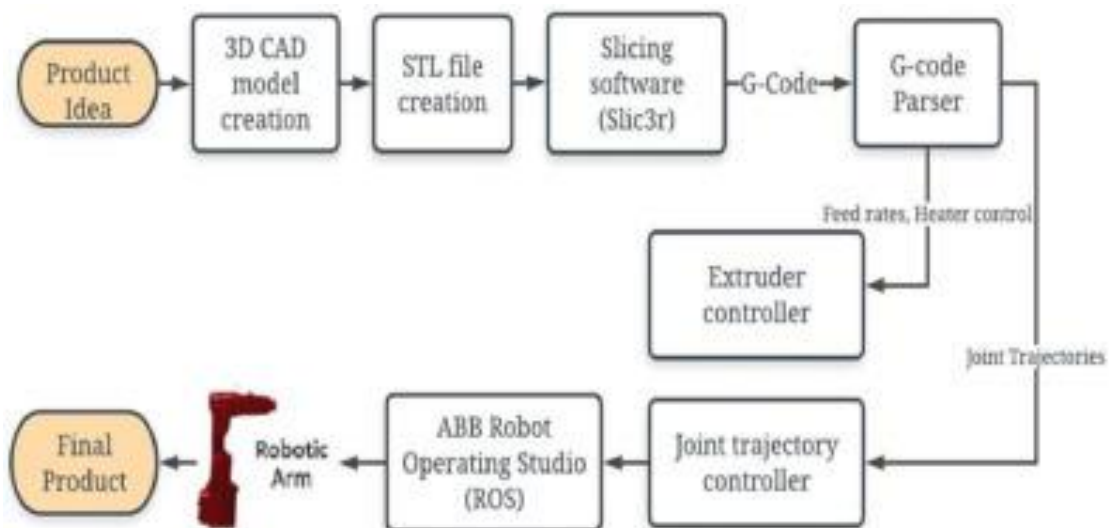
Kombinace multiosých robotů a AM technologií nabízí možnost pro víceosé nanášení vrstev a výrobu částí o komplexní geometrii v různých výrobních podmínkách. [44]

Použití robotů v oblasti AM je ale stále problematické. Ovládání jak robotického systému, tak systému aditivní výroby naráz je jedna z hlavních překážek. Dnešní *slicing* algoritmy („plátkování“ 3D modelu do 2D vrstev) nejsou schopny generovat data G-kódu, která by byla kompatibilní s jazykem robota a neexistují žádné normy týkající se informačního toku spojujícího systém CAD a robotem asistovaný AM proces. [44]

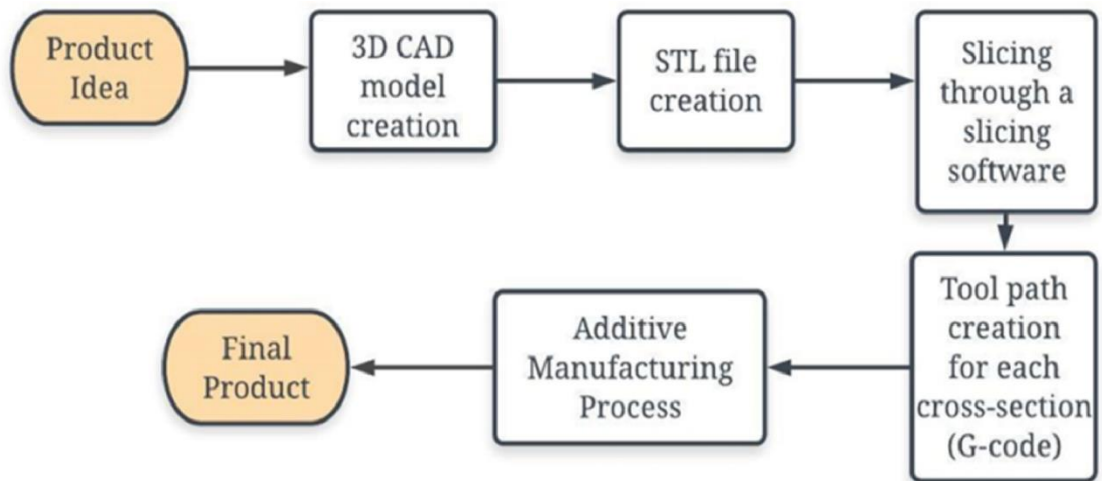
Tok informací je u robotem asistovaného AM komplikovanější než u konvenčních tříosých AM metod. Sjednocení strategie je obtížné, jelikož v tomto případě závisí tok informací na konkrétním robotu a jeho jazyce. [44]

Příklad uvedený na Obrázek 4 zobrazuje příklad toku informací u šestiosého systému, při použití robota ABB IRB 1200-7. Na rozdíl od tradičních AM metod využívá systém kromě Sliceru i analyzátor G-kódu, který si vytáhne informace o pohybu pro robota a informace o parametrech svařovacího procesu a zvláště je odešle příslušným zdrojům (viz Obrázek 4). Informace pro pohyb robota musí být navíc přeloženy do jeho jazyka za pomoci dalšího programu. [44]

Pro porovnání Obrázek 5 se zobrazením toku informací u konvenčních tříosých AM zařízení. [44]



Obrázek 4 Tok informací u šestiosého systému [44]



Obrázek 5 Tok informací u konvenčních tříosých AM zařízení [44]

5 Experiment

V experimentální části byly zhotoveny návary ve tvaru stěny pomocí technologie mikroplazmového navařování metodou PTA. Jako přídavný materiál byla použita slitina typu Stellite 6 a jako základní materiál konstrukční ocel 11 523.

Pro každou stěnu byly nastaveny různé parametry navařování. Následně byl zkoumán vliv změny parametrů na mikrostrukturu a geometrii mikroplazmového návaru.

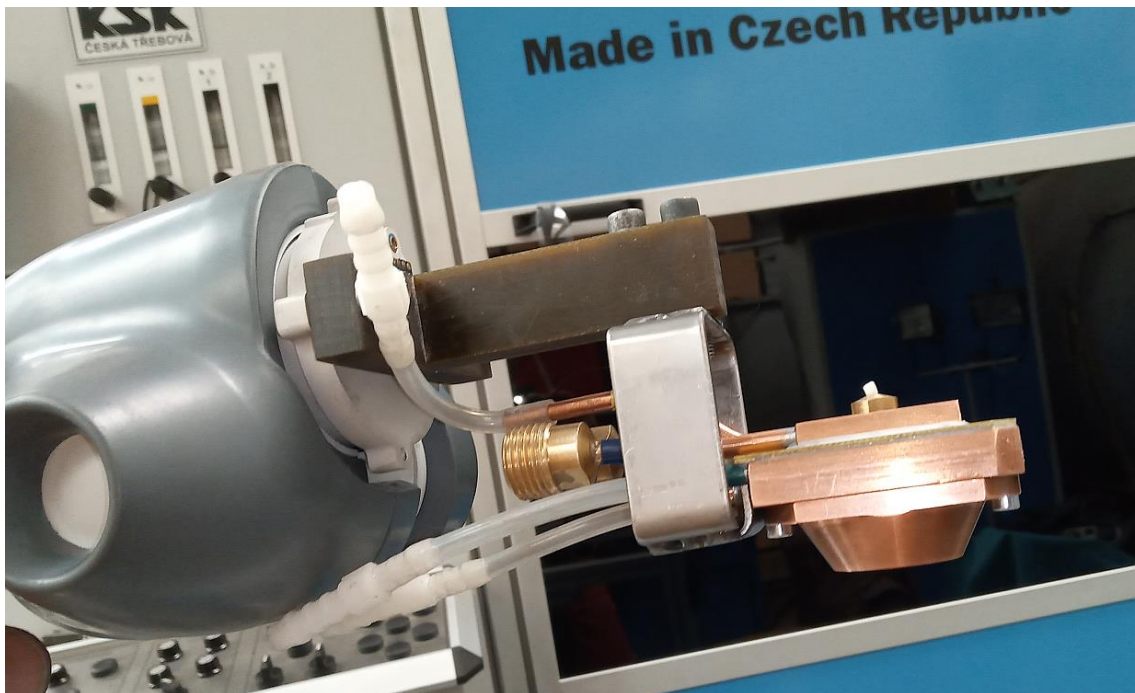
Experiment vznikl díky spolupráci se společností ŠKODA AUTO a. s., sídlící v Mladé Boleslavi.

5.1 Použitá zařízení

5.1.1 Kolaborativní robot ABB YuMi – jednoruký

Jednoruký sedmiosý robot ABB ovládaný odděleným kontrolérem, vybavený softwarem Omnicore.

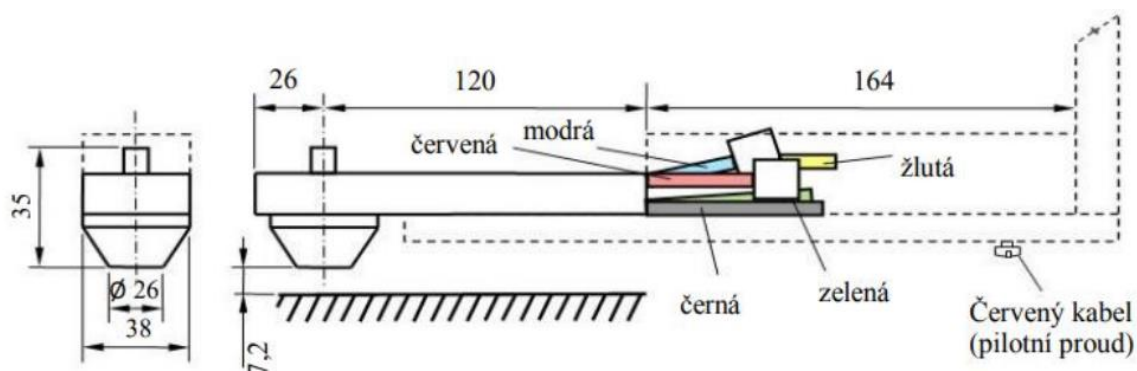
Pro účely experimentu byl z robota odmontován gripper a na přírubu byl místo něj přišroubován držák hořáku.



Obrázek 6 Připevnění držáku hořáku KSK na robotu YuMi

5.1.2 Plazmový hořák KSK PHP 140 V

Plazmatron od společnosti KSK, s. r. o. (Česká Třebová) byl zvolen pro svou odlehčenou konstrukci a odolnost. Originálně je navržen pro navařování vnitřních ploch od průměru 48 mm.



Obrázek 7 Schéma hořáku PHP 140 V (KSK) [45]

5.1.3 Balancér Atlas Copco RIL – 1C

Pro zajištění plynulejšího pohybu robota v mezních polohách byl hořák přichycen na balancér RIL – 1C od společnosti Atlas Copco.

Tabulka 3 Katalogové parametry balancéru RIL – 1C (Atlas Copco)

Délka nylonového lanka	1,5 m
Maximální kapacita	0,5 kg
Hmotnost	0,6 kg

5.1.4 Zdroj plazmového proudu EWM Microplasma 50

Zdroj zajišťuje přesné nastavení svařovacího proudu pomocí desetistupňového spirálového potenciometru (0,1 – 50 A). Umožňuje komfortní nastavení plazmového a ochranného plynu na přístroji s průtokoměry a čidly pro bezproudovou zkoušku plynu. Nastavitelný pilotní oblouk umožňuje optimální přizpůsobení pro použitý svařovací hořák.

