

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie



ADITIVNÍ VÝROBA POLOTOVARŮ  
PULZNÍ PTA METODOU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Autor:** Bc. Monika Boxanová

**Studijní obor:** Výrobní a materiálové inženýrství

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

Praha 2019

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Boxanová** Jméno: **Monika** Osobní číslo: **439161**  
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:

**Aditivní výroba polotovarů pulzní PTA metodou**

Název diplomové práce anglicky:

**Additive manufacturing by pulsed PTA**

Pokyny pro vypracování:

- provést literární rešerši v oblasti navařování plazmatem, vysokokobaltových slitin a titanu
- navrhnout metodiku optimalizace parametrů při navařování základních tvarů metodou pulzního PTA navařování
- provést experimentální ověření základních parametrů navařování vysokokobaltových slitin a titanu
- vyhodnotit provedené návrhy z hlediska geometrie a základních vlastností struktury

Seznam doporučené literatury:

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:

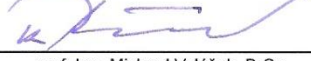
Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2019**

  
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

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna 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.

26.4. 2019  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studentky

## Anotační list

Jméno autora, titul:	Monika Boxanová, Bc.
Název DP:	Aditivní výroba polotovarů pulzní PTA metodou
Anglický název:	Additive manufacturing by pulsed PTA
Rok	2019
Obor studia	Výrobní a materiálové inženýrství
Ústav	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí	Ing. Pavel Rohan, Ph.D., EWE
Konzultant	-
Bibliografické údaje:	Počet stran: 82 Počet obrázků: 40 Počet tabulek: 10 Počet příloh: 8
Klíčová slova	Aditivní technologie, PTA, titan, vysoko-kobaltová slitina
Keywords:	Additive manufacturing, PTA, Titanium, Stellite alloys
Anotace:	Diplomová práce se zabývá problematikou aditivní výroby polotovarů pulzní PTA metodou pro materiály Titan Grade 1 a Stellite. Rešeršní část je zaměřena na úvod do aditivních technologií, dále na problematiku navařování a rozbor titanových a vysoko-kobaltových materiálů. Experimentální část se zabývá určením vyhovujících parametrů plazmového navařování pro vytvoření 3D objektu z výše zmíněných materiálů.
Abstract:	The diploma thesis deals with the issue of additive manufacturing of semi-finished products by using the pulse PTA method for the "Stellite" and Titanium Grade 1 types of alloys. The research part is focused on an introduction to additive manufacturing technologies and further on the issue of welding and on an analysis of the characteristics of titanium materials and materials with cobalt-based materials. The experiment part determines suitable parameters of Plasma Transferred Arc for creating a 3D object from the above-mentioned materials.

## Čestné prohlášení

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

V Praze dne 21. 5. 2019

.....  
podpis

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala panu Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D., EWE za odborné vedení, cenné rady a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Dále děkuji firmě KSK, s.r.o. za možnost pracovat na moderním zařízení.

# OBSAH

Seznam zkratk a symbolů .....	7
Seznam obrázků .....	8
Seznam tabulek.....	10
Úvod a cíl práce.....	11
1 Aditivní technologie .....	13
1.1 Úvod do aditivních technologií.....	13
1.2 LAM (laser additive manufacturing) .....	15
1.3 EBM (electron beam melting).....	16
1.4 SMD (shaped metal deposition).....	16
1.5 Dokončovací operace.....	16
1.6 Materiály v aditivních technologiích.....	17
1.7 Ekonomická stránka aditivních technologií.....	17
1.8 Rizika při 3D tisku kovů. ....	18
1.9 3D navařování.....	18
1.10 Výhody a nevýhody aditivních technologií.....	19
2 Technologie navařování.....	21
2.1 Navařování plamenem.....	22
2.2 Navařování elektrickým obloukem.....	23
2.3 Navařování laserem.....	25
3 Navařování plazmatem.....	26
3.1 Princip plazmového navařování.....	26
3.2 Plazma.....	27
3.3 Plazmový hořák.....	27
3.4 Plyny používané u PTA .....	28

3.5	Přídavný materiál pro PTA.....	29
3.6	Základní materiály pro navařování plazmatem.....	30
3.7	Výhody a nevýhody PTA.....	30
4	Titan .....	31
4.1	Průmyslová výroba titanu .....	31
4.2	Slitiny titanu.....	32
4.3	Svařování titanu .....	33
4.4	Zabarvení titanu .....	35
5	Vysoko-kobaltové slitiny.....	36
5.1	Chemické složení vysoko-kobaltových slitin.....	36
5.2	Vlastnosti vysoko-kobaltových slitin .....	38
5.3	Výroba vysoko-kobaltových slitin.....	38
5.4	Aplikace .....	39
6	Experimentální část .....	40
6.1	Navařovací automat PPC 250 R6 .....	40
6.2	Část 1 - Vysoko-kobaltová slitina.....	42
6.3	Část 2 – Titan Grade 1.....	53
	Závěr .....	64
	Bibliografie .....	66
	Přílohy.....	72

## SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka, symbol	Anglický název	Český překlad
AM	Additive manufacturing	Aditivní technologie
ASTM	American Society for Testing and Materials	Americká organizace pro testování a materiály
DED	Directed energy deposition	Přesné nasměrování energie
EBM	Electron beam melting	Aditivní výroba využívající elektronový paprsek
HV	Vickers hardness	Tvrдость dle Vickerse
$I_{ef} [A]$	-	efektivní proud
IH [A]	-	Horní hodnota proudu
IL [A]	-	Dolní hodnota proudu
LAM	Laser additive manufacturing	Aditivní výroba laserem
LM	Laser melting	Přídavný materiál je taven
LMD	Laser metal deposition	Zdroj energie je určen přímo pro depozici přídavného materiálu
LS	Laser sintering	Přídavný materiál je spékán
MMA	Manual metal arc welding	Svařování ruční elektrodou
MAG	Metal active gas	Svařování se odtavující se elektrodou v aktivním plynu
MIG	Metal inert gas	Svařování se odtavující se elektrodou v inertním plynu
P	-	Podávání
PB	Powder bed systems	Aditivní výroba využívající přídavný materiál ve formě prášku
PTA	Plasma transferred arc	Navařování plazmatem s přeneseným obloukem
PM	-	Přídavný materiál
PW	Wire feed systems	Aditivní výroba využívající přídavný materiál ve formě drátu
SAW	Submerged arc welding	Svařování pod tavidlem
SMD	Shaped metal deposition	Aditivní výroba využívající elektrický oblouk
TIG	Tungsten inert gas	Svařování neodtavující se elektrodou v inertním plynu
WAAM	Wire and arc additive manufacturing	Aditivní technologie ve spojení s navařováním odtavující se elektrodou
ZM	-	Základní materiál



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Dekorativní předmět vytvořený Bakerem [4] .....	13
Obrázek 2. technologie LAM.....	15
Obrázek 3. Technologie LS .....	15
Obrázek 4. Svařovací roboty [58] .....	19
Obrázek 5. Navařování plamenem doleva a doprava .....	22
Obrázek 6. Navařování obalenou elektrodou .....	23
Obrázek 7. Navařování MIG/MAG .....	24
Obrázek 8 Navařování metodou TIG.....	24
Obrázek 9. Navařování pod tavidlem.....	25
Obrázek 10. Navařování pod tavidlem.....	25
Obrázek 11. Schéma plazmatronu .....	28
Obrázek 12. Ukázka navařených povlaků metodou PTA [Krška Zdeněk, KSK, s.r.o.] .	30
Obrázek 13. Základní druhy binárních rovnovážných diagramů titanu [28] .....	33
Obrázek 14. Komory určené pro ruční svařování titanu a jeho slitin [59] [60] .....	34
Obrázek 15. Příklady svařování titanu [61] [62] .....	35
Obrázek 16. Barevný titan pomocí anodizace [38] .....	35
Obrázek 17. Stellite 6 a Stellite 2 [3] [42] .....	36
Obrázek 18. Svařovaná struktura slitiny Stellite 6 [40].....	39
Obrázek 19. 1000x zvětšená struktura Stellite 6 na elektronovém mikroskopu [40] ....	39
Obrázek 20. Navařovací automat PPC 250 R6 .....	40
Obrázek 21. Osy navařovacího automatu PPC 250 R6 .....	42
Obrázek 22. Parametrické pole pro osmnáct zkušebních navařů .....	43
Obrázek 23. Umístění základního materiálu na navařovacím automatu .....	44
Obrázek 24. Základní materiál s navařenými zkušebními navařmi A - I .....	45
Obrázek 25. Základní materiál s navařenými zkušebními navařmi J - R.....	45
Obrázek 26. Znázorněná plocha obsahu plochy.....	47
Obrázek 27. Finální 3D objekt z vysoko-kobaltové slitiny, boční pohled .....	51
Obrázek 28. Finální 3D objekt z vysoko-kobaltové slitiny, pohled shora.....	51
Obrázek 29. Průběh tvrdosti pro vzorek Celsit V-P stěna.....	52
Obrázek 30. Spodní a horní část přípravku [56] .....	55

Obrázek 31. Přípravek umístěný na navařovacím automatu [56].....	56
Obrázek 32. Výkres přípravku pro navařování citlivých slitin .....	57
Obrázek 33. Procentuální pokles obsahu O <sub>2</sub> v přípravku [56].....	58
Obrázek 34. Procentuální pokles obsahu CO <sub>2</sub> v přípravku [56].....	58
Obrázek 35. Průběh teploty při navařování třívrstvého návaru .....	59
Obrázek 36. Návar a a návar B.....	60
Obrázek 37. Další zkušební návary Titanu Grade 1.....	61
Obrázek 38. 3D objekt Titan stěna .....	62
Obrázek 39. Průběh mikrotvrdosti vzorku Titan blok.....	62
Obrázek 40. Mikrotvrdoměr IndentaMET 1104 (Buehler) a pohled na vzorek při probíhající měření mikrotvrdosti.....	63

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Ionizační energie plazmových plynů [23] .....	29
Tabulka 2. Chemické složení vysoko-kobaltové slitiny Stellite 6 [40] .....	37
Tabulka 3. Rozsah jednotlivých os.....	41
Tabulka 4. Směrná chemická analýza prášků, uvedeno v % [51].....	42
Tabulka 5. Hodnoty proudu pro jednotlivé vrstvy návaru .....	44
Tabulka 6. Tabulka pro hodnocení návarů.....	48
Tabulka 7. Tabulka pro finální parametry .....	48
Tabulka 8. Fotografie kruhových návarů .....	50
Tabulka 9. Chemické složení přídatného materiálu Titan Grade 1 uvedené v hmotnostních % [54] [55] .....	53
Tabulka 10. Navařovací parametry [56].....	60

## ÚVOD A CÍL PRÁCE

Aditivní výroba neboli 3D tisk, je proces výroby fyzického předmětu na základě modelu v digitální podobě. Postupným vrstvením jednotlivých vrstev je dosaženo požadovaného výsledného tvaru součásti. 3D tisk lze nazývat také přímou digitální výrobou, protože tento proces vyplývá z přechodu od digitálního návrhu výrobku k hotovému fyzickému produktu. Výroba aditivními technologiemi zažívá v posledních letech opravdový rozmach. I když se může zdát, že se jedná o zbrusu novou technologii, v přírodě tato technologie není ničím výjimečná. Měkkýši a korálnatci si pomocí „3D tisku“ staví svá obydlí, včely budují voskové plástve a lidské kosti vyrůstají z růstové chrupavky aditivním procesem. Všechny tyto „výrobky“ mají optimální funkční design pro konkrétního uživatele. Vytvoření produktu, který by měl ve své finální podobě požadovaný vzhled a funkčnost, je snahou i moderních aditivních technologií. [1] [2]

V současné době jsou aditivní technologie limitovány velikostí výrobních strojů, omezenou škálou základních materiálů, pomalostí výroby a nízkou 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“. [2]

Navarování plazmatem (PTA) je jednou z perspektivních a investičně méně náročných metod aditivních technologií. Přídavným materiálem je zpravidla prášek, který je unášen podávacím plynem do proudu plazmatu. Teplem plazmatu dochází k natavení prášku a vytvoření návarové vrstvy. Navarováním vrstvy po vrstvě vzniká homogenní struktura bez porozity a v případě použití pulzního plazmatu i s minimálním promísením se základním materiálem, resp. předcházející vrstvou.

Vysoko-kobaltové slitiny jsou slitinami kobaltu a chromu a vyznačují se zvýšenou odolností proti mechanickému i chemickému opotřebení při nepříznivých podmínkách za vysokých teplot. V průmyslové praxi se označují pod názvem Stellite [3].

Titan a jeho slitiny se pro jejich vysokou pevnost při nízké měrné hmotnosti využívají v medicíně nebo letectví. Výroba polotovarů z čistého titanu nebo z jeho slitin

je vysoce náročná vzhledem citlivosti k titanu na kyslík, k požadavkům na výsledné chemické složení a strukturu. Při zpracovávání titanu a jeho slitin za vyšších teplot je nutné zajistit dokonalou plynovou ochranu materiálu inertními plyny před okolní atmosférou. V oblasti svařování a navařování jsou v průmyslové praxi používány komory se stálým průtokem ochranné atmosféry. Tyto komory jsou ale určeny pouze pro ruční svařování a navařování, pro plně automatizované procesy jsou svařovací komory konstruovány tak, aby se do nich dalo uzavřít celé pracoviště.

Cílem mé diplomové práce je teoretické seznámení se s problematikou aditivních technologií, technologií navařování plazmatem a dále s materiály vysoko-kobaltových slitin a titanu. Experiment je zaměřen na úspěšné navaření 3D objektů z vysoko-kobaltové slitiny Stellite 6 a Titanu Grade 1. Nejprve je nutné nalézt správné parametry navařování a navrhnout vhodný tvar 3D objektu. Pro zpracování titanu bude nutné navrhnout a zkonstruovat přípravek pro jeho navařování v ochranné atmosféře argonu.

# 1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

## 1.1 Úvod do aditivních technologií

Historie 3D technologie zpracování kovů se datuje do roku 1920, kdy Američan Baker použil elektrický oblouk a odtavující se elektrodu pro vytvoření dekorativních předmětů (viz Obrázek 1). Dnešní aditivní technologie jsou založeny na stejném principu. [4]



Obrázek 1. Dekorativní předmět vytvořený Bakerem [4]

Společnost ASTM (americká organizace pro testování a materiály) definuje aditivní výrobu jako „proces spojování materiálů pro vytváření objektů z dat 3D modelu, obvykle vrstvy na vrstvě“ [1]. Tato definice je obecně použitelná pro všechny třídy materiálů, včetně kovů, keramiky, polymerů, kompozitů a biologických systémů. Cílem aditivní výroby je snížení nákladů a zvýšení efektivity. V dnešní době se aditivní technologie používají především při vývoji nových produktů, v následujících letech mají ale potenciál revoluce v oblasti globální výroby a logistiky. 3D technologie umožňují distribuovanou výrobu, kusovou výrobu a zároveň nabízí potenciál ke snížení nákladů, spotřeby energie a uhlíkové stopy. Dále se používají například pro výrobu forem pro odlévání a vstřikování, v leteckém průmyslu a zdravotnictví. [5]

Nezanedbatelnou oblastí využití technologií AM (additive manufacturing) je obnova opotřebených součástí nanesením náhradního materiálu v místech opotřebení a do tvaru, který je blízký původní součásti. [6]

Použití 3D tisku pro již vyráběný produkt vyžaduje změnu v jeho konstrukci a ve výrobním i technologickém postupu. Z hlediska morfologie tvaru výrobků jsou možnosti 3D tisku takřka neomezené. Často se v této souvislosti hovoří o organických

tvarech, které jsou inspirovány přírodou. V dnešní době však nelze realizovat výrobu výsledného produktu s plynule se měnícími materiálovými vlastnostmi. [2]

Všechny metody aditivních technologií se rychle rozvíjejí, jsou neustále vylepšovány a jsou vyvíjeny nové kombinace materiálů pro 3D tisk. Byly provedeny případové studie poukazující na to, že aditivní technologie mohou umožnit tzv. „zelenou výrobu“. Základní oblastí využití aditivních technologií jsou unikátní aplikace, které nemohly být vyrobeny pomocí standardních postupů výroby. 3D tiskem lze vytvořit na míru šité zdravotnické implantáty nebo pokročilé lopatky turbín se speciálně navrženými chladičnými kanálky. Pro plné využití možností aditivní výroby je však potřeba porozumět mikrostruktuře materiálu vyplývající z určitého cyklu tepelného zpracování. [1]

Aditivní technologie lze rozdělit dle použitého materiálu, zdroje energie, objemu stavby atd. Obecně lze říci, že přídavný materiál požadovaných vlastností je vrstven pomocí tepelného zdroje a spékán tak, aby se výsledný výrobek co nejvíce podobal finální součásti. V oblasti 3D tisku kovových materiálů se v technické praxi ustálilo dělení dle tepelného zdroje a podle druhu přídavného materiálu.

Dle tepelného zdroje se AM technologie dělí na: [5] [7]

- LAM (laser additive manufacturing) využívající laserový paprsek,
- EBM (electron beam melting) využívající elektronový paprsek,
- SMD (shaped metal deposition) využívající elektrický oblouk.

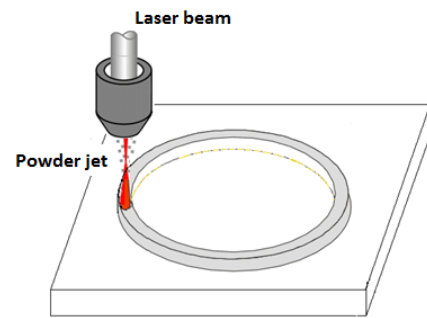
Dle přídavného materiálu je lze rozdělit do dvou základních kategorií: [8]

- PB (powder bed systems), přídavný materiál ve formě prášku,
- WB (wire feed systems), přídavný materiál ve formě drátu.

Všechny tyto skupiny prochází v posledních letech velmi dynamickým vývojem, mají svá specifika, výhody a nevýhody.

