

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta strojní  
Ústav strojírenské technologie



Pulzní plazmové navařování kompozitů s kovovou  
matricí

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

*Vypracoval:* **Daniel-John Rowland**  
*Vedoucí práce:* **Ing. Pavel Rohan, Ph.D, IWE**  
*Rok:* **2022**



### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem k tomu pouze zdroje uvedené na konci práce, a to v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským.

V Praze dne: .....

.....

Jméno a Příjmení

### Poděkování

Rád bych tímto poděkoval Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D, IWE za odborné konzultace a rady v průběhu zpracování této bakalářské práce a dále doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D. za čas, který mi věnovala při experimentální části.

.....

Jméno a Příjmení

Název práce: Pulzní plazmové navařování kompozitů s kovovou maticí

*Autor:* Daniel-John Rowland

*Obor:* Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

*Druh práce:* Bakalářská práce

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

Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze

*Konzultant:* —

*Abstrakt:* Bakalářská práce se zabývá plazmovým navařováním cermetu složeného z niklové slitiny typu Inconel 625® a karbidu boru za účelem vytvoření povlaku metalurgicky spojeného se základním materiálem. V teoretické části práce jsou popsány navařovací metody, konkrétně pak metoda PTA, a je zde podrobně popsán nikl, jeho slitiny a karbid boru. Experimentální část řeší výběr vhodných navařovacích parametrů, podle kterých bylo navařeno osm povlaků. Během navařování byl sledován průběh teploty vzorku. U výsledných povlaků bylo provedeno metalografické hodnocení a byla změřena mikrotvrdost. Vyšší procento přidaného B<sub>4</sub>C mělo za následek vyšší mikrotvrdost návaru. V závěru experimentálních prací byl navařen FGM kompozitní vzorek niklové slitiny typu Inconel 625® a B<sub>4</sub>C.

*Klíčová slova:* Pulzní PTA, Navařování, Plasma transferred arc, Cermety, Ni-slitiny typu 625, Karbid boru, B<sub>4</sub>C

Title: Pulsed-PTA Preparation of Metal Matrix Composites

*Author:* Daniel-John Rowland

*Abstract:* This bachelor thesis focuses on the plasma hardfacing of materials using cermets composed of the Inconel 625® type nickel alloy and boron carbide to form a coating metallurgically bonded to the base material. The theoretical part of the thesis describes multiple hardfacing methods, specifically the PTA method, and provides a detailed description of nickel, its alloys and boron carbide. The experimental section addresses the selection of suitable hardfacing parameters, according to which eight coatings were applied. The temperature distribution and progression of the individual samples were monitored during the process. The resulting coatings were metallographically evaluated and the microhardness was measured. A higher percentage of added B<sub>4</sub>C resulted in a greater microhardness of the coating. At the conclusion of the experimental studies, an FGM composite sample of Inconel 625® type nickel alloy and B<sub>4</sub>C was hardfaced.

*Key words:* Pulsed PTA, Hardfacing, Plasma transferred arc, Cermet, Ni-alloys type 625, Boron carbide, B<sub>4</sub>C

# Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
Seznam grafů	12
Úvod	13
1 Teoretická část	14
1.1 Technologie navařování	14
1.1.1 Navařování plamenem	14
1.1.2 Navařování elektrickým obloukem	15
1.2 Navařování laserem	18
1.3 Navařování plazmatem	18
1.3.1 Plazma	18
1.3.2 Princip	19
1.3.3 Plazmové hořáky	19
1.3.4 Využívané plyny	20
1.3.5 Přídavný materiál	21
1.4 Nikl a jeho slitiny	23
1.4.1 Monel® slitiny	24
1.4.2 Žáruvzdorné a žárupevné slitiny	24
1.4.3 Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi	24
1.4.4 Inconel® slitiny	24
1.5 Karbid boru	26
2 Experimentální část	28
2.1 Využitá zařízení	28
2.1.1 Navařovací automat PPC 250 R6	28
2.1.2 Univerzální měřicí ústředna Almemo 5690-2	31
2.1.3 Metalografický lis Citopress -1	32
2.1.4 Bruska a leštička Buehler Beta	32
2.1.5 Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104	33
2.1.6 Mikroskop Zeiss Axio Observer D1M	33

2.2	Postup navařování .....	34
2.3	Výsledky a diskuse .....	35
2.4	Vzorek č.1 .....	35
2.4.1	Zvolené parametry .....	35
2.4.2	Tepelné ovlivnění .....	36
2.4.3	Makrostruktura .....	37
2.4.4	Mikrotvrdomost .....	38
2.5	Vzorky č. 2, 3, 4 .....	39
2.5.1	Zvolené parametry .....	39
2.5.2	Tepelné ovlivnění .....	40
2.5.3	Makrostruktura .....	41
2.5.4	Mikrotvrdomost .....	42
2.6	Vzorky č. 5, 6 .....	43
2.6.1	Zvolené parametry .....	43
2.6.2	Tepelné ovlivnění .....	45
2.6.3	Makrostruktura .....	46
2.6.4	Mikrotvrdomost .....	46
2.7	Vzorek č. 7 .....	48
2.7.1	Zvolené parametry .....	48
2.7.2	Tepelné ovlivnění .....	49
2.7.3	Makrostruktura .....	50
2.7.4	Mikrotvrdomost .....	50
2.8	Vzorek č. 8 .....	51
2.8.1	Zvolené parametry .....	51
2.8.2	Tepelné ovlivnění .....	51
2.8.3	Makrostruktura .....	52
2.8.4	Měření mikrotvrdomosti .....	53
	Závěr .....	55
	Citovaná literatura .....	57

# Seznam zkratek

<b>Zkratka</b>	<b>Termín</b>
<b>A/D</b>	Analog to digital
<b>AMR</b>	Automated meter readings
<b>DC</b>	Direct current
<b>FAT</b>	File allocation table
<b>FCC</b>	Face-centered cubic
<b>FGM</b>	Functionally graded material
<b>HRC</b>	Hardness Rockwell C
<b>HK</b>	Hardness Knoop
<b>HV</b>	Hardness Vickers
<b>IH</b>	Horní hodnota proudu
<b>IL</b>	Dolní hodnota proudu
<b>MAG</b>	Metal active gas
<b>MIG</b>	Metal inert gas
<b>MMA</b>	Manual metal arc
<b>MMC</b>	MultiMediaCard
<b>PAW</b>	Plasma arc welding
<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 obrázků

Obrázek 1 Směry navařování plamenem[4].....	15
Obrázek 2 MMA proces[6] .....	16
Obrázek 3 MIG/MAG proces[7] .....	16
Obrázek 4 TIG proces[6].....	17
Obrázek 5 SAW proces[10] .....	17
Obrázek 6 Navařování laserem[11].....	18
Obrázek 7 PTA proces[14].....	19
Obrázek 8 Schéma plazmového hořáku[16] .....	20
Obrázek 9 Rozdělení niklových slitin[22] .....	23
Obrázek 10 Tahové vlastnosti slitiny Inconel 625®[29] .....	26
Obrázek 11 Navařovací automat PPC 250 R6 .....	29
Obrázek 12 Řídicí systém PPC 250 R6.....	30
Obrázek 13 Hořák PPC 250 R6.....	30
Obrázek 14 Podavač PPC 250 R6 .....	31
Obrázek 15 Univerzální měřicí ústředna Almemo 5690-2 .....	31
Obrázek 16 Metalografický lis Citopress -1 .....	32
Obrázek 17 Bruska a leštička Buehler Beta .....	32
Obrázek 18 Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104 .....	33
Obrázek 19 Mikroskop Zeiss Axio Observer D1M .....	33
Obrázek 20 Makrostruktura vzorku č. 1(L) .....	37
Obrázek 21 Makrostruktura vzorku č. 1(P).....	37
Obrázek 22 Makrostruktura vzorku č. 1 .....	37
Obrázek 23 Makrostruktura vzorku č. 2(L) .....	41
Obrázek 24 Makrostruktura vzorku č. 2(P).....	41
Obrázek 25 Makrostruktura vzorku č. 2.....	41
Obrázek 26 Makrostruktura vzorku č. 3(P).....	42
Obrázek 27 Makrostruktura vzorku č. 3(L) .....	42
Obrázek 28 Makrostruktura vzorku č. 4(P).....	42

Obrázek 29 Makrostruktura vzorku č. 4(L) .....	42
Obrázek 30 Makrostruktura vzorku č. 5 (P).....	46
Obrázek 31 Makrostruktura vzorku č. 5(L) .....	46
Obrázek 32 Makrostruktura vzorku č. 6(P).....	46
Obrázek 33 Makrostruktura vzorku č. 6(L) .....	46
Obrázek 34 Makrostruktura vzorku č. 7.....	50
Obrázek 35 Makrostruktura vzorku č. 8(P).....	52
Obrázek 36 Makrostruktura vzorku č. 8(L) .....	52
Obrázek 37 Makrostruktura vzorku č. 8.....	53

# Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry plazmových plynů[13] .....	20
Tabulka 2 Příklady PM na bázi niklu[18] .....	21
Tabulka 3 Příklady PM na bázi železa[18] .....	22
Tabulka 4 Chemické složení slitiny Inconel 625®[28].....	25
Tabulka 5 Mechanické vlastnosti Inconelu 625® [28] .....	25
Tabulka 6 Příklad chemického složení dodávaného prášku B <sub>4</sub> C[32] .....	27
Tabulka 7 Mechanické vlastnosti B <sub>4</sub> C[32].....	27
Tabulka 8 Fyzikální vlastnosti B <sub>4</sub> C[32] .....	27
Tabulka 9 Chemické složení Nibasitu 625® [33] .....	28
Tabulka 10 Parametry automatu PPC 250 R6.....	29
Tabulka 11 Rozsah polohování hořáku PPC 250 R6 .....	30
Tabulka 12 Parametry zkušebního návaru .....	34
Tabulka 13 Reálné parametry návarů.....	35
Tabulka 14 Navařovací parametry vzorku č. 1 .....	35
Tabulka 15 Mikrotvrdost vzorku č. 1 .....	38
Tabulka 16 Navařovací parametry vzorku č. 2 .....	39
Tabulka 17 Navařovací parametry vzorku č. 3, 4 .....	39
Tabulka 18 Mikrotvrdost vzorku č. 2, 3, 4.....	43
Tabulka 19 Navařovací parametry vzorku č. 5 .....	44
Tabulka 20 Navařovací parametry vzorku č. 6 .....	44
Tabulka 21 Mikrotvrdost vzorků č. 5, 6.....	47
Tabulka 22 Navařovací parametry vzorku č. 7 .....	48
Tabulka 23 Mikrotvrdost vzorku č. 7.....	50
Tabulka 24 Navařovací parametry vzorku č. 8 .....	51
Tabulka 25 Mikrotvrdost vzorku č. 7.....	53

# Seznam grafů

Graf 1 Tepelné ovlivnění vzorku č. 1 .....	36
Graf 2 Mikrotvrдост vzorku č. 1 .....	38
Graf 3 Tepelné ovlivnění vzorku č. 3 .....	40
Graf 4 Mikrotvrдост vzorku č. 2, 3, 4 .....	43
Graf 5 Tepelné ovlivnění vzorku č. 6 .....	45
Graf 6 Mikrotvrдост vzorku č. 5, 6 .....	47
Graf 7 Tepelné ovlivnění vzorku č. 7 .....	49
Graf 8 Tepelné ovlivnění vzorku č. 8 .....	52
Graf 9 Porovnání mikrotvrдостí vzorků č. 4, 5, 7, 8 .....	54

# Úvod

Hlavním cílem této práce je studie využití pulzního plazmového navařování k výrobě a návaru kompozitů s kovovou maticí, konkrétně niklových slitin typu Inconel 625® (Nibasit 625®) s karbidem boru.

V teoretické části bakalářské práce jsou popsány technologie navařování, zvláštní pozornost je věnována navařování plazmatem. Technologie navařování je forma aditivní technologie a spočívá v nanášení jednotlivých vrstev materiálu na sebe a tím vytváří návar požadovaných rozměrů. Proces využívá proud plazmatu k navaření materiálu ve formě prášku za účelem vytvoření povlaku na základní materiál. Návar je charakteristický nízkým ovlivněním základního materiálu součástí. Teoretická část práce se zabývá niklem a jeho slitinami - složením těchto slitin, jejich mechanickými vlastnostmi a využitím. Obsahuje i kapitolu popisující základní vlastnosti karbidu boru.

Inconel 625® je superslitina, která ve struktuře obsahuje převážně prvek nikl. Je využívána pro svou vysokou pevnost, tepelnou odolnost, ale hlavně pro velkou odolnost proti korozi. Právě díky chemickému složení je tato slitina aplikovatelná v prostředí s vysokým objemem vlhkosti vzduchu. Tento typ niklové slitiny byl navržen i za účelem dobré svařitelnosti/navarovatelnosti a proto je jeho aplikace v aditivních technologiích prominentní.

Karbid boru je jeden z nejtvrdějších materiálů, které jsou dnes k dispozici. Využívá se ve zbrojařském průmyslu například k výrobě neprůstřelných vest nebo štítů bojových letadel. Je to ale i jeden z mála materiálů na Zemi, který může být využíván v jaderné energetice pro jeho schopnost absorpce a částečného odražení radiační energie. Právě kvůli jeho mechanickým vlastnostem jsou pro karbid boru konvenční metody zpracování velice nevhodné.

Využití kombinace těchto dvou látek ve formě cermetu k vytvoření povlaků pomocí procesu navařování má tedy velký potenciál.

Experimentální část práce prověřuje funkčnost navařených kompozitů různého poměrového zastoupení karbidu boru ve struktuře a porovnává jejich mechanické vlastnosti. První část praktického segmentu se zabývá problematikou zvolení vhodných parametrů navařovacího procesu a s jejich pomocí vyhotovení zhodnotitelného finálního povlaku. Druhá část shrnuje závěry vycházející z poznatků o zhotovených návarech. Finální část tyto závěry pak porovnává.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Technologie navařování

Základní princip technologie navařování spočívá v tavení základního a přídavného materiálu. Přídavný materiál, ve formě kovového prášku či drátu, v metalurgickém procesu po ochlazení vytvoří návar na materiál základní. Návar musí vykazovat požadované vlastnosti. Navařovací procesy se dělí na základě použitého zdroje tepla na jednotlivé technologie. Jako tepelný zdroj pro navařování se používá plamen hořlavého plynu ve směsi s kyslíkem, elektrický oblouk, laser, plazma, nebo elektronový svazek. Volba tepelného zdroje pro navařování má velký vliv na efektivitu technologie a kvalitu výsledného návaru.[1]

V praxi se navařování využívá především ke zlepšení povrchových vlastností nebo k údržbě součástí. Využívá se ale i k obnově opotřebené nebo poškozené funkční plochy. Aby se efektivní návar zrealizoval, zpravidla se používá kvalitnější přídavný materiál než základní. Podmínkou ale je, že navařovaný materiál musí mít nižší teplotu tavení než materiál základní.[1][2]

Navařovat lze jak ručně, tak lze proces automatizovat. Při automatické sériové výrobě je velkou výhodou produktivita, za použití vysoce výkonných tepelných zdrojů. Při sériové výrobě automatizace značně zlepšuje i výslednou kvalitu návaru. Naopak ruční navařování se využívá spíše u kusové výroby, kde samotné provedení návaru nevykazuje velké finanční náklady a u kterého se tolik nedbá na kvalitu finálního návaru.[1][2]

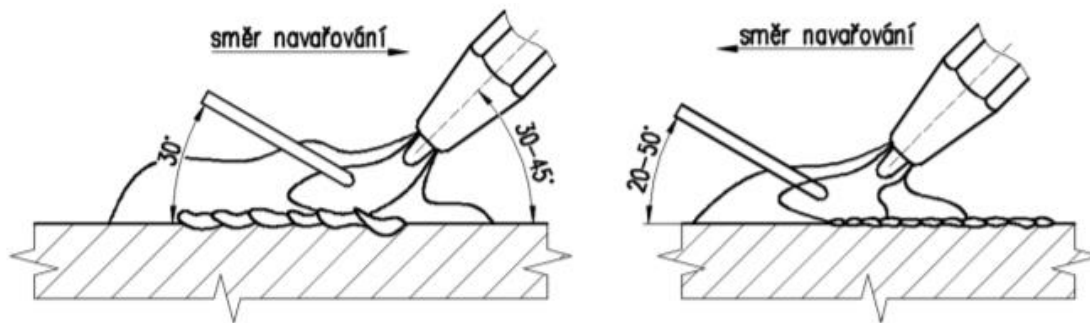
Při navařování dochází k značnému tepelnému ovlivnění základního materiálu. To může mít nežádoucí vliv na změnu struktury materiálu součástí. Finální návar může být nehomogenní, což způsobuje zhoršení vlastností závěrečného povlaku. Na návaru se často provádí dokončovací operace obráběním pro zajištění požadované kvality navařeného povrchu.[1][2]

### 1.1.1 Navařování plamenem

Navařování plamenem probíhá za pomoci využití hoření kyslíko-acetylenového plamene jako tepelného zdroje. Tato technologie je považována za nejjednodušší a ekonomicky nenáročný způsob navařování. Metoda je sice nenáročná na realizaci, avšak kvůli nutnosti vysokého přehřevu základního materiálu vzniká nechtěný tepelný dopad na materiál ve formě tvarových a objemových deformací a velkého vnitřního pnutí. Navařování plamenem bylo považováno za jednu z nejvíce využívaných metod právě kvůli finanční dostupnosti, poslední dobou bylo ale spíše nahrazeno metodou MAG.[1][2][3]

Nejčastěji používané přídavné materiály pro tuto metodu jsou slitiny kovů s vysokou tvrdostí za účelem zlepšení odolnosti součástí před mechanickým opotřebením. Slitiny jsou přidávány ve formě drátu nebo prášku. Hrubý povrch základního materiálu může způsobit nehomogenost

finálního návaru, proto je za potřebí plochu patřičně vyčistit a vyhladit. Navařování plamenem lze provádět směrem jak doleva, tak doprava (viz Obr. 1).[1][3]



Obrázek 1 Směry navařování plamenem[4]

### 1.1.2 Navařování elektrickým obloukem

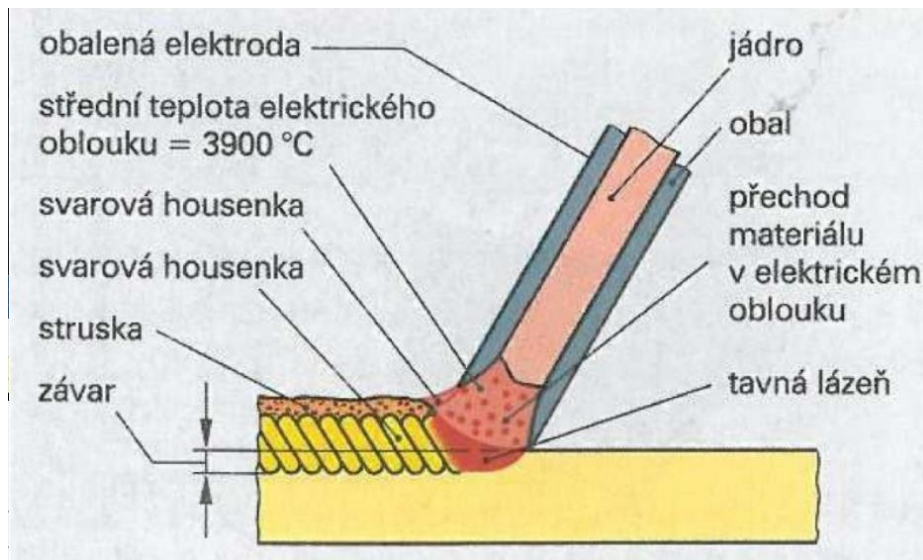
U navařování elektrickým obloukem se využívá jak střídavý, tak i stejnosměrný (DC-, DC+) elektrický proud. Typ proudu závisí na zvolené metodě navařování, ale v praxi se spíše používá proud stejnosměrný. K metodám navařování elektrickým obloukem patří navařování ruční obalenou elektrodou (MMA), navařování odtavující se elektrodou (MIG/MAG), navařování neodtavující se elektrodou (TIG) a navařování pod tavidlem (SAW).[5]

Technologie navařování elektrickým obloukem je obecně více produktivní než navařování plamenem a je využívána na rozsáhlejší povrchy s určitou nepravidelností. Jako přídatný materiál se používají tvrdé kovové slitiny, které se při nánosu promísí se základním materiálem. Je proto vhodné nejprve nanést tenkou vrstvu návarového kovu a poté až konečnou vrstvu požadované tloušťky.[5]

#### *Navařování ruční obalenou elektrodou*

Navařování ruční obalenou elektrodou, neboli MMA, se především využívá v opravárenství a to z důvodu nevelkých finančních nákladů a jednoduchosti využití. Přídatný materiál se skládá z jádra elektrody a obalu. Obal slouží převážně k vytváření ochranného plynu na ochranu svarové lázně, může sloužit i k případnému legování materiálu. Po odtavení obalu na místě návaru vzniká struska (viz. Obr. 2), která se musí po zhotovení a před navařováním další vrstvy odstranit. Elektrody se rozlišují podle materiálu obalu do několik druhů – např. kyselé, bazické a rutilové.[5]

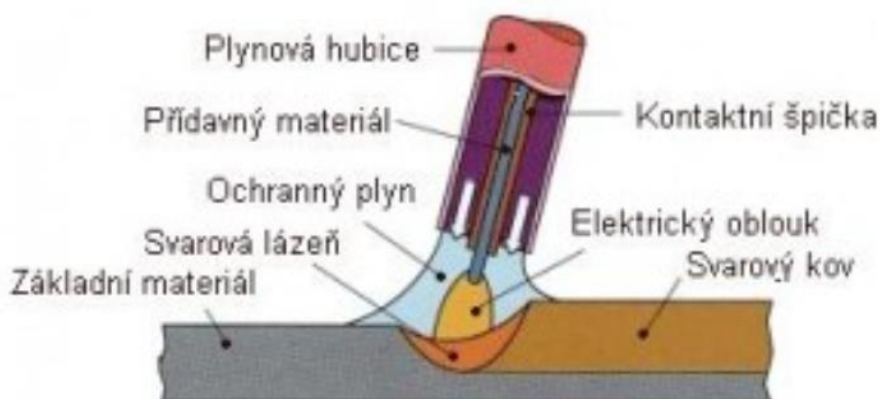
Tepelné ovlivnění oblasti při tomto typu navařování je velké a negativně tak ovlivňuje strukturu materiálu a finální vlastnosti součásti.[5]



Obrázek 2 MMA proces[6]

### ***Navarování odtavující se elektrodou MIG/MAG***

Při navarování odtavující se elektrodou se jako ochrana svarové lázně využívá plyn (viz Obr. 3). Navarování tímto způsobem se dělí na metody Metal inert gas (MIG) a Metal active gas (MAG). Rozdíl těchto metod je ve volbě ochranného plynu. Metoda MIG používá jako ochranný plyn směs inertních plynů argonu a hélia, metoda MAG využívá aktivní plyn ve formě buď čistého CO<sub>2</sub>, jeho směsi s Argonem, nebo směs Argonu a O<sub>2</sub>. Tato technologie se v porovnání s metodou MMA, mimo jiné z důvodu možnosti automatizace, obecně považuje jako produktivnější. Metoda využívá přídavný materiál ve formě plných i plněných drátů či trubiček o průměru 1.2 až 4.0 mm a využívá se převážně na navarování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí.[5][9]

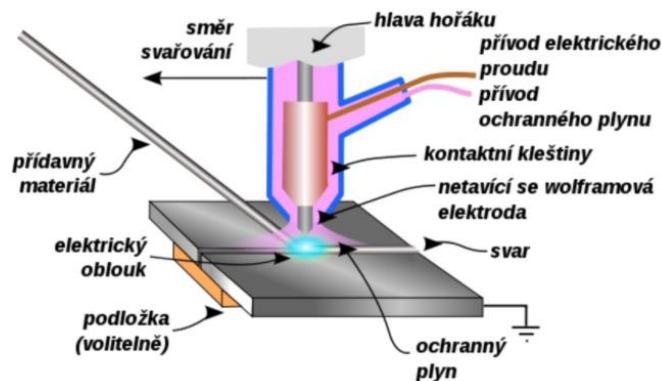


Obrázek 3 MIG/MAG proces[7]



## *Navařování neodtavující se elektrodou*

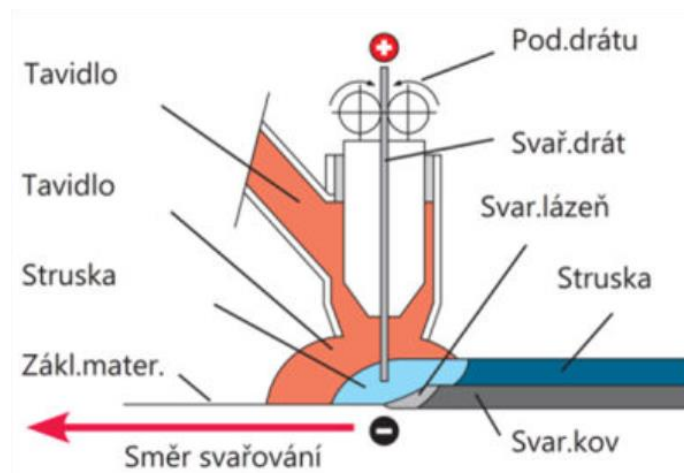
Při navařování neodtavující se elektrodou, neboli metodou TIG, hoří oblouk mezi základním materiálem a neodtavující se wolframovou elektrodou (viz Obr. 4). Do svarové lázně se postupně přidává přídatný materiál ve formě drátu, tyčinky nebo prášku. Návar je chráněn inertním plynem. TIG se využívá pro navařování antikoročních materiálů a materiálů s velkou odolností proti adhezivnímu a abrazivnímu opotřebení. Navařovat lze jak střídavým, tak stejnosměrným proudem, a proces může být zcela automatický.[5]



Obrázek 4 TIG proces[6]

## *Navařování pod tavidlem*

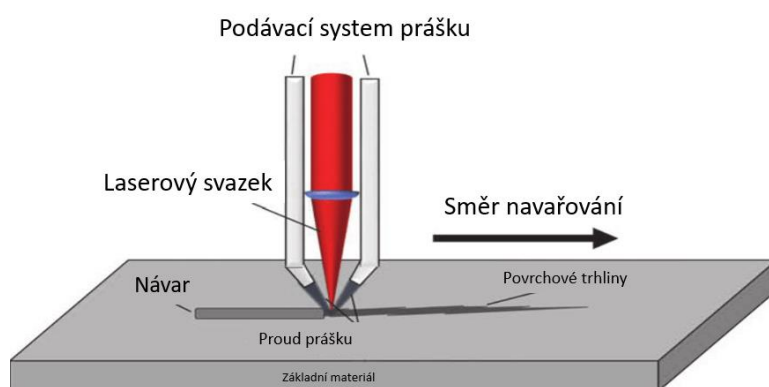
Navařování pod tavidlem, neboli SAW, je plně automatický proces, který se využívá především u dlouhých návarů, například u kolejnic a rozsáhlých válcových součástí. Přídavný materiál ve formě drátu, pásy nebo trubičky se postupně odtavuje do místa návaru a následně je zasypáván tavidlem, které slouží jako ochrana proti okolním vlivům atmosféry (viz Obr. 5). Tavidlo může také plnit částečnou legující funkci. Tavidla se používají tavná, keramická a sintrovaná. Kvůli úplnému zásypu návaru není možná průběžná kontrola a při této metodě dochází až k 60% zředění materiálu.[5][9]



Obrázek 5 SAW proces[10]

## 1.2 Navařování laserem

Možnost zaměření paprsku laseru umožňuje využívat tuto metodu na detailní návary drobných součástí a zároveň zachovat velice nízké tepelné ovlivnění základního materiálu. Tato exaktní metoda umožňuje vytvářet návary s přesností na desetiny milimetru. I když je ekonomicky velmi náročná, navařování laserem se považuje za jednu z nejpokročilejších a nejdokonalejších metod navařování. Vzhledem k minimálnímu vnitřnímu pnutí finálního návaru začala tato metoda nahrazovat v praxi jiné metody navařování za pomoci elektrického oblouku. Návar jako takový vzniká postupným přidáváním materiálu na základní materiál při působení vysoce koncentrovaného laserového paprsku (viz Obr. 6). Oproti metodě Plasma transferred arc je ale nastavení adekvátních navařovacích parametrů složitější a pro nízký výkon odtavení se u všech návarů nevyužívá.[5][11]



Obrázek 6 Navařování laserem[11]

## 1.3 Navařování plazmatem

Navařování plazmatem je finančně přijatelná metoda s možností snadné automatizace. V porovnání s metodami navařování elektrickým obloukem má navařování plazmatem efektivnější možnost řízení procesu a obecně lepší opakovatelnost překryvů návarových housenek. Spolu s navařováním laserem jde o jednu z nejvíce rozvíjejících se metod povrchového inženýrství, v porovnání s laserovým navařováním však disponuje větší flexibilitou možnosti navařovacích parametrů. Koncentrace plazmového paprsku umožňuje velké využití návarového kovu s nízkým potenciálem zředění a minimální tepelné ovlivnění základního materiálu.[12][13]

### 1.3.1 Plazma

Plazma je vodivá látka složená z kladně nabitých iontů a elektronů. Je považováno za čtvrté skupenství. Je to rozsáhle vyskytující se forma hmoty ve vesmíru. Jejím zdrojem na Zemi jsou převážně elektrické výboje v atmosféře. Během navařování vzniká ionizací plazmového plynu.[12][13]

### 1.3.2 Princip

Principem metody Plazma transferred arc je vytvoření přeneseného plazmového oblouku hořícího mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem. Nejprve se oblouk za pomoci vysokofrekvenčního výboje zapálí uvnitř hořáku mezi jeho tryskou a wolframovou elektrodou a přiblížením základního materiálu, nebo zapnutím plazmového proudu, se vytvoří oblouk hlavní. Do svarové lázně vytvořené plazmovým paprskem, který může dosahovat teplot až 30000 K, je za pomoci podávacího plynu postupně dodáván kovový prášek (viz Obr. 7). U metody Plasma arc welding (PAW) se využívá jako přídavný materiál drát. Dále je možné použít i drát předehřátý jiným zdrojem energie, tzv. horký drát. Při navařování plazmatem se využívá poměrně velká návarová rychlost, právě kvůli vysoké stabilitě oblouku a malému procentuálnímu tepelnému ovlivnění základního materiálu.[12][13]



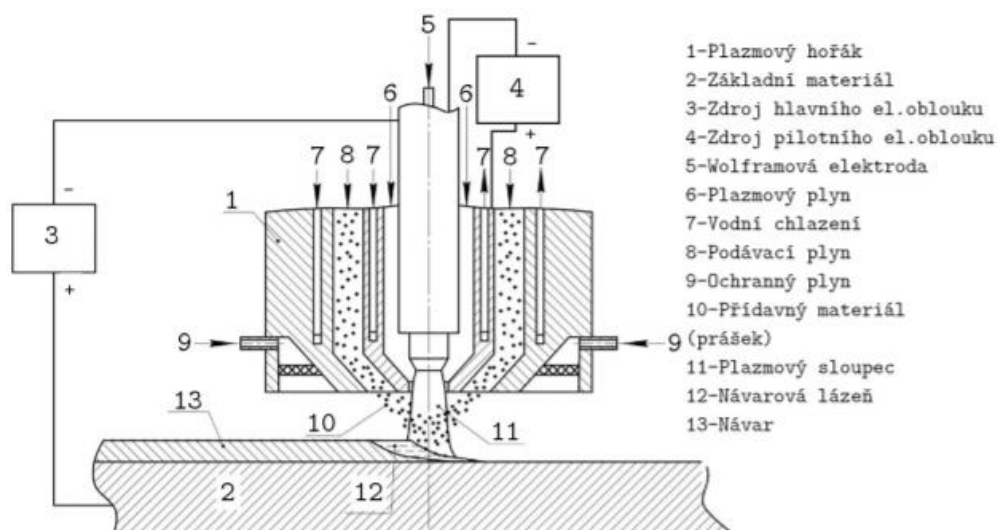
Obrázek 7 PTA proces[14]

### 1.3.3 Plazmové hořáky

Pro navařování plazmatem se používá podobný hořák jako pro metodu TIG. Plazmový hořák neboli plazmatron se skládá z wolframové elektrody, kanálků na plazmový plyn a vodní chlazení, systému na podávání přídavného materiálu ve formě prášku a přívodu ochranného plynu (viz Obr. 8). Měděné tělo plazmatronu se kvůli vysokým hodnotám proudu musí v průběhu navařování chladit vodou. Plazmatrony jsou speciálně navrhovány přímo pro navařování specifických tvarů, například pro vnitřní plochy (již od průměru 45 mm) nebo pro obtížně přístupné vnější tvary. Při navařování musí být hořák umístěn svisle dolů, proto se při polohování manipuluje především s navařovanou součástí.[12][13]

Před zapálením hlavního oblouku mezi hořákem a základním materiálem je třeba zapálit tzv. "pilotní oblouk". Pilotní oblouk vzniká mezi wolframovou elektrodou (katodou) a měděnou částí plazmatronu (anodou). Vzdálenost nutná k proražení vysokofrekvenčního výboje se zmenší a tím pilotní oblouk napomáhá k zjednodušení zapálení oblouku hlavního.[13]

Plazma se využívá také na případné zpracování základního materiálu před návarem, například k předehřátí nebo k tepelnému ovlivnění povrchu.[13]



Obrázek 8 Schéma plazmového hořáku[16]

### 1.3.4 Využívané plyny

U navařování plazmatem se využívají tři druhy plynů - plazmové, podávací a ochranné. Plazmový plyn slouží k samotnému vytváření plazmatu, podávací k unášení přídavného materiálu do svarové lázně a ochranný k ochraně svarové lázně.[15]

Nejpoužívanější plazmový plyn je argon, případně jeho směsi s jinými plyny (viz Tab. 1). Nejdůležitějším parametrem plynu je ionizační energie, která rozhoduje o míře snadnosti ionizace. Nízká ionizační energie umožňuje snadnější zapálení oblouku. Díky termickému zvětšení objemu se výstupní rychlost plazmatu při navařování pohybuje mezi 200-500 m.s<sup>-1</sup>. [12][13][15]

Tabulka 1 Parametry plazmových plynů[13]

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

Podávací plyn ovlivňuje tok přídavného materiálu, který se do svarové lázně pomocí podavače podává v formě prášku. Nejčastěji využívaný plyn pro regulaci kovového prášku je čistý argon, případně argon v směsi s heliem nebo vodíkem. [15]

Ochranný plyn zabraňuje ovlivnění svarové lázně okolní atmosférou, chrání před oxidací návaru. Využívají se inertní ochranné plyny jako čistý argon a jeho směs s dusíkem a vodíkem. Pokud nejsou zvoleny správné parametry přívodu ochranného plynu, může dojít k nechtěným vlivům na finální návar, např. k porozitě povrchu.[15]

### 1.3.5 Přídavný materiál

Přídavný materiál pro navařování plazmatem může být rovněž prášek i drát. Pomocí podavače a proudu podávacího plynu proudí přídavný materiál, pokud je ve formě prášku, do místa proudu plazmatu a tavné lázně, kde dochází k jeho natavení a vytvoření vrstvy návaru. Materiál ve formě drátu je přidáván do svarové lázně z boku. Systém pro podávání drátu není součástí plazmového hořáku.[12][13]

Značnou výhodou volby využití přídavného materiálu formou prášku je možnost velké rozmanitosti složení. Navařovaný materiál může obecně obsahovat směs jakýchkoli prvků, avšak za účelem přijatelné ceny, dostupnosti materiálu a vhodných finálních parametrů návaru, se nějaké prvky využívají více než jiné. Skupiny návarových materiálů lze rozdělit podle převažujícího prvku. Nejčastěji využívané materiály jsou na bázi kobaltu, niklu nebo železa. Tyto základní prvky jsou smíchány například s chromem, vanadem, wolframem, uhlíkem, ale i bórem, křemíkem a dalšími. Příklady práškových přídavných materiálů jsou uvedeny v tabulkách 2, 3.[12][13][16]

Obecná volba přídavných materiálů se provádí podle řady parametrů, jako je požadovaná tvrdost, odolnost proti opotřebení, pracovní teplota, chemická odolnost, typ legovacích prvků atd.[17]

Tabulka 2 Příklady PM na bázi niklu[18]

Označení	Typ slitiny	Zrnitost [μm]	Tvrdost	C [%]	Ni [%]	Cr [%]	B [%]	Si [%]	Fe [%]	Mo [%]	Ostatní [%]
31.25.10	Alloy 625	-150 +63	200 HV	≤ 0.03	základ	21	-	0.4	1.4	9	Nb 3.5
31.96.10	Alloy C276	-150 +53	210 HV	≤ 0.02	základ	15	-	0.1	3	15.5	W 3.8 Co 2
31.10.10	NiBSi 22 HRC SF	-150 +53	22 HCR	-	základ	-	1.3	2.3	1	-	-

Označení	Typ slitiny	Zrnitost [μm]	Tvrдость	C [%]	Ni [%]	Cr [%]	B [%]	Si [%]	Fe [%]	Mo [%]	Ostatní [%]
10.11.6	NiCrBSi 30 HRC SF	-125 +45	30 HCR	0.15	základ	7	1.25	3.4	3	-	-
10.12.6	NiCrBSi 40 HRC SF	-125 +45	40 HCR	0.25	základ	7.5	1.7	3.5	2.5	-	-
31.14.10	NiCrBSi 50 HRC SF	-150 +53	50 HCR	0.5	základ	14	2.5	3.7	4	-	-
31.15.10	NiCrBSi 60 HRC SF	-150 +53	60 HCR	0.75	základ	14	3.3	4.5	4.5	-	-
10.16.6	NiCrBSi- CuMo	-125 +45	58 HCR	0.5	základ	16	3.5	4.5	3.5	3	Cu 3

Tabulka 3 Příklady PM na bázi železa[18]

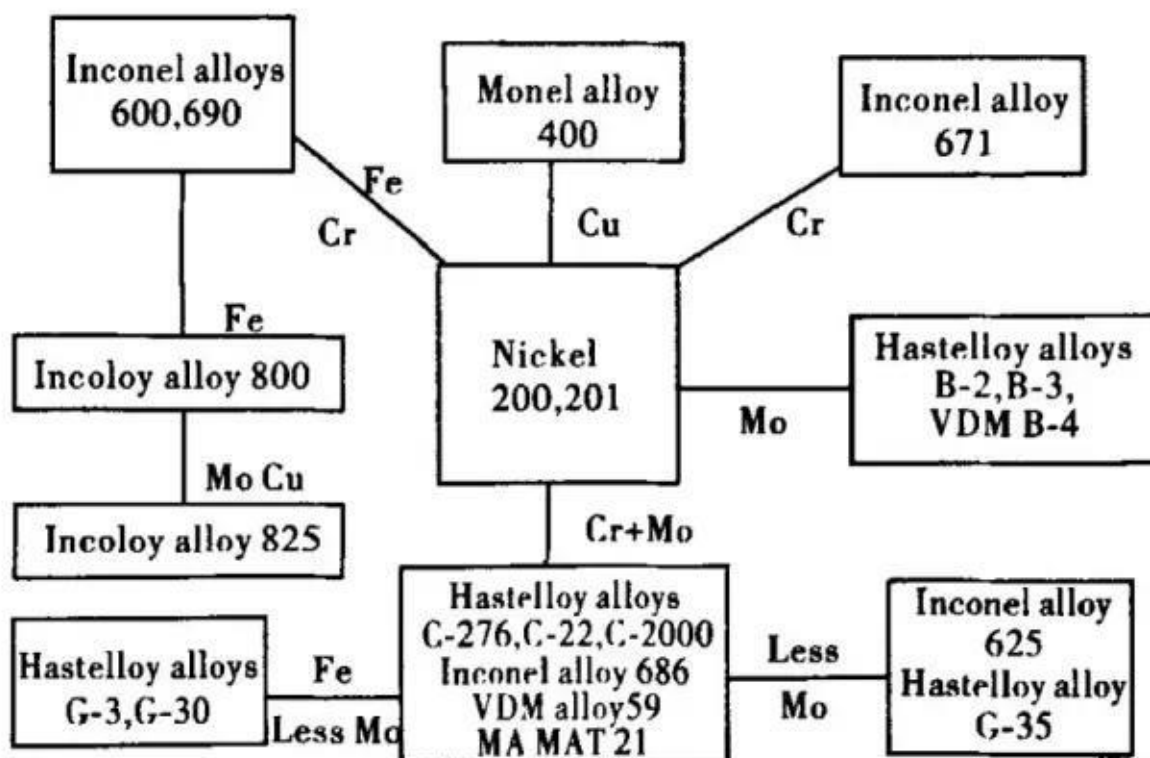
Označení	Typ slitiny	Zrnitost [μm]	Tvrдость	C [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mn [%]	Si [%]	Fe [%]	Mo [%]	Ostatní [%]
31.46.10	AISI 316L	-150 +53	160 HV	≤ 0.03	12	17	1.5	0.8	základ	2.5	-
316 HIC	AISI 316H	-150 +53	190 HV	0.03	12	17	0.2	0.8	základ	2.2	-
31.91.10	AISI 410L	-150 +53	220 HV	≤ 0.03	-	12.5	0.1	0.5	základ	-	-
M2	Nástrojová ocel	-150 +53	63 HCR	1	-	4	0.3	0.3	základ	5	W 6.2 V 2

## 1.4 Nikl a jeho slitiny

Historicky je nikl, latinsky Niccolum, jeden z nejvíce průmyslově využívaných kovových materiálů právě kvůli své univerzálnosti a možnosti být legován většinou ostatních kovových prvků. Velkou část vyrobeného niklu lze nalézt právě ve slitinových a niklových ocelích. Obecně je nikl nákladný feromagnetický prvek bílé barvy, který má velkou tepelnou a korozní odolnost. Je to prvek, který je v přírodě relativně hojně zastoupen. Obsah niklu ve slitinách zajišťuje vyšší tvrdost, pevnost a houževnatost. Při zpracovávání slitin s velkým niklovým obsahem se musí provádět mezioperační ohřevy z důvodu rychlého zpevňování struktury. Mezi tyto slitiny se řadí slitiny s malou délkovou roztažností, magneticky měkké slitiny, slitiny s tvarovou pamětí, odporové a termočlávkové slitiny. Nikl má velké využití převážně v energetice, například u parních turbín - lopatky a hřídele.[19][20]

V přírodě se čistý nikl nevyskytuje, získává se z vyskytujících se směsí s železem ve formě oxidů. Výroba niklu je velice komplikovaný proces a závisí na používané rudě. Konečná fáze výroby redukuje oxid nikelnatý koksem za vzniku elementárního niklu.  $NiO + C \rightarrow Ni + CO$ . [19][21]

Obecně názvy niklových slitin sledují obchodní označení výrobců, kteří je vyvinuli (viz Obr. 9). Například slitiny Ni-Cu se nazývají Monely®. Slitiny Ni-Cr se obecně nazývají Inconely®. Příklady Inconelů® jsou Inconel 600® a Inconel 625®, což jsou slitiny se zvýšenou žáruvzdorností.[22]



Obrázek 9 Rozdělení niklových slitin[22]

### **1.4.1 Monel® slitiny**

Monely®, neboli konstrukční slitiny, jsou niklové slitiny s 30% až 32% obsahem mědi. Využívají se především v potravinářském nebo chemickém průmyslu. Mají vysokou korozivzdornost. Dalšími legujícími prvky jsou křemík, mangan a železo. Kvůli větší pevnosti se dají legovat i hliníkem a mohou dosahovat pevnosti až 1400 MPa. [19][23]

Pro dobrou houževnatost a vyšší pevnost se využívají monely s 2 % berylia, dosahují pevnosti až 1800 MPa. Nevýhodou ale je omezení pracovní teploty, slitiny Ni-Be mají aplikaci pouze do 500 °C. Slitiny niklu a manganu mají za vysokých teplot dobrou korozivzdornost. Slitiny niklu s křemíkem nebo molybdenem se spíše využívají jako slévárenské slitiny, kvůli vhodné odolnosti proti kyselině sírové, solné a chloridům.[19][23]

### **1.4.2 Žáruvzdorné a žárupevné slitiny**

Do žáruvzdorných a žárupevných slitin se řadí slitiny typu Inconel®, Incoloy® a Hastalloy®. Zpracování těchto slitin je velice nákladné z důvodu nutného využití specifických vakuových technologií. U žáruvzdorných slitin se jedná většinou o slitiny niklu s chromem (až 30 %), nebo s železem. Tuhý roztok s krychlovou mřížkou typu FCC a velký obsah chromu zajišťuje právě žáruvzdornost. U žárupevných slitin jsou legující prvky nejčastěji hliník a titan. Jemné precipitáty fáze  $Ni_3(Ti,Al)$  jsou tuhé roztoky titanu v sloučenině  $Ni_3Al$  a udávají žáru-pevnost. Negativně ale ovlivňují tvárnost samotné slitiny.[19][23]

### **1.4.3 Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi**

Mezi slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi se řadí například chromel a almel, které se společně využívají na výrobu termočlánků funkčních do 1000 °C právě kvůli dobré rezistivitě a tepelné vodivosti. Slitiny chromel obsahují 9-12 % chromu. Slitiny almel obsahují cca 94 % niklu a legují se křemíkem, manganem nebo hliníkem. Odporové slitiny s obsahem chromu kolem 20 % se využívají pro výrobu topných těles, například rezistorů a topných článků funkčních do vysokých teplot, až 1150 °C. Požadované vlastnosti těchto slitin jsou zejména velká rezistivita, malý teplotní součinitel rezistivity a stálost vodivostních vlastností za určitých podmínek (vysoké teploty). Magneticky měkké slitiny jsou slitiny niklu a železa (až 65 %) a disponují vysokou permeabilitou, která způsobuje vysoký stínící účinek, například u odstínění nízkofrekvenčních magnetických polí a při výrobě železných jader transformátorů, snímačů proudu a čidel.[19][23]

### **1.4.4 Inconel® slitiny**

Díky jejich odolnosti proti korozi a oxidaci se slitiny Inconel® využívají především v prostředích, kde jsou vystavovány vysokým tlakům a teplotním maximům. Odolnost vůči vysokým teplotám může být dodatečně zvětšena precipitačním vytvrzováním. Slitiny typu inconel jsou slitiny niklu, chromu, případně hliníku, a kvůli vysokoteplotní odolnosti se využívají převážně v průmyslu tepelného zpracování. Slitiny Inconel 600® a 625® disponují



dobrou odolností proti suchým plynům (HCl, Cl<sub>2</sub>). Tyto typy Inconel® slitin se využívají na výrobu vakuových pecí a chloračních zařízení.[24]

Konkrétně slitina Inconel 625® díky svému vysokému obsahu niklu odolává vůči koroznímu praskání, důlkové a štěrbinové korozi, oxidaci, a zároveň obecně vykazuje vysokou pevnost a houževnatost. Inconel 625® má také vysokou tepelnou stabilitu a používá se při pracovních teplotách až 1100 °C. Využívá se i v agresivním prostředí, protože disponuje odolností proti acidické atmosféře. Slitiny typu inconel se vyznačují také dobrou svařitelností. Slitina je legována prvky jako je chlór, molybden, uhlík nebo niob.[25][26]

Právě kvůli uvedeným vlastnostem se slitina rozsáhle využívá v průmyslu chemických procesů obsahujících chloridy, obecně v kyselém prostředí (zařízení a součásti používané při výrobě prostředí s kyselým plynem, reakční generátor kyseliny octové a acetanhydridu, kondenzátory kyseliny sírové). Slitina má velké využití i v námořním, papírenském a leteckém průmyslu. Vyrábí se z ní i součásti reaktorů, například komponenty jader a regulační tyče.[25][27]

Součásti vyráběné z této slitiny mají většinou složitý tvar, proto se z ekonomického důvodu tato slitina nezpracovává konvenčními subtraktivními metodami. Obráběcí metody by byly technologicky a časově náročné a finančně nákladné. Tato slitina se primárně zpracovává do výrobků metodami aditivními (metodou Laser rapid manufacturing), nebo navařováním pomocí plazmatu.[26][27]

Skvělá korozivzdornost a odolnost proti oxidaci je způsobena zastoupením niklu a chromu v slitině. Dobrá pevnost a houževnatost je dána obsahem niobu a molybdenu v nikl-chromové matici slitiny Inconel 625® (viz. Tab. 4). Molybden zvyšuje odolnost proti štěrbinové korozi a niob zamezuje nadměrnému rozpínání součásti při jejím ohřevu, například u svařování. Legující prvky mají dopad i na ostatní mechanické vlastnosti (viz Tab. 5, Obr. 10)[25][27]

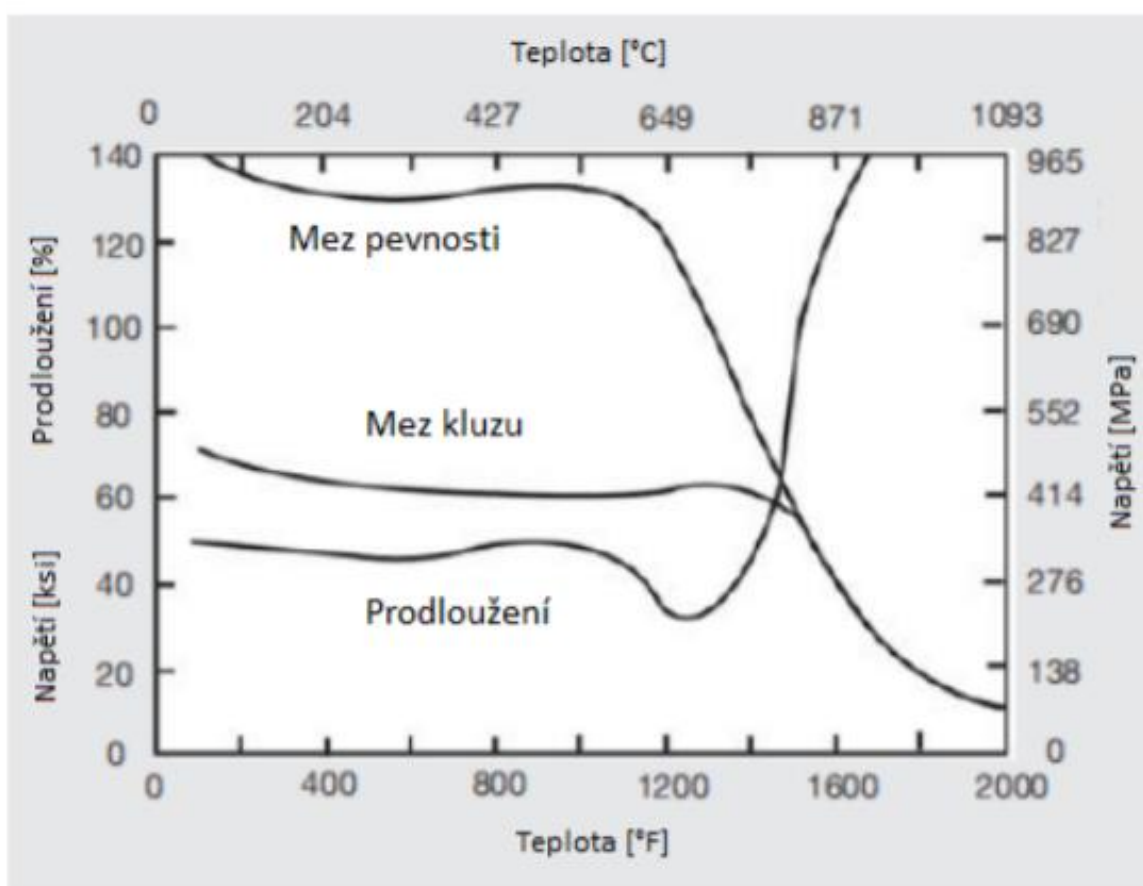
*Tabulka 4 Chemické složení slitiny Inconel 625®[28]*

Označení	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	Nb [%]	Fe [%]	C [%]	Ti [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	P [%]
<b>Inconel 625®</b>	min. 58	20 - 23	3.15 - 4.15	max. 5	max. 0.1	max. 0.4	max. 0.4	max. 0.5	max. 0.5	max. 0.015	max. 0.015

*Tabulka 5 Mechanické vlastnosti Inconelu 625® [28]*

Mechanické vlastnosti	Inconel 625®
<b>Hustota [g.cm<sup>-1</sup>]</b>	8.44
<b>Teplota tání [°C]</b>	1290

Mechanické vlastnosti	Inconel 625®
Pevnost v tahu [MPa]	760
min. Výnosová síla [MPa]	345
Prodloužení [%]	25
min. Tvrdost [HB]	220



Obrázek 10 Tahové vlastnosti slitiny Inconel 625®[29]

## 1.5 Karbid boru

Karbid boru ( $B_4C$ ), je třetím nejtvrdším materiálem hned po diamantu a kubickém nitridu boru (CBN)(viz Tab. 7). Je to synteticky vyráběná krystalická sloučenina boru a uhlíku a díky své vysoké tvrdosti se využívá k výrobě abrazivních a otěruvzdorných součástí, nebo jako brusivo v práškové formě. Vzhledem ke své nízké hustotě našel využití v kombinaci s hliníkem

ve zbrojařském průmyslu, a to ve výrobě neprůstřelných vest a štítů vojenských vozidel. Využívá se také hojně v jaderné energetice, má totiž schopnost, jako jeden z mála známých materiálů, částečně pohlcovat a odrážet radiální záření. Ve formě prášku se využívá k regulaci rychlosti štěpení v jaderných reaktorech.[30][31]

Velkou nevýhodou B<sub>4</sub>C je jeho nízká oxidační teplota, která se pohybuje kolem 400 - 500 °C. Takto nízká hranice oxidační teploty neumožňuje karbidu boru odolávat zahřívání při broušení ocelí s lepšími mechanickými vlastnostmi, např. nástrojových a kalených ocelí.[31]

Karbid boru se vyrábí redukcí oxidu boru s uhlíkem za vysokých teplot. Po reakci se prášek lisuje za teploty vyšší než 2000 °C za účelem výroby pevné součásti.[31]

*Tabulka 6 Příklad chemického složení dodávaného prášku B<sub>4</sub>C[32]*

Chemické složení	B [%]	C [%]	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Fe [%]
B <sub>4</sub> C	76	23	0.5	0.2

Právě díky velké tvrdosti je B<sub>4</sub>C velmi špatně zpracovatelný materiál. Konvenčními metodami subtraktivní technologie nelze karbid boru efektivně zpracovat. Nejpoužívanějším druhem zpracování je slinování B<sub>4</sub>C ve formě prášku. Volně dostupný prášek B<sub>4</sub>C však nikdy není 100% čistý (viz Tab. 6). Slinování je proces výroby z materiálů ve formě prášků. Prášek se zahřeje na teplotu blízké teplotě tání, což zapříčiní sloučení struktury v celek. B<sub>4</sub>C se při slinování zahřívá lehce pod teplotu tavení (viz Tab. 8).[30][31]

*Tabulka 7 Mechanické vlastnosti B<sub>4</sub>C[32]*

Vlastnosti mechanické	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Lomová houževnatost [MPa.m <sup>-2</sup> ]	Tvrhost [HM]
B <sub>4</sub> C	450 - 470	480	0.17	3 - 3.7	9.36

*Tabulka 8 Fyzikální vlastnosti B<sub>4</sub>C[32]*

Vlastnosti fyzikální	Hustota [g.cm <sup>-3</sup> ]	Teplota tavení [°C]	Teplotní součinitel roztažnosti [1.K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivost [W.(m.K) <sup>-1</sup> ]	Měrný odpor [Ω.cm]
B <sub>4</sub> C	2.51	2450	5.10 <sup>-6</sup>	30 - 42	0.14

## 2 Experimentální část

Praktická část práce spočívala v plazmovém navaření několikvrstvého povlaku na základní materiál a vyhodnocení jeho základních vlastností. Velký důraz byl kladen na zvolení vhodných a efektivních navařovacích parametrů - proudu, frekvence, rychlosti pohybu hořáku a množství podávaného prášku. Hlavní rozdíl ve studovaných vzorcích je v chemickém složení přidaného povlaku a to v procentuálním zastoupení karbidu boru v poměru s využívanou slitinou typu inconel 625 – Nibasit 625® (Deutsche Edelstahlwerke (DEW), Německo) (viz Tab. 9).

*Tabulka 9 Chemické složení Nibasitu 625® [33]*

Chemické složení	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	Fe [%]	Nb [%]	Si [%]	Mn [%]	C [%]
Nibasit 625®	základ	22	9	4	3.6	< 0.5	< 0.5	< 0.05

### 2.1 Využitá zařízení

#### 2.1.1 Navařovací automat PPC 250 R6

Při navařování povlaků byl využit navařovací automat PPC 250 R6 (KSK, s.r.o. Česká Třebová) (viz Obr. 11). Společnost KSK, s r.o. Česká Třebová se specializuje na výrobu automatických navařovacích zařízení, spočívajících převážně ve vykonávání návarů pod tavidlem a pomocí plazmatu a v ochranných atmosférách. Automaty jsou vyráběny zakázkově podle typu přídavného materiálu a podle potřebných rozměrů a složitostí navařované součásti. Ideální navařená povrchová úprava vykazuje antikorozi a žáruvzdorné vlastnosti. Stroje typu PPC 250 jsou určeny k navařování pomocí metody PTA s práškem.



*Obrázek 11 Navařovací automat PPC 250 R6*

Plazmové navařovací automaty řady PPC 250 R jsou určeny především na navařování rotačních součástí z čela nebo po jejich obvodu. Značení R6 definuje možnosti polohování jak hořáku, tak stolu. Lze tedy navařovat šesti způsoby - za využití polohování hořáku po osách X, Y, Z, N a polohování stolu po osách C, R. Řídit stroje můžeme manuálně pomocí funkce „Tech-in“ nebo pomocí již přednastavených režimů ovládání. Další parametry jsou popsány v Tabulce 10.

*Tabulka 10 Parametry automatu PPC 250 R6*

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
<b>Proud pulzního navařování [A]</b>	50 - 250
<b>Frekvence [Hz]</b>	0 - 200
<b>Průměr stolu [mm]</b>	300
<b>Nosnost stolu [kg]</b>	70
<b>Celkové rozměry [mm]</b>	1770 x 1700 x 2185
<b>Celková váha [kg]</b>	1100

Stroj PPC 250 R6 se skládá z těchto částí:

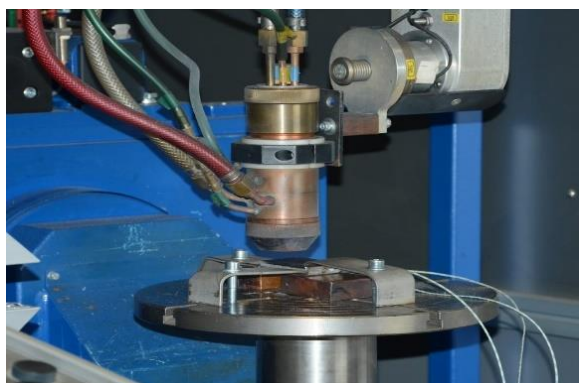
### ***System řízení***



*Obrázek 12 Řídicí systém PPC 250 R6*

Řídicí systém se skládá z ovládacího panelu, dálkového ovladače, dotykového monitoru a měrek na znázornění průtoku plynů (viz Obr. 12). Měrka označená žlutě znázorňuje plazmový plyn, měrka označená zeleně znázorňuje plyn ochranný a měrky označené číslem znázorňují průtok podávacích plynů jednotlivých prášků. Na klimatizovaném boxu, v kterém je umístěna elektroinstalace, se nachází bezpečnostní tlačítko k ukončení činnosti.

### ***Hořák***



*Obrázek 13 Hořák PPC 250 R6*

Měděné tělo hořáku (viz Obr. 13) zastupuje při zapálení pilotního oblouku funkci anody a wolframová elektroda zastupuje funkci katody. Hořák i elektroda jsou během navařování chlazeny vodou. Hořák se pohybuje za pomoci servo motorů. Maximální možný rozsah manipulace je znázorněn v Tabulce 11.

*Tabulka 11 Rozsah polohování hořáku PPC 250 R6*

<b>X [mm]</b>	<b>Y [mm]</b>	<b>Z [mm]</b>	<b>N [°]</b>
490	260	260	40

## ***System podávání prášku***



System podávání (viz Obr. 14) využívá toku podávacího plynu (Argon + 30 % Helium) k přísunu nastaveného množství přidavného materiálu – prášku. Samotný podavač má kapacitu 10 kg. Stroj, využívaný během experimentální části, disponoval dvěma podavači. Jako ideální forma přidavného materiálu se doporučuje prášek kuličkového tvaru a velikosti 50 - 200  $\mu\text{m}$ .

*Obrázek 14 Podavač PPC 250 R6*

### **2.1.2 Univerzální měřicí ústředna Almemo 5690-2**

Tato měřicí ústředna (viz Obr. 15) slouží k zaznamenání teplotního ovlivnění základního materiálu v určitých bodech během navařování. Navařené termočlánky snímají teplotní výkyvy, data se zaznamenávají, a pomocí ústředny ukládají na MMC - kartu ve formátu FAT16. Almemo 5690-2 disponuje až 20 vstupy. K programování ústředny a snímačů lze využít manuální ovládání funkcí a parametrů nebo software AMR-Control. Almemo 5690-2 využívá A/D převodník Delta-Sigma, díky kterému vykazuje přesné měření při rychlostech až 100 měření za vteřinu.



*Obrázek 15 Univerzální měřicí ústředna Almemo 5690-2*

### 2.1.3 Metalografický lis Citopress -1



Metalografický lis Citopress -1 od společnosti Struers (viz Obr. 16) slouží k zapékání a zalisování částí vzorků za tepla. Je to plně automatický elektro-hydraulický stroj o průměru válce 40 mm. U tohoto jednokomorového zařízení lze zvolit až tři druhy chlazení. Vyznačuje se velmi krátkou dobou zapékání – včetně chlazení necelých 5 minut. Vzorky se zapékají do pryskyřice. Společnost Struers nabízí velkou škálu pryskyřic. Čiré nebo barevné, s výborným zachováním hran, s elektrickou vodivostí, nebo pryskyřice v formě tablet pro sériové zalévání.

Obrázek 16 Metalografický lis Citopress -1 Pro zpracování vzorků této praktické části byly využity pryskyřice „MultiFast black“ a „ClaroFast transparent“.

### 2.1.4 Bruska a leštička Buehler Beta



Při odřezávání vzorku dochází k poškození materiálu na povrchu. Poškozená vrstva se pomocí broušení odstraní. Dále odstranění rysek probíhá při operaci leštění. Při leštění již nedochází k úbytku materiálu. K těmto procesům byla využita bruska a leštička Buehler Beta (viz Obr. 17). Jedná se o poloautomatický stroj s hlavou na čtyři vzorky o průměru 40 mm. Otáčky kotouče lze měnit, a to v rozmezí 50 - 500 ot.min<sup>-1</sup>. Otáčení hlavy lze nastavit v rozmezí 30 - 200 ot.min<sup>-1</sup>. V tomto stroji se využívají brusné papíry SiC a to v rozmezí zrnitosti 200 - 5 μm.

Obrázek 17 Bruska a leštička Buehler Beta



## 2.1.5 Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104



Obrázek 18 Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104

Buehler IndentaMet 1104 je poloautomatický tvrdoměr, který disponuje až třemi objektivy a dvěma indentory (viz Obr. 18). Tento stroj využívá nitkový odečítací systém k automatickému změření úhlopříček vtisku a k výpočtu příslušné hodnoty tvrdosti. Tento tvrdoměr, dle tvaru indentoru, může měřit tvrdosti HV, HRC, HK. Pro účely předkládané práce byl využit indentor o tvaru čtyřbokého jehlanu s úhlem skosení  $136^\circ$ , tedy měření na stupnici podle Vickerse. Před měřením se nastaví síla vtisku a doba, po kterou indentor silou působí na vzorek. Hodnoty úhlopříček se pak automaticky dosadí do vzorce  $HV = 0,189 \cdot (F \cdot d^{-2})$ . V tomto případě byla nastavena zátěž 1kg, odpovídající značení dle Vickerse HV1, působící po dobu 12 s.

## 2.1.6 Mikroskop Zeiss Axio Observer D1M

Jedná se o světelný inverzní mikroskop, kde jsou objektivy umístěny pod zkoumaným vzorkem. Je určen k pozorování a fotodokumentaci mikrostruktury materiálů z metalografických výbrusů (viz Obr. 19). Mikroskop disponuje zvětšením 100x - 1000x. Umožňuje zkoumání struktur i pod lineárně polarizovaným světlem.



Obrázek 19 Mikroskop Zeiss Axio Observer D1M

## 2.2 Postup navařování

U zahájení experimentální části bylo zprvu nutné určit vhodné parametry navařování. Během celého experimentu se nastavovalo jedenáct parametrů přímo na stroji. V procesu navařování se využilo u všech vzorků stejných procesních plynů. Jako ochranný plyn byl použit Argon 4.8 (99.998 % Ar) a jako plazmový a zároveň podávací plyn byla využita směs Argonu a Héliu (Ar + 30 % He). Zkušební vzorky základního materiálu byly stejně velké, a to 90x50x15 mm. Provedl se jeden zkušební návar ve formě jedné vrstvy s vybranými parametry (viz Tab. 12). Parametry byly zvoleny na základě předešlé zkušenosti s navařováním Nibasitu 625® na navařovacím automatu PPC 250 R6. Zkouška parametrů proběhla při rozkyvu.

Tabulka 12 Parametry zkušebního návaru

Vrstva	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min <sup>-1</sup> ]	Lin. Rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Šířka pendlu [mm]	Rychlost pendlu [mm.s <sup>-1</sup> ]	Pauza N/P [s]	B <sub>4</sub> C [%]
1	125	45	5	19.47	0.68	27	12	0.1	30

IH = proud horní

IL = proud dolní

Frekvence = při jaké frekvenci dochází k změně proudu

Rychlost podávání = rychlost hmotnostního průtoku přídavného prášku

Lineární rychlost = rychlost posuvu hořáku

Šířka pendlu = šířka rozkyvu

Rychlost pendlu = rychlost rozkyvu

Pauza (negativ / pozitiv) = doba udržení v krajní poloze rozkyvu

B<sub>4</sub>C = procentuální zastoupení karbidu boru v návaru

Po vizuální kontrole byl zaznamenán nedostatečně prohřátý základní materiál a obecně studený návar. Nedostatek přídavného materiálu v prostředku návarové vrstvy nekorespondoval s požadavkem zachování stejné geometrie napříč vrstvou. Parametry byly tedy upraveny zvýšením použitého proudu a upravením charakteristik rozkyvu.

Cílem bylo navařit na vzorek třívrstvý povlak horizontálním rozkyvem. Vrstvy se navařovaly postupně. Po každé navařené vrstvě se dosavadní návar nechal vzdušně zchladit na teplotu kolem 300 °C. Reálné parametry (viz Tab. 13) se upravovaly v průběhu navařování na základě vizuálních indikací průběhu návaru.

Tabulka 13 Reálné parametry návarů

Vrstva	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min <sup>-1</sup> ]	Lin. rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Šířka pendlu [mm]	Rychlost pendlu [mm.s <sup>-1</sup> ]	Pauza N/P [s]	B <sub>4</sub> C [%]
1	110	45	5	16.87	0.68	27	18	0	0
	-	-		-					-
	140	50		22.16					30

Před upevňováním vzorku do komory navařovacího automatu byly na základní materiál navařeny tři termočlánky na snímání průběhu teploty během procesu navařování. Termočlánek 1 z pravé části ZM, 2 na spodní ploše ZM, 3 na ploše směřující k pozorovateli.

