

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ**

**V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

Ústav strojírenské technologie



Aditivní výroba polotovarů z niklových slitin pulzní PTA metodou

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Autor:** Bc. Jan Nestával

**Vedoucí práce:** Ing. Pavel Rohan Ph.D., IWE

**Studijní obor:** Výrobní a materiálové inženýrství

**Praha 2020**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nestával** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **457284**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Additivní výroba polotovarů z niklových slitin pulzní PTA metodou**

Název diplomové práce anglicky:

**Additive manufacturing of Ni alloys by pulsed PTA**

Pokyny pro vypracování:

Provést literární rešerši na téma plazmové navařování se zaměřením na aditivní technologie, niklové slitiny  
Vyhledat parametry pro navaření základních několika vrstev  
Charakterizovat navařený materiál z hlediska struktury, tvrdosti

Seznam doporučené literatury:

FRAZIER, William E. Metal Additive Manufacturing: A Review. Journal of Materials Engineering and Performance. 2014,  
PRASAD, K. Siva, Ch. Srinivasa RAO a D. Nageswara RAO. Application of design of experiments to plasma Arc Welding Process: a review. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. sciELO, 2012,  
FAUCHAIS, Pierre a Armelle VARDELLE. Thermal Plasmas Surface Treatment. Materials Surface Processing by Directed Energy Techniques. Elsevier, 2006,

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Pavel Rohan, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

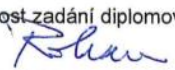
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


**Ing. Tomáš Gurčík, ústav strojírenské technologie FS**

Datum zadání diplomové práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**

  
Ing. Pavel Rohan, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

**25.6.2020**

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## Anotační list

Jméno autora, titul	Jan Nestával, Bc.
Název DP	Aditivní výroba polotovarů z niklových slitin pulzní PTA metodou
Anglický název	Additive manufacturing of Ni alloys by pulsed PTA
Rok	2020
Obor studia	Výrobní a materiálové inženýrství
Ústav	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí	Ing. Pavel Rohan, Ph.D., EWE
Bibliografické údaje	Počet stran: 71 Počet obrázků: 22 Počet tabulek: 16 Počet příloh: 7
Klíčová slova	Aditivní technologie, PTA, nikl, Inconel 625
Keywords	Additive manufacturing, PTA, nickel, Inconel 625
Abstrakt	Tato diplomová práce se zabývá aditivní výrobou polotovarů PTA metodou pro materiál Inconel 625. V rešeršní části je proveden rozbor jednotlivých metod aditivních technologií, konkrétně pak rozbor problematiky navařování. Experimentální část je zaměřena na nalezení vhodných parametrů plazmového navařování pro slitinu Inconel 625 a následně na vytvoření 3D struktury z tohoto materiálu. Výsledná struktura je podrobena různým zkouškám za účelem zjištění jejích vlastností.
Abstract	The diploma thesis focuses on the additive manufacturing of products by using the pulse PTA method for the Inconel 625 alloy. The theoretical part deals with the analysis of all additive manufacturing technologies and further on the issue of welding. The experiment part is focused on finding suitable parameters of PTA process for Inconel 625 material. The second half deals with creating a 3D structure from Inconel 625 and providing various tests to determine properties of this structure.

## Čestné prohlášení

Čestně prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Aditivní výroba polotovarů z niklových slitin pulzní PTA metodou“ jsem vypracoval samostatně s využitím odborné literatury uvedené v seznamu literatury a na základě konzultací s vedoucím práce.

V Praze dne: .....

.....

Podpis autora

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D., IWE za jeho čas, odborné vedení, podnětné rady, připomínky a trpělivost při psaní mé diplomové práce.

## Obsah

Úvod a cíl práce.....	11
1 Aditivní výroba .....	12
1.1 Rozdělení AM .....	13
1.2 Laser Additive Manufacturing (LAM) .....	14
1.2.1 Selective Laser Sintering .....	15
1.2.2 Selective Laser Melting .....	16
1.2.3 Laser Metal Deposition .....	16
1.3 Electron Beam Melting.....	17
1.4 Shaped Metal Deposition.....	18
1.5 Ekonomické hledisko AM .....	18
1.6 Materiály pro AM .....	18
2 Technologie navařování.....	19
2.1 Navařování plamenem .....	20
2.2 Navařování elektrickým obloukem .....	20
2.3 Navařování ruční obalenou elektrodou .....	21
2.4 Navařování odtavující se elektrodou .....	21
2.5 Navařování neodtavující se elektrodou .....	21
2.6 Navařování pod tavidlem .....	22
2.7 Navařování laserem .....	22
2.8 Navařování plazmatem .....	23
2.8.1 Podstata .....	24
2.8.2 Plazmový hořák.....	25
2.8.3 Používané procesní plyny .....	26
2.8.4 Přídavný materiál .....	27
3 Slitiny niklu.....	27
3.1 Konstrukční slitiny .....	28
3.2 Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi .....	29
3.3 Slitiny žáruvzdorné a žárupevné .....	29
3.4 Slitiny typu Inconel™ .....	29
3.4.1 Slitina Inconel 625.....	30
3.5 Použití Inconel 625 .....	32

4	Experimentální část .....	33
4.1	Použitá zařízení a metody .....	33
4.1.1	Navařovací automat PPC 250 R6 .....	33
4.1.2	Komorová pec .....	35
4.1.3	Univerzální měřicí ústředna.....	36
4.1.4	Zkouška tahem.....	37
4.1.5	Mikrotvrdost .....	38
4.1.6	SEM .....	39
4.1.7	Mikrostruktura.....	39
4.2	Návrh parametrů.....	39
4.2.1	Parametry lineárních návarů .....	40
4.2.2	Parametry návarů s rozkvyem .....	41
4.2.3	Parametry výsledné 3D struktury .....	42
5	Výsledky a diskuze .....	43
5.1	3D Struktura .....	43
5.2	Teplotní průběh procesu .....	44
5.3	Vyhodnocení materiálových vlastností .....	45
5.3.1	Zkouška tahem.....	45
5.3.2	Zkouška rázem v ohybu .....	46
5.3.3	Mikrotvrdost .....	47
5.3.4	SEM .....	48
5.3.5	Mikrostruktura.....	50
5.4	Porovnání mechanických vlastností.....	51
6	Závěr .....	52
7	Bibliografie .....	54
	Přílohy .....	61

## Seznam zkratk a symbolů

AM	Additive Manufacturing
EBM	Electron Beam Melting
HV	Vickers Hardness
IH	Horní hodnota proudu
IL	Dolní hodnota proudu
LAM	Laser Additive Manufacturing
LM	Laser Melting
LMD	Laser Metal Deposition
SLS	Selective Laser Sintering
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
PM	Přídavný materiál
PTA	Plasma Transferred Arc
SAW	Submerged Arc Welding
SMD	Shaped Metal Deposition
TIG	Tungsten Inert Gas
WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing
ZM	Základní Materiál



## Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení aditivních metod [6] .....	13
Obr. 2 Princip LMD [8] .....	14
Obr. 3 Princip SLS [10].....	15
Obr. 4 EBM – Princip [11] .....	17
Obr. 5 Porovnání metod PTA a PAW [24] .....	23
Obr. 6 Průběh navařování plazmatem [5] .....	24
Obr. 7 Stavba plazmatronu [25].....	25
Obr. 8 Rozdělení niklových slitin [33] .....	28
Obr. 9 Vysokoteplotní tahové vlastnosti [38] .....	31
Obr. 10 Laboratorní komorová pec LE 15/11 .....	35
Obr. 11 Univerzální měřicí ústředna ALMEMO 5690-2M.....	36
Obr. 12 Trhací stroj LabTest 5.100SP1 .....	37
Obr. 13 Tvrdoměr IndentaMet 1104 .....	38
Obr. 14 Mikroskop ZEISS.....	39
Obr. 15 Prvotní zkušební návary .....	40
Obr. 16 Výsledná 3D struktura .....	43
Obr. 17 Teplotní ovlivnění ZM v závislosti na čase .....	44
Obr. 18 Závislost $F - \Delta l$ .....	45
Obr. 19 Závislost tvrdosti a vzdálenosti od základního materiálu.....	47
Obr. 20 SEM analýza 12 mm od ZM.....	48
Obr. 21 SEM analýza 24 mm od ZM.....	49
Obr. 22 Mikrostruktura vzorku v horní části návaru – přiblížení 1000x.....	50

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Ionizační energie plazmových plynů [27] .....	26
Tabulka 2 Chemické složení Inconel 625 [38] .....	30
Tabulka 3 Mechanické vlastnosti [38] .....	31
Tabulka 4 Parametry navařovacího automatu .....	33
Tabulka 5 Parametry komorové pece .....	35
Tabulka 6 Vstupní hodnoty .....	37
Tabulka 7 Parametry stroje .....	38
Tabulka 8 Parametry pro zkušební návary .....	40
Tabulka 9 Parametry - Rozkvyv .....	41
Tabulka 10 Vstupní data .....	42
Tabulka 11 Mechanické vlastnosti materiálu Inconel 625 .....	45
Tabulka 12 Hodnoty zkoušky rázem v ohybu .....	46
Tabulka 13 Naměřené hodnoty mikrotvrdosti dle Vickerse .....	47
Tabulka 14 Chemické složení 12 mm od ZM .....	48
Tabulka 15 Chemické složení 24 mm od ZM .....	49
Tabulka 16 Porovnání mechanických vlastností [41] .....	51

## Úvod a cíl práce

Aditivní výroba, v dnešní době známá spíše jako 3D tisk, je způsob vytvoření výrobku z předem vytvořeného modelu ve virtuální podobě. Tato technologie spočívá v pokládání jedné vrstvy na druhou, čímž je docíleno postupného sestavení předem navržené struktury. Aditivní technologie výroby je v posledních letech jednou z nejrychleji se rozvíjejících výrobních metod. Snahou této technologie je co nejvěrohodněji napodobení navržené předlohy a zároveň dosažení co nejlepších vlastností. V současné době jsou aditivní technologie limitovány velikostí pracovních ploch, nízkou produktivitou a nedostatečnou kvalitou povrchu. Z technicky obvyklých materiálů jsou využívány především plasty a kovové materiály. U finálních produktů je obvykle nutné další zpracování, jako například obrobení funkčních ploch nebo úprava povrchu pro lepší vzhled. Roli zde hraje i vysoká cena finálních výrobků. Přes všechny uvedené nevýhody se jedná o důležitý průmyslový proces při výrobě kovových výrobků „na zakázku“.

Navařování plazmatem (Plasma Transferred Arc) se řadí mezi aditivní technologie. Jedná se o perspektivní metodu využívající proud plazmatu k navaření materiálu, který je podáván nejčastěji ve formě prášku. Takto natavený materiál následně vytvoří vrstvu návaru na základním materiálu. Skládáním vrstev na sebe vznikne stejnorodá struktura, která jen minimálně ovlivňuje materiál, na který je navařena.

V rámci teoretické části je cílem této diplomové práce seznámení s aditivními technologiemi a především pak s technologií navařování plazmatem. Následně se práce zabývá slitinami niklu, jejich složením a vlastnostmi. Experimentální část se zabývá navařováním 3D struktur tvořených slitinou Inconel 625. První část experimentu je zaměřena na nalezení vhodných parametrů procesu, druhá část se zabývá vytvořením návaru na základě získaných informací z předešlé části. Navařená 3D struktura je následně podrobena různým zkouškám za účelem zjištění mechanických vlastností této struktury a její homogenity.

# Teoretická část

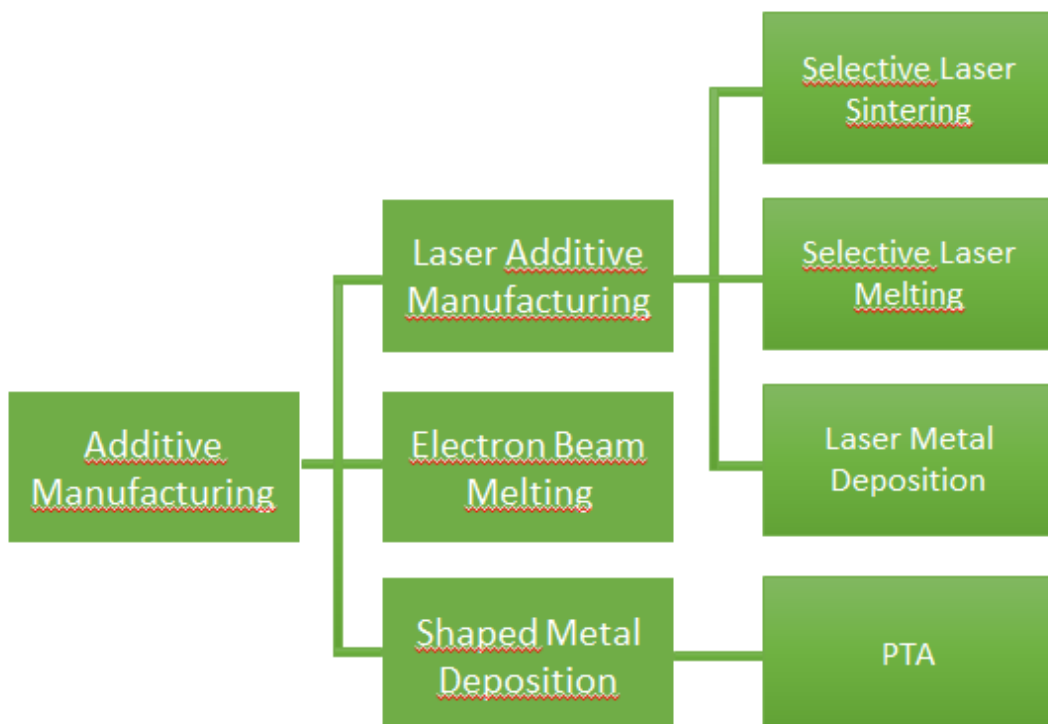
## 1 Aditivní výroba

Na vytvoření postupu výrobku lze koukat dvěma pohledy. Tím prvním, dlouhá léta jednoznačně upřednostňovaným, je subtraktivní výroba. Tato metoda spočívá v postupném odebírání materiálu z polotovaru až do finální podoby výrobku. Druhou, v posledních letech výrazně rozvíjející se metodou, je aditivní výroba. Principem této metody je nanášení materiálu ve vrstvách na sebe tak, aby vznikl požadovaný tvar výrobku. Pro tento typ výroby se vžilo zjednodušený název 3D tisk, kterým se označuje způsob výroby výsledného produktu. Aditivní výroba je chápána jako proces, při němž vzniká výrobek postupným nanášením tenkých vrstev na sebe. Za hlavní rozdíl mezi těmito pojmy lze považovat fakt, že pojem aditivní výroba se používá především pro označení procesů, při kterých vzniká finální výrobek, nikoliv jen prototyp. [1] [2] [3]

Jednoznačnou výhodou aditivní výroby oproti konvenčním metodám obrábění je možnost vytvoření výrobků rozmanitých tvarů. Touto metodou lze dosáhnout náročných tvarových požadavků, které není možné konvenčními metodami docílit. Topologická optimalizace je pojem, jenž úzce souvisí s aditivní výrobou. Jedná se o proces, který se snaží docílit požadovaných funkčních vlastností – například požadavků na pevnost, návaznost na další součásti, atd. [1] [4] [5]

## 1.1 Rozdělení AM

Při výrobě pomocí AM s využitím kovových materiálů je možné použít celou řadu metod, obvykle rozdělovaných podle typu přídavného materiálu a způsobu jeho zpracování. Názvosloví, resp. označování jednotlivých metod, zatím není plně ustálené a používají se různé názvy, ale pro zpracování kovových materiálů rozeznáváme obvykle tyto základní metody (viz Obr. 1). [2] [6] [7]



Obr. 1 Rozdělení aditivních metod [6]

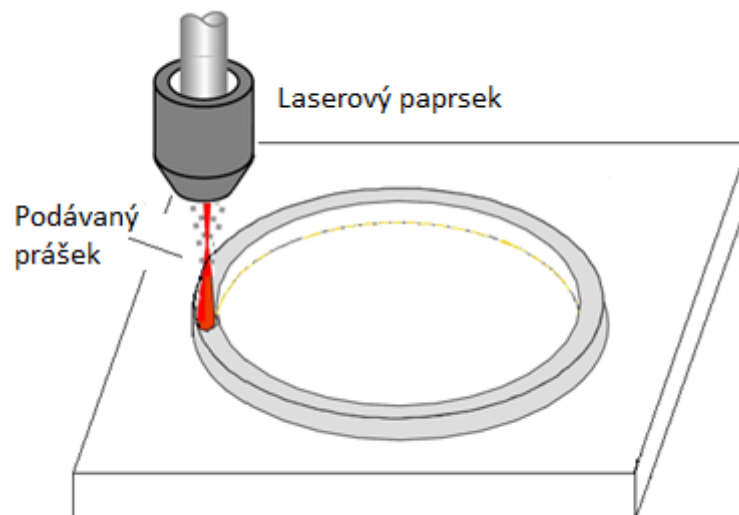
Další kritérium, dle kterého můžeme metody rozdělit, je způsob podávání přídavného materiálu. Takto rozlišujeme dvě kategorie:

- Powder bed systems – přídavný materiál ve formě prášku
- Wire feed systems – přídavný materiál ve formě drátu