## 1.2 LAM (laser additive manufacturing)

Jedná se o technologii, kdy je jako tepelný zdroj používán laserový paprsek a přídavný materiál je ve formě prášku. Dělí se na tři metody, z nichž každá má své specifické vlastnosti z hlediska zpracování, přídavných materiálů a finálního použití. [7]



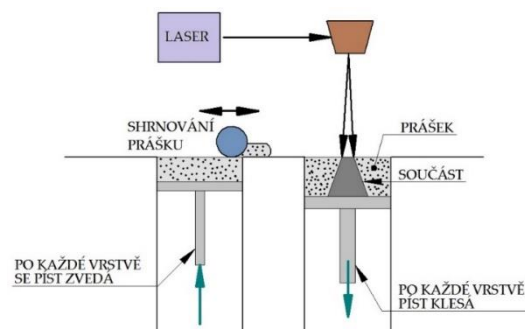
Obrázek 2. technologie LAM

### 1.2.1 LM (laser melting)

U technologie laserového tavení dochází k roztavení přídavného materiálu ve formě prášku a následně dochází ke spojení na atomové úrovni. Proto je tato metoda vhodná pouze pro homogenní přídavné materiály, jelikož lze uvažovat jen jednu teplotu tavení. Kovový prášek je nanášen po celé ploše pracovní desky a ke spékání dochází pouze na požadovaných místech. Zařízení pro LM je složeno z laseru, automatického zařízení pro vrstvení a shrnování prášku, dále z řídicího počítače a pomocných zařízení. Technologie LM byla vyvinuta v roce 1995 na Institutu Fraunhofer ILT. [7]

### 1.2.2 LS (laser sintering)

Technologie LS (viz Obrázek 3) je založena na spékání přídavného 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 přídavné prášky, není však dosaženo finální homogenní struktury. [7]



Obrázek 3. Technologie LS



### 1.2.3 LMD (laser metal deposition)

LMD je oproti technologiím LM a LS rozdílná v nanášení kovového prášku, kdy je prášek nanášen pomocí speciální hlavy přímo do místa spékání. Je jednou z technologií z oblasti “direct energy” technologií, využívající zdroj energie přímo pro depozici přídavného materiálu. Pracovní komora tudíž nemusí být zaplněna zcela inertním plynem a chybí zde zařízení pro vrstvení a shrnování prášku. Stejně jako u metody PM je vhodné použít homogenní materiál, aby došlo k dokonalému propojení. [7]

### 1.3 EBM (electron beam melting)

Technologie EBM pracuje na bázi elektronového paprsku jako tepelného zdroje. V pracovním prostoru není pro ochranu materiálu využíváno inertních plynů, ale vakua. Nedochozí tak ke zpomalování elektronů při průletu okolní atmosférou. Přídavným materiálem je kovový prášek, který je nanášen vysokou rychlostí. Výrobky vytvořené touto technologií mají vysoce kvalitní strukturu s vysokou pevností a minimálním znečištěním. [7]

Tento proces je využíván především v kosmickém a lékařském průmyslu pro výrobu přesných titanových součástí. Nejčastější velikost výrobků je 5–10 cm. [7]

### 1.4 SMD (shaped metal deposition)

Technologie SMD využívá za přídavný materiál kovové svařovací dráty. Tepelným zdrojem je elektronový paprsek, elektrický oblouk, plazma nebo laser. Titanové slitiny vyrobené touto technologií neobsahují póry, tažnost a výsledné náklady jsou ovlivněné zejména rychlostí depozice. Hlavním zástupcem této metody je technologie WAAM (wire arc additive manufacturing) využívající jako tepelný zdroj elektrický oblouk. [7]

### 1.5 Dokončovací operace

Většina součástí vyráběná pomocí aditivních technologií potřebuje dokončovací operace, tzv. post-processing, pro vytvoření kvalitního povrchu a přesnosti tvaru. Dokončovací operací může být například obrábění, které může být ale náročné vzhledem k odlehčeným tenkostěnným konstrukcím nebo složitým tvarům. Je proto

nutné vyrobít odlehčené součásti dostatečně tuhé, aby odolaly mechanickému zatížení při dokončovacích operacích. Dalšími dokončovacími operacemi jsou povrchové úpravy materiálu, jako je leštění, tryskání, pískování nebo galvanické pokovování. Leštěním lze dosáhnout velmi malých úběrů materiálu, a proto je zařazeno do obráběcích operací. Tryskání a pískování se používá ke zlepšení vlastností povrchu a ke zvýšení čistoty dílů. [1] [9]

## 1.6 Materiály v aditivních technologiích

Vzhledem k vysoké ekonomické náročnosti je výhodné použít AM hlavně pro materiály a výrobky s vysokou přidanou hodnotou – například pro výrobky se složitým tvarem. Další výhodné použití je při tvorbě výrobků z materiálů, jejichž zpracovatelnost je klasickými technologiemi obtížná. Těmto charakteristikám odpovídají tvarově složitě součásti z titanu a jeho slitin.

Součásti z titanu vyrobené aditivní technologií se poprvé objevily v roce 1997 ve společnosti Aeromet (Velká Británie), která se zaměřovala na technologii DED (directed energy deposition) rozměrných komponentů pro kosmonautiku a na technologii EBM (electron beam melting) pro medicínské komponenty. Vzhledem k ekonomické stránce začala být aditivní výroba součástí z titanu a jeho slitin směřována na díly pro letectví, kosmonautiku a lékařské aplikace. [10]

## 1.7 Ekonomická stránka aditivních technologií

3D tisk je atraktivní volbou pro kusovou výrobu ve srovnání s běžnými výrobními postupy, jako je kování, protlačování, odlévání apod. Pro velkokapacitní sériovou výrobu není v dnešní době aditivní výroba výhodná. Při kusové výrobě může být na jedné součásti uspořeno až 50 % celkové částky v porovnání s výrobou konvenčními technologiemi. Výslednou cenu výrobku ovlivňuje i velikost a kvalita použitého prášku. Díky možnosti výroby dutých výrobků dojde k úspoře hmotnosti a materiálu. Příkladem může být výměna ocelové spony pro sedadlo v letadle dutou sponou z titanové konstrukce. Dojde tak ke snížení hmotnosti o 55 %. Pro letadlo Airbus A380 se 853 místy k sezení dojde v rámci nákladů k ušetření 3 milionů dolarů na životnost letadla, kdy cena spon pro všechna sedadla je 256 000 dolarů. [10] [1]

## 1.8 Rizika při 3D tisku kovů.

Jsou známa čtyři hlavní rizika, která vznikají při procesu 3D tisku kovů: požár a exploze, inhalace a kontakt s práškem, zadušení plynem a dopad vzniklého odpadu na životní prostředí. Částice v kovovém prášku mají sférický tvar a rozměrově se pohybují v rozmezí 10–70  $\mu\text{m}$ . Tato velikost odpovídá prachovým částicím, které mohou na lidský organismus nepříznivě působit tím, že se usazují na kůži, sliznicích, spojivkovém vaku a v neposlední řadě také v plicích. Při dlouhodobém kontaktu a inhalaci může dojít k závažným zdravotním komplikacím jako je karcinogenní onemocnění. Prevencí před zdravotními riziky je striktní dodržování pravidel pro používání osobních ochranných pomůcek, nošení nehořlavého bezpečnostního obleku, včetně respirátoru a dalších prostředků. [11]

## 1.9 3D navařování

Navařování je v aditivních technologiích prováděno pomocí automatizovaných strojů nebo robotů. V dnešní době se svařovací roboty využívají převážně pro svary na jednoduchých konstrukcích v sériové výrobě. Na rozdíl od 3D tiskáren nejsou používány kovové prášky o velikosti prachových částic, snižuje se zde proto zdravotní riziko pro lidský organismus. Nejpoužívanější technologií 3D navařování je WAAM technologie.

Milníkem v technologii 3D tisku svařovacím robotem je lodní šroub o váze 400 kg a rozměru 1350 mm, který byl vyroben v roce 2017. Výrobek prošel technologickými zkouškami a od roku 2018 je testován v reálném provozu. Byla použita technologie svařování WAAM, použitý svařovací robot od společnosti RAMLAB dokáže vytisknout předměty o maximálních rozměrech 7x2x2 m. Tento výrobek dokazuje, že v blízké době budou 3D technologie svařování využívány ve stále větší míře. [12]

### 1.9.1 WAAM (Wire and arc additive manufacturing)

WAAM je technologie vyvinutá na konci 20. století v Anglii. Pracuje na principu kladení jednotlivých návarových housenek, kde vrstvení je naprogramováno do řídicí jednotky víceosého robota (viz Obrázek 4) nebo portálového automatu. Dalším potřebným vybavením je svařovací zdroj, svařovací hořák a systémy pro podávání drátu. Přídavným materiálem je drát a lze navařovat i heterogenní přídavné materiály. V současné době je technologie WAAM se zvyšující se tendencí využívána v leteckém průmyslu z důvodu snižování množství odpadu při výrobě. Pomocí WAAM lze předpokládat snížení hmotnosti letadla až o 30 %. [13]



Obrázek 4. Svařovací roboty [58]

### 1.10 Výhody a nevýhody aditivních technologií

Technologie AM umožňuje vyrobit součásti, které nelze vyrobit jiným způsobem. Proces výroby součásti může být plně automatizovaný a může probíhat s minimální produkcí odpadu. Výhodou je možnost nahrazení soustavy dílů jedním extrémně komplikovaným dílem a možnost vyrobení funkčního vzorku během několika hodin. Při konstrukci není třeba hledět na složitost výroby. Výrobní náklady na tvarově složité součásti jsou podobné jako na jednoduché součásti, kde o nákladech rozhoduje především doba stavění (tj. výška a průřez součásti). Výroba aditivními technologiemi je všestranná – je možné vyrobit různé tvary. Aditivními technologiemi jsou produkovány přímo komplexní součásti. [2] [9]

Nevýhodou AM je, že při procesu stavění nelze měnit plynule přídavné materiály. AM není vhodné pro jednoduché součásti, jelikož doba výroby je delší než u konvenčních technologií. Výroba složitějších výrobků vyžaduje umístění podpěr, jinak dojde k deformaci výrobků. Odladění stroje a programu může být složitější než u konvenčních technologií.

## 2 TECHNOLOGIE NAVAŘOVÁNÍ

*„Navařování kovů je obdoba svařování, kdy se v omezeném prostoru dané součásti nanáší přídavný materiál za účelem doplnění nebo zvětšení objemu součásti s cílem dosáhnout ochrany proti korozi, nebo zvýšení odolnosti proti opotřebení, případně z jiných důvodů.“ [14]*

Technologie navařování je metalurgický proces, při kterém dochází k natavení základního a přídavného materiálu. Při procesu se tvoří tavná lázeň a na základním materiálu se po ochlazení vytváří povlak (návar) s požadovanými vlastnostmi. K natavení materiálů dochází působením vnějšího zdroje tepla. Jako zdroj tepla se používá plamen hořlavého plynu ve směsi s kyslíkem, elektrický oblouk, laser, plazma nebo obloukový výboj. Navařovací proces lze rozdělit dle použitého zdroje tepla potřebného k natavení přídavného a základního materiálu na jednotlivé technologie. Volba technologie navařování má vliv na efektivitu a dobu výroby a její špatné zvolení může vést až ke znehodnocení součásti. [15]

Teplota tavení přídavného materiálu musí být stejná, nejlépe nižší, než je teplota tavení základního materiálu. V opačném případě je navařování velmi problematické, ne-li nemožné. V posledních letech se však začínají vyskytovat práce ukazující, že za určitých navařovacích parametrů lze navařit povlak o vyšší teplotě tavení, než má základní materiál. [15]

V průmyslu se navařování využívá v opravárenství, v údržbě, pro zvýšení životnosti funkční plochy nebo jako prostá obnova poškozené součásti. U prodloužení životnosti funkční plochy se používá návarový kov o vyšší kvalitě, než je základní materiál renovované součásti. [15] [16]

Výhodou navařování je jeho produktivita při použití vysoce výkonných zdrojů tepla, což je využitelné především v sériové výrobě. Proces je také možné automatizovat. Ruční navařování je nenáročné na samotné provedení svaru a pořizovací náklady, ale vyznačuje se nízkou produktivitou, proto je využíváno především v kusové výrobě a opravárenství. Tvrdost navařeného povlaku je zpravidla vyšší než základního materiálu. [15]

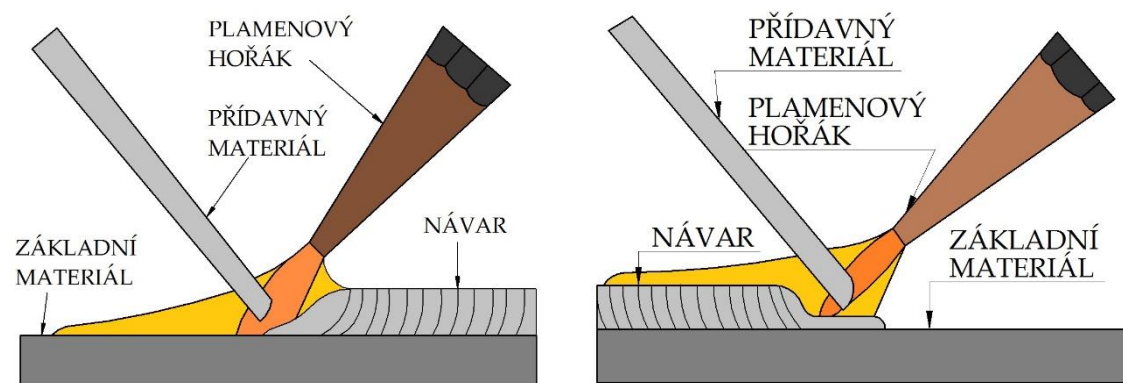
Nevýhodou navařovacího procesu je značné tepelné ovlivnění základního materiálu, ve kterém kvůli působení tepla dochází ke změně struktury. Návarový

materiál je také téměř vždy kontaminován základním materiálem, čímž dochází ke snížení požadovaných vlastností povlaku. Pro dosažení požadované rozměrové přesnosti a drsnosti je nutno navařený povlak po ukončení procesu obrábět. [15] [16]

## 2.1 Navařování plamenem

Navařování plamenem je snadno proveditelná, ekonomicky nenáročná, rychlá a jednoduchá technologie. Řadí se mezi nejrozšířenější technologie navařování. Je zde však zpravidla nutný vysoký předehřev materiálu a kvůli velkému působení tepla zde dochází ke tvarovým deformacím materiálu a k objemovým změnám. Výsledný výrobek je proto nutné po navaření obrobit. Díky pomalému ochlazení výsledného navařeného povlaku nedochází k praskání návaru. [15] [17]

Navařené povlaky slouží zpravidla pro zvýšení odolnosti povrchu před mechanickým opotřebením. Pro vytvoření navařeného povlaku se tedy nejčastěji používají slitiny kovů s vysokou tvrdostí. Pro správné provedení metody je nutné dodržet základní zásady a postupy, například: plochy určené k navařování musí být dokonale čisté a hladké. Hrubý povrch může způsobit kontaminaci navařeného povlaku základním materiálem. Zdrojem tepla je kyslíko-acetylenový plamen. Navařování plamenem se provádí směrem doleva a směrem doprava (viz Obrázek 5). [15] [17]



Obrázek 5. Navařování plamenem doleva (obrázek vlevo) a doprava (obrázek vpravo)

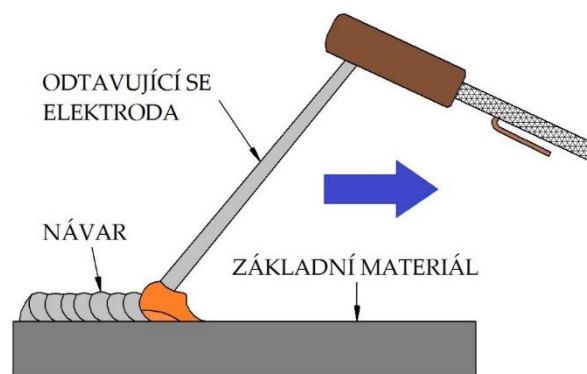
## 2.2 Navařování elektrickým obloukem

Tato technologie je vhodná pro navařování tvrdých slitin na rozměrné součásti a pro navařování rozměrných ploch s nepravidelně opotřeбенým povrchem. Protože při procesu navařování elektrickým obloukem dochází ke značné kontaminaci návarového kovu základním materiálem, je doporučeno nanést nejprve tenkou vrstvu návarového kovu a poté nanést finální vrstvu o odpovídající požadované tloušťce. [15]

U zapojení elektrického oblouku lze použít stejnosměrný i střídavý elektrický proud. Do technologie navařování elektrickým obloukem řadíme navařování ruční obalenou elektrodou (MMA), navařování odtavující se elektrodou (MIG/MAG), navařování neodtavující se elektrodou (TIG), navařování pod tavidlem (SAW), navařování laserem a navařování plazmatem. [18]

### 2.2.1 Navařování ruční obalenou elektrodou (MMA)

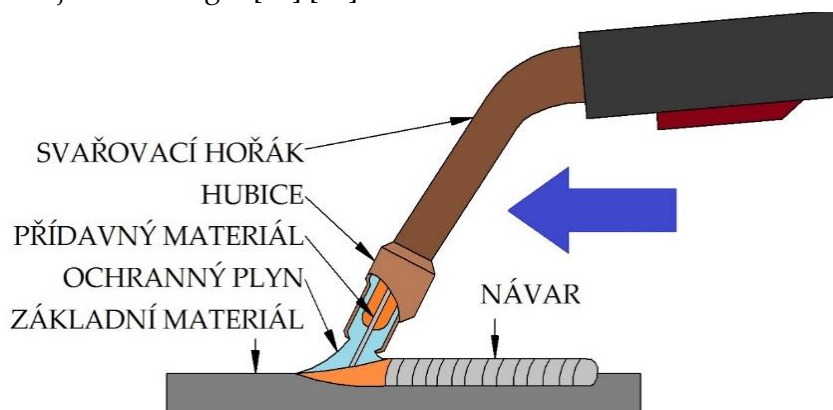
Obalené elektrody se pro navařování používají ve třech provedeních, a to s bazickým, kyselým nebo rutilovým obalem. Legující prvky jsou zpravidla obsaženy v jádře elektrody, u určitých aplikacích se ale používá i přilegování obalem. K ochraně svarové lázně a výsledného návaru slouží struska, vznikající 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. Použití této technologie je pro svoji jednoduchost a nízké provozní náklady především v opravárenství. Schéma pro navařování ruční obalenou elektrodou je na Obrázku 6. [15] [17] [19]





### 2.2.2 Navařování odtavující se elektrodou (MIG/MAG)

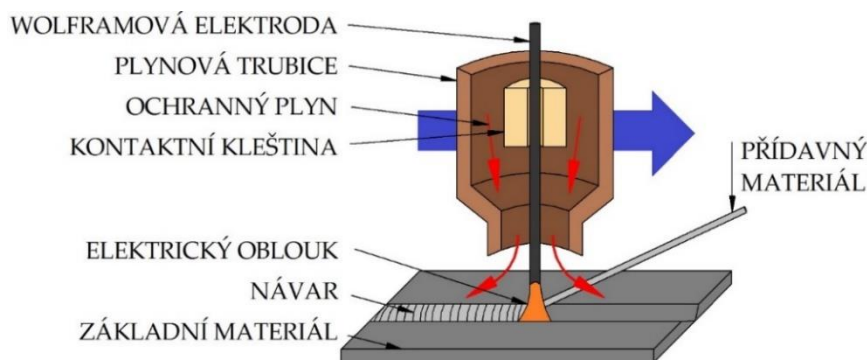
Technologie MIG/MAG (viz Obrázek 7) je založena na navařování odtavující se elektrodou v ochranném plynu. Metoda MAG používá aktivní plyny (argon + O<sub>2</sub>, argon + CO<sub>2</sub>, čistý CO<sub>2</sub>), metoda MIG inertní plyny (argon, helium). Přídavný materiál se používá ve formě drátů nebo plněných trubiček o průměru 1,2 až 4,0 mm. Tuto metodu lze plně automatizovat a oproti navařování ruční obalenou elektrodou se jedná o produktivnější technologii. [15] [17]



Obrázek 7. Navařování MIG/MAG

### 2.2.3 Navařování neodtavující se elektrodou (TIG)

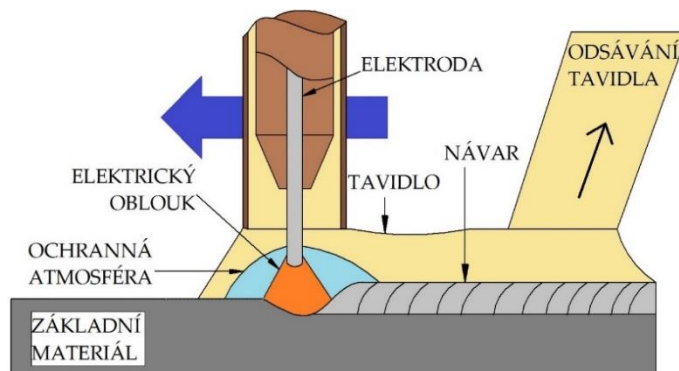
U navařování metodou TIG (viz Obrázek 8) se používá neodtavující se wolframové elektrody a nezávisle podávaného přídavného materiálu. Ten může být ve formě drátu, tyčinky nebo prášku. Jedná se o plně automatizovatelnou metodu s možností navařování stejnosměrným i střídavým proudem. Výsledný návar je kvalitní s minimálním rozstříkem a s hladkým povrchem. Tato technologie se používá pro navařování antikorozních materiálů a pro opravy materiálů, které jsou odolné vůči abrazivnímu a adhezivnímu opotřebení. [15]