5.1.5 Metalografická pila Struers Labotom 3

Manuální stolní pila Labotom-3 je model umožňující řezat téměř jakýkoli materiál díky vyměnitelným dělicím kotoučům. Používá aktivní chlazení a materiál tak není výrazně tepelně ovlivněn. [46]

Pro rozřezání vzorků byl použit kotouč Hexagonal 66A25 vhodný pro dělení extra tvrdých slitin železa (>HV 600).

5.1.6 Laboratorní lis Struers CitoPress 1

Pro lisování nařezaných metalografických vzorků do termostatické pryskyřice byl použit automatický, elektrohydraulický montážní lis CitoPress 1 od společnosti Struers.

5.1.7 Laboratorní bruska a leštička SAPHIR 250 A2-ECO

Příprava ve formě broušení a leštění byla provedena na automatické brusce a leštičce SAPHIR 250 A2-ECO od společnosti Metalco.

5.1.8 Zeiss Axio Observer D1m

Metalografické vzorky byly pozorovány a vyfoceny na světelném mikroskopu Zeiss Axio Observer D1m. Jedná se o inverzní typ mikroskopu, u kterého se objektivy nachází pod sledovaným vzorkem a vzorek se pokládá nad ně.

Je možné použít zvětšení 25x až 1000x. K mikroskopu je dostupné SW rozhraní a úpravy obrazu a pořizování fotografií tak lze provést přímo na řídicím počítači.

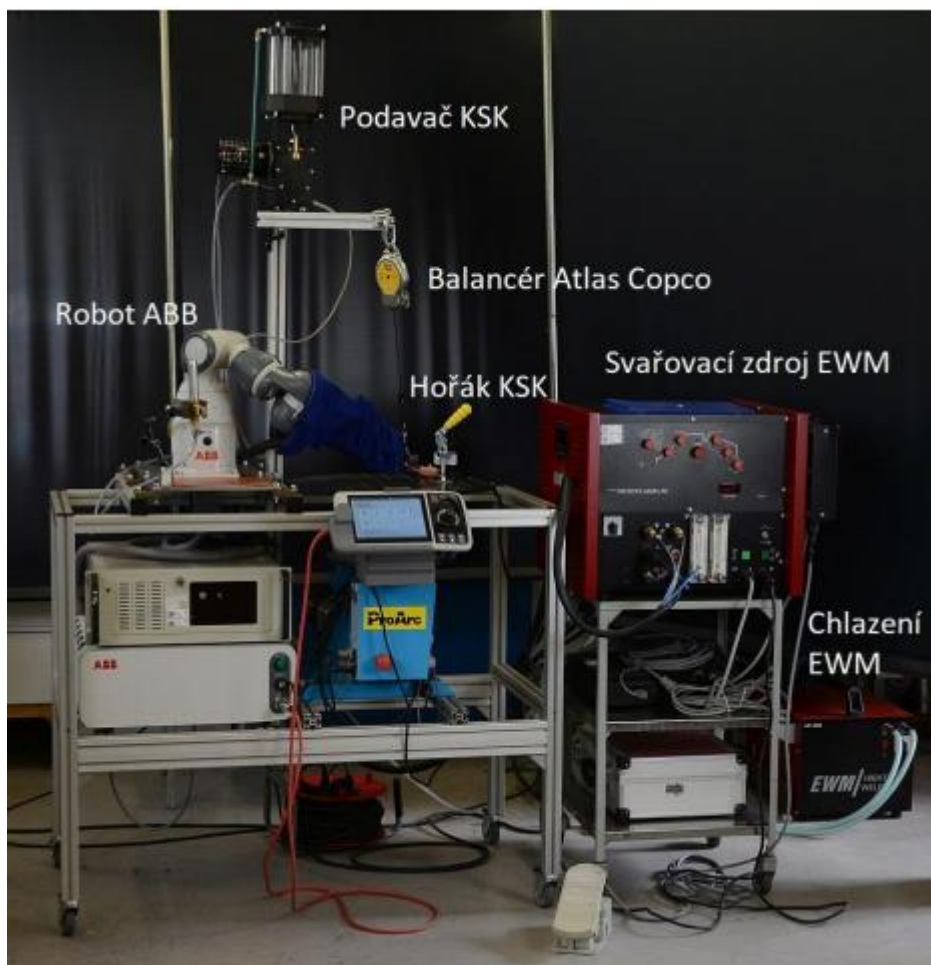
5.1.9 Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1100

Buehler IndentaMet 1104 je poloautomatický tvrdoměr, který disponuje až třemi objektivy a dvěma indentory. Stroj využívá nitkový odečítací systém k automatickému změření úhlopříček vtisku a k výpočtu příslušné hodnoty tvrdosti. Dle tvaru indentoru, může měřit tvrdosti HV, HRC, HK.

5.2 Výroba vzorků

5.2.1 Příprava pracoviště

Vlastní plazmatron byl k robotické ruce připevněn pomocí elektricky nevodivého držáku, vyrobeného v ÚST. Robot je usazen do izolované základové desky a celé zařízení je tak tvořené třemi navzájem elektricky odizolovanými systémy. První je systém robota a jeho řízení, druhý zajišťuje vlastní navařování mikroplazmatem a třetí je tvořen rámem ve kterém jsou systémy umístěny.



Obrázek 8 Pracoviště pro mikroplazmové navařování [47]

5.2.2 Program robota

Směr, odkud je přídavný materiál podáván do svarové lázně ovlivňuje výslednou návarovou housenku. Bylo proto nutné zvolit trajektorii robota tak, aby se v průběhu navařování neměnila orientace hořáku a tím směr podávání prášku. Robot je také omezen hadicí pro podávání prášku a přívod plynu a kabely hořáku. Z těchto důvodů byla pro tuto práci jako 3D součást k navaření zvolena stěna.

Aby zažehávání oblouku neovlivnilo návarovou housenku, byla přidána oblast pro zažehnutí oblouku a přiblížení hořáku na požadovanou vzdálenost od základního materiálu.

Program trajektorie robota byl zadán manuálně přímo na Flexpendantu (dálkovém ovládání robotického systému). Posuv v ose z mezi jednotlivými vrstvami se různil podle nastavení rychlosti posuvu v ose x. Čím rychlejší posuv v ose x byl nastaven, tím nižší housenka byla navařena a tím menší posuv v ose z byl potřeba. Aby se kód nemusel pro každý vzorek přepisovat, byly použity proměnné a offsety.

5.2.3 Základní materiál

Jako základní materiál byla použita nelegovaná konstrukční jemnozrnná ocel vhodná ke svařování ČSN 11 523.

Naměřené hodnoty složení jsou uvedeny v tabulce níže.

Tabulka 4 Naměřené hodnoty složení základního materiálu

Prve	Fe	Mn	Si	S	P	Cr
%	99,15	0,52	0,17	0,044	0,025	0,026 (stopa)

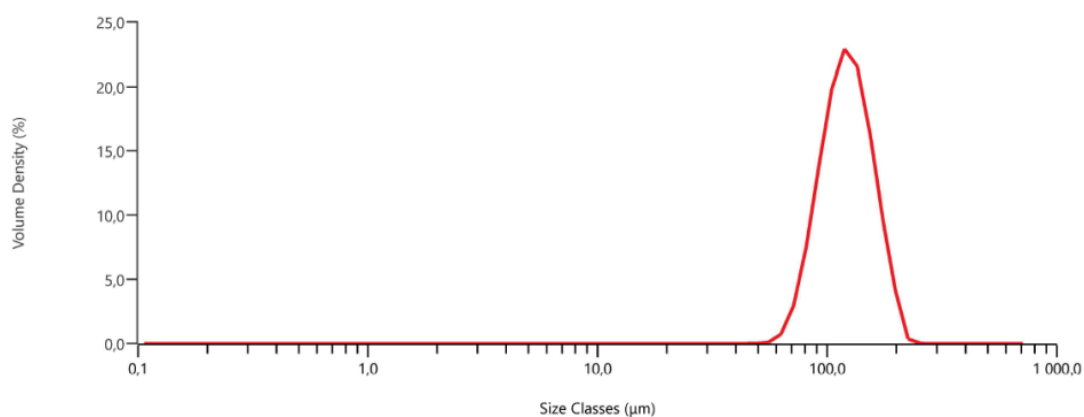
5.2.4 Přídavný materiál

V experimentu byl jako přídavný materiál použit kovový prášek ze slitiny typu Stellite 6 od společnosti LSN Diffusion. Katalogový název slitiny je C6K-PLK dle starší verze a C-06 dle novější verze. Chemické složení prášku C-06 dle katalogu je v hmotnostních procentech 29 % chromu, 4,5 % wolframu, 1,2 % uhlíku a 34,7 % kobaltu (Co-29Cr-4,5W-1,2C) s tvrdostí 38-42 HRC. [48]

Byl proveden rozbor chemického složení (Tabulka 1, Příloha 1) a granulometrie (Obrázek 9, Příloha 2) konkrétního prášku použitého v experimentu s číslem tavby 43866. Snímek prášku pod mikroskopem je na obrázku (Obrázek 8).

Tabulka 5 Chemické složení prášku C-06 (LSN Diffusion), číslo tavby 43866 (viz Příloha 1)

Prvek	Podíl [%]	Chyba [%]
Co	58,403	0,200
Cr	29,210	0,100
W	6,109	0,100
Ni	2,320	0,050
Fe	1,764	0,040
Mo	0,784	0,030
Si	0,713	0,030
Mn	0,562	0,020
Cl	0,086	0,009
Nb	0,033	0,005
Al	0,016	0,004



Obrázek 9 Granulometrie prášku C-06 (LSN Diffusion), číslo tavby 43866 (viz Příloha 2)

5.2.5 Rychlost podávání prášku

Rychlost podávání prášku byla zjištěna experimentálně. Ovládání podavače má 5 stupňů a množství přivedeného prášku na každém stupni pro různé hodnoty průtoku plynu lze vidět v tabulkách níže.

Tabulka 6 Množství prášku pro průtok 7,5 l/min

Stupeň	ml	g
Min	0,7	3,1
.	0,8	3,6
..	0,9	3,7
...	1	4,5
Max	1,1	5,6

Tabulka 7 Množství prášku pro průtok 10 l/min

Stupeň	ml	g
Min	0,6	2,9
.	0,7	3,2
..	0,85	3,6
...	1	4,9
Max	1,15	5,8

5.2.6 Navařovací parametry

Jako proměnné parametry byly zvoleny rychlost posuvu robota a v závislosti na ní pak výška posuvu v ose z. Napětí je parametr přímo svázaný s proudem a svařovací zdroj sám nastavuje jeho optimální hodnotu.