## 2.3 Výsledky a diskuse

### 2.4 Vzorek č.1

#### 2.4.1 Zvolené parametry

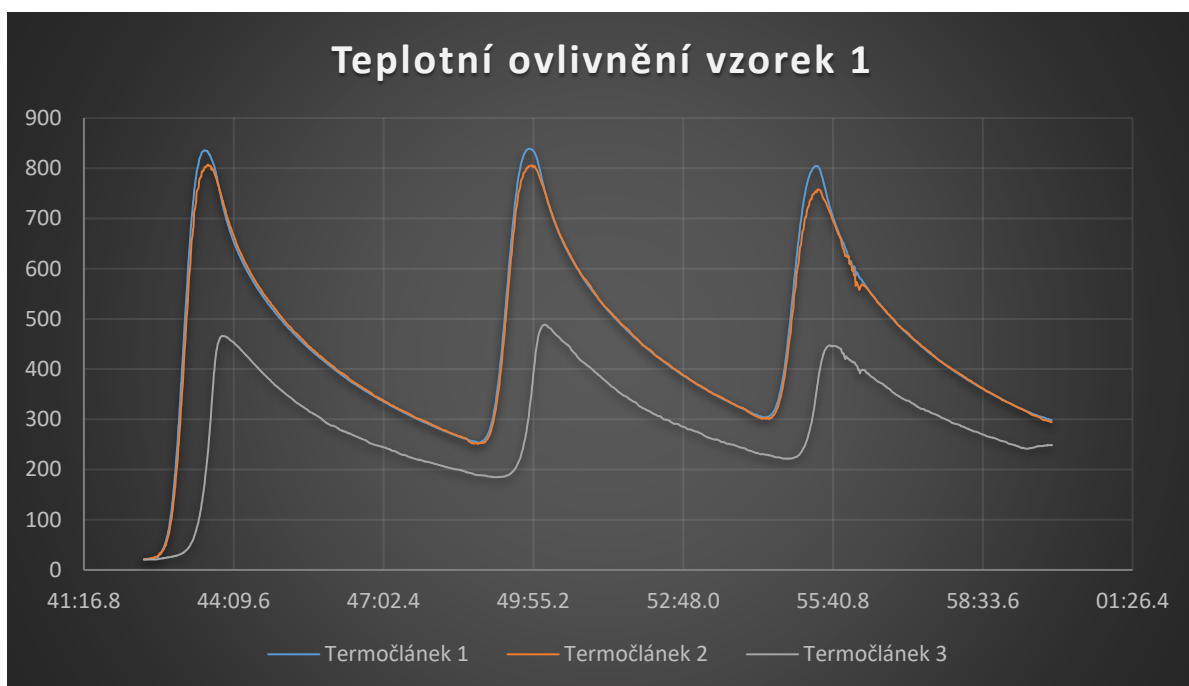
Parametry navařování prvního vzorku odpovídají parametrům z Tabulky 14. Vzorek byl upevněn a měděné podložce navařovacího automatu tak, že trajektorie hořáku začínala v poloze X = -165.7 Y = 53.3 Z = 40. U prvního vzorku byl kladen důraz na držení se v rozmezí předem stanovených parametrů. Během navařování první vrstvy bylo vidět, že dochází k vysokému prohřátí, z toho důvodu bylo třeba ubrat přidávaného množství tepla. Proto se tedy v průběhu zhotovení vrstev měnil poměr horního a dolního proudu. Po vizuální kontrole druhá vrstva dosáhla požadovaného natavení přidávaného materiálu. U třetí vrstvy se navařovací proud také ubíral, díky předehtí přechází vrstvy.

Tabulka 14 Navařovací parametry vzorku č. 1

Vrstva	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min <sup>-1</sup> ]	Lin. rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Šířka pendlu [mm]	Rychlost pendlu [mm.s <sup>-1</sup> ]	Pauza N/P [s]	B <sub>4</sub> C [%]
1	120	50	5	16.87	0.68	27	18	0	<b>30</b>
	-								
	140								
2	110	50	5	18.17	0.68	27	18	0	<b>30</b>

Vrstva	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min <sup>-1</sup> ]	Lin. rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Šířka pendlu [mm]	Rychlost pendlu [mm.s <sup>-1</sup> ]	Pauza N/P [s]	B <sub>4</sub> C [%]
3	100 - 120	45	5	18.17	0.68	27	18	0	30

## 2.4.2 Tepelné ovlivnění

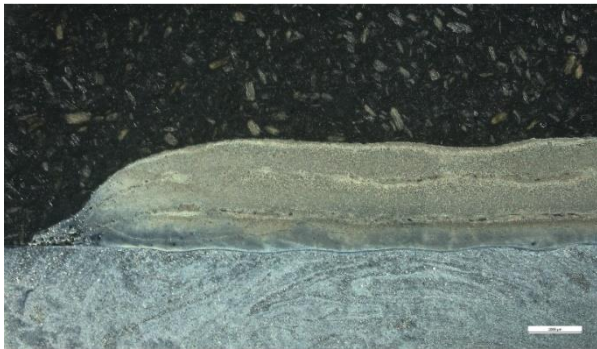


Graf 1 Tepelné ovlivnění vzorku č. 1

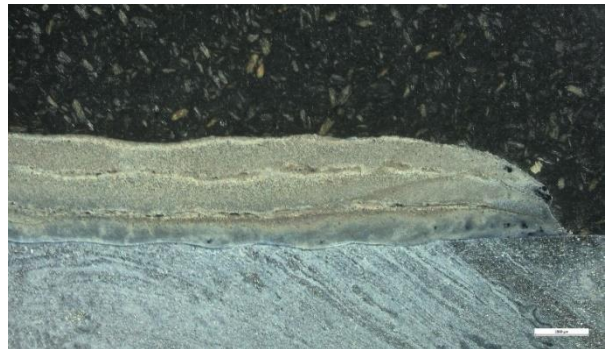
Průběh teplot na termočláncích prvního vzorku (viz Graf 1) ukazuje nárůst teploty během navařování tří vrstev. První termočlánek, v grafu značený jako Termočlánek 1, byl umístěn z boku základního materiálu. Byl v těsné blízkosti návaru po celou dobu procesu, proto jako první zaznamenal změnu teplot a také dosahuje nejvyšších hodnot, až 835 °C. Druhý termočlánek byl umístěn na opačné straně navařové plochy. Tento termočlánek nedosahuje takových teplotních maxim z důvodu delší doby prohřátí skrz celý vzorek. Třetí termočlánek byl umístěn nejdále od počátečního bodu návaru. Tomu odpovídá i pozdní zaznamenání změny teploty. Termočlánek 3 byl po většinu doby procesu umístěn nejdál od zapáleného oblouku a křivka odpovídá předpokladům.

Maximální dosažené teplotní ovlivnění materiálu má tendenci klesat v čase (nikdy opět nedosáhne dosaženého maxima 835 °C). Je to dáno vrstvením struktury a postupným vzdalováním se od místa umístění termočláneku. Postupné zvětšování výšky návaru umožňuje uchovávat větší množství tepla ve vrstvách. Finální návar dosahoval výšky 3.1 mm.

Finální křivky Grafu 1 odpovídají teoretickému předpokladu teplotnímu ovlivnění materiálu.



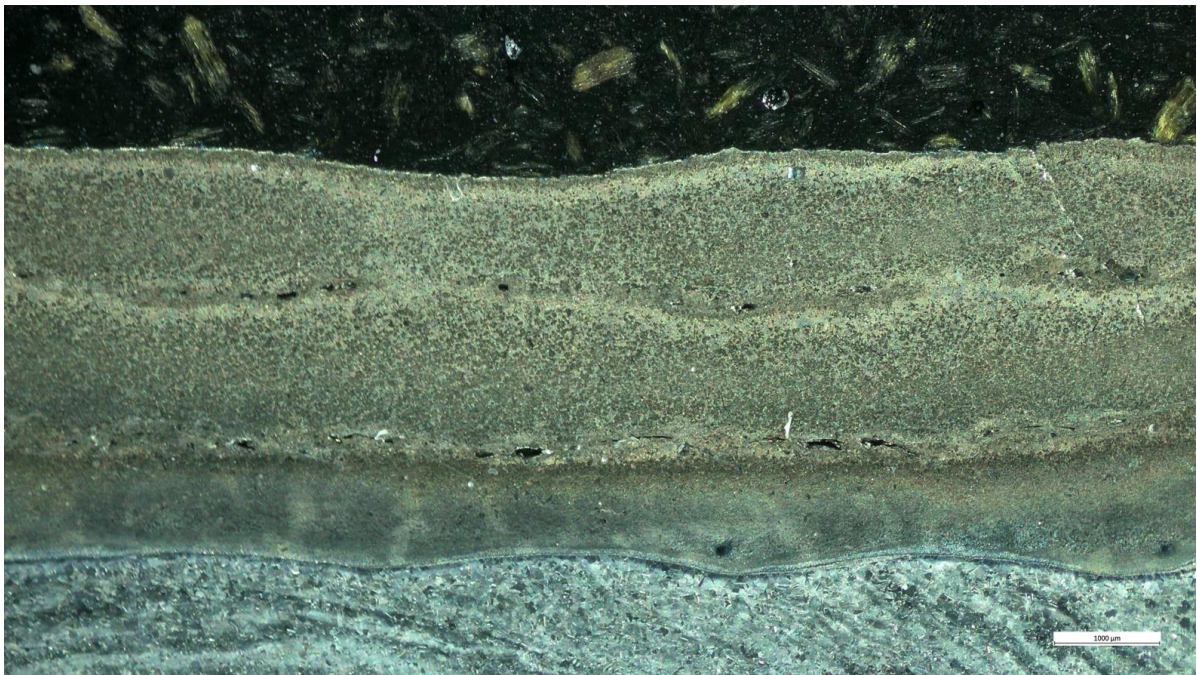
*Obrázek 20 Makrostruktura vzorku č. 1(L)*



*Obrázek 21 Makrostruktura vzorku č. 1(P)*

### 2.4.3 Makrostruktura

Na makrostruktře řezu vzorku č. 1 (viz Obr. 20, 21) po návaru je vidět, že pravděpodobně došlo k minimálnímu provaření základního materiálu. Přílnavost první vrstvy k základnímu materiálu je však dobrá, nízké provaření základního materiálu tedy není na závadu.



*Obrázek 22 Makrostruktura vzorku č. 1*

Po větším přiblížení je vidět nedokonalá adheze mezi vrstvami (viz Obr. 22). Mohla být způsobena nedostatečným provařením materiálu, tedy dlouhou dobou chladnutí mezi vrstvami. Na stejném obrázku lze taktéž vypořadovat větší zastoupení struktury karbidu boru na vrchu první vrstvy. Při návaru první vrstvy mohlo dojít k nepravidelnému promíchání přídavných materiálů. Další příčinou je i nižší hustota karbidu v porovnání s Nibasitem 625®, díky které

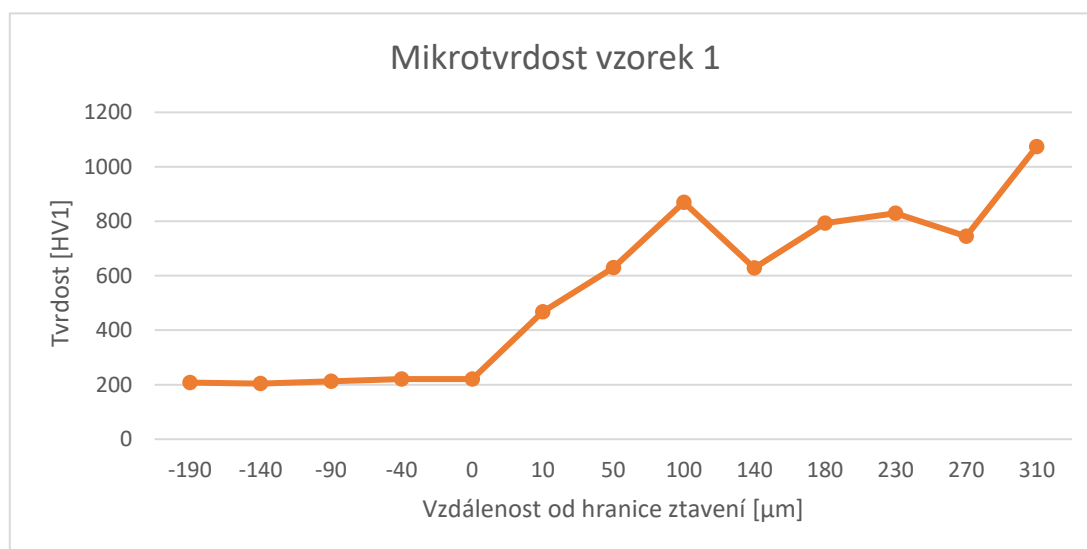
se dostal na povrch svarové lázně, a tedy i na povrch návarové vrstvy. Ve zbylých vrstvách se ale přídavné materiály promíchaly vcelku dobře.

## 2.4.4 Mikrotvrdot

Zkouška mikrotvrdoti podle Vickerse probíhala vytvořením celkem 12 vtisků čtyřbokým jehlanovým diamantovým indentorem ve vzdálenostech 0,5 mm. První čtyři vtisky byly provedeny do základního materiálu, zbylých osm vtisků bylo vedeno skrz celý návar. Mikrotvrdot se pohybovala v rozmezí 203 - 1075 HV1. Hodnota mikrotvrdoti vysoce vzrostla při měření směrem k horní straně navařené vrstvy. Příčinou může být již zmiňované vyplavení karbidu boru na povrch svarové lázně před zatuhnutím. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v Tabulce 15 a v Grafu 2.

Tabulka 15 Mikrotvrdot vzorku č. 1

Měření:	ZM 1.	ZM 2.	ZM 3.	ZM 4.	PM 1.	PM 2.	PM 3.	PM 4.	PM 5.	PM 6.	PM 7.	PM 8.
<b>Tvrdot (v. 1) [HV1]</b>	208	204	213	221	467	630	869	628	793	829	745	1074



Graf 2 Mikrotvrdot vzorku č. 1

## 2.5 Vzorky č. 2, 3, 4

### 2.5.1 Zvolené parametry

Vzorky č. 2, 3, 4 byly navařeny obdobně jako vzorek č. 1. V poměru těchto vzorků se vzorkem č.1 byl jediný rozdíl v navařovacích parametrech první vrstvy a to pouze v horním proudu. Lineární rychlost a rychlost rozkvyvu byla ponechána. Hodnota horního proudu byla u vzorku č. 2 na základě zkušeností ze vzorku č. 1 snížena. Navařování druhého vzorku proběhlo po neúplném vychladnutí základní podložky automatu, měděná podložka měla tedy 60 °C, a proto byl zvolen menší horní proud než u zbylých dvou vzorků. Změna parametrů (viz Tab. 16, 17) ovlivnila průběh teploty základního materiálu.

*Tabulka 16 Navařovací parametry vzorku č. 2*

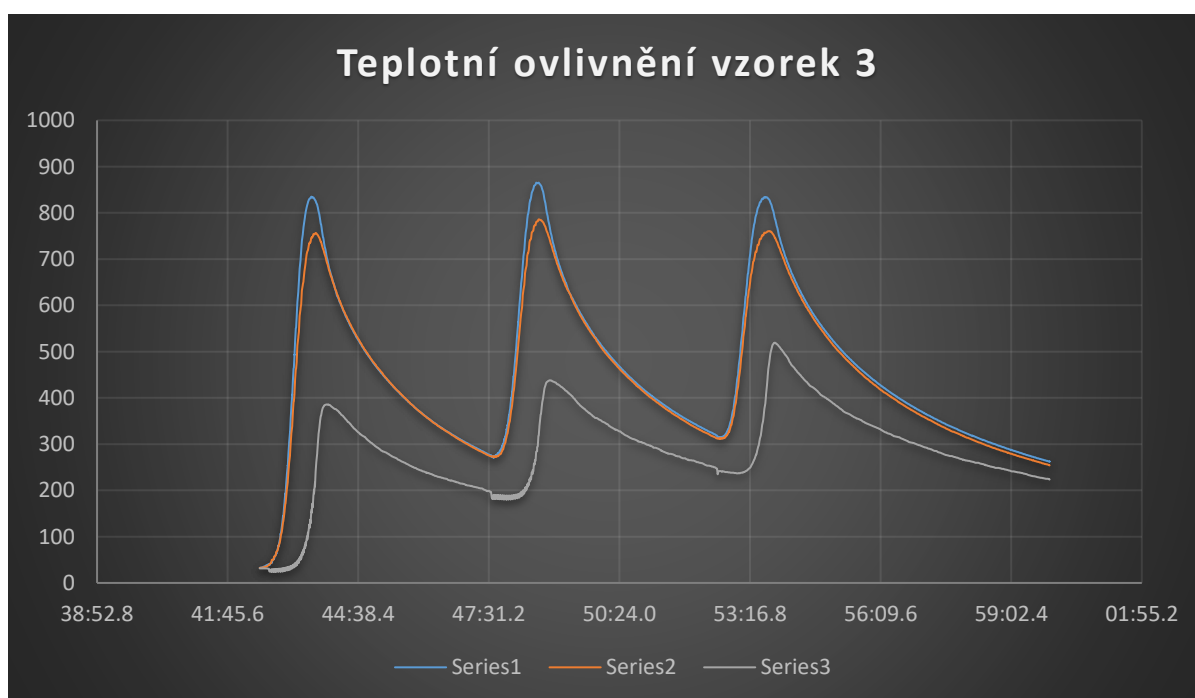
Vrstva	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min <sup>-1</sup> ]	Lin. rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Šířka pendlu [mm]	Rychlost pendlu [mm.s <sup>-1</sup> ]	Pauza N/P [s]	B <sub>4</sub> C [%]
1	120	50	5	16.87	0.68	27	18	0	30
2	110	50	5	18.17	0.68	27	18	0	30
3	100 - 120	45	5	18.17	0.68	27	18	0	30

*Tabulka 17 Navařovací parametry vzorku č. 3, 4*

Vrstva	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min <sup>-1</sup> ]	Lin. rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Šířka pendlu [mm]	Rychlost pendlu [mm.s <sup>-1</sup> ]	Pauza N/P [s]	B <sub>4</sub> C [%]
1	130	50	5	16.87	0.68	27	18	0	30
2	110	50	5	18.17	0.68	27	18	0	30

Vrstva	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min <sup>-1</sup> ]	Lin. rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Šířka pendlu [mm]	Rychlost pendlu [mm.s <sup>-1</sup> ]	Pauza N/P [s]	B <sub>4</sub> C [%]
3	100 - 120	45	5	18.17	0.68	27	18	0	30

## 2.5.2 Tepelné ovlivnění



*Graf 3 Tepelné ovlivnění vzorku č. 3*

Tepelné ovlivnění ZM (viz Graf 3) je pro všechny tři vzorky obdobné. Pouze u vzorku 2 termočlánek č. 3 začíná snímání na 60 °C právě kvůli zmíněnému nedochladnutí základní měděné desky navařovacího stroje. Během vizuální kontroly návaru nebyl zaznamenán žádný negativní průběh. U všech tří vzorků na každém termočlátku se dosažená teplotní maxima lišila pouze o jednotky stupně, okolo 828 °C. Ve srovnání se vzorkem 1 tato sada vzorků nedosahuje takových teplotních maxim na termočlátku 2 a 3. Ubrání horního proudu v první návarové vrstvě zapříčinilo, že se na termočlátku 2 teplotní vrchol liší až o 70 °C. Menší časové prodlevy mezi vrstvami zapříčinily odlišnost teplotního maxima snímaného termočlátkem 3 až o 75 °C.



### 2.5.3 Makrostruktura

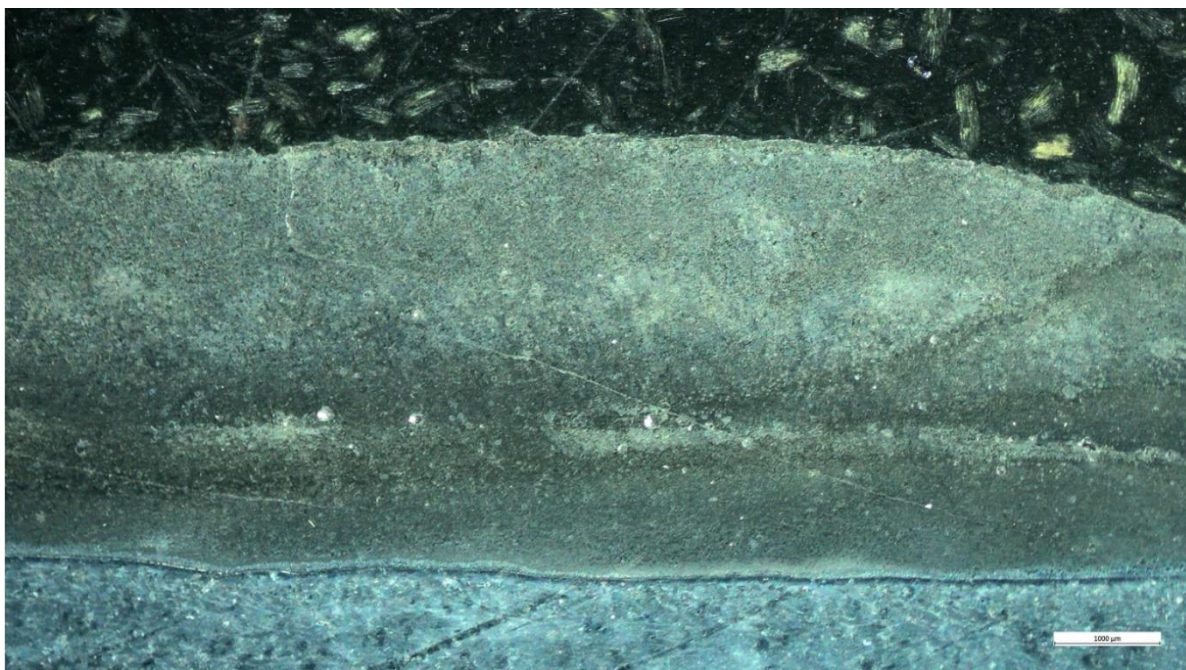


Obrázek 23 Makrostruktura vzorku č. 2(L)



Obrázek 24 Makrostruktura vzorku č. 2(P)

Při zkoumání makrostruktury vzorku č. 2 (viz Obr. 23, 24) je vidět, že opět nedošlo k velkému natavení základního materiálu, tento poznatek je faktem ve finálních snímcích makrostruktur u všech navařených vzorků. I přes viditelné nízké provaření materiálu je přídatný materiál se základním metalurgicky spojen, stejně jako u vzorku prvního. I zde jde vidět nedokonalá adheze mezi první a druhou vrstvou, spojení u vrstev 2 a 3 je značně lepší. Na tomto vzorku lze vidět i lepší promíšení přídatných materiálů. Na rozdíl od prvního vzorku není uskupení karbidu boru na vrchu první vrstvy tak značné. To by mohlo být způsobeno menším ohřevem tavné lázně, tudíž menší možností karbidu boru vyplavat na povrch.



Obrázek 25 Makrostruktura vzorku č. 2

Při větším zvětšení (viz Obr. 25) lze vidět, že se v návaru nevyskytují trhliny. V návaru se vyskytují mírné nehomogenity rozložení karbidu boru.



Obrázek 27 Makrostruktura vzorku č. 3(L)



Obrázek 26 Makrostruktura vzorku č. 3(P)

Vzorek č. 3 je charakteristický nejlepším propojením jednotlivých vrstev a homogenním rozložením materiálu (viz Obr. 26, 27). V pravé části metalografického výbrusu lze vidět trhlinu, která může být způsobena teplotními změnami a nehomogenitou návarových vrstev.



Obrázek 29 Makrostruktura vzorku č. 4(L)



Obrázek 28 Makrostruktura vzorku č. 4(P)

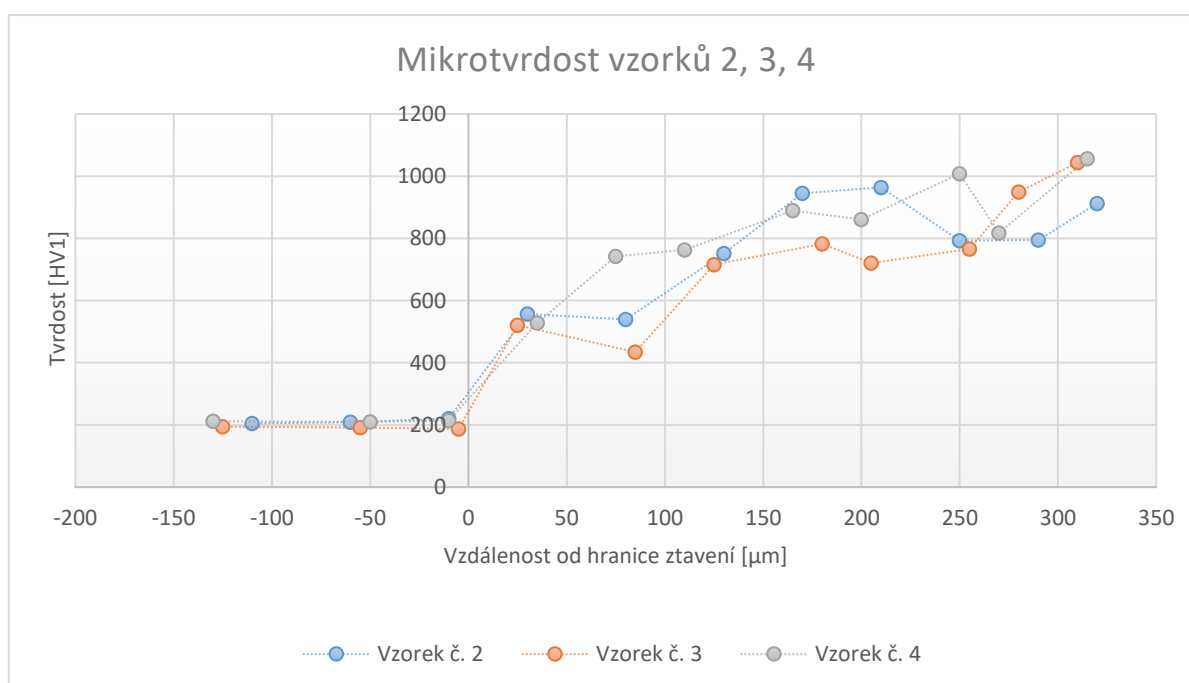
Jediným rozdílem navařování vzorků 3 a 4 byla doba chladnutí mezi jednotlivými vrstvami. Vzorek č. 4 byl ponechán chladnout na nižší teplotu (až o 50 °C při navařování druhé vrstvy a až o 100 °C při navařování třetí). V tomto návaru se nevyskytují žádné trhliny a vrstvy jsou propojené (viz Obr. 28, 29). Je zde však na několika místech vidět výrazné nechtěné uskupení struktury s větší hustotou karbidu boru. U všech tří vzorků je patrná geometrická nesouměrnost jednotlivých vrstev, dochází k propadu v blízkosti osy návaru.

#### 2.5.4 Mikrotvrdość

Měření mikrotvrdości u těchto vzorků probíhalo obdobně jako u vzorku 1. Rozdílem byl počet vtisků. Do základního materiálu byly udělány tři vtisky. Zátěž a doba indentace byla zachována. Mikrotvrdoční zkouška dle Vickerse zaznamenala podobné výsledky jako u prvního měření. Výsledky jsou zaznamenány v Tabulce 18 a v Grafu 4.

Tabulka 18 Mikrotvrдост vzorku č. 2, 3, 4

Měření:	ZM 1.	ZM 2.	ZM 3.	PM 1.	PM 2.	PM 3.	PM 4.	PM 5.	PM 6.	PM 7.	PM 8.
<b>Tvrđost (v. 2) [HV1]</b>	205	209	220	557	539	752	945	964	793	795	912
<b>Tvrđost (v. 3) [HV1]</b>	195	192	187	521	434	716	782	721	766	949	1044
<b>Tvrđost (v. 4) [HV1]</b>	212	210	214	528	742	763	890	861	1008	817	1056



Graf 4 Mikrotvrđost vzorku č. 2, 3, 4

## 2.6 Vzorky č. 5, 6

### 2.6.1 Zvolené parametry

K porovnání mechanických vlastností byly navařeny také dva vzorky s 15% zastoupením karbidu boru ve struktuře. Na základě průběhu navařování předchozích vzorků nebyly provedeny změny v nastavených parametrech u vzorku č. 5. Průtoky procesních plynů taktéž zůstaly zachovány. Využité parametry jsou zaznamenány v Tabulce 19.

Tabulka 19 Navařovací parametry vzorku č. 5

Vrstva	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min <sup>-1</sup> ]	Lin. Rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Šířka pendlu [mm]	Rychlost pendlu [mm.s <sup>-1</sup> ]	Pauza N/P [s]	B <sub>4</sub> C [%]
1	130	50	5	19.16	0.68	27	18	0	15
2	110	50	5	20.64	0.68	27	18	0	15
3	100 - 110	45	5	20.64	0.68	27	18	0	15

Během navařování první vrstvy bylo zaznamenáno vytvoření příliš velké tavné lázně, ve které mohl karbid boru vlivem nízké hustoty vyplouvat na povrch. Na základě tohoto poznatku byl zachován větší časový interval mezi navařením následující vrstvy a tím tedy pozměněna doba chladnutí prvního návaru.

Během vizuálního kontrolování průběhu návaru druhé vrstvy se ukázalo, že se podavač karbidu boru ucpal, protože v návaru bylo vidět jeho naprosto minimální obsazení. Průtok podávacích plynů zůstal konstantní. Ucpání podavače nejspíše zapříčinila geometrie prášku boru. Narozdíl od kuličkové struktury prášku Nibasitu 625® má karbid boru geometrii spíše šterkovou. Tento fakt zapříčinil nižší koncentraci karbidu boru v druhé vrstvě, jak je zřejmé v makrostrukturním snímku vzorku č. 5. Tato provozní událost byla vyřešena pročištěním podavače a kompletním vyčištěním podávací komory a přesušením prášku v sušičce.

Na základě vysokého ohřevu první vrstvy byl u třetí vrstvy horní proud snížen.

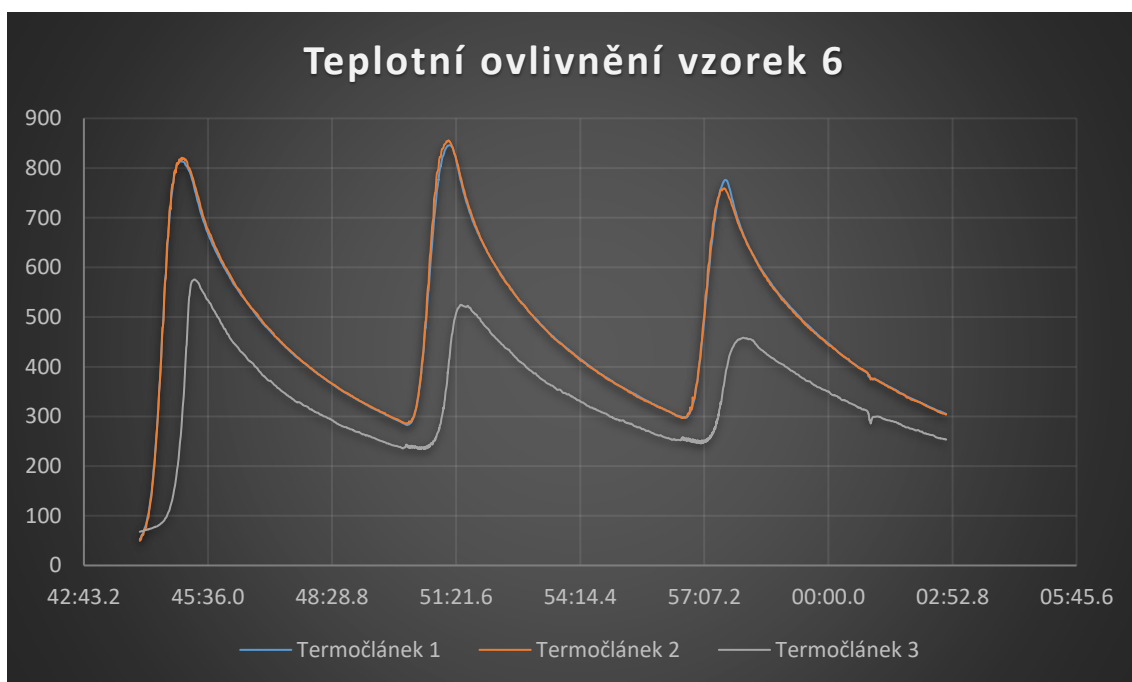
U vzorku č. 6 byly parametry pozměněny na základě informací ze vzorku předešlého. Nejvýraznější změna parametrů byla v době udržení hořáku v krajních polohách během návaru. Tato změna byla provedena z důvodu delšího času vychladnutí jednotlivých housenek návarové vrstvy a k vytvoření rovnoměrnosti ve finální geometrii návaru. Na základě této změny byl zvětšen i horní navařovací proud.. Parametry návaru vzorku č. 6 jsou uvedeny v Tabulce 20.

Tabulka 20 Navařovací parametry vzorku č. 6

Vrstva	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min <sup>-1</sup> ]	Lin. rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Šířka pendlu [mm]	Rychlost pendlu [mm.s <sup>-1</sup> ]	Pauza N/P [s]	B <sub>4</sub> C [%]
1	130	50	5	19.16	0.68	27	18	0.2	15
2	130	50	5	20.64	0.68	27	18	0.2	15

Vrstva	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min <sup>-1</sup> ]	Lin. rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Šířka pendlu [mm]	Rychlost pendlu [mm.s <sup>-1</sup> ]	Pauza N/P [s]	B <sub>4</sub> C [%]
3	130	45	5	20.64	0.68	27	18	0.2	15

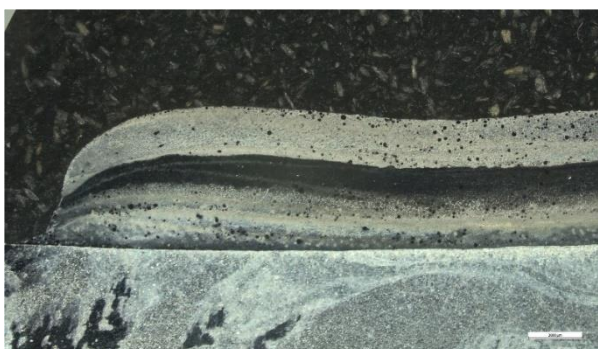
## 2.6.2 Tepelné ovlivnění



Graf 5 Tepelné ovlivnění vzorku č. 6

Při sledování teplotního působení u vzorku č. 6 (viz Graf 5) lze vyzorovat, že teploty snímané termočlánkem 1 a 2 jsou skoro totožné. Toto mohlo být zapříčiněno delším časovým vytrváním účinku tepelného vlivu plazmatu na konce jednotlivých housenek a tedy delším tepelným působením na základní materiál. Tímto působením tak termočlánek 2 snímal lépe tepelné ovlivnění ZM i z druhé strany návarové plochy. Snížení maximální dosažené teploty při navařování třetí vrstvy bylo též způsobeno delší časovou náročností procesu. Touto změnou parametru byl do svarové lázně přidáván větší objem prášků a tím se i finální výška návaru zvýšila. Druhá vrstva vzorku dosáhla výšky 3.4 mm a tím se třetí vrstva navařovala o cca 0.6 mm větší vzdálenosti od oblasti snímání termočlánků než u předchozích vzorků.

### 2.6.3 Makrostruktura



Obrázek 31 Makrostruktura vzorku č. 5(L)



Obrázek 30 Makrostruktura vzorku č. 5 (P)

Na makrostruktúre vzorku č. 5 (viz Obr. 30, 31) je opäť vidieť veľmi nízke ovlivnenie základního materiálu. Zmíněné vytvoření velké tavné lázně zapříčinilo vyplavání karbidu boru na povrch první vrstvy, po upravení parametrů třetí vrstvy je promíchání přídavných prášků lepší. Ve svrchní vrstvě jsou vidět malá uskupení nenataveného Nibasitu 625®.

Kvůli ucpání podavače karbidu boru během navařování druhé vrstvy je na snímku vidět, že se do struktury skoro žádný nedostal. Je to patrné na „černém“ pruhu Nibasitu 625® uprostřed návaru. Vrstvy jsou však dobře spojené a v makrostrukturálním snímku nejsou patrné žádné trhliny.



Obrázek 33 Makrostruktura vzorku č. 6(L)



Obrázek 32 Makrostruktura vzorku č. 6(P)

U snímků makrostruktury vzorku č. 6 (viz Obr. 32, 33) je opäť nízke ovlivnenie základního materiálu, i když přilnavost návaru je dobrá. V této struktuře, i na povrchu samotných vrstev, lze vyzorovat lokální nenatavení přídavného materiálu. Vyskytují se zde nechtěné kompaktní útvary karbidu boru. To mohlo být způsobeno menším ohřevem, tedy vytvořením menší tavné lázně. Tento návar je geometricky více symetrický než návary předchozí.

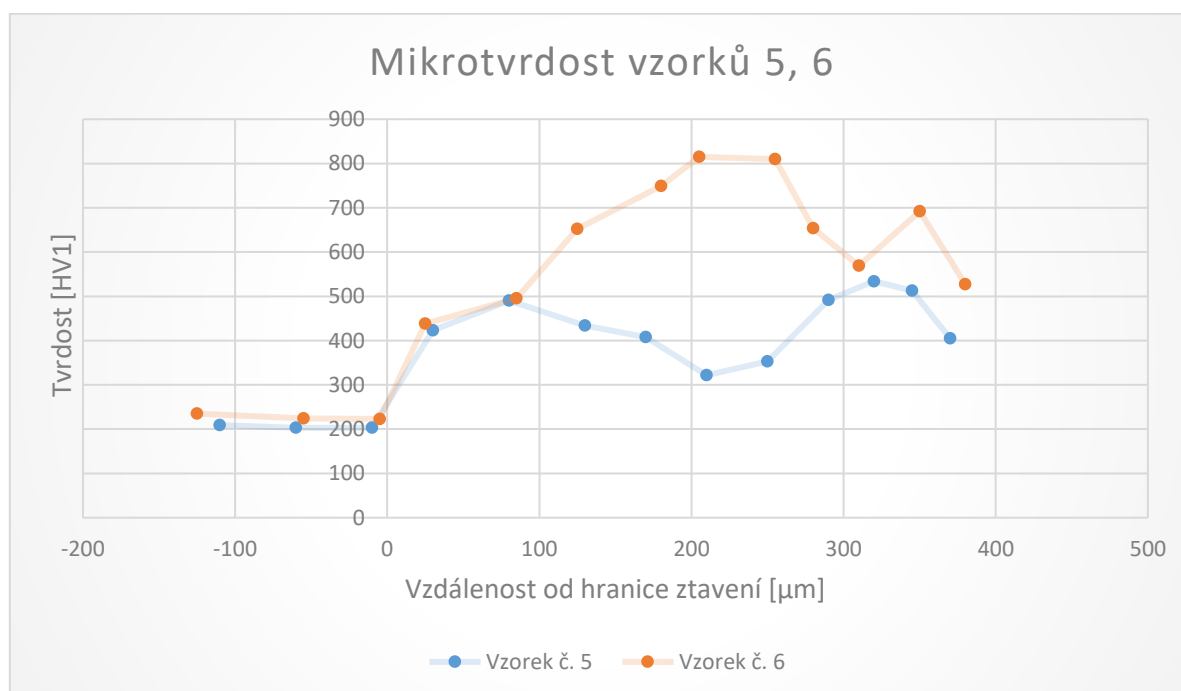
### 2.6.4 Mikrotvrdoost

Do návarové části vzorků bylo vtisknuto o dva vtisky více než do předešlých návareů, tedy celkem 13 vtisků. Výsledky zkoušky mikrotvrdoosti jsou zaznamenány v Tabulce 21.

Tabulka 21 Mikrotvrдость vzorků č. 5, 6

Měření:	ZM 1.	ZM 2.	ZM 3.	PM 1.	PM 2.	PM 3.	PM 4.	PM 5.	PM 6.	PM 7.	PM 8.	PM 9.	PM 10.
Tvrđost (v. 5) [HV1]	209	203	203	423	490	434	408	322	353	492	534	513	405
Tvrđost (v. 6) [HV1]	235	224	223	438	495	652	749	815	810	654	569	692	527

Dle výsledků zkoušky mikrotvrđosti je patrné, že návarová struktura s 15% zastoupením karbidu boru nedosahuje takových hodnot, jako struktura se zastoupením 30%. Hodnoty vzorku č. 6 dosahují mikrotvrđostních maxim v průběhu druhé vrstvy, poté se mikrotvrđost materiálu snižuje. Naopak u vzorku č. 5 dosahují hodnoty v druhé vrstvě značně menších mikrotvrđostí. To je zapříčiněné zanesením podavače během navařování, a tedy mnohem menším zastoupením karbidu boru ve struktuře druhé vrstvy vzorku. Porovnání mikrotvrđostí těchto vzorků je zaznamenáno v Grafu 6.



Graf 6 Mikrotvrđost vzorku č. 5, 6

## 2.7 Vzorek č. 7

### 2.7.1 Zvolené parametry

Za účelem porovnání vzorků byl vytvořen i návar Nibasitu 625® bez přidaného karbidu boru. Pro tento návar byly zvoleny stejné počáteční parametry jako u vzorku č. 6. Byla zachována také doba udržení v krajní poloze rozkyvu za účelem replikování geometrické souměrnosti předchozího vzorku. Během vizuálního kontrolování průběhu návaru bylo však patrné, že se přídavný materiál dostatečně nenatavuje a že se tvoří nechtěný výrazný zásyp nenataveného prášku na povrchu ZM. Během navařování první vrstvy se horní hranice proudu zvedla z 130 A na 160 A. Před navřením druhé vrstvy se vzorek nechal vychladnout na teplotu 200 °C, to však zapříčinilo menší přilnavost druhé vrstvy k první a horní hranice proudu se musela během procesu opět zvedat. Parametry použité během navařování vzorku č. 7 jsou uvedeny v Tabulce 22.

Tabulka 22 Navařovací parametry vzorku č. 7

Vrstva	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min <sup>-1</sup> ]	Lin. rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Šířka pendlu [mm]	Rychlost pendlu [mm.s <sup>-1</sup> ]	Pauza N/P [s]	B <sub>4</sub> C [%]
1	130 - 160	50	5	19.2	0.68	27	18	0.2	0
2	130 - 160	50	5	20.68	0.68	27	18	0.2	0
3	130	45	5	20.68	0.68	27	18	0.2	0



## 2.7.2 Tepelné ovlivnění



Graf 7 Tepelné ovlivnění vzorku č. 7

Průběh tepelného ovlivnění vzorku č. 7 (viz Graf 7) ukazuje, že samotný Nibasit 625® nedosahuje takových tepelných maxim, jako předešle vytvořené kompozity s karbidem boru. Horní navařovací proud byl zvýšen již od počátku navařování druhé vrstvy, což se projevilo i v grafu tepelného ovlivnění vzorku (viz Graf 7). Teplotní maximum je dosaženo u druhé vrstvy, cca 830 °C. Během chladnutí druhé vrstvy je v grafu zaznamenán tepelný výkyv. Ten je zapříčiněn odpadnutím druhého termočláneku ze základního materiálu. Po zaznamenání problematického snímání byl termočlánek odebrán a pomocí výbojové svářečky BT-2 opět přivařen.

### 2.7.3 Makrostruktura

Při přípravě metalurgických výbrusů vzorků se po broušení a leštění vzorky leptaly přípravkem na leptání niklových slitin a směsí  $2/7 \text{ C}_2\text{H}_4\text{O}_2 + 3/7 \text{ HCl} + 2/7 \text{ HNO}_3$ . Po leptání metalografického výbrusu vzorku č. 7 vypadala pod mikroskopem struktura nepoškozeně.



Obrázek 34 Makrostruktura vzorku č. 7

Z tohoto snímku lze o návaru říct, že jako u předchozích vzorků není základní materiál adekvátně natavený, ale že zde působí i dobrá přilnavost jednotlivých vrstev. Mikrostruktura také nevykazuje žádné stopy po trhlinách.

### 2.7.4 Mikrotvrдость

Parametry měření mikrotvrđosti byly opět neměnné a výsledky zkoušky jsou zaznamenány v Tabulce 23.

Tabulka 23 Mikrotvrđost vzorku č. 7

Měření:	ZM 1.	ZM 2.	ZM 3.	PM 1.	PM 2.	PM 3.	PM 4.	PM 5.	PM 6.	PM 7.	PM 8.	PM 9.
Tvrđost (v. 7) [HV1]	192	188	179	218	230	227	234	224	234	229	223	209

Naměřené mikrotvrđosti odpovídají teoretickému předpokladu. Jelikož se jedná o homogenní návar, mají hodnoty naměřených mikrotvrđostí malou odchylku ( $\pm 13 \text{ HV1}$ ) a jejich grafické znázornění by nezaznamenalo velké výkyvy od vodorovné konstantní přímky.

## 2.8 Vzorek č. 8

U vzorku č. 8 bylo cílem vytvořit funkčně gradovaný materiál, neboli FGM. FGM materiály mají záměrně vytvořenou gradovaně proměnnou mikrostrukturu nebo chemické složení. Nejedná se o rychlý přechod z jednoho materiálu do druhého, ale o postupnou změnu složení jednotlivých vrstev ke graduální změně materiálu dle funkčnosti. Právě tyto pozvolné změny ve vrstvách návaru umožňují lepší adhezi jednotlivých vrstev. Finální návar má také větší odolnost vůči delaminaci při tepelném ovlivňování a namáhání.

Cílem bylo vytvořit návar, jehož složení by postupně přecházelo z čistého Nibasitu 625® do struktury s čím dál tím větším zastoupením karbidu boru. Tento návar se opět skládal z tří vrstev.

### 2.8.1 Zvolené parametry

Zvolení parametrů jednotlivých vrstev vycházelo z parametrů navařování předchozích vzorků. U první vrstvy čistého Nibasitu 625® byl zvolen vyšší parametr horního proudu za účelem plného natavení přídavného materiálu. Za účelem lepší adheze mezi první a druhou vrstvou byla doba chlazení zkrácena a další vrstva návaru byla aplikována již při 320 °C. Parametry druhé vrstvy byly zvoleny stejné jako u vzorku č. 6 a doba vychladnutí se protáhla. Finální vrstva s 30% zastoupením karbidu boru byla navařena při předhřevu 275 °C a se změnou snížení dolního proudu na 45 A. Parametry celého návaru jsou zaznamenány v Tabulce 24.

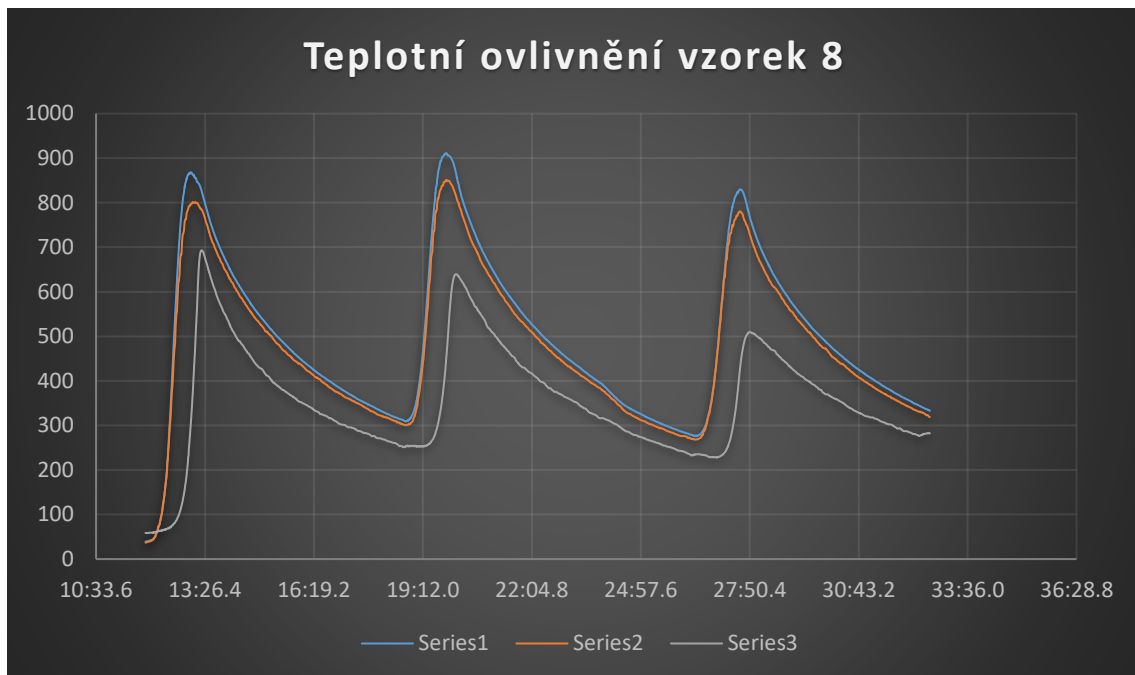
Tabulka 24 Navařovací parametry vzorku č. 8

Vrstva	IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min <sup>-1</sup> ]	Lin. rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Šířka pendlu [mm]	Rychlost pendlu [mm.s <sup>-1</sup> ]	Pauza N/P [s]	B <sub>4</sub> C [%]
1	140 - 160	50	5	19.2	0.68	27	18	0.2	0
2	130	50	5	20.64	0.68	27	18	0.2	15
3	130	45	5	18.17	0.68	27	18	0.2	30

### 2.8.2 Tepelné ovlivnění

Snímání tepelného ovlivnění vzorku č. 8 naměřilo doposud největší teplotní maximum, a to při navařování druhé vrstvy - 905 °C. Této teploty bylo možné dosáhnout právě kvůli vyššímu nastavení horní hranice proudu při započetí samotného navařovacího procesu a menší

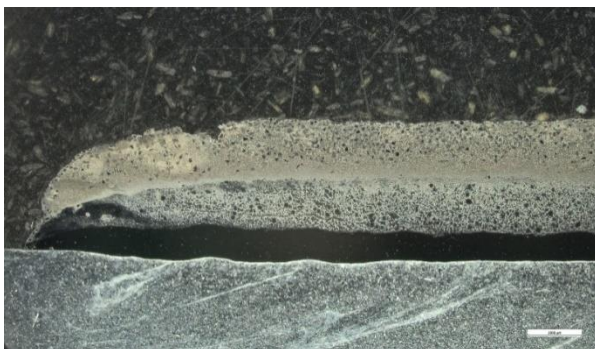
časové prodlevě mezi návary. Vysoké teploty byly nasnímány i třetím termočlánkem na opačné ploše navařované části. Při navařování první vrstvy tento termočlánek zaznamenal teplotu až 680 °C.



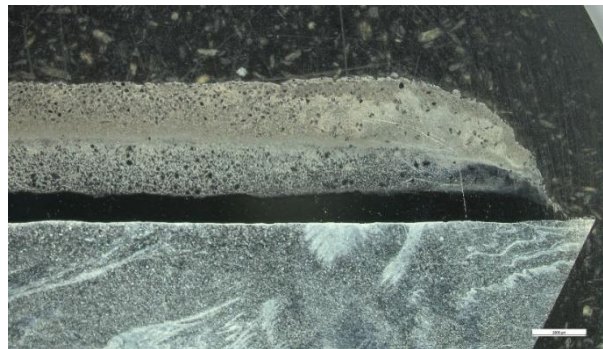
Graf 8 Tepelné ovlivnění vzorku č. 8

### 2.8.3 Makrostruktura

Makrostruktura ukazuje na nízké ovlivnění základního materiálu. Na snímku lze vidět graduální změnu chemického složení jednotlivých vrstev (viz Obr. 35, 36). Tato gradualita může také napomáhat k jejich patrně dobrému přilnutí.

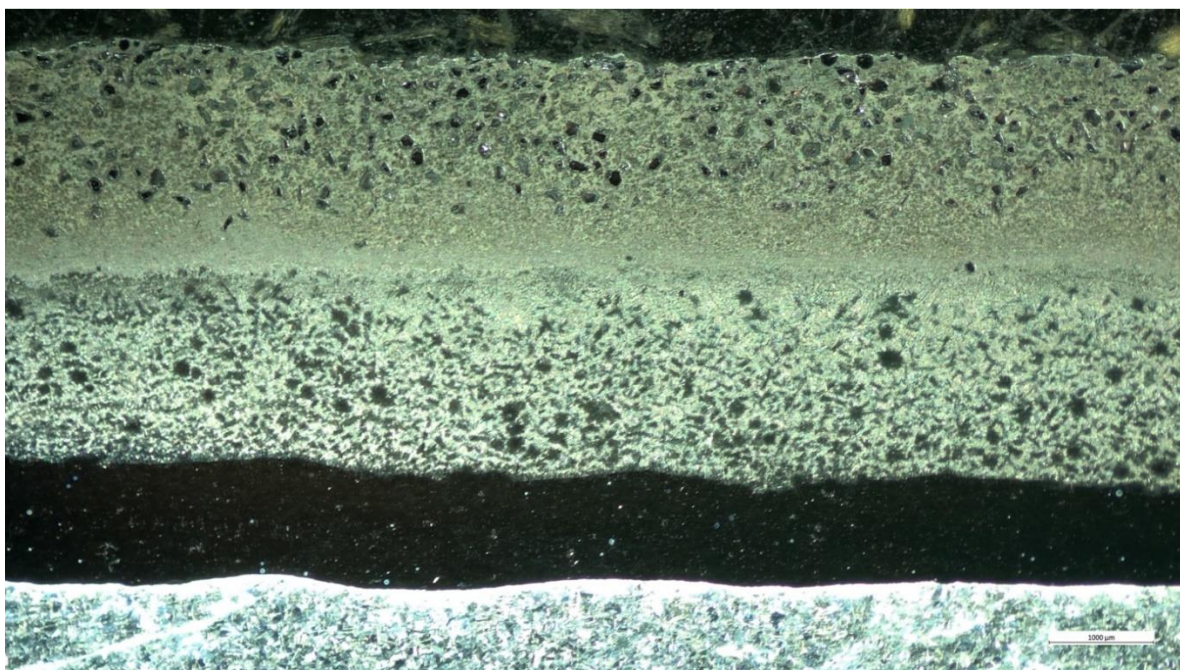


Obrázek 36 Makrostruktura vzorku č. 8(L)



Obrázek 35 Makrostruktura vzorku č. 8(P)

Na detailnějším snímku makrostruktury (viz Obr. 37) je patrné, že karbid boru si zachovává tvar i velikost při průchodu plazmatem, zatímco Nibasit 625® je plně nataven. Geometrická rovnoměrnost je zachována a ve struktuře nejsou patrné žádné trhliny.