Obrázek 8 Navařování metodou TIG

## 2.2.4 Navařování pod tavidlem (SAW)

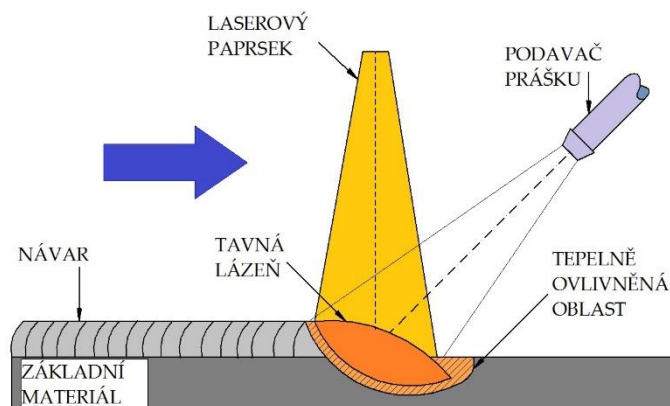
Technologie navařování pod tavidlem (viz Obrázek 9) je plně automatizovaná metoda, při které je navařovaný materiál nepřetržitě podáván do místa navařování. Přídavný materiál je ve formě drátu, trubičky nebo pásky. Celý proces navařování probíhá v zásypu tavidla, které tvoří ochranu před vlivem okolní atmosféry a zároveň leguje návar. Díky automatizovatelnosti a vysokým odtavovacím výkonům se jedná o velmi rychlou a produktivní metodu využívanou pro dlouhé a široké návary. [15][20]



Obrázek 9. Navařování pod tavidlem

## 2.3 Navařování laserem

Navařování laserem (viz Obrázek 10) patří mezi pokročilé způsoby navařování. Dochází zde k minimálnímu tepelnému ovlivnění základního materiálu, proto je možné navařovat drobné součásti a 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. Vzhledem k vysoké hustotě tepelného příkonu je také obtížné nastavit parametry navařování tak, aby nedocházelo k nadměrnému promísení se základním materiálem. [15] [21] [22]



Obrázek 10. Navařování pod tavidlem

## 3 NAVAŘOVÁNÍ PLAZMATEM

Plazmové navařování zaujímá jednu z předních pozic v technologiích povrchového inženýrství. Jedná se o snadno automatizovatelný proces navařování poskytující vysoký stupeň reprodukovatelnosti překryvů navařených housenek. Ve srovnání s ostatními navařovacími metodami (ručně obalenou elektrodou, MIG/MAG, TIG, pod tavidlem) má navařování plazmatem dobrou možnost kvalitního řízení procesu při zachování přijatelných investičních nákladů. Oproti navařování laserem má navařování plazmatem širší okno optimálních navařovacích parametrů. Díky vysoce koncentrovanému zdroji tepla dochází k vysokému využití přídavného materiálu. Lze také docílit velmi nízkého procenta zředění návarového kovu základním materiálem (do 10 %). [23] [24]

### 3.1 Princip plazmového navařování

Pro procesy navařování využívající plazma jsou využívány plazmové hořáky napájené stejnosměrným proudem. Existují tři základní druhy hořáků dle druhu zapojení:

- s přeneseným obloukem (PTA)
- s nepřeneseným obloukem (nezávislé zapojení pro nevodivé materiály)
- kombinované zapojení přeneseného i nepřeneseného oblouku

V oblasti navařování se zpravidla využívá zapojení s přeneseným obloukem nebo kombinované zapojení, kde plazmový oblouk hoří mezi wolframovou elektrodou ( - pól, katoda) a navařovaným základním materiálem ( + pól, anoda). Při zahájení navařování je nejprve prostředí okolo wolframové elektrody ionizováno pilotním obloukem, který je zapalován vysokofrekvenčním výbojem mezi měděnou dýzou a elektrodou. Přiblížením součásti k plazmatronu nebo spuštěním plazmového proudu je zapálen hlavní přenesený plazmový oblouk. [25]

Princip vytvoření povlaku propojeného metalurgicky se základním materiálem je při navařování plazmatem stejný jako u ostatních navařovacích metod. Přídavný materiál je přiváděn podávacím plynem do proudu plazmatu a dopadá do svarové

lázň, která je vytvořena působením tepla na základním materiálu. Požadovaná čistota navařeného povlaku je obvykle dosažena již v první vrstvě, dochází tak k úspoře přídavného materiálu a času navařování. Tolerance povrchu se pohybuje v rozmezí  $\pm 0,5$  mm. [23]

Přídavný materiál je nejčastěji prášek, je ale možné použít i drát, popřípadě „horký drát“, kdy je přídavný materiál předehříván dalším zdrojem elektrické energie. Horkého drátu se využívá v aplikacích, kde je požadovaný zvýšený výkon odtavení. Ten může dosáhnout hodnoty až 6 kg/hod. [23]

### 3.2 Plazma

Plazma je nejrozšířenější formou známé hmoty ve vesmíru a je považováno za čtvrté skupenství hmoty. Zdrojem plazmatu v přírodě je například elektrický výboj v atmosféře. Využití nachází plazma zejména v technické praxi u svařování elektrickým obloukem. [26] [23]

Plazma je elektricky vodivá látka skládající se z kladně nabitých iontů a elektronů. Díky tomu uzavírá elektrický obvod tvořený zdrojem elektrického proudu, vedením, základním materiálem a plazmovým hořákem (plazmatron). Vznik plazmatu je zapříčiněn disociací a následnou ionizací plazmového plynu, který protéká plazmovým hořákem. [23]

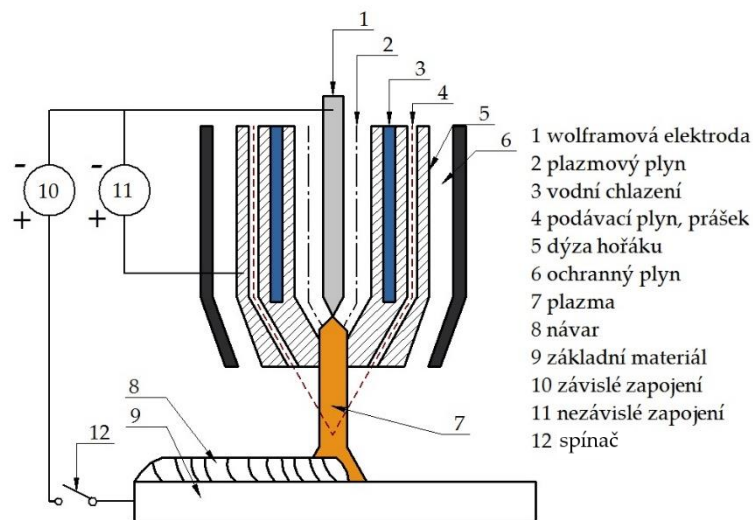
### 3.3 Plazmový hořák

Plazmový hořák neboli plazmatron pro navařování práškem vychází z hořáku pro metodu TIG/WIG. Skládá z měděného těla plazmatronu, dýzy, wolframové elektrody, chladících kanálů a systémem podávání prášku (viz Obrázek 11). V měděné dýze o malém průměru dochází k zužování plazmového paprsku. Kvůli vysokým hodnotám proudu je dýza chlazena vodou. Pro navaření povlaků na zakřivené plochy nebo do úzkých otvorů lze uzpůsobit konstrukci plazmatronu. Konstrukce hořáku je ovlivněna formou přídavného materiálu. Pohyb plazmatronu nad navařovanou součástí má vliv na velikost tepelného ovlivnění základního materiálu a geometrii navařeného povlaku. Technologie navařování plazmatem je prováděna v poloze shora dolů, proto je

nutné umístit navařovanou součást tak, aby svislá osa hořáku byla zachována při navařování všech ploch. [23]

Zapálení plazmatronu se provádí pomocí pilotního oblouku. Ten je zapálen mezi měděnou částí plazmatronu – anoda a wolframovou elektrodou – katoda. Díky pilotnímu oblouku je následné zapálení hlavního oblouku mezi wolframovou elektrodou (katoda) a základním materiálem (anoda) jednodušší. [23]

Plazma lze jako zdroj tepla využít i pro ohřev nebo předeřtí základního materiálu, a to jak pilotním, tak hlavním obloukem. [23]



Obrázek 11. Schéma plazmatronu

### 3.4 Plyny používané u PTA

Vzhledem k vysokým teplotám koncentrovaného plazmatu (9000 – 30 000 K) se pro navařování plazmatem používají plyny, které nereagují s materiálem trysky a katody. Nejvhodnějším a nejčastěji používaným plynem je argon, pro určité aplikace lze použít argon ve směsi s vodíkem, heliem nebo dusíkem. Plazma je tvořené plazmovým plynem, přídavný materiál je do místa navařování usměřňován podávacím plynem. Průniku okolní atmosféry do místa navařování brání ochranný plyn. [27]

#### 3.4.1 Plazmový plyn

Nejpoužívanějším plazmovým plynem je v dnešní době argon, používány jsou ale i jeho směsi s vodíkem a heliem. Rozhodujícím faktorem pro snadnou ionizaci je hodnota ionizační energie. Pro snadné zapálení oblouku je vhodná co nejnižší ionizační

energie. Hodnoty ionizačních energií vybraných plynů jsou uvedeny v Tabulka 1. Výstupní rychlost plazmového plynu se při navařování pohybuje mezi 200–500 m/s. Vysoká výstupní rychlost je zapříčiněna mnohonásobným zvyšováním objemu plynu při jeho zahřívání. [23] [25] [27]

Tabulka 1. Ionizační energie plazmových plynů [23]

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

### 3.4.2 Podávací plyn

Podávací plyn slouží k unášení a k usměrňování toku prášku, který slouží jako přídatný materiál. Používá se nejčastěji čistý argon, nebo argon ve směsi s vodíkem nebo heliem. [27]

### 3.4.3 Ochranný plyn

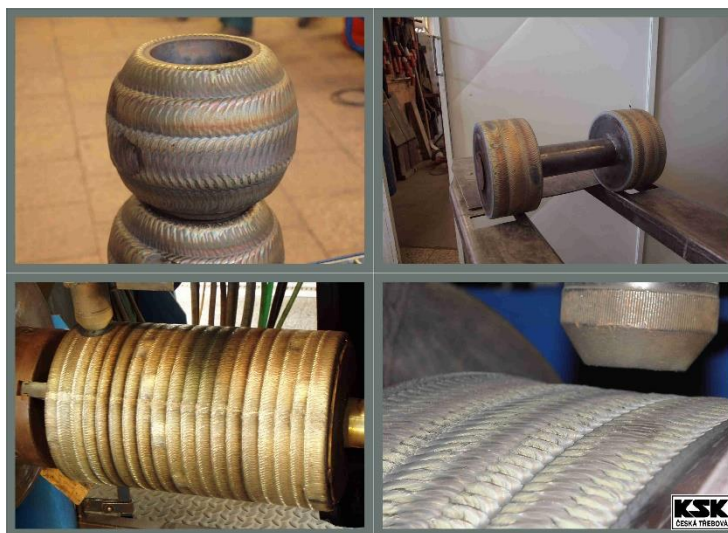
Funkce ochranného plynu je zabránění přístupu okolní atmosféry do místa navařování. Nedochozí tak k oxidaci navařeného povlaku. Průtok se volí 2–20 l/min. Ochranný plyn nesmí ovlivňovat základní materiál. Špatná ochrana svarové lázně a návaru může být důvodem porozity. [27]

## 3.5 Přídatný materiál pro PTA

Jako přídatný materiál je u metody PTA používán prášek nebo drát. Přísun prášku je zajištěn pomocí podávacího plynu, který prášek unáší hadicí a po průchodem plazmatronem prášek dopadá do proudu plazmatu. Zde dochází k jeho natavení a vytvoření vrstvy návaru. Přídatný materiál ve formě drátu je do proudu plazmatu přiváděn z boku mimo plazmatron. [23]

### 3.6 Základní materiály pro navařování plazmatem

Navařování plazmatem je vhodné pro téměř všechny typy součástí z oceli i slitin neželezných kovů. Mezi nejčastěji navařované polotovary patří kovací a řezné nástroje, součástky pro chemický a stavební průmysl, dále polotovary pro zemědělství i energetiku (těsnící plochy armatur).



Obrázek 12. Ukázka navařených povlaků metodou PTA [Krška Zdeněk, KSK, s.r.o.]

### 3.7 Výhody a nevýhody PTA

PTA je dobře automatizovatelný proces navařování, kde parametry podávání nejsou závislé na parametrech plazmatu a tepelného výkonu. Výhodou je vysoká rychlost nanášení a nízké ztráty prášku při procesu navařování. Při správně nastavených parametrech umožňuje navaření povlaku libovolné tloušťky při minimálním promísení a s malými deformacemi základního materiálu. Aby byl návar kvalitní, je nutné strojové řízení hořáku. Moderní stroje umožňují navařování pulzním proudem, který poskytuje další možnosti pro seřízení parametrů za účelem dosažení co nejkvalitnějšího návaru. [23] [24]

Nevýhodou plazmového navařování je vysoká teplota a intenzivní vyzařování plazmatu, kvůli kterému jsou zhoršeny pracovní podmínky obsluhy. Vysoká teplota může negativně ovlivnit základní materiál, kdy je nutné počítat s odpařováním legujících prvků.



## 4 TITAN

Titan je polymorfní kov bílé barvy a je devátým nejrozšířenějším prvkem zemské kůry. V přírodě se vyskytuje ve formě oxidů, jako jsou rutil ( $\text{TiO}_2$ ), titanit ( $\text{CaTiSO}_5$ ) nebo ilmenit ( $\text{FeTiO}_3$ ). Byl objeven roku 1791 Williamem Gregorem, jeho izolování se ale podařilo až po 100 letech. V České republice se začal vyrábět až po konci druhé světové války. Je zdravotně nezávadný a biokompatibilní. Jeho měrná hmotnost je  $4500 \text{ kg/m}^3$ , teplota tání  $1668 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Uspořádání krystalové mřížky má dvojího druhu, do teploty  $882 \text{ }^\circ\text{C}$  existuje v krystalové mřížce šesterečné s těsným uspořádáním, nad  $882 \text{ }^\circ\text{C}$  se vyskytuje v krychlově prostorově středěné mřížce. Má vysokou odolnost proti korozi a jako jediný kov odolává chloru a chlorovým sloučeninám. Korozivně na něj ale působí například koncentrovaná kyselina sírová. Za zvýšených teplot u titanu dochází k oxidaci. Je velmi špatně obrobitelný, má ale dobrou svařitelnost v ochranných plynech. Čistý titan ztrácí s rostoucí teplotou pevnost tak, že je použitelný asi do  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Možnosti použití titanu jsou rozšiřovány povrchovými úpravami, například nitridováním nebo oxidací. [28] [29] [30] [31] [32]

Titan se pro svoji nízkou hmotnost využívá v medicíně, kde se z něj vyrábějí implantáty, ale i chirurgické nástroje. Jako konstrukční materiál se používá v chemickém, potravinářském nebo farmaceutickém průmyslu, kde jsou z něj využívány plechy, pásy, trubky, tyče nebo dráty. Cena technicky čistého titanu je  $1317 \text{ Kč/kg}$  ([33], ke dni 6. 5. 2019), proto není doposud široce využíván. [28] [32]

Některé slitiny titanu lze tepelně zpracovat, obvykle kalením a popouštěním. Slitiny titanu lze nitridovat. [28]

### 4.1 Průmyslová výroba titanu

Výroba titanu běžnými hutními metodami je pro titan neúčinná, proto se nejčastěji vyrábí Krollovým procesem. Jedná se o redukci par chloridu titaničitého hořčíkem v inertní argonové atmosféře. Krollovým procesem vzniká tuhá a pórovitá látka, ze které je nutné odstranit chlorid hořečnatý a nezreagovaný hořčík. Slitiny titanu se odlévají ve vakuu a přetavují se ve vakuových indukčních pecích. V období studené války byl titan strategickou surovinou a jeho výroba byla přísně tajná. V roce 2015 byla světová produkce titanu cca  $50\,000 \text{ tun/rok}$ . [4] [29]



## 4.2 Slitiny titanu

Slitiny titanu jsou velmi důležitým materiálem a pro jeho materiálové vlastnosti jsou využívány především v letectví, automobilovém průmyslu nebo v kosmonautice. Cena titanových slitin se pohybuje kolem 60 \$/kg. [33] Titan je součástí mnoha technických slitin. Jako legující přísada se používá nejčastěji mangan, chrom, hliník, železo, vanad, molybden a měď. Jsou to polymorfní slitiny a dle rovnovážné struktury lze nejužívanější slitiny rozdělit na tři skupiny, kdy teplota přeměny je 882 °C [4] [28] [32]:

- a) Homogenní slitiny  $\alpha$
- b) Heterogenní slitiny  $\alpha+\beta$
- c) Homogenní slitiny  $\beta$

Nejrozšířenějšími slitinami jsou slitiny  $\alpha$  a  $\alpha+\beta$ . [28]

### 4.2.1 Homogenní slitiny $\alpha$

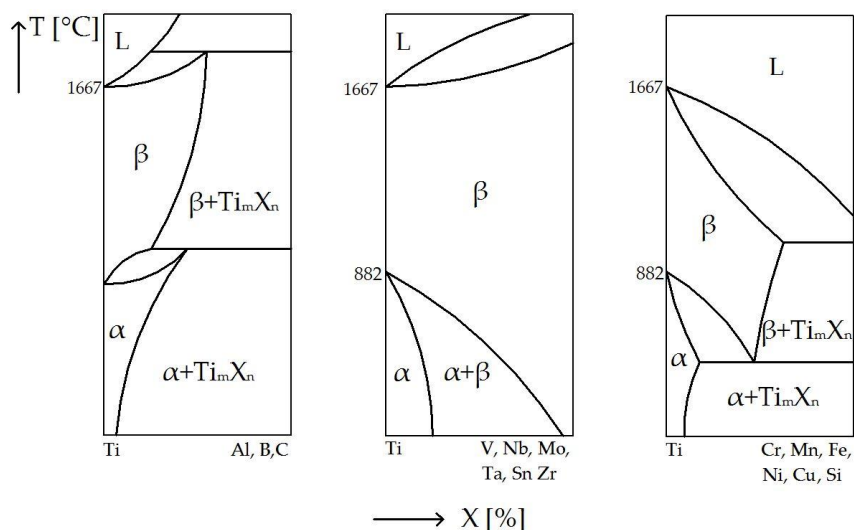
Tyto slitiny mají většinou základ v binární slitině Ti-Al, obsahují menší množství přísad stabilizující fázi  $\alpha$ . Mezi tyto přísady patří hliník, dusík a uhlík. Jsou dobře tvárné za tepla i za studena, ale mají nižší pevnost než čistý titan. Jsou svařitelné a nehodí se pro tepelné zpracování. Do té to skupiny patří například slitina TiAl5Sn2,5. [28] [32]