Tabulka 8 Konstantní parametry pro všechny návary

Navařovací proud [A]	50
Počáteční vzdálenost hubice hořáku od základního materiálu [mm]	6
Rychlost podávání přídavného materiálu [g/min]	4,9
Směr podávání přídavného materiálu do svarové lázně	Prášek podáván před hořák ve směru pohybu robota
Průtok plazmového plynu [l/min]	2,8
Průtok ochranného plynu [l/min]	10
Průtok transportního plynu [l/min]	2

Pro zkušební vzorek byly na základě bakalářské práce [47] zvoleny následující parametry:

Tabulka 9 Navařovací parametry pro Vzorek 0

Vzorek	Rychlost posuvu hořáku [mm/s]	Posuv v ose z [mm]	Počet vrstev
0	0,44	0,5	10

Po vizuální kontrole návaru byly další parametry nastaveny následovně:

Tabulka 10 Navařovací parametry pro Vzorky 1-5

Vzorek	Rychlost posuvu hořáku [mm/s]	Posuv v ose z [mm]	Počet vrstev
1	0,66	0,5	10
2	0,66	0,6	30
3	0,99	0,5	10
4	0,99	0,25	30
5	0,33	0,9	10

5.3 Metalografie vzorků

5.3.1 Řezání a lisování

Navařené vzorky byly nejprve rozřezány na vhodné velikosti pro lisování do metalografických puků. Řezání proběhlo na metalografické pile Labotom 3.

Vzorky byly následně lisovány do metalografických puků v laboratorním lisu CitoPress 1. Vzorky byly zality do termostatické pryskyřice. Pro zalití byla použita černá hmota s názvem Multifast a pro zalití popisovacího štítku byla použita průhledná hmota Clarofast. Obě hmoty jsou od společnosti Struers.

5.3.2 Broušení a leštění

Pro umožnění pozorování pod mikroskopem bylo třeba vzorky v metalografických pukcích připravit na laboratorní brusce a leštiče SAPHIR 250 A2-ECO. Nejprve byly vzorky broušeny za mokra brusnými papíry SiC 180, SiC 1200 a SiC 2000. Všechny

brusné papíry byly aplikovány po dobu 120 sekund a při otáčkách 400 ot·min⁻¹. Následně byly vzorky leštěny diamantovým kotoučem MD DAC 1 μm s diamantovou suspenzí s velikostí zrn 1 μm. Leštění probíhalo 4 minuty při otáčkách 150 ot·min⁻¹. Nakonec byly vzorky mechanicko-chemicky leštěny kotoučem MD NAP 0,05 μm s přípravkem Masterprep po dobu 4 minut, při otáčkách 150 ot·min⁻¹.

5.3.3 Leptání

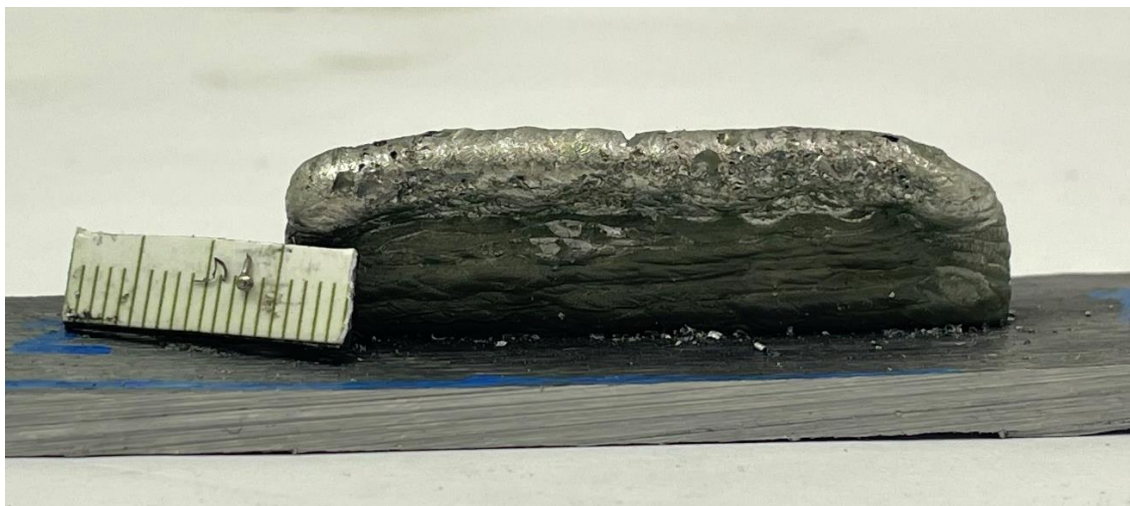
Před vložením vzorků pod mikroskop bylo nutné naleptat jejich povrch pro zvýraznění kontrastu mezi základním materiálem a navařenou stěnou. Vzorky byly naleptány pomocí směsi 100 ml HCl a 5 ml H₂O₂ (30 %).

5.3.4 Měření mikrotvrdomosti

Zkouška mikrotvrdomosti vzorků byla provedena podle Vickerse. Tvar indentoru pro tuto metodu je rovnostranný jehlan s vrcholovým úhlem 136°. Pro měření bylo použito zatížení 0,1 kgf a doba zatížení 12 s.

6 Výsledky a diskuze

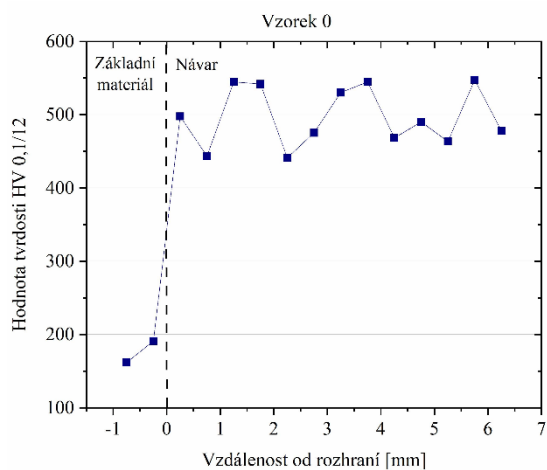
Mikroplazmovým navařováním pomocí kolaborativního robota bylo vyrobeno 6 vzorků. Stěny byly vytvořeny lineárním kladením housenek na sebe. Příklad návaru před rozřezáním lze vidět na Obrázek 10.



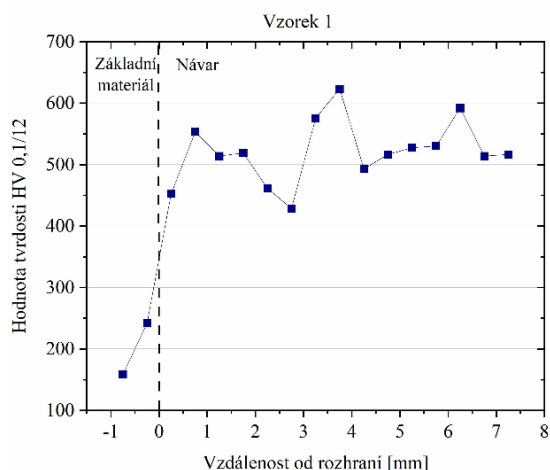
Obrázek 10 Vzorek 2

6.1 Průběh mikrotvrdosti

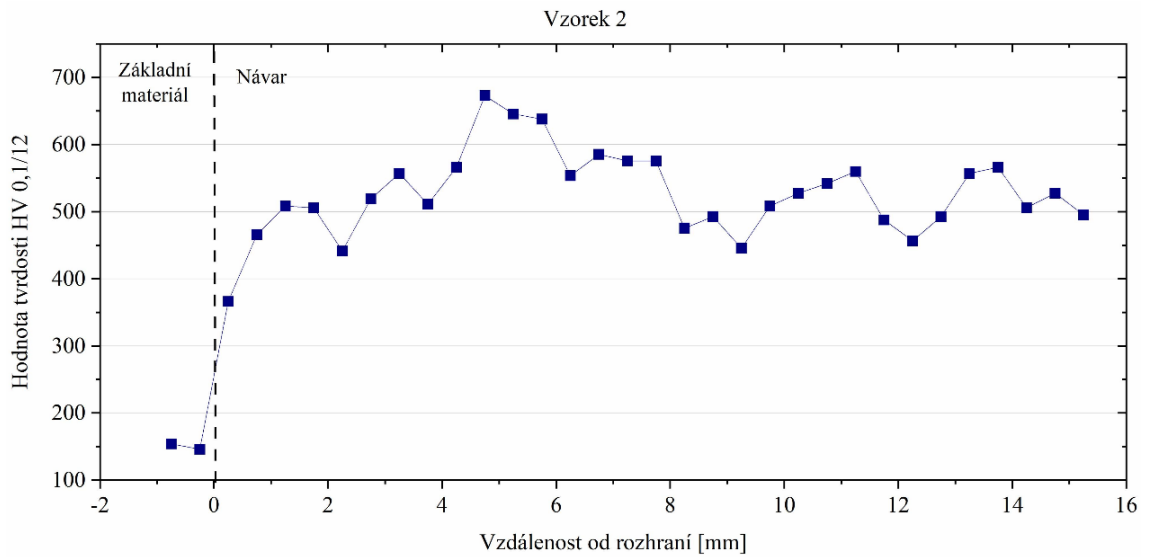
Tabulky naměřených hodnot průběhu mikrotvrdosti jednotlivých vzorků lze nalézt v Příloze 3.



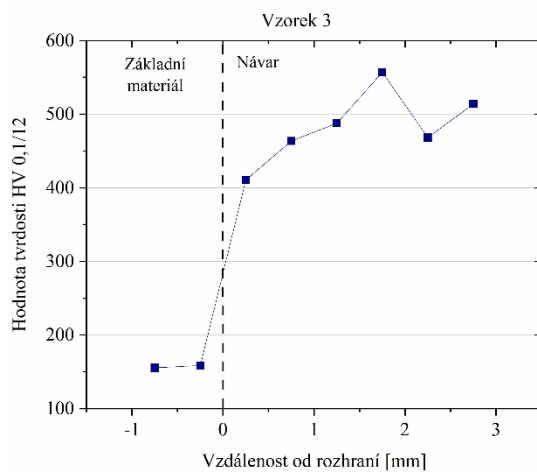
Obrázek 11 Graf průběhu tvrdosti pro Vzorek 0



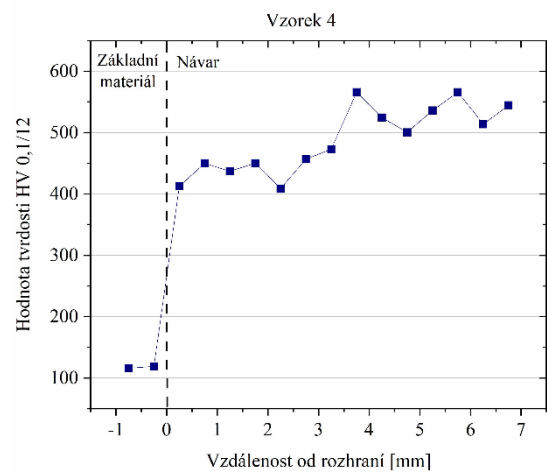
Obrázek 12 Graf průběhu tvrdosti pro Vzorek 1



