



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Navařování abrazivzdorných povlaků metodou pulzního PTA

Jan Stulhofer

DIPLOMOVÁ PRÁCE

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

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma *Navařování abrazivzdorných povlaků metodou pulzního PTA* vypracoval samostatně a využil jsem pouze uvedenou literaturu.

V Praze dne

Podpis:

## Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu své diplomové práce, Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D., za trpělivé vedení a předávání cenných rad při jejím vypracování.

Dále děkuji pracovníkům oddělení Materiálového inženýrství ÚFP AV ČR v.v.i. za obětavé poskytnutí potřebných materiálů.

Děkuji také všem svým blízkým, zejména pak své snoubence a rodičům, kteří mne ve studiu a tvorbě diplomové práce podporovali a byli mi pevnou oporou.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stulhofer** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **473724**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Navařování abrazivzodorných povlaků metodou pulzního PTA**

Název diplomové práce anglicky:

**Pulsed PTA hardfacing of wear resistant alloys**

Pokyny pro vypracování:

Provést rešerši na téma navařování, niklové slitiny, karbid křemíku, cermety prověřit možnost navaření povlaků cermetů na základě niklové slitiny a SiC charakterizovat materiál návaru z hlediska tvrdosti, struktury

Seznam doporučené literatury:

PRASAD, K. Siva, Ch. Srínivasa RAO a D. Nageswara RAO. Application of design of experiments to plasma Arc Welding Process: a review: a review. 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.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2022**

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

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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

# Anotace

Tato diplomová práce je zaměřena na navařování abrazivzdorných povlaků na bázi kompozitů s kovovou maticí. Cílem práce je ověřit možnosti navