

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2023**



**ČVUT**

ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

# **Navařování abrazivzdorných povlaků metodou pulzního PTA**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Vojtěch Koula

**VEDOUCÍ PRÁCE:** Ing. Pavel Rohan, Ph.D., EWE

**STUDIJNÍ PROGRAM:** B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

**STUDIJNÍ OBOR:** 2301R000 Studijní program je bezoborový

**Praha 2023**



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Koula** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **501299**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojírenství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Navařování abrazivzdorných povlaků metodou pulzního PTA**

Název bakalářské práce anglicky:

**Pulsed PTA hardfacing of wear resistant alloys**

Pokyny pro vypracování:

Provést rešerši na téma navařování, abrazivzdorné slitiny,  
Navařit vzorky, charakterizovat materiál návaru z hlediska tvrdosti, struktury

Seznam doporučené literatury:

PRASAD, K. Siva, Ch. Srinivasa RAO a D. Nageswara RAO. Application of design of experiments to plasma Arc Welding Process: Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. scielo, 2012, 34, 75-81. ISSN 1678-5878.  
FAUCHAIS, Pierre a Armelle VARDELLE. Thermal Plasmas Surface Treatment. Materials Surface Processing by Directed Energy Techniques. Elsevier, 2006, s. 311-344.  
VITRY, V., S. NARDONE, J.-P. BREYER, M. SINNAEVE a F. DELAUNOIS. Microstructure of two centrifugal cast high speed steels for hot strip mills applications. Materials & Design. 2012, 34, 372-378. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.041>. ISSN 02613069. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026130691100519X>  
SUCHÁNEK, J., KUKLÍK, V., ZDRAVECKÁ, E., Abrazivní opotřebenění materiálů. Praha, 2007. ISBN 978-80-01-03659-4.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11.08.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

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

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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

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

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

V Praze dne: .....

.....

Podpis autora

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat především vedoucímu bakalářské práce **Ing. Pavlovi Rohanovi, Ph.D., EWE** za jeho odborné vedení, cenné rady a informace, nabyté zkušenosti a za jeho čas. Dále bych rád poděkoval **Ing. Martinovi Sahulovi, Ph.D.** za odborné vedení a pomoc při zhotovování metalografického výbrusu vzorků. Další poděkování patří níže zmiňované společnosti za možnost spolupráce na tomto projektu. A v neposlední řadě bych chtěl poděkovat celé své rodině, která mě podporovala nejen během psaní práce, ale i během celého studia.

# Anotace

**Název bakalářské práce:** Navařování abrazivzdorných povlaků metodou pulzního PTA

**Autor práce:** Vojtěch Koula

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

**Konzultant:**

**Akademický rok:** 2022/2023

**Vysoká škola:** ČVUT v Praze, Fakulta strojní

**Ústav:** 12133 – Ústav strojírenské technologie

**Vedoucí ústavu:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

**Rozsah práce:** 83 stránek, 12 tabulek, 46 obrázků

**Klíčová slova:** plazmové navařování, abrazivzdorné slitiny, niklová slitina typu 625, karbid bóru, kompozity s kovovou maticí, PTA, abrazivzdorné povlaky

## Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá navařováním abrazivzdorných povlaků na bázi kompozitu s kovovou maticí pomocí metody pulzního PTA. Teoretická část se věnuje obecné problematice technologie navařování, zejména pak metodě pulzního PTA. Dále je zde popsána problematika abrazivzdorných slitin se zaměřením na materiály typu Inconel® 625 a karbid bóru.

Experimentální část se zabývá nalezením vhodných parametrů navařovacího procesu a jejich použití při navaření vzorků. Materiálem povlaku je kompozit s kovovou maticí na bázi niklové slitiny typu 625, jehož výztuž tvoří karbid bóru. Vzorky byly podrobeny vybraným zkouškám pro zjištění vlastností návaru.

Navařený povlak by měl sloužit k ochranně součástí proti abrazivnímu opotřebením způsobeného proudící taveninou o teplotě blízké se 1500 °C.

# Annotation

<b>Title of the final thesis:</b>	Pulsed PTA hardfacing of wear resistant alloys
<b>Author:</b>	Vojtěch Koula
<b>Supervisor:</b>	Ing. Pavel Rohan, Ph.D., EWE
<b>Consultant:</b>	
<b>Academic year:</b>	2022/2023
<b>University:</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	12133 – Department of Manufacturing Technology
<b>Head of department:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Extent:</b>	83 pages, 12 tables, 46 pictures
<b>Keywords:</b>	plasma deposition, abrasion-resistant alloys, nickel alloy 625, boron carbide, metal matrix composites, PTA, abrasion-resistant coatings

## Abstract

This bachelor thesis deals with the deposition of abrasion-resistant coatings based on metal matrix composite using pulsed PTA method. The theoretical part is focused on the general issues of hardfacing, particularly the pulsed PTA method. Also, the issue of abrasion-resistant alloys, with a focus on Inconel® 625 and boron carbide, is described.

The experimental part deals with finding suitable parameters for deposition process and applying them to make samples. The material of the coating is metal matrix composite based on nickel alloy 625, reinforced with boron carbide. The samples underwent selected tests to determine the properties of the coating.

The deposited coating should be able to protect components against abrasion wear caused by flowing melt at temperature of approximately 1500 °C.

# Obsah

Seznam zkratk.....	9
Seznam použité symboliky .....	10
1. ÚVOD.....	11
2. Technologie navařování.....	12
2.1 Vybrané metody navařování .....	13
2.2 Plazmové navařování.....	16
2.2.1 Podstata a princip metody PTA.....	17
2.2.2 Hořáky pro PTA navařování.....	18
2.2.3 Vznik plazmatu.....	20
2.2.4 Parametry u PTA navařování .....	21
2.2.5 Promísení při PTA navařování .....	23
2.2.6 Zařízení pro navařování metodou PTA.....	25
3. Abrazivzdorné slitiny .....	27
3.1 Niklová slitina typu 625.....	30
3.2 Karbid bóru.....	32
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	33
4.1 Použité metody, přístroje a zařízení.....	34
4.1.1 Navařovací automat PPC 250 R6.....	34
4.1.2 Laboratorní komorová pec .....	36
4.1.3 Metodika navařování vzorků.....	37
4.1.4 Použité přídavné materiály .....	39
4.1.5 Parametry navařování vzorků.....	40
4.1.6 Měřicí ústředna.....	43
4.1.7 Snímání teploty .....	44
4.1.8 Měření mikrotvrdosti .....	46



4.1.9	Pozorování struktury .....	48
5.	VÝSLEDKY EXPERIMENTU A DISKUZE.....	49
5.1	Vizuální vyhodnocení návarů a průběhy teplot.....	49
5.1.1	Vzorky 4 a 5.....	50
5.1.2	Vzorek 7 .....	51
5.1.3	Vzorek 9.....	53
5.2	Tvrdost návarů .....	56
5.3	Struktura návarů.....	59
5.3.1	Makrostruktura návarů.....	59
5.3.2	Mikrostruktura návarů.....	63
5.4	Zkouška odolnosti návaru .....	67
6.	ZÁVĚR.....	69
	Bibliografie .....	71
	Seznam tabulek .....	77
	Seznam obrázků .....	78
	Seznam příloh.....	80
	Přílohy .....	81

## Seznam zkratek

<b>FGM</b>	functionally graded material
<b>HB</b>	stupnice tvrdosti dle Brinella
<b>HRC</b>	stupnice tvrdosti dle Rockwella
<b>HV</b>	stupnice tvrdosti dle Vickerse
<b>MAG</b>	metal active gas
<b>MMA</b>	manual metal arc
<b>MIG</b>	metal inert gas
<b>MMC</b>	metal matrix composite
<b>Nib625</b>	Nibasit 625–P/LFe® (DEW, Německo)
<b>PA</b>	poloha vodorovná shora
<b>PB</b>	poloha vodorovná šikmo shora
<b>PM</b>	přídavný materiál
<b>PTA</b>	plasma transferred arc
<b>SAW</b>	submerged arc welding
<b>TIG</b>	tungsten inert gas
<b>ZM</b>	základní materiál

## Seznam použité symboliky

Ar 4.8	argon o stupni čistoty 99,998 %
Ar 5.0	argon o stupni čistoty 99,999 %
hm %	hmotnostní procento
HV0,5	tvrdost dle Vickerse při zatížení 0,5 kilogramu
HV100	tvrdost dle Vickerse při zatížení 100 gramů

# 1. ÚVOD

Abrazivní opotřebení komponent mechanismů v mnoha průmyslových odvětvích je jeden z největších problémů, který má na svědomí významné finanční náklady společností. Je tedy obecnou tendencí vyrábět součásti z materiálů, které co nejvíce odolávají nepříznivým vlivům. Používanými materiály jsou nejčastěji tzv. abrazivzdorné slitiny na bázi kovových prvků, zejména Fe, Ni a Co. Mimo těchto slitin je možné použití MMC – kompozitů s kovovou maticí výhodně kombinujících vlastnosti kovové matrice a keramické výztuže. Díky širokému spektru existujících kovových slitin a keramických materiálů je možné vytvářet mnoho různých kombinací a dosáhnout tak požadovaných vlastností. Nicméně, ne vždy je výroba celé součásti ze zmiňovaných materiálů nutná nebo ekonomicky či technologicky výhodná. Efektivním řešením se jeví zlepšení vlastností jejího povrchu. Jednou z možností je aplikování ochranné vrstvy, tvořené výše zmíněnými materiály, k čemuž se dnes využívá řada technologií.

Práce se zabývá jednou z nejmodernějších technologií, a sice pulzním plazmovým navařováním (PTA) s využitím přídavného materiálů ve formě prášku. Materiálem navařovaného povlaku je kompozit s kovovou maticí (MMC). Matrice je tvořena niklovou slitinou Nibasit 625–P/LFe® (DEW, Německo) a výztuž karbidem bóru B<sub>4</sub>C.

Cílem teoretické části práce je přiblížit a popsat problematiku navařování se zaměřením právě na metodu PTA. Dále se tato část zabývá obecnou problematikou abrazivzdorných slitin. Blíže jsou pak představeny materiály použité v experimentální části. Jejím cílem je nalezení vhodných parametrů navařovacího procesu, navaření jednotlivých vzorků a konečně charakterizování materiálu návaru z hlediska tvrdosti a struktury.

Experimentální část práce probíhala ve spolupráci se společností, působící v oblasti výroby izolačních materiálů. Spolupráce se zabývá možností využití navařovaného povlaku k ochranně a prodloužení životnosti komponent výrobní linky, kteréžto jsou během jejího provozu vystavovány výrazným abrazivním a tepelným vlivům proudící taveniny o teplotě přibližně 1500 °C.

## 2. Technologie navařování

Navařování je proces, jehož podstata spočívá v natavování přídavného a základního materiálu a jejich následnému metalurgickému spojení ve vzniknuvší tavné lázni. Na navařované součásti tak po vychladnutí vzniká povlak – návar z přídavného materiálu, nejčastěji kovu požadovaných vlastností.

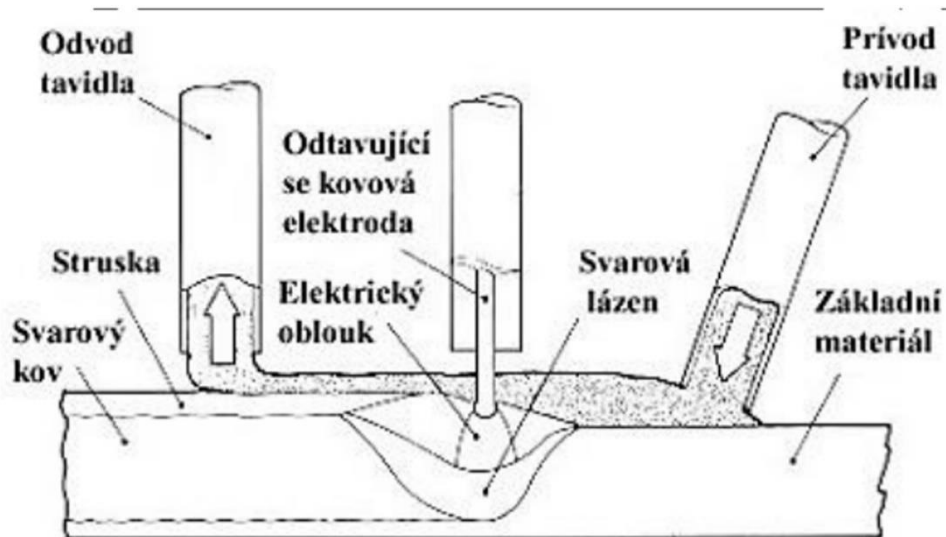
Technologie navařování je v principu stejná jako technologie svařování. Při svařování je většinou cílem spojení dvou či více součástí, čehož lze dosáhnout pomocí různých metod. Jedním ze společných prvků metod je přídavný materiál, který má u svařování funkci výhradně spojovací. Na rozdíl od toho je navařování proces, při kterém dochází k nanášení povlaku tvořeného právě přídavným materiálem na povrch součásti či obecně na základní materiál. Přídavný materiál je tedy využíván pro jeho vlastnosti zlepšující odolnost, trvanlivost a jiné parametry povrchu.

Technologie navařování má celou řadu využití. Především se ale jedná o dva základní případy. Tím prvním je oprava poškozených či opotřebovaných součástí. Zde je většinou přídavný materiál totožný s materiálem základním. Po navaření materiálu je nutné obrobení návaru na požadované rozměry. Druhým případem je zlepšování povrchových vlastností, a tedy funkčnosti povrchu součástí. V tomto případě je přídavný materiál odlišný od základní materiálu. Požadované vlastnosti přídavného materiálu jsou především otěruvzdornost, tvrdost, korozivzdornost či lepší životnost. Protože by výroba celé součásti z materiálu zajišťujícího právě tyto vlastnosti mohla být velice nákladná či dokonce nežádoucí (myšleno z hlediska požadavku na jiné vlastnosti jádra součásti), zdá se být navařování ideální technologií k vyřešení této problematiky. [1] [2]

## 2.1 Vybrané metody navařování

Jak již bylo zmíněno, svařování, a tedy i navařování, lze realizovat různými metodami. Nejčastěji jsou to metody využívající elektrického oblouku. Některé lze provádět manuálním způsobem, některé vyžadují automatizaci. Jako konvenční metody je možné označit: [2]

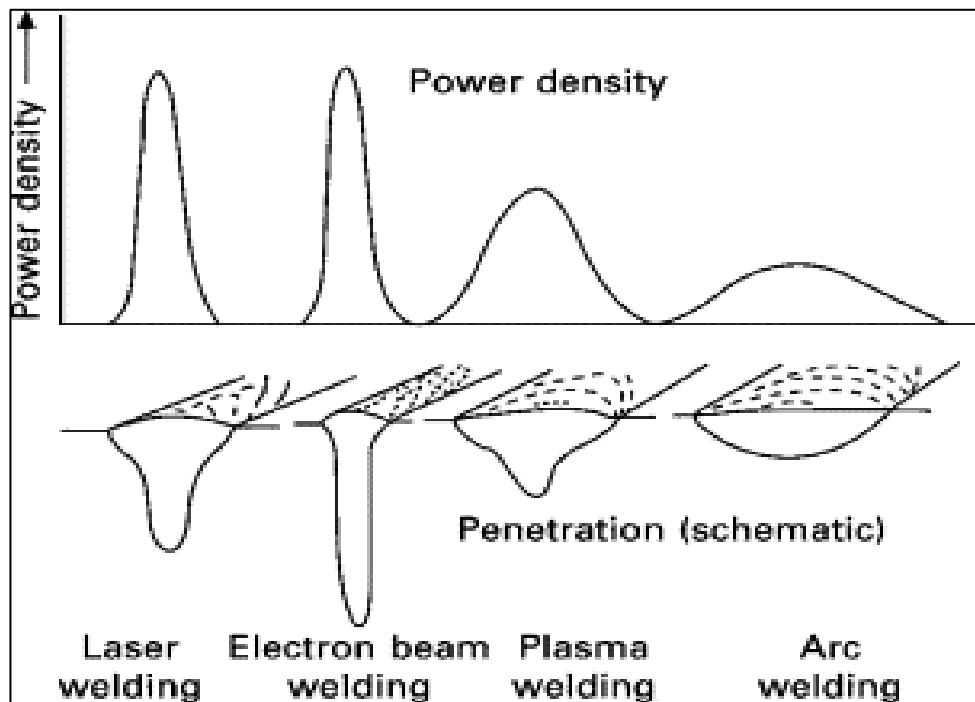
- MMA (navářování obalenou elektrodou) – metoda se provádí především manuálně a pro svou nízkou efektivitu není v průmyslu téměř vůbec využívána; zdrojem tepla je elektrický oblouk; obal elektrody má funkci elektrickou, fyzikální, metalurgickou, legující, operativní [3][4]
- MIG/MAG (navářování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře) – navařování odtavující se elektrodou, kde ochranná atmosféra je tvořena inertním (nereaguje při tvorbě svarového kovu) či aktivním (aktivně se účastní tvorby svarového kovu) plynem; metody lze provádět manuálně ale vhodnější je automatizovaný způsob; výhodou je poměrná vysoká produktivita, nevýhodou je pak malá škála použitelných přídavných materiálů [3][4]
- TIG (navářování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře) – navařování netavící se wolframovou elektrodou, kde ochranná atmosféra je tvořena inertním plynem; vhodná je automatizace procesu, nevýhodou oproti metodám MIG/MAG je nižší postupová rychlost či nutnost broušení elektrody [3]
- SAW (navářování pod tavidlem) – princip metody ukazuje Obrázek 1; u této metody je nutná robotizace (používá se tzv. svařovací traktor), z principu metody vyplývá její asi největší nevýhoda, a sice že ji lze použít jen v polohách PA (vodorovná shora) a PB (vodorovná šikmo shora) [3]



Obrázek 1 - Schéma navařování metodou SAW [3]

Kromě konvenčních metod se postupem času vyvinuly nové, modernější metody, a to navařování plazmatem, elektronovým paprskem a nejnověji také laserové navařování. [5]

Navařování laserem je dnes poměrně hojně využíváno. K natavení přídavného a základního materiálu a jejich následnému metalurgickému spojení dochází pomocí laserového paprsku, který zajišťuje velkou hustotu energie (viz Obrázek 2) a velmi nízké vnesené teplo do navařovaných součástí a lze tak navařovat i velmi jemné detaily. Dalšími výhodami jsou dobrá koheze a adheze povlaků bez porozit, vysoká efektivita (viz Tabulka 1) nebo široká škála přídavných materiálů, které mohou být dodávány ve formě drátu či prášku. Jde typicky o nerezové, konstrukční a nástrojové oceli, kobaltové, niklové či bronzové slitiny a v neposlední řadě také kompozity s kovovou maticí. Oproti plazmovému navařování jsou ale možnosti optimalizace parametrů navařování velmi zúžené. Jinou nevýhodou je poměrně vysoká investiční náročnost či velká hloubka průvaru (viz Obrázek 2 a Tabulka 1). Konkrétní příklady použití metody jsou navařování střížných hran nástrojů, komponent turbín, navíjecích bubnů, čepů a dorazových ploch. [1] [2] [4]



Obrázek 2 - Srovnání hustoty energie a tvaru průvaru vybraných metod navařování [48]

Tabulka 1 - Porovnání vybraných metod v číslech [10]

Metoda	Hustota energie [W/cm <sup>2</sup> ]	Hloubka průvaru [mm]	Šířka/hloubka svaru	Svařovací rychlost [m/min]
Laser	10 <sup>7</sup> – 10 <sup>9</sup>	25	0,1 – 0,5	až 10 m/min
Plamen	10 <sup>3</sup>	3	3	0,01
El. oblouk	10 <sup>4</sup>	4	2	0,5 – 3
Plasma	10 <sup>6</sup>	až 12	1	0,5 – 5
El. paprsek	10 <sup>8</sup>	200	0,03	0,5 – 5

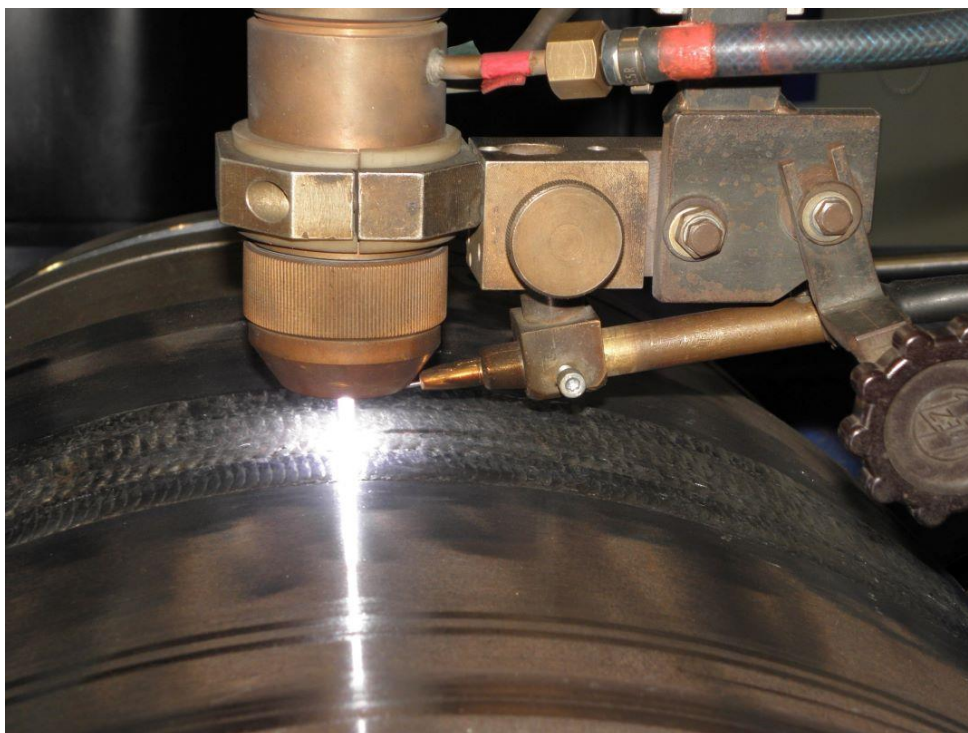


## 2.2 Plazmové navařování

Metoda PTA (viz Obrázek 3) byla vynalezena v 60. létech 20. století Robertem M. Gagem. Jedná se o dnes jednu z nejpoužívanějších technologií navařování. Mezi největší výhody metody patří: [2] [3] [5] [6] [7]

- malé promísení se základním materiálem i při téměř libovolné tloušťce návaru
- metalurgické spojení přídavného a základního materiálu
- úzká tepelně ovlivněná oblast a malé tepelné ovlivnění zákl. materiálu
- snadná automatizace
- dobrá možnost řízení procesu při zachování přijatelných investičních nákladů
- širší okno optimálních navařovacích parametrů oproti navařování laserem
- široká škála a vysoké využití přídavného materiálu

Metoda PTA byla použita k vyhotovení vzorků v experimentální části, a tedy právě jí se bude práce nadále věnovat.