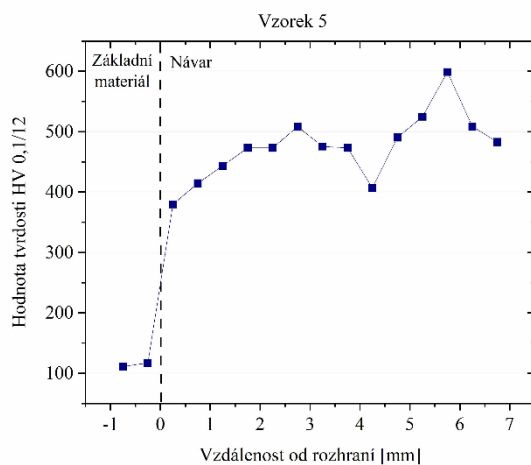
Obrázek 13 Graf průběhu tvrdosti pro Vzorek 2



Obrázek 14 Graf průběhu tvrdosti pro Vzorek 3



Obrázek 15 Graf průběhu tvrdosti pro Vzorek 4



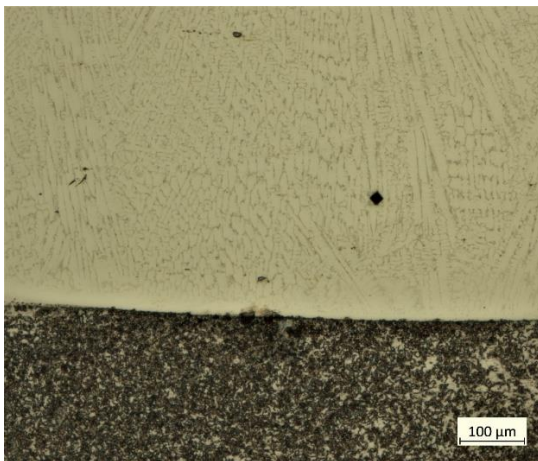
Obrázek 16 Graf průběhu tvrdosti pro Vzorek 5

6.2 Diskuze

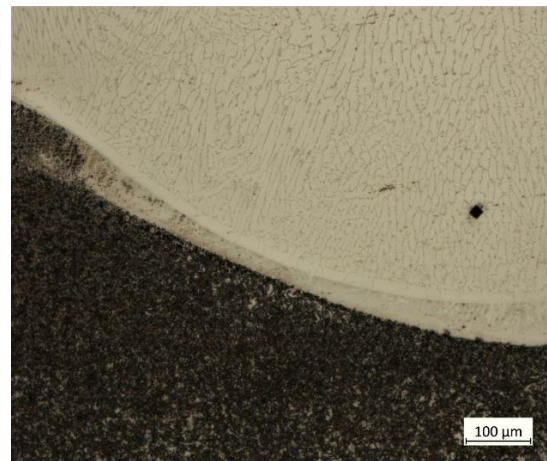
Pro každý vzorek bylo zhotoveno několik mikroskopických snímků v závislosti na výsledcích mikrotvrdomosti. Pozornost byla soustředěna na rozhraní mezi základním materiálem a návarem, oblasti s vysokou porozitou, oblasti píku tvrdosti a rozhraní mezi jednotlivými housenkami.

6.2.1 Růst zrn na rozhraní mezi ZM a návarem

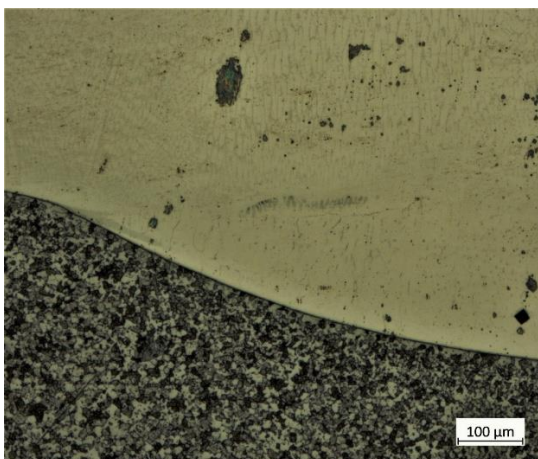
Velikost zrn v blízkosti rozhraní mezi ZM a návarem typicky závisí na charakteristikách odvodu tepla během procesu navařování. Rychlý odvod tepla základním materiálem obecně vede k jemnějším zrnům v důsledku rychlého tuhnutí, což bylo pozorováno u vzorků 0, 1 a 3. V těchto případech se zdá, že byla v blízkosti rozhraní zachována očekávaná jemnost zrna nejspíš díky malému promísení mezi základním a přídatným materiálem. Naopak u vzorků 2 a 4, kde lze pozorovat podstatné promísení, se struktura zrna jeví hrubší. Na Obrázek 22 si lze také všimnout, že v oblasti paty návaru u vzorku 4, kde došlo k menšímu promísení, je struktura dle očekávání jemnozrnná. Kdežto na jiném místě rozhraní u stejného vzorku (Obrázek 21) došlo k vysokému stupni promísení a struktura je výrazně hrubozrnná. Pokud jde o vzorek 5, nadměrná pórovitost znemožňuje jasná pozorování morfologie.



Obrázek 17 Vzorek 0 – rozhraní ZM a návaru



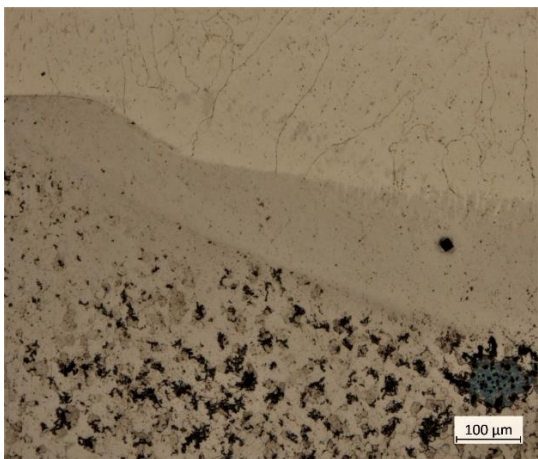
Obrázek 18 Vzorek 1 – rozhraní ZM a návaru



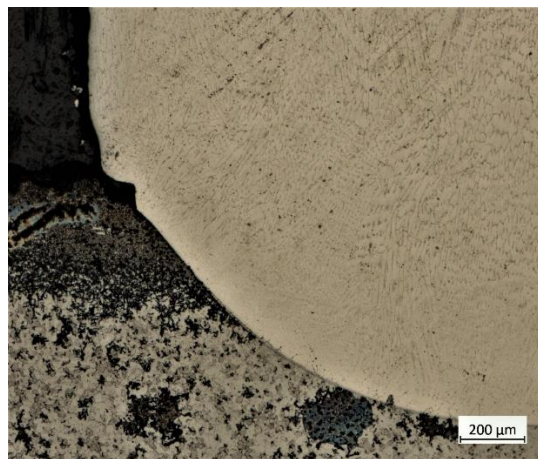
Obrázek 19 Vzorek 2 – rozhraní ZM a návaru



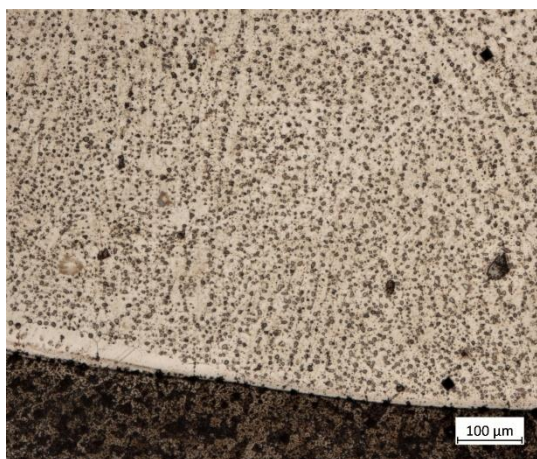
Obrázek 20 Vzorek 3 – rozhraní ZM a návaru



Obrázek 21 Vzorek 4 – rozhraní ZM a návaru



Obrázek 22 Vzorek 4 – pata návaru



Obrázek 23 Vzorek 5 – rozhraní ZM a návaru

Literatura [49], [50], [51] uvádí, že od tavné linie směrem k povrchu povlaku se rychlost tuhnutí (R) zvyšovala a teplotní gradient (G) postupně klesal. Tudíž byl poměr tepelného gradientu (G) k rychlosti tuhnutí R (G/R) na rozhraní ZM/návar vysoký. Proto byl v blízkosti rozhraní proces tuhnutí následován planárním růstem a buněčným růstem dendritů. Jak se tuhnutí pohybuje směrem k povrchu, dochází k rovnoosému dendritickému růstu ve středu a na povrchu navařené vrstvy. V literatuře [50], [51] tak bylo uvedeno, že mikrostruktura stelitových povlaků navařených laserem, vykazuje planární rozhraní, po kterém následuje sloupcový a dendritický růst.

Jak lze vidět na mikroskopických snímcích rozhraní mezi ZM a návarem, u většiny vzorků, které netrpí velkým promísením materiálu, převládá sloupcové dendritické tuhnutí. Je to způsobeno tím, že v mikro-PTA procesu je teplo přivedeno velmi koncentrovaně a jeho odvod je u hranice ztavení velmi efektivní. To znamená vysoký teplotní gradient a poměr G/R je tak, na rozdíl od [49] a [50], nízký. Podobný výsledek také uvedli [51] a [52]. Sloupcová dendritická struktura se pak ve vyšších vrstvách návarů mění na hrubší dendritická zrna, nejspíš právě kvůli změně odvodu tepla a vysokému poměru G/R .

Podle [49] a [52] první fáze, která se formuje při tuhnutí z taveniny je primárně dendritická fáze v hypoeutektické struktuře, která sestává z tuhého roztoku bohatého na Co (γ). Zbytek taveniny nakonec ztuhne jako eutektická struktura, jež se skládá z Co-bohaté γ fáze smíchané s komplexními karbidy, jako je $Cr_{23}C_6$ nebo Co_3W_3C .

6.2.2 Změna rychlosti posuvu

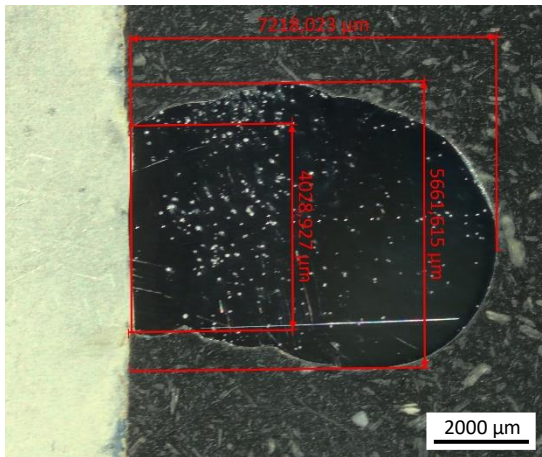
Výsledky týkající se změny rychlosti posuvu nekorespondují s očekáváním. Zatímco předpokladem bylo, že nižší rychlost posuvu by vytvořila vyšší a širší stěnu a prohloubila průvar, měření neprokázala jasnou korelaci, která by toto potvrdila.

Analýza šesti vzorků stěn, svařovaných při různých rychlostech posuvu, poskytuje pohled na souvislost mezi rychlostí posuvu a pórovitostí, charakteristikami průvaru a šířkou stěny.