## 1.2 Laser Additive Manufacturing (LAM)

Jedná se o metody AM využívající laserový paprsek jakožto tepelný zdroj pro zpracování kovových materiálů ve formě prášku. Princip jedné z metod LAM - LMD je znázorněn na Obr. 2. Tyto metody můžeme rozdělit do třech kategorií, z nichž každá má své unikátní vlastnosti z hlediska zpracování, přídavných materiálů i finálního použití: [8] [9]

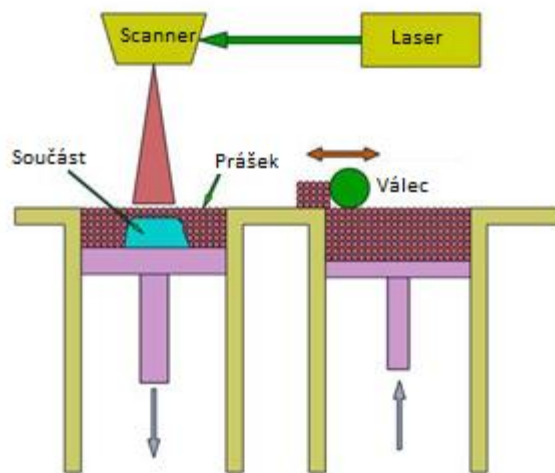
- Selective Laser Sintering (SLS)
- Selective Laser Melting (SLM)
- Laser Metal Deposition (LMD)



Obr. 2 Princip LMD [8]

### 1.2.1 Selective Laser Sintering

Laser sintering neboli laserové spékání (viz Obr. 3) je typický AM proces. Laser sintering je založen na spékání přídatného materiálu na pracovní desce, kde je prášek umístěn po celé ploše desky. Poloha desky se nastavuje vůči fokusační vzdálenosti laseru a ke spékání kovového prášku může proto docházet v přesně určených místech. Oproti technologii LM lze LS použít i pro heterogenní kovové přídatné prášky, není však dosaženo finální homogenní struktury. [9] [10]



Obr. 3 Princip SLS [10]

Princip metody spočívá v tom, že materiál ve formě velmi jemného prášku (částice 20 - 100  $\mu\text{m}$ ) je laserovým paprskem sintrován. Pracovní prostor je chráněn inertním plynem, který zabraňuje jakékoliv oxidaci během procesu. Metoda využívá vertikálně posuvnou podkladovou desku, na kterou jsou nanášeny jednotlivé vrstvy prášku. Nanášené vrstvy jsou postupně zahřívány pomocí laseru, čímž dochází ke spékání. Teplota je nastavena mírně pod teplotu tavení. Během procesu je intenzita laserového paprsku regulována řídicím systémem, za účelem tepelného ovlivnění pouze v požadovaném místě. Nenatavený prášek se hromadí v okolí vznikající struktury a slouží jako podpora pro vznikající model, takto nahromaděný prášek je odstraněn na konci postupu. Na finální vrstvu je nanášena vrstva čítající až několik centimetrů prášku, která zajišťuje rovnoměrnější chladnutí součásti. Následně přicházejí na řadu dokončovací operace, které jsou nutnou součástí výrobního procesu. Nejprve je nezbytné odstranit již zmiňované pomocné struktury shromážděné na povrchu

součásti. Poté je povrch dále upravován. Následné dokončovací operace jsou tryskání, broušení, leštění nebo i obrábění. [6] [9]

System SLS se skládá z laseru (obvykle se používá CO<sub>2</sub>, Nd: YAG, Nd:Yb, vláknový nebo diskový), automatického zařízení pro vrstvení a stírání prášku, počítačového řídicího systému a dalších pomocných zařízení, kterými jsou rozvod inertního plynu či vyhřívání pracovní desky. Mezi výhody této technologie lze bez pochyby zařadit možnost recyklace přebytečného materiálu a přesnost této metody. [6] [9]

### **1.2.2 Selective Laser Melting**

SLM neboli laserové tavení funguje na obdobném principu a je provozováno na stejném zařízení jako metoda SLS. Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma technologiemi spočívá v míře natavení PM. U SLS nedochází k úplnému roztavení prášku, který je spékán. U technologie SLM přídavný materiál kompletně roztaven a dochází tak ke spojení na atomové úrovni v tzv. homogenní stav. Za tímto účelem je teplota ohřevu těsně nad teplotu tavení. Především z tohoto důvodu se laserové tavení používá pro homogenní přídavné materiály, jelikož je brána v potaz pouze jedna teplota tavení. [6] [9]

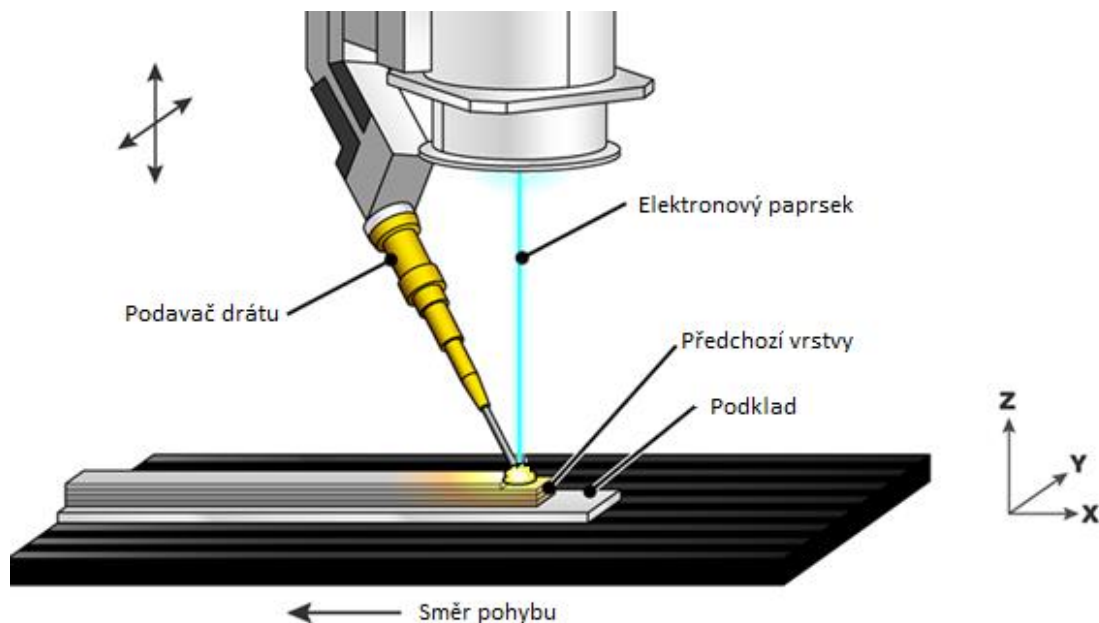
### **1.2.3 Laser Metal Deposition**

Metoda LMD neboli 3D Laserového navařování spočívá v tom, že prášek je přiváděn proudem plynu tryskami. U technologie LMD stejně jako u SLM je vhodné použít čisté materiály pro jejich úplné roztavení. Za hlavní výhodu technologie LMD je považována absence prostorného zařízení pro stírání a nanášení kovového prášku. Také není nutné zaplnit pracovní komoru inertní atmosférou. Prášek je v tomto případě nanášen přímo na místo spékání díky speciální hlavě a to přímo laserového paprsku. Skrz tuto hlavu současně protéká do místa spékání ochranný plyn. [6] [9]



### 1.3 Electron Beam Melting

Metoda Electron Beam Melting (dále jen EBM) patří také mezi AM technologie s možností PM jak ve formě prášku, tak i drátu. Stěžejní rozdíl tkví v tom v použití laseru místo elektronového svazku. Dalším rozdílem je fakt, že na místo použití inertní ochranné atmosféry se celý proces odehrává ve vakuu. Důvodem využití vakua v rámci této technologie je zamezení snižování energie svazku odražením se od částic obsažených v atmosféře. Toto především zajišťuje vyšší kvalitu výsledné struktury, která obsahuje znatelně méně nečistot a méně mikroporéznosti. Výsledné výrobky mají jemnou a homogenní mikrostrukturu a konzistentní mechanické vlastnosti materiálu. Tyto podmínky nejlépe vyhovují titanu a jeho slitinám, které své uplatnění nachází zejména v lékařském a leteckém průmyslu. Výhodami této technologie jsou vysoká přesnost vyrobených součástí a větší produkce oproti ostatním metodám. Dále odpadá nutnost zařazení TZ či dokončovacích operací do výrobního postupu. Princip této metody je zobrazen na Obr. 4. [9] [11]



Obr. 4 EBM – Princip [11]

#### 1.4 Shaped Metal Deposition

Shaped Metal Deposition (dále jen SMD) je způsob rychlé výroby prototypů nanášením jedné vrstvy na druhou pomocí svařovacího kovového drátu – PM ve formě drátu. Pro proces SMD mohou být použity všechny svařitelné materiály. Tato metoda je vhodná pro drahé materiály, které jsou náročné na zpracování pomocí konvenčních metod. Mezi tyto materiály můžeme zařadit například nikl či titan a jejich slitiny. Tepelným zdrojem je v tomto případě laserový paprsek, elektronový svazek, plasma či elektrický oblouk. Mezi technologie, které pod tuto metodu spadají, můžeme zařadit například PTA nebo WAAM. [6] [9]

#### 1.5 Ekonomické hledisko AM

Obecně můžeme říci, že technologie LAM a EBM mohou vyrobit součásti s požadovanými vlastnostmi (tj. geometrie, vysoká přesnost). Na druhou stranu existují zde stále omezení těchto technologií, které brání v jejich komplexním uplatnění. Tím prvním je cena a náročnost daného zařízení. Za další nevýhodu můžeme považovat limitování z hlediska rozměrů pracovního prostoru, které výrazně redukuje výrobní možnosti. Celkově platí, že AM jsou vhodné spíše pro kusovou výrobu v porovnání s konvenčními metodami. Vzhledem k ekonomické stránce začala být aditivní výroba součástí z titanu a jeho slitin zaměřena na letecký a lékařský průmysl. [12]

#### 1.6 Materiály pro AM

PM v podobě přídavného drátu má lepší procentuální využití materiálu. Tvoří také méně znečištění a dosahuje mnohem vyšších rychlostí depozice. Díky těmto faktorům roste tendence používat PM ve formě přídavného drátu jakožto náhradu za práškové přídavné materiály. Vzhledem k vysoké ekonomické náročnosti je výhodné použít materiály pro výrobky s přidanou hodnotou či s obtížnou zpracovatelností, například pro výrobky se složitým tvarem, pro titan a jeho slitiny. [13]

## 2 Technologie navařování

Navařování se dnes používá v širokém rozsahu jako součást výrobní technologie a také jako prostředek ke zvyšování životnosti strojů, zařízení, součástí i nástrojů ve výrobě. Navařování oceli nebo slitin se zvláštními vlastnostmi (např. odolnost proti otěru) na pracovní hrany a plochy strojních součástí vede k zvýšení životnosti těchto nástrojů. Tímto způsobem lze zlepšit ekonomickou stránku procesu a zajistit hospodárnou výrobu trvanlivých a provozně spolehlivých součástí pro nejrůznější strojní zařízení. [14] [15]

Technologie navařování je metalurgický proces, při kterém dochází k natavení základního a přídavného materiálu. Při procesu se tvoří tavná lázeň a na ZM se po ochlazení vytváří vrstva (návar) s požadovanými vlastnostmi, tzv. návar. Výchozí podmínkou je zajištění dostatečného zdroje tepla pro dosažení teploty tavení materiálu. Toho může být dosaženo různými způsoby. Za tradiční způsoby lze považovat plamen hořlavého plynu ve směsi s kyslíkem, elektrický oblouk, laser, plazma nebo obloukový výboj. Volba technologie navařování má vliv na efektivitu a dobu výroby. Její špatné zvolení může vést až ke znehodnocení součásti. Další výchozí podmínkou je rozdíl mezi teplotami tavení PM a ZM. Teplota tavení PM musí být menší nebo rovna teplotě tavení ZM. [14] [15]

Výhodou navařování je jeho produktivita při použití vysoce výkonných zdrojů tepla, čehož se využívá především v sériové výrobě. Ruční navařování je vhodné spíše pro kusovou výrobu, kde nejsou kladeny vysoké požadavky na výslednou kvalitu návaru. V rámci sériové výroby dochází k automatizaci procesu, což vede ke zvýšení produktivity a kvality výsledných návarů. Tvrdost navařeného povlaku je zpravidla vyšší než základního materiálu. Za nevýhodu navařovacího procesu je považováno značné tepelné ovlivnění ZM, ve kterém kvůli působení tepla dochází ke změně struktury. Dochází také ke smíchání PM a ZM, což může vést ke zhoršení vlastností vznikajícího návaru. [14] [15] [16]

## 2.1 Navařování plamenem

Navařování plamenem je snadno proveditelná, ekonomicky nenáročná, rychlá a jednoduchá technologie. Řadí se mezi nejrozšířenější technologie navařování. Způsob plamenového navařování se stále využívá vzhledem k nízkým finančním nákladům. Z důvodů vznikajících deformací a vnitřních pnutí je však nahrazována navařováním metodou MAG. Je zde ovšem zpravidla nutný vysoký přehřev materiálu a kvůli velkému působení tepla zde dochází k již zmiňovaným tvarovým deformacím materiálu. Toto je také důvod, proč je doporučováno tuto operaci zařadit za hrubovací operace. Výsledný výrobek je proto nutné po navaření obrobit. Zdrojem tepla je u této metody chemická reakce vzniklá hořením směsí oxidujícího a hořlavého plynu. Tyto plyny jsou přiváděny do hořáku, kde jsou následně zažehuty. Cílem tohoto navařování je zejména zlepšení mechanických vlastností. Pro vytvoření navařeného povlaku se tedy nejčastěji používají slitiny kovů s vysokou tvrdostí. Pro správné provedení metody je nutné dodržet základní zásady a postupy svařování. [17] [18]

## 2.2 Navařování elektrickým obloukem

Tato technologie je vhodná pro navařování tvrdých slitin na rozměrné součásti a pro navařování rozměrných ploch s nepravidelně opotřeбенým povrchem. Během procesu navařování elektrickým obloukem dochází k promísení návarového kovu se ZM, proto je vhodné nanést nejprve tenkou vrstvu návarového kovu a následně až finální vrstvu o odpovídající požadované tloušťce. Obecně platí, že navařování elektrickým obloukem je produktivnější než technologie navařování plamenem. U zapojení elektrického oblouku je možné použít jak stejnosměrný, tak i střídavý elektrický proud. Pod navařování elektrickým obloukem spadá navařování neodtavující se wolframovou elektrodou (TIG), odtavující se elektrodou (MIG/MAG), navařování ruční obalenou elektrodou (MMA) a navařování pod tavidlem (SAW). [15] [17] [19]

### 2.3 Navařování ruční obalenou elektrodou

Složení a síla obalu ovlivňují velmi výrazně navařovací vlastnosti. Obalené elektrody se pro navařování používají v různých formách. Rozlišujeme celkem tři druhy obalů – kyselé, bazický a rutilový. Obal se skládá především z organických součástí, které se spálí v navařovacím oblouku a vytvářejí přitom ochranný plyn na ochranu místa návaru. Legující prvky jsou zpravidla obsaženy v jádře elektrody, u určitých aplikací se ale používá i při legování obalem. K ochraně svarové lázně a výsledného návaru slouží struska vznikající odtavením obalu elektrod. Strusku je před navařením další vrstvy nutné odstranit. Tepelně ovlivněná oblast je u navařování obalenou elektrodou výrazná a může docházet k negativnímu ovlivnění vlastností a struktur základního materiálu. Tato technologie se pro svou jednoduchost a nízké provozní náklady uplatňuje především v opravárenství. [15] [19]

### 2.4 Navařování odtavující se elektrodou

U technologie MIG/MAG dochází k odtavování kovové elektrody v ochranném plynu. Metoda MAG používá aktivní plyny, ty jsou běžně tvořeny buďto čistým CO<sub>2</sub>, argonem + O<sub>2</sub> nebo argonem + CO<sub>2</sub>. Metoda MIG používá inertní plyny, k těmto účelům se používá argon nebo helium. Přídavný materiál se používá ve formě drátů nebo plněných trubiček a je do hořáku přiváděn pomocí podávacího mechanismu. Aktivní plyn vstupuje do chemických reakcí se základním materiálem, a proto se používá k navařování nelegovaných, nízkolegovaných a vysoce legovaných ocelí. Tyto metody lze plně automatizovat. Oproti navařování ruční obalenou elektrodou se jedná o produktivnější technologii. [15] [19]

### 2.5 Navařování neodtavující se elektrodou

U navařování metodou TIG se používá neodtavující se wolframová elektroda. Oblouk hoří mezi touto elektrodou a ZM. PM může být ve formě drátu, tyčinky nebo prášku. Jako ochrana se používá inertní plyn. Tuto metodu lze plně automatizovat. Je možné použít k navařování stejnosměrný i střídavý proud. Výsledný návar je kvalitní s minimálním rozstříkem a s hladkým povrchem. Při navařování se udržuje krátký oblouk, aby se dosáhlo úzké tepelně ovlivněné zóny, díky čemuž se dá dosáhnout dobré návarové kvality. [15] [19]