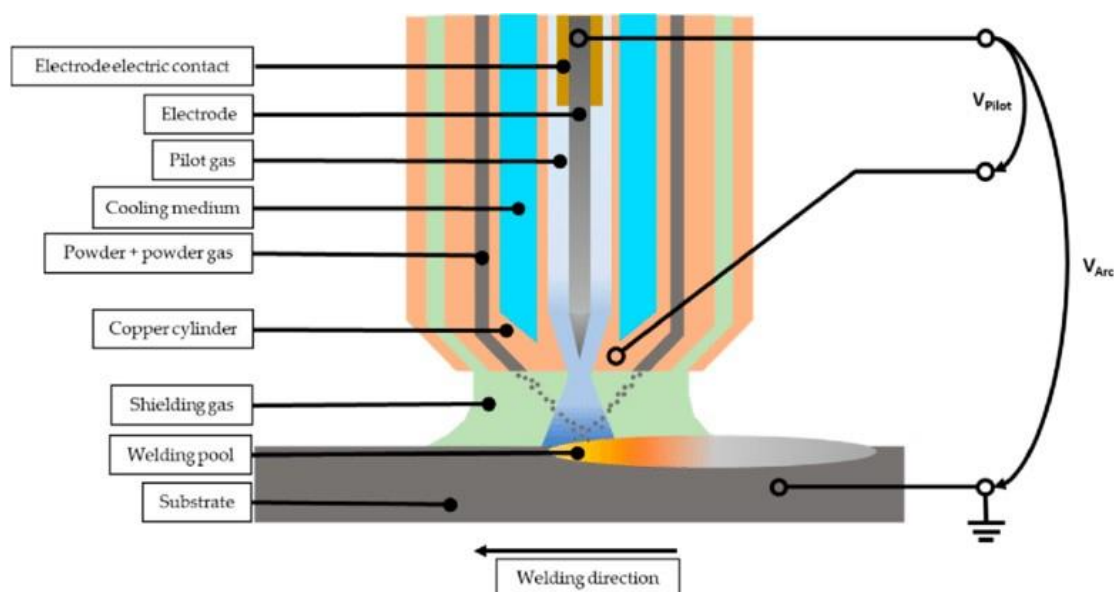


Obrázek 3 - Navařování metodou PTA [18]

## 2.2.1 Podstata a princip metody PTA

Podstata metody PTA je v zásadě stejná jako u již zmiňovaných metod. Přídavný materiál se roztavuje a dopadá na natavený základní materiál, kde se s ním spojuje – vzniká tak návar.

Na začátku celého procesu dochází k ionizaci prostředí hořáku, k čemuž slouží tzv. pilotní oblouk. Ten je zapalován vysokofrekvenčním výbojem mezi wolframovou elektrodou, která zastává roli katody, a měděnou tryskou v roli anody. Díky tomu se minimalizuje vzdálenost, kterou je potřeba výbojem prorazit a následné zapálení hlavního oblouku je jednodušší. Z důvodu opotřebovávání anody nezůstává pilotní oblouk hořet po celou dobu procesu. Okolo wolframové elektrody proudí inertní plyn, nejčastěji argon, který je díky vysoké teplotě oblouku ionizován a stává se tak plazmatem. Proud plazmatu o teplotě mezi 10 000 a 15 000 °C je vodivý, a lze jím přenášet elektrický proud. Hlavní, přenesený, oblouk je zapálen mezi wolframovou elektrodou (katoda) plazmatronu a navařovanou součástí, připojenou na kladný pól (anoda). Proud plazmatu natavuje základní materiál a je do něj přiváděn materiál přídavný, který je v něm roztavován a urychlován. Roztavený přídavný materiál následně dopadá do tavné lázně, tvořené nataveným základním materiálem. Tavná lázeň poté krystalizuje, čímž vzniká povlak (návar), který je metalurgicky propojen s navařovanou součástí. [2] [6] [7] [8] [9] [10] [13] [14]



Obrázek 4 - Schéma hořáku pro PTA navařování [49]

## 2.2.2 Hořáky pro PTA navařování

Hořák, nebo také plazmatron, pro plazmové navařování lze popsat jako jakousi trysku, skládající se z několika částí (viz Obrázek 4). Hořáky bývají často navrženy přímo pro navařování specifických oblastí. To mohou být například obtížně přístupné vnější tvary, zde se využívá zúžené dýzy, či vnitřní povrchy a plochy, a to již od průměru 45 mm. Dalším parametrem určujícím konstrukci hořáku je dozajista forma, ve které se podává přídavný materiál. Ten může být dodáván buď ve formě drátu, či ve formě prášku. [2]

Hořáky je možné rozdělit podle toho, jak v nich plazma vzniká na: [14]

- hořáky se závislým (přeneseným) plazmovým obloukem – u tohoto typu hoří oblouk mezi wolframovou katodou a základním materiálem v roli anody, tepelné namáhání svařovací hubice je v tomto případě menší a její životnost delší [14]
- hořáky s nezávislým (nepřenosným) plazmovým obloukem – oblouk hoří mezi wolframovou katodou a tryskou hořáku zastávající roli anody, z trysky poté vystupuje pouze plazmový paprsek o vysoké teplotě, díky čemuž lze navařovat na nevodivé materiály, v tomto případě je ale zapotřebí vodního chlazení, protože dochází k výraznému zahřívání trysky [14]
- hořáky s kombinovaným zapojením – toto zapojení kombinuje předchozí dvě a jeho princip byl popsán v kapitole 2.2.1

Následující odstavce se budou věnovat popisu částí plazmatronu využívající práškový přídavný materiál.

Uprostřed plazmatronu se nachází netavící se wolframová elektroda. Jak již bylo řečeno, zajišťuje hoření jak pilotního, tak přeneseného (plazmového) oblouku. V obou případech zastává roli katody. Elektroda je broušena do špičky, stejně jako u metody TIG, čímž se zajišťuje dobrá stabilita oblouku a lepší trvanlivost elektrody samotné. [2] [3] [13] [15]

Okolo centrální elektrody proudí plazmový plyn, který je vždy plynem inertním. Ten je ionizován pomocí pilotního oblouku a stává se z něj proud plazmatu, který je koncentrován a usměrňován zužující se tryskou. Nejčastěji se jedná o argon, ovšem lze použít jeho směsi, především s héliem a vodíkem. [2] [13] [15]

Zužující se tryska, která je další vrstvou hořáku, je vyrobena z mědi a její hlavní specifikací je velikost centrálního otvoru, skrze který protéká proud plazmatu, a tedy přenesený oblouk. Průměr otvoru má velký vliv na kvalitu navařování, zejména pak na šířku a hloubku penetrace. Trysku je z důvodu jejího významného zahřívání chladit. K tomu slouží kanálky pro chladící médium, nejčastěji vodu. [12] [13] [14] [15]

V trysce se dále nachází přívod přídavného materiálu. Ten je dodáván ve formě prášku a je usměrňován a poháněn nosným plynem, kterým je nejčastěji směs argonu s vodíkem nebo dusíkem. Velikost částic prášku se pohybuje od desítek do stovek  $\mu\text{m}$ . Sklon přívodu ve spodní části hořáku je  $60^\circ$  což zajišťuje vhodný přívod prášku přímo do proudu plazmatu. Přídavný materiál může být dodáván ve formě drátu, který je podáván mimo plazmatron do prostoru mezi ním a navařovanou součástí. V případě potřeby zvýšení odtavovacího výkonu může být tento drát přehříván, pak se jedná o tzv. metodu horkého drátu. [2] [12] [13] [14] [15]

Nejdále od středu trysky, mezi tryskou hořáku a hubicí pro přívod ochranného plynu, proudí právě ochranný plyn, který má za úkol chránit tavnou lázeň před nepříznivými vlivy okolní atmosféry, jako je například oxidace. Nejčastější k tomu využívané plyny jsou argon, jeho směsi s vodíkem či dusíkem nebo oxid uhličitý. Tento plyn se volí dle základního materiálu tak, aby byla tavná lázeň co nejméně chemicky ovlivněna. [12] [14] [15] [16]

### 2.2.3 Vznik plazmatu

Jak již bylo zmíněno, zdrojem tepla u metody PTA je právě plazmový paprsek, který vzniká ohřátím proudícího plynu na vysokou teplotu. Obecný stav plynu závisí na pohybu jeho molekul. S rostoucí teplotou roste také rychlost, jakou se molekuly pohybují. Když je rychlost dostatečně velká, může nastat stav, během kterého je při vzájemných srážkách molekul nárazová energie větší než energie vazební, čímž dojde k disociaci molekuly na atomy. Při teplotě 4000 K je disociováno asi 40 % molekul, při 10 000 K disociuje již asi 99 %. [14]

Při dalším zvýšení teploty, a tedy zvýšení energie srážek, dochází k vyrážení elektronů z valenční vrstvy atomů. Atom se štěpí na záporně nabitý elektron a zbytek atomu, kladně nabitý iont. Obě části se mohou volně pohybovat, čímž dochází k ionizaci plynu. Hodnoty energie, potřebné k ionizaci vybraných plynů, uvádí Tabulka 2. U plynů, jako jsou argon, helium či neon, dochází pouze k ionizaci. Tyto plyny, které jsou charakterizovány jako netečné, mají uzavřenou valenční vrstvu a jejich molekula je pouze jednoatomová – nemůže disociovat. Naopak u plynu, kterým je například dusík, je k ionizační energii nutno připočítat i energii potřebnou právě k disociaci molekuly. [2] [14]

Plazma tedy obsahuje jak částice nabitě záporně, tak částice nabitě kladně. Díky tomu na plazma, na rozdíl od plynu, působí magnetické a elektrické pole, čehož využívá právě metoda PTA. Jelikož je ale počet částic obou polarit vždy stejný, je plazma celkově elektricky neutrální. [14]

Tabulka 2 - Ionizační energie vybraných plynů [2]

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

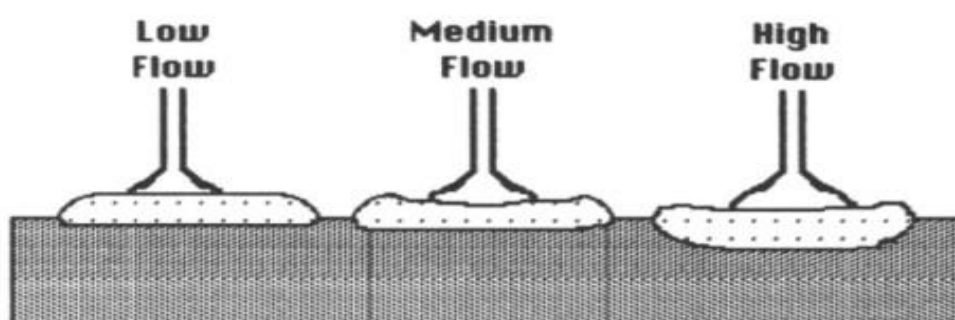
## 2.2.4 Parametry u PTA navařování

Nejdůležitějšími parametry u metody PTA jsou velikost proudu pilotního i plazmového oblouku, průtok plazmového, ochranného i nosného plynu, rychlost dodávání přídavného materiálu či vzdálenost trysky od navařované. Díky tolika stavitelným parametrům lze optimalizovat proces navařování, což je, jak již bylo zmíněno, jedna z největších výhod metody PTA. Navíc se v poslední době objevují vcelku významná zlepšení celé technologie, kterým je například využití pulzního proudu v pilotním oblouku pro generování plazmatu, čímž se snižuje vnesené teplo do součásti. Umožňuje se také další zpřesnění volby parametrů procesu. [2] [12] [14]

Na výsledek má také velký vliv tzv. stupeň fokusace paprsku. Ten zahrnuje hustotu proudu plazmatu, jeho maximální teplotu a průměr. Fokusaci lze docílit pomocí několika řešení, založených především na mechanicko-fyzikálním principu ochlazování. K tomu dochází již v hubici plazmatronu, kde vodou chlazený povrch trysky ochlazuje vnější vrstvy plazmového paprsku. Důsledkem toho je vnější vrstva tvořena poměrně studeným neionizovaným plynem, který je méně vodivý, a tedy průřez vodivého jádra se zmenší. Nemá-li klesnout přenášený elektrický výkon, teplota paprsku musí stoupnout. [14]

Je ale velmi důležité udržet paprsek fokusovaný i poté, co opustí trysku. Toho lze dosáhnout například ochrannou atmosférou, která má vysoký ochlazovací účinek. Je složena z víceatomového plynu, tedy vodíku či dusíku. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.3, při zahřívání víceatomových plynů musí molekuly nejprve disociovat, a proto je jejich ionizace obtížná. Vodík vyžaduje k disociaci molekul velké množství tepla. Potřebné teplo vlastně odebírá okrajové vrstvě paprsku – ochlazuje ji, čímž se opět snižuje elektrická vodivost této vrstvy a paprsek se zužuje – je fokusován. Další možností je užití tzv. fokusačního plynu, který je do paprsku plazmatu přiváděn pod určitým úhlem tak, aby ho protínal ještě před stykem se základním materiálem. Fokusační plyn paprsek plazmatu zaostřuje a zužuje. Nejčastěji se jedná o směs argonu s vodíkem nebo dusíkem, a to v množství 4 až 7 l/min. Fokusační plyn je užíván spíše při svařování metodou PTA. [14] [15] [19]

Samozřejmě k usměrnění paprsku slouží i samotné zúžení trysky. Průměr otvoru trysky, kterým prochází veškerý objem plazmového plynu, má velký vliv na kvalitu návaru, nýbrž souvisí se šířkou a penetrací vznikuvší svarové housenky. Zúžování průměru otvoru znamená snižování průtoku plazmového plynu, snižování svařovacího proudu a zvyšování teploty oblouku. Moc velký průtok plynu znamená jeho turbulentní proudění, což může zapříčinit vznik pórů či oxidů. Dále dochází ke ztenčování střední části návaru a vytlačování materiálu na okraj (viz Obrázek 5). Proto se průtok plynu volí mezi 2 až 8 l/min. [12] [14] [17]

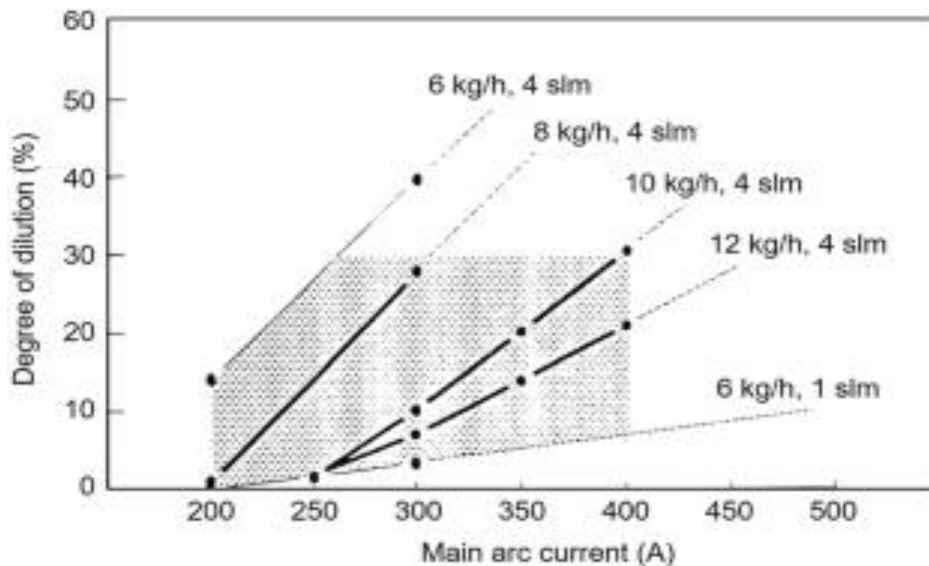


Obrázek 5 - Vliv průtoku plazmového plynu na tvar tavné lázně [17]

Dalším parametrem je odstup elektrody, který se měří od špičky elektrody k vnější ploše trysky a má vliv především na stupeň sevření a tuhost plazmového paprsku. Z výzkumu Oliveiry [20], který se zabýval tím, zdali stupeň sevření oblouku ovlivňuje jeho napětí, vyplývá, že průměrná změna napětí jako funkce odstup elektrody je 2,4 V/mm. [12]

Čím menší je odstup wolframové elektrody a čím menší je průměr otvoru trysky, tím větší je účinek zúžení paprsku a ten je opět více koncentrovaný – fokusovaný. [12]

Rychlost proudění plazmového plynu má vliv především na rychlost částic přídavného materiálu nanášených na základní materiál. Dopadová rychlost částic ovlivňuje výslednou kvalitu a přilnavost návaru. Při použití přídavného materiálu ve formě drátu má rychlost proudění vliv na velikost vznikajících kapiček kovu. [14]



Obrázek 6 - Závislost stupně promísení na velikosti svařovacího proudu, rychlosti dodávání částic a průtoku plazmového plynu [50]

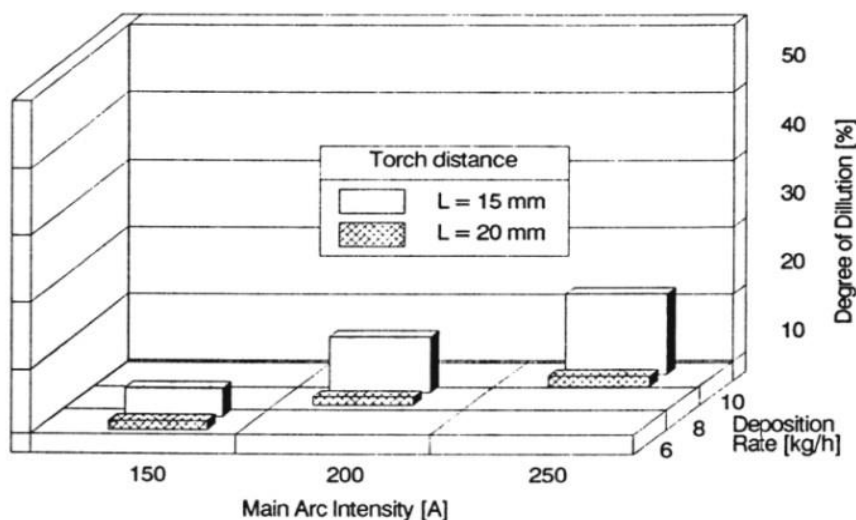
## 2.2.5 Promísení při PTA navařování

Promísení je jev vyskytující se při navařování i svařování. Během procesu navařování dochází ke vzlínání prvků ze základního materiálu do tavné lázně. Návar je vzlínajícími prvky legován, přičemž největší vliv má železo, což nepříznivě ovlivňuje výslednou kvalitu povlaku, projevující se snížením tvrdosti, korozní odolnosti či odolnosti proti opotřebení. Při použití koncentrovaného zdroje tepla, kterým plazmový paprsek je, dosahuje stupeň promísení velmi nízkých hodnot. Navíc díky tolika stavitelným parametrům, jakými metoda PTA disponuje, lze promísení vhodně kontrolovat a omezovat. [17] [21]

Největší vliv na promísení má svařovací proud. Dále pak také průtok plazmového plynu či rychlost, kterou je dodáván přídatný materiál. Při zvýšení hodnoty proudu dochází ke zvýšení penetrace paprsku, a proto také ke zvýšení stupně promísení, jak je patrné z Obrázek 6. Stejný efekt jako svařovací proud má průtok plazmového plynu. Naopak efekt opačný, tedy snižování stupně promísení, má zvyšování rychlosti dodávaných částic. Je tomu tak proto, že více energie se spotřebuje právě na tavení částic. Z grafu na Obrázek 6 také vyplývá, že při zvyšování průtoku plazmového plynu a snižování rychlosti podávání částic se zvyšuje i rychlost promísení v závislosti na zvyšování proudu – to je patrné ze strmosti křivek. [17]



Dalším parametrem, který má výrazný vliv na stupeň promísení, je vzdálenost trysky od navařované součásti, zmiňovaná již v kapitole 2.2.4. Její vliv ovšem není tak markantní, jako vliv svařovacího proudu. Čím větší je vzdálenost trysky, tím menší je stupeň promísení. Popsané závislosti ilustruje Obrázek 7. Navíc, když je vzdálenost trysky od povrchu větší, je tryska méně vystavována výparům a rozstříkům vznikajících během procesu, a má tak delší životnost. [17]