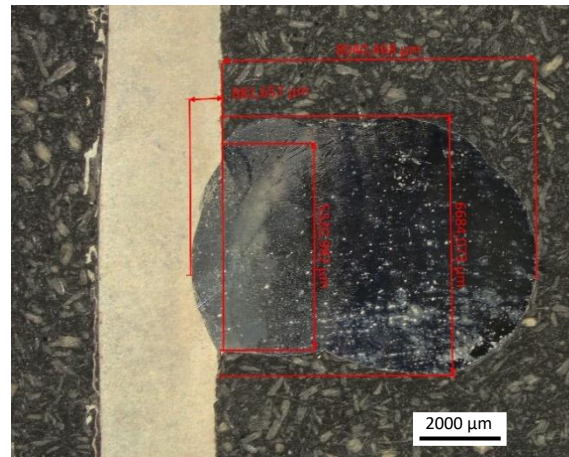
Malé rychlosti posuvu (0,33 a 0,44 mm/s):

Vzorek 0 (0,44 mm/s): Není zde pozorován téměř žádný průvar a vzorek vykazuje nejnižší porozitu, vyznačující se jejich minimální přítomností a nahodilostí v distribuci.

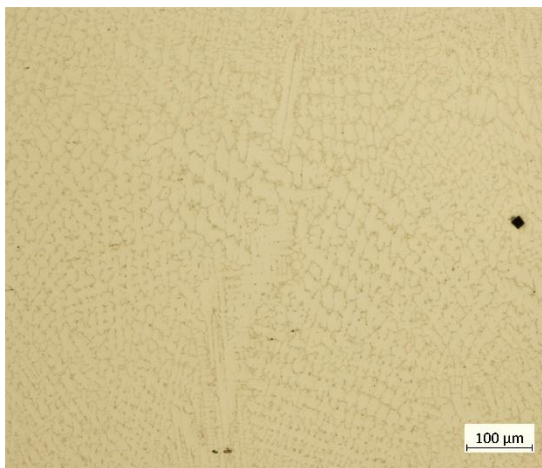
Vzorek 5 (0,33 mm/s): Vyznačuje se hlubokým a širokým průvarem, což je v rozporu s hypotézou, a nejvyšší pórovitostí. Rozmístění pórů v celém vzorku se zdá být náhodné.



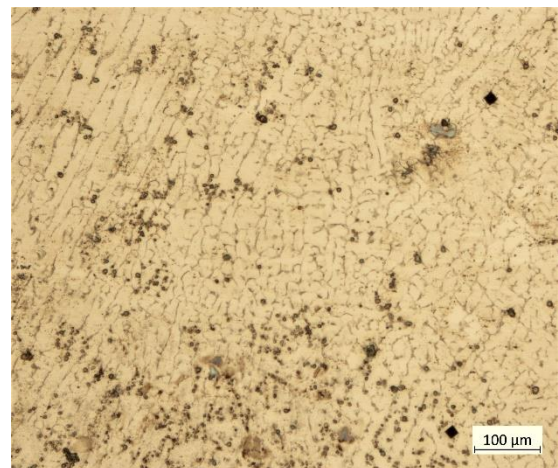
Obrázek 24 Geometrie Vzorku 0



Obrázek 25 Geometrie Vzorku 1



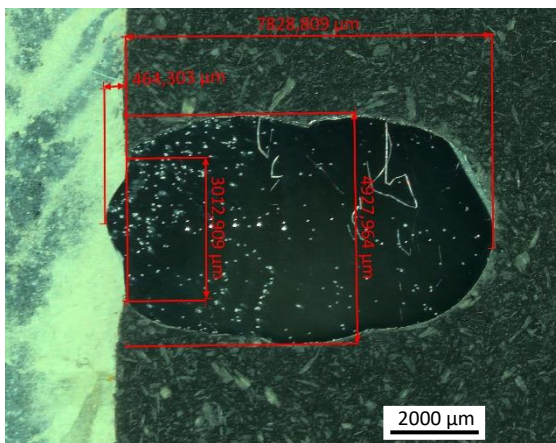
Obrázek 26 Míra a uskupení porozity Vzorku 0



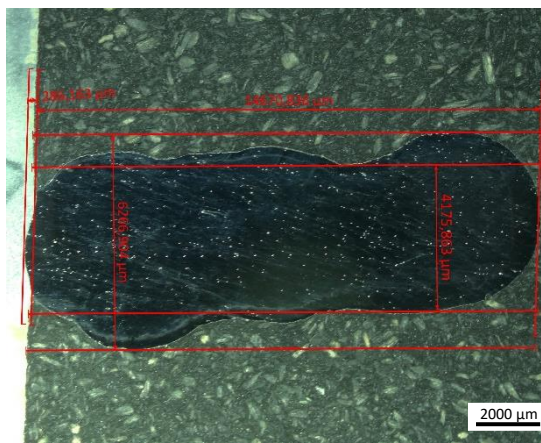
Obrázek 27 Míra a uskupení porozity Vzorku 1

Střední rychlost posuvu (0,66 mm/s):

Vzorky 1 a 2: Zobrazené úzké a hluboké linie ztavení se zvýšenou pórovitostí, ale stále nižší než u vzorků s vyšší rychlostí posuvu. Zdá se, že distribuce pórů je řízená, bez zjevného periodického vzoru.



Obrázek 28 Geometrie Vzorku 1



Obrázek 29 Geometrie Vzorku 2



Obrázek 30 Míra a uskupení porozity Vzorku 1



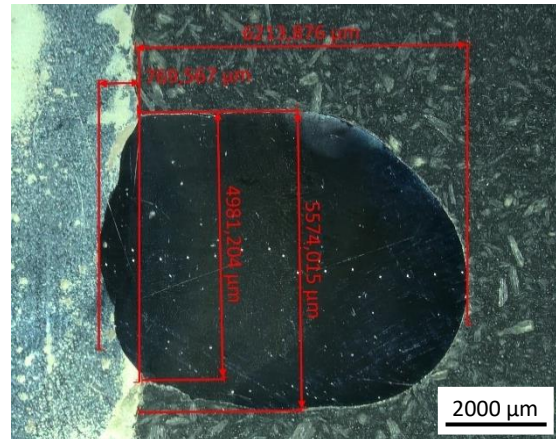
Obrázek 31 Míra a uskupení porozity Vzorku 2

Vysoká rychlost posuvu (0,99 mm/s):

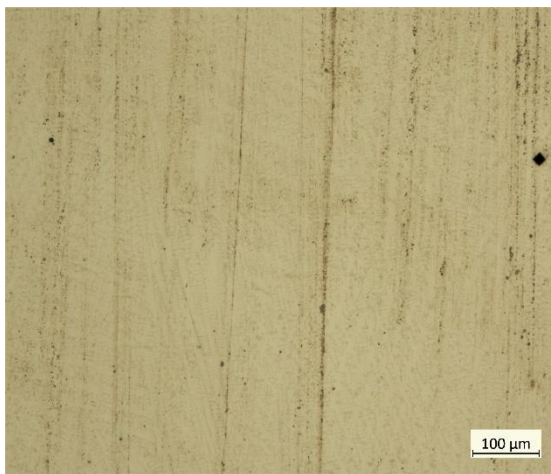
Vzorky 3 a 4: Výrazně se lišily v hloubce svaru a šířkách stěny. Pozoruhodně byla pozorována vyšší porozita, která se vyznačuje lineárním zarovnáním pórů v těchto vzorcích, což je charakteristický rys, který se u jiných vzorků nenachází.



Obrázek 32 Geometrie Vzorku 3



Obrázek 33 Geometrie Vzorku 4



Obrázek 34 Míra a uskupení porozity Vzorku 3



Obrázek 35 Míra a uskupení porozity Vzorku 4

Šířka stěny a pórovitost:

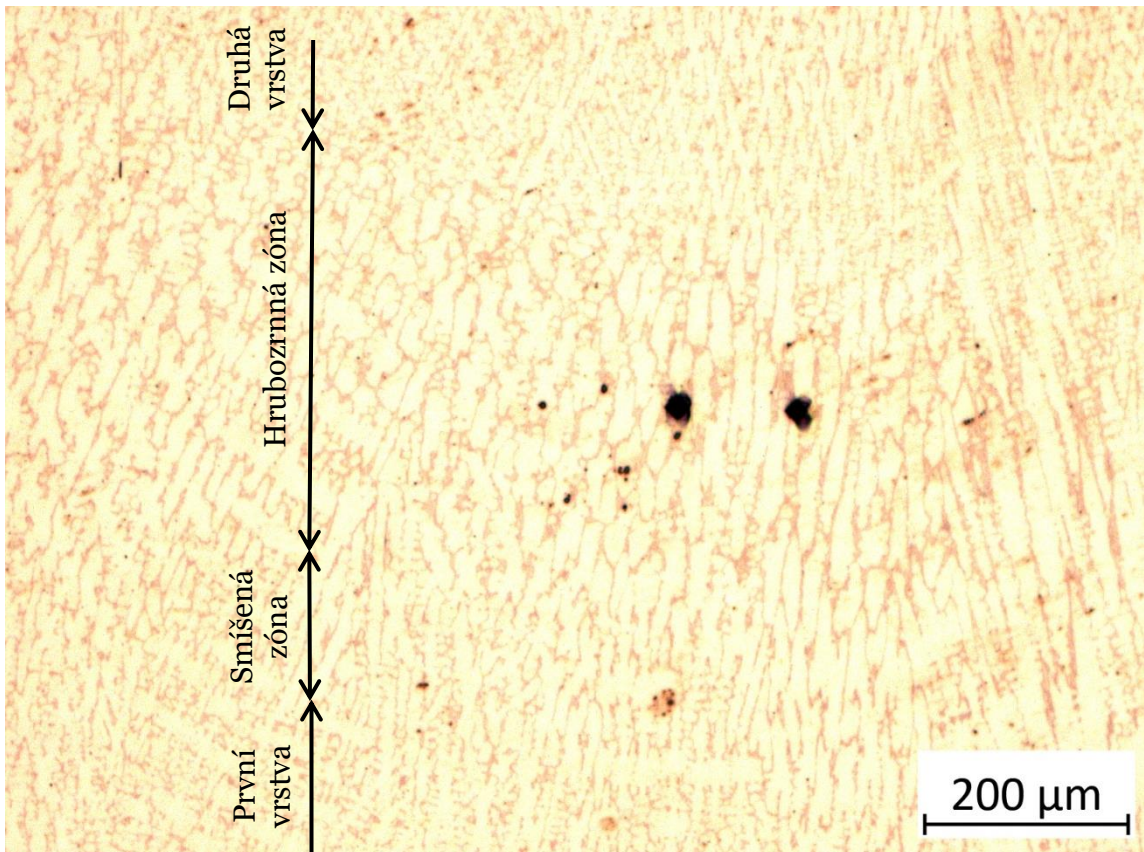
Pozorovaná náhodnost šířky stěny napříč vzorky naznačuje, že rychlost posuvu není jediným určujícím faktorem. Kromě toho, s velmi nízkou rychlostí posuvu u Vzorku 5 a také s velmi vysokou rychlostí posuvu u Vzorků 3 a 4, došlo k významnému nárůstu porozity. Toto dále naznačuje nelineární vztah, který zpochybňuje předpovědi původní hypotézy. Navíc jedinečné vyrovnaní poréznosti u Vzorků 3 a 4 zdůrazňuje složitou povahu procesu navařování. Další faktory, jako je například nekonzistentní tok prášku Stellite 6, mohou hrát roli.