### 4.2.2 Heterogenní slitiny $\alpha+\beta$

Patří mezi nejpočetnější skupinu slitin titanu, obsahují přísady, které zvětšují stabilitu vysokoteplotní modifikace  $\beta$ . Těmito přísadami je molybden, niob, tantal, vanad, nikl, železo nebo chrom. Tyto slitiny lze tepelně zpracovávat podobně jako oceli. Zástupcem těchto slitin je TiAl6V4. [28] [32]

### 4.2.3 Homogenní slitiny $\beta$

Homogenní slitiny  $\beta$  mají zvýšený obsah prvků, které rozšiřují oblast existence krychlové mřížky. Jsou velmi dobře svařitelné, tvářitelné a lze je použít i za zvýšených teplot (do 500 °C). Homogenní slitinou  $\beta$  je například TiMo11Zr6Sn5. [28] [32]



Obrázek 13. Základní druhy binárních rovnovážných diagramů titanu [28]

### 4.3 Svařování titanu

Svařitelnost titanu je dobrá při dodržení podmínek ochrany svaru a svarové lázně. Protože má titan zejména za vysokých teplot vysokou reaktivitu s kyslíkem, je nutné při svařování titanu použít dokonalou plynovou ochranu. Používají se inertní plyny jako je argon nebo hélium, také je možné titan svařovat ve vakuu. Ochranný plyn musí mít maximální čistotu a ochranu je nutné udržovat, dokud teplota neklesne pod 300 °C. Čistota plynu by měla být 99,999 %, už u 99,995 % čistoty může docházet k nevhodnému zabarvení výsledného svaru. Pokud není ochrana dost kvalitní, projeví se to na zabarvení okolí svaru. Oproti ocelím lze titan svařovat nižšími svařovacími proudy. [29] [34]

V technické praxi se pro svařování a navařování titanu a jeho slitin používají svařovací komory (viz Obrázek 14), které zajišťují spoje nejvyšší kvality bez trhlin a nečistot. Tyto komory, používající kontrolní ukazatele znečištění atmosféry, zajišťují atmosféru inertního plynu s minimálním obsahem vzdušného kyslíku i bez vzdušné vlhkosti. Konstrukce komor se používá v provedení uzavřeného boxu, do kterého je

přístup ke svařenci umožněn pomocí přístupového zipu a ochranných rukavic. Tímto příslušenstvím je zajištěna ochrana proti kontaminaci přídavného a základního materiálu. Tyto komory jsou ale určeny pouze pro ruční svařování a navařování, pro plně automatizované procesy se tyto komory na trhu nevyskytují a pokud ano, tak pouze v podobě rozměrných komor, ve kterých je uzavřen celý zautomatizovaný proces. [35] [36]



Obrázek 14. Komory určené pro ruční svařování titanu a jeho slitin [59] [60]

Nejčastějšími metodami svařování titanu je metoda TIG, dále svařování plazmatem a laserem. U těchto metod je nutné použít kořenovou a vlečnou ochranu. Další metodou je svařování elektronovým svazkem, které probíhá ve vakuových komorách. Svařováním elektronovým svazkem lze docílit lepších plastických vlastností než u svarů vyrobených v ochranných atmosférách. [29]

Správně provedený titanový svar vypadá jako zmrzlá rtuť, je lesklý a reflexivní. Před zahájením svařování je nutné základní materiál očistit od olejů, mastnot, povlaků, oxidů nebo prachových nečistot. Pro dosažení ideální čistoty je vhodné zacházet se základním materiálem v ochranných rukavicích a těsně před začátkem svařování očistit základní materiál například acetonem. [37]

Při svařování může u svaru a okolí svaru dojít k zabarvení. Ideální svar je dokonale stříbrný bez známky zabarvení. Pokud je okolí svaru zabarvené do hněda, jedná se o kvalitně provedený svar. [37]

Svařováním se vyrábí například výfukové potrubí (viz Obrázek 15).



Obrázek 15. Příklady svařování titanu [61] [62]

#### 4.4 Zabarvení titanu

Působením tepla lze u titanu dosáhnout různého zabarvení. Závislost výsledného zabarvení titanové součásti na teplotě byla doposud zkoumána pouze empiricky, a proto neexistuje žádná přesná tabulka udávající rozmezí teplot pro určitou barvu. Nejčastější metodou pro zabarvení titanu je jeho anodizování pomocí elektrického proudu, ukázka zabarvení je na Obrázku 16. Lze tak dosáhnout velkého množství odstínů barev. Zabarvení může vznikat i nedostatečnou plynovou ochranou svaru. [38]



Obrázek 16. Barevný titan pomocí anodizace [38]

## 5 VYSOKO-KOBALTOVÉ SLITINY

Slitina typu stellite byla poprvé vyvinuta Elwoodem Haynesem na počátku 20. století jako alternativa pro příbory, které byly tehdy náchylné k oxidaci. Jedná se o slitinu s kobaltovou maticí s přídavkem uhlíku, chromu, wolframu a dalších legur. Také byla využívána pro řezné nástroje. Název „Stellite“ je odvozen od latinského slova „stella“ (hvězda) kvůli vysokému lesku, který je patrný na Obrázku 17. V dnešní době je název Stellite ochranná známka společnosti Deloro Stellite, která je součástí skupiny Kennametal. Vysoko-kobaltové slitiny se nazývají superslitinami kobaltu a chromu a díky své vysoké odolnosti proti opotřebení a chemické korozi jsou určeny pro náročné aplikace z pravidla za vysokých teplot. Obvyklé použití je při teplotách 315–600 °C. [24] [39] [40] [41] [42]

Kobalt v čisté podobě není v průmyslově praxi příliš využíván, je ale vhodný pro technické využití jako slitinový prvek. Vysoko-kobaltové slitiny jsou stabilní, nemagnetické slitiny odolné proti kalení a žíhání. [39] [40]



Obrázek 17. Stellite 6 a Stellite 2 [3] [42]

### 5.1 Chemické složení vysoko-kobaltových slitin

Stellity jsou slitiny kobaltu, chromu a dalších prvků, jako je molybden, wolfram, titan, křemík, síra, fosfor, mangan, chromu, hliník, železo nebo uhlík. Tyto prvky umožňují ještě vyšší výkon pro specifické aplikace. Většina slitin obsahuje kombinaci čtyř až šesti těchto prvků. Skládají se z komplexních karbidů v kobaltové maticí. Rozložení, tvar a velikost karbidů je určena podmínkami zpracování a ovlivňuje mechanické vlastnosti a tvrdost. [39] [40] [43]

Pro příklad chemického složení je zde uvedeno chemické složení slitiny Stellite 6 (viz Tabulka 2). [40]

Tabulka 2. Chemické složení vysoko-kobaltové slitiny Stellite 6 [40]

Co [hm%]	Cr [hm%]	W [hm%]	C [hm%]	Si [hm%]	Fe [hm%]	Ni [hm%]	Mo [hm%]	Další [hm%]
základ	30	4–5	1,2	< 2	< 3	< 3	< 1	< 0,5

Chrom je hlavní legující prvek vysoko-kobaltových slitin. Zajišťuje, díky obsahu mezi 20–30 hm.%, vysokou odolnost vůči korozi a současně s uhlíkem tvoří ve slitině tvrdé karbidy. Reakcí s uhlíkem vznikají mezidendritické karbidy M7C3 a M23C6. [43] [44]

Wolfram (4–17 hm.%) a molybden (až 28 hm.%) také reagují s uhlíkem za vzniku karbidů (M6C, Co3Mo, Co3W) jako sekundárních částic. Díky jejich atomové velikosti zabraňují také pohybům dislokací a skluzu. Příznivý účinek wolframu na vysokoteplotní vlastnosti vysoko-kobaltových slitin je ve vysokém bodu tání, a i vysoké odolnosti za vysokých teplot. [43] [44]

Přidáním niklu se zvyšuje stabilita FCC mřížky matrice. Přidáním bóru se snižuje bod tání slitiny, což je vhodné u vysoko-kobaltových slitin, které jsou používány v práškové metalurgii. [39] [40] [44]

Hlavní rozdíl mezi jednotlivými stelliteovými slitinami je v obsahu uhlíku, tedy objemu karbidů ve slitině. Dle obsahu uhlíku lze vysoko-kobaltové slitiny rozdělit následujícím způsobem [39] [44]:

- Vysoký obsah uhlíku – určeno pro aplikace s vysokým opotřebením
- Nízký obsah uhlíku – určeno pro vysokoteplotní použití a kombinaci vysoké teploty s vysokým opotřebením
- Nízký obsah uhlíku/vyšší obsah chromu – určeno pro protikorozní aplikace

Vysoko-kobaltové slitiny nemají žádný přesný chemický vzorec, protože různé typy slitin jsou tvořeny kombinací několika prvků v různých poměrech. Proto jsou slitiny označovány číslem, popřípadě písmenem, jako je Stellite 6K nebo Stellite 706. [40]



Nejrozšířenější slitinou je Stellite 6, která nabízí vysokou mechanickou a chemickou odolnost a univerzální odolnost proti opotřebení v nepříznivém prostředí. [39]

## 5.2 Vlastnosti vysoko-kobaltových slitin

Vysoko-kobaltové slitiny mají vysokou odolnost proti korozi a opotřebení při zhoršených podmínkách. Dle [44] se tvrdost a odolnost proti opotřebení chovají odlišně při pokojových a vysokých teplotách. Odolnosti vysoko-kobaltových slitin proti opotřebení při pokojové teplotě závisí především na obsahu uhlíku a wolframu. Při vysokých teplotách jsou však mechanismy opotřebení složitější a zahrnují několik faktorů. [44]

Vysoká teplota neovlivňuje tvrdost karbidů, dochází ale ke změkčení tuhých roztoků. Tuto okolnost lze přisuzovat vyšším teplotám tavení u karbidů. Karbidy chromu mají teplotu tavení 1250–1895 °C, karbidy wolframu až 2870 °C. Čím vyšší je obsah wolframu, tím je nižší citlivost na změnu tvrdosti za zvýšených teplot. [44]

Za zvýšené teploty klesá odolnost proti opotřebení, protože dochází ke zvýšené oxidaci celého povrchu.

Díky široké škále aplikací byly vysoko-kobaltové slitiny již prozkoumány v mnoha vědeckých pracích. Frenk a Wagniere [45] zkoumali vysoko-kobaltové slitiny z pohledu mechanismů opotřebení, Frenk a Kurz [46] řešili vliv mikrostruktury na vlastnosti a opotřebení těchto slitin. Kavitační erozní chování Stellite 3, Stellite 6 a Stellite 20 bylo studováno Heathcockem a spol. [47]. Byl také zkoumán vliv obsahu křemíku v Stellite 6 na jeho tvrdost a odolnost proti opotřebení za zvýšených teplot [48].

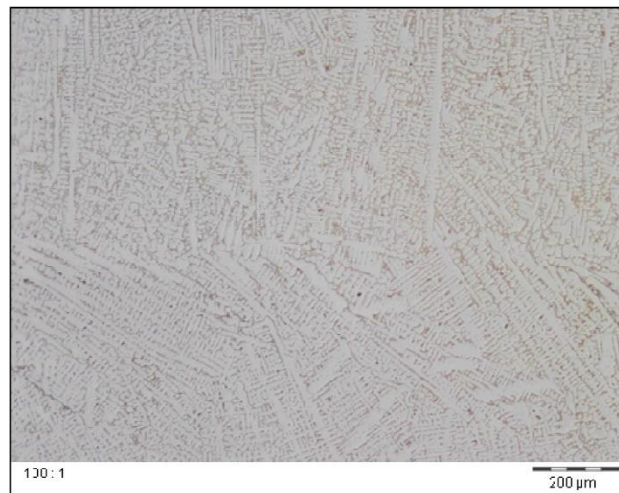
## 5.3 Výroba vysoko-kobaltových slitin

Výroba vysoko-kobaltových slitin závisí na konečné aplikaci. Jsou vyráběny řadou různých procesů, od lití po práškovou metalurgii. Nejčastěji je vysoko-kobaltová slitina zpracovávána do tvaru tyčí a desek. Během mechanického zpracování dochází k optimalizaci velikosti a orientaci matrice, proto tvářené polotovary dosahují vyšší pevnosti než lité polotovary. Z tyčí a desek se slitina rozřezává na polotovary různých velikostí, ze kterých se poté zpracovávají finální díly. Pro výsledné zpracování je nutné používat výkonné zařízení a speciální obráběcí nástroje, protože vysoko-kobaltová

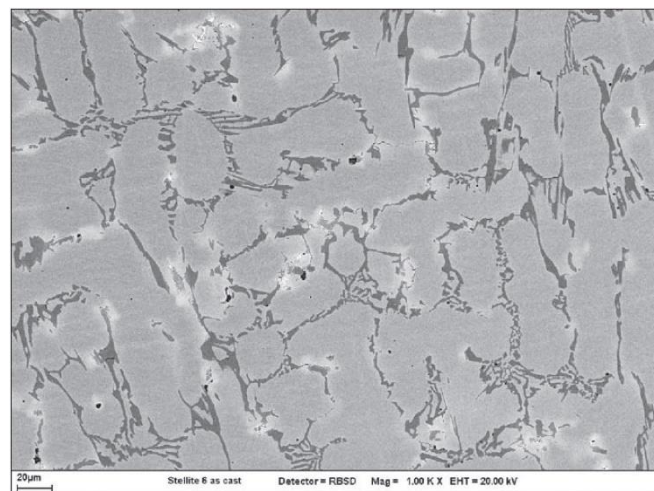
slitina je náročnější pro obrábění i broušení. Kvůli své vysoké houževnatosti je tato slitina častěji opracovávána broušením než řezáním. [39]

## 5.4 Aplikace

Vysoko-kobaltové slitiny jsou používány v aplikacích v nepříznivém a náročném prostředí. Jsou proto vhodné pro obráběcí nástroje, klapkové ventily, sedla ventilů, výfukové ventily spalovacích motorů nebo pro výrobu tvrdých povlaků. Díky vysoké teplotě tání jsou vhodné pro povlaky a tvrdonávary v parních turbínách. V lékařství je možné je využít pro výrobu umělých kyčelních kloubů a dalších kostních náhrad. Lze je najít i v aplikacích u střelných zbraní. [39] [49]



Obrázek 18. Svařovaná struktura slitiny Stellite 6 [40]



Obrázek 19.  
1000x zvětšená struktura Stellite 6 na elektronovém mikroskopu [40]



## 6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část se zabývá navařením 3D objektů z materiálů typu „Stellite 6“ a Titan Grade 1. V první části je zaměřena na vysoko kobaltovou slitinu, optimalizaci navařovacích parametrů pro určení nejvhodnějších hodnot efektivního proudu, frekvence, rychlosti navařování a podávání přídavného materiálu a dále na navaření a vyhodnocení finálního 3D objektu. V druhé části experimentu byl navržen a zkonstruován přípravek pro navařování titanu a jeho slitin v ochranné atmosféře argonu a byly navařeny a vyhodnoceny zkušební návary. Z již publikované literatury je možno předpokládat, že při použití pulzního proudu bude dosaženo odlišných návary než při navařování konstantním proudem.

### 6.1 Navařovací automat PPC 250 R6

Pro vyhotovení návary byl použit navařovací automat PPC 250 R6 (KSK s.r.o. Česká Třebová). Společnost KSK s.r.o. se zabývá vývojem a dodávkami speciálních automatů pro navařování pod tavidlem, v ochranných atmosférách a plazmatem. Automaty slouží pro navařování antikoročních, otěruvzdorných, žáruvzdorných a dalších povlaků. Jednotlivá zařízení jsou konstruována na zakázku s ohledem na typ a velikost navařované součásti a typ návaryvého materiálu. Pro plazmové navařování jsou určeny automaty řady PPC 250. [50]



Obrázek 20. Navařovací automat PPC 250 R6 (KSK s.r.o. Česká Třebová)

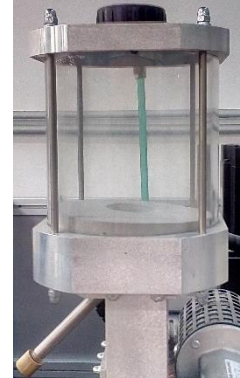
Navařovací automat PPC 250 R6, zobrazen na Obrázku 20, je určen pro navařování rotačních i nerotačních součástí metodou PTA. Součásti lze navařovat z čela nebo na obvodu. Přídavný materiál je prášek. Automat umožňuje pulzní navařování proudem 50–250 A a frekvencí 0–200 Hz. Navařovací hořák je polohovatelný a je řízený ve čtyřech osách X, Y, Z, N. Polohovadlo navařované součásti je řízené ve dvou osách C a R. Průměr stolu činí 300 mm, jeho nosnost je max. 70 kg. Automat lze programovat

ručně se záznamem parametrů do programu, metodou „teach-in“, nebo lze upravit již přednastavené režimy navařování. Rozměry automatu jsou 1 770 x 1 700 x 2 185 mm (šířka x délka x výška), váha je 1 100 kg. [50]

Navařovací automat se skládá z těchto základních komponentů: [50]

### PODAVAČ PRÁŠKU

Podavač prášku zajišťuje pomocí podávacího plynu přísun regulovaného množství prášku do plazmatronu. V základním uspořádání je použitý jeden podavač prášku, mohou však být nainstalovány další podavače prášků. Podavač je určen pro 10 kg prášku a doporučená velikost částí přídavného materiálu je 50–200  $\mu\text{m}$ . [50]



### SYSTÉM ŘÍZENÍ

Programovací panel je umístěn v klimatizovaném boxu. Programování probíhá v softwaru vyvinutém v KSK s.r.o. Zápis programu je umožněn základním dialogem, nebo pomocí dálkového ovládání. Systém řízení lze kontrolovat a opravovat přes internet. Nad systémem řízení se nachází kontrolní ukazatele průtoků plynů. [50]



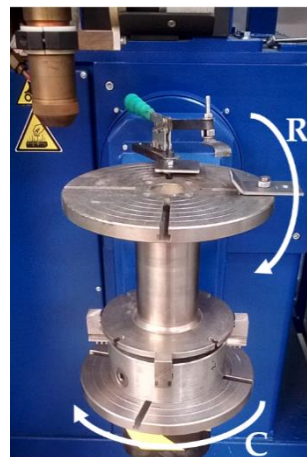
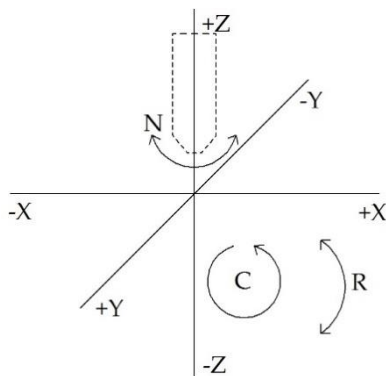
### HOŘÁK a POLOHOVADLO

Hořák a elektroda jsou intenzivně chlazeny vodou na teplotu okolí. Posun hořáku je zajištěn servo motory. Rozsah v jednotlivých osách je uveden v Tabulka 3. Polohovadlo lze korigovat ve dvou směrech. Osy a polohovadlo jsou zobrazeny na Obrázku 21. [50]

Tabulka 3. Rozsah jednotlivých os

X	Y	Z	N
490 mm	260 mm	260 mm	40°





Obrázek 21. Osy navařovacího automatu PPC 250 R6

## 6.2 Část 1 - Vysoko-kobaltová slitina

V experimentu byla navařována vysoko-kobaltová slitina typu Celsit V-P. Jedná se o kobaltovou slitinu o chemickém složení uvedeném v Tabulka 4. Hlavními legujícími prvky jsou kobalt a chrom. Vyšší obsah wolframu zvyšuje tvrdost slitiny. Celsit V-P se vyznačuje svojí vysokou tvrdostí za tepla, korozní odolností a žáruvzdorností do 900 °C. Má dobrou odolnost proti rázům a adhezivnímu i abrazivnímu opotřebení. Za vysokým teplot má dobré kluzné vlastnosti a návary lze opracovat až do vysokého lesku. Jedná se o nemagnetickou slitinu. Celsit V-P se využívá pro navařování třecích a těsnících ploch armatur v plynárenství, dále v energetickém a chemickém průmyslu. [51]

Velikost částic v prášku je 63–200  $\mu\text{m}$ .