## 2.6 Navařování pod tavidlem

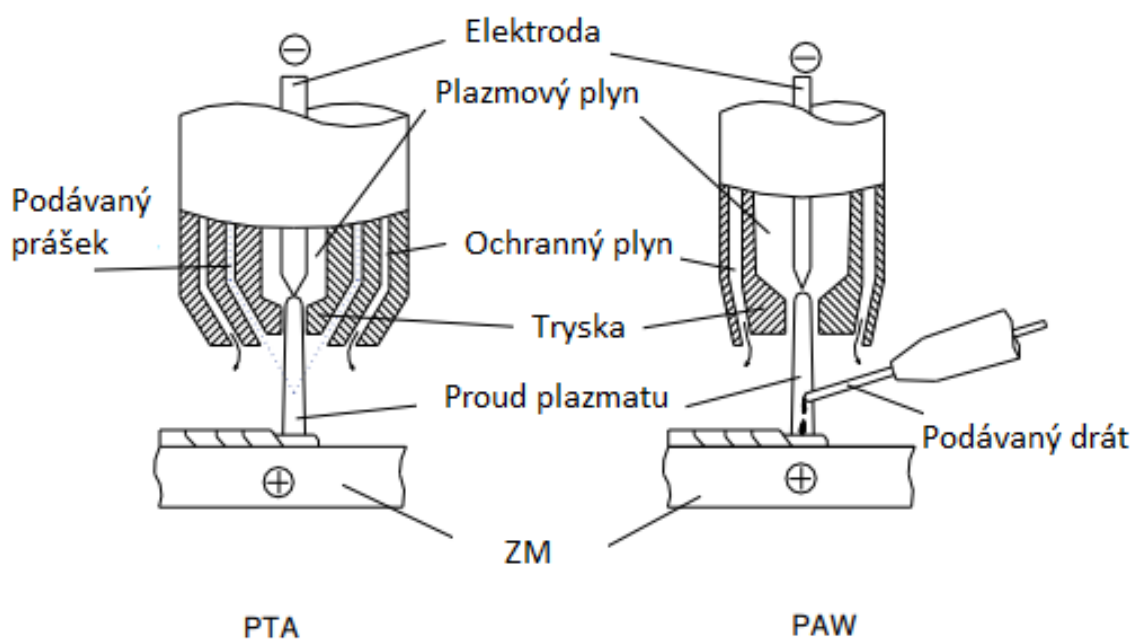
Technologie navařování pod tavidlem (SAW) je plně automatizovaná. Při této metodě je navařovaný materiál kontinuálně podáván do navařovací lázně. PM může být jak ve formě drátu, trubičky, tak i například pásky. Proces je po celou dobu chráněn před okolní atmosférou díky schování navařované oblasti vrstvou zásypu použitého tavidla. Tato vrstva zásypu také může plnit funkci legování. Tato metoda se vyznačuje především svou produktivitou a možností vytvoření rozměrově velkých návarů. [15]

## 2.7 Navařování laserem

Navařování laserem patří mezi pokročilé způsoby navařování. Tato technologie může zlepšit vlastnosti materiálu nebo například renovovat povrch součásti. Touto metodou lze docílit zvýšení tvrdosti povrchu, odolnosti proti opotřebení a korozivzdornosti. Vzhledem k možnosti fokusace paprsku je ZM jen minimálně ovlivňován, proto je možné navařovat drobné součásti a vytvářet i velmi malé detaily. Návary mohou být provedeny s přesností na desetiny milimetru. Z ekonomického hlediska je laserové navařování výhodné pro renovaci součástí, jedná se však o nákladnou technologii. V současnosti tato technologie patří mezi jedny z nejdokonalejších technologií navařování. [15] [20]

## 2.8 Navařování plazmatem

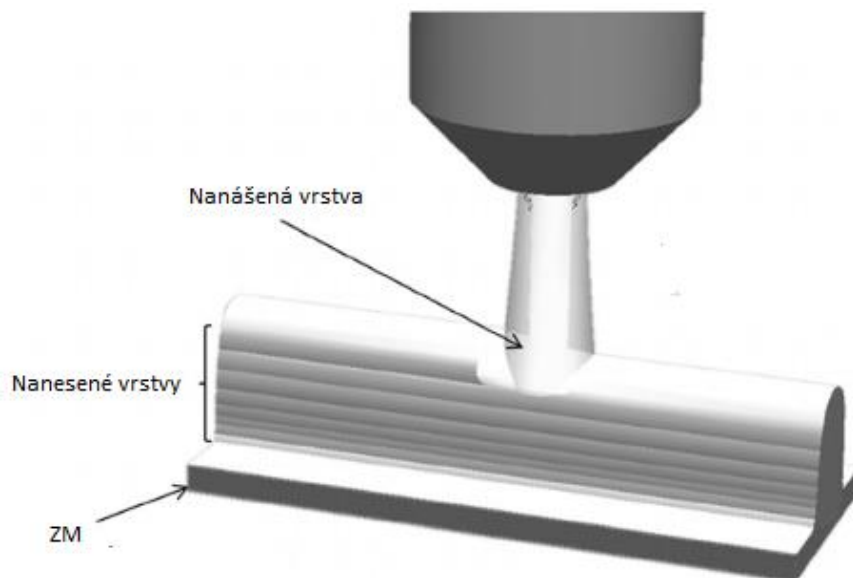
Metodu PTA lze považovat za odvětví metody PAW, porovnání metod je zobrazeno na Obr. 5. Obě metody využívají neodtavující se wolframovou elektrodu, která je umístěna uvnitř hořáku, a ochrannou atmosféru zajišťující ochranu lázně. Rozdíl mezi těmito dvěma svařovacími procesy spočívá v druhu přídavného materiálu – metoda PTA na místo drátu využívá prášek, který je do oblouku dopraven pomocí plynu. [21] [22] [23]



Obr. 5 Porovnání metod PTA a PAW [24]

### 2.8.1 Podstata

Podstatou metody svařování plazmatem (PTA) je vytvoření pilotního oblouku uvnitř hořáku mezi wolframovou elektrodou a tryskou prostřednictvím nízkoproudého oblouku. Následně dochází k přenesení oblouku na součást ZM, což vede k vytvoření elektrického obvodu. Kovový prášek je dodáván do kolimovaného plazmového paprsku, což zajišťuje vysokou koncentraci energie. Díky tomu lze dosahovat úzkých a hlubokých svarů. Tento proces je znázorněn na Obr. 6. Tento proces je charakterizován extrémně vysokými teplotami (20 000 – 30 000 °C) vynikající stabilitou oblouku, nízkým tepelným ovlivněním a možností dosahování vysokých svařovacích rychlostí. Vysoká tepelná intenzita umožňuje nejen vysoké rychlosti nanášení, ale s tím i spojenou úsporu času. [21] [25] [26]



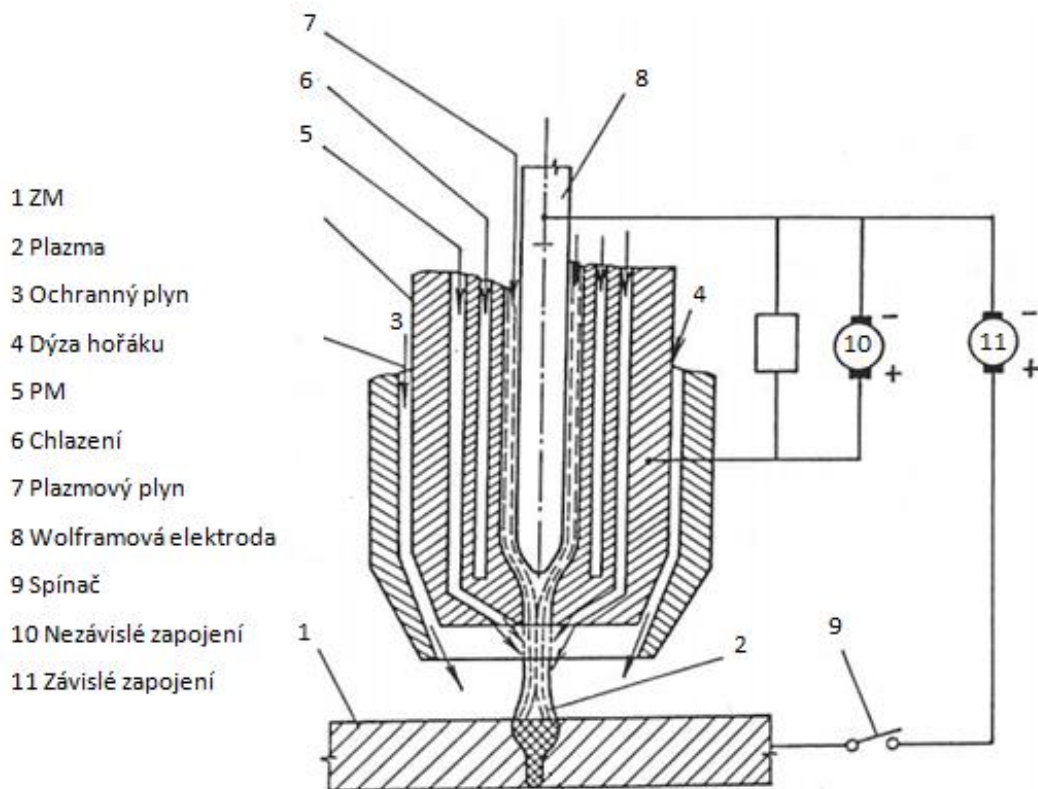
*Obr. 6 Průběh navařování plazmatem [5]*

Rychlost plazmového paprsku se docílí díky plynu procházejícímu skrz oblouk, ve kterém plyn mnohonásobně zvětší svůj objem. Tím dojde k rapidnímu zvýšení rychlosti. Lze tedy říci, že rychlost plazmatu je důsledkem expanze plynu při ohřevu a přechodu do stavu plazmatu. Při navařování musí být vytvořena rovnováha mezi povrchovým napětím návaru a silou vyvolanou dynamickým účinkem tak, aby nedošlo k vyfouknutí návaru. Právě velký dynamický účinek dopadajícího plazmatu spolu s vysokou teplotou umožňuje proniknout paprsku do materiálu při svařování. Výstupní rychlost plazmatu při navařování je v rozmezí 200 – 500 m.s-1. [21] [25]



### 2.8.2 Plazmový hořák

Plazmový hořák (literatura uvádí též pojem „plazmatron“) je obdobou hořáku pro navařování metodou TIG. Pro zažehnutí plazmatronu se používá tzv. „pilotní oblouk“. K zapálení pilotního oblouku dochází mezi wolframovou katodou a měděnou anodou plazmatronu. Hlavním účelem pilotního oblouku je snadnější zapálení hlavního oblouku mezi wolframovou katodou a ZM (anoda). Jak hlavní tak i pilotní oblouk lze využít i k předehřevu ZM. Stavba plazmatronu viz Obr. 7. [25] [27]



Obr. 7 Stavba plazmatronu [25]

### 2.8.3 Používané procesní plyny

Pro metodu PTA rozlišujeme tři různé druhy procesních plynů - plazmový plyn, fokusační plyn a ochranný plyn.

#### Plazmový plyn

Složení plynu je Ar / Ar + H<sub>2</sub> / Ar + He. Rychlost průtoku se může pohybovat v rozmezí 0,5 – 10 l/min. Výstupní rychlost plazmatu díky termické expanzi dosahuje 200 – 500 m.s-1. Pro snadnou ionizaci je rozhodující ionizační energie. Pro snadné zapálení oblouku je vhodná co nejnižší hodnota ionizační energie (viz Tabulka 1). [25]

Tabulka 1 Ionizační energie plazmových plynů [27]

Plyn	Teplota varu [°C]	Ionizační energie [eV]	Relativní hustota (vzduch = 1)
Vodík	- 252,9	13,59	0,06
Argon	- 185,9	15,76	1,38
Helium	- 268,9	24,56	0,14
Dusík	- 195,8	14,55	0,91

#### Fokusační plyn

Používá se za účelem koncentrování (zúžení) plazmového paprsku. Skládá se ze směsi Ar + H<sub>2</sub> nebo Ar + N<sub>2</sub>. Průtok se pohybuje v rozmezí 3 – 12 l.min<sup>-1</sup>. Fokusační plyn se pro navařování používá jen v určitých případech, spíše je využíván při svařování. [25]

#### Ochranný plyn

Používá se pro ochranu svarové lázně. Chrání před účinky oxidace - zabraňuje oxidaci. Používají se Ar / Ar + H<sub>2</sub> / Ar + N<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>. Průtočné množství je kolem 15 – 25 l.min<sup>-1</sup>. Pokud není ochranný plyn použit správně, může dojít k výskytu porozity v návaru. [25]

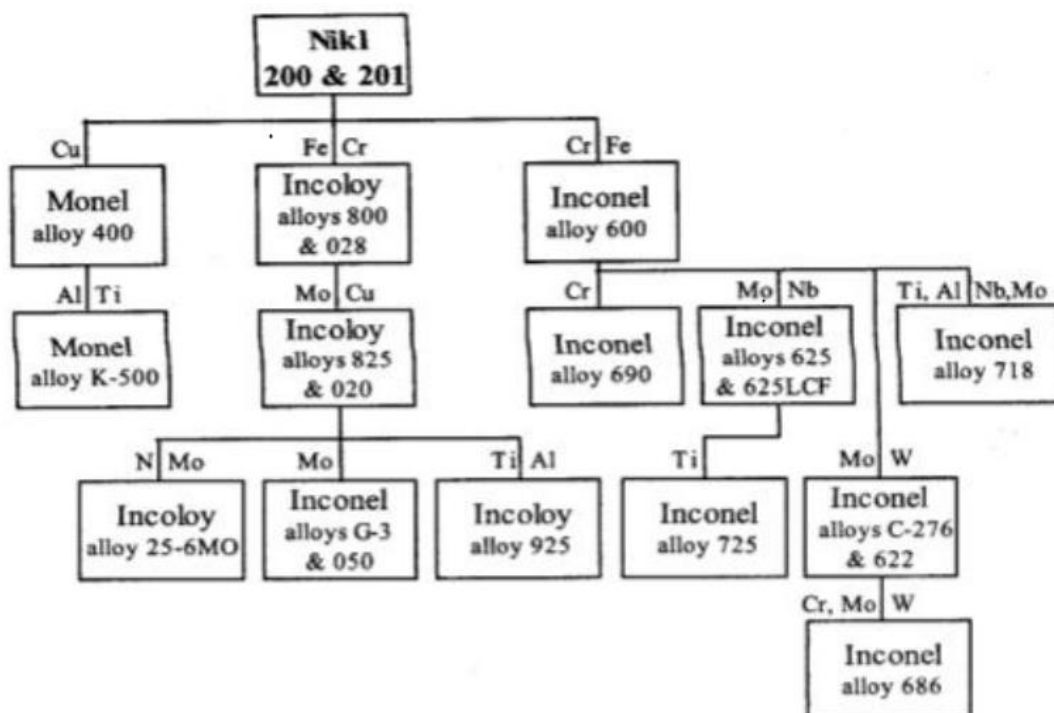
#### 2.8.4 Přídavný materiál

U metody PTA je možné podávat PM buďto ve formě prášku nebo drátu. V případě prášku je přísun zajištěn pomocí podávacího plynu, který unáší prášek skrz hadici a trysku až do proudu plazmatu, kde dochází k jeho natavení. V případě použití PM v podobě drátu se jedná o externí podávání, tzn. PM je přidáván přímo do proudu plazmatu. [25] [28]

### 3 Slitiny niklu

Nikl je drahý, feromagnetický kov. Nikl je jedním z významných prvků moderní doby, ať už v samotný nebo ve formě sloučeniny. Nikl byl vždy důležitým kovem pro celou řadu průmyslových odvětví z prostého důvodu. Jedná se o vysoce všestranný materiál, který lze legovat s většinou ostatních kovů. Z celkového objemu vyrobeného niklu je přibližně 60 % použito jako přísada do slitinových ocelí. Dalších 15 % slouží k výrobě polotovarů (tyče, plechy, atd.). Zbýlých 25 % představují niklové slitiny. Široký rozsah rozpustnosti mezi železem, chromem a niklem umožňuje mnoho kombinací této slitiny. Jeho vysoká všestrannost v kombinaci s vynikající odolností proti teplu a korozi vedla k jeho použití v různých aplikacích, jako jsou turbíny pro letadla, parní turbíny v elektrárnách nebo rozsáhlé použití v energetice. [5] [29] [30] [31]

Řada dalších aplikací pro slitiny niklu zahrnuje jedinečné fyzikální vlastnosti speciálních niklových slitin nebo slitin s vysokým obsahem niklu. Tyto slitiny jsou obecně pevnější, tvrdší a houževnatější než většina slitin neželezných kovů. Při tváření těchto slitin dochází rychle ke zpevnování, je proto nutné do procesu zpracování zařadit častější mezioperační ohřevy. Mezi ně lze zařadit například slitiny s tvarovou pamětí, slitiny s malou délkovou roztažností, magneticky měkké slitiny, termočláňkové slitiny a odporové slitiny. Obr. 8 popisuje rozdělení niklových slitin na základě chemického složení. [29] [30] [32]



Obr. 8 Rozdělení niklových slitin [33]