Obrázek 7 - Závislost stupně promísení na vzdálenosti trysky a svařovacím proudem [17]

Pokud dochází k navařování směsi složené ze dvou různých materiálů, je třeba dát pozor i na jejich vzájemné promísení. Z důvodu rozdílných fyzikálních vlastností může docházet například k vyplavování jedné ze složek na povrch tavné lázně, čímž pádem nejsou zajištěny vlastnosti, vyplývající právě z kombinace dvou či více materiálů, v celém objemu návaru, což může a nemusí být žádoucí. [19]

Konkrétně v problematice, kterou se práce zabývá, dochází k vyplavování keramického materiálu  $B_4C$  na povrch. Ve spodní části je pak koncentrovaná niklová slitina typu 625. Jelikož účelem návaru ochrana základního materiálu proti proudící tavenině, je koncentrace keramického, tedy tepelně odolnějšího, materiálu ve stykové oblasti výhodná. Navíc větší koncentrace niklové slitiny, či spíše menší koncentrace keramické látky ve spodní části, zajišťuje lepší spojení návaru se základním materiálem. [19]

## 2.2.6 Zařízení pro navařování metodou PTA

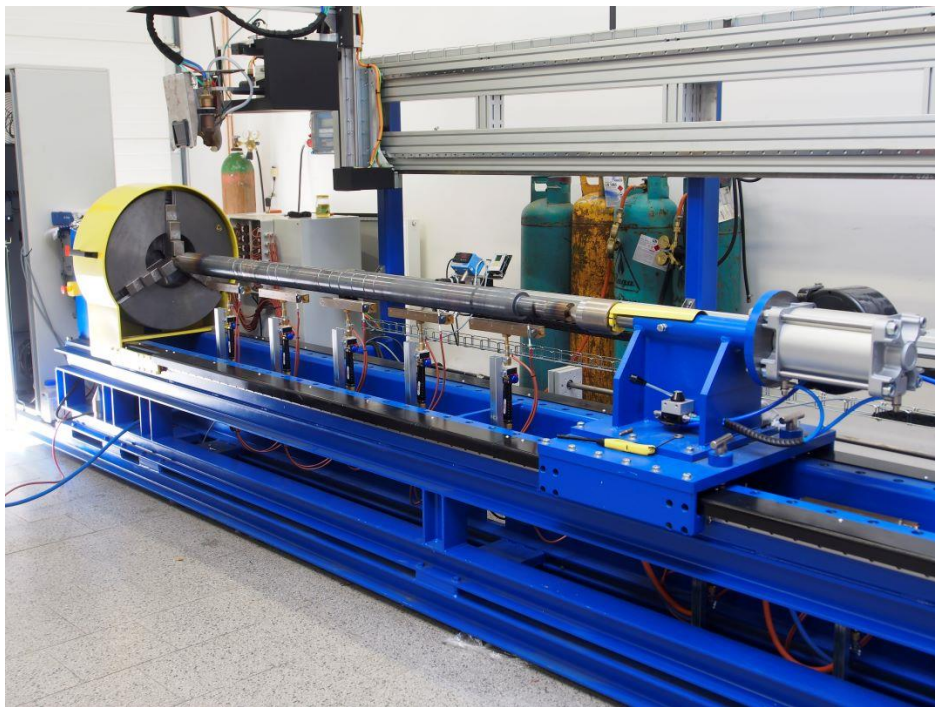
Z předchozích kapitol vyplývá, že pro úspěšné a kvalitní navaření povlaku je nutné dodržet hned několik parametrů, jakými jsou například vzdálenost trysky, svařovací proud či průtok plynu. Tedy vzhledem k podstatě samé, přichází v úvahu pouze automatizovaný způsob navařovacího procesu. Využívá se navařovacích automatů, které jsou díky počítačovému řízení schopny udržet zmíněné parametry na požadovaných hodnotách po celou dobu procesu.

Zařízení pro plazmové navařování lze rozdělit na univerzální a specializované/jednoúčelové automaty. Univerzální slouží zejména pro kusovou a malosériovou výrobu. Velikost či tvar součásti, na kterou lze navařovat, jsou omezeny konstrukcí daného stroje. Například automat PPC 250 GMR (KSK, s.r.o., Česká Třebová, Obrázek 8) je určen pro navařování tvarových součástí (např. sklářské formy), rotačních součástí na obvodě i z čela (např. sedla a kuželky armatur, středící kroužky) a nerotačních součástí z čela. Univerzální automaty mají obecně vzato více řízených os, a to jak polohovadla součásti, tak polohovacího systému plazmového hořáku. Konkrétně u automatu PPC 250 GMR lze hořák řídit ve 4 osách a součást ve 2 osách. [18]



Obrázek 8 - Univerzální navařovací automat PPC 250 GMR [18]

Jednouúčelové stroje mají naopak méně řízených os, a tedy i jednodušší konstrukční uspořádání, zajišťující mimo jiné i vyšší tuhost stroje. Jsou uzpůsobené potřebám výroby konkrétní součásti, a proto se využívají pro sériovou výrobu (např. Obrázek 9). Jedná se o automat PPC 250 WH, určený pro navařování na rotačních součástech, např. extrudérech. Jak je patrné z konstrukce, navařované součásti mohou být velmi dlouhé a těžké – maximální hmotnost součásti je výrobcem (KSK, s.r.o., Česká Třebová) uváděna jako 2000 kg a délka jako 7 m. Zařízení je vybaveno systémem pro přehřev součásti. [18]



*Obrázek 9 - Navařovací automat PPC 250 WH [18]*

### 3. Abrazivzdorné slitiny

Abrazivní opotřebení je jedním z největších problémů mnoha průmyslových odvětví, kterými mohou být například těžební a stavební průmysl, letectví a kosmonautika či energetika. Degradace dílů vlivem abraze a jejich následné opravy nebo výměny stojí společnosti působící ve vyjmenovaných, a mnoha dalších odvětvích, nezanedbatelné množství finančních prostředků. K omezení výdajů byla vyvinuta řada technologií povrchových úprav, které mají za úkol chránit součást (základní materiál) právě před abrazivními, ale i jinými nepříznivými vlivy, a tím tak prodloužit její životnost. Úprava povrchové vrstvy může být docílena fyzikálním či chemickým ošetřením nebo nanesením ochranné vrstvy. Metodám nanášení ochranné vrstvy, zejména pak metodě PTA za použití práškového přídavného materiálu, se věnuje kapitola 2. [21] [22]

Hojně využívanými materiály pro ochranné vrstvy jsou tzv. abrazivzdorné slitiny. Obecně se tyto slitiny skládají ze dvou a více kovových prvků, díky jejichž správné kombinaci lze dosáhnout požadovaných vlastností, v tomto případě zvýšené odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení. Nejčastěji bývají abrazivzdorné slitiny na bázi železa, niklu nebo kobaltu, a sice proto, že tyto prvky vynikají dobrými vlastnostmi držet a spojovat tvrdé fáze. K bázevým prvkům se přidávají prvky jako Cr, C, B, W, Si a další. Při výrobě abrazivzdorných slitin spolu zmiňované prvky za působení vysokých teplot reagují a během následného tuhnutí dochází ke vzniku primárních a eutektických tvrdých fází. U slitin na bázi Fe a Co se jedná především o karbidy. U slitin na bázi Ni se jedná o boridy a karbidy. Právě vznikající tvrdé fáze způsobují vysokou tvrdost a pevnost slitin, což zajišťuje jejich vysokou abrazivní odolnost. [21] [24] [25]

Abrazivzdorné slitiny jsou označovány například následujícím způsobem. Na prvním místě označení se nachází chemická značka základního materiálu, po které následují chemické značky prvků legujících. Za těmi se vždy nachází číslo značící obsah prvku v hmotnostních procentech. [24]

Vzhledem k častým výměnám opotřebovávaných dílů, které jsou součástí například různých drtičů, mlecích zařízení nebo důlních strojů, je tendence chránit je co nejlevnějšími a nejdostupnějšími materiály. Z tohoto důvodu jsou nejpoužívanějšími abrazivzdornými slitinami ty na bázi Fe, právě tedy díky jejich nízké ceně a široké škále žádoucích vlastností. Klasifikování těchto slitin je vhodné spíše dle způsobu využití nebo dle mikrostruktury než podle chemického složení. Lze je rozdělit na: [25]

- oceli perlitické – nízký obsah C (<0,2 %) a legujících prvků; obnova rozměrů součástí z uhlíkových či nízkolegovaných ocelí; dobrá odolnost vůči rázům, nízká tvrdost (25-37 HRC) [25]
- austenitické (manganové) oceli –
  - s nízkým obsahem chromu (do 4 % Cr); oprava součástí z manganových ocelí vystavovaných silným rázům [25]
  - s vysokým obsahem chromu (12 až 17 % Cr); oprava součástí z austenitických manganových, uhlíkových i nízkolegovaných ocelí [25]
- martenzitické oceli – obsah C <0,7 %; obsah legujících prvků Mo, W, Cr <12 %; nízká odolnost vůči rázům, ale vysoká tvrdost (45–60 HRC) a odolnost vůči abrazi; využití v aplikacích, kde dochází ke kontaktu kov na kov; jedná se například o válcování plechů nebo kluzné díly bez použití mazání [25]
- austenitické korozivzdorné oceli – považovány za alternativu ke slitinám na bázi Co; dobré vlastnosti pro omezení tvorby okují a dobrá odolnost vůči kavitační erozi; využití např. v jaderných elektrárnách jako výztuž ventilů, poněvadž Co vytváří v prostředí jaderné elektrárny radioaktivní izotopy a představuje tak bezpečnostní riziko; jiným příkladem použitím je oprava lopatek turbín ve vodních elektrárnách [25] [26]

Abrazivzdorné slitiny na bázi Ni a Co nacházejí své využití tam, kde je potřeba vysoká odolnost součástí proti opotřebení za současného provozu v chemicky agresivním a korozivním prostředí nebo při provozu za vysokých teplot, obvykle překračujících hranici použitelnosti slitin na bázi Fe. Tyto slitiny disponují velmi dobrou odolností vůči korozi (dána především obsahem Cr), dobrými mechanickými vlastnostmi i za vysokých teplot a dobrou odolností vůči opotřebení. Používají se pro výrobu součástí turbín, sedel ventilů či jiných součástí podléhajících kavitaci. Nacházejí uplatnění také v medicíně, automobilovém, petrochemickém nebo v jaderném průmyslu. Slitiny na bázi Ni mají obecně lepší odolnost vůči opotřebení a bývají levnější než slitiny na bázi Co. Nejčastěji používané Ni slitiny jsou NiFe, NiW a NiFeW. Typickými zástupci Co slitin jsou skupiny slitin s názvy Stellite® či Tribaloy®. [25] [27] [28] [29] [30]

Další možností pro zhotovení ochranné vrstvy je využití kompozitních materiálů. V této oblasti se jedná o kompozity s kovovou maticí (MMC). Z funkčního hlediska je jejich princip v zásadě stejný, jako u abrazivzdorných slitin. Kompozitní materiály jsou ale na rozdíl od homogenních slitin tvořeny různými složkami majícími odlišné vlastnosti. Zatímco u slitin je tvrdost dána vznikem tvrdých fází během jejich tuhnutí, u kompozitů je tvrdosti dosaženo přidáním pevných částic – výztuže – do kovové matrice. Jako výztuž se nejčastěji používají keramické materiály – nitridy, karbidy či boridy různých kovů. Konkrétními příklady mohou být WC, TiC, TiCN, B<sub>4</sub>C, SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, které přinášejí vlastnosti jako jsou vysoká tvrdost, tepelná stálost či malá hmotnost. Jako materiál matrice se pak často využívají žárovečné slitiny na bázi Ni, Co či Ti, obvykle zajišťující schopnost plastické deformace, odolnost vůči korozi, houževnatost a v neposlední řadě plní funkci pojiva. Výsledné fyzikální a mechanické vlastnosti nezávisí pouze na volbě materiálů, ale také na způsobu výroby nebo na podílu jednotlivých složek. MMC jsou nejčastěji vyráběny práškovou metalurgií. Dalšími metodami jsou depozice plazmatem či laserem nebo metoda zvaná spark plasma sintering. [21] [24] [25] [31] [32] [33]

Díky kombinaci tolika vlastností je škála použití kompozitů s kovovou maticí opravdu široká. Využívají se v leteckém průmyslu pro výrobu lopatek turbín, v medicíně pro výrobu implantátů a kostních náhrad (zejména Ti slitiny), ve strojírenství jako řezné materiály. Mimo výroby celých součástí se také využívají jako materiál pro zhotovování žárovevných a vůči abrazi odolných povlaků. Metodami nanášení povlaků jsou například žárový nástřik, laserové povlakování nebo PTA povlakování. [34]

Právě navařování metodou PTA bylo využito v experimentální části práce. Jako materiál matrice MMC povlaku byla použita niklová slitina typu 625 a jako materiál výztuže byl použit karbid bóru. Právě těmito dvěma materiály se věnují následující kapitoly.

### 3.1 Niklová slitina typu 625

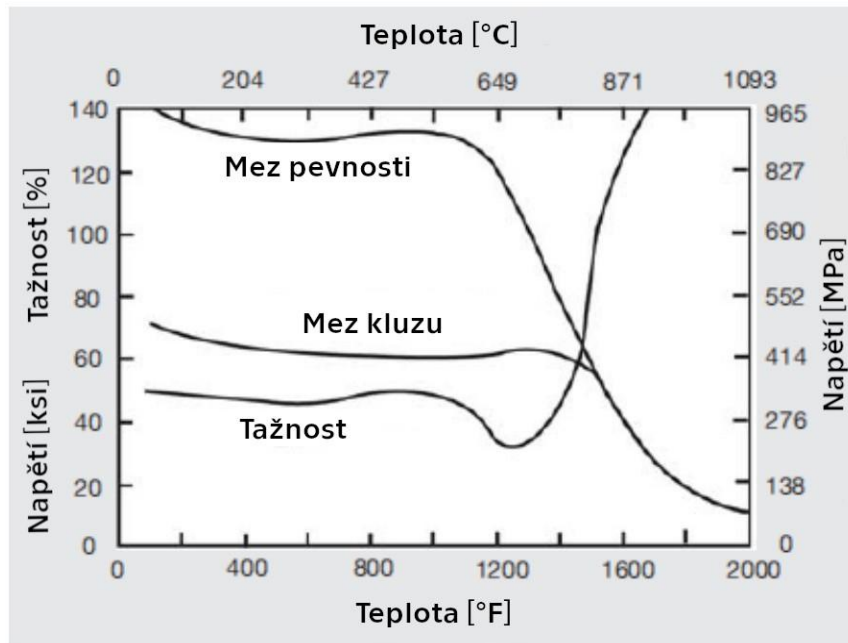
U niklových slitin obecně platí, že se pro jejich značení používají obchodní názvy. Nejznámější slitinou typu 625 je Inconel® 625, které se bude věnovat následující text. [35]

Jedná se o superslitinu na bázi niklu obsahující legující prvky, kterými jsou především chrom, molybden, železo či niob. Procento zastoupení vyjmenovaných a ostatních legujících prvků zachycuje Tabulka 3. Díky kombinaci obsažených prvků dosahuje Inconel® 625 úžasných vlastností, kterými jsou především vysoká pevnost, výborná odolnost vůči korozi i ve značně agresivních prostředích (kyseliny, zásady, slaná voda), odolnost vůči vysokým teplotám a oxidaci. Oproti většině niklových slitin také disponuje dobrou svařitelností. Odolává též únavovým lomům, creepu, pittingu a štěrbinové korozi. [36] [37]

Tabulka 3 - Chemické složení slitiny Inconel® 625 [36]

Prvek	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb+Ta	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti
Obsah	>	20÷	< 5	8÷	3,15 ÷	<	<	<	<	<	<	<
[hm %]	58	23		10	4,15	0,1	0,5	0,5	0,015	0,015	0,4	0,4

Provozní teploty se pohybují od kryogenních až po cca 980 °C. Pro tyčový polotovar ve vyžíhaném stavu se při pokojové teplotě mez pevnosti pohybuje od 827 MPa do 1034 MPa, mez kluzu od 414 MPa do 655 MPa, tažnost se pohybuje mezi 60 a 30 % a tvrdost dle Brinella dosahuje 145-220 HB. Závislost tahových vlastností na teplotě popisuje Obrázek 10. [36]



Obrázek 10 - Tahové vlastnosti slitiny Inconel® 625 za vysokých teplot (tyčový polotovar ve vyžíhaném stavu) [36]

Tento materiál se pro své vlastnosti využívá v námořním průmyslu pro výrobu lopatek lodních šroubů, krytů podvodních kabelů, výfukové potrubí námořních lodí. V letectví a kosmonautice pro systémy potrubí letadel, výfukové systémy motorů, palivová a hydraulická potrubí, lopatky turbín či systémy pro obrácení tahu. Dále pak v chemickém průmyslu k výrobě ventilů, přepravních potrubí či destilačních zařízení. V neposlední řadě v jaderném průmyslu, kde se využívá například pro součásti jader reaktorů či řídicích tyčí ve vodních reaktorech. [35] [36] [37]

Vzhledem k tvarové složitosti většiny součástí vyráběných z niklové slitiny typu 625, nepřipadá výroba třískovým obráběním v úvahu, zejména pak kvůli vysokým nákladům. Proto je tendence vyrábění součástí aditivními technologiemi, jako jsou především laser rapid manufacturing, ale poslední době také navařování plazmatem. [38]



## 3.2 Karbid bóru

Karbid bóru, někdy nazývaný také jako bór karbid, je keramický materiál tmavé barvy s chemickým označením  $B_4C$ , který vyniká především svou extrémní tvrdostí. Jedná se o třetí nejtvrdší existující materiál. Vyšší tvrdosti dosahuje již jen diamant a kubický nitrid bóru. Objeven byl přibližně v polovině 19. století, a sice jako vedlejší produkt při výrobě boridů kovů. [21] [39] [40] [41]

Kromě vysoké tvrdosti, která dosahuje až 47 GPa  $HV_{100}$ , jsou dalšími vlastnostmi malá hustota ( $2,52 \text{ g/cm}^3$ ) či vysoká teplota tavení ( $2300\text{-}2400 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Modul pružnosti dosahuje hodnot až 470 GPa a tepelná vodivost  $30\text{-}42 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . [39] [41]



Obrázek 11 - Karbid bóru v práškové formě  
(hrubá a jemná frakce) [40]

Díky své tvrdosti je  $B_4C$  používán jako abrazivum v oblasti leštění a lapování, při řezání nebo při broušení diamantových nástrojů. Používá se také na výrobu abrazí vysoce namáhaných součástí, jako jsou trysky pro pískování či pro řezání vodním paprsek.  $B_4C$  také vyniká schopností absorbovat neutrony, aniž by vytvářel nebezpečné radionuklidy. Díky tomu se využívá v jaderné energetice, jako materiál stínění, kontrolních tyčí a absorbérů pro zastavení reakce. V neposlední řadě nachází uplatnění ve vojenském průmyslu, kde je díky své tvrdosti, lehkosti a vysokému modulu pružnosti využíván pro výrobu balistických ochran. [21] [39] [40] [41]

## 4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část práce se věnuje:

- Nalezení vhodných parametrů pro správné navaření MMC povlaku metodou PTA. Tento kompozit s kovovou maticí je složen z niklové slitiny Nibasit 625–P/LFe® (DEW, Německo) a keramického materiálu B<sub>4</sub>C.
- Navaření jednotlivých vzorků
- Snímání průběhu teplot během procesu navařování i následného chladnutí vzorků.
- Charakterizování tvrdosti a struktury návaru pomocí zkoušek tvrdosti a pozorování mikrostruktury a makrostruktury.



Obrázek 12 - Plazmový navařovací automat PPC 250 R6 (KSK, s.r.o., Česká Třebová) [18]

## 4.1 Použité metody, přístroje a zařízení

### 4.1.1 Navařovací automat PPC 250 R6

K navaření vzorků byl využit plazmový navařovací automat PPC 250 R6 (KSK, s.r.o., Česká Třebová, Obrázek 12). Jedná se o zařízení primárně určené k navařování rotačních součástí z čela nebo na obvodu. Lze ovšem navařovat i součásti nerotační, jako jsou například desky. [18]

Zařízení disponuje řízením celkem v šesti jednotlivých osách. Polohovacímu systému plazmatronu, odpovídají osy X, Y, Z, které zajišťují jeho lineární posuv, a osa N, která slouží k naklápění hořáku v rozsahu až 40°. Polohovadlo, nebo také stůl, lze ovládat ve dvou rotačních osách C a R. Řízení v tolika osách zajišťuje možnost navařování i velmi složitých tvarů. [18]

V levé části automatu jsou umístěny dotykový monitor a ovládací panel, pomocí nichž lze nastavovat parametry procesu a celý stroj řídit. Tento automat lze provozovat v ručním režimu i automatickém, s možností záznamu parametrů do programu. Možné je také zvolit jeden z předprogramovaných navařovacích cyklů. [18]

Nad monitorem se nachází ukazatele průtoku plazmového, ochranného a nosných plynů. Jako plazmový a nosný plyn byl použit Ar 5.0 + 30 % He. Jako plyn ochranný byl použit Ar 4.8.

Automat je konstruovaný pro přídavný materiál ve formě prášku. Konkrétní stroj, na kterém bylo navařováno, je poté doplněn o druhý zásobník přídavného materiálu a směšovací mechanismus vlastní konstrukce. Díky tomu lze navařovat povlaky výhodně kombinující vlastnosti obou použitých přídavných materiálů tak, jak bylo učiněno v rámci experimentální části práce.

Další vybrané parametry navařovacího automatu popisuje Tabulka 4.

Tabulka 4 – Parametry navařovacího automatu PPC 250 R6 (KSK, s.r.o., Česká Třebová) [18]

Parametr	Hodnota
Průměr stolu [mm]	300
Nosnost stolu [kg]	70
Maximální proud [A]	250
Maximální frekvence pulzů [Hz]	200
Rozměry stroje [mm]	1770 x 1700 x 2185



Obrázek 13 - Pracoviště připravené pro navaření vzorku

## 4.1.2 Laboratorní komorová pec

Pro předehřev ocelových destiček byla využita laboratorní komorová pec typu LE 15/11 s regulátorem HT 60 B (viz Obrázek 14). Pece typu LE jsou, na rozdíl od pecí typu L, navrženy spíše pro krátkodobější provoz. Jsou tak vhodné pro testování a zkoušky [42]. Parametry pece jsou uvedeny v Tabulka 5.

Pec byla využita i pro vysoušení práškových přídavných materiálů. Vysoušení prášků je důležité především proto, že vlhkost jimi zachycená způsobuje během navařování vznik pórů a jiných vad.

Tabulka 5 – Parametry laboratorní komorové pece LE 11/15 [42]

Parametr	Příkon [kW]	Max. teplota [°C]	Objem [l]	Max. nosnost dna [kg]	Hmotnost [kg]
Hodnota	3	1100	14,4	6	28



Obrázek 14 - Laboratorní komorová pec LE 15/11 [42]

### 4.1.3 Metodika navařování vzorků

Vzorky byly navařovány technologií pulzního PTA na výše zmíněném automatu (viz Obrázek 12), a sice pomocí ručního režimu řízení dráhy hořáku. Následující odstavce se věnují technologickému postupu vyhotovení jednotlivých vzorků.

Před samotným navařováním byl ZM ve formě destiček umístěn do komorové pece (viz Obrázek 14), kde byl předehřát. Po vyjmutí z pece byly na vzorek přichyceny termočlánky, pomocí nichž byla snímána teplota během procesu navařování a následného chladnutí. Následně byl vzorek upnut na stůl automatu, přičemž byl vypodložen ocelovými, hliníkovými či měděnými destičkami, pro zajištění správného odvodu tepla, a také zajištění místa pro vývod termočlánků. Upnutý vzorek ilustruje Obrázek 15.

Následoval samotný proces navaření. Nejprve byla navařena první vrstva obsahující 15 %  $B_4C$  a 85 % Nib625. Každá housenka byla po navaření přikryta žároizolační vatou a hliníkovou fólií pro zajištění pomalejšího chladnutí. Poté, co teplota součásti klesla na požadovanou teplotu, byla housenka očištěna nerezovým kartáčem a bylo možné v procesu pokračovat. Následné navaření druhé vrstvy, obsahující 30 %  $B_4C$  a 70 % Nib625, probíhalo stejně jako v případě první vrstvy. Vzdálenost trysky od povrchu byla pro všechny případy stejná, a sice 10 mm. Po dokončení celého návaru byl vzorek zasypán tavidlem pro zajištění pomalejšího a plynulého vychladnutí.

Jako základní materiál, na něž byly návary vyhotovovány, byly použity destičky z konstrukční oceli o tloušťce 10 mm. Složení (viz Tabulka 6) a následně označení oceli bylo zjištěno pomocí ručního rentgenového spektrometru. Obsah hliníku, jenž byl změřen, je poměrně vysoký. To bylo zapříčiněno zbytkovými částicemi hliníkové slitiny na brusném kotouči, jímž byl zkoumaný vzorek opracován. Chemické složení použité oceli, s označením DIN 1.0534 S 390 G2 S, dle náležité normy lze nalézt v Tabulka 7.

Tabulka 6 - Chemické složení základního materiálu zjištěné spektrometrem

Prvek	Fe	Al	Mn	Si	Cr	S
Obsah [hm. %]	97,75	0,43	1,15	0,42	0,187	0,052

Tabulka 7 – Chemické složení oceli DIN 1.0534 S 390 G2 S [43]

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
Obsah [hm. %]	≤0,018	≤0,5	0,9-1,6	0,035	0,035	≤0,2	≥0,015
Prvek	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	Fe
Obsah [hm. %]	≤0,3	≤0,08	0,02-0,05	≤0,4	≤0,02	≤0,05-0,1	zbytek



Obrázek 15 - Příklad upnutí vzorku

#### 4.1.4 Použité přídavné materiály

Jako přídavné materiály byly použity Nibasit 625–P/LFe<sup>®</sup> a B<sub>4</sub>C, a to v práškové podobě. Ty byly podávány ze dvou zásobníků a míchány ve směšovací mechanizmu. Částice prášku byly unášeny nosným plynem Ar 5.0 + 30 % He.

##### Nibasit 625–P/LFe<sup>®</sup> (DEW, Německo)

Jedná se o niklovou slitinu typu 625, pod obchodním názvem Nibasit 625–P/LFe<sup>®</sup> (DEW, Německo). Výrobní šarže konkrétního použitého materiálu je 258042. Velikost částic činí 63-200 μm. Chemické složení lze nalézt v Tabulka 8. Ostatní parametry viz Příloha 1. Tento prášek byl vyroben atomizací, tudíž částice jsou kulového tvaru, což zajišťuje jeho dobrou tekutost. Tento materiál zastával roli matrice MMC povlaku. [44]

Tabulka 8 - Chemické složení práškového materiálu Nibasit 625–P/LFe<sup>®</sup> (DEW, Německo) [příloha 1]

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe	Co	Nb	Ni
Obsah [hm %]	<0,03	0,5	0,2	<0,01	<0,005	20,9	8,9	0,5	<0,1	3,2	zbytek

##### B<sub>4</sub>C

Jedná se o velmi tvrdý keramický materiál. Částice o velikosti 167 μm a 67 μm (medián) mají nepravidelný tvar s ostrými hranami [21]. Ten způsobuje špatnou tekutost prášku, kvůli které mohou následně vznikat problémy, jako například nedostatek materiálu v tavné lázni nebo jeho špatné mísení s druhým přídavným materiálem. V tomto případě byla navíc použita hrubá frakce prášku. Tento materiál zastával roli výztuže MMC povlaku.

Při navařování povlaků složených z různých materiálů mohou vznikat problémy spojené s jejich rozdílnými vlastnostmi. Zde se například jedná o vyplavování částic B<sub>4</sub>C k povrchu návaru z důvodu rozdílných hustot. To může zapříčinit nehomogenost návaru, a tedy nedosažení požadovaného efektu (zvýšení tvrdosti a abrazivzdornosti) v celém jeho objemu. Tento jev je více popsán v kapitole 5.3.1.



#### 4.1.5 Parametry navařování vzorků

Návar byl koncipován jako FGM (functionally graded material), tedy materiál, který má ve svých částech postupně se měnící materiálové vlastnosti. V tomto případě se jedná o odolnost vůči abrazi, tvrdost a tepelnou odolnost. Cílem zde bylo, aby se požadované vlastnosti směrem od základního materiálu k povrchu zlepšovaly. Toho bylo docíleno dvojnásobným, tedy 30% podílem  $B_4C$  ve druhé vrstvě návaru oproti vrstvě první, kde bylo jen 15 %  $B_4C$ . Procenta vyjadřují objemový poměr prášku  $B_4C$  v celkovém dodávaném objemu obou přídatných materiálů. [19]

V rámci experimentální části práce bylo zhotoveno celkem 9 vzorků. U všech vzorků tedy koncentrace  $B_4C$  v první vrstvě činila 15 %, ve vrstvě druhé 30 %. Rychlost podávání obou PM byla u všech vzorků 14 (dílků stupnice).

Vzorky 1÷7 sloužily k nalezení vhodného technologického postupu jejich vyhotovení, zahrnující předehřev, způsob upnutí a vypodložení, ale především nalezení parametrů vlastního procesu navařování. Na vzorcích číslo 5 a 7 byly také provedeny zkoušky tvrdosti a pozorování struktury. Vzorky číslo 8 a 9 byly navařeny pro potřeby zmiňované společnosti.

První tři vzorky byly vypodloženy hliníkovým chladičem. To se ukázalo jako nevhodné, protože docházelo k moc rychlému odvodu tepla, což způsobovalo vznik prasklin.

##### **Vzorky číslo 4 a 5**

U vzorku číslo 4 byla navařena pouze jedna housenka od každé vrstvy. Na pátém vzorku byl zkoumán i překryv, a tak byly vyhotoveny dvě housenky v obou vrstvách. Použité parametry pro navaření obou vzorků lze nalézt v Tabulka 9. Oba vzorky byly předehřáty na 200 °C. Pro snížení rychlosti odvodu tepla (oproti předchozím vzorkům), byly vzorky vypodloženy měděnou a hliníkovou destičkou. Nízká rychlost posuvu u vzorku 4 zapříčiňovala velké množství roztaveného materiálu v tavné lázni a byla tedy u vzorku 5 zvýšena.

Tabulka 9 - Parametry navařování vzorků 4 a 5

Vzorek	Horní/dolní proud [A]	f [Hz]	Lineární posuv [mm/s]	Šířka rozkyvu [mm]	Rychlost rozkyvu [mm/s]
4	120/50	28,7	0,38	24	22,4
5	120/50	28,7	0,58	23	22

### Vzorek číslo 6

U vzorku číslo 6 nebyla použita metodika FGM. Byla tak navařena pouze jedna vrstva, a sice se 30% obsahem B<sub>4</sub>C. Vzorek sloužil jen jako jakýsi pokus a dále na něj nebude brán zřetel.

### Vzorek číslo 7

Vzorek číslo 7 byl vyhotoven pomocí již nalezených parametrů, které se jen minimálně upravovaly dle aktuální situace tak, aby byla zajištěno kvalitní navaření každé housenky. Vzhledem k jejich délce, bylo ke zpomalení chladnutí nutné použít žároizolační materiál, kterým byla každá housenka po jejím navaření přikryta. Předehřát byl vzorek na 165 °C. Použité parametry popisuje Tabulka 10. Během procesu navařování došlo k prohřátí vzorku, a tudíž muselo dojít ke snížení svařovacího proudu, ke zvýšení lineární rychlosti a snížení rychlosti rozkyvu tak, aby se zamezilo přílišnému množství nataveného materiálu.

Tabulka 10 - Parametry navařování vzorku 7

Vrstva/housenka	Horní/dolní proud [A]	f [Hz]	Lineární posuv [mm/s]	Šířka rozkyvu [mm]	Rychlost rozkyvu [mm/s]
1/1	120/55	28,7	0,58->0,62	23	22->20
1/2	120->105/55	28,7	0,62	23	20
2/3	105/55	28,7	0,62	23	20
2/4	105/55	28,7	0,62	23	20

## Vzorek 8

Tento vzorek je téměř totožný se vzorkem 7, a to jak parametry (viz Tabulka 11), tak pořadím navařování jednotlivých housenek. Vzorek byl vybrán jako reprezentativní a byl předán výše zmíněné společnosti.

Tabulka 11 – Parametry navařování vzorku 8

Vrstva/ housenka	Horní/dolní proud [A]	f [Hz]	Lineární posuv [mm/s]	Šířka rozkyvu [mm]	Rychlost rozkyvu [mm/s]
1/1	120/55	28,7	0,62	23	20
1/2	110->105/55	28,7	0,62->0,63	23	20
2/3	105/55	28,7	0,63	23	20
2/4	105/55	28,7	0,63	23	20

## Vzorek 9

Vzorek 9 se od předchozích vzorků liší svou velikostí (rozměry viz Obrázek 19), a tedy i počtem a délkou navařených housenek, což již více odpovídá reálnému průmyslovému využití. Konkrétně byly vyhotoveny celkem 4 housenky v první vrstvě a 10 housenek ve vrstvě druhé. Větší velikost vzorku s sebou přináší jisté problémy, jako například deformaci ZM vlivem tepla. Použité parametry popisuje tabulka v

Příloha 2 . Během navařování docházelo opět k úpravě parametrů, především lineární rychlosti, svařovacího proudu a vzájemnému přesazení jednotlivých housenek. Vzorek byl také předán společnosti, která na něm vykonala zkoušku odolnosti při kontaktu s proudem taveniny.

#### 4.1.6 Měřicí ústředna

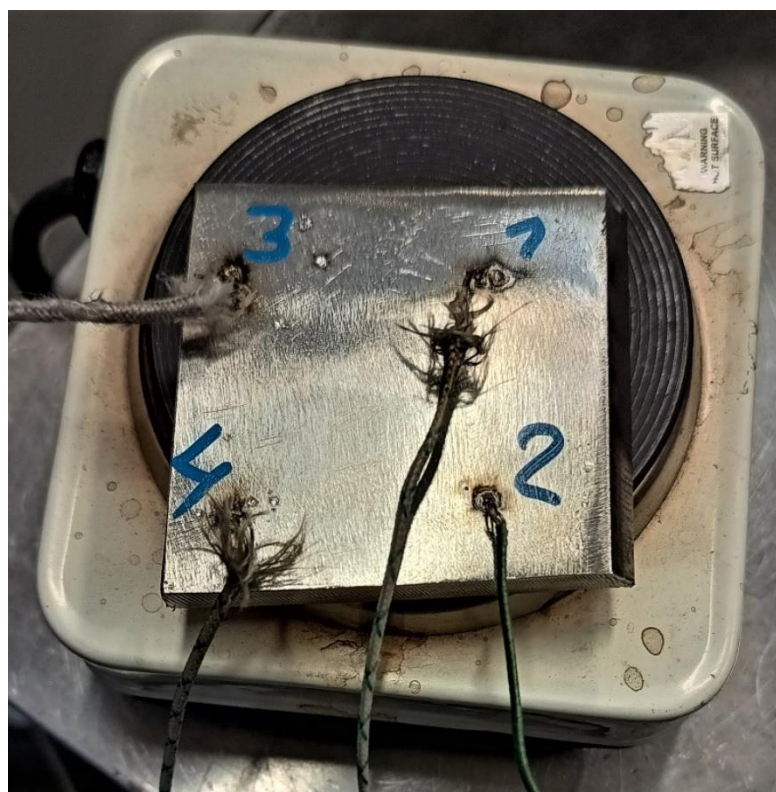
Pro zaznamenávání všech dat během snímání teploty byla použita univerzální měřicí ústředna ALMEMO 5690-2 (AHLBORN, Německo, viz Obrázek 16). Při své velikosti nabízí ústředna poměrně vysoký počet vstupních kanálů. Na grafickém displeji lze zobrazit až 20 kanálů najednou. Programovat ústřednu lze pomocí menu a tlačítek nebo pomocí softwaru AMR-Control. Měřené hodnoty jsou poté ukládány na paměťovou kartu s kapacitou až 6,4 mil. hodnot. Ústřednu lze pomocí optického kabelu připojit k počítači. Maximální frekvence měření je až 100 měření za sekundu. [45]



Obrázek 16 - Univerzální měřicí ústředna ALMEMO 5690-2 [45]

### 4.1.7 Snímání teploty

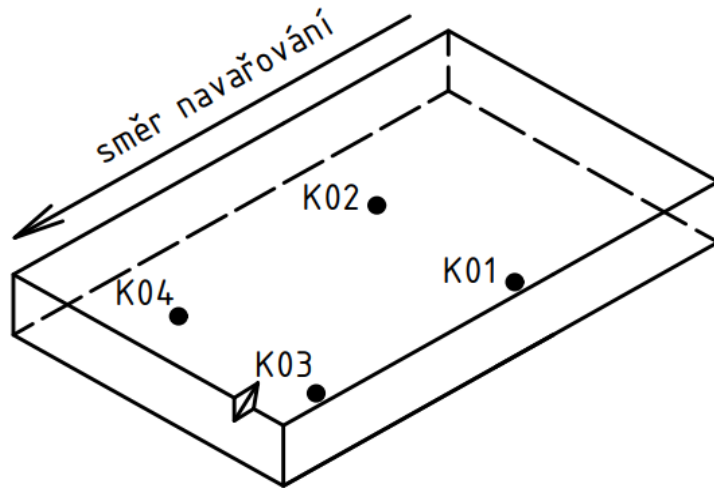
Jak již bylo zmíněno, během procesu navařování a chladnutí vzorků byla snímána teplota. Tak bylo učiněno pomocí svařovaných drátových termočlánků typu K, umístěných na spodní straně polotovaru základního materiálu. Příklad umístění termočlánků na vzorku ilustruje Obrázek 17. Tento typ termočlánku byl vybrán proto, že jeho rozsah měřitelných teplot dosahuje až 1250 °C. [46]



Obrázek 17 - Příklad umístění termočlánků na vzorku

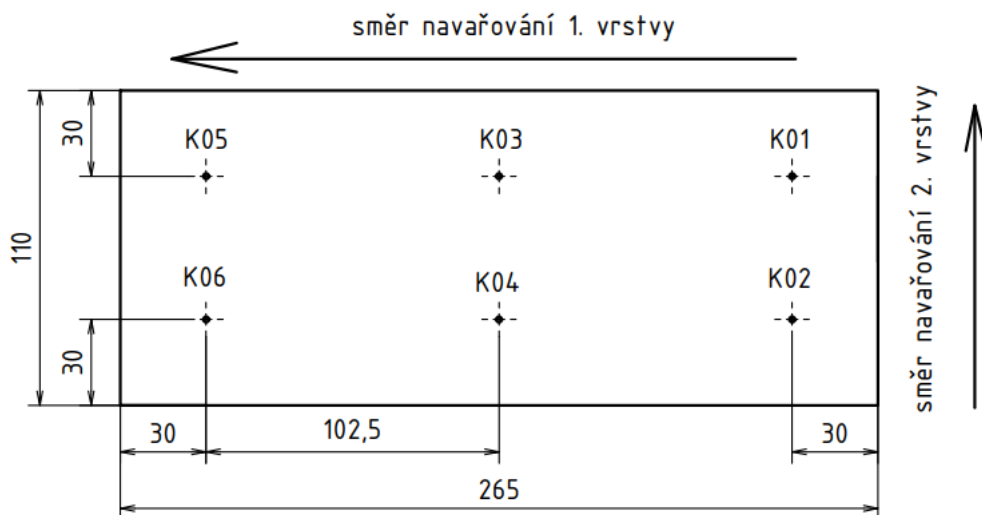
Z Obrázek 17 je patrné, že vzorky byly během upevňování termočlánků umístěny na elektrickém ohříváči. Bylo tak učiněno z důvodu zajištění co nejmenšího vychladnutí vzorku během procesu upevňování. Později se tento postup ukázal jako ne příliš efektivní.

Na vzorky 7 a 8 byly upevněny čtyři termočlánky ve přibližně čtvercovém rozložení (viz Obrázek 18).



Obrázek 18 - Rozmístění termočlánků na vzorcích číslo 7 a 8

Na vzorek 9 bylo umístěno termočlánků šest, a sice v přesném rozmístění, které je znázorněno na Obrázek 19.



Obrázek 19 - Rozmístění termočlánků na vzorku číslo 9 (rozměry v mm)

#### 4.1.8 Měření mikrotvrdosti

Mikrotvrdost návaru byla měřena pomocí tvrdoměru IndentaMet 1104 od společnosti Buehler (viz Obrázek 20). Použita byla zkouška dle Vickerse, přičemž zatížení činilo 0,5 kg a doba zatěžování 10 s. Ve všech případech byla rozteč mezi vtisky 0,5 mm.



Obrázek 20 - Tvrdoměr IndentaMet 1104 (Buehler) s upnutým vzorkem

Na tuto zkoušku byly použity vzorky 5 a 7. Metalografický výbrus obou vzorků (viz Obrázek 22), na němž byla tvrdost měřena, byl vyhotoven klasickým metalografickým postupem:

Nejprve byly vzorky uříznuty na pile Struers Labotom-3. Použit byl řezný kotouč pro extrémně tvrdé materiály s označením Struers 66A25. Doba řezání jednoho vzorku byla cca 45 min, což potvrzuje vysokou tvrdost návaru. Následně byly oba nařezané vzorky společně zality za studena do akrylové pryskyřice Versocit-2. Po zatuhnutí pryskyřice byly vzorky manuálně broušeny a následně leštěny na zařízení Buehler Beta (viz Obrázek 21). Pro broušení byly z důvodu vysoké tvrdosti návaru použity diamantové kotouče Buehler Apex DGD 55  $\mu\text{m}$  a Buehler Apex DGD 15  $\mu\text{m}$ . První krok, zarovnání vzorku, trval přibližně 2,5 h. Druhý krok pak 10 min. Otáčky při broušení byly nastaveny na 300 ot/min. Kotouče byly chlazeny vodou. Následné leštění probíhalo za použití leštících pláten Buehler UltraPad s diamantovou suspenzí Buehler MetaDi 9  $\mu\text{m}$  po dobu 8 minut a Buehler Trident s diamantovou suspenzí Buehler MetaDi 3  $\mu\text{m}$  po dobu 6 minut. Finální leštění pak probíhalo za použití plátna Buehler ChemoMet se suspenzí Buehler MasterMet s částicemi  $\text{SiO}_2$  o velikosti 0,05  $\mu\text{m}$  po dobu 5 minut. Otáčky při všech krocích leštění byly nastaveny na 150 ot/min. Plátna byla zvlhčována pomocí zvlhčovačla Buehler MetaDi Fluid.



Obrázek 21 - Buehler Beta s automatickou hlavou Buehler Vector Power Head



#### 4.1.9 Pozorování struktury

K pozorování struktury vzorků byl použit optický mikroskop Neophot 21 od společnosti Zeiss (viz Obrázek 23). Zvolená zvětšení byla v rozsahu od 100x po 500x pro zkoumání mikrostruktury a 12,5x pro zkoumání makrostruktury. Toto pozorování probíhalo na stejném metalografickém výbrusu (viz Obrázek 22) jako měření mikrotvrdosti.



Obrázek 22 - Metalografický výbrus vzorků 5 a 7



Obrázek 23 - Optický mikroskop Neophot 21 od společnosti Zeiss

## **5. VÝSLEDKY EXPERIMENTU A DISKUZE**

V této části práce jsou popsány průběhy a výsledky provedených experimentů a zkoušek.

### **5.1 Vizualní vyhodnocení návarů a průběhy teplot**

Tato kapitola se věnuje dějům probíhajícím během navařování vzorků, jejich vizuálnímu zhodnocení a možným příčinám vzniku nalezených vad.

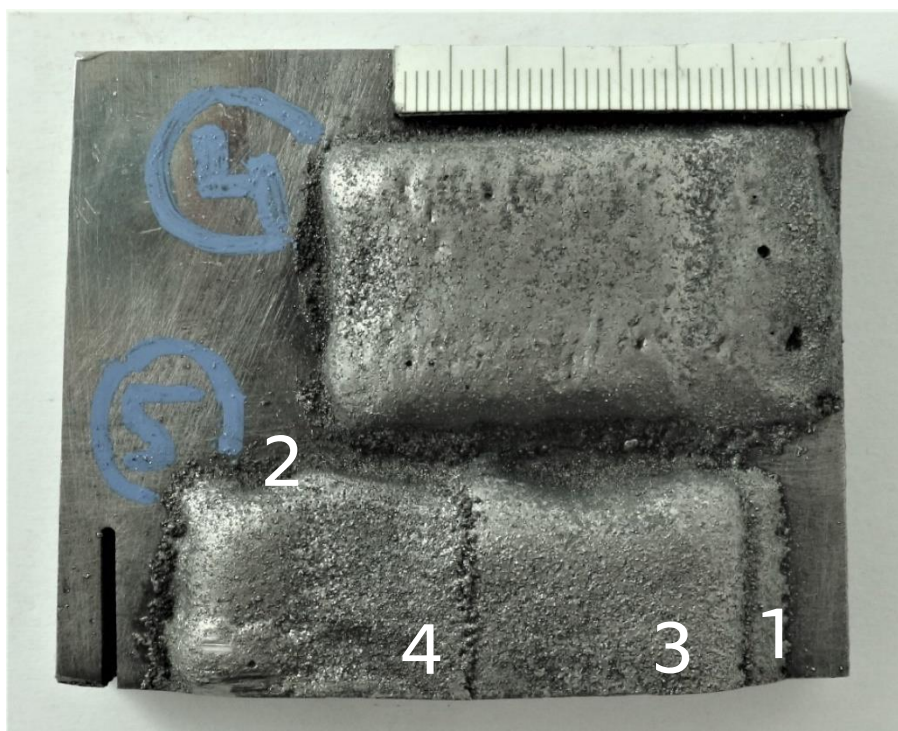
Dále se také věnuje naměřeným datům při snímání teploty, které probíhalo během navařování. Z naměřených dat byly v programu MS Excel vyneseny grafy závislosti teplot na čase. V grafech (viz Obrázek 26, Příloha 3, Obrázek 30) jsou označeny a barevně odlišeny jednotlivé termočlánky (K01 – K06) a lze tak pozorovat průběhy teplot v jednotlivých místech vzorku.

### 5.1.1 Vzorky 4 a 5

Na Obrázek 24 lze vidět vyhotovené vzorky 4 a 5. Navařené housenky jsou poměrně krátké. Jejich délka činí přibližně 20 až 40 mm.

Důvodem lesklejšího a hladšího povrchu vzorku 4 je malá koncentrace částic  $B_4C$ , která byla zapříčiněna nestabilitou v podávání prášku  $B_4C$ .

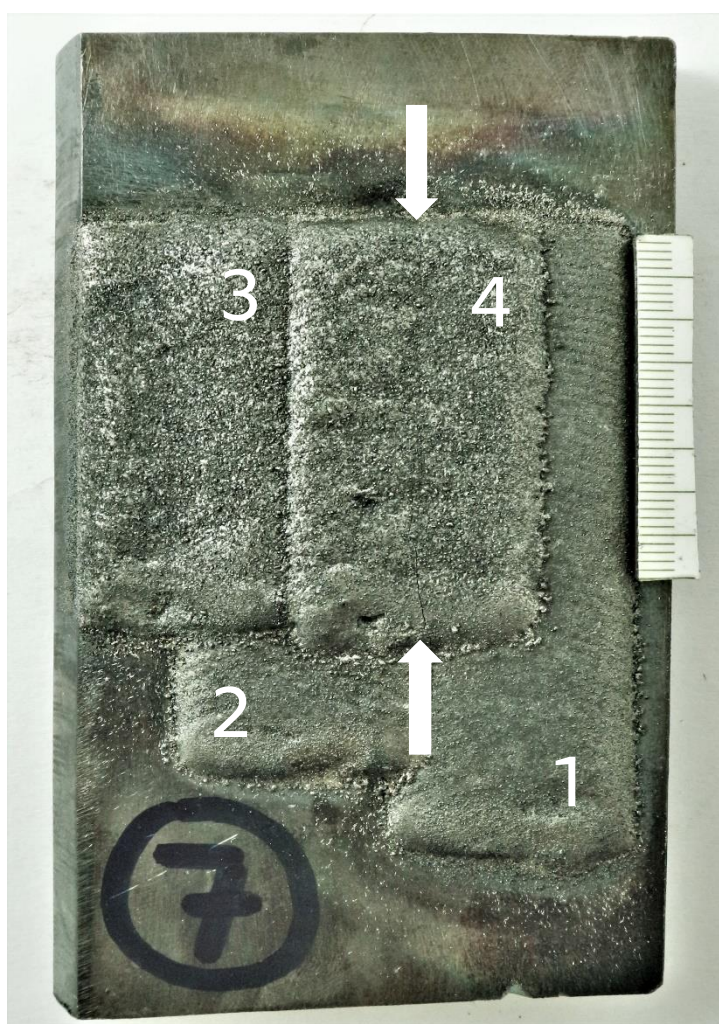
Pořadí navařování housenek vzorku 5 ilustruje Obrázek 24. Osa housenky 3 byla oproti rozhraní housenek 1 a 2 přesazena o 8 mm. Housenka 4 poté přesahovala až na ZM, a sice také o 8 mm. Přesazení nejspíše zapříčinilo vznik vyvýšené části, která je viditelná v levé části. Ta je lesklejší než zbytek povrchu návaru, a sice opět z důvodu nepřítomnosti částic  $B_4C$ . Problematika rozmístění částic  $B_4C$  v návaru je více popsána v kapitole 5.3.1. Napojení housenek 3 a 4 zde není optimálně hladké a spojitě.



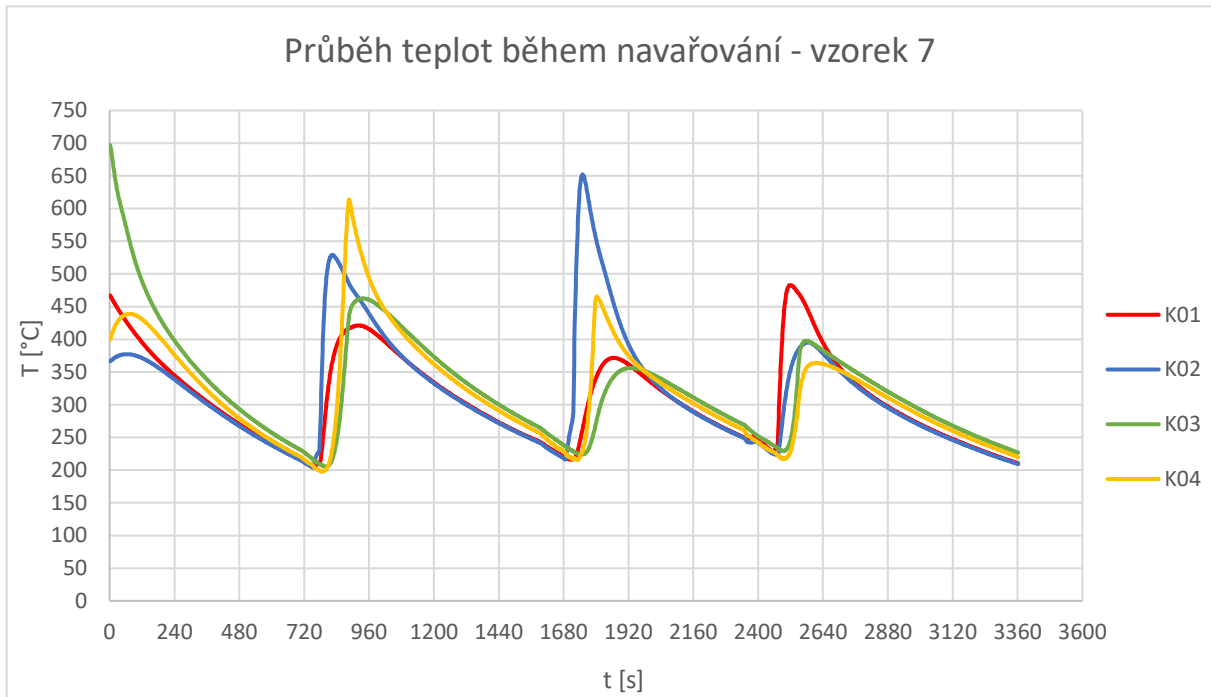
Obrázek 24 – Vzorky číslo 4 a 5

### 5.1.2 Vzorek 7

U vzorku číslo 7 byly housenky druhé vrstvy voleny kratší (přibližně 50 mm) než housenky vrstvy první (přibližně 70 mm). Jak je patrné z Obrázek 25, druhá vrstva se 30 %  $B_4C$  má oproti první vrstvě, obsahující pouze 15 %  $B_4C$ , drsnější povrch. Pořadí navařování housenek ilustrují čísla na Obrázek 25. Osa housenky 3 byla zarovnána s levým okrajem housenky 2. Posunutí housenky 4 bylo o celou šíři rozkvyvu a její osa tak byla zarovnána s rozhraním housenek 1 a 2. Právě v oblasti rozhraní housenek 1 a 2 došlo ke snížení výšky návaru a nejspíše tedy k moc rychlému zchlazení, což zapříčinilo vznik podélné praskliny, vedoucí skrze celou housenku 4. Ta je na Obrázek 25 označena šipkami. Během navařování housenky 4 také docházelo ke vzniku bublin a pění v oblasti kontaktu s housenkou 3. To dokládají dva viditelné krátery v levé spodní části housenky 4.



Obrázek 25 - Vzorek číslo 7



Obrázek 26 - Graf průběhu teplot, vzorek číslo 7

Díky snímání teploty bylo možné zahájit proces navařování jednotlivých housenek vždy na předem vybrané teplotě. V grafu na Obrázek 26 lze tyto teploty vyčíst z bodů, ve kterých začnou křivky prudce stoupat.

Maximální dosažená teplota závisí především na velikosti proudu a době trvání navařování, tedy i na délce housenky. U první housenky byl proud nastaven na nejvyšší hodnotu (120 A), tudíž bylo při jejím navařování dosaženo nejvyšší teploty (přibližně 700 °C), která byla snímána termočlánkem 3, umístěným na konci housenky.

Trend postupného snižování maximálních dosažených teplot je dán snížením velikosti proudu (na 105 A), ale také tím, že se tloušťka materiálu, kterou teplo prostupovalo, zvětšila o navařenou první vrstvu.

Po posledním vychladnutí na 200 °C byl vzorek zasypán tavidlem pro zajištění plynulého a pomalejšího chladnutí. Záznam průběhu teplot byl ukončen.

Graf průběhu teplot vzorku číslo 8 je obdobný a lze ho naléznout v Příloha 3.

### 5.1.3 Vzorek 9

Navaření první vrstvy proběhlo plynule, bez nestabilit v procesu. Jak dokládá Obrázek 27, povedlo se dosáhnout rovného povrchu bez propadů i dobrého napojení jednotlivých housenek. První tři byly vzájemně posunuty o celou šířku rozkyvu, tedy 23 mm. Čtvrtá byla housenka posunuta pouze o 22 mm.



*Obrázek 27 – Vzorek číslo 9 v průběhu navařování první vrstvy*

Během navařování druhé vrstvy docházelo v úvratích rozkyvu ke vzniku bublin. U druhé a třetí housenky tak byla zařazena 0,1s pauza v úvratích, která ale k vyřešení problému nevedla. Navíc docházelo ke zvyšování návaru na krajích a k propadání jeho středu. U dalších housenek tak bylo eliminováno přesazení, byla snížena rychlost rozkyvu a zvýšena lineární rychlost. Provedené změny vedly ke snížení tvorby porozit.

Druhá vrstva byla navařována kolmo na vrstvu první. Přibližně uprostřed housenek druhé vrstvy docházelo ke vzniku vyvýšené části (viz Obrázek 29). Pokus o eliminování vzniku vyvýšeniny zvýšením proudu byl neúspěšný. Problémy s přesahem druhé vrstvy na ZM, popisované v kapitolách 5.1.1 a 5.1.2, zde byly vyřešeny poloviční šířkou poslední housenky.

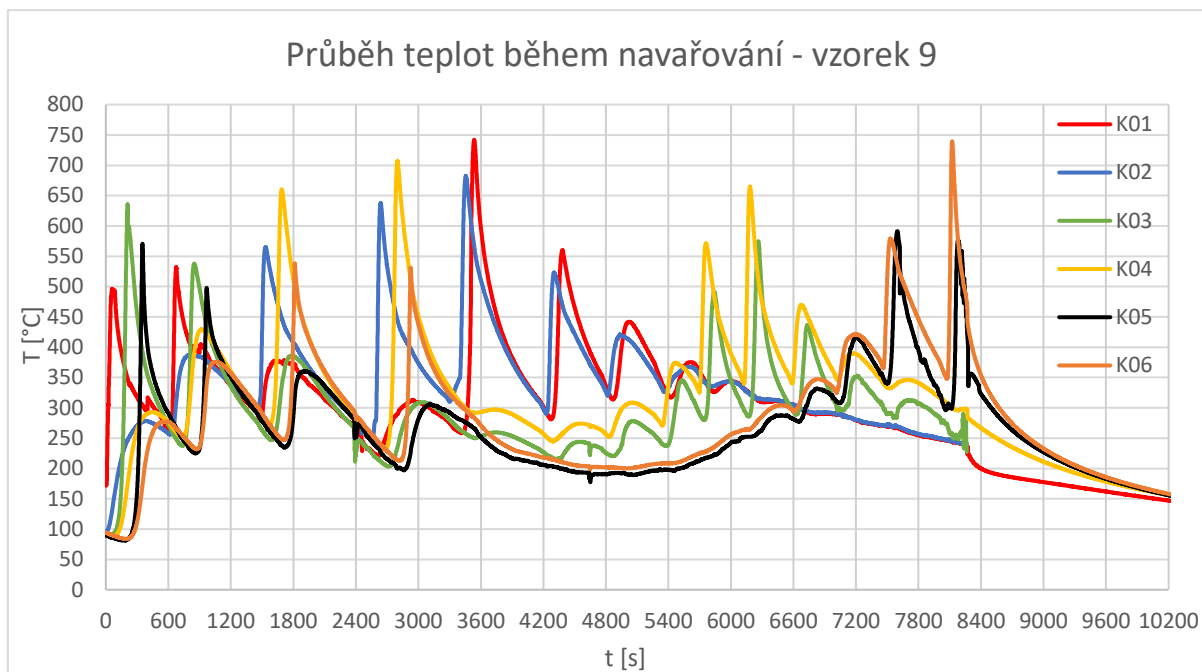
Z důvodu většího počtu navařených housenek bylo do vzorku vneseno velké množství tepla, což vedlo k jeho značné deformaci. Jak je patrné z Obrázek 28, došlo k prohnutí vzorku přibližně o 10 mm. Tomu by se dalo zabránit pevnějším upnutím ze všech čtyř stran. Na druhou stranu zabráněním přirozené deformaci hrozí vnesení vnitřních pnutí do systému. Kvůli vnesenému teplu, nemožnosti včasnému zpomalení odvodu tepla a snad i kvůli prohnutí, došlo zřejmě ke vzniku trhlin, což bylo slyšitelné i během procesu navařování.



Obrázek 28 - Deformace vzorku číslo 9 vlivem tepla [foto: Ing. Pavel Rohan, Ph.D.]



Obrázek 29 - Vzorek číslo 9 [foto: Ing. Pavel Rohan, Ph.D.]



Obrázek 30 - Graf průběhu teplot, vzorek číslo 9

Z levé části grafu na Obrázek 30 je patrné, že během připevňování termočlánků došlo k vychladnutí vzorku ze 165 °C, na které byl předeheřát, na 100 °C, při kterých navařování započalo. Termočlánek K01 vykazoval v tento moment vyšší teplotu proto, že nad ním byl spuštěn pilotní oblouk, který již součást začal zahřívat.

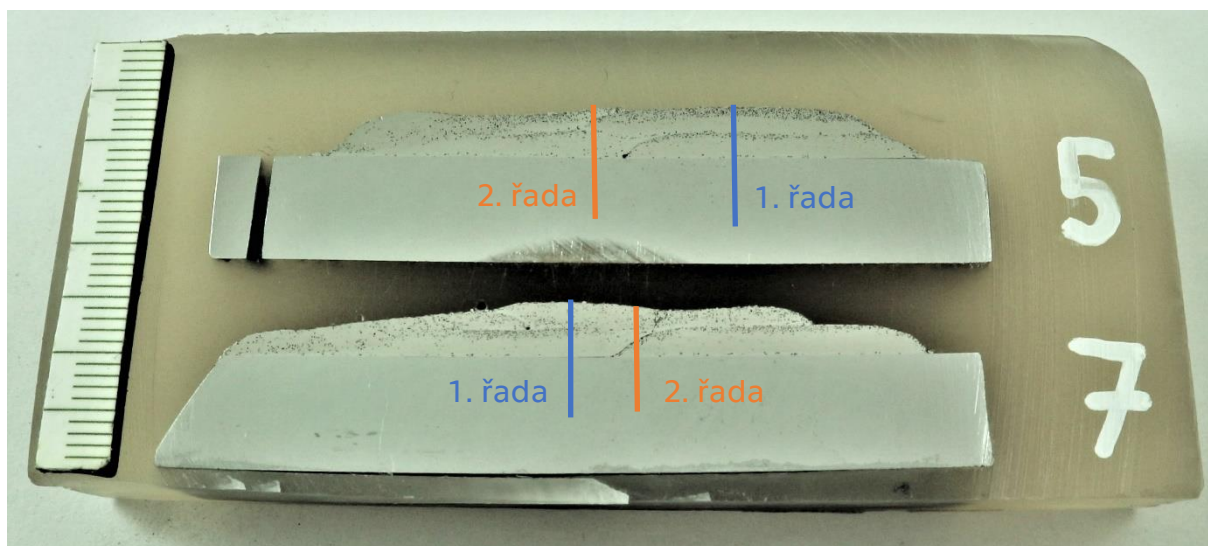
Maximální dosažená teplota činila přibližně 750 °C, a sice při navařování první housenky druhé vrstvy. K tomu došlo proto, že byl proud nastaven na 120 A a nad místem opět nějakou dobu hořel pilotní oblouk. Podobné teploty bylo dosaženo při navařování deváté housenky druhé vrstvy, kdy byl ve snaze o eliminování pravidelně vznikající vyvýšené části zvýšen proud na 130 A.

V grafu lze také vidět trend postupného zvyšování teploty počátků navařování jednotlivých housenek od 250 °C až po 370 °C.



## 5.2 Tvrdost návarů

Tvrdost byla měřena na metalografickém výbrusu vzorků 5 a 7. Na každém z nich bylo měření provedeno ve dvou řadách, přičemž v každé bylo učiněno 15 vtisků. Vtisky byly umístěny směrem od základního materiálu, přes první a druhou vrstvu, až k povrchu návaru. Měřena byla také podpovrchová tvrdost, ke které bylo použito 5 vtisků, přibližně 1 mm pod povrchem. Vzdálenost mezi vtisky byla ve všech případech zvolena 0,5 mm, aby nedošlo k vzájemnému ovlivnění, a aby byla obsažena celá výška návaru při zachování rozumného počtu naměřených hodnot.



Obrázek 31 - Místa měření tvrdosti na vzorcích číslo 5 a 7

Jedno měření vždy probíhalo v místě, kde druhá vrstva čistě překrývá tu první. Druhé měření pak probíhalo v místě, kde dochází k napojení housenek první či druhé vrstvy a kde lze očekávat různé odchylky a vady. Místa měření jsou na Obrázek 31 označena příslušnými barvami, které korespondují s grafy na Obrázek 32 a Obrázek 33.

Z grafů (viz Obrázek 32 a Obrázek 33) je patrné, že tvrdost první vrstvy oproti ZM skokově vzroste a směrem k povrchu návaru se zvyšuje. To je v případě porovnání první a druhé vrstvy dáno zvyšujícím se obsahem B<sub>4</sub>C. Růst tvrdosti v jednotlivých vrstvách je pak dán vyplavováním částic B<sub>4</sub>C k povrchu. Především u vzorku 7 je pak tento růst poměrně nespojitý. To dosvědčuje nehomogenitu materiálu a nepravidelný výskyt tvrdých fází.

Tvrdost ZM pod středem housenky (řady 2) směrem k jeho povrchu nepatrně klesá. To je nejspíše zapříčiněno difuzí některých prvků, především pak uhlíku, do návaru. Tvrdost ZM pod okrajem housenky (řady 1) se jeví konstantní. Průměrná hodnota tvrdosti ZM pak činí přibližně 250 HV<sub>0,5</sub>.

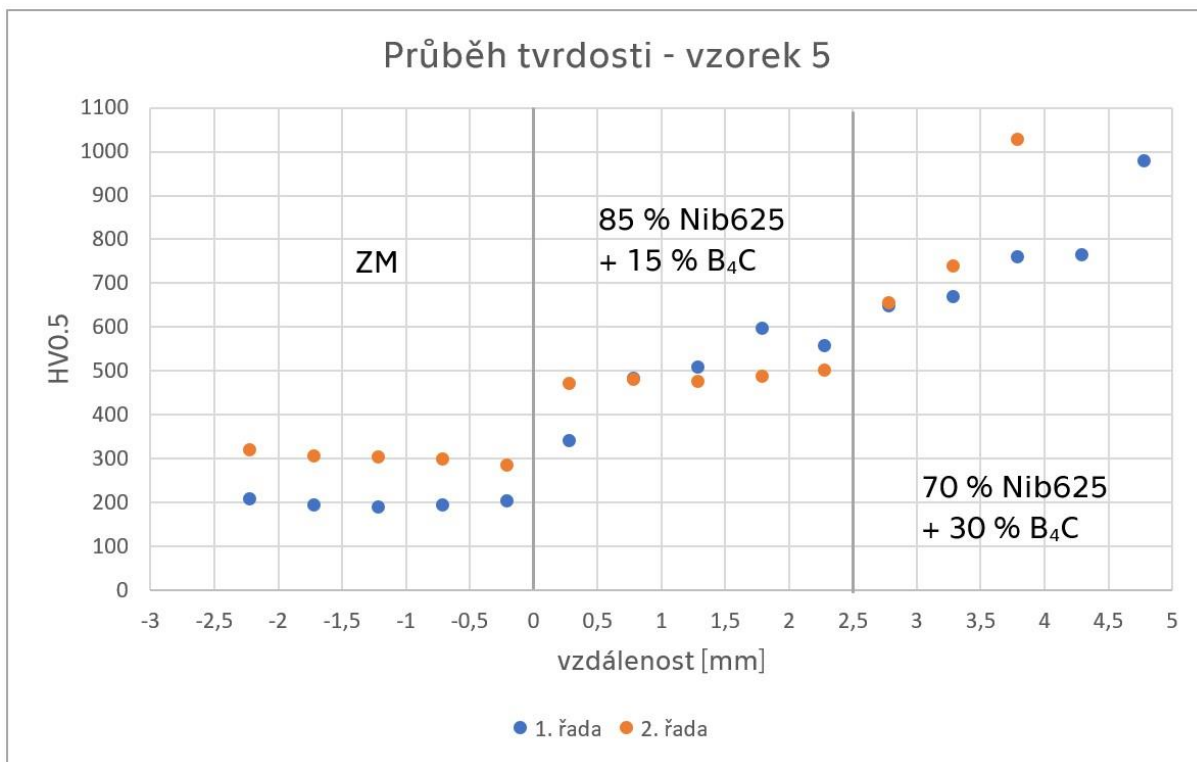
Dvě hodnoty řady 2 v první vrstvě vzorku 7, které jsou o 200 HV<sub>0,5</sub> nižší, byly naměřeny na povrchu napojení dvou housenek první vrstvy.

Maximální tvrdost dosažená u vzorku 5 činila přibližně 1020 HV<sub>0,5</sub>, u vzorku 7 až 1400 HV<sub>0,5</sub>. Kvůli zmiňovanému nepravidelnému rozmístění tvrdých fází byla měřena i průměrná podpovrchová tvrdost, kterou lze nalézt v Tabulka 12.

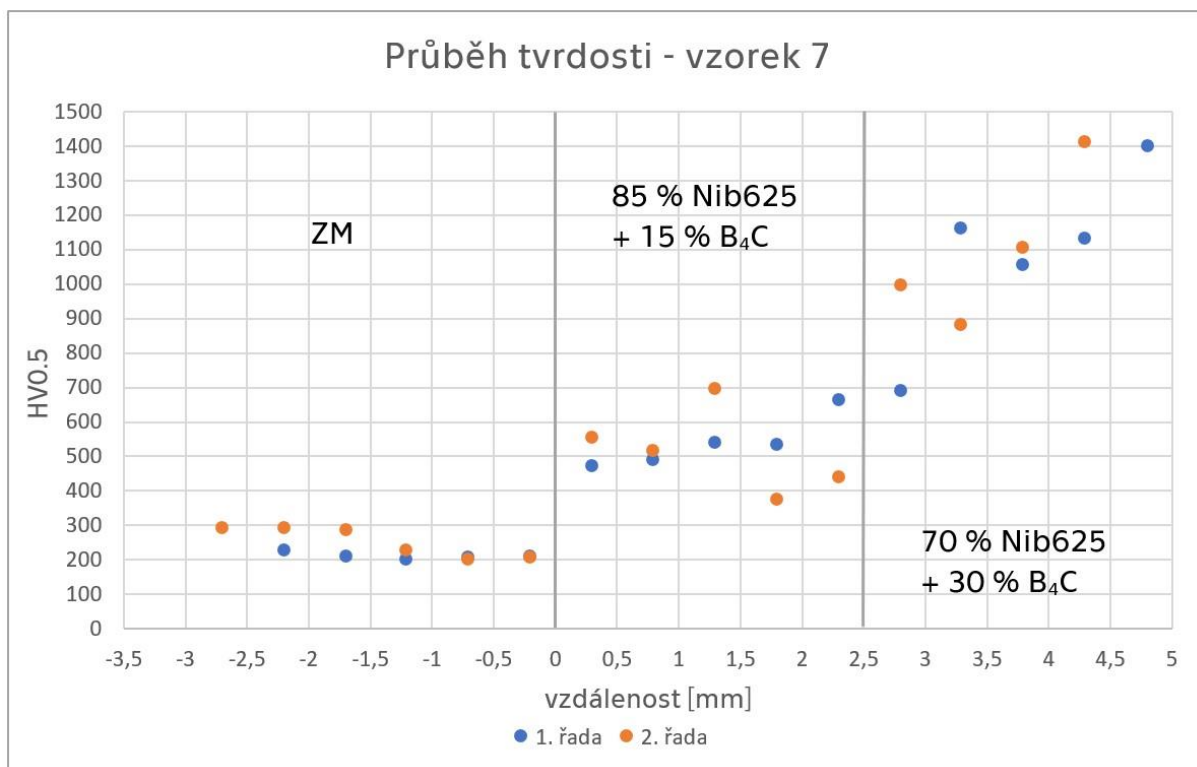
*Tabulka 12 - Naměřené hodnoty podpovrchové tvrdosti [HV<sub>0,5</sub>]*

Měření	1	2	3	4	5	Průměrná hodnota
Vzorek 5	710	788	880,5	831,2	797,4	801
Vzorek 7	1258	1174,3	1047,6	1191	1161,8	1167

Z porovnání naměřené tvrdosti a navařovacích parametrů použitých u obou vzorků lze vyvodit závěr, že zvýšením lineární rychlosti, snížením rychlosti rozkvyvu a snížením proudu lze dosáhnout větší tvrdosti.



Obrázek 32 - Graf průběhu tvrdosti, vzorek 5



Obrázek 33 - Graf průběhu tvrdosti, vzorek 7

## 5.3 Struktura návarů

Cílem této části práce je charakterizování zhotovených návarů z hlediska mikroskopického i makroskopického. Dále pak také objasnění dějů probíhajících při navařování a vizuální vyhodnocení stavu návaru v řezu.

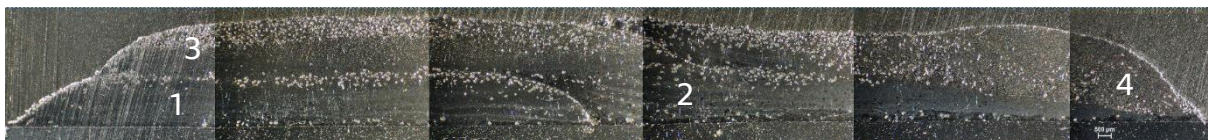
### 5.3.1 Makrostruktura návarů

Na makroskopických snímcích vzorků 5 a 7 bylo zkoumáno rozložení částic  $B_4C$ , tvar jednotlivých housenek a jejich propojení, a to jak se ZM, tak mezi sebou.

Jak je ze snímků makrostruktury patrné, během navařování docházelo k vyplavování částic  $B_4C$  na povrch návaru. To je dáno podstatně nižší hustotou  $B_4C$  ( $2,52 \text{ g/cm}^3$ ) [39] oproti Nib625 ( $8,44 \text{ g/cm}^3$ ) [36]. Částice  $B_4C$  lze na obrázcích rozeznat jako světlé tečky a díky jejich koncentraci u povrchu jsou jednotlivé housenky snadno rozlišitelné.

#### Vzorek 5

Na Obrázek 34 lze vidět skladbu jednotlivých housenek a jejich vzájemná přesazení, popisovaná již v kapitole 5.1.1. U housenky 1 došlo k nepatrnému propadnutí jejího středu, jinak má společně s housenkou 3 vyhovující tvar. Kvůli zvolenému pořadí navařování vznikla v levé části housenky 4 mírně vyvýšená část a její napojení s housenkou 3 tak není úplně hladké. V pravé části housenky 4 pak vznikla poměrně výrazná vyvýšenina, která neobsahuje téměř žádné částice  $B_4C$ . Během navařování housenky 4 došlo k natavení housenky 2 a k pozvolnému snižování její výšky směrem k pravému okraji. Lze se domnívat, že usměrnění vyplavování částic  $B_4C$  v housence 4 směrem k jejímu středu, kde lze pozorovat jejich hustou koncentraci, bylo dáno právě touto šikmou plochou. Maximální výška návaru 5 mm byla naměřena v překryvu housenek 1 a 3.



Obrázek 34 - Makrostruktura vzorku 5

## Vzorek 7

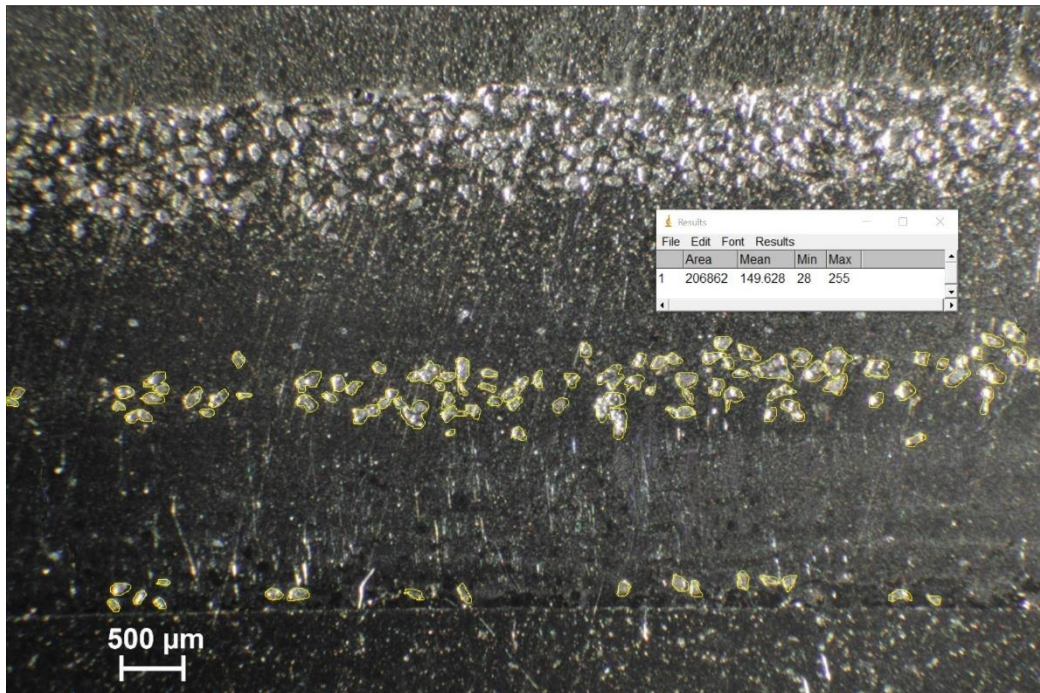
Na Obrázek 35 lze pozorovat skladbu navařovaných housenek. U druhé vrstvy bylo pořadí housenek voleno opačné, než u vzorku 5. Také přesazení housenek se oproti předchozímu vzorku zvětšilo, a sice přibližně o polovinu šířky housenky směrem doprava. Vyhovující tvar má pouze housenka 1, u které nedošlo ani k propadnutí středu. Housenka 3 polovinou svojí šířky zasahuje na ZM a polovinou překrývá housenku 2. Vlivem použitého přesazení nedošlo během navařování k takové deformaci tvaru housenky 2. Housenka 4 má v pravé části větší výšku než v levé. To je dáno překryvem s housenkou 3, která je kvůli překonání výškového rozdílu nakloněná. Střed housenky 4 je propadlý a jeho výška činí jen 1,9 mm. Z tohoto důvodu došlo v místě propadu k rychlému zchladnutí a vzniku praskliny, která je na Obrázek 35 označena šipkou. Maximální výška návaru 5 mm je v překryvu housenek 2 a 4. Od tohoto místa se výška směrem k okrajům zmenšuje. V housenkách 3 a 4, u kterých byl snížen proud a zvýšena lineární rychlost, jsou částice  $B_4C$  rozptýleny v celém jejich objemu a nejsou tak signifikantně vyplaveny u povrchu.



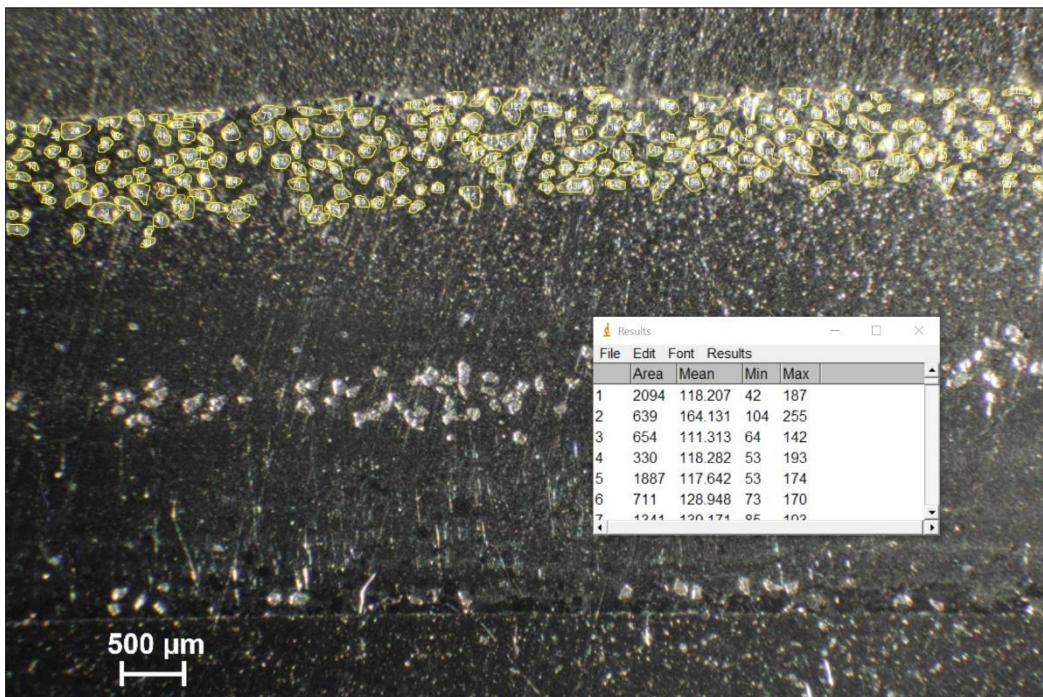
Obrázek 35 - Makrostruktura vzorku 7

V případě obou vzorků je viditelná kontrastní hranice mezi ZM a první vrstvou, která značí jejich nedostatečné propojení. Tento nedostatek by bylo možné opravit změnou parametrů (např. zvýšením proudu a snížením rychlosti).

Během navařování vzorku 5 došlo k lepšímu vzájemnému propojení housenek, než u vzorku 7. U toho jsou mezi housenkami vidět kontrastní hranice. Tento jev je nejspíše zapříčiněn použitím vyšší lineární rychlosti u vzorku 7.



Obrázek 36 - Analýza částic  $B_4C$  v první vrstvě



Obrázek 37 - Analýza částic  $B_4C$  ve druhé vrstvě

Pomocí analýzy částic v programu ImageJ byl vyhodnocován také obsah částic B<sub>4</sub>C a jejich rozložení v návaru. Vzhledem k velikosti návarů a náročnosti analýzy byl pro tyto účely vybrán reprezentativní úsek, a sice místo překryvu housenek 1 a 3 na vzorku 5. Na Obrázek 36 a Obrázek 37 jsou částice B<sub>4</sub>C označeny žlutou barvou. Pomocí programu pak byla určena plocha označených částic a následně porovnána s plochou celé vrstvy v měřeném úseku.

Jak je patrné, drtivá většina částic se nachází vždy na povrchu housenky vrstvy. To je, jak již bylo zmiňováno, zapříčiněno jejich vyplavováním z důvodu nižší hustoty. První vrstva obsahuje na první pohled méně částic než vrstva druhá, což koresponduje s nastaveným podílem B<sub>4</sub>C v dodávaném množství PM, který pro první vrstvu činil 15 % a pro druhou 30 %.

V případě první vrstvy se vyskytují částice do úrovně přibližně 0,7 mm pod jejím povrchem. Celková výška vrstvy je přibližně 2,5 mm. Malý počet částic byl ovšem identifikován také ve spodní části, blízko ZM. Jedná se spíše o anomálie vzniklé různými prouděními během navařování. Vypočtená koncentrace částic v měřeném úseku činí 6,5 %. U druhé vrstvy se částice vyskytují zhruba do úrovně 1 mm pod povrchem. Celková výška vrstvy činí 2,5 mm. Vypočtená koncentrace částic v měřeném úseku činí 15,7 %.

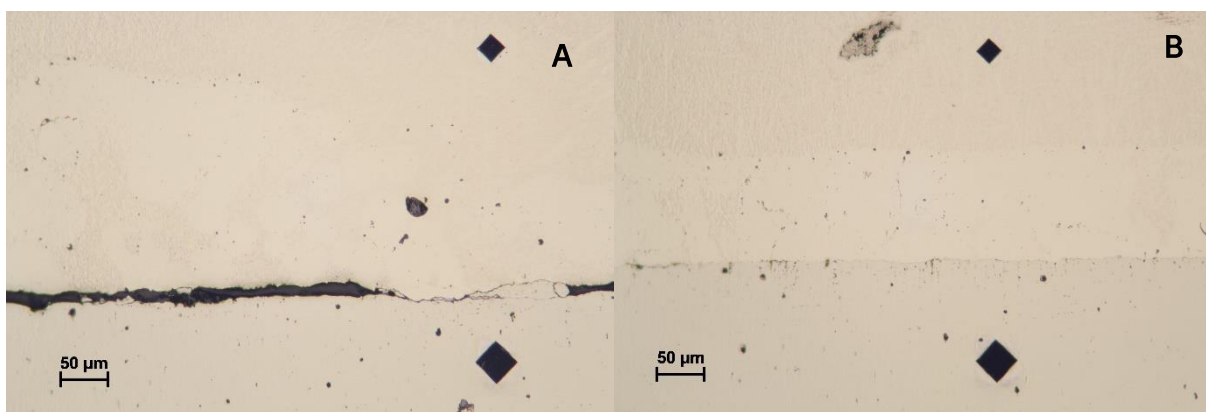
Obě vypočtené hodnoty koncentrací odpovídají přibližně polovině nastavené hodnoty. To je způsobeno tím, že touto metodou je měřen plošný obsah částic a v celkovém objemu může být poměr odlišný. Také během navařování dochází k rozpouštění některých částic B<sub>4</sub>C, jejichž podíl není touto metodou měřitelný. V neposlední řadě je potřeba počítat s lidskou chybou při vyhodnocování touto metodou. Lze tedy předpokládat, že skutečná koncentrace bude vyšší nežli vypočtená.

Vypočtená hodnota koncentrace u první vrstvy je menší nežli polovina nastavené hodnoty. Naopak u druhé vrstvy je vypočtená koncentrace větší nežli polovina nastavené hodnoty. Z této skutečnosti by se dalo usuzovat, že během navařování dochází k vyplavování malého počtu částic B<sub>4</sub>C z první vrstvy do vrstvy druhé.

### 5.3.2 Mikrostruktura návarů

Na mikroskopických snímcích bylo zkoumáno propojení návaru se ZM a vzájemné propojení jednotlivých housenek. Dále pak částice  $B_4C$ , jejich velikost, rozložení a jejich okolí. V neposlední řadě byl zkoumán také tvar a velikost zrn matrice.

K těmto účelům sloužil metalografický výbrus vzorků 5 a 7, který nebyl před pozorováním naleptán. Z důvodu lepší orientace v ploše návaru probíhalo pozorování v blízkosti oblastí měření tvrdosti. Proto jsou na snímcích viditelné vtisky vzniklé při měření.