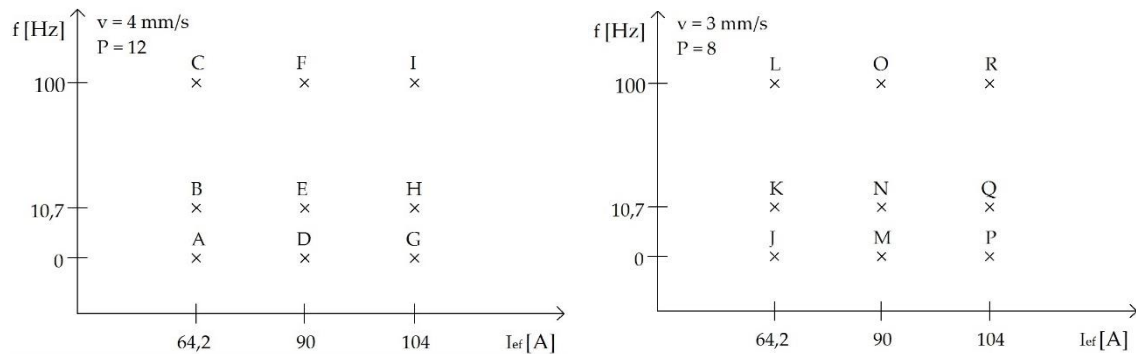
Tabulka 4. Směrná chemická analýza prášků, uvedeno v % [51]

C	Cr	Fe	Ni	W	Co
1,1	28	1	1	4,5	základ

### 6.2.1 Návrh parametrů

Při optimalizaci parametrů bylo navařeno osmnáct zkušebních návarů. Každý návar se skládal z předehřevu základního materiálu a čtyř vrstev. Základním materiálem byly dvě desky z nerezové oceli (Cr-Ni austenitická ocel (AISI 316)) o rozměrech 257x127x10 mm, na každou desku bylo navařeno devět zkušebních návarů s písmenným označením A až R. Jednotlivé návary byly navařeny pro rozdílné

parametry frekvence a efektivního proudu, viz Obrázek 22. Před navařením každého návaru byl základní materiál ochlazen na teplotu okolí. Délka návarů byla 75 mm, návary byly navařeny bez rozkyvu, vzdálenost mezi návarů 23 mm. Přídavným materiálem byl Celsit V-P o velikosti částic 63–200  $\mu\text{m}$ . Argon (4.8) byl použit jako plazmový, ochranný a podávací plyn.



Obrázek 22. Parametrické pole pro osmnáct zkušebních návarů

Pro první navařování byl zvolen proud přehřevu 70 A a rychlost 3 mm/s. Tyto hodnoty se ukázaly jako nevyhovující, z důvodu přehřívání základního materiálu. Proud byl snížen na 40 A (minimální hodnota zařízení), rychlost byla zvýšena na 6 mm/s. Po každé navařené vrstvě byla zvýšena poloha hořáku o 1,5 mm v souřadnici Z.

Hodnoty proudu  $I_{ef}$  byly pro jednotlivé vrstvy rozdílné a to tak, že první byla navařena s 110 %  $I_{ef}$  a druhá vrstva byla navařena 105 %  $I_{ef}$ . Třetí a čtvrtá vrstva byla navařena základními hodnotami  $I_{ef}$ , které byly určeny na začátku experimentu. Hodnoty proudů jsou znázorněny v Tabulka 5.

Základní materiál byl upevněn na navařovacím automatu pomocí upínky a na zadní a boční straně byl podepřen zarážkami (viz Obrázek 23). Díky zarážkám byl základní materiál umístěn vždy do stejné polohy na navařovacím automatu.

Fotografie základního materiálu s navařenými zkušebními návarů jsou zobrazeny na Obrázku 24 a Obrázku 25. Fotografie jednotlivých návarů jsou uvedeny v Příloze 1.

Tabulka 5. Hodnoty proudu pro jednotlivé vrstvy návaru, frekvence změny proudu 3 Hz

<b>I<sub>ef</sub> = 64,2 A</b>		
vrstva	Proud [A]	IH/IL [A]
0	40	-
1	70,6	133/55
2	68	120/55
3+4	64,2	101/55
<b>I<sub>ef</sub> = 90 A</b>		
vrstva	proud [A]	IH/IL [A]
0	40	-
1	99	215/70
2	95,4	197/70
3+4	90	170/70
<b>I<sub>ef</sub> = 104 A</b>		
vrstva	proud [A]	IH/IL [A]
0	40	-
1	114	232/85
2	110	211/85
3+4	104	180/85



Obrázek 23. Umístění základního materiálu na navařovacím automatu





Obrázek 24. Základní materiál s navařenými zkušebními návary A - I



Obrázek 25. Základní materiál s navařenými zkušebními návary J - R

### 6.2.2 Vyhodnocení zkušebních návrhů

Po navaření byly návrhy vyhodnoceny dle několika kritérií a následně byly určeny tři finální parametry návrhů, které byly použity pro navaření výsledného objektu. Všem kritériím byla přiřazena stejná váha. U každého kritéria bylo vybráno sedm nejlepších návrhů, které jsou uvedeny v Tabulka 6. Za finální návrhy pro navaření 3D objektu byly zvoleny návrhy B, F a L (viz Tabulka 7). Kritéria hodnocení byla následující:

#### **GEOMETRIE NÁVARU 1: VÝŠKA a ŠÍŘKA NÁVARU**

Výška i šířka byla měřena ve vzdálenostech 20, 40 a 60 mm od začátku návaru. Hodnoty jsou zaznamenány v Příloze 2 a v Příloze 3. Pro každý návar byly následně vypočítány hodnoty rozdílu maximální výšky/šířky a minimální výšky/šířky. Z těchto hodnot bylo určené pořadí návrhů seřazené od nejnižšího po nejvyšší rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou výšky/šířky. Umístění pro jednotlivé návrhy v tabulkách pro výšku a šířku bylo obodováno (nejnižší hodnota = 1, vyšší hodnota = 2, atd...). Body pro výšku a šířku byly sečteny a na základě výsledků byly vybrány návrhy s nejnižším počtem bodů.

#### **GEOMETRIE NÁVARU 2: TVAR NÁVAROVÉ HOUSENKY**

Po rozříznutí vzorků na dvě poloviny byl na kolmých řezech hodnocen i tvar návarové housenky. Pro stavění 3D objektů je vhodné, aby housenka byla co nejužší, bez zápalů, a aby její hrany byly co nejkolmější. Hodnoty se nacházejí v Příloze 4

#### **MINIMÁLNÍ TEPELNÉ OVLIVNĚNÍ ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU**

Tepelné ovlivnění bylo viditelné na rubové straně základního materiálu. Hodnocení probíhalo na základě vizuální prohlídky s předpokladem, že čím menší je zbarvená plocha základního materiálu pod návarovou housenkou, tím je menší tepelné ovlivnění základního materiálu. Fotografie tepelného ovlivnění se nacházejí v Příloze 5.

## KRESBA NÁVARU

Kresba návarů byla hodnocena vizuálně na základě tvaru a vykreslení celého návaru. Nejvhodnější návarová housenka by měla mít plynulý povrch (kresbu), bez změn výšek a bez viditelných nežádoucích znaků (nepravidelnost kresby apod.)

## ROVINNOST NÁVARU

Rovinnost byla určena na základě obsahu plochy pod nejvyšším bodem na posledním vrstvě (viz Obrázek 26). Obsah plochy byl měřen ve vzdálenosti 20–40 mm od začátku návaru, protože začátek a konec návaru je ovlivněn zapalováním a zhasínáním oblouku. Hodnoty obsahů byly měřeny v grafickém programu, a proto jsou v Příloze 6 vyjádřeny pomocí počtu pixelů. Pro hodnocení bylo uvažováno, že čím menší počet pixelů, tím je rovinnost návaru lepší.



Obrázek 26. Znárodná plocha obsahu plochy

## SPOJENÍ SE ZÁKLADNÍM MATERIÁLEM

Navařený základní materiál byl na metalografické pile rozřezán na dvě poloviny a po vybroušení a vyleštění ploch bylo zkoumáno spojení se základním materiálem.



Tabulka 6. Tabulka pro hodnocení návrů

KRITÉRIUM	VYBRANÝ NÁVAR																		
GEOMETRIE NÁVARŮ 1	A	B	C	F	J	K	O												
GEOMETRIE NÁVARŮ 2	A	B	C	D	F	K	L												
TEPELNÉ OVLIVNĚNÍ	B	C	D	E	F	K	L												
KRESBA	A	B	C	D	F	J	L												
ROVINNOST	B	D	F	J	L	O	R												
SPOJENÍ SE ZM	B	D	F	J	K	L	M												
Počet bodů pro jednotlivé návrý	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
	3	6	4	5	1	6	0	0	0	4	4	5	1	0	2	0	0	0	

Tabulka 7. Tabulka pro finální parametry

FINÁLNÍ NÁVARY	B	F	L
PARAMETRY NÁVARŮ	$I_{ef} = 64,2 \text{ A}$	$I_{ef} = 90 \text{ A}$	$I_{ef} = 64,2 \text{ A}$
	$f = 10 \text{ Hz}$	$f = 100 \text{ Hz}$	$f = 100 \text{ Hz}$
	$P = 12$	$P = 12$	$P = 8$
	$v = 4 \text{ m/s}$	$v = 4 \text{ m/s}$	$v = 3 \text{ m/s}$

### 6.2.3 Vytvoření 3D objektu z vysoko-kobaltové slitiny







Výsledné tři parametry, které byly vybrány na základě vyhodnocení zkušebních návarů, byly použity pro návary ve tvaru 3D objektu. Po navaření všech tří parametrů byl vybrán finální návar, který nejvíce odpovídal předpokladům pro navaření kvalitního 3D objektu z vysoko-kobaltové slitiny.

Na základě poznatků z [52] byl pro navaření výsledných 3D návaru zvolen objekt s kruhovým průřezem a jako doplnění objekt typu „stěna“. Průměr kruhového průřezu byl zvolen 30 mm, obvodová rychlost byla přepočítána z lineární rychlosti. Počet vrstev byl deset. Pro ukotvení první vrstvy na základní materiál bylo nutné zvolit rozkyv (pendl) s minimálním rozkyvem. Při samotném navařování bylo nutné korigovat proces pomocí ručního řízení, a přesto nebylo dosaženo požadovaných vizuálních vlastností návarů. Návary jsou zobrazeny v Tabulka 8.

Vzorek B se vyznačoval úzkou stěnou s četným rozstříkem okolo kruhového průřezu. Z bočního pohledu jsou patrná napojení jednotlivých housenek. V nejvyšším bodě vzorek dosáhl výšky 9,5 mm. U parametru F je širší stěna návaru než u vzorku B z důvodu vyšších navařovacích parametrů, při kterých došlo k výraznějším rozliti tavné lázně u všech vrstev. Výška vzorku F v nejvyšším bodě je 8,5 mm. Jednotlivé vrstvy jsou z bočního pohledu slité. Povrch je hladký, bez viditelných vad. Vzorek L má nerovnoměrný povrch, nejvyšší bod má výšku 9,4 mm. Taktéž, jako u vzorku F, došlo k výraznějšímu rozliti tavné lázně. Vzorek L je bez okolního rozstříku.

Parametry se ukázaly být přímo nepřenositelné pro kruhový objekt z důvodu pomalejšího ochlazování vlivem navařování následujících vrstev. Lineární 3D objekt typu „stěna“ byl zvolen v délce cca 75 mm s cílem navařit více než 30 vrstev. Na základě poznatků z navařování kruhového průřezu byl za vhodný zvolen návar F s parametry:  $I_{ef} = 90$  A,  $f = 100$  Hz,  $P = 12$  a  $v = 4$  mm/s.

Tabulka 8. Fotografie kruhových návarů

NÁVAR	Horní pohled	Boční pohled
<p style="text-align: center;"><b>B</b></p> <p>Pozn: 10 vrstev max. výška = 9,5 mm</p>		
<p style="text-align: center;"><b>F</b></p> <p>Pozn: 10 vrstev max. výška = 8,5 mm</p>		
<p style="text-align: center;"><b>L</b></p> <p>Pozn: 10 vrstev max. výška = 9,4 mm</p>		

Finální 3D objekt z vysoko-kobaltové slitiny Celsit V-P lineárního průřezu byl navařen parametry F. Fotografie objektu jsou na Obrázku 27 a Obrázku 28. Bylo navařeno 34 vrstev s rozkyvem (pendl) 3 mm. Maximální výška objektu je 30,4 mm, délka je 98 mm. Stěna objektu je kolmá na základní materiál a nedošlo k odtržení od základního materiálu.



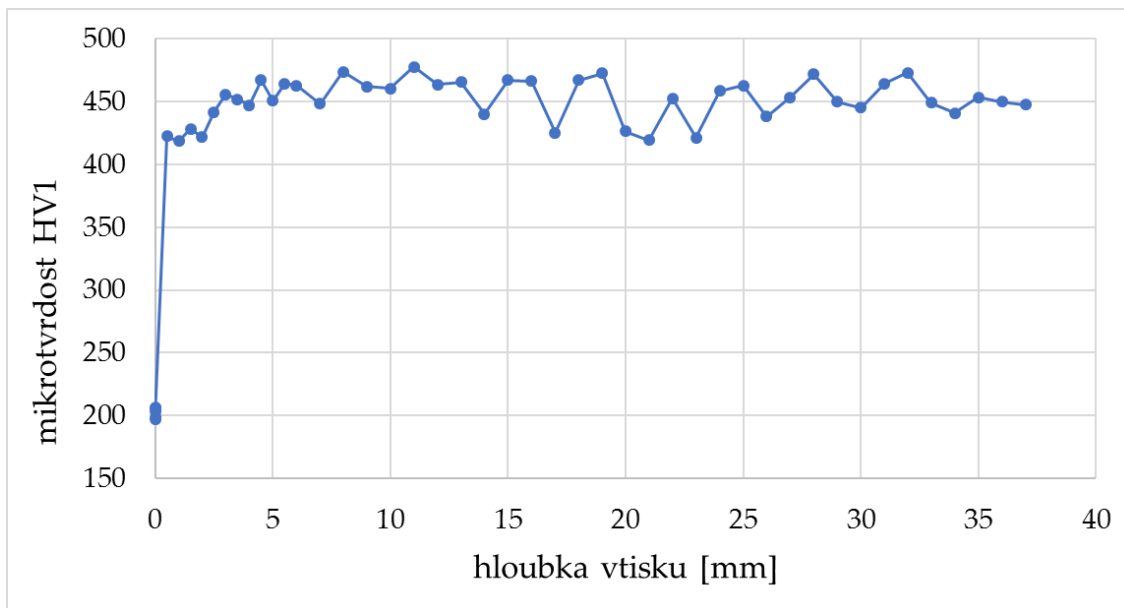
Obrázek 27. Finální 3D objekt z vysoko-kobaltové slitiny, boční pohled



Obrázek 28. Finální 3D objekt z vysoko-kobaltové slitiny, pohled shora

#### 6.2.4 Měření mikrotvrdosti

Měření mikrotvrdosti dle Vickerse proběhlo na mikrotvrdoměru IndentaMet 1104 (Buehler). Doba působení vtisku byla 11 sekund, zatížení hrotu odpovídalo 1 kilogramu. Průběh mikrotvrdosti je zaznamenán na Obrázku 29 a v Příloze 7. Celkem bylo provedeno 48 vtisků. Vtisky byly vedeny středem stěny s četností 16 vtisků po 0,5 mm a 32 vtisků po 1 mm. Základním materiálem byla korozivzdorná ocel (AISI 316). Nejvyšší hodnota mikrotvrdosti byla 478 HV a nejnižší hodnota byla 420 HV. Průměrná hodnota mikrotvrdosti byla 451 HV.



Obrázek 29. Průběh tvrdosti pro vzorek Celsit V-P stěna

## 6.3 Část 2 – Titan Grade 1

Při navařování titanu nebo jeho slitin z titanu je nutné zařídit dokonalou ochranu návaru před okolní atmosférou. Pro vytvoření plynové ochrany bylo nutné navrhnout přípravek, který by umožnil pohodlné navařování přímých i kruhových návarů při proměnlivé výšce hořáku.

V experimentální části této práce byl použit komerčně čistý Titan Grade 1. Jedná se o houževnatý a snadno svařitelný materiál s optimální tažností a tvářitelností za studena. Jedná se o jednofázový materiál. Vysoké svařovací a navařovací teploty nijak zásadně neovlivňují mikrostrukturu fáze  $\alpha$ . Má vysokou odolnost v oxidačním a lehce redukčním prostředí. Typické použití je pro chemický a letecký průmysl. Chemické složení Titanu Grade 1 je uvedeno v Tabulka 9. [53]

Jako přídatný materiál byl použit Titan Grade 1 s velikostí částic v rozmezí 90–200  $\mu\text{m}$  (TLS Technik Spezialpulver).

Tabulka 9. Chemické složení přídatného materiálu Titan Grade 1 uvedené v hmotnostních % [54] [55]

	C hm%	Fe hm%	H hm%	N hm%	O hm%	Ti hm%
požadované množství	max. 0,1	max. 0,2	max. 0,015	max. 0,03	max. 0,18	základ
tavba	0,013	0,19	0,001	0,005	0,05	základ

### 6.3.1 Přípravek pro navařování Titanu Grade 1

Přípravek je navržen ve formě utěsněné, mírně přetlakové komory s předpokládaným stálým průtokem inertní ochranné atmosféry a s možností kontroly procesu během navařování. Přípravek je složen z hliníkové základní desky ve tvaru osmiúhelníku s vyfrézovanou drážkou pro umístění obvodových ochranných skel. Ochranná skla jsou čirá z důvodu zjednodušení programování navařovacích programů, pro kontrolu samotného navařovacího procesu a pro umožnění jednodušší manipulace se základním materiálem uvnitř přípravku. Počet ochranných skel je osm a na základové desce jsou umístěna do tvaru osmiúhelníku. Nebezpečné vyzařování navařovacího procesu je odstíněné dveřmi navařovacího automatu, proto nebylo nutné použít ztmavená skla. V drážce jsou usazena pomocí topenářského tepelně odolného tmelu. Na

sklech je upevněn hliníkový límec s vyfrézovanou drážkou pro uchycení horní strany skel. Límec je pokryt těsněním, které je složené z vrstvy grafitové plsti a dvou řad silikonového těsnění do drážky. Díky této těsnící vrstvě je zajištěn pohyb horní desky po spodní části přípravku při dodržení dostateční těsnosti (viz Obrázek 30). [56]

Horní část přípravku (viz Obrázek 30) je složena z plechu z hliníkové slitiny o tloušťce 5 mm a slouží pro utěsnění přípravku. V desce se nachází osmiúhelníkový otvor, kterým je umožněn pohyb hořáku uvnitř přípravku. Navařovací hořák je s horní deskou spojen pomocí kožené manžety. Manžeta je na hořáku upevněna pomocí hadicové spony, na horní desce pak pomocí rámečku a dvanácti šroubů M6-25 se zápusťnou hlavou. Rozměry kožené manžety byly zvoleny tak, aby byl zajištěn horizontální pohyb hořáku při různých výškách navařování. V kůži je dále vyříznutý otvor pro kontrolní ukazatel těsnosti přípravku. Kontrolní ukazatel je ve formě balónku. [56]

Celý přípravek je šrouby upevněn na polohovatelném stole navařovacího automatu. Umístění nainstalovaného přípravku na navařovacím automatu je zobrazeno na Obrázku 31, výkres přípravku je zobrazen na Obrázku 32.