### 3.1 Konstrukční slitiny

Slitiny *Ni-Cu* (obsah Cu 30 – 32 %), známé také jako monely, se vyznačují svou vysokou odolností vůči korozi jak na vzduchu, tak i ve vodě. Své použití nacházejí především v potravinářském, chemickém či farmaceutickém průmyslu. Také se používají na součásti čerpadel nebo na lopatková kola. Tyto slitiny se zpravidla legují prvky Si, Mn a Fe. Pevnost těchto slitin se odvíjí od procentuálního chemického složení a zpracování, může dosahovat hodnoty až 1200 MPa. Další možností je legování hliníkem. Tyto slitiny jsou dobře vytvrditelné, dosahují pevnosti až 1400 MPa. [29] [30]

Další slitinou spadající do této kategorie je slitina *Ni-Be* (obsah berylia max 2 %). Po vytvrzení tyto slitiny dosahují pevnosti až 1800 MPa a mají dobrou houževnatost. Aplikace těchto slitin je omezená pracovními teplotami do 500 °C. Používá se například pro výrobu trysek nebo pružin. *Slitiny Ni-Mn* mají vysokou odolnost proti korozi za vysokých teplot v prostředí se sírou, proto se používají například pro elektrody zapalovacích svíček. *Slitiny Ni-Si a Ni-Mo* jsou vhodné pro slévárenské slitiny, odolávají působení kyseliny sírové, solné a chloridů. [29] [30]

### 3.2 Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi

*Termočlánkové slitiny Ni-Cr* (obsah Cr 9 – 12 %), též známé jako chromel, tvoří spolu se slitinami almel (ca 94 % Ni, zbytek legury Si, Mn a Al) termočlánky pro pracovní teploty až 1000 °C. *Odporové slitiny Ni-Cr* (obsah Cr okolo 20 %) s názvy chromnikl, pyrochrom či nichrom se používají na výrobu drátů, pásů, nebo také pro topné odpory do 1150 °C. *Magneticky měkké slitiny*, známé jako permaloy, obsahují 22 – 64 % Fe, případně mohou obsahovat i menší množství Cu, Mo, Cr a Si. Tento druh slitin nachází své uplatnění při výrobě jádra transformátorů měřících zařízení a přístrojů. [29] [30]

### 3.3 Slitiny žáruvzdorné a žárupevné

Jedná se o velice drahé materiály a to především díky jejich nákladnému zpracování. Tavení a odlévání těchto slitin vyžaduje drahou vakuovou technologii a i další způsoby zpracování těchto slitin jsou velice obtížné a drahé. *Žáruvzdorné slitiny* jsou tvořeny Ni-Cr, případně Fe. Obsah chromu se pohybuje v rozmezí 15 – 30 % a zajišťuje dobrou žáruvzdornost. Tyto slitiny jsou tvořeny tuhými roztoky Ni-Cr s plošně středěnou krychlovou mřížkou (FCC). *Žárupevné slitiny* jsou taktéž tvořeny tuhými roztoky Ni-Cr. Tento typ slitin je legován nejčastěji přísadami Al a Ti. Žárupevnost je dána výskytem jemných precipitátů fáze  $Ni_3(Ti,Al)$ . Jedná se o tuhý roztok titanu ve sloučenině  $Ni_3Al$ . Se zastoupením těchto roztoků ve struktuře výrazně klesá tvárnost slitiny. Do této kategorie slitin lze zařadit slitiny jako Incoloy, Hestalloj či Inconel. [29] [30]

### 3.4 Slitiny typu Inconel™

Součásti z této slitiny jsou odolné vůči oxidaci a korozi, tudíž jsou vhodné pro použití v extrémních prostředích, kde mohou být vystaveny vysokému tlaku a teplotám. Po zahřátí vytváří Inconel silnou, stabilní, pasivující vrstvu oxidu, která chrání povrch před dalším poškozením. Inconel si zachovává pevnost v širokém teplotním rozsahu, což je vhodné pro vysokoteplotní aplikace, kde by například slitiny hliníku a oceli nebylo již možné použít. Vysokoteplotní odolnost Inconelu může být zvýšena zpevněním nebo precipitačním vytvrzováním. Tyto slitiny jsou tvořeny především prvky Ni, Cr, Fe a Mo. Zastoupení těchto přísad se odvíjí od konkrétního typu slitiny. [33]

### 3.4.1 Slitina Inconel 625

Inconel 625 je superslitina na bázi niklu posílená zejména legurami jako je uhlík, chlór, molybden či niob. Tato slitina je vhodná pro použití při pracovních teplotách od kryogenních hodnot až do 700 °C. Pro tuto slitinu je charakteristická především odolnost vůči korozi a oxidaci. Další předností této slitiny je její vynikající pevnost a houževnatost, respektive kombinace meze kluzu, pevnosti v tahu, creepové pevnosti, svařitelnost a dobré odolnosti vůči korozi při vysokých teplotách při dlouhodobém vystavení agresivním prostředím. Díky svým vlastnostem nachází rozsáhlé uplatnění v leteckém, námořním, chemickém a petrochemickém průmyslu. Používá se také pro komponenty jádra reaktoru a regulační tyče v reaktorech s tlakovou vodou a jako trubice výměníku tepla v závodech na výrobu amoniaku pro výrobu těžké vody. Komponenty tvořené Inconelem 625 jsou proto často tvarově složité, tudíž jsou i náročné a drahé na výrobu obráběcími metodami. Z tohoto důvodu je tendence tyto komponenty vyrábět především metodami aditivními. Mezi těmito metodami je nejvíce využívána technologie laser rapid manufacturing, avšak v posledních letech je tendence, nejen pro Inconel 625, používat další aditivní metody, například metodu navařování plazmatem. Složení této slitiny ukazuje Tabulka 2. [34] [35] [36] [37]

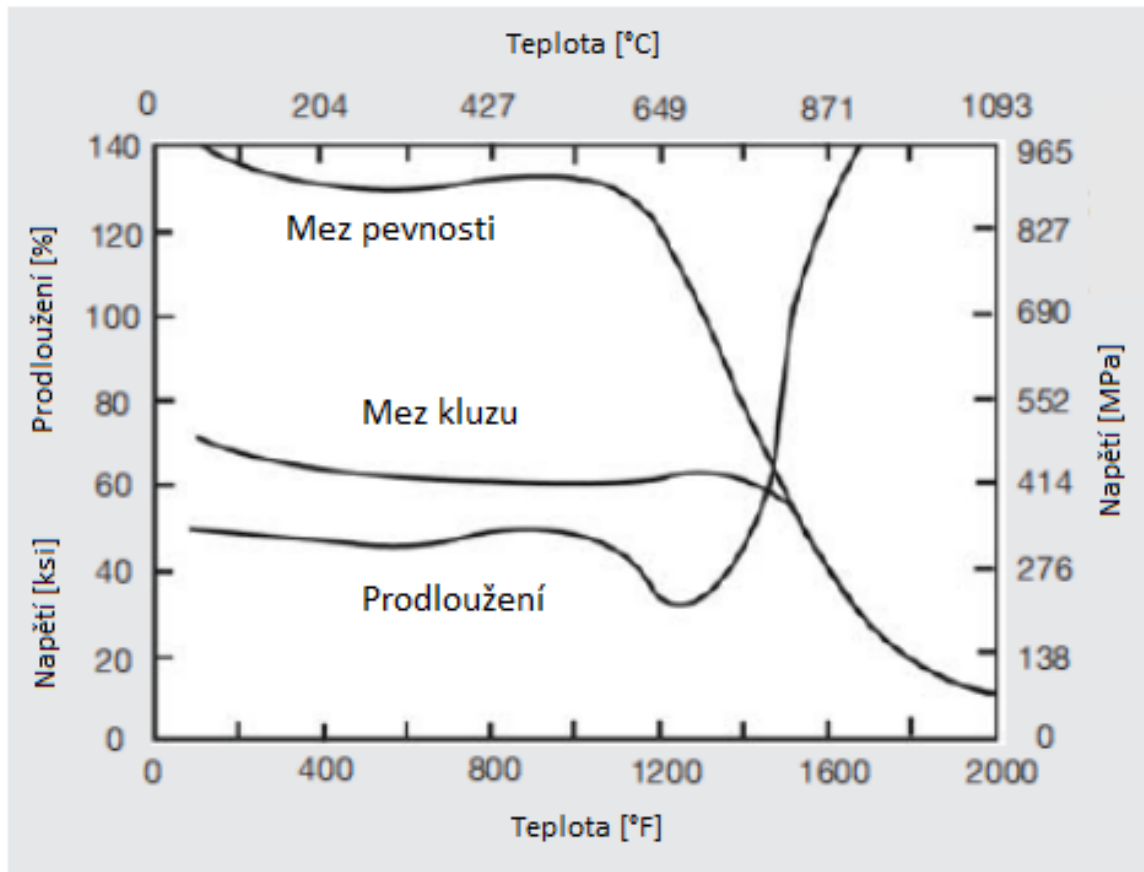
Tabulka 2 Chemické složení Inconel 625 [38]

Prvek	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	Nb [%]	Fe [%]	C [%]
-	> 58	20 – 23	8 – 10	3,15 – 4,15	< 5	< 0,1
Co [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	Al [%]	Ti [%]	P [%]
< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,015	< 0,4	< 0,4	< 0,015

Pro tuto slitinu je charakteristická především odolnost vůči korozi a oxidaci. Další předností této slitiny je vynikající pevnost a houževnatost v rozsahu od kryogenních teplot až do 1100 °C, to je dáno výskytem niobu a molybdenu v matici nikl-chrom. Nikl a chrom také poskytují již zmiňovanou odolnost vůči oxidačnímu prostředí. Molybden zvyšuje odolnost vůči pittingu a štěrbinové korozi. Niob stabilizuje slitinu vůči senzibilizaci během svařování. Tabulka 3 znázorňuje mechanické vlastnosti. Na Obr. 9 jsou zobrazeny vysokoteplotní tahové vlastnosti této slitiny. Inconel 625 se používá na konstrukce v pobřežním (off shore) a leteckém průmyslu. [34] [38] [39]

Tabulka 3 Mechanické vlastnosti [38]

Vlastnost	Rm [MPa]	Re [MPa]	Tažnost [%]	Tvrdoost
Inconel 625	827 – 1034	414 – 655	60 – 30	145 - 220



Obr. 9 Vysokoteplotní tahové vlastnosti [38]

### 3.5 Použití Inconel 625

Slitiny na bázi niklu a kobaltu se běžně používají pro povlaky odolné vůči opotřebení a korozi za účelem zvýšení životnosti součásti a přizpůsobení vysokoteplotním podmínkám. Prášky se vyrábějí pomocí atomizace v ochranné atmosféře, která zajišťuje vhodnou velikost zrn (50 – 150  $\mu\text{m}$ ) a nepřítomnost oxidace, která by mohla způsobit pórovitost v nanesené vrstvě. Procento základního materiálu roztaveného v povlaku je v rozmezí 5 – 10 %. Mezi další charakteristiky nanesených vrstev můžeme řadit vzniklou jemnou mikrostrukturu, díky vysoké rychlosti chlazení, vynikající tvarovou stálost svaru nebo vysokou přilnavost mezi povlakem a nosnou vrstvou. Průmyslové aplikace těchto vysoce výkonných povlaků jsou poměrně široké: formy na sklo, keramika, automobilové ventily, chemické a benzín-chemické ventily, laminovací válce, plastové vytlačovací šrouby a matrice. [28] [40]



## 4 Experimentální část

Praktická část je nejprve věnována nalezení vhodných parametrů procesu navařování slitiny Inconel 625 pomocí plazmatu. Mezi tyto parametry patří proud a frekvence, se kterou je navařováno, dále rychlost hořáku a množství podávání prášku. Nalezené vhodné parametry jsou následně použity pro vytvoření 3D struktury typu „stěna“, na které jsou vyhodnoceny mechanické vlastnosti navařeného materiálu.

### 4.1 Použitá zařízení a metody

#### 4.1.1 Navařovací automat PPC 250 R6

Tento plazmový navařovací automat slouží k navařování především rotačních součástí metodou PTA s přídavným materiálem v podobě prášku. Součásti lze na tomto stroji zhotovovat buďto z čela nebo po obvodu. Tabulka 4 popisuje parametry tohoto stroje.

*Tabulka 4 Parametry navařovacího automatu*

Parametr	Údaj
Proud pro pulzní navařování [A]	50 – 250
Frekvence [Hz]	0 - 200
Polohování hořáku	Osy X, Y, Z, N
Polohování stolu	Osy C, R
Průměr stolu [mm]	300
Nosnost [kg]	70
Rozměry stroje [mm]	1770x1700x2185

Navarovací stroj PPC 250 R6 se skládá z:

- Řídicí systém – skládá se z interaktivního monitoru, ovládacího panelu, dálkového ovladače a ukazatelů průtoků plynu. Programování kódů je ruční, s možností vygenerování několika předdefinovaných tvarů/trajektorií pro navarování.

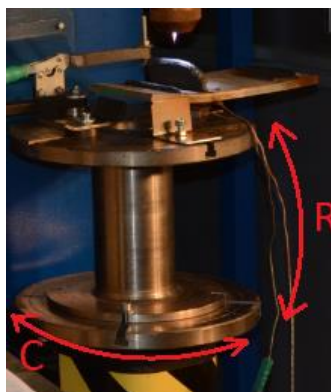


- Hořák – pohyb hořáku je prováděn servo motory, hořák je chlazen vodou na teplotu okolí, rozsah pohybu v jednotlivých osách:

X [mm]	490
Y [mm]	260
Z [mm]	260
N [°]	40

- Podavač – z podavače je dopravován materiál ve formě prášku do hořáku, pohyb prášku je uskutečněn nejprve mechanicky, poté za pomoci plynu. Objem prášku je možné regulovat, je zde také možnost mísit dva různé prášky ze dvou podavačů.

- Polohovatelný stůl – polohovadlo je řízené ve dvou osách - C, R.



#### 4.1.2 Komorová pec

Pro vysušení prášku je použita laboratorní komorová pec LE 15/11. Parametry této pece jsou uvedeny v Tabulka 5. Tento typ pece je znázorněn na Obr. 10.

*Tabulka 5 Parametry komorové pece*

Parametr	Jmenovitá teplota [°C]	Topný příkon [kW]	Přípojný příkon [kw]	Vnitřní rozměry [mm]	Jmenovitý proud [A]
Hodnota	1100	3	3,7	250x170x340	13



*Obr. 10 Laboratorní komorová pec LE 15/11*

### 4.1.3 Univerzální měřicí ústředna

K zaznamenání tepelného ovlivnění materiálu na různých místech základního materiálu jsou použité termočlánky napojené na univerzální měřicí ústřednu ALMEMO 5690-2M (viz Obr. 11). Tato měřicí ústředna umožňuje zaznamenávání dat z více kanálů naráz. Data jsou ukládána na MMC – kartu s minimální pamětí 32 MB.



Obr. 11 Univerzální měřicí ústředna ALMEMO 5690-2M

#### 4.1.4 Zkouška tahem

Zkouška tahem proběhla na trhacím stroji LabTest 5.100SP1 (viz Obr. 12). Na stroji byly přetrženy celkem dva vzorky. Tabulka 6 zaznamenává vstupní hodnoty pro zkoušky tahem. Parametry stroje udává Tabulka 7.



Obr. 12 Trhací stroj LabTest 5.100SP1

Tabulka 6 Vstupní hodnoty

Vzorek	Teplota vzorku [°C]	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Rychlost zatěžování [mm/s]
1	20	2,09	3	14,15	1
2	20	2,15	3,2	14,78	1

Tabulka 7 Parametry stroje

Technická data	5.100SP1
Jmenovité zatížení [kN]	100
Max. zkušební rychlost [mm/min]	600
Přesnost řízení rychlosti [%]	± 0,5
Tuhost rámu [mm/N]	1,6x 10 - 6
Rozpětí sil [kN]	500 - 600
Přesnost měření síly [%]	± 0,3 z hodnoty v rozsahu
Přesnost dráhy [μm]	1 - ČSN EN ř513
Přesnost měření napětí [%]	± 0,5 průtahoměru

#### 4.1.5 Mikrotvrdost

Ke zjištění mikrotvrdosti dle Vickerse byl použit tvrdoměr IndentaMet 1104 (Buehler; Obr. 13). Vtisky byly uskutečněny po celé délce vzorku, s rozstupem 1 mm. Zatěžující síla byla nastavena na 1 kg a čas zatěžování 10 s.



Obr. 13 Tvrdoměr IndentaMet 1104

#### 4.1.6 SEM

Ke zjištění chemického složení navařené struktury byla provedena analýza SEM. Tuto část experimentu uskutečnil Ústav materiálového inženýrství FS ČVUT. K analýze byl použit řádkovací elektronový mikroskop JEOL JSM 5410. Tento typ elektronového mikroskopu disponuje urychlovacím napětím v rozsahu 0,5 – 30 kV. Dosahuje zvětšení v rozmezí 15 – 200 000x s rozlišením až 3,5 nm.

#### 4.1.7 Mikrostruktura

Metalografické výbrusy byly umístěny pod mikroskop od firmy ZEISS (viz Obr. 14), za účelem pořízení snímků vzorků. Pomocí mikroskopu byla vizuálně zkontrolována struktura jednotlivých návarových housenek a jejich homogenita.