6.2.3 Interakce mezi vrstvami a kolísání tvrdosti

Články [49] i [52] pozorují podobný fenomén kolísání tvrdosti návaru. Zatímco i [52] si této zvláštnosti nevšímá, článek [49] nastiňuje, že se nejspíš jedná o pokles na rozhraní mezi jednotlivými vrstvami a objasňuje, proč tomu tak je.

Opakovaný pokles se podle [49] objevuje na rozhraní mezi návarovými housenkami a může být způsoben tavením a opětovným ohřevem částí předchozí vrstvy při navařování té následující.

Pozorování hrubozrnných, smíšených a jemnozrnných zón na rozhraní mezi vrstvami na Obrázku 20 níže, tento předpoklad dále podporuje.



Obrázek 36 Změna velikosti zrn mezi vrstvami návaru u Vzorku 2. Místo výrazného poklesu tvrdosti v sedmém měřeném bodě, cca 2,25 mm od ZM (viz Obrázek 13)

6.2.4 Pík tvrdosti navařených stěn

Zajímavé je také pozorování pozvolného zvyšování tvrdosti až k jejímu píku ve výšce kolem 5-6 mm od základního materiálu, po kterém následuje její mírný pokles (viz 5.4.1). Tento jev je konzistentní napříč všemi vzorky a nejspíš na něj má vliv kombinace několika faktorů:

- (i) **Dendritický růst a mikrostruktura:** Článek [49] zdůrazňuje, že rychlost tuhnutí a teplotní gradient se od rozhraní po povrch návaru mění, což vede k různým způsobům růstu, jako je plošný růst, růst zrn a dendritický růst ve vrstvách. Tento růst pravděpodobně přispívá k pozorovaným změnám tvrdosti. Postupný pokles rychlosti odvodu tepla se zvyšující se vzdáleností od základního materiálu, stejně jako nárůst konstitučního podchlazení, dále vysvětluje změny mikrostruktury napříč vrstvami.
- (ii) **Odvod tepla:** Jak je uvedeno v článku [49], změny tepelné vodivosti a teplotních gradientů napříč vrstvami by mohly vytvořit optimální rovnováhu kolem 5 mm. Toto by mohlo vysvětlovat vrchol tvrdosti v této výšce a následný pokles, jak se mění způsob odvodu tepla z odvodu přes základní materiál na odvod pouze stěnou.
- (iii) **Složení materiálu a účinky promísení:** Tvrdost v blízkosti základního materiálu je nižší pravděpodobně kvůli promísení Fe ze základního materiálu. Tento efekt může ovlivnit počáteční postup tvrdosti při přidávání vrstev, což přispívá k pozorovanému píku při 5 mm.
- (iv) **Zbytková napětí a parametry svařování:** Podle [53] by kumulace zbytkových napětí během procesu vrstvení mohla také přispět k pozorovanému vrcholu tvrdosti právě v této oblasti. Vzhledem k tomu, že navařované stěny nebyly odstraněny ze základního materiálu, mohly by být zvláště relevantní specifické trendy shrnuté v [53], jako jsou tahová napětí na rozhraní návaru a základního materiálu a tlaková napětí v jádru součásti.

7 Závěr

Růst zrn v blízkosti rozhraní mezi základním materiálem a povlakem je významně ovlivněn charakteristikou odvodu tepla během procesu svařování. Rychlejší odvod tepla má tendenci vést k jemnějším zrnům. Některé vzorky, jako například 2 a 4, vykazovaly hrubší zrnitost v důsledku značného promísení mezi základním a přídatným materiálem. Literární zdroje navíc potvrzují, že faktory odvodu tepla a poměr rychlosti tuhnutí a teplotního gradientu (G/R), hrají kritickou roli při určování struktury zrna během tuhnutí, což vede k různému druhu růstu napříč navařenou stěnou.

Kromě toho studie změny rychlosti posuvu odhalila zajímavý nelineární vztah mezi rychlostí posuvu a pórovitostí, šířkou svarové housenky a charakteristikami průvaru, což zpochybnilo počáteční hypotézy. Tato nelineární závislost naznačuje existenci rychlosti posuvu, která je ideální pro dosažení minimální porozity, pravděpodobně mezi 0,44-0,66 mm/s. Nepředvídatelnou šířku stěny má pak nejspíš za následek nekonzistentní přísun stelitového prášku.

A konečně, nerovnoměrná tvrdost napříč svařovanými vrstvami může být přisouzena mnoha faktorům. Nejvýraznější roli však nejspíš hraje kombinace způsobu odvodu tepla a promísení základního a přídatného materiálu. Prvotní pozorované stoupání tvrdosti je pravděpodobně následkem právě promísení železa a dalších prvků ze základního materiálu do stelitového návaru. Maximální tvrdost ve vzdálenosti 5-6 mm od základního materiálu a následný mírný pokles lze pak přisoudit právě změně odvodu tepla přes masu základního materiálu na odvod stěnou.

Pro další práce by bylo vhodné zajistit spolehlivější sestavu všech komponent, aby nedocházelo k vlivu neočekávaných proměnných na navařovací proces. Zvláště se pak zaměřit na konzistentní přísun přídatného materiálu.

8 Literatura

- [1] WEMAN, Klas, ed. *MIG Welding Guide*. First. North America: Woodhead Publishing Limited, 2006. ISBN 978-1-85573-947-5.
- [2] JEYAPRAKASH, N., Adisu HAILE a M. ARUNPRASATH. The parameters and equipments used in TIG welding: A review. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*. 2015, **4**(2), 11-20.
- [3] DHAS, J. a S. KUMANAN. Optimization of parameters of submerged arc weld using non conventional techniques. *Applied Soft Computing [online]*. 2011, 11(8), 5198-5204 [cit. 2023-08-07]. ISSN 15684946. Dostupné z: doi:10.1016/j.asoc.2011.05.041
- [4] SAHOO, A. a S. TRIPATHY. Development in plasma arc welding process: A review. *Materials Today: Proceedings [online]*. 2021, **41**, 363-368 [cit. 2023-08-07]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.09.562
- [5] FOTOVVATI, Behzad, Steven WAYNE, Gladius LEWIS a Ebrahim ASADI. A Review on Melt-Pool Characteristics in Laser Welding of Metals. *Advances in Materials Science and Engineering [online]*. 2018, 2018, 1-18 [cit. 2023-08-07]. ISSN 1687-8434. Dostupné z: doi:10.1155/2018/4920718
- [6] JIANG, Meng, Wang TAO a Yanbin CHEN. Laser Welding under Vacuum: A Review. *Applied Sciences [online]*. 2017, 7(9) [cit. 2023-08-07]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app7090909
- [7] WęGŁOWSKI, M.St., S. BIACHA a A. PHILLIPS. Electron beam welding – Techniques and trends – Review. *Vacuum [online]*. 2016, **130**, 72-92 [cit. 2023-08-07]. ISSN 0042207X. Dostupné z: doi:10.1016/j.vacuum.2016.05.004
- [8] PATTERSON, T., J. HOCHANADEL, S. SUTTON, B. PANTON a J. LIPPOLD. A review of high energy density beam processes for welding and additive manufacturing applications. *Welding in the World [online]*. 2021, **65**(7), 1235-1306 [cit. 2023-08-07]. ISSN 0043-2288. Dostupné z: doi:10.1007/s40194-021-01116-0

- [9] ŘÍPA, Milan, Jan MLINÁŘ, Vladimír WEINZETTL a František ŽÁČEK. *Řízená termojaderná fúze pro každého* [online]. Třetí přepracované vydání. Praha: TA PRINT, s.r.o., 2011 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/fuze_sceen.pdf
- [10] KULHÁNEK, Petr. *Úvod do teorie plazmatu*. Vyd. 1. Praha: AGA, 2011. ISBN 978-80904582-2-2.
- [11] FRANK-KAMENETSKII, D. A. *Plasma: The Fourth State of Matter* [online]. 1st edition. Boston, MA: Springer US, 1972 [cit. 2020-06-26]. ISBN 978-1-4684-1898-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4684-1896-5
- [12] HUTCHINGS, Ian a Philip SHIPWAY. Surface engineering. In: *Tribology* [online]. Elsevier, 2017, s. 237-281 [cit. 2023-08-07]. ISBN 9780081009109. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100910-9.00007-6
- [13] VERGARA, Victor, Jair CARLOS a Ana CLIMACO DOLIVEIR. Hardfacing by Plasma Transferred Arc Process. In: SUDNIK, Wladislav, ed., Wladislav SUDNIK. *Arc Welding* [online]. InTech, 2011 [cit. 2023-08-07]. ISBN 978-953-307-642-3. Dostupné z: doi:10.5772/28802
- [14] GATTO, A., E. BASSOLI a M. FORNARI. Plasma Transferred Arc deposition of powdered high performances alloys: process parameters optimisation as a function of alloy and geometrical configuration. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2004, **187**(2-3), 265-271 [cit. 2023-08-07]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2004.02.013
- [15] Difference Between Transferred Arc and Non-Transferred Arc Plasma Torch. In: Minaprem.com [online]. 2022 [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <http://www.difference.minaprem.com/ntm/difference-between-transferred-arc-and-non-transferred-arc-plasma-torch/>
- [16] MORAVEC, Jaromír. *Teorie svařování a pájení II: speciální metody svařování*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-439-9.
- [17] WU, C.S., L. WANG, W.J. REN a X.Y. ZHANG. Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling. *Journal of Manufacturing Processes* [online].

- 2014, 16(1), 74-85 [cit. 2023-08-08]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2013.06.004
- [18] Druhy a použití wolframových elektrod. In: SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.CZ [online]. [cit. 2023-08-08]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/radce-svarece/druhy-a-pouziti-wolframovych-elektrod/>
- [19] TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ A ZAŘÍZENÍ. Brno: Česká svářečská společnost ANB, 2016. Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT). VUT v Brně, FSI, odbor svařování - ATB 2.
- [20] SCHWARZ, Drahomír a Ivo HLAVATÝ. Svařování plazmovým obloukem. In: Svět svaru. Hadyna International s.r.o., 2014, s. 7-11. ISSN 1214-4983.
- [21] Metal Deposition: Plasma-Based Processes. In: SHOHET, J. Leon, ed., J. SHOHET. Encyclopedia of Plasma Technology [online]. CRC Press, 2016, s. 722-740 [cit. 2023-08-07]. ISBN 9781482214314. Dostupné z: doi:10.1081/E-EPLT-120053919
- [22] GEBHARDT, Andreas. Understanding Additive Manufacturing [online]. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011 [cit. 2023-08-07]. ISBN 978-3-446-42552-1. Dostupné z: doi:10.3139/9783446431621
- [23] SAWANT, Mayur a N. JAIN. Investigations on Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V by Microplasma Transferred Arc Powder Deposition Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. 2018, 140(8) [cit. 2023-08-07]. ISSN 1087-1357. Dostupné z: doi:10.1115/1.4040324
- [24] GU, D D, W MEINERS, K WISSENBACH a R POPRAWE. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews* [online]. 2013, 57(3), 133-164 [cit. 2023-08-09]. ISSN 0950-6608. Dostupné z: doi:10.1179/1743280411Y.0000000014
- [25] BRANDT, Milan, ed. Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications. Woodhead Publishing, 2017. ISBN 978-0-08-100434-0.

- [26] CHROMIK, Richard, Dina GOLDBAUM, J. SHOCKLEY, Stephen YUE, Eric IRISSOU, Jean-Gabriel LEGOUX a Nicholas RANDALL. *Modified ball bond shear test for determination of adhesion strength of cold spray splats*. Surface and Coatings Technology [online]. 2010, **205**(5), 1409-1414 [cit. 2023-08-07]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2010.07.037
- [27] LI, W.-Y., C. ZHANG, X. GUO, J. XU, C.-J. LI, H. LIAO, C. CODDET a K. A. KHOR. *Ti and Ti-6Al-4V Coatings by Cold Spraying and Microstructure Modification by Heat Treatment*. Advanced Engineering Materials [online]. 2007, **9**(5), 418-423 [cit. 2023-08-07]. ISSN 14381656. Dostupné z: doi:10.1002/adem.200700022
- [28] DYKHUIZEN, R.C. a M.F. SMITH. *Gas Dynamic Principles of Cold Spray*. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 7(2), 205-212 [cit. 2023-08-07]. ISSN 00000000. Dostupné z: doi:10.1361/105996398770350945
- [29] SINGH, Sudhanshu a Pradeep KHANNA. *Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials*. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, 44, 118-128 [cit. 2023-08-07]. ISSN **22147853**. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.08.030
- [30] DING, Donghong, Zengxi PAN, Dominic CUIURI a Huijun LI. *A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)*. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2015, 31, 101-110 [cit. 2023-08-07]. ISSN 07365845. Dostupné z: doi:10.1016/j.rcim.2014.08.008
- [31] DHINAKARAN, V., J. AJITH, A. FATHIMA YASIN FAHMIDHA, T. JAGADEESHA, T. SATHISH a B. STALIN. *Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process of nickel based superalloys – A review*. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, **21**, 920-925 [cit. 2023-08-07]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2019.08.159
- [32] DING, Donghong, Zengxi PAN, Dominic CUIURI a Huijun LI. *Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests*. *The International Journal of Advanced Manufacturing*

- Technology [online]. 2015, 81(1-4), 465-481 [cit. 2023-08-07]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-015-7077-3
- [33] DADIĆ, Zvonimir, Dražen ŽIVKOVIĆ, Nikša ČATIPOVIĆ a Josip BILIĆ. *High pressure die casting mould repair technologies*. 2017. ISBN 1847-7917.
- [34] CHEN, Changrong, Yan WANG, Hengan OU, Yan HE a Xianzhi TANG. A review on remanufacture of dies *and moulds*. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2014, 64, 13-23 [cit. 2023-08-10]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2013.09.014
- [35] MAYUR S. SAWANT, N. <https://doi.org/10.1115/1.4040324>. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article/140/8/081014/377641/Investigations-on-Additive-Manufacturing-of-Ti-6Al>
- [36] GARBADE, R. a N. DHOKEY. Overview on Hardfacing Processes, Materials and Applications. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering* [online]. 2021, 1017(1) [cit. 2023-08-07]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1017/1/012033
- [37] ZHANG, Duyao, Shoujin SUN, Dong QIU, Mark GIBSON, Matthew DARGUSCH, Milan BRANDT, Ma QIAN a Mark EASTON. Metal Alloys for Fusion-Based Additive Manufacturing. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2018, 20(5) [cit. 2023-08-07]. ISSN 1438-1656. Dostupné z: doi:10.1002/adem.201700952
- [38] HERZOG, Dirk, Vanessa SEYDA, Eric WYCISK a Claus EMMELMANN. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* [online]. 2016, 117, 371-392 [cit. 2023-08-07]. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2016.07.019
- [39] SUN, Zhongji, Xipeng TAN, Shu TOR a Wai YEONG. Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rates. *Materials & Design* [online]. 2016, 104, 197-204 [cit. 2023-08-07]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.05.035
- [40] BAJAJ, P., A. HARIHARAN, A. KINI, P. KÜRNSTEINER, D. RAABE a E.A. JÄGLE. Steels in additive manufacturing: A **review** of their microstructure

- and properties. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2020, 772 [cit. 2023-08-07]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2019.138633
- [41] VILARO, T., C. COLIN, J.D. BARTOUT, L. NAZÉ a M. SENNOUR. Microstructural and mechanical approaches of the selective laser melting process applied to a nickel-base superalloy. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2012, **534**, 446-451 [cit. 2023-08-07]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2011.11.092
- [42] LIN, Zidong, Wei YA, Vignesh SUBRAMANIAN, Constantinos GOULAS, Benedetto DI CASTRI, Marcel HERMANS a Belavendram PATHIRAJ. Deposition of Stellite 6 alloy on steel *substrates using wire* and arc additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, **111**(1-2), 411-426 [cit. 2023-08-07]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-06116-w
- [43] Stellite 6 – Composition, Properties and Uses. In: *The Piping Mart* [online]. thepipingmart.com, 2022 [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://blog.thepipingmart.com/grades/stellite-6-composition-properties-and-uses/>
- [44] MATTEVI, Cecilia, Hokwon KIM a Manish CHHOWALLA. A review of chemical vapour deposition of graphene on copper. *J. Mater. Chem* [online]. **2011**, 21(10), 3324-3334 [cit. 2023-08-07]. ISSN 0959-9428. Dostupné z: doi:10.1039/C0JM02126A
- [45] FRAZIER, William E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2014, **23**(6), 1917-1928 [cit. 2023-08-07]. ISSN 1059-9495. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-014-0958-z
- [46] ANTONY, Leo V. M. a Ramana G. REDDY. Processes for production of high-purity metal powders. *JOM* [online]. 2003, **55**(3), 14-18 [cit. 2023-08-09]. ISSN 1047-4838. Dostupné z: doi:10.1007/s11837-003-0153-4
- [47] SKOTNICOVÁ, Kateřina a Miroslav KURSA. *Prášková metalurgie: studijní opory : učební text, scénáře, testy*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3378-1.

- [48] URHAL, Pinar, Andrew WEIGHTMAN, Carl DIVER a Paulo BARTOLO. Robot assisted additive manufacturing: A review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2019, 59, 335-345 [cit. 2023-08-07]. ISSN 07365845. Dostupné z: doi:10.1016/j.rcim.2019.05.005
- [49] PALETA, Petr. Navařování kobaltové slitiny plazmou. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [50] Labotom-3: Katalog. In: Priniotakis [online]. priniotakis.gr, 2011 [cit. 2020-07-08]. Dostupné z: http://www.priniotakis.gr/catalog2/manuals/Labotom-3_brochure_English.pdf
- [51] VRBÍČEK, Martin. Vliv navařovacích parametrů na mikroplazmový návar slitiny kobaltu. Praha, 2022. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [52] COBALT BASED ALLOYS. In: LSN DIFFUSION [online]. LSN Diffusion Limited, 2022 [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <http://lsndiffusion.com/products/cobalt-based-alloys/>
- [53] XU, Guojian, Munaharu KUTSUNA, Zhongjie LIU a Liquan SUN. Characteristic behaviours of clad layer by a multi-layer laser cladding with powder *mixture* of Stellite-6 and tungsten **carbide**. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2006, 201(6), 3385-3392 [cit. 2023-08-07]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2006.07.210
- [54] XU, Guojian, Muneharu KUTSUNA, Zhongjie LIU a Katsusige YAMADA. Comparison between diode laser and TIG cladding of Co-based alloys on the *SUS403* stainless steel. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2006, 201(3-4), 1138-1144 [cit. 2023-08-07]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2006.01.040
- [55] HIDOUCI, A., J.M. PELLETIER, F. DUCOIN, D. DEZERT a R. EL GUERJOURA. Microstructural and mechanical characteristics of *laser* coatings. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2000, 123(1), 17-23 [cit. 2023-08-07]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/S0257-8972(99)00394-1

- [56] ARABI JESHVAGHANI, R., M. SHAMANIAN a M. JABERZADEH. Enhancement of wear resistance of ductile iron surface alloyed by stellite 6. *Materials & Design* [online]. 2011, 32(4), 2028-2033 [cit. 2023-08-07]. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2010.11.060
- [57] LI, C., Z.Y. LIU, X.Y. FANG a Y.B. GUO. Residual Stress in Metal Additive Manufacturing. *Procedia CIRP* [online]. 2018, 71, 348-353 [cit. 2023-08-07]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2018.05.039

9 Seznam tabulek

Tabulka 1 Chemické složení slitiny Stellite 6 [39].....	25
Tabulka 2 Mechanické vlastnosti slitiny Stellite 6 [39].....	26
Tabulka 3 Katalogové parametry balancéru RIL – 1C (Atlas Copco).....	33
Tabulka 4 Naměřené hodnoty složení základního materiálu.....	36
Tabulka 5 Chemické složení prášku C-06 (LSN Duffusion), číslo tavby 43866 (viz Příloha 1).....	37
Tabulka 6 Množství prášku pro průtok 7,5 l/min	38
Tabulka 7 Množství prášku pro průtok 10 l/min.....	38
Tabulka 8 Konstantní parametry pro všechny návary	38
Tabulka 9 Navařovací parametry pro Vzorek 0.....	39
Tabulka 10 Navařovací parametry pro Vzorky 1-5	39

10 Seznam obrázků

Obrázek 1 Princip plazmatronu pro proces PTA a PAW [13]	16
Obrázek 2 Binární diagram Co-C [40]	26
Obrázek 3 Přehled procesů výroby kovového prášku [42]	28
Obrázek 4 Tok informací u šestiosého systému [44]	30
Obrázek 5 Tok informací u konvenčních tříosých AM zařízení [44]	31
Obrázek 6 Připevnění držáku hořáku KSK na robotu YuMi	32
Obrázek 7 Schéma hořáku PHP 140 V (KSK) [45]	33
Obrázek 8 Pracoviště pro mikroplazmové navařování [47]	35
Obrázek 9 Granulometrie prášku C-06 (LSN Diffusion), číslo tavby 43866 (viz Příloha 2)	37
Obrázek 10 Vzorek 2	41
Obrázek 11 Graf průběhu tvrdosti pro Vzorek 0	41
Obrázek 12 Graf průběhu tvrdosti pro Vzorek 1	41
Obrázek 13 Graf průběhu tvrdosti pro Vzorek 2	42
Obrázek 14 Graf průběhu tvrdosti pro Vzorek 3	42
Obrázek 15 Graf průběhu tvrdosti pro Vzorek 4	42
Obrázek 16 Graf průběhu tvrdosti pro Vzorek 5	42
Obrázek 17 Vzorek 0 – rozhraní ZM a návaru	43
Obrázek 18 Vzorek 1 – rozhraní ZM a návaru	43
Obrázek 19 Vzorek 2 – rozhraní ZM a návaru	44
Obrázek 20 Vzorek 3 – rozhraní ZM a návaru	44
Obrázek 21 Vzorek 4 – rozhraní ZM a návaru	44
Obrázek 22 Vzorek 4 – pata návaru	44
Obrázek 23 Vzorek 5 – rozhraní ZM a návaru	44
Obrázek 24 Geometrie Vzorku 0	46
Obrázek 25 Geometrie Vzorku 1	46
Obrázek 26 Míra a uskupení porozity Vzorku 0	46
Obrázek 27 Míra a uskupení porozity Vzorku 1	46
Obrázek 28 Geometrie Vzorku 1	47
Obrázek 29 Geometrie Vzorku 2	47
Obrázek 30 Míra a uskupení porozity Vzorku 1	47
Obrázek 31 Míra a uskupení porozity Vzorku 2	47
Obrázek 32 Geometrie Vzorku 3	48