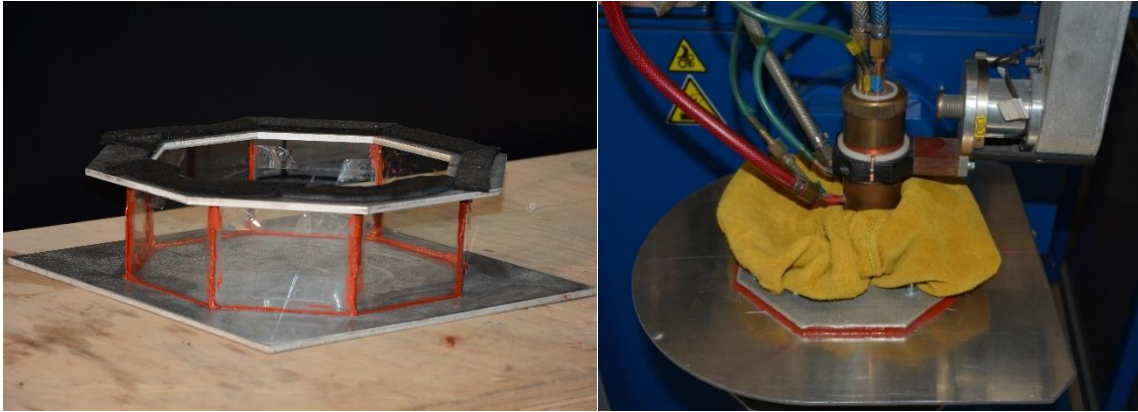
Celkový objem přípravku je:

$$V = S_p \cdot v = \frac{1}{4} \cdot n \cdot a^2 \cdot \cot \frac{\pi}{n} \cdot v = \frac{1}{4} \cdot 8 \cdot 110^2 \cdot \cot \frac{\pi}{8} \cdot 90 = 5\,258\,157 \text{ mm}^3 \quad (1)$$

Konstrukce přípravku umožňuje volný pohyb spodní části přípravku vůči horní desce. Tímto uspořádáním je zajištěna možnost navařování přímých i kruhových návarů. Je zajištěn obousměrný pohyb hořáku v osách X, Y a Z tak, aby bylo umožněno navaření zkušebních vzorků. Rotace kolem osy Z je možná v obou směrech o libovolný počet otáček. [56]

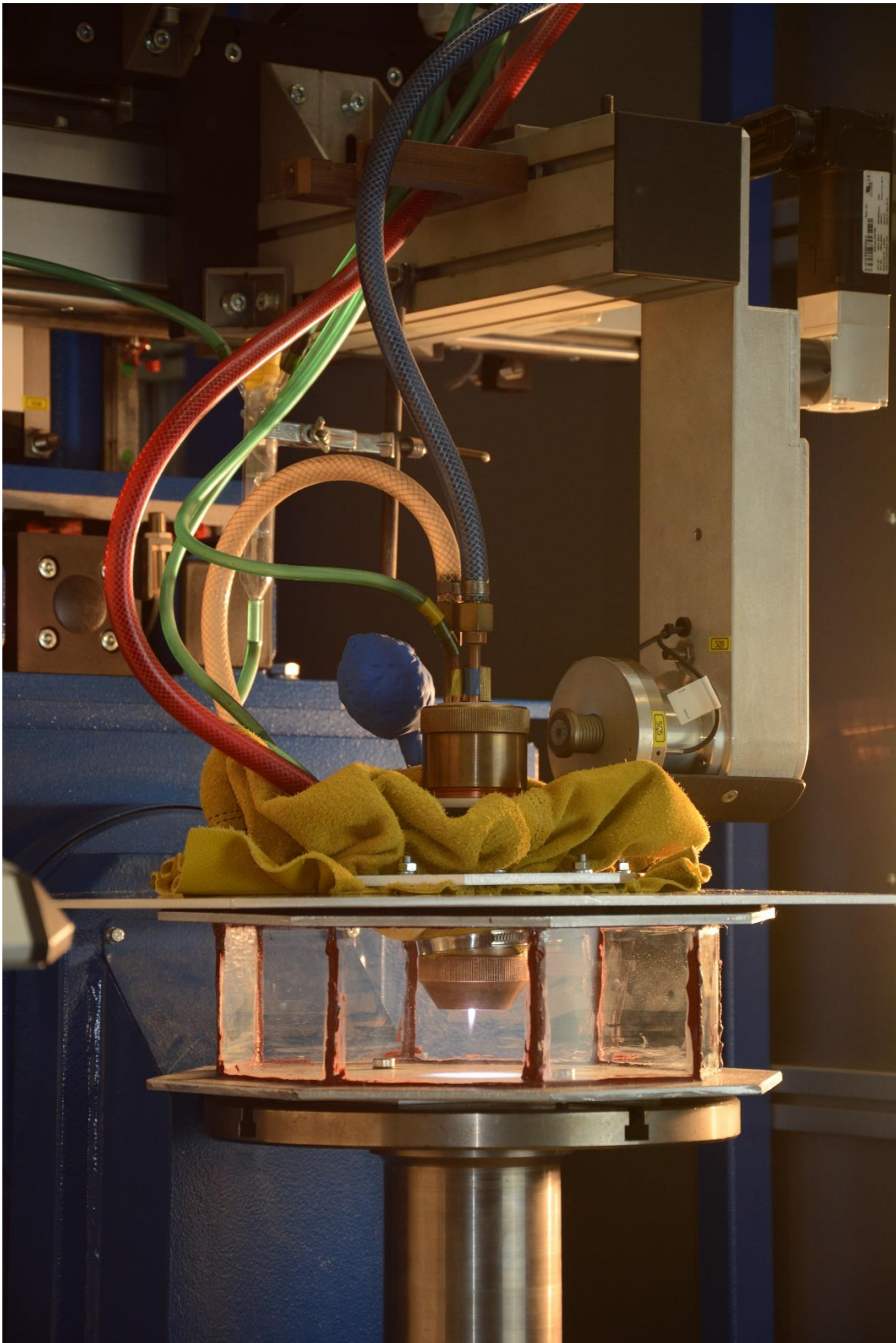
Ochranný plynem pro navařování byl argon s čistotou 99,999 %. Přívod plynu je zajištěn dvěma možnostmi. První je skrz navařovací hořák, tato možnost je primární a funkční při každém navařování. Druhou možností je přidaný přívod ochranného plynu dolním přívodem skrz základovou desku. Při navařování vzorků byly použity obě možnosti přívodu ochranného plynu. Před samotným navařováním protéká přípravkem ochranný plyn po dobu 100 sekund. Tím jsou zajištěny vhodné podmínky

pro navařování citlivých materiálů, protože obsah  $O_2$  a  $CO_2$  uvnitř přípravku je sníženo na minimum. Po navaření návaru je nutné nechat ochrannou inertní atmosféru protékat přípravkem do té doby, než teplota návaru klesne pod  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . [56]

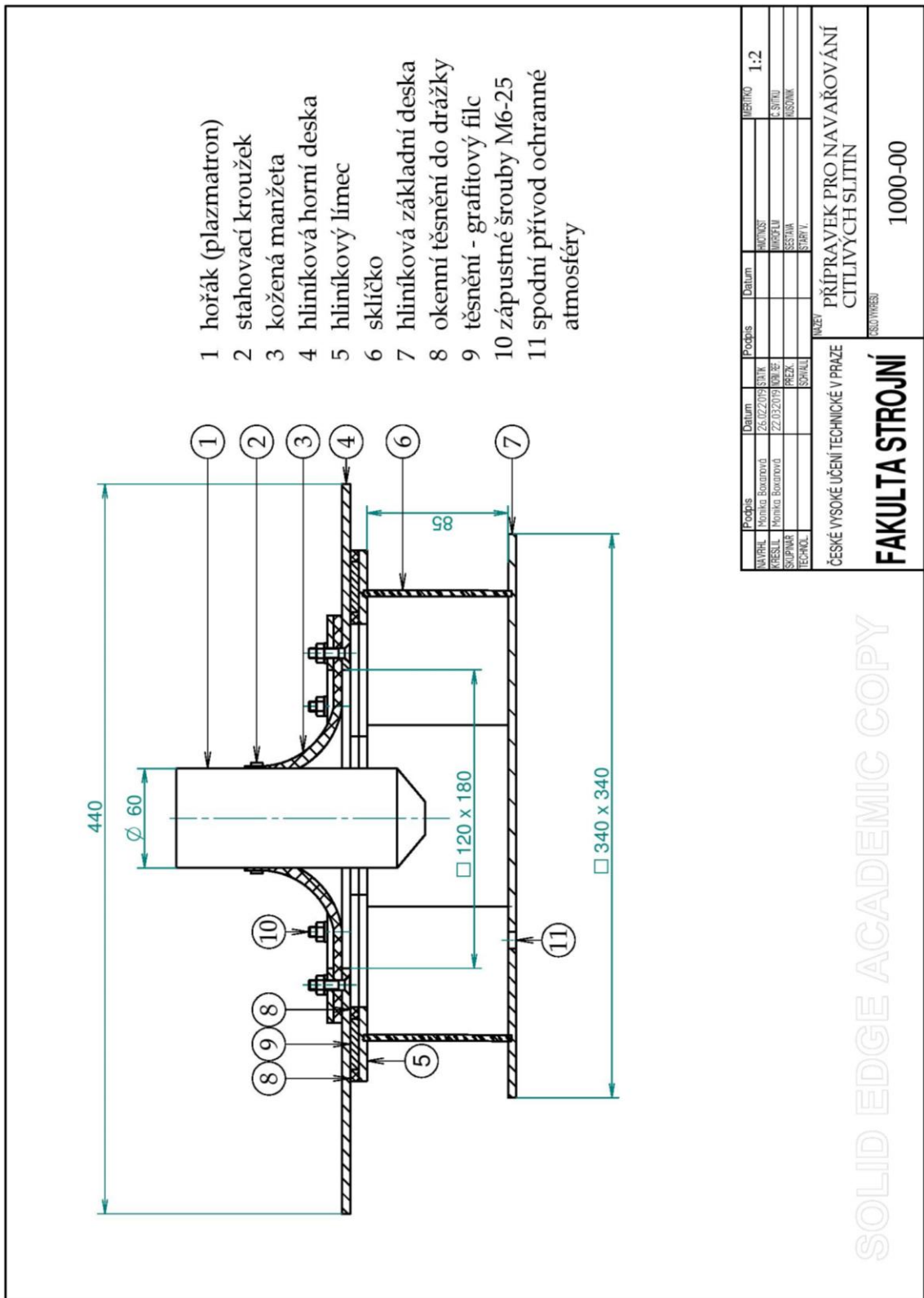


Obrázek 30. Spodní a horní část přípravku [56]





Obrázek 31. Přípravek umístěný na navařovacím automatu [56]

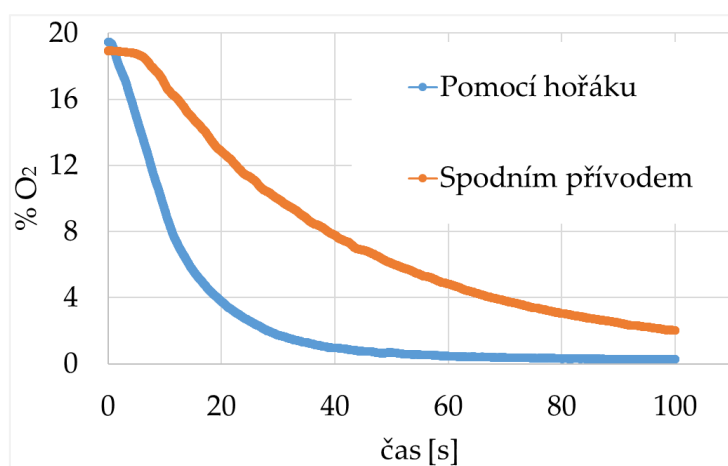


Obrázek 32. Výkres přípravku pro navařování citlivých slitin

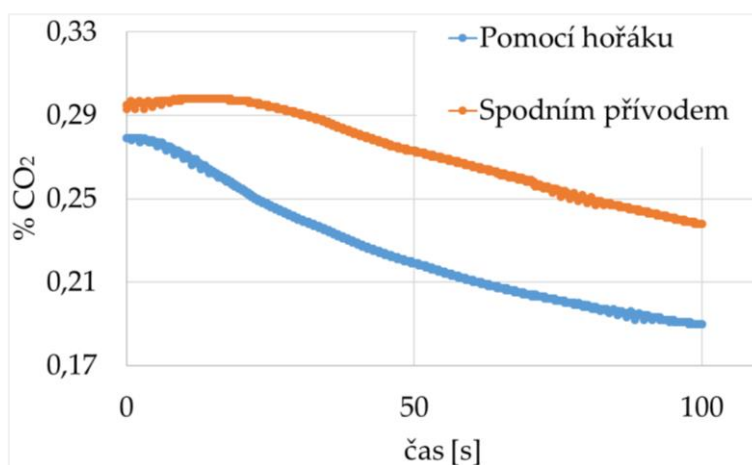
### 6.3.2 Ověření funkčnosti přípravku

#### PROCENTUÁLNÍ OBJEM O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> UVNITŘ PŘÍPRAVKU

Pomocí snímačů měřicí stanice ALMEMO byla změřena procentuální hodnota objemu O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> uvnitř přípravku. Měření proběhlo pro dvě možnosti průtoku ochranného plynu, a to pomocí hořáku při průtoku 17,5 l/min a pomocí spodního přívodu při průtoku plynu 10 l/min. Průběhy a grafické porovnání poklesů jsou zobrazeny na Obrázku 33 a Obrázku 34. [56]



Obrázek 33. Procentuální pokles obsahu O<sub>2</sub> v přípravku [56]

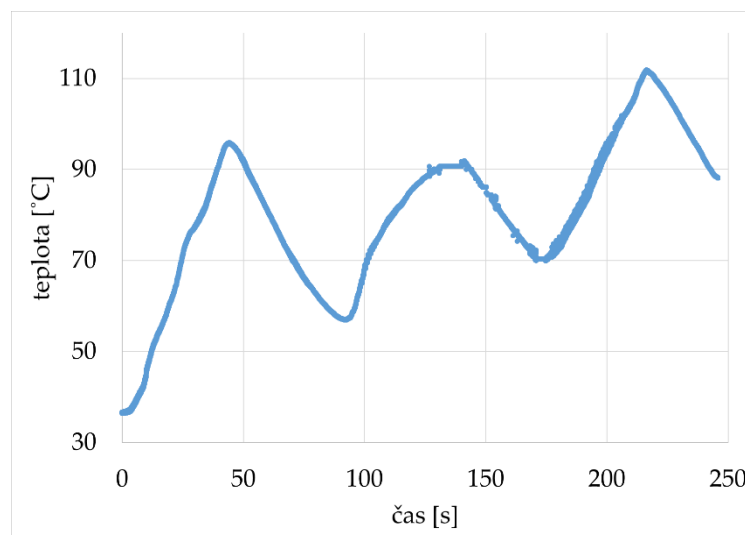


Obrázek 34. Procentuální pokles obsahu CO<sub>2</sub> v přípravku [56]

Z grafů je zřejmé, že v čase 100 sekund nebylo dosaženo stejných poklesů pro obě možnosti přívodu ochranného plynu. Přívodem skrz hořák bylo dosaženo příznivějších hodnot. Po čase 100 sekund došlo k poklesu procentuálního objemu  $O_2$  o 98,6 % na hodnotu 0,26 % objemu  $CO_2$  o 31,9 % na hodnotu 0,19 %. Pro možnost dolního přívodu skrz základovou desku byly časy pro dosažení minimálních hodnot delší, a proto byly vyhodnoceny jako nevhodné. Protože je přípravek konstruován jako přetlaková komora se stálým průtokem, dochází k malému úniku ochranné atmosféry, a proto nelze uvnitř přípravku dosáhnout ideální hodnoty obsahu  $O_2$  pro navařování titanu bez potřeby proudění ochranné atmosféry okolo prostoru navařování. [56]

### TEPLOTA UVNITŘ PŘÍPRAVKU

Měření teploty přípravku proběhlo při navařování třívrstvého návaru. Termočlánek byl umístěn uvnitř přípravku v prostoru vzorku. Záznam teplot byl zprostředkován měřicí stanicí ALMEMO. Při navařování první a druhé vrstvy teplota vystoupala nad hodnotu  $90\text{ }^\circ\text{C}$ , při navařování třetí vrstvy překročila teplota hodnotu  $110\text{ }^\circ\text{C}$ . Průběh teploty je zobrazen na Obrázku 35. [56]



Obrázek 35. Průběh teploty při navařování třívrstvého návaru

I když teplota uvnitř přípravku při navařování nedosáhla vysokých hodnot, došlo k popraskání některých ochranných skel. K prasknutí došlo z důvodu nerovnoměrného ohřevu skla a také z důvodu rozdílné tepelné roztažnosti hliníkové slitiny a vlastního skla. [56]

## TĚSNOST PŘÍPRAVKU

Těsnost přípravku je zajištěna třemi řadami těsnění mez límcem a horní deskou. V kožené manžetě je umístěn ukazatel přetlaku ve formě nafukovacího balónku. Při zapnutí průtoku ochranné atmosféry dojde k nafouknutí balónku do vzpřímené polohy. [56]

## ZKUŠEBNÍ NÁVARY

Nejdůležitějším ukazatel funkčnosti přípravku jsou samotné návary. Přídavným materiálem byl Titan Grade 1 (tavba 0243/4), jeho chemické složení je uvedeno v Tabulka 9. Pro ověření funkčnosti byly navařeny dva návary o šířce 10 mm a délce 60 mm. Návary byly navařeny při totožných navařovacích parametrech. Parametry jsou uvedeny v Tabulka 10, fotografie návarů na Obrázku 36. [56]

Tabulka 10. Navařovací parametry [56]

v [m/s]	IH [A]	IL [A]	TH [s]	TL [s]
4	130	45	0,15	0,55



Obrázek 36. Návar A a návar B

Návar A byl navařen mimo komoru navařovacího přípravku, návar B při působení ochranné inertní atmosféry uvnitř přípravku. Návar A je charakterizován pravděpodobně oxidickým povlakem šedého zbarvení. Tento povlak vznikl



při nedostatečné ochraně chladičového navařeného kovu. V navařené struktuře je patrné promíchání se základním materiálem. Vady na povrchu housenky vypovídají o okysličení tavné lázně. [56]

Návar B, navařený uvnitř přípravku, jeví minimální známky oxidace. Povrch návaru B je kovově lesklý bez viditelných vad. Kvůli nestabilitě podávání prášku došlo k posypání tavné lázně nenataveným přídavným materiálem. [56]

Funkční prostředí ochranné atmosféry uvnitř přípravku bylo potvrzeno dalšími návarů z materiálu Titan Grade 1, které se vyznačovaly lesklým povrchem bez viditelných vad a nežádoucího zabarvení, viz Obrázek 37.

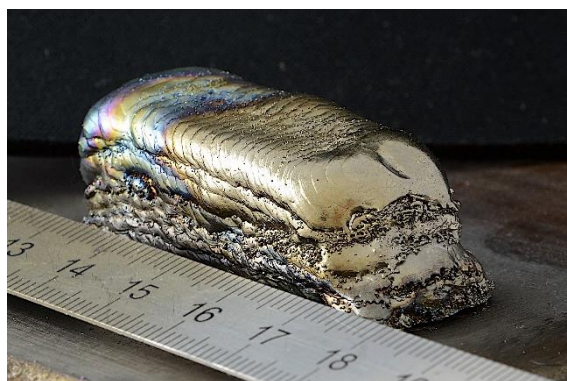


Obrázek 37. Další zkušební návary Titanu Grade 1 z navařovacího přípravku

### 6.3.3 Vytvoření 3D objektu z Titanu Grade 1

Předpoklad, že pro navařování 3D objektu z titanu budou vhodné finální parametry z první části experimentu, nebyl potvrzen. Chování titanu při navařování je velmi odlišné od chování vysoko-kobaltových slitin a nebylo možné navařit kvalitní 3D objekt z Titanu Grade 1 za stejných navařovacích parametrů, které byly použité u Celsitu V-P. Pro navaření titanového bloku bylo nutné zvolit odlišné parametry navařování a ručně korigovat.

Výsledný navařený 3D objekt z materiálu Titan Grade 1 (viz Obrázek 38) o délce 50 mm a šířce 15 mm je složen ze 14 vrstev.

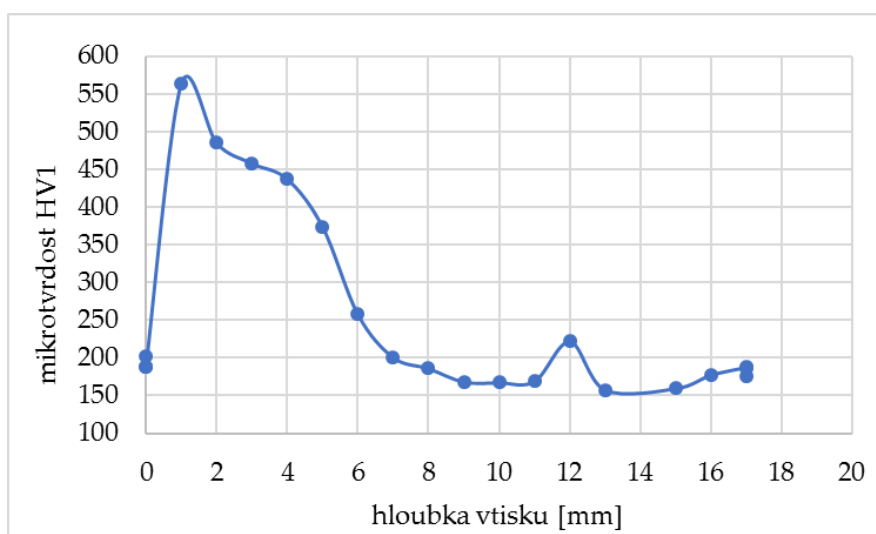


Obrázek 38. 3D objekt Titan stěna

#### 6.3.4 Měření mikrotvrdomosti

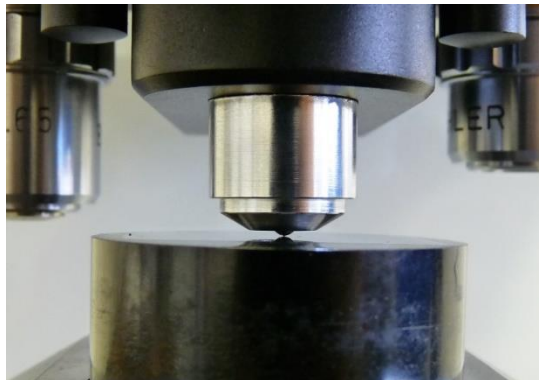
Měření mikrotvrdomosti dle Vickerse proběhlo na mikrotvrdoměru IndentaMet 1104 (Buehler). Doba působení vtisku byla 11 sekund, zatížení hrotu odpovídalo 1 kilogramu. Vtisky byly vedeny středem vzorku ve vzdálenosti 1 mm od sebe. Počet vtisků byl 21. Základním materiálem byla korozivzdorná ocel.

Průběh tvrdostí je zaznamenán na Obrázku 39 a v Příloze 8. Bylo provedeno celkem 22 vtisků, 3 v základním materiálu a 19 v návaru. Směrem od paty vzorku k povrchu nastal pokles mikrotvrdomosti. Nejvyšší tvrdost návarů byla dosažena v prvních vrstvách, kde se pohybovala mezi hodnotami 400 a 500 HV. Nejnižší tvrdost byla změřena 1 mm od povrchu vzorku, a to 159,4 HV. Průměrná hodnota tvrdosti je 263 HV, což odpovídá



Obrázek 39. Průběh mikrotvrdomosti vzorku Titan blok

hodnotě průměrné tvrdosti vzorku z komerčně čistého titanu uveřejněného v článku zabývajícíím se vyhodnocením tvrdosti dle Vickerse u titanových vzorků [57] .



*Obrázek 40. Mikrotvrdoměr IndentaMET 1104 (Buehler) a pohled na vzorek při probíhajícíím měření mikrotvrdosti*



## ZÁVĚR

V teoretické části této diplomové práce byla vypracována rešerše popisující problematiku aditivních technologií, jejich rozdělení na jednotlivé výrobní technologie a význam 3D tisku v technologiích svařování a navařování. Problematice navařování jsou věnovány dvě kapitoly popisující základní druhy navařovacích procesů. Samotnou kapitolu zaujímá metoda navařování plazmatem (PTA), která byla použita v experimentální části. V druhé části rešerše jsou shrnuty základní informace o titanu a vysoko-kobaltových slitinách (slitiny Celsit V-P). Jsou zde popsány jejich vlastnosti, výroba, chemické složení a možné druhy slitin. Technologie navařování plazmatem je moderní vysoce produktivní metoda vhodná pro opravy, renovace a výrobu součástí, u kterých je vyžadována kvalitní funkční plocha. Proces navařování je zcela zautomatizován a umožňuje navařování rozličných přídavných materiálů za použití kontinuálního i pulzního navařovacího proudu. Spojení navařování plazmatem s titanovými a vysoko-kobaltovými přídavnými materiály může vést k vytvoření nové technologie pro výrobu a renovaci funkčních ploch s vysokými nároky na odolnost proti korozi.

Cílem experimentu bylo úspěšné navaření 3D objektů z titanu a vysoko-kobaltové slitiny Celsit V-P. Navařování probíhalo na navařovacím automatu PPC 250 R6. Experiment byl rozdělen na dvě části, dále byla každá část rozdělena do dílčích úkolů. První část experimentu byla zaměřena na navařování vysoko-kobaltových slitin. Nejprve byly nalezeny vyhovující navařovací parametry pro vytvoření 3D objektu. Bylo navařeno osmnáct zkušebních čtyřvrstevých návarů, každý návar měl odlišné parametry navařování. Vyhodnocení a určení finálních parametrů proběhlo na základě šesti kritérií. Tři kritéria uvažovala geometrii návarů, dále bylo zkoumáno minimální tepelné ovlivnění základního materiálu, kresba návarů a spojení návaru se základním materiálem. Dle těchto kritérií byly určeny tři finální parametry navařování. Při těchto třech finálních parametrech navařování byly navařeny kruhové 3D objekty a následně byl vybrány parametry navařování pro vytvoření finálního 3D objektu. Stěna finálního lineárního objektu má délku 98 mm a maximální výšku 30,4 mm, je kolmá na základní materiál a nedošlo k odtržení objektu od základního materiálu. Průměrná tvrdost objektu byla 451 HV.

Přídavnému materiálu Titan Grade 1 byla věnována druhá část experimentu. V prvním kroku bylo nutné navrhnout a zkonstruovat přípravek pro zajištění dokonalé ochranné atmosféry při navařování titanu. Ochranným plynem byl argon s čistotou 99,999 %. Přípravek byl proveden jako utěsněná, mírně přetlaková komora s předpokládaným stálým průtokem inertní atmosféry a s možností kontroly procesu během navařování. Na výrobu byla použita hliníková slitina, ochranná skla, kožená manžeta a spojovací materiál. Těsnění je vyrobeno z okenního těsnění do drážky a grafitového filcu. Přípravek je dohromady složen pomocí silikonového tepelně odolného tmelu. Přivedení ochranné atmosféry je umožněno dvěma možnostmi, a to hořákem a přívodem skrz základní desku. Přívod plynu plazmovým hořákem je automatický. Funkčnost přípravku byla ověřena čtyřmi kritérii, a to poklesem procentuálního obsahu  $O_2$  a  $CO_2$  uvnitř přípravku, teplotou uvnitř přípravku, těsností a zkušebními návary. Pokles procentuálního obsahu byl zaznamenán pro  $O_2$  i  $CO_2$  na hodnotu 0,19 % pro  $CO_2$  a 0,26 % pro  $O_2$ . I když tyto procentuální hodnoty neodpovídají hodnotám průmyslově vyráběných komor, lze dosáhnout kvalitního návaru z titanu a jeho slitin. Při navařování zkušebních vzorků došlo k popraskání ochranných skel z důvodu nerovnoměrného ohřevu skla a také z důvodu rozdílné tepelné roztažnosti hliníkové konstrukce a vlastního skla. Pro další experimenty by bylo vhodné zlepšit umístění skel v přípravku a použití tepelně odolných skel. Zkušební návary však vykazují požadovaný kovově lesklý vzhled povrchu bez nežádoucího zabarvení a povrchových vad a nedošlo k oddělení návarů od základního materiálu.

Předpoklad, že pro navařování 3D objektu z titanu budou vhodné finální parametry z první části experimentu, nebyl potvrzen, pro navaření titanové stěny bylo nutné zvolit odlišné parametry navařování s vysokou nutností ruční regulace procesu navařování. Na vzorku „titanový blok“ byla změřena tvrdost dle Vickerse. Průměrná hodnota tvrdosti byla 263 HV, což odpovídá hodnotě průměrné tvrdosti vzorku z komerčně čistého titanu.

Získané informace o chování kobaltových slitin a titanu při navařování plazmatem mohou sloužit pro další vědecké práce.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] BADIRU, Adedeji Bodunde, ed., Vhance V. VALENCIA, ed. a David LIU, ed. *Additive manufacturing handbook: product development for the defense industry*. Boca Raton, 2017. System innovation series. ISBN 978-148-2264-081.
- [2] VTÍPIL, Jaroslav. Aditivní technologie (nejen) v leteckém průmyslu. *MM Průmyslové spektrum*. 2018, (4). ISSN 1212-2572.
- [3] *Stellite Alloys* [online]. b.r. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: [https://www.kennametal.com/content/dam/kennametal/kennametal/common/Resources/Catalogs-Literature/Stellite/B-18-05723\\_KMT\\_Stellite\\_Alloys\\_Brochure\\_Direct\\_update\\_LR.pdf](https://www.kennametal.com/content/dam/kennametal/kennametal/common/Resources/Catalogs-Literature/Stellite/B-18-05723_KMT_Stellite_Alloys_Brochure_Direct_update_LR.pdf)
- [4] FROES, F.H. a B. DUTTA. The Additive Manufacturing (AM) of Titanium Alloys. *Advanced Materials Research* [online]. 2014, **1019**, 19-25 [cit. 2018-12-21]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1019.19. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMR.1019.19>
- [5] FRAZIER, William E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2014, **23**(6), 1917-1928 [cit. 2018-12-21]. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11665-014-0958-z>
- [6] DUTTA, Bhaskar a F. H. FROES. *Additive manufacturing of titanium alloys: state of the art, challenges and opportunities* [online]. Boston: Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2016. ISBN 978-0-12-804782-8.
- [7] CHEN, Jian. *Hybrid design based on wire and arc additive manufacturing in the aircraft industry*. 2012. Disertační práce. Cranfield university. Vedoucí práce Dr. Jörn Mehnen a Dr. Helen Lockett.
- [8] MITSUISHI, Mamoru, Jian CAO, Paulo BÁRTOLO, Dirk FRIEDRICH, Albert J. SHIH, Kamlakar RAJURKAR, Naohiko SUGITA a Kanako HARADA. Biomanufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. b.r., , 585-606.
- [9] SAUNDERS, Marc. *You can build it, but can you finish it?* [online]. b.r. [cit. 2018-10-29]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/you-can-build-finish-marc-saunders/>

- [10] DUTTA, B. a F.H. (Sam) FROES. The Additive Manufacturing (AM) of titanium alloys. *Metal Powder Report* [online]. 2017, 72(2), 96-106 [cit. 2018-12-21]. DOI: 10.1016/j.mprp.2016.12.062. ISSN 00260657. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0026065716305045>
- [11] 3D Printing Health & Safety Guide. *University of California, Riverside: Environmental Health & Safety* [online]. University of California, Riverside, b.r. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: [https://ehs.ucr.edu/laboratory/3D\\_coding\\_.html](https://ehs.ucr.edu/laboratory/3D_coding_.html)
- [12] 3D printed ship's propeller takes step closer to completion. *Damen* [online]. Nizozemsko, b.r. [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: [https://www.damen.com/en/news/2017/09/3d\\_printed\\_ships\\_propeller\\_takes\\_step\\_closer\\_to\\_completion](https://www.damen.com/en/news/2017/09/3d_printed_ships_propeller_takes_step_closer_to_completion)
- [13] EBM® in Aerospace: Additive Manufacturing taken to unseen heights. *Arcam EBM: a GE Additive company* [online]. Sweden, b.r. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/solutions/aerospace-ebm/>
- [14] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
- [15] MILOSLAV, Bajda. Navařování kovů. *Svět svaru*. 1996. ISSN 1214-4983.
- [16] HLAVATÝ, Ivo, Jiří HLAVATÝ a Lucie KREJČÍ. Navařování tvrdokovů. *Svět svaru*. Hadyna International s.r.o., 2007, 11(3), 18-19. ISSN 1214-4983.
- [17] LÖBL, Karel. *Navařování: Knihnice strojírenské výroby*. První. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. ISBN nemá.
- [18] PROCHÁZKA, Jiří, Miroslav ZAPOTIL, Milan NĚMEC a Jiří NOVOTNÝ. *Technologie slévání, tváření a svařování*. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1982. ISBN nemá.
- [19] LAPŠANSKÁ, Hana. Přehled metod svařování. In: *Portál moderní fyziky* [online]. Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky, b.r. [cit. 2016-10-04]. Dostupné z: [http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/lapsanska\\_prehled\\_metod\\_svarovani.pdf](http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/lapsanska_prehled_metod_svarovani.pdf)
- [20] *M13 MAG svařování nerezavějících ocelí* [online]. Air Products, b.r. [cit. 2017-12-12].
- [21] NOWOTNY, Steffen. *Laser-Präzisionsauftragschweißen mit zentrischer Werkstoffzufuhr*. Dresden, 2009.

- [22] Laserové navařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001 [cit. 2016-08-16]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-navarovani.html>
- [23] ROHAN, Pavel, Ladislav KOLAŘÍK, Tomáš KRAMÁR a Zdeněk KRŠKA. Navařování plazmatem: ochranné povlaky ve výrobě i výzkumu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, b.r. [cit. 2019-01-04]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-plazmatem-ochranne-povlaky-ve-vyrobe-i-vyzkumu.html>
- [24] *Deloro* [online]. Deloro Wear Solutions, 2016 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.deloro.com/>
- [25] MORAVEC, Jaromír. *Teorie svařování a pájení II: speciální metody svařování*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-439-9.
- [26] ELIEZER, Yaffa. a Shalom. ELIEZER. *The fourth state of matter: an introduction to plasma science*. 2nd ed. Philadelphia: IOP, 2001. ISBN 07-503-0740-4.
- [27] SCHWARZ, Drahomír a Ivo HLAVATÝ. Svařování plazmovým obloukem. *Svět svaru*. 2014, (1), 5. ISSN 1214-4983.
- [28] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Strojírenské materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2798-8.
- [29] KOLAŘÍK, Ladislav. *Svařitelnost TITANU a jeho slitin*. Praha, 2018.
- [30] KAMENÍČEK, Jiří. *Anorganická chemie*. 4. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2009. ISBN 978-80-244-2387-6.
- [31] GREENWOOD, N. N a Alan EARNSHAW. *Chemie proků*. Praha: Informatorium, 1993. ISBN 80-854-2738-9.
- [32] DORAZIL, Eduard. *Nauka o materiálu I.: Přednášky*. Brno: VUT v Brně, b.r.
- [33] Titanium. *MetalMiner: Sourcing & Trading Intelligence for Global Metals Markets* [online]. b.r. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <https://agmetalminer.com/metal-prices/titanium/>
- [34] OTANI, Tadayuki. *Titanium Welding Technology* [online]. b.r., , 5 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9515.pdf>
- [35] Welding Chambers Glovebox. *Glovebox.org* [online]. b.r. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <http://www.gloveboxes.org/welding-chambers-glovebox/>

- [36] Flexible Enclosure Welding. *Fabricating Metalworking* [online]. b.r. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2015/11/flexible-enclosure-welding/>
- [37] COLLIER, Jody. Welding Titanium. *WeldingTipsandTricks* [online]. b.r. [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <http://www.weldingtipsandtricks.com/welding-titanium.html>
- [38] Titanium anodize: Colours. In: *TFC: Titanium Finishing Company* [online]. b.r. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <https://www.titaniumfinishing.com/capabilities/titanium-anodize-colors/>
- [39] GILBERT, Nick. Stellite Alloys - Chemical Composition, Mechanical Properties and Common Applications. *AZO Materials* [online]. b.r. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9857>
- [40] *Stellite 6 Alloy: Technical data* [online]. In: . Koblenz, Německo: Deloro, wear solutions, b.r., s. 2 [cit. 2018-12-17].
- [41] Our Company History. *HAYBES International* [online]. 2015 [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <http://www.haynesintl.com/company-information/our-heritage/our-company-history>
- [42] Stellite Alloys - Chemical Composition, Mechanical Properties and Common Applications. *AZO materials* [online]. 2013 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9857#2>
- [43] ZHU, Zhiyuan, Chun OUYANG, Yanxin QIAO a Xiaowei ZHOU. Wear Characteristic of Stellite 6 Alloy Hardfacing Layer by Plasma Arc Surfacing Processes. *Scanning* [online]. 2017, **2017**, 1-7 [cit. 2018-12-17]. DOI: 10.1155/2017/6097486. ISSN 0161-0457. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/scanning/2017/6097486/>
- [44] KAPOOR, S., R. LIU, X. J. WU a M. X. YAO. Temperature-Dependence of Hardness and Wear: Resistance of Stellite Alloys. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering* [online]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2012, , 10 [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: <http://waset.org/publications/5340/temperature-dependence-of-hardness-and-wear-resistance-of-stellite-alloys>
- [45] FRENK, A. a J.-D. WAGNIÈRE. Laser cladding with Cobalt-based hardfacing alloys. *Le Journal de Physique IV* [online]. 1991, **01(7)**, 7-65-7-68 [cit. 2018-12-20]. DOI: 10.1051. ISSN 1155-4339. Dostupné z: <http://www.edpsciences.org/10.1051/jp4:1991714>