*Obr. 14 Mikroskop ZEISS*

#### 4.2 Návrh parametrů

Pro nalezení vhodných parametrů bude pro každou kombinaci těchto parametrů navařen jeden návar typu „housenka“, na základě takto vzniklých housenek jsou zvoleny vhodné parametry. Jako základní materiál pro všechny návary byla použita Cr-Ni austenitická ocel (AISI 316).

#### 4.2.1 Parametry lineárních návarů

Nejprve proběhl návrh parametrů pro návar ve tvaru jednoduché housenky čítající pět na sobě navařených vrstev. Účelem těchto zkušebních návarů bylo především získání přibližného odhadu, jak který parametr procesu ovlivňuje stavbu výsledné struktury. Celkem bylo vytvořeno sedm návarů (Obr. 15), jejich parametry jsou zaznamenány v Tabulka 8.

Tabulka 8 Parametry pro zkušební návary

Návar	Rychlost hořáku [mm/s]	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]
D	4	50	0	100
F	4	170	70	100
B	4	133	55	10
1	2	64	50	111
2	3	85	50	111
3	3	64	50	111
4	3	68	45	111



Obr. 15 Prvotní zkušební návary



#### 4.2.2 Parametry návarů s rozkyvem

Na základě získaných poznatků a informací byly navařeny housenky s přidáním pohybu hořáku do strany – rozkyvu. Spolu s tím bylo nezbytné zavést několik nových parametrů – šířka housenky, velikost kroku vpřed a rychlost rozlišit na dvě různé – rychlost vpřed a do strany. Každý návar se skládá celkem z pěti vrstev navařených na sebe. Všechny čtyři varianty jsou znázorněny v Tabulka 9.

Tabulka 9 Parametry - Rozkyv

<b>Varianta 1</b>						
Rychlost P [mm/s]	Rychlost K [mm/s]	Šířka [mm]	Krok [mm]	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]
10	2	3	2,7	80	50	111
Pozn.: Byl použit předeřev. Proud pro druhou vrstvu snížen na 90 %, na třetí na 80 %						
<b>Varianta 2</b>						
Rychlost P [mm/s]	Rychlost K [mm/s]	Šířka [mm]	Krok [mm]	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]
11	3	3	2,7	85	50	111
Pozn.: Bez předeřevu						
<b>Varianta 3</b>						
Rychlost P [mm/s]	Rychlost K [mm/s]	Šířka [mm]	Krok [mm]	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]
11	3	3	2,7	64	50	111
Pozn.: Bez předeřevu, první vrstva 130 %, od druhé 100 %, pátá vrstva 85 %						
<b>Varianta 4</b>						
Rychlost P [mm/s]	Rychlost K [mm/s]	Šířka [mm]	Krok [mm]	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]
11	3	3	2,7	68	45	111
Pozn.: Od druhé vrstvy 110 %						

Ze všech vytvořených variant dosáhla nejlepších výsledků ta první. Pro navaření finální 3D struktury byly optimalizovány pouze parametry týkající se rychlosti,

kdy při přibližném zachování celkové rychlosti hořáku byla snížena rychlost ve směru pendlu na úkor rychlosti vpřed. Ostatní parametry zůstaly zachovány.

#### 4.2.3 Parametry výsledné 3D struktury

Cílem bylo navaření struktury o 32 vrstvách. Vrstvy se navařovaly postupně, po každých čtyřech vrstvách byl proces zastaven, dosavadní návar ochlazen na teplotu 100 °C a vizuálně zkontrolován. Za vstupní parametry byly použity mírně upravené parametry varianty 1 z předchozího zkoumání (Tabulka 10). V průběhu procesu byly hodnoty vybraných parametrů upravovány na základě aktuálního vývoje návaru. Přehled těchto úprav spolu s měřením aktuální celkové výšky návaru ukazuje Příloha č.1.

*Tabulka 10 Vstupní data*

Rychlost P [mm/s]	Rychlost K [mm/s]	Šířka [mm]	Krok [mm]	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]
5,8	5,8	3	2,7	80	50	111

## 5 Výsledky a diskuze

V rámci výsledků byla vyhodnocena struktura z hlediska rozměrových vlastností, a geometrie. Proces byl po celou dobu tepelně monitorován. Dále byly zjištěné mechanické vlastnosti porovnány s teoretickými předpoklady a následně i s mechanickými vlastnostmi, které byly dosaženy odlišnými metodami aditivních technologií.

### 5.1 3D Struktura

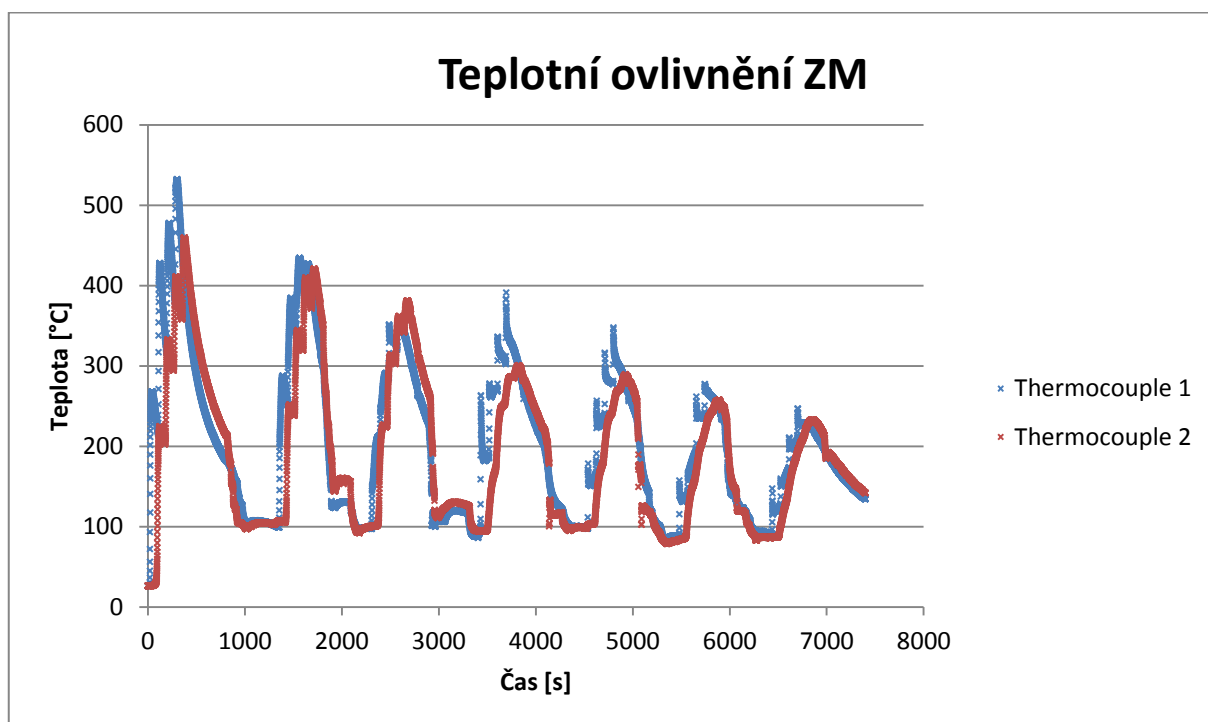
Navařená 3D struktura typu „stěna“ (viz Obr. 16) čítá 32 na sebe navařených vrstev. Nejvyšší bod této struktury dosahuje výšky 30,1 mm. Struktura nemá tendenci se naklánět na žádnou stranu, na obou koncích stěny je patrný důsledek většího tepelného ovlivnění, které zapříčiňuje vyšší míru natavení materiálu. Spojení návaru se ZM je úplné, bez sebemenších narušení.



*Obr. 16 Výsledná 3D struktura*

## 5.2 Teplotní průběh procesu

Po celou dobu navařování 3D struktury typu „stěna“ byla zaznamenávána teplota. K tomuto účelu byly použity termočlánky připevněné u obou konců tvořené struktury. Aby naměřená data byla co nejvíce vypovídající, po každých čtyřech navařených vrstvách byl proces zastaven a navařená část spolu se ZM ochlazena na teplotu 100 °C. Získaná data odpovídají teoretickému předpokladu – teplotní ovlivnění základního materiálu má klesající tendenci v čase. Tento fakt je dán především postupně se zvyšující strukturou „vzdalující se“ od povrchu základního materiálu, neboli dochází k uchování většího množství tepla ve stále narůstající struktuře a tudíž menšímu tepelnému ovlivnění okolního základního materiálu. Nejvyšší naměřená teplota ZM byla ca 530 °C. Teplotní průběh je znázorněn na Obr. 17.



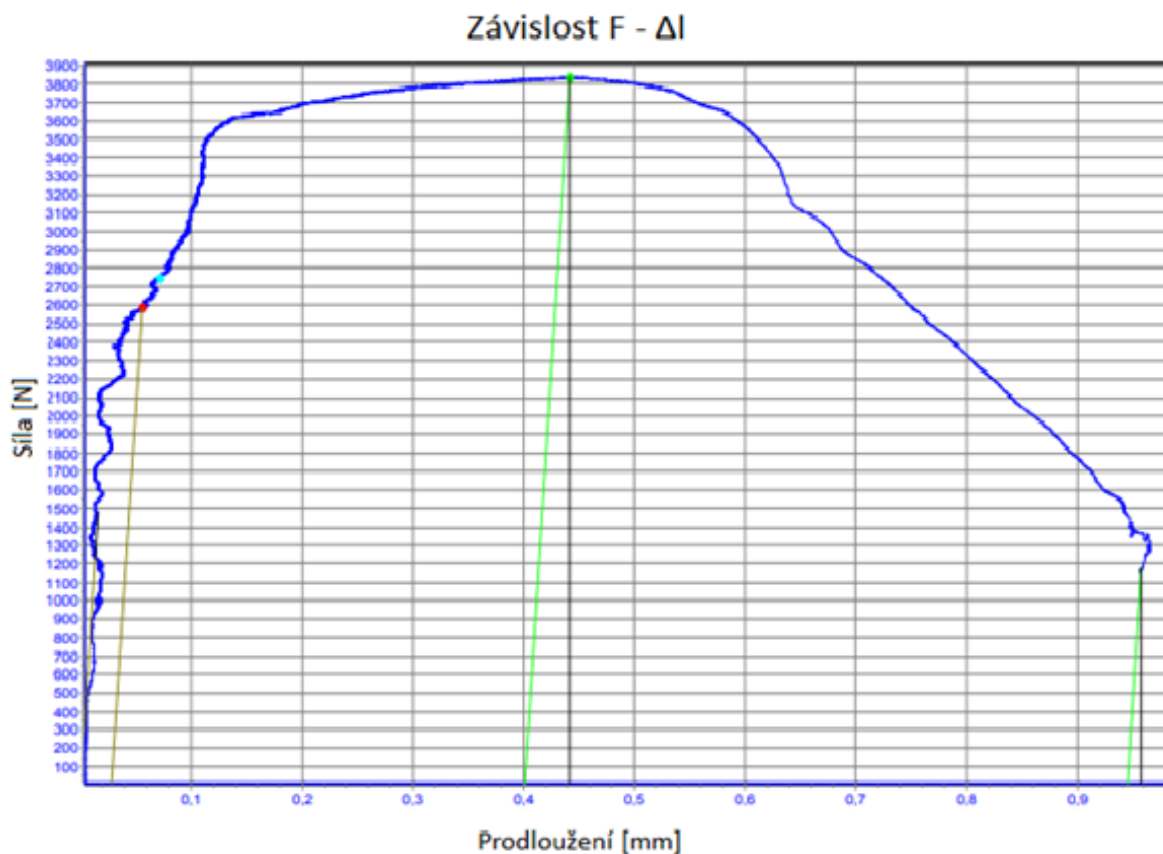
Obr. 17 Teplotní ovlivnění ZM v závislosti na čase

### 5.3 Vyhodnocení materiálových vlastností

Vytvořená struktura z navařeného materiálu Inconel 625 byla podrobena různým zkouškám pro vyhodnocení mechanických a fyzikálních vlastností.

#### 5.3.1 Zkouška tahem

Závislost síly na prodloužení během zkoušky prvního vzorku je znázorněna na Obr. 18:



Obr. 18 Závislost F - Δl

Na základě provedené zkoušky tahem byly stanoveny tyto vlastnosti materiálu:

Tabulka 11 Mechanické vlastnosti materiálu Inconel 625

Vzorek	Rm [MPa]	Re [MPa]	A [%]
1	612	412	6,68
2	666	535	7,08

### 5.3.2 Zkouška rázem v ohybu

Ke zjištění nárazové práce byla provedena zkouška rázem v ohybu, k tomu bylo použito kladivo s nominální energií 150 J a zkušební vzorek s vrubem ve tvaru V. Teplota vzorku byla -20 °C. Výsledná hodnota práce pro oba vzorky je 24 J. Výčet hodnot pro zkoušku rázem v ohybu je zaznamenán v Tabulka 12. Vzorek použitý u zkoušky viz Příloha č.5.

*Tabulka 12 Hodnoty zkoušky rázem v ohybu*

Vzorek	Teplota vzorku [°C]	Tloušťka [mm]	Výška [mm]	Výška vrubu [mm]	Nárazová práce [J]
KV150/8,9	-20	5,13	9,95	1,05	24
KV150/8,7	-20	4,88	10,04	1,37	24

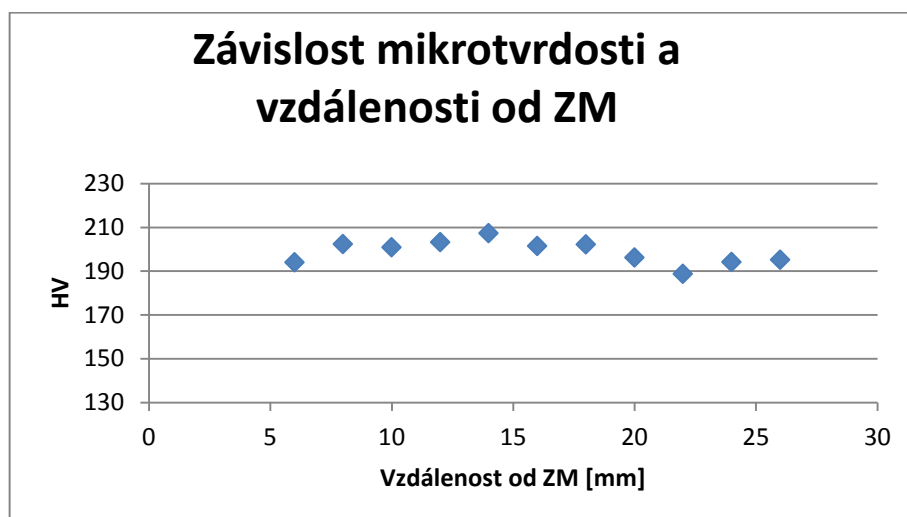
### 5.3.3 Mikrotvrdość

Vtisky byly uskutečnĚny po celĚ dĚlce vzorku, s rozestupem 1 mm. ZatĚžení bylo nastaveno na 1 kg a čas zatĚžování 10 s. NamĚřené hodnoty viz Tabulka 13:

Tabulka 13 NamĚřené hodnoty mikrotvrdości dle Vickerse

Vzdálenost od ZM [mm]	Tvrdość dle Vickerse
6	193,9
8	202,3
10	200,8
12	203,1
14	207,2
16	201,4
18	202,1
20	196,1
22	188,6
24	194,1
26	195,1
28	216,7
PrůmĚř	200

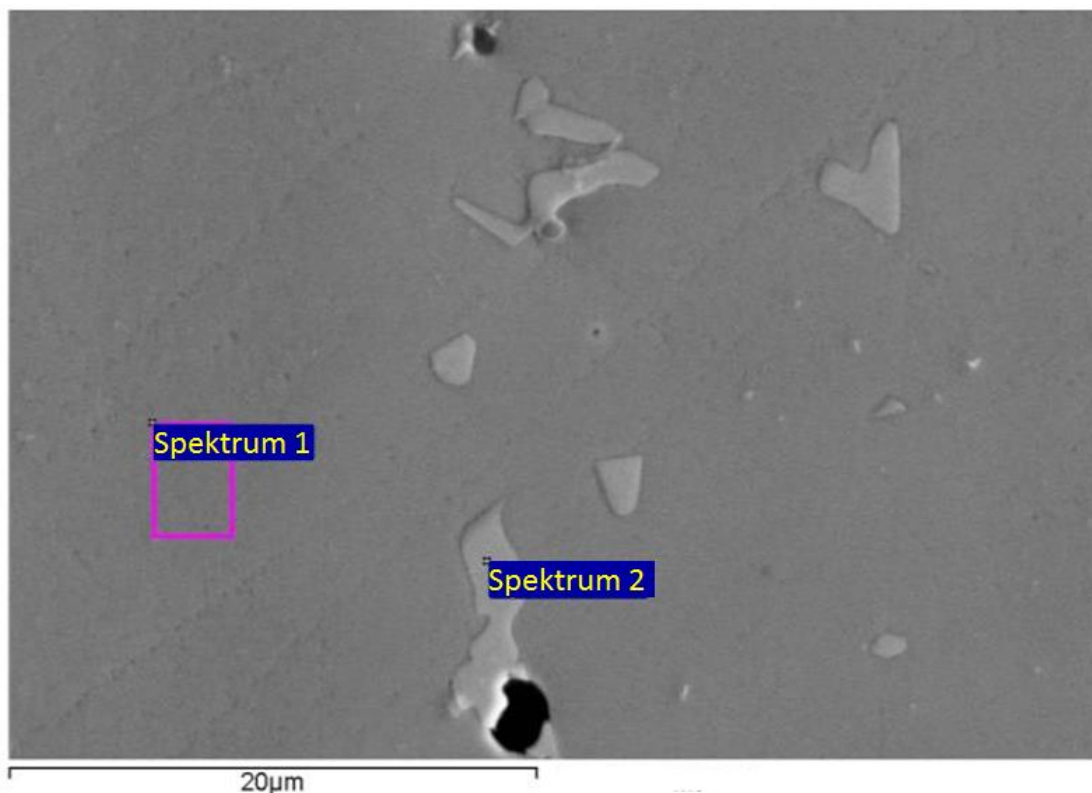
NamĚřená hodnota ve vzdálenosti 28 mm od základního materiálu se odchyluje od trendu ostatních namĚřĚných hodnot. Výsledná tvrdość vzorku je 200 HV. Velikost tvrdości v závislosti na vzdálenosti od základního materiálu ukazuje Obr. 19.