Obrázek 37 Makrostruktura vzorku č. 8

## 2.8.4 Měření mikrotvrdosti

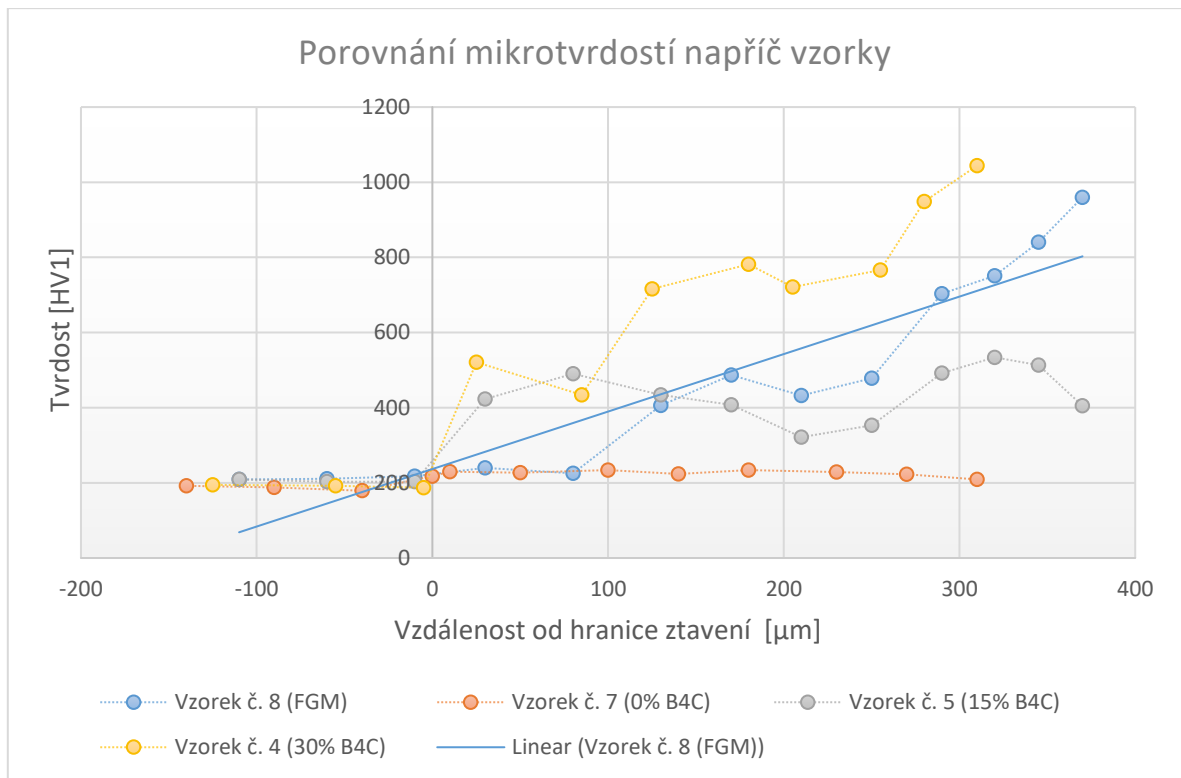
Měření mikrotvrdosti FGM vzorku probíhalo za stejných podmínek jako měření vzorku č. 7. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v Tabulce 25.

Tabulka 25 Mikrotvrdost vzorku č. 7

Měření:	ZM 1.	ZM 2.	ZM 3.	PM 1.	PM 2.	PM 3.	PM 4.	PM 5.	PM 6.	PM 7.	PM 8.	PM 9.	PM 10.
<b>Tvrdost (v. 8) [HV1]</b>	209	211	218	240	225	406	487	432	478	703	751	840	960

Výsledky korespondují s předchozími naměřenými hodnotami ve strukturách se stejným procentuálním obsahem přídavných materiálů. V Grafu 9 jsou naměřené hodnoty porovnány.

Mikrotvrdost naměřená v oblasti první vrstvy koresponduje s hodnotami naměřenými u vzorku č. 7, který neměl žádné zastoupení karbidu boru v své homogenní struktuře. Hodnoty naměřené u druhé vrstvy v porovnání s mikrotvrdostí vzorku č. 5, který má 15% obsah karbidu boru v návaru, se také shodují. Poslední čtyři měření provedená v finální vrstvě, tedy oblasti s 30% zastoupením karbidu, taktéž spíše odpovídají naměřené mikrotvrdosti vzorků se stejným obsahem.



*Graf 9 Porovnání mikrotvrdoostí vzorků č. 4, 5, 7, 8*

Základní zjištění je to, že vzorek FGM dosáhl téměř stejné mikrotvrdoosti (viz Graf 9), ale s plynulejším zvyšováním směrem od základního materiálu, takže se dá předpokládat větší soudržnost ZM a návaru.

# Závěr

V první části bakalářské práce byla popsána technologie navařování a konkrétní druhy jejich procesů. Důraz byl kladen na technologii navařování plazmatem, z důvodu jejího využití při části experimentální. Byl popsán celý proces, jednotlivé využívané komponenty, používané plyny a přídavné materiály. Další úsek teoretické části se zabývá niklem a jeho slitinami. Podrobněji rozebrána byla slitina typu Inconel 625® Nibasit 625®, která byla jako přídavný materiál využita spolu s karbidem boru v experimentální části. Bylo zdůrazněno její chemické složení, mechanické vlastnosti i využití. Jsou zde popsány i obecné vlastnosti a aplikace B<sub>4</sub>C.

Hlavním úkolem praktické části bylo vyhotovení povlaků ze slitiny Nibasit 625® a karbidu boru. Byla popsána veškerá zařízení, která se před, v průběhu i po navaření využívala. Před samotným navařením povlaku bylo nutné určit navařovací parametry samotného procesu. Díky průběžnému měnění procentuálního zastoupení karbidu boru ve finálních návarech byl každý vzorek navařován za využití jiných parametrů zadaných do navařovacího automatu PPC 250 R6. Optimalizace parametrů probíhala pomocí navařování zkušebních návarek. Ke zpracování této práce bylo využito celkem osm vzorků.

Navařené povlaky všech vzorků se skládaly ze tří vrstev. U každého vzorku bylo při samotném navařování snímáno průběžné tepelné ovlivnění základního materiálu. Po zhotovení povlaků byl z jednotlivých vzorků vyhotoven metalografický výbrus, na kterém se následně zkoumala makrostruktura a byla provedena zkouška mikrotvrlosti dle Vickerse.

Obtížné během navařování bylo nalezení vhodné rovnováhy mezi používaným proudem a časem chladnutí jednotlivých vzorků. Během studování makrostruktury bylo na některých povlacích pozorované nehomogenní rozložení karbidu boru ve struktuře. I přes minimální ovlivnění základního materiálu byly všechny návary metalurgicky spojeny s podložkou.

Naměřené mikrotvrlosti vzorku č. 5 se neshodují s předpokladem odvozeným z dosažených výsledků ostatních vzorků, protože došlo k selhání podávání prášku při navařování druhé vrstvy. To zapříčinilo nerovnoměrnou distribuci karbidu boru ve struktuře a tomu také odpovídaly naměřené mikrotvrlosti.

Až na vzorek č. 1 dosáhly všechny vzorky dostatečné adheze mezi vrstvami.

Na první čtyři vzorky se navařoval povlak s 30% zastoupením karbidu boru. Tyto vzorky dosahovaly v příčném řezu největších mikrotvrlostí. U vzorku č. 1 byla naměřena mikrotvrlost až 1074 HV1.

U vzorků č. 5 a 6 byl proveden návar s 15 % karbidu boru. Výsledky zkoušky mikrotvrlosti u vzorku č. 6 odpovídají teoretickému předpokladu zmenšení naměřených hodnot. 815 HV1 byla maximální dosažená hodnota mikrotvrlosti u této skupiny vzorků.

Homogenní struktura vzorku č. 7, která obsahuje pouze Nibasit 625®, tvrdostně odpovídá předepsaným hodnotám výrobce. Naměřené hodnoty tohoto vzorku se pohybují v rozmezí  $221 \pm 13$  HV1.

Finální vzorek byl navařen jako FGM, jeho složení postupně nabývalo po jednotlivých vrstvách většího zastoupení karbidu boru. Tento vzorek dosáhl téměř stejné mikrotvrlosti jako vzorky s 30% zastoupením, ale s plynulejším navyšováním hodnot.

Ze získaných výsledků lze konstatovat, že metoda PTA má velký potenciál ve tvorbě návarových povlaků z cermetu na bázi niklové matrice s částicemi B<sub>4</sub>C.



# Citovaná literatura

- [1] BAJDA, Miroslav. Navařování kovů. Svět svaru [online]. 1996 [cit. 2021-11-07]. ISSN 1214-4983
- [2] HLAVATÝ, Ivo, Jiří HLAVATÝ a Lucie KREJČÍ. Navařování tvrdokovů. Svět svaru. Hadyna International s.r.o., 2007, 11(3), 18-19. ISSN 1214-4983.
- [3] PRUDKÝ, Jan. Teorie a metodika svařování. 1. vyd. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1981
- [4] Nanášení tvrdokovu. DYNALLOY INDUSTRIES, INC. [online]. USA: x, 2019 [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: <http://dynamalloyinc.com/dynarod/dynarod-sb/>
- [5] PROCHÁZKA, Jiří, Miroslav ZAPOTIL, Milan NĚMEC a Jiří NOVOTNÝ. Technologie slévání, tváření a svařování. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1982
- [6] MMA | svařování obalenou elektrodou. Svářečí Kukla [online]. Mladá Boleslav, 2019 [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: <https://www.svarcikukla.cz/blog/mma-svarovani-obalenou-elektrodou/>
- [7] Metoda svařování MIG/MAG. Schinkmann [online]. Průmyslová 1072: Kosmonosy, 2019 [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mig-mag-svarovani-v-ochranne-atmosfere-plynu>
- [8] Svařování TIG - seznámení. Svářečský Elektrody [online]. Příbram, 2010 [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-39/t-120>
- [9] MINAŘÍK, Václav. Obloukové svařování [online]. 2., aktualiz. vyd. Praha: Scientia, pedagogické nakladatelství, 1998 [cit. 2020-07-22]. ISBN 80-718-3285-5.
- [10] Totální řešení automatizace. Welmet [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: <https://www.welmet.cz/automatizace/totalni-reseni/>
- [11] HU, Anming. Advanced Materials and Processes of Nanobrazing [online]. University of Tennessee, 2017 [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/320353060\\_Nanobrazing\\_for\\_turbine\\_blade\\_and\\_vane\\_repair](https://www.researchgate.net/publication/320353060_Nanobrazing_for_turbine_blade_and_vane_repair). University of Tennessee.
- [12] ROHAN, Pavel, Tomáš KRAMAR a Tomáš PANÁČEK. Diagnostika plazmového navařovacího procesu. KONSTRUKCE [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, 2015, 26.12.2015, 2016, 1-2 [cit. 2021-11-04]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/diagnostika-plazmoveho-navarovaciho-procesu/>
- [13] Rohan, Pavel, Ladislav Kolařík, Tomáš Kramár a Zdeněk Krška. Navařování plazmatem - ochranné povlaky ve výrobě i výzkumu. MM Průmyslové spektrum. 2015, ročník 18, č. 1, s. 86 [vid. 13. 11. 2017]. ISSN 1212-2572. Dostupné též na <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-plazmatem-ochranne-povlakyve-vyrobe-i-vyzkumu.html>.

- [14] Plasma Transferred Arc Welding (PTAW). ACME-INTER [online]. Bangkok, 2017 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <http://www.acme-inter.com/en/article/plasma-transferred-arc-welding-ptaw/>
- [15] SCHWARZ, Drahomír a Ivo HLA VATÝ. Svařování plazmovým obloukem. Svět svaru. 2014, (1), 5. ISSN 1214-4983.
- [16] Degterev, AS, SF Gnyusov a S Yu Tarasov. Structural modification in a reheated bead-overlapping zone of the multiple-pass plasma-transferred arc Fe-CrV-Mo-C coating. Surface and Coatings Technology. 2017, ročník 329, s. 272–280[vid.13.11.2017].Dostupné též na <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897217309854>.
- [17] NEDUCHAL, Přemysl. Plazmové svařování (navarování): Volba formy přídavného materiálu. In: Docplayer [online]. Praha: Anzdoc, 2016, 2016, s. 8-9 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/1807039-Plazmove-svarovani-navarovani-15.html#>
- [18] PRÁŠKY NA NAVAŘOVÁNÍ PTA A LASEREM. Wirpo [online]. Brno: Wirpo, 2016 [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://www.wirpo.cz/zarove-nastriky/laserova-navary/prasky-pro-navarovani-laserem-a-pta>
- [19] JANOVEC, Jiří, Petr ZUNA a Karel MACEK. Fyzikální metalurgie. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2935-2.
- [20] ANTOSZCZYSZYN, Tiago Jose, Rodrigo Metz Gabriel PAES, Ana Sofia Clímaco Monteiro de OLIVEIRA a Adriano SCHEID. Impact of dilution on the microstructure and properties of Ni-based 625 alloy coatings. Soldagem & Inspeção [online]. 2014, 19(2), 134-144 [cit. 2021-11-19]. DOI: 10.1590/0104-9224/SI1902.05. ISSN 0104-9224. Dostupné z: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242014000200005&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242014000200005&lng=en&tlng=en)
- [21] BOURELL, David L. Perspectives on Additive Manufacturing. Annual Review of Materials Research. 2016, 46(1), 1-18. ISSN 1531-7331. Dostupné z: [doi:10.1146/annurev-matsci-070115-031606](https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-031606)
- [22] Research Progress of Nickel-based Corrosion Resistant Alloys: Performance and Application. PipeLine Dubai [online]. Wenzhou, Zhejiang, P.R. China, 2019 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.pipelinedubai.com/research-progress-of-nickel-based-corrosion-resistant-alloys.html>
- [23] FERREIRA, Luciano da Silva, Karin GRAF a Adriano SCHEID. Microstructure and Properties of Nickel-based C276 Alloy Coatings by PTA on AISI 316L and API 5L X70 Steel Substrates. Materials Research [online]. 2015, 18(1), 212-221 [cit. 2021-11-20]. DOI: 10.1590/1516-1439.332914. ISSN 1516-1439. Dostupné z: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392015000100212&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392015000100212&lng=en&tlng=en)
- [24] SHANKAR, Vani, K BHANU SANKARA RAO a S.L MANNAN. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy. Journal of Nuclear Materials. 2001, 288(2),

222-232. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(00\)00723-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(00)00723-6). ISSN 0022-3115. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311500007236>

[25] ABIOYE, T.E., J. FOLKES a A.T. CLARE. A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013, 213(12), 2145-2151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.06.007>. ISSN 0924-0136. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013613001982>

[26] Inconel Alloy 625. Special Metals Corporation [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconelalloy-625.pdf>

[27] WANG, J.F., Q.J. SUN, H. WANG, J.P. LIU a J.C. FENG. Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2016, 676, 395-405 [cit. 2021-11-21]. DOI: 10.1016/j.msea.2016.09.015. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509316310772>

[28] Inconel 625, slitina 625. Ikalloy [online]. Gangwu Road, Si-an, Čína: Gangwu, 2019 [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <https://lkalloy.com/cs/nickel-based-alloys/inconel-625/>

[29] Inconel Alloy 625. Special Metals Corporation [online]. [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconelalloy-625.pdf>

[30] DOMNICH, V., S. REYNAUD, R. A. HABER a M. CHHOWALLA. Boron carbide: structure, properties, and stability under stress. 94. 2011.

[31] BRITANNICA, T. EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA. Boron carbide [online]. Cambridge: Encyclopedia Britannica, 2010 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/boron-carbide>

[32] HNATKO, M. a J. KŘEŠŤAN. Karbid boru (B<sub>4</sub>C). *MatNet* [online]. 2006, 2006, 1-2 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=236>

[33] Kskct [online]. Nibasit 625-P. Prášky, návarové materiály a tvrdokovy. Katalog. ©2017. [online] [cit. 2021. 11. 20]. Dostupné z: <https://www.kskct.cz/images/katalog/praskynavarove-materialy-a-tvrdokovy/dokumentace/Nibasit%20625-P.pdf>.