- [46] FRENK, A. a W. KURZ. Microstructural effects on the sliding wear resistance of a cobalt-based alloy. *Wear* [online]. 1994, **174**(1-2), 81-91 [cit. 2018-12-20]. DOI: 10.1016/0043-1648(94)90089-2. ISSN 00431648. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0043164894900892>
- [47] HEATHCOCK, C.J., A. BALL a B.E. PROTHEROE. Cavitation erosion of cobalt-based Stellite® alloys, cemented carbides and surface-treated low alloy steels. *Wear* [online]. 1981, **74**(1), 11-26 [cit. 2018-12-20]. DOI: 10.1016/0043-1648(81)90191-5. ISSN 00431648. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0043164881901915>
- [48] CELIS, J.P, D DREES, M.Z HUQ, P.Q WU a M De BONTE. Hybrid processes — a versatile technique to match process requirements and coating needs1. *Surface and Coatings Technology*. b.r., , 165-181.
- [49] Cobalt alloys: Typical Cobalt Alloy specifications we trade. *S.J.M. Alloys&metals: limited* [online]. 2017-2018 [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: <http://www.sjmalloysandmetals.com/portfolio-items/cobalt-alloys/>
- [50] *PPC 250 R3,5,6: Cladding machine (PTA metod)* [online]. b.r. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <http://ksk.stario.cz/wp-content/uploads/2016/03/PPC-250-R356.pdf>
- [51] *Materiálový list: Celsit V-P* [online]. b.r. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: [https://www.dew-metallpulver.de/fileadmin/files/metallpulver.de/documents/Publikationen/Deutsch/09.\\_Celsit-V-P\\_CZ\\_Rev\\_1.pdf](https://www.dew-metallpulver.de/fileadmin/files/metallpulver.de/documents/Publikationen/Deutsch/09._Celsit-V-P_CZ_Rev_1.pdf)
- [52] GURČÍK, Tomáš. *Stabilita procesu technologie WAAM*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Karel Kovanda Ph.D., IWE.
- [53] WAUTHLE, Ruben, Seyed Mohammad AHMADI, Saber Amin YAVARI et al. Revival of pure titanium for dynamically loaded porous implants using additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: C*. b.r., , 94-100.
- [54] *Werkzeugniss nach EN 10204-2.2: DEW CELSIT V-P*. Deutsche Edelstahlwerke, 2016.
- [55] Titanium Grade 1: Commercial pure titanium. *Institut for Energy Technology* [online]. Norway, b.r. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: [https://www.ife.no/en/ife/departments/materials\\_and\\_corrosion\\_tech/files/facts-and-figures-for-commonly-used-titanium-alloys](https://www.ife.no/en/ife/departments/materials_and_corrosion_tech/files/facts-and-figures-for-commonly-used-titanium-alloys)

- [56] BOXANOVÁ, Monika. Přípravek pro navařování citlivých materiálů. *Studentská tvůrčí činnosti 2019* [online]. České vysoké učení technické v Praze, 2019, , 5 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: [http://stc.fs.cvut.cz/pdf19/9519.pdf?\\_=1553890418](http://stc.fs.cvut.cz/pdf19/9519.pdf?_=1553890418)
- [57] DA ROCHA, Siknan Soares, Gelson Luis ADABO, Guilherme Elias Pessanha HENRIQUES a Mauro Antônio de Arruda NÓBILO. *Vickers Hardness of Cast Commercially Pure Titanium and Ti-6Al-4V Alloy Submitted to Heat Treatments* [online]. b.r., , 4 [cit. 2019-05-09]. ISSN 0103-6440. Dostupné z: <http://www.scielo.br/pdf/bdj/v17n2/v17n2a08.pdf>
- [58] ARC WELDING ROBOTS. In: *Fairweld: Dayachand Engineering Industries Pvt. Ltd.* [online]. b.r. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: [http://www.fairweld.com/welding\\_robots.html](http://www.fairweld.com/welding_robots.html)
- [59] Titanium Welding Chamber. In: *Topsimages* [online]. b.r. [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.topsimages.com/images/titanium-welding-chamber-97.html>
- [60] Inert Gas Chambers (welding Gloveboxes). In: *Weldlogic: Europe limited* [online]. 2014 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.weldlogic.co.uk/inert-gas-chambers-welding-gloveboxes/>
- [61] *Titan Schweißen: wir sind spezialisiert für das schweissen von Titan Werkstoffen* [online]. In: . b.r. [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <http://www.titan-schweissen.ch/>
- [62] *Blaue Titan Rohr Schweißen brennen– Stockbild* [online]. In: . 2018 [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <https://de.depositphotos.com/121339880/stock-photo-burning-blue-titanium-welding-pipe.html>


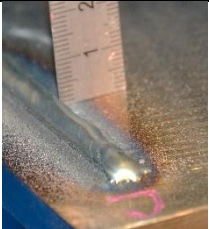
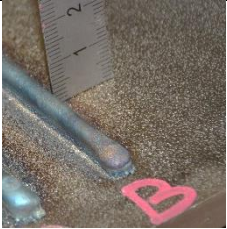

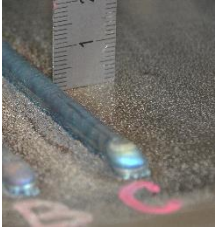

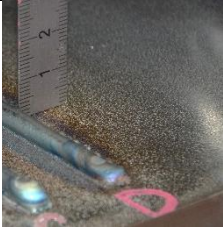







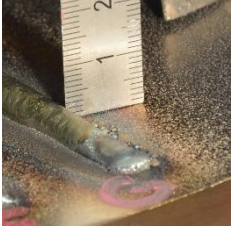





## PŘÍLOHY

Příloha č. 1	Fotografie návarů A až R
Příloha č. 2	Geometrie návarů 1 Formulář měření výšek návarů A–R, délka
Příloha č. 3	Geometrie návarů 1 Formulář měření šířek návarů A–R, šířka
Příloha č. 4	Geometrie návarů 2 Tvar návarové housenky
Příloha č. 5	Tepelné ovlivnění základního materiálu
Příloha č. 6	Formulář pro určení rovinnosti
Příloha č. 7	Formulář měření tvrdosti vzorku Stellite stěna
Příloha č. 8	Formulář měření tvrdosti vzorku Titanová stěna

## Příloha č. 1 – Fotografie návarů A–R

Fotografie byly pořízené na stroji těsně po navaření.

NÁVAR		NÁVAR	
A		J	
B		K	
C		L	
D		M	
E		N	
F		O	

<p><b>G</b></p>		<p><b>P</b></p>	
<p><b>H</b></p>		<p><b>Q</b></p>	
<p><b>I</b></p>		<p><b>R</b></p>	

## Příloha č. 2 – Geometrie návarů 1

### Formulář měření výšek návarů A–R

Délka návaru je 75 mm, měření probíhalo ve vzdálenostech 20, 40 a 60 mm od začátku návaru.

NÁVAR	VÝŠKA 1 [mm]	VÝŠKA 2 [mm]	VÝŠKA 3 [mm]	DOPLŇJÍCÍ MĚŘENÍ [mm]
A	4,7	4,5	4,7	
B	4,9	5,0	4,6	
C	4,9	4,6	4,9	
D	4,3	4,1	4,1	
E	3,0	2,4	2,6	4,6 (ve vzdálenosti 33 mm)
F	5,1	5,2	4,6	
G	5,8	5,0	4,0	
H	5,8	5,6	4,1	
I	6,0	5,3	4,4	
J	3,6	3,3	3,5	
K	3,7	3,9	3,4	
L	3,7	4,2	3,9	
M	4,4	4,0	3,2	
N	5,6	5,0	3,4	
O	4,9	4,5	4,0	
P	4,4	4,0	2,6	
Q	5,4	4,6	4,0	
R	5,3	4,5	4,1	

## Příloha č. 3 – Geometrie návaru 1

### Formulář měření šířek návarů A–R

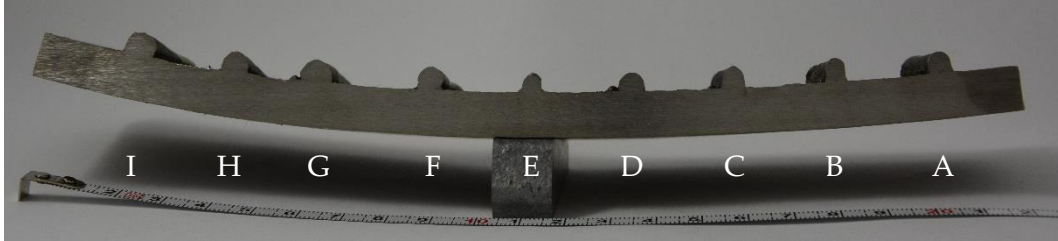
Délka návaru je 75 mm, měření probíhalo ve vzdálenostech 20, 40 a 60 mm od začátku návaru. V místě byla měřena maximální šířka.

NÁVAR	ŠÍŘKA 1 [mm]	ŠÍŘKA 2 [mm]	ŠÍŘKA 3 [mm]	DOPLŇJÍCÍ MĚŘENÍ
A	5,4	5,5	5,4	
B	4,4	4,6	4,4	
C	5,4	5,3	5,6	
D	5,0	5,9	5,6	
E	4,7	4,8	4,3	4 (ve vzdálenosti 33 mm)
F	5,9	5,8	5,9	
G	7,8	7,2	6,9	
H	6,7	6,2	6,1	
I	7,7	7,1	6,7	
J	5,9	5,9	5,5	
K	4,2	4,7	4,3	
L	4,8	5,2	5,4	
M	7,3	6,9	6,5	
N	5,4	5,4	6,0	
O	6,9	6,8	6,8	
P	8,1	7,1	7,0	
Q	8,1	7,6	7,2	
R	8,6	8,3	7,6	

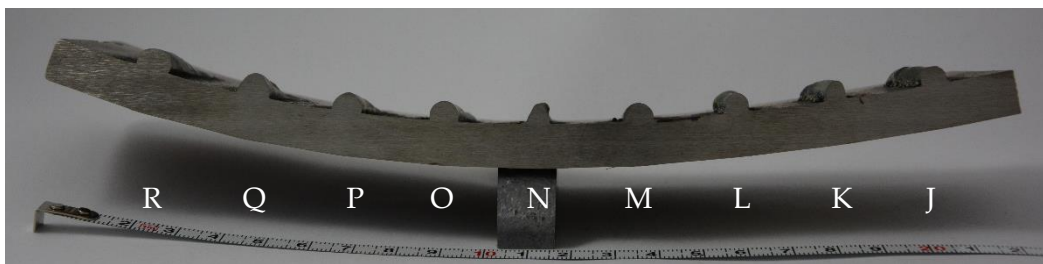
## Příloha č. 4 – Geometrie návarů 2

### Tvar návarové housenky

NÁVARY A - I



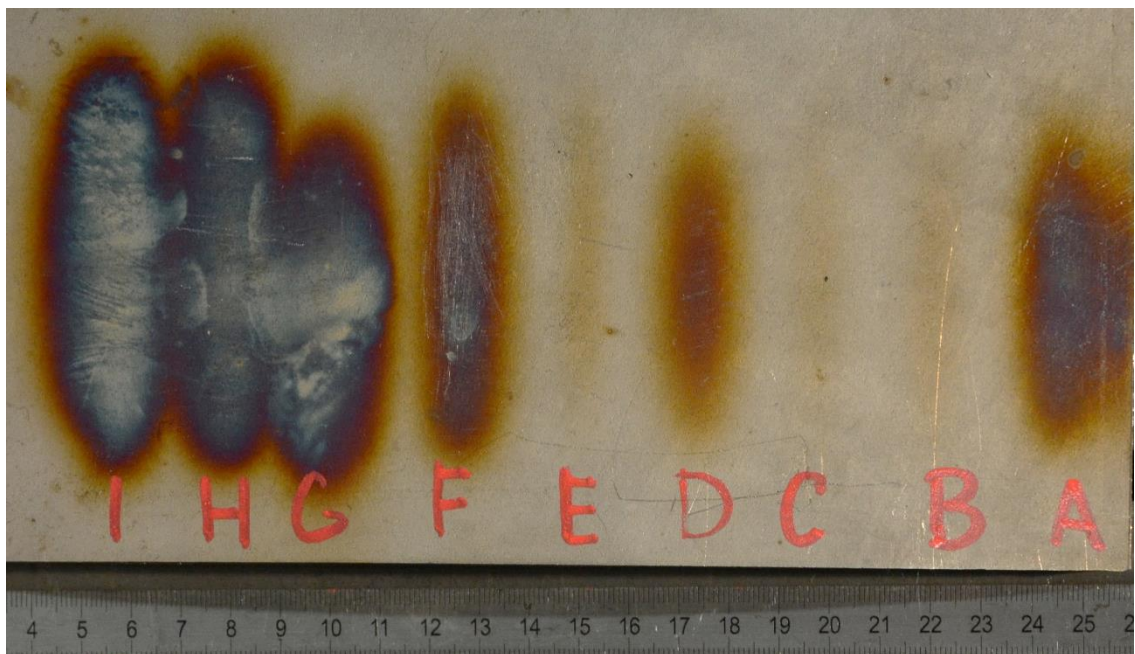
NÁVARY J - R



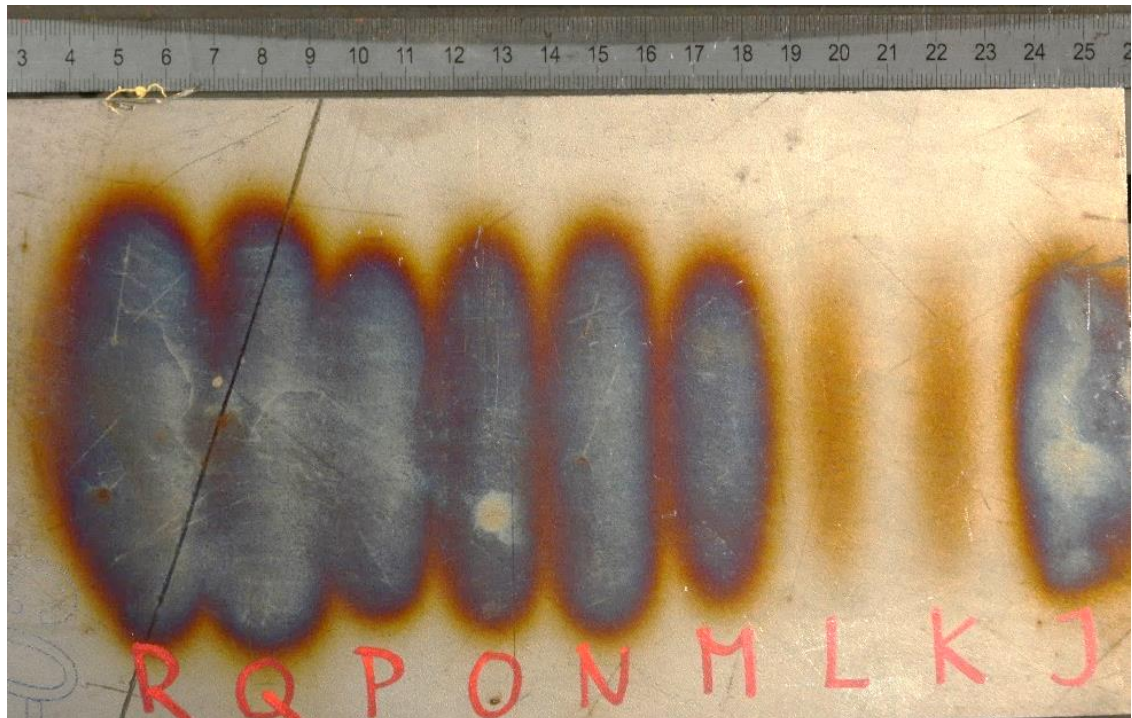


Příloha č. 5 – Tepelné ovlivnění základního materiálu

TEPELNÉ OVLIVNĚNÍ, NÁVARY A – I



TEPELNÉ OVLIVNĚNÍ, NÁVARY J – R




Příloha č. 6 – Formulář pro určení rovinnosti

NÁVAR	POČET PIXELŮ	NÁVAR	POČET PIXELŮ
A	8 040	J	3 972
B	4 823	K	7 407
C	7 628	L	2 224
D	4 062	M	5 038
E	24 163	N	11 843
F	2 986	O	4 860
G	8 036	P	15 611
H	9 092	Q	16 423
I	5 755	R	4 172

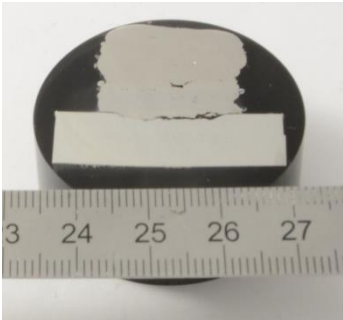


Příloha č. 7 – Formulář měření tvrdosti vzorku Celsit V-P stěna

<b>VZOREK</b>	Celsit V-P stěna	
<b>DATUM</b>	9. 5. 2019	
<b>NORMA</b>	ČSN EN ISO 6507-1	
<b>ZATÍŽENÍ</b>	1 kg	
<b>DOBA ZATÍŽENÍ</b>	11 s	
<b>POZNÁMKA</b>	<p>Vtisky v rozestupu 0,5 mm a 1 mm.</p> <p>Měření tvrdosti uprostřed vzorku směrem od ZM k povrchu.</p>	

VZDÁLENOST OD PATY [mm]	HV 1	VZDÁLENOST OD PATY [mm]	HV 1	VZDÁLENOST OD PATY [mm]	HV 1
ZM	202,5	6	462,8	22	452,7
ZM	202,9	7	448,5	23	421,2
ZM	206,1	8	474	24	458,4
ZM	196,7	9	462,1	25	462,8
ZM	198,7	10	460,6	26	438,2
0,5	422,5	11	477,8	27	453,4
1	418,7	12	463,5	28	471,7
1,5	428,3	13	465,7	29	449,9
2	421,9	14	440,3	30	445,1
2,5	441,6	15	467,2	31	464,3
3	455,6	16	466,5	32	473,2
3,5	452	17	425,1	33	449,2
4	447,1	18	467,2	34	440,9
4,5	467,2	19	472,5	35	453,4
5	450,6	20	426,4	36	449,9
5,5	464,3	21	419,3	37	447,7

Příloha č. 8 – Formulář měření tvrdosti vzorku Titanový blok

<b>VZOREK</b>	<b>Titanový blok</b>	
<b>DATUM</b>	<b>7. 5. 2019</b>	
<b>NORMA</b>	<b>ČSN EN ISO 6507-1</b>	
<b>ZATÍŽENÍ</b>	<b>1 kg</b>	
<b>DOBA ZATÍŽENÍ</b>	<b>11 s</b>	
<b>POZNÁMKA</b>	<b>Vtisky v rozestupu 1 mm.</b> <b>Měření tvrdosti uprostřed</b> <b>vzorku směrem od ZM</b> <b>k povrchu.</b>	

<b>VZDÁLENOST OD PATY [mm]</b>	<b>HV 1</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>VZDÁLENOST OD PATY [mm]</b>	<b>HV 1</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>
ZM	188,8	98,4	99,8	15	159,4	106,9	108,8
ZM	202,3	90,8	100,7	16	177,4	105,2	99,1
ZM	188,3	96,6	101,9	POVRCH	187,5	98,2	100,7
1	563,8	57,2	57,5	POVRCH	186,2	103,4	96,2
2	485,5	61,7	61,9	POVRCH	175,8	101,9	103,5
3	458,4	63,8	63,4				
4	437,6	65,5	64,7				
5	374,2	69,9	70,9				
6	257,9	81,3	88,3				
7	200,8	93,1	99,1				
8	186,0	99,9	99,8				
9	168,2	102,3	107,6				
10	167,2	106,3	104,3				
11	169,0	100,4	109,1				
12	221,7	91,1	91,8				
13	157,5	109,9	107,1				
14	151,7	110,2	110,9				