Obrázek 33 Geometrie Vzorku 4.....	48
Obrázek 34 Míra a uskupení porozity Vzorku 3.....	48
Obrázek 35 Míra a uskupení porozity Vzorku 4.....	48
Obrázek 36 Změna velikosti zrn mezi vrstvami návaru u Vzorku 2. Místo výrazného poklesu tvrdosti v sedmém měřeném bodě, cca 2,25 mm od ZM (viz Obrázek 11) .	49

11 Přílohy

Příloha 1 Chemické složení prášku Stellite 6

9/9/2016 1:18:34 AM
 PANalytical
 Quantification of sample Rohan BROZEK_LSN

R.M.S.: 0.003
 Result status:
 Sum before normalization: 58.9 %
 Normalised to: 100.0 %
 Sample type: Pressed powder
 Initial sample weight (g): 4.000
 Weight after pressing (g): 4.500
 Correction applied for medium: No
 Correction applied for film: Yes
 Results database: omnian_2kw30mm
 Results database in: c:\panalytical\superq\userdata

Compound	Conc.	Absolute	Compound	Conc.	Absolute	Compound	Conc.	Absolute
Name	(%)	Error (%)	Name	(%)	Error (%)	Name	(%)	Error (%)
1			Ge			Gd		
2	H		As			Tb		
3	He		Se			Dy		
4	Li		Br			Ho		
5	Be		Kr			Er		
6	B		Rb			Tm		
7	C		Sr			Yb		
8	N		Y			Lu		
9	O		Zr			Hf		
10	F		Nb	0.033	0.005	Ta		
11	Ne		Mo	0.784	0.03	W	6.109	0.1
12	Na		Tc			Re		
13	Mg		Ru			Os		
14	Al	0.016	0.004	Rh		Ir		
15	Si	0.713	0.03	Pd		Pt		
16	P		Ag			Au		
17	S		Cd			Hg		
18	Cl	0.086	0.009	In		Tl		
19	Ar		Sn			Pb		
20	K		Sb			Bi		
21	Ca		Te			Po		
22	Sc		I			At		
23	Ti		Xe			Rn		
24	V		Cs			Fr		
25	Cr	29.210	0.1	Ba		Ra		
26	Mn	0.562	0.02	La		Ac		
27	Fe	1.764	0.04	Ce		Th		
28	Co	58.403	0.2	Pr		Pa		
29	Ni	2.320	0.05	Nd		U		
30	Cu		Pm			Np		
31	Zn		Sm			Pu		
32	Ga		Eu			Am		

Binder
 Chemical formula Weight
 (g)
 H3B03 0.5

Příloha 2 Granulometrie prášku Stellite 6

Analysis

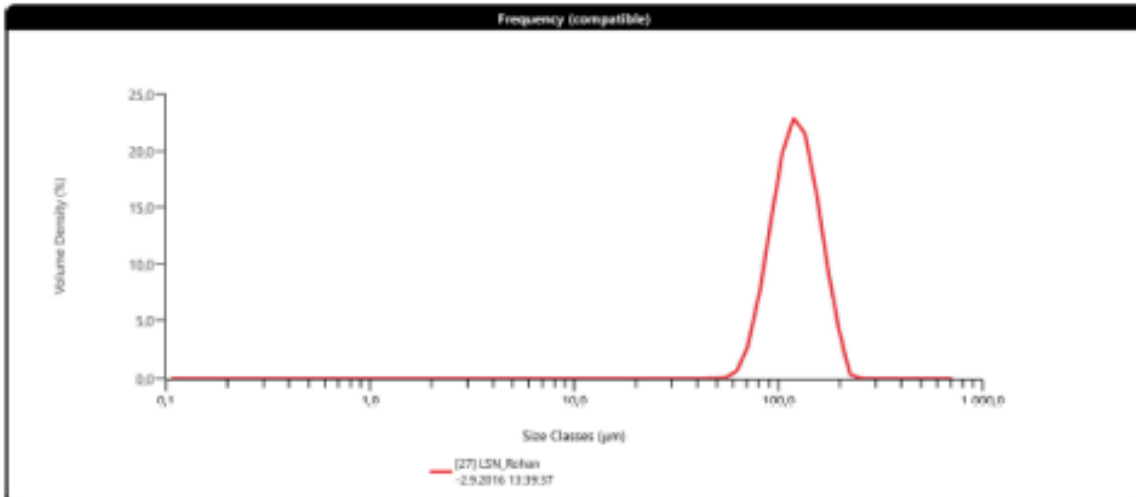
Created by: Malvern Instruments Ltd
Last edited: 13.4.2016 17:12:51



Measurement Details	
Sample Name	LSN_Rohan
Operator Name	Malvern
SOP File Name	HydroMV.cfg
Measurement Date Time	2.9.2016 13:39:37
Analysis Date Time	2.9.2016 14:20:42
Result Source	Edited

Analysis	
Particle Name	Stellite6
Dispersant Name	Water
Particle Absorption Index	1,000
Weighted Residual	0,53 %
Analysis Model	General Purpose
Particle Refractive Index	1,000
Dispersant Refractive Index	1,330
Laser Obscuration	6,39 %
Scattering Model	Fraunhofer
Analysis Sensitivity	Nominal

Result	
Concentration	0,1036 %
Uniformity	0,200
Specific Surface Area	51,15 m ² /kg
D [3,2]	117 µm
D [4,3]	124 µm
Span	0,658
Result Units	Volume
Dv (10)	87,4 µm
Dv (50)	121 µm
Dv (90)	167 µm



Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In
0,0100	0,00	0,0679	0,00	0,440	0,00	3,12	0,00	21,2	0,00	144	13,76	976	0,00
0,0124	0,00	0,0721	0,00	0,523	0,00	3,55	0,00	24,1	0,00	163	8,04	1130	0,00
0,0158	0,00	0,0876	0,00	0,594	0,00	4,03	0,00	27,4	0,00	186	3,34	1260	0,00
0,0197	0,00	0,0996	0,00	0,675	0,00	4,58	0,00	31,1	0,00	211	0,02	1430	0,00
0,0247	0,00	0,113	0,00	0,767	0,00	5,21	0,00	35,3	0,00	243	0,00	1630	0,00
0,0309	0,00	0,128	0,00	0,872	0,00	5,92	0,00	40,1	0,00	272	0,00	1850	0,00
0,0385	0,00	0,146	0,00	0,991	0,00	6,72	0,00	45,6	0,00	310	0,00	2100	0,00
0,0476	0,00	0,166	0,00	1,13	0,00	7,64	0,00	51,8	0,03	352	0,00	2390	0,00
0,0584	0,00	0,188	0,00	1,28	0,00	8,68	0,00	58,9	0,48	400	0,00	2730	0,00
0,0711	0,00	0,214	0,00	1,45	0,00	9,86	0,00	66,9	2,28	454	0,00	3080	0,00
0,0861	0,00	0,243	0,00	1,65	0,00	11,2	0,00	76,0	6,13	516	0,00	3500	0,00
0,1036	0,00	0,276	0,00	1,88	0,00	12,7	0,00	86,4	11,56	586	0,00		
0,124	0,00	0,314	0,00	2,13	0,00	14,5	0,00	98,1	16,74	666	0,00		
0,152	0,00	0,357	0,00	2,42	0,00	16,4	0,00	111	19,40	756	0,00		
0,188	0,00	0,405	0,00	2,75	0,00	18,7	0,00	127	18,24	859	0,00		



Příloha 3 Tabulky naměřených hodnot mikrotvrdości

Vzorek 0

Vzdálenost od rozhraní [mm]	Naměřená hodnota tvrdosti [HV]
-0,75	161,8
-0,25	191,1
0,25	497,8
0,75	443,4
1,25	544,8
1,75	541,8
2,25	441,3
2,75	475,4
3,25	530,3
3,75	544,8
4,25	468,3
4,75	490,2
5,25	463,6
5,75	547,7
6,25	477,8

Vzorek 1

Vzdálenost od rozhraní [mm]	Naměřená hodnota tvrdosti [HV]
-0,75	158,5
-0,25	241,7
0,25	452,2
0,75	553,7
1,25	513,7
1,75	519,1
2,25	461,3
2,75	428,6
3,25	575,5
3,75	623,2
4,25	492,7
4,75	516,4
5,25	527,5
5,75	530,3
6,25	591,9
6,75	513,7
7,25	516,4

Vzorek 2

Vzdálenost od rozhraní [mm]	Naměřená hodnota tvrdosti [HV]
-0,75	154
-0,25	145,9
0,25	366,3
0,75	465,9
1,25	508,3
1,75	505,7
2,25	441,3
2,75	519,1
3,25	556,8
3,75	511
4,25	566
4,75	673
5,25	645,5
5,75	637,9
6,25	553,7
6,75	585,3
7,25	575,7
7,75	575,5
8,25	475,4
8,75	492,7
9,25	445,6
9,75	508,3
10,25	527,5
10,75	541,8
11,25	559,8
11,75	487,7
12,25	456,7
12,75	492,7
13,25	556,8
13,75	566
14,25	505,7
14,75	527,5
15,25	495,3

Vzorek 3

Vzdálenost od rozhraní [mm]	Naměřená hodnota tvrdosti [HV]
-0,75	155,3
-0,25	158,5
0,25	410,7
0,75	463,6
1,25	487,7
1,75	556,8
2,25	468,3
2,75	513,7

Vzorek 4

Vzdálenost od rozhraní [mm]	Naměřená hodnota tvrdosti [HV]
-0,75	115,9
-0,25	118,9
0,25	412,6
0,75	450
1,25	437
1,75	450
2,25	408,7
2,75	456,7
3,25	473
3,75	566
4,25	524,7
4,75	500,4
5,25	536
5,75	566
6,25	513,7
6,75	544,8

Vzorek 5

Vzdálenost od rozhraní [mm]	Naměřená hodnota tvrdosti [HV]
-0,75	110,9
-0,25	117,1
0,25	379,7
0,75	414,6
1,25	443,4
1,75	473
2,25	473
2,75	508,3
3,25	475,4
3,75	473
4,25	406,8
4,75	490,2
5,25	524,7
5,75	598,7
6,25	508,3
6,75	482,7