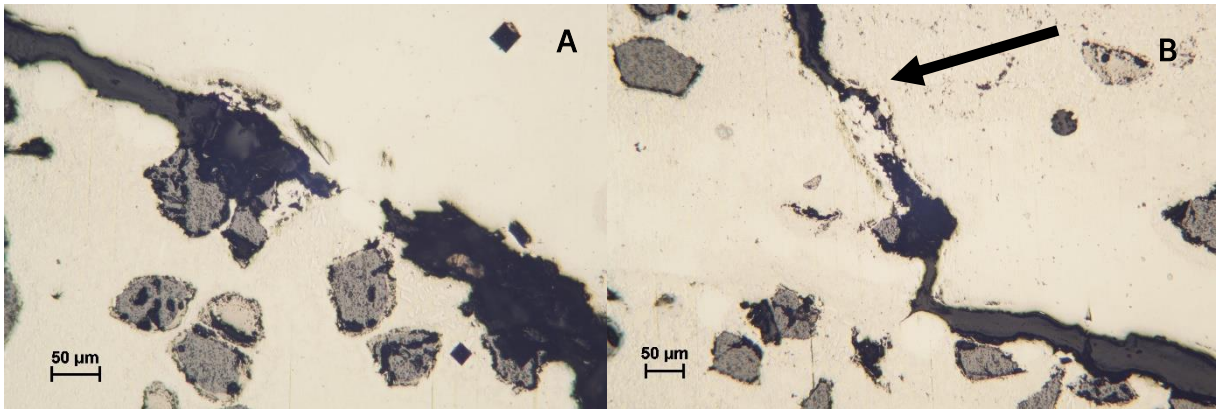


Obrázek 38 – Mikrostruktura na rozhraní ZM a první vrstvy návaru, vzorek 7 - OM, 125x

Na Obrázek 38 lze pozorovat nehomogennost propojení návaru se ZM. Zatímco na Obrázek 38 A, který byl zhotoven v oblasti řady 1 (viz Obrázek 31), lze na rozhraní vidět výraznou kontrastní hranici značící studený spoj, na Obrázek 38 B, který byl zhotoven v oblasti řady 2 (viz Obrázek 31), je spojení již dostatečně kvalitní.

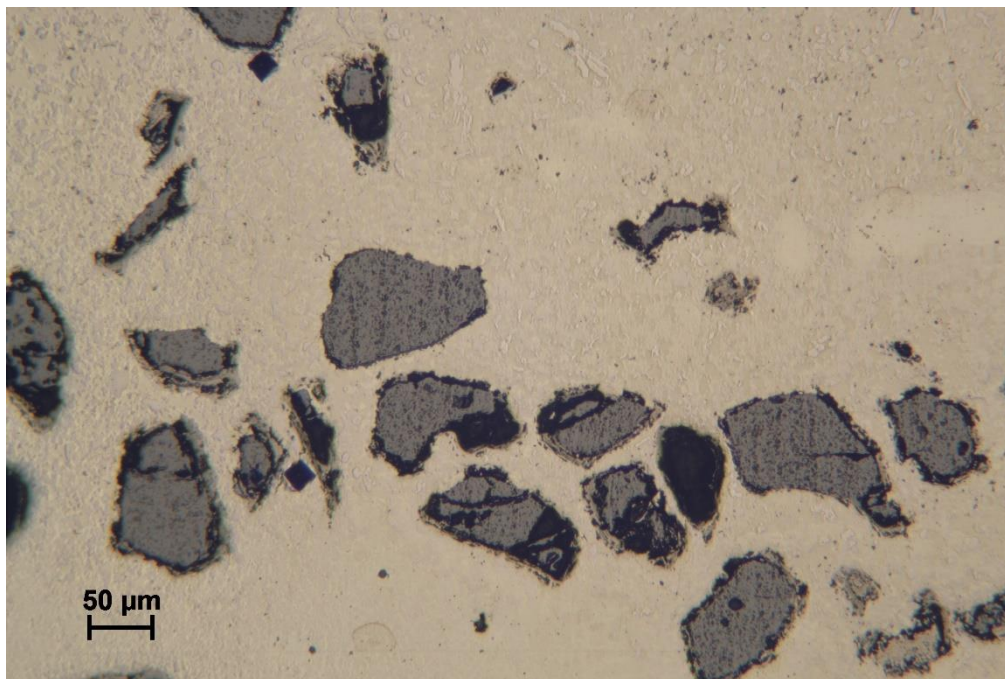
Na Obrázek 38 B lze vidět tři odlišné strukturní fáze. Kromě struktury ZM ve spodní třetině a struktury první vrstvy v třetině horní, se uprostřed nachází jakási přechodová fáze o výšce přibližně 100  $\mu m$ . Ta má světlejší odstín a mohla vzniknout difuzí prvků ze ZM a jejich následného reagování s prvky návaru. Tuto teorii podporují černé částice, které se vyskytují pouze v ZM a právě v přechodové fázi.





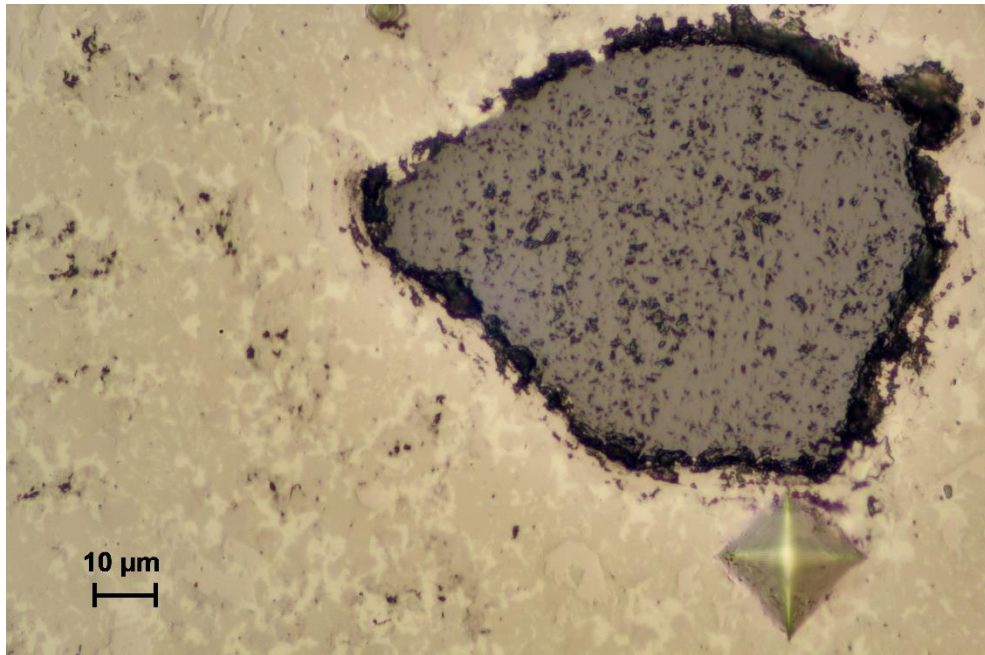
Obrázek 39 - Rozhraní housenek první vrstvy a jejich napojení s druhou vrstvou, vzorek 7 - OM, 125x (A), 100x (B)

Na Obrázek 39 A lze pozorovat kontrastní hranici mezi housenkami 1 a 2 (viz Obrázek 35) potvrzující jejich nedokonalé spojení. Na Obrázek 39 B hranice pokračuje. Je zde také patrná prasklina vzniklá v housence 4 (označena šipkou), komentovaná v kapitole 5.3.1. Ta se zdá být napojená právě na studený spoj mezi housenkami první vrstvy. V horní části Obrázek 39 B lze vidět zrna  $B_4C$  i přes to, že se nejedná o povrch vrstvy. Zrna jsou v celém objemu oblasti poměrně hustě koncentrována, zejména pak kvůli malé výšce návaru (viz Obrázek 35).

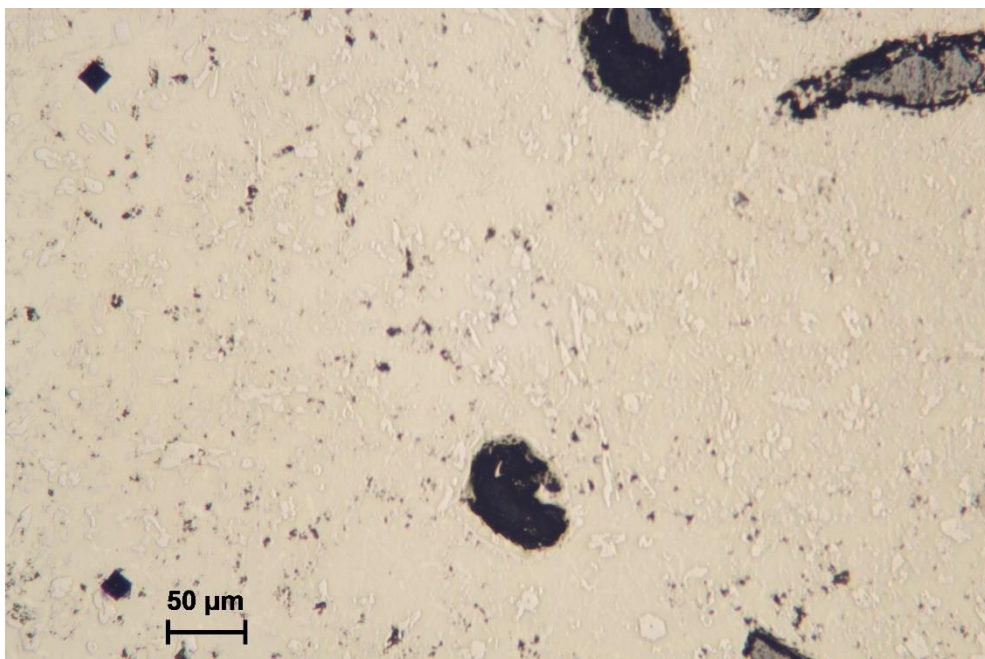


Obrázek 40 - Mikrostruktura na rozhraní vrstvy s 15 %  $B_4C$  a vrstvy se 30 %  $B_4C$ , vzorek 7 - OM, 125x

Na Obrázek 40 lze pozorovat rozhraní první a druhé vrstvy v oblasti řady 1 (viz Obrázek 31). Je vidět zvýšená koncentrace tmavých částic  $B_4C$  na povrchu první vrstvy. Částice mají nepravidelný tvar a jejich velikost se pohybuje řádově v desítkách mikrometrů, přičemž největší z nich dosahují až  $150\ \mu m$ . Kolem částic  $B_4C$  se nachází jakýsi obal, lépe viditelný na Obrázek 41. Ten byl pravděpodobně vytvořen rozkládáním částic  $B_4C$  za vysokých teplot a difuzí B a C do matrice.



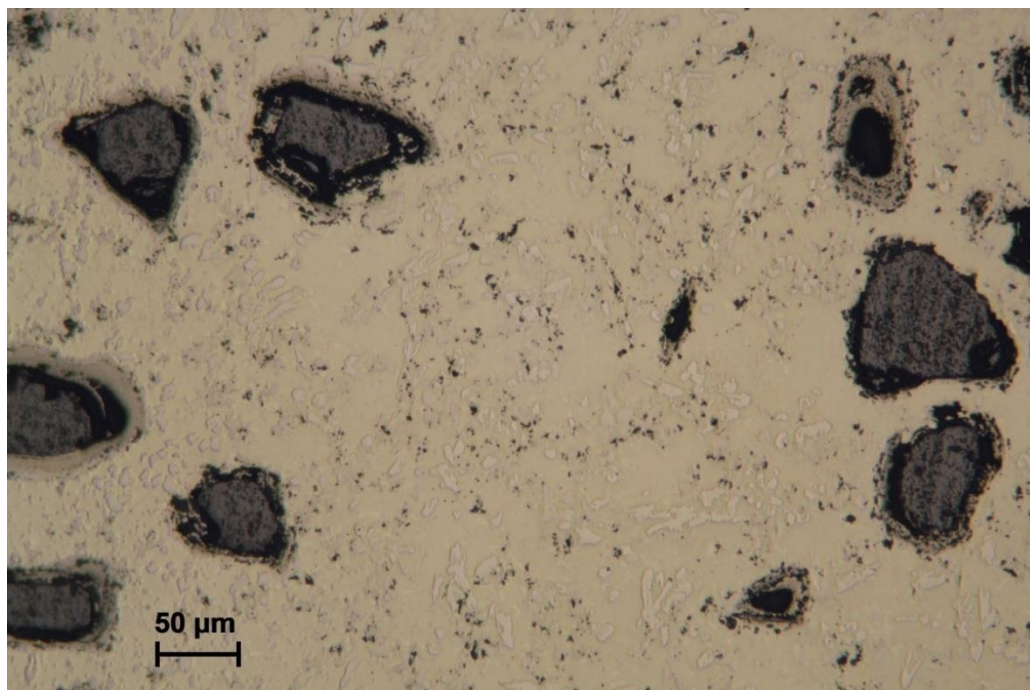
Obrázek 41 - Detail zrna  $B_4C$  v oblasti přechodu první a druhé vrstvy, vzorek 7 - OM, 500x



Obrázek 42 - Mikrostruktura uprostřed vrstvy se 30 %  $B_4C$ , vzorek 7 - OM, 125x

Struktura uprostřed druhé vrstvy, obsahující 30 %  $B_4C$  (viz Obrázek 42), je tvořena zejména maticí Nib625 dochází zde však ale i k výskytu větších tmavých částic  $B_4C$ . Matrice je jemnozrná a obsahuje světlé částice globulárních, podlouhlých i nepravidelných tvarů o velikosti řádově jednotek až desítek mikrometrů. V její struktuře také dochází k hojnému výskytu tmavých částic nepravidelného tvaru o velikosti řádově jednotek mikrometrů. Může se jednat o menší částice práškového  $B_4C$ , u kterých došlo během procesu k téměř úplnému rozpuštění. Mohlo by se ale také jednat o intermetalické částice vzniklé v matici Nib625 vlivem rozpouštění částic a procesů probíhajících během navařování. K ověření správnosti předpokladů by bylo nutné provést analýzu chemického složení, která ovšem není obsahem práce.

Obrázek 41 byl zachycen na povrchu druhé vrstvy. Je zde proto vidět zvýšený výskyt tmavých částic  $B_4C$ , opět o velikosti řádově desítek až stovek mikrometrů. Zmiňovaný obal, vytvářející se kolem částic  $B_4C$ , se v tomto případě jeví větší, než na Obrázek 40. To je způsobeno intenzivnějším rozkládáním částic  $B_4C$ , které je dáno vyšší teplotou. Struktura mezi zrny je stejná jako na Obrázek 42.



Obrázek 43 - Mikrostruktura povrchu vrstvy se 30 %  $B_4C$ , vzorek 7 - OM, 125x

## 5.4 Zkouška odolnosti návaru

Zkouška odolnosti návaru byla učiněna pod vedením Ing. Martina Kuříka, Ph.D. v prostorech výrobního závodu společnosti. Cílem zkoušky, jež byla provedena na vzorku číslo 9, bylo zjistit odolnost a ochranné schopnosti zhotoveného návaru. Návar byl během zkoušky vystaven dynamickým i tepelným účinkům taveniny o teplotě přibližně 1500 °C po dobu 60 s. [47]

Obrázek 44 a Obrázek 45 dokládají stav vzorku po vytažení z proudu lávy. Tavenina pokryla téměř celý vzorek. V místě nátoky lávy se i dlouho po vyjmutí držela vysoká teplota. Z oblasti bílé záře na Obrázek 45 lze vidět, že došlo k prohřátí vzorku na teplotu přibližně 1200 °C. [47]



Obrázek 44 - Stav vzorku po vytažení z proudu lávy [47]



Obrázek 45 - Spodní strana vzorku po vytažení z proudu lávy [47]

Po vychladnutí vzorku a jeho očištění od ztuhlé lávy bylo vidět významné poškození návaru v místě přímého nátoky lávy. V tomto místě nejspíše došlo k propálení povlaku a zatečení lávy pod návar, což vedlo k utržení jeho části (viz Obrázek 46). Tomuto předpokladu nasvědčují skutečnosti, že byl ZM pod místem utržení ztenčen rovnoměrně a není tak pravděpodobné, že by byl návar rozpouštěn a odplavován postupně od místa dopadu lávy. Druhou skutečností je pak výskyt ztuhlé lávy mezi návarem a ZM. [47]

Pozitivním výsledkem je, že místa povlaku, která byla lávou jen pokryta a nebyla tedy vystavena jejímu proudu, nenesou zjevné známky poškození a nejsou tepelně zbarvená. [47]



Obrázek 46 - Stav vzorku po očištění od ztuhlé taveniny [47]

Z charakteru vzniklého poškození lze usuzovat, že došlo k nedostatečnému propojení návaru se základním materiálem. Jinou možnou příčinou jsou během deponace vzniklé praskliny, do nichž mohla láva zatékat. Při dalším výzkumu by bylo nutné upravit parametry navařovacího procesu (např. zvýšení proudu, vhodnější upnutí či předehřev na vyšší teplotu) tak, aby došlo k eliminaci zmíněných vad. Úpravy parametrů s sebou ovšem přináší jiné problémy (např. přílišné tavení PM či vznik vnitřních pnutí v důsledku zamezení přirozené deformace), a proto je třeba nalézt kompromis vedoucí k nejlepšímu výsledku.

Jedním z možných řešení problému by pak byla aplikace návaru na součást, která je během kontaktu s lávou zároveň chlazena. [47]

## 6. ZÁVĚR

Teoretická část práce se zabývala problematikou navařování, přičemž největší pozornosti se dostalo metodě pulzního plazmového navařování (PTA) s využitím přídatných materiálů ve formě prášku. Podrobněji byl popsán obecný princip použité metody, schéma a části hořáku či podstatné parametry charakterizující PTA. Druhý úsek teoretické části byl věnován abrazivzdorným slitinám, jejich složení, vlastnostem a využití. Podrobněji byly popsány materiály použité v experimentální části, tedy niklová slitina typu 625 a karbid bóru.

V experimentální části byly pomocí metody PTA navařeny vzorky, na kterých bylo následně prováděno měření tvrdosti a pozorování struktury. Dva z nich byly poskytnuty společnosti, s níž tento výzkum spolupracuje. K navaření byl použit navařovací automat PPC 250 R6 (KSK, s.r.o., Česká Třebová). Materiálem navařovaného povlaku byl kompozit s kovovou maticí (MMC), složený z niklové slitiny Nibasit 625-P/LFe® (DEW, Německo) v roli matrice a keramického karbidu bóru ( $B_4C$ ) v roli výztuže. Oba materiály byly dodávány v práškové podobě a míseny až během samotného procesu navařování. Jako základní materiál sloužily destičky z konstrukční oceli DIN 1.0534 S 390 G2 S o tloušťce 10 mm.

Návar se vždy skládal ze dvou vrstev. V první vrstvě byl poměr přídatných materiálů 85 % Nib625 a 15 %  $B_4C$ . Ve vrstvě druhé pak 70 % Nib625 a 30 %  $B_4C$ . Návar by se tak dal charakterizovat jako functionally graded material (FGM), což by se dalo vysvětlit jako materiál vyznačující se změnou vlastností v různých částech jeho struktury. Změny vlastností jsou dány právě rozdílným obsahem  $B_4C$  v jednotlivých vrstvách. Jedním z hlavních poznatků, získaných z pozorování makrostruktury, je skutečnost, že vzhledem k rozdílným hustotám přídatných materiálů, dochází k vyplavování částic  $B_4C$  směrem k povrchu návaru. Vlastnosti se tak nemění jen v částech návaru jako celku, ale také v částech jednotlivých vrstev, přičemž největší gradient vlastností je právě směrem od základního materiálu k povrchu návaru.

Během navařování byly na vzorcích přichyceny termočlánky a bylo tak možné sledovat průběhy teplot.

Na metalografickém výbrusu dvou vzorků bylo provedeno měření tvrdosti. Právě tvrdost, která je úzce spojena s odolností vůči abrazi, je jednou z hlavních požadovaných vlastností. Ukázalo se, že se zvyšujícím se obsahem, ale i koncentrací částic  $B_4C$ , tvrdost signifikantně roste. Průměrná hodnota naměřené podpovrchové tvrdosti činila u jednoho vzorku 801 HV<sub>0,5</sub> a u druhého vzorku 1167 HV<sub>0,5</sub>. Z porovnání obou hodnot a navařovacích parametrů použitých obou vzorků lze vyvodit závěr, že zvýšením lineární rychlosti, snížením rychlosti rozkvyvu a snížením proudu lze dosáhnout větší tvrdosti. Tato skutečnost by mohla být způsobena tím, že při takovéto úpravě parametrů dochází k pomalejšímu rozkladu tvrdých částic  $B_4C$ . Mikrostruktura návaru je poměrně heterogenní, a sice z důvodu výskytu množství různých částic vytvořených právě během rozpouštění částic  $B_4C$  a jejich interakce s matricí.

Experimentální část probíhala ve spolupráci se společností zabývající se výrobou izolačních materiálů. Hlavní myšlenkou spolupráce je využití popisovaného povlaku k ochranně komponent výrobní linky, které jsou během jejího provozu vystaveny proudu taveniny o teplotě přibližně 1500 °C. Tento proud působí na součásti výraznými tepelnými a abrazivními účinky a jejich životnost je tak značně omezená. Na jednom ze vzorků, předaných společnosti, byla vyhotovena zkouška odolnosti právě vůči proudu taveniny. V místě přímého nátoku lávy došlo k ulomení a odpadnutí části návaru od základního materiálu, které bylo nejspíše způsobeno jejich nedostatečným propojením. V dalším výzkumu by tak bylo vhodné zaměřit se na úpravu parametrů navařovacího procesu tak, aby došlo k jeho eliminování. Pozitivním výsledkem je fakt, že místa návaru, která byla lávou jen pokryta, nenesou zjevné známky poškození. Problematická se tak zdá být kombinace vysoké teploty a dynamických účinků lávy. Možným řešením by byla aplikace povlaku na součást zároveň chlazenou.

## Bibliografie

- [1] Laserová navařování. *Lasertherm.cz* [online]. LaserTherm, 2019 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-navarovani-kovu>
- [2] ROHAN, Pavel, Ladislav KOLAŘÍK a Zdeněk KRŠKA. Navařování – ochranné povlaky ve výrobě i výzkumu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015, 11.02.2015, (1,2), 1 [cit. 2022-12-19]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-plazmatem-ochranne-povlaky-ve-vyrobe-i-vyzkumu>
- [3] ROHAN, Pavel a Karel KOVANDA. *Tavné svařování, pájení* [online]. Praha, 2022 [cit. 2022-12-20]. Prezentace prezentována: [přednáška z předmětu Technologie 1; 08.03.2022]. České vysoké učení technické, fakulta strojní.
- [4] Laserové navařování. *Lintech* [online]. 2022 [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-aplikace/ostatni-laser-podle-aplikace/laserove-navarovani/>
- [5] Historie svařování. *Svarinfo.cz: magazín praktického svařování* [online]. 2006, 2006, 1 [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006061401>
- [6] Plasma transferred arc welding. *KUKA* [online]. Germany: KUKA, 2022 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-de/products/process-technologies/plasma-transferred-arc-welding>
- [7] PLAZMOVÉ NAVAŘOVÁNÍ (PTA – Plasma Transferred Arc). *Servis armatur* [online]. Česká republika: Servis armatur spol., 2020 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <http://www.servisarmatur.cz/index.php?page=plasma-powder-surfacing>
- [8] PTAW AND GTAW (TIG) TECHNOLOGY COMPARED. *Commersald* [online]. Modena: Commersald S.P.A., 2022 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://www.commersald.com/en/machines-and-systems/ptaw-and-gtaw-tig-technology-compared/>
- [9] HLAVATÝ, Ivo. *Plazmové svařování (navarování) - 15* [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <http://staryweb.ivohlavaty.cz/2009Svarovani/2-01-15.pdf>. VŠB – Technická univerzita Ostrava.



- [10] WILDEN, J., J. P. BERGMANN a H. FRANK. Plasma Transferred Arc Welding— Modeling and Experimental Optimization. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2006, December 2006, **15**, 779-784 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1361/105996306X146767>
- [11] Srovnání parametrů s ostatními metodami. In: *Staryweb.ivohlavaty* [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <http://staryweb.ivohlavaty.cz/2009Svarovani/2-03--52.pdf>
- [12] VERGARA, Victor, Jair Carlos DUTRA a Ana Sofia D'OLIVEIRA. Hardfacing by Plasma Transferred Arc Process. In: SUDNIK, Wladislav. *Arc Welding* [online]. United Kingdom: IntechOpen, 2011, s. 4-9 [cit. 2022-12-29]. ISBN 978-953-307-642-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/28802>
- [13] GAGE, Robert M. *Arc torch and process*. USA. Uděleno 10.9.1957.
- [14] KUNCIPÁL, Josef, Václav PILOUS a Jiří DUNOVSKÝ. *Nové technologie ve svařování*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1984. ISBN 04-245-84.
- [15] VENKATRAMANI, N. Industrial plasma torches and applications. *Current science* [online]. 2002, **83**(3), 254-262 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://www.currentscience.ac.in/Volumes/83/03/0254.pdf>
- [16] AITHAL, S. M., V. V. SUBRAMANIAM, J. PAGAN a R. W. RICHARDSON. Numerical model of a transferred plasma arc. *Journal of Applied Physics* [online]. 1998, **84**(7), 3506-3517 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1063/1.368526>
- [17] KERÄNEN, Marko. *EFFECT OF WELDING PARAMETERS OF PLASMA TRANSFERRED ARC WELDING METHOD ON ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF 12 V TOOL STEEL DEPOSIT* [online]. Espoo, 2010 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <http://lib.tkk.fi/Diss/2010/isbn9789526031101/isbn9789526031101.pdf>. Disertační práce. Aalto University School of Science and Technology.
- [18] Plazmové navařovací automaty. *KSK Česká Třebová* [online]. Česká Třebová: KSK, 2023 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://kskct.cz/cs/navarovani/plazmove-navarovaci-automaty>
- [19] Konzultace s vedoucím bakalářské práce (Ing. Pavel Rohan, Ph.D.)
- [20] Oliveira, M. A. (2001). Estudo do processo plasma com alimentação automática de arame: 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis.

- [21] ROHAN, Pavel, František LUKÁČ a Marie KOLAŘÍKOVÁ. Pulsed Plasma Surfacing of Titanium Matrix Cermet Based on B4C. *J Therm Spray Tech* [online]. 2022, **31**, 1-10 [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01421-0>
- [22] TIAN, Harry H. Wear-resistant materials for engineering and mining applications. *Engineering and Mining Journal* [online]. 2002, **203**(6), 1 [cit. 2023-06-21]. Dostupné z: <https://www.proquest.com/openview/a86b3eec8f617a111e666f2d81a01666/1?cbl=39&pq-origsite=gscholar>
- [23] HUSAIN, Hadi, Zdeněk HAZDRA, Jan KUDLÁČEK a Jiří KUCHAR. RISK FACTORS FOR B4C COMPOSITE UTILIZATION IN TRIBOLOGICAL PROCESSES. *30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials* [online]. Brno, 2021, **32**, 801-806 [cit. 2023-06-21]. ISSN 2694-9296. Dostupné z: <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4186>
- [24] BERNS, Hans. Microstructural properties of wear-resistant alloys. *WEAR* [online]. 1995, **181-183**(1), 271-279 [cit. 2023-06-21]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)90034-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)90034-9)
- [25] VASILESCU, Marius a Mircea DOBRESCU. Hardfacing Corrosion and Wear Resistant Alloys. *Advanced Materials Research* [online]. © (2015) Trans Tech Publications, Switzerland, 2015, **1114**, 196-205 [cit. 2023-06-21]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1114.196>
- [26] GEYAN, Fu, Liu SHUANG a Fan JIWEI. The design of cobalt-free, nickel-based alloy powder (Ni-3) used for sealing surfaces of nuclear power valves and its structure of laser cladding coating. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2011, **241**(5), 1403-1406 [cit. 2023-06-22]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.01.020>
- [27] JINKU, Yu, Yuehua WANG, XiCan ZHAO, Qinyang LI, Qi QIAO a et AL. Wear Resistance of Ni-Based Alloy Coatings. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. 2019, **2019**(Article ID 2548285), 1-7 [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1155/2019/2548285>
- [28] DIABB, J., A. JUÁREZ-HERNANDEZ, R. COLAS, A.G. CASTILLO a et AL. Boron influence on wear resistance in nickel-based alloys. *WEAR* [online]. 2009, **267**(1-4), 550-555 [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.046>

- [29] 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. 2023-06-23]. Dostupné z: doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)90089-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90089-2)
- [30] RENZ, Alexander, Braham PRAKASH, Jens HARDELL a Oliver LEHMANN. High-temperature sliding wear behaviour of Stellite®12 and Tribaloy®T400. *WEAR* [online]. 2018, **402-403**, 148-159 [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.02.013>
- [31] NOUARI, Saheb, Zafar IQBAL, Abdullah KHALIL, Abbas Saeed HAKEEM, Nasser AL AQEELI a et AL. Spark Plasma Sintering of Metals and Metal Matrix Nanocomposites: A Review. *Journal of Nanomaterials* [online]. 2012, **2012**(Article ID 983470), 1-13 [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2012/983470>
- [31] HARRIGAN JR., William C. Commercial processing of metal matrix composites. *Materials Science and Engineering* [online]. 1998, **244**(1), 75-79 [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00828-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00828-9)
- [33] MARI, D. Cermets and Hardmetals. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* [online]. 2001, **2**, 1118 [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00209-6>
- [34] DEUIS, R.L., J.M. YELLUP a C. SUBRAMANIAN. Metal-matrix composite coatings by PTA surfacing. *Composites Science and Technology* [online]. 1998, **58**(2), 299-309 [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(97\)00131-0](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00131-0)
- [35] APPLICATIONS OF INCONEL 625 ALLOY. *Corrotherm international* [online]. Corrotherm International, 2023 [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: <https://www.corrotherm.co.uk/blog/applications-of-inconel-625-alloy>
- [36] INCONEL ® alloy 625. *Specialmetals* [online]. Precision Castparts, 2023 [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf>
- [37] SHANKAR, Vani, K Bhanu Sankara RAO a S.L. MANNAN. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2001, **288**(2-3), 222-232 [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(00\)00723-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(00)00723-6)
- [38] XU, Fujia, Yaohui LV, Fengyuan SHU, Peng HE a Binshi XU. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Inconel 625 Alloy during Pulsed Plasma

Arc Deposition Process. *Journal of Materials Science & Technology* [online]. 2013, **29**(5), 480-488 [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.02.010>

[39] Boron Carbide (B4C) - Properties and Information about Boron Carbide. *AZO Materials* [online]. Manchester: AZoNetwork, 2023 [cit. 2023-06-24]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=75>

[40] Boron Carbide (B4C). *Washington Mills* [online]. WASHINGTON MILLS, 2023 [cit. 2023-06-24]. Dostupné z: <https://www.washingtonmills.com/products/boron-carbide-b4c>

[41] DOMNICH, Vladislav, Sara REYNAULD, Richard A. HABER a Manish CHHOWALLA. Boron Carbide: Structure, Properties, and Stability under Stress. *Journal of the American Ceramic Society* [online]. 2011, **94**(11), 3605-3628 [cit. 2023-06-24]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04865.x>

[42] Laboratorní pece LE 15/11, regulátor HT 60 B. *Unimed* [online]. Vestec u Prahy: FastCentrik® [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.unimed.cz/laboratorni-pece-le-15-11-regulator-ht-60b>

[43] Steel Material: 1.0534 (DIN/EN). *SteelShop: High quality steels from Germany* [online]. Německo: Pauly Stahlhandel, 2010 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://steelshop.net/steel-materials/others/de-material-nr/1.0534>

[44] GATTO, A., E. BASSOLI a M. FORNARI. Plasma Transferred Arc deposition of powdered high performances alloys: process parameters optimisation as a function of alloy and geometrical configuration. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2004, **187**(2-3), 256-271 [cit. 2023-06-24]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.02.013>

[45] UNIVERZÁLNÍ MĚŘICÍ ÚSTŘEDNA. *AHLBORN: Přesná německá měřicí technika* [online]. Praha, 2020 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/univerzalni-merici-ustredna-datalogger-ahlborn-almemo-5690-2m-vicekanalova.html>

[46] Co je to termočlánek K?. *Jakar Electronics* [online]. Karviná: Jakar Electronics, spol. s r.o., 2023 [cit. 2023-06-24]. Dostupné z: <https://www.jakar.cz/advisor/co-je-to-termoclanek-typu-k>

[47] KUŘÍK, Martin. *CAS\_ Metal matrix composite coating*. 2023.

[48] Power densities for typical welding heat sources, and geometry of weld beads obtained at respective densities. In: *ScienceDirect* [online]. Elsevier, 2013 [cit. 2022-12-20]. Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857092649500015>

[49] Scheme of the plasma transferred arc (PTA) torch. In: *Researchgate* [online]. ResearchGate, 2008, 2020 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/publication/338947255\\_Processing\\_by\\_Additive\\_Manufacturing\\_Based\\_on\\_Plasma\\_Transferred\\_Arc\\_of\\_Hastelloy\\_in\\_Air\\_and\\_Argon\\_Atmosphere](https://www.researchgate.net/publication/338947255_Processing_by_Additive_Manufacturing_Based_on_Plasma_Transferred_Arc_of_Hastelloy_in_Air_and_Argon_Atmosphere)

[50] BOULOS, Maher I., Pierre L. FAUCHAIS a Joachim V. R. HEBERLEIN. Plasma Transferred Arc Coating. *Thermal Spray Fundamental* [online]. 2021, (2), 519-558 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: doi:

[https://doi.org/10.1007/978-3-030-70672-2\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70672-2_12)

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Porovnání vybraných metod v číslech [10] .....	15
Tabulka 2 - Ionizační energie vybraných plynů [2].....	20
Tabulka 3 - Chemické složení slitiny Inconel® 625 [36].....	30
Tabulka 4 – Parametry navařovacího automatu PPC 250 R6 (KSK, s.r.o., Česká Třebová) [18].....	35
Tabulka 5 – Parametry laboratorní komorové pece LE 11/15 [42].....	36
Tabulka 6 -Chemické složení základního materiálu zjištěné spektrometrem.....	38
Tabulka 7 – Chemické složení oceli DIN 1.0534 S 390 G2 S [43] .....	38
Tabulka 8 - Chemické složení práškového materiálu Nibasit 625–P/LFe® (DEW, Německo) [příloha 1] .....	39
Tabulka 9 - Parametry navařování vzorků 4 a 5 .....	41
Tabulka 10 - Parametry navařování vzorku 7 .....	41
Tabulka 11 – Parametry navařování vzorku 8 .....	42
Tabulka 12 - Naměřené hodnoty podpovrchové tvrdosti [HV0,5].....	57

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma navařování metodou SAW [3] .....	14
Obrázek 2 - Srovnání hustoty energie a tvaru průvaru vybraných metod navařování [48].....	15
Obrázek 3 - Navařování metodou PTA [18].....	16
Obrázek 4 - Schéma hořáku pro PTA navařování [49] .....	17
Obrázek 5 - Vliv průtoku plazmového plynu na tvar tavné lázně [17] .....	22
Obrázek 6 - Závislost stupně promísení na velikosti svařovacího proudu, rychlosti dodávání částic a průtoku plazmového plynu [50].....	23
Obrázek 7 - Závislost stupně promísení na vzdálenosti trysky a svařovacím proudu [17] .....	24
Obrázek 8 - Univerzální navařovací automat PPC 250 GMR [18].....	25
Obrázek 9 - Navařovací automat PPC 250 WH [18] .....	26
Obrázek 10 - Tahové vlastnosti slitiny Inconel® 625 za vysokých teplot (tyčový polotovar ve vyžíhaném stavu) [36].....	31
Obrázek 11 - Karbid bóru v práškové formě (hrubá a jemná frakce) [40].....	32
Obrázek 12 - Plazmový navařovací automat PPC 250 R6 (KSK, s.r.o., Česká Třebová) [18].....	33
Obrázek 13 - Pracoviště připravené pro navaření vzorku .....	35
Obrázek 14 - Laboratorní komorová pec LE 15/11 [42] .....	36
Obrázek 15 - Příklad upnutí vzorku.....	38
Obrázek 16 - Univerzální měřicí ústředna ALMEMO 5690–2 [45].....	43
Obrázek 17 - Příklad umístění termočlánků na vzorku .....	44
Obrázek 18 - Rozmístění termočlánků na vzorcích číslo 7 a 8.....	45
Obrázek 19 - Rozmístění termočlánků na vzorku číslo 9 (rozměry v mm).....	45
Obrázek 20 - Tvrdoměr IndentaMet 1104 (Buehler) s upnutým vzorkem .....	46
Obrázek 21 - Buehler Beta s automatickou hlavou Buehler Vector Power Head .....	47
Obrázek 22 - Metalografický výbrus vzorků 5 a 7.....	48
Obrázek 23 - Optický mikroskop Neophot 21 od společnosti Zeiss .....	48
Obrázek 24 – Vzorky číslo 4 a 5.....	50
Obrázek 25 - Vzorek číslo 7 .....	51
Obrázek 26 - Graf průběhu teplot, vzorek číslo 7 .....	52

Obrázek 27 – Vzorek číslo 9 v průběhu navařování první vrstvy.....	53
Obrázek 28 - Deformace vzorku číslo 9 vlivem tepla [foto: Ing. Pavel Rohan, Ph.D.] .....	54
Obrázek 29 - Vzorek číslo 9 [foto: Ing. Pavel Rohan, Ph.D.].....	54
Obrázek 30 - Graf průběhu teplot, vzorek číslo 9 .....	55
Obrázek 31 - Místa měření tvrdosti na vzorcích číslo 5 a 7 .....	56
Obrázek 32 - Graf průběhu tvrdosti, vzorek 5.....	58
Obrázek 33 - Graf průběhu tvrdosti, vzorek 7.....	58
Obrázek 34 - Makrostruktura vzorku 5.....	59
Obrázek 35 - Makrostruktura vzorku 7.....	60
Obrázek 36 - Analýza částic B <sub>4</sub> C v první vrstvě .....	61
Obrázek 37 - Analýza částic B <sub>4</sub> C ve druhé vrstvě.....	61
Obrázek 38 – Mikrostruktura na rozhraní ZM a první vrstvy návaru, vzorek 7 - OM, 125x .....	63
Obrázek 39 - Rozhraní housenek první vrstvy a jejich napojení s druhou vrstvou, vzorek 7 - OM, 125x (A), 100x (B).....	64
Obrázek 40 - Mikrostruktura na rozhraní vrstvy s 15 % B <sub>4</sub> C a vrstvy se 30 % B <sub>4</sub> C, vzorek 7 - OM, 125x.....	64
Obrázek 41 - Detail zrna B <sub>4</sub> C v oblasti přechodu první a druhé vrstvy, vzorek 7 - OM, 500x .....	65
Obrázek 42 - Mikrostruktura uprostřed vrstvy se 30 % B <sub>4</sub> C, vzorek 7 - OM, 125x	65
Obrázek 43 - Mikrostruktura povrchu vrstvy se 30 % B <sub>4</sub> C, vzorek 7 - OM, 125x ...	66
Obrázek 44 - Stav vzorku po vytažení z proudu lávy [47] .....	67
Obrázek 45 - Spodní strana vzorku po vytažení z proudu lávy [47] .....	67
Obrázek 46 - Stav vzorku po očištění od ztuhlé taveniny [47] .....	68



## Seznam příloh

Příloha 1 - Certifikát práškového materiálu DEW-Nibasit 625-P/LFe® .....	81
Příloha 2 - Parametry navařování vzorku 9.....	82
Příloha 3 - Graf průběhu teplot, vzorek číslo 8 .....	83

# Přílohy

## Příloha 1- Certifikát práškového materiálu DEW-Nibasit 625-P/LFe®

DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE



Sonderwerkstoffe

Oberschlesienstr. 16  
47807 Krefeld - Germany  
Telefon: (siehe Sachbearbeiter)  
Telefax: (02151) 3633 3877  
email: sales@ferro-titanit.com

Seite/page 1 von/of 1

Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co. KG - 47805 Krefeld - Germany

Seiko Flowcontrol s.r.o.  
CZ 696 71 Blatnice

Zeugnis/Warenbegleitschein-Nr. - Inspection certificate/Delivery note no.		Datum - Date
57804/1		17.02.20
Abteilung V&O	Sachbearbeiter - Telephons Benedikt Siebel 02151/36332054	Kunden-Nr. - Customer's Index 866478
Ihre Bestellung - Your order 752190061/2019-11-19		Auftrags-Nr. - Order No. 4931341/1

### Abnahmeprüfzeugnis nach EN 10204-3.1 Inspection certificate EN 10204-3.1

Gegenstand Product	Prüfgegenstand/Test object Anforderungen/Requirements	Kennzeichnung/Verpackung Marking/package	Charge/Gewicht kg Heat no./weight kg
DEW-Nibasit 625-P/LFe 4697.68 63-200 µm 5 kg Plastikflaschen	Metallpulver DEW Standardprodukt	DEW-Ni-Basis-P Körnung/grain size -1000 µm	258042 490 kg

#### Chemische Analyse/Chemical analysis: (Masseprozent, percent by mass)

Charge Heat No.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Fe %	Co %	Nb %	Ni %
258042	<0,03	0,5	0,2	<0,010	<0,005	20,9	8,9	0,5	<0,1	3,2	Balance

#### Siebanalyse/Sieve analysis:

Charge Heat No.	<45 µm %	45-53 µm %	53-63 µm %	63-100 µm %	100-125 µm %	125-150 µm %	150-180 µm %	180-200 µm %	200-250 µm %	>250 µm %
258042	0,1	0,3	2,7	39,7	22,4	16,5	13,7	4,4	0,3	0,0

#### Sonstige Eigenschaften/Other characteristics:

Charge Heat No.	Fließverhalten (s/50g) Flow rate (s/50g)	Schüttdichte (g/cm³) Apparent density (g/cm³)
258042	16,3	4,54

Dieses Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist ohne persönliche Unterschrift gültig.  
This document has been computer generated and is valid without signing.

Der Abnahmebeauftragte/Authorized representative  
Sinan Turan

Příloha 2 - Parametry navařování vzorku 9

Vrstva/ housenka	Horní/dolní proud [A]	f [Hz]	Lineární posuv [mm/s]	Šířka rozkyvu [mm]	Rychlost rozkyvu [mm/s]	Pauza v okrajích [s]
1/1	120->105/55	28,7	0,65	23	20	0/0
1/2	105/55	28,7	0,65	23	20	0/0
1/3	105/55	28,7	0,65	23	20	0/0
1/4	105/55	28,7	0,65	23	20	0/0
2/1	130->115/55	28,7	0,65	23	20	0/0
2/2	115/55	28,7	0,65	23	20	0,1->0,2 /0,1
2/3	115/55	28,7	0,69	23	20	0,2->0,1 /0,1
2/4	115/55	28,7	0,69	23	20	0/0
2/5	115/55	28,7	0,69->0,72	23	19	0/0
2/6	115/55	28,7	0,72	23	19	0/0
2/7	115/55	28,7	0,72	23	19	0/0
2/8	115/55	28,7	0,72	23	19	0/0
2/9	115->130/55	28,7	0,72	23	19	0/0
2/10	125/55	28,7	0,8	14	19	0/0

### Příloha 3 - Graf průběhu teplot, vzorek číslo 8