Obr. 19 Závislost tvrdości a vzdálenosti od základního materiálu

### 5.3.4 SEM

Vyhodnocení bylo provedeno ve čtyřech různých úrovních vzdálenosti od ZM (6 – 12 – 18 – 24 mm od ZM). Tři ze čtyř měření došly k přibližně stejným hodnotám složení (viz Obr. 20 a Tabulka 14). Obr. 21 a Tabulka 15 uvádí měření ve vzdálenosti 24 mm od ZM, které došlo k odlišným výsledkům. Zbylá měření viz Příloha č.1.



Obr. 20 SEM analýza 12 mm od ZM

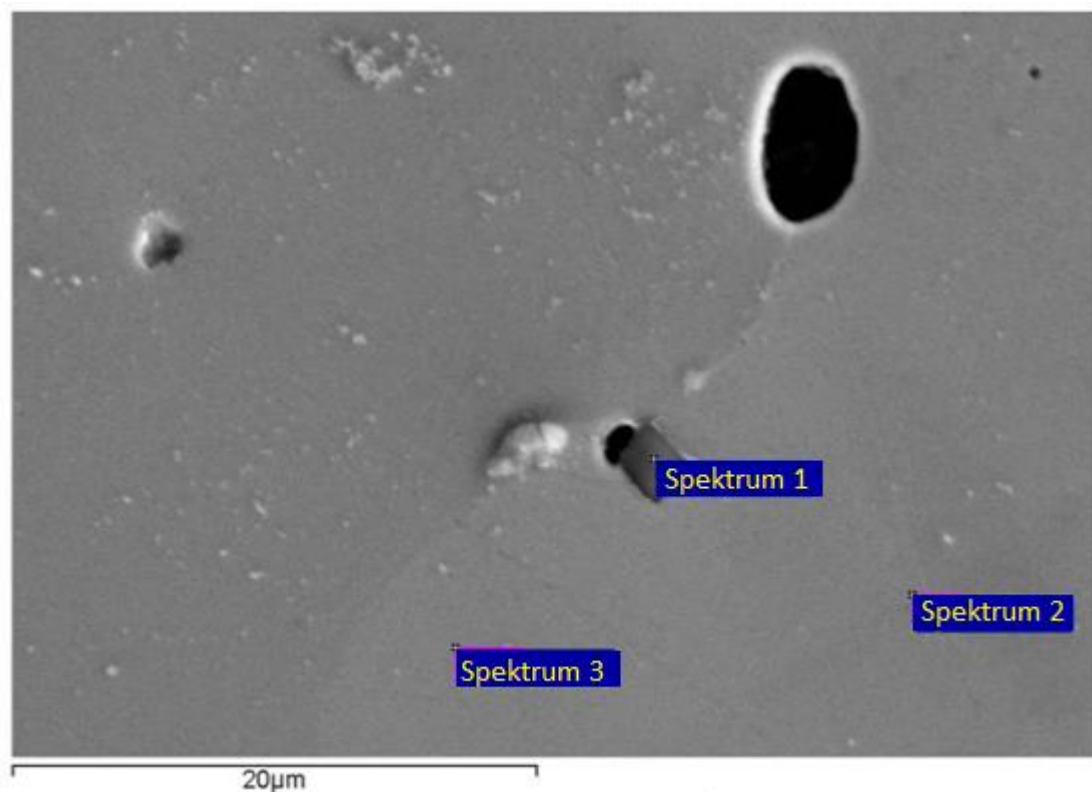
Tabulka 14 Chemické složení 12 mm od ZM

Vzorek	C [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Fe [%]	Ni [%]	Nb [%]	Mo [%]	Celkem [%]
S1	-	0,04	0,29	21,48	3,49	63,22	2,35	9,12	100
S2	8,82	0,05	2,04	9,93	0,96	25,45	32,03	20,73	100

Ze získaného chemického složení vyplývá, že většina navařeného materiálu (Spektrum 1) odpovídá předpokládanému chemickému složení materiálu Inconel 625. Složení v místě označeném jako Spektrum 2 napovídá, že by se mohlo jednat o karbidy



niobu a molybdenu ve struktuře, které by mohly mít případný vliv na mechanické vlastnosti struktury.



Obr. 21 SEM analýza 24 mm od ZM

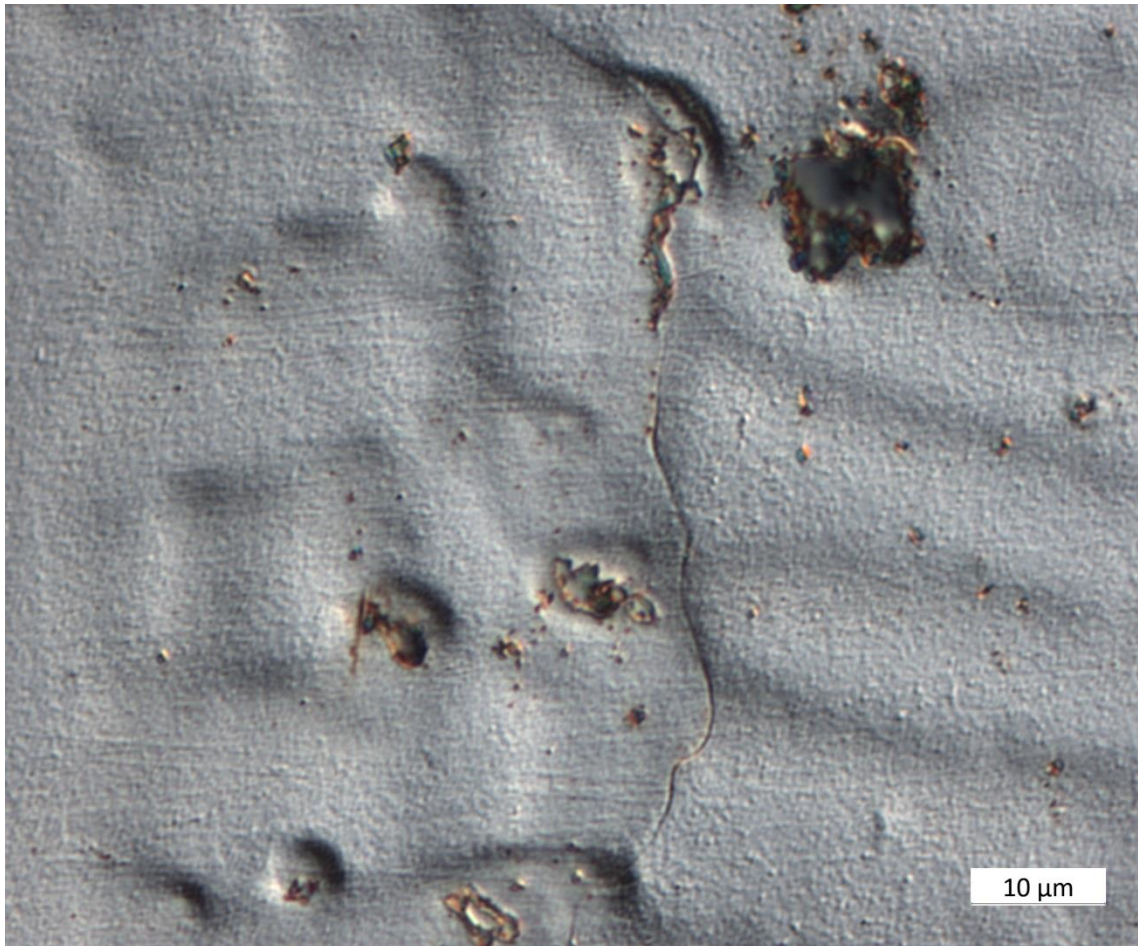
Tabulka 15 Chemické složení 24 mm od ZM

Vzorek	O [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Fe [%]	Ni [%]	Nb [%]	Mo [%]	Celkem [%]
S1	39,76	0,23	0,06	55,61	0,1	1,66	1,69	0,18	100
S2	-	0,07	0,36	21,64	3,5	62,1	2,96	9,38	100
S3	-	0,12	0,35	21,56	3,54	62,74	2,52	9,16	100

Chemické složení v místech označených jako Spektrum 2 a Spektrum 3 zcela odpovídá předpokládaným hodnotám chemického složení slitiny Inconel 625. Hodnoty v oblasti Spektrum 1 naznačují výskyt oxidů chromu. Tyto oxidy by mohly mít značný vliv na vlastnosti navažené struktury.

### 5.3.5 Mikrostruktura

Byly zhotoveny snímky ve vzdálenostech 3 mm a 27 mm od ZM. Na Obr. 22 je znázorněna mikrostruktura v horní části návaru při zvětšení 1000x. Zbylé snímky viz Příloha č.7.



*Obr. 22 Mikrostruktura vzorku v horní části návaru – přiblížení 1000x*

Na základě získaných poznatků lze usuzovat, že prohloubeniny by mohly být odbroušené měkké části struktury, to by mohlo být dáno ochuzením o legující prvky C, Nb, Mo. Ty, jak bylo zjištěno SEM analýzou, mají tendenci se shromažďovat v karbidech uprostřed těchto prohloubenin.

#### 5.4 Porovnání mechanických vlastností

Získané hodnoty mechanických vlastností námi navařené 3D struktury metodou PTA byly porovnány s hodnotami mechanických vlastností výchozího materiálu a hodnotami zjištěnými při použití aditivních technologií využívající laserový paprsek. Srovnání je zobrazeno v Tabulka 16.

*Tabulka 16 Porovnání mechanických vlastností [41]*

Vlastnost	Rm [MPa]	Tažnost [%]	Tvrдость dle Vickerse
Vzorek	639	7	200
Výchozí materiál	860	50	210
SLM	925	32	310
LMD	1073	26	320

## 6 Závěr

V teoretické části této diplomové práce byla nejprve rozebrána problematika aditivních technologií. Podrobněji byly rozebrány jednotlivé metody, které spadají pod tuto technologii. Dále se tato práce zabývá navařováním jako takovým, rozebírá konkrétní druhy navařovacích procesů. Do detailu se práce věnuje navařování plazmatem. Další část rešerše je věnována niklu a jeho slitinám, konkrétně pak slitině Inconel 625, se kterou je pracováno v experimentální části. Je zde výčet jejich složení, vlastností a možné aplikace v průmyslu.

Cílem experimentální části bylo vytvoření 3D struktury ze slitiny Inconel 625. Většina experimentální části se odehrávala na navařovacím automatu PPC 250 R6. Vzhledem k minimálním dostupným informacím o navařování slitiny Inconel 625 plazmatem byla praktická část nejprve věnována nalezení vhodných parametrů pro navařování této slitiny. Na začátku byly navařeny jednoduché lineární návary čítající pět na sebe navařených vrstev. Na základě těchto návarů byly zvoleny vstupní parametry pro následné zkušební návary typu „stěna“. Tyto návary byly navařeny celkem čtyři. Během procesu docházelo k postupné regulaci parametrů na základě průběžně prováděné vizuální kontroly. Z informací získaných během této části experimentu byly navrženy parametry pro vytvoření finální 3D struktury. Navařená struktura čítá celkem 30 na sobě navařených vrstev a dosahuje výšky 30,1 mm. Během celého procesu byla měřena teplota okolního ZM za účelem stanovení míry tepelného ovlivnění okolí.

Výsledný návar byl podroben bližšímu zkoumání. Bylo provedeno několik zkoušek ke zjištění mechanických vlastností. Nejprve byla provedena tahová zkouška, díky které byla stanovena mez pevnosti, mez kluzu a tažnost vytvořeného materiálu. Mez pevnosti je 639 MPa, mez kluzu 474 MPa. Tažnost návaru je pouze 7 %. Tento fakt je dán pravděpodobně tím, že se ve struktuře vyskytují karbidy niobu a molybdenu, ty mohou mít negativní vliv na mechanické vlastnosti struktury. Výskyt těchto karbidů byl zjištěn z provedené SEM zkoušky. Na vzorku návaru byla vyhodnocena mikrotvrdost, průměrná tvrdost napříč vzorku je 200 HV.

Na závěr této práce byly výsledky mechanických vlastností porovnány s materiálem ve výchozí podobě a s výsledky získanými navařením struktury pomocí jiných navařovacích technologií. Hodnoty získané v experimentální části této práce dosahují menších čísel oproti ostatním technologiím i oproti materiálu v původní podobě. Výrazně nižší je především hodnota tažnosti, která je několikanásobně nižší.

Bylo prokázáno, že navařováním jednotlivých vrstev plazmatem je možné vytvořit 3D strukturu typu „stěna“. Pro použití v průmyslovém nasazení je třeba provést další upřesnění parametrů vzhledem ke geometrické přesnosti stěny i vzhledem k nízké tažnosti.

## 7 Bibliografie

- [1] LI, Neng, Shuai HUANG, Guodong ZHANG, Renyao QIN, Wei LIU, Huaping XIONG, Gongqi SHI a Jon BLACKBURN. Progress in additive manufacturing on new materials: A review. *Journal of Materials Science & Technology* [online]. 2019, **35**(2), 242-269 [cit. 2020-02-05]. DOI: 10.1016/j.jmst.2018.09.002. ISSN 10050302. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1005030218301786>
- [2] KUMAR, Sanjay a Sisa PITYANA. Laser-Based Additive Manufacturing of Metals. *Advanced Materials Research* [online]. 2011, **227**, 92-95 [cit. 2020-02-05]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.227.92. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMR.227.92>
- [3] CARDOZO, Eloisa Pereira, Gonçalo Rodrigues PARDAL, Sergio RÍOS, Supriyo GANGULY a Ana Sofia C. M. DOLIVEIRA. Additive Techniques to Refurbish Ni Based Components. *Soldagem & Inspeção*. scielo, 2019, **24**. ISSN 0104-9224.
- [4] Aditivní výroba - moderní způsob obrábění. *AXIOM TECH* [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.axiomtech.cz/25836n-aditivni-vyroba-moderni-zpusob-obrabeni>
- [5] 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]. DOI: 10.1007/s00170-015-7697-7. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-015-7697-7>
- [6] KOLAŘÍK, Ladislav, Karel KOVANDA a Tomáš GURČÍK. *Využití metody robotického navařování - WAAM a porovnání s 3D tiskem kovových materiálů* [online]. In: . [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <file:///F:/Literatura%20DP/Kola%20C5%99%C3%ADk,L,Kovanda,K.,Gur%20C4%8D%C3%ADk,T.%20VYU%20C5%BDIT%20C3%8D%20METODY%20ROBOTICK%20C3%89HO%20AVA%20C5%98OV%20C3%81N%20C3%8D%20%20WAAM%20A%20POROVN%20C3%81N%20C3%8D%20S%203D%20TISKEM%20KOV%20OV%20C3%9DCH%20MATERI%20C3%81L%20C5%AE.pdf>

- [7] LIU, Z.Y., C. LI, X.Y. FANG a Y.B. GUO. Energy Consumption in Additive Manufacturing of Metal Parts. *Procedia Manufacturing* [online]. 2018, **26**, 834-845 [cit. 2020-02-05]. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.104. ISSN 23519789. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978918307753>
- [8] TAMSAOUT, Toufik, Karim KHELOUFI, El Hachemi AMARA, Nana Kwamina ARTHUR a Sisa PITYANA. CFD MODEL OF LASER ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS OF CYLINDERS. *South African Journal of Industrial Engineering* [online]. 2017, **28**(3) [cit. 2020-07-08]. DOI: 10.7166/28-3-1855. ISSN 22247890. Dostupné z: <http://sajie.journals.ac.za/pub/article/view/1855>
- [9] JIAN, Chen. *Hybrid design based on wire and arc additive manufacturing in the aircraft industry* [online]. 2012 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/7863>. Thesis. The Cranfield University. Vedoucí práce Dr. Jörn Mehnert and Dr. Helen Lockett.
- [10] *Principle of 3d printing-Selective laser sintering(SLS)* [online]. [cit. 2020-07-08]. Dostupné z: <https://www.tanerxun.com/principle-of-3d-printing-sls/.html>
- [11] *Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) – Advantages of Wire AM vs. Powder AM* [online]. In: . [cit. 2020-07-08]. Dostupné z: <http://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebam-advantages-of-wire-am-vs-powder-am/>
- [12] DUTTA, B. a F.H. (Sam) FROES. The Additive Manufacturing (AM) of titanium alloys. *Metal Powder Report* [online]. 2017, **72**(2), 96-106 [cit. 2020-07-22]. DOI: 10.1016/j.mprp.2016.12.062. ISSN 00260657. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0026065716305045>
- [13] FRAZIER, William E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2014, **23**(6), 1917-1928 [cit. 2020-07-21]. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11665-014-0958-z>
- [14] HLAVATÝ, Ivo, Jiří HLAVATÝ a Lucie KREJČÍ. Navařování tvrdokovů. *Svět svaru*. Hadyna - International, 2007, **11**, 2. ISSN 1214-4983.

- [15] BAJDA, Miroslav. Navařování kovů. *Svět svaru* [online]. 1996 [cit. 2020-07-22]. ISSN 1214-4983.
- [16] RODRIGUEZ, Johnnatan, Kevin HOEFER, Andre HAELSIG a Peter MAYR. Functionally Graded SS 316L to Ni-Based Structures Produced by 3D Plasma Metal Deposition. *Metals* [online]. 2019, **9**(6) [cit. 2020-02-05]. DOI: 10.3390/met9060620. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/6/620>
- [17] PRUDKÝ, Jan. *Teorie a metodika svařování*. 1. vyd. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1981.
- [18] LÖBL, Karel. *Navařování*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. Knižnice strojírenské výroby, sv. 42.
- [19] MINAŘÍK, Václav. *Obloukové svařování* [online]. 2., aktualiz. vyd. Praha: Scientia, pedagogické nakladatelství, 1998 [cit. 2020-07-22]. ISBN 80-718-3285-5.
- [20] Laser Cladding Services. *Thermal Spray Depot* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <http://www.thermalspraydepot.com/laser-cladding-services/>
- [21] KERÄNEN, Marko. *Effect of welding parameters of plasma transferred arc welding method on abrasive wear resistance of 12V tool steel deposit* [online]. 2010 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/80703740.pdf>. Disertační práce. Aalto University.
- [22] LIU, Zu Ming, ShuangLin CUI, Zhen LUO, ChangZhen ZHANG, ZhengMing WANG a YuChen ZHANG. Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling. *Journal of Manufacturing Processes*. 2016, **23**, 315-327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.04.004>. ISSN 1526-6125. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612516300214>



- [23] SANTOS, Aureliano Xavier dos, Theophilo Moura MACIEL, Josiane Dantas COSTA, Mikarla Baía de SOUSA, Shiva PRASAD, Ana Regina Nascimento CAMPOS a Renato Alexandre Costa de SANTANA. Study on influence of the PTA-P welding process parameters on corrosion behavior of Inconel 625 coatings. *Matéria (Rio de Janeiro)* [online]. 2019, **24**(1), -12282 [cit. 2020-02-05]. DOI: 10.1590/s1517-707620190001.0619. ISSN 1517-7076. Dostupné z: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-70762019000100310&tIng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762019000100310&tIng=en)
- [24] Plasma Transferred Arc Welding. *Total Materia* [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=ES&NM=481>
- [25] KUBÍČEK, Jaroslav. *TECHNOLOGIE II - ČÁST SVAŘOVÁNÍ: SPECIÁLNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ TLAKOVÉ SVAŘOVÁNÍ* [online]. In: . Brno, 2006 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te\\_technologie\\_2\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_specialni_metody_svarovani_kubicek.pdf)
- [26] NAGY, Jason a Xiao HUANG. Assessing the Feasibility of Micro-Plasma Technology for Additive Manufacturing. In: *Volume 6: Ceramics; Controls, Diagnostics, and Instrumentation; Education; Manufacturing Materials and Metallurgy* [online]. American Society of Mechanical Engineers, 2018, s. - [cit. 2020-02-05]. DOI: 10.1115/GT2018-75119. ISBN 978-0-7918-5112-8. Dostupné z: <https://asmedigitalcollection.asme.org/GT/proceedings/GT2018/51128/Oslo,%20Norway/271327>
- [27] ROHAN, Pavel, Ladislav KOLAŘÍK, Tomáš KRAMÁR a Zdeněk KRŠKA. Navařování plazmatem: ochranné povlaky ve výrobě i výzkumu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2015, , 86 [cit. 2020-07-22]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-plazmatem-ochrannepovlaky-ve-vyrobe-i-vyzkumu.html>

- [28] 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. 2020-02-05]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.02.013. ISSN 02578972. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897204001446>
- [29] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-720-4130-4.
- [30] JANOVEC, Jiří, Petr ZUNA a Karel MACEK. *Fyzikální metalurgie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2935-2.
- [31] ANTOSZCZYSZYN, Tiago Jose, Rodrigo Metz Gabriel PAES, Ana Sofia Clímaco Monteiro de OLIVEIRA a Adriano SCHEID. Impact of dilution on the microstructure and properties of Ni-based 625 alloy coatings. *Soldagem & Inspeção* [online]. 2014, **19**(2), 134-144 [cit. 2020-02-05]. DOI: 10.1590/0104-9224/S11902.05. ISSN 0104-9224. Dostupné z: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242014000200005&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242014000200005&lng=en&tlng=en)
- [32] FERREIRA, Luciano da Silva, Karin GRAF a Adriano SCHEID. Microstructure and Properties of Nickel-based C276 Alloy Coatings by PTA on AISI 316L and API 5L X70 Steel Substrates. *Materials Research* [online]. 2015, **18**(1), 212-221 [cit. 2020-02-05]. DOI: 10.1590/1516-1439.332914. ISSN 1516-1439. Dostupné z: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392015000100212&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392015000100212&lng=en&tlng=en)
- [33] KRAMAR, Davorin. *The machinability of nickel-based alloys in high-pressure jet assisted (HPJA) turning* [online]. [cit. 2020-07-08]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-machinability-of-nickel-based-alloys-in-jet-Kramar-Sekuli%20%27ff239d91f49ad5c81ba87fbd4bb251f17c126738#citing-papers>
- [34] Nickel Alloys for Aerospace Applications. *NeoNickel* [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/nickel-alloys-for-aerospace-applications/>

- [35] XU, Fujia, Yaohui LV, Yuxin LIU, Fengyuan SHU, Peng HE a Binshi XU. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Inconel 625 Alloy during Pulsed Plasma Arc Deposition Process. *Journal of Materials Science & Technology*. 2013, **29**(5), 480-488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.02.010>. ISSN 1005-0302. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005030213000388>
- [36] SHANKAR, Vani, K BHANU SANKARA RAO a S.L MANNAN. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy. *Journal of Nuclear Materials*. 2001, **288**(2), 222-232. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(00\)00723-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(00)00723-6). ISSN 0022-3115. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311500007236>
- [37] ABIOYE, T.E., J. FOLKES a A.T. CLARE. A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013, **213**(12), 2145-2151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.06.007>. ISSN 0924-0136. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013613001982>
- [38] Inconel Alloy 625. *Special Metals Corporation* [online]. [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>
- [39] BHARGAVA, P., C. P. PAUL, C. H. PREMSINGH, S. K. MISHRA, Atul KUMAR, D. C. NAGPURE, Gurvinderjit SINGH a L. M. KUKREJA. Tandem rapid manufacturing of Inconel-625 using laser assisted and plasma transferred arc depositions. *Advances in Manufacturing* [online]. 2013, **1**(4), 305-313 [cit. 2020-02-05]. DOI: 10.1007/s40436-013-0044-z. ISSN 2095-3127. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40436-013-0044-z>
- [40] RAJKUMAR, V, T V ARJUNAN a A RAJESH KANNAN. Metallurgical and mechanical investigations of Inconel 625 overlay welds produced by GMAW-hardfacing process on AISI 347 pipes. *Materials Research Express*. IOP Publishing, 2019, **6**(7), 076534. DOI: 10.1088/2053-1591/ab11f0. ISSN 2053-1591. Dostupné také z: <http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/ab11f0>

[41] WANG, J.F., Q.J. SUN, H. WANG, J.P. LIU a J.C. FENG. Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2016, **676**, 395-405 [cit. 2020-03-09]. DOI: 10.1016/j.msea.2016.09.015. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509316310772>

## Přílohy

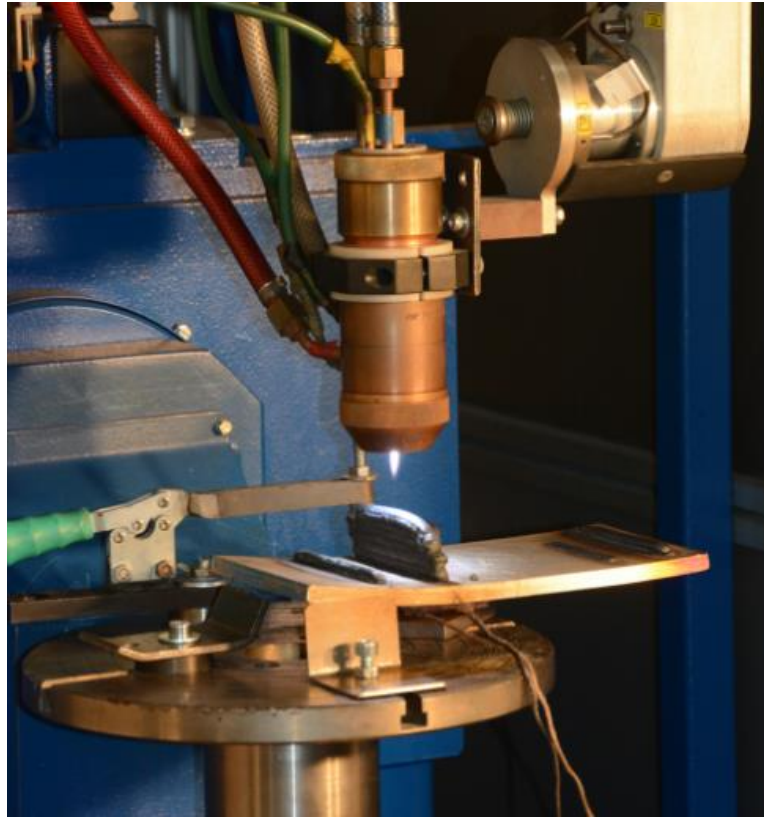
Příloha č.1	Průběh navařovacího procesu - parametry
Příloha č.2	Průběh procesu
Příloha č.3	Navařená 3D struktura
Příloha č.4	Metalografický výbrus – snímky
Příloha č.5	Vzorky pro tahovou a rázovou zkoušku
Příloha č.6	Snímky SEM + zjištěná složení
Příloha č.7	Mikrostruktura

## Příloha č.1 – Průběh navařovacího procesu - parametry

Vrstva [-]	I [%]	Rychlost [%]	Podávání [-]	Výška [mm]
1	120	85	8	-
2	100	85	8	-
3	100	85	8	-
4	100	100	8	5
5	100	100	8	-
6	100	100	8	-
7	100	100	8	-
8	100	100	8	9
9	100	100	8	-
10	100	100	8	-
11	100	100	8	-
12	100	120	8	13,5
13	100	110	6	-
14	100	110	6	-
15	100	110	6	-
16	95	110	6	17,5
17	95	105	6	-
18	95	105	6	-
19	95	105	6	-
20	95	105	6	20
21	85	105	6	-
22	80	105	6	-
23	73	105	6	-
24	85	105	6	24,5
25	80	105	6	-
26	85	120	6	-
27	85	115	6	-
28	85	115	6	27,5
29	73	120	6	-
30	80	120	6	-
31	90	120	6	-
32	85	100	6	30

## Příloha č.2 – Průběh procesu

Navářený zkušební vzorek:

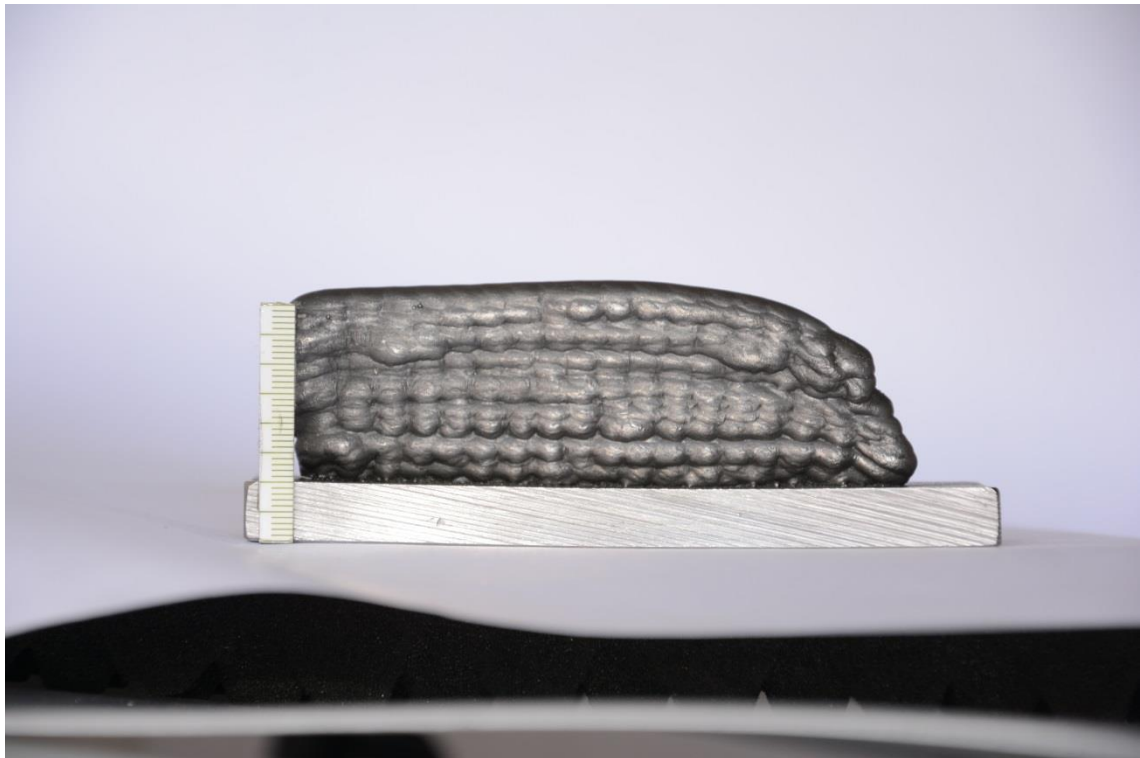


Naváření první série vrstev finálního vzorku:



### Příloha č.3 – Navařená 3D struktura

Výsledný návar – pohled z boku:



Výsledný návar – čelní pohled:



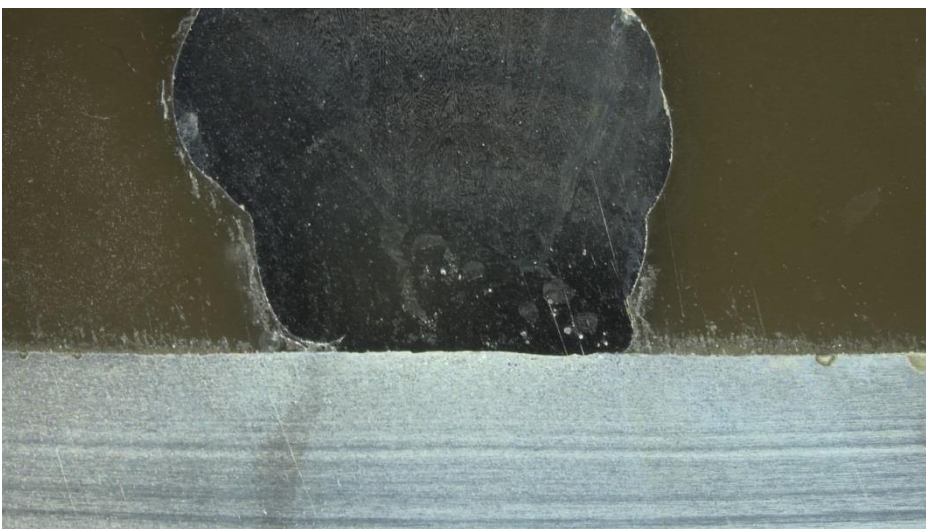
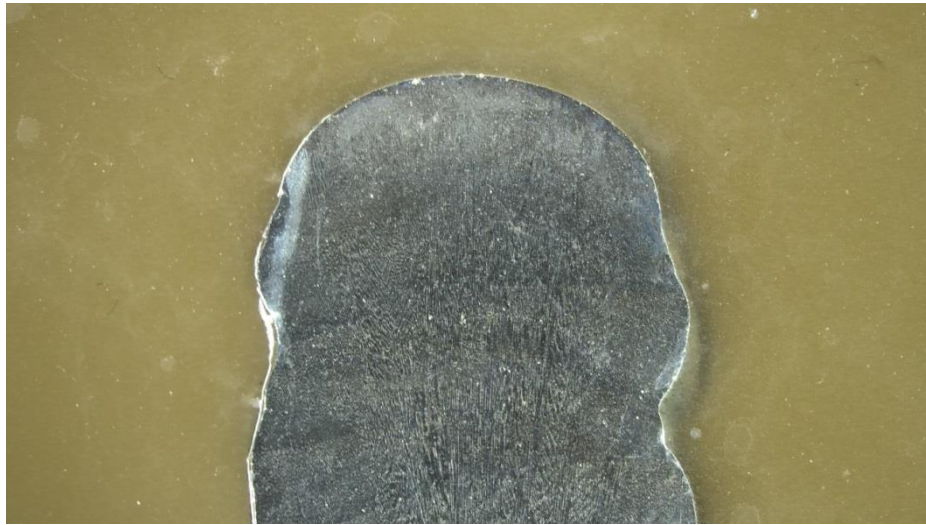


Výsledný návar – šikmý pohled:



#### Příloha č.4 – Metalografický výbrus – snímky

Snímky hlavy, těla a paty vytvořeného návaru.

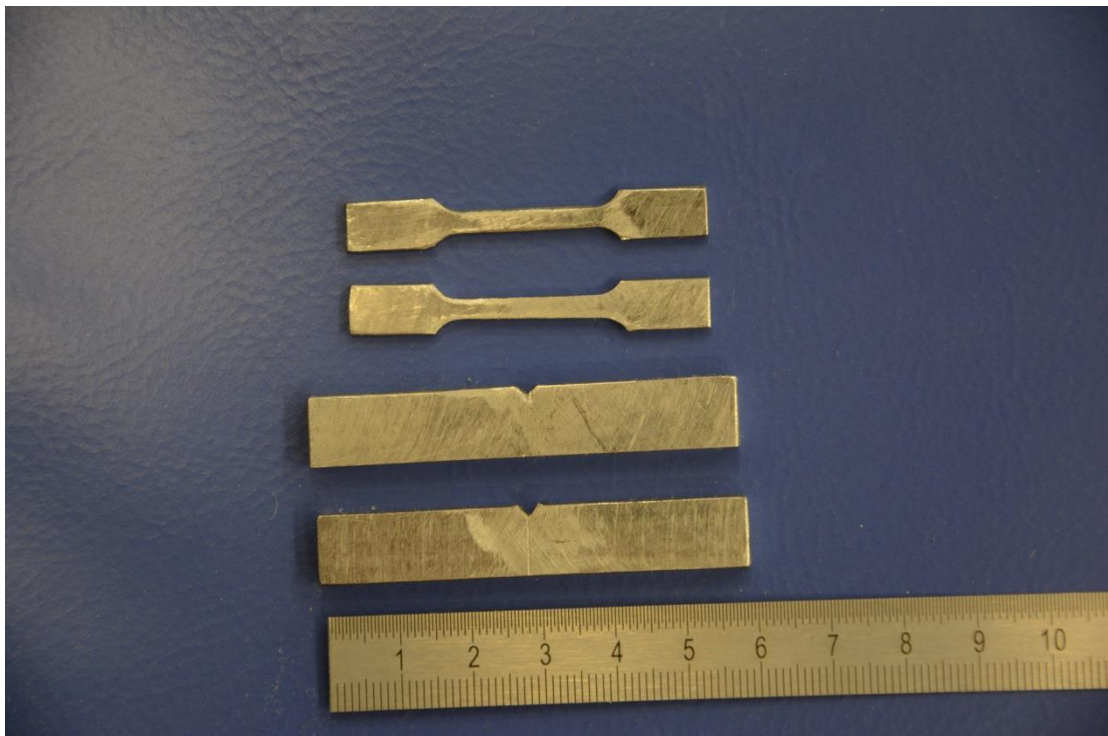


## Příloha č.5 – Vzorky pro tahovou a rázovou zkoušku

Použité vzorky – pohled A:

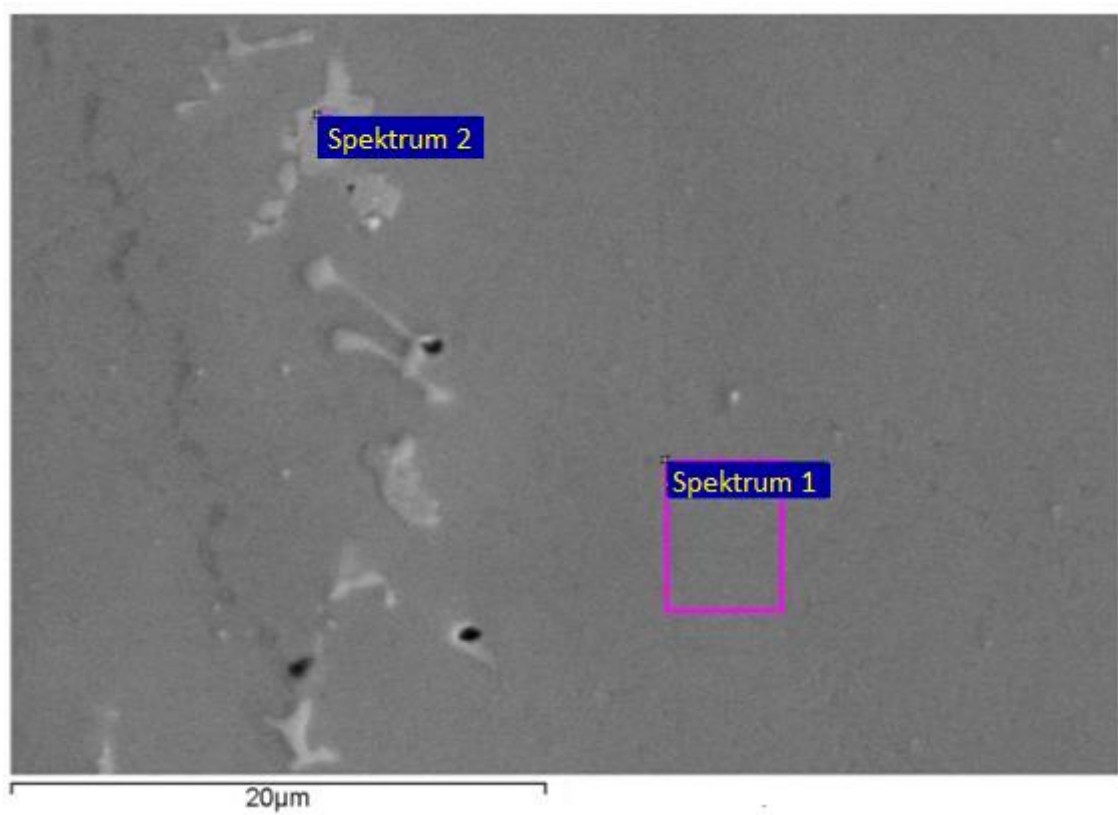


Použité vzorky – pohled B:



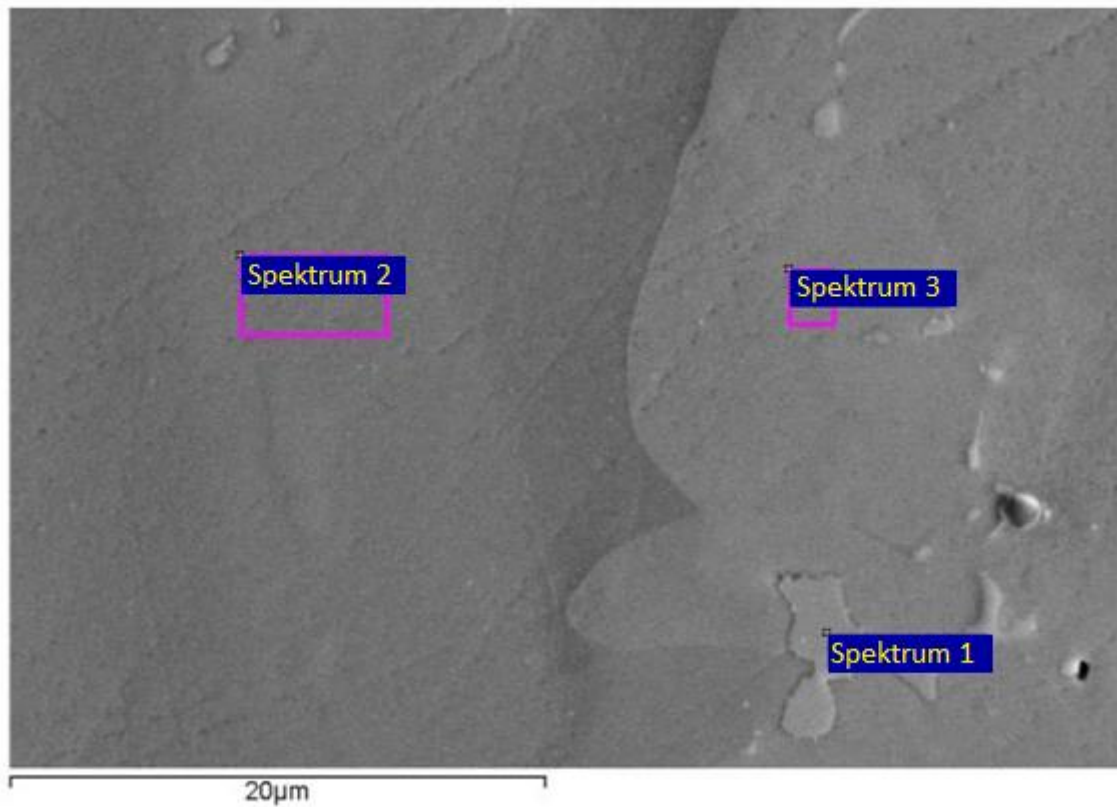
## Příloha č.6 – Snímky SEM + zjištěná složení

Zkouška SEM ve vzdálenosti 6 mm od ZM:



Vzorek	C [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Fe [%]	Ni [%]	Nb [%]	Mo [%]	Celkem [%]
S1	-	0,07	0,31	21,27	3,5	63,19	2,37	9,29	100
S2	6,81	0,14	1,84	12,84	1,66	39,17	17,33	20,22	100

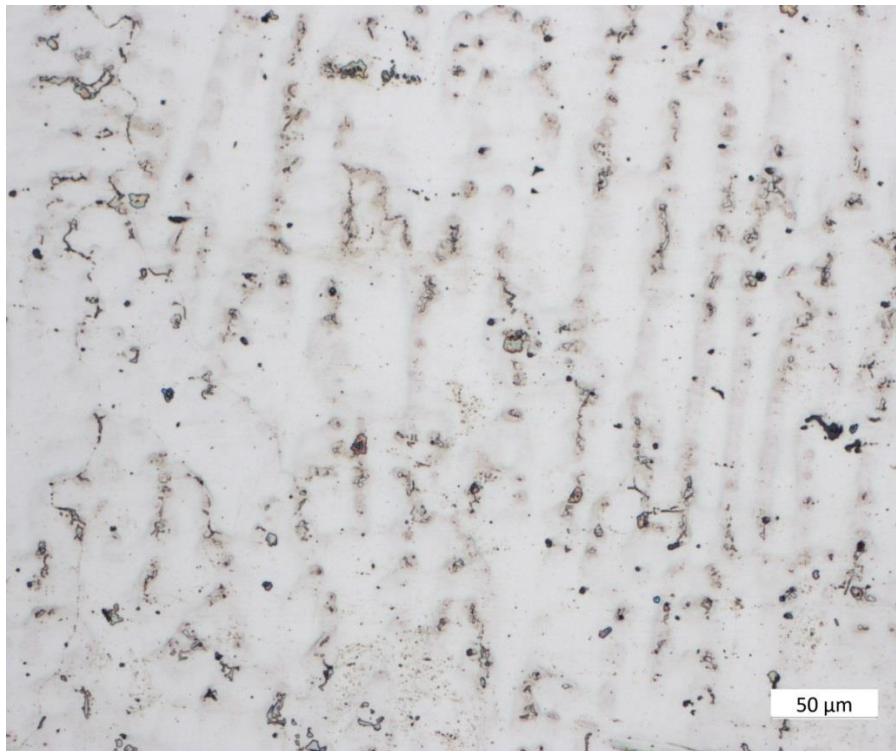
Zkouška SEM ve vzdálenosti 18 mm od ZM:



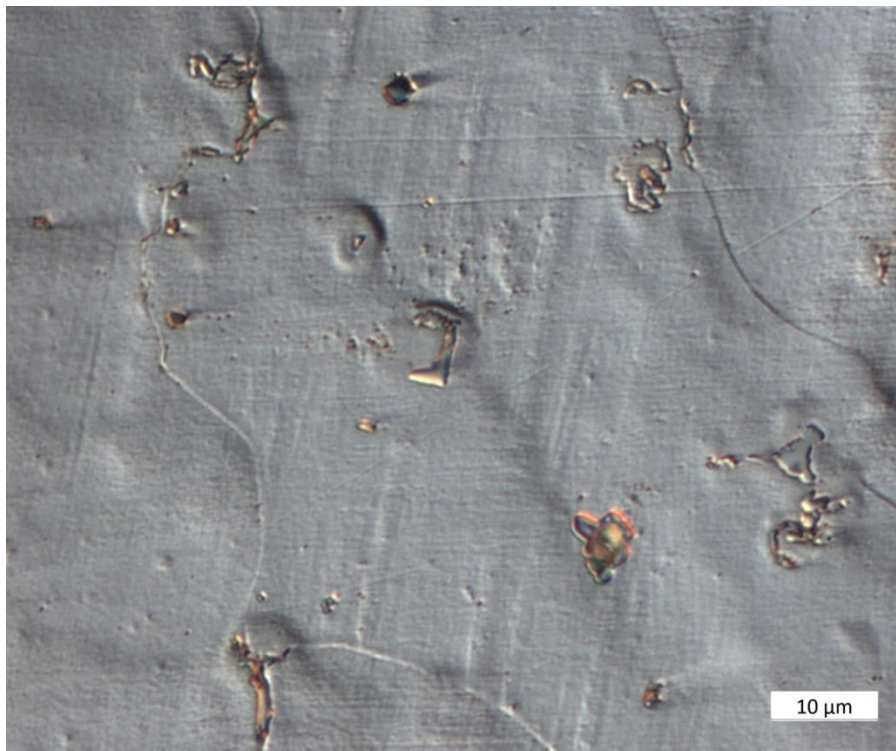
Vzorek	C [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Fe [%]	Ni [%]	Nb [%]	Mo [%]	Celkem [%]
S1	7,29	0,07	1,45	12,97	1,5	39,48	19,55	17,69	100
S2	-	0,06	0,37	20,84	3,14	60,36	4,59	10,63	100
S3	-	0,03	0,42	20,55	3,05	59,75	5,39	10,8	100

## Příloha č.7 – Mikrostruktura

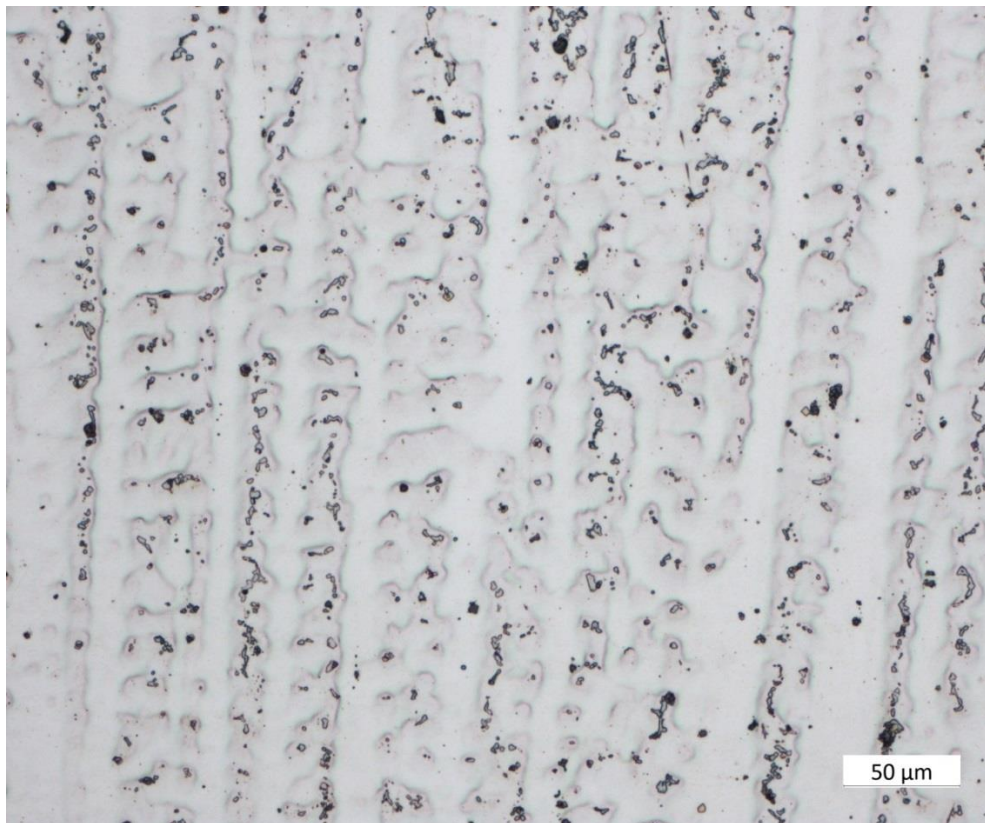
Oblast u paty návaru – zvětšení 200x:



Oblast u paty návaru – zvětšení 1000x:



Oblast u hlavy návaru – zvětšení 200x:



Oblast u hlavy návaru – zvětšení 1000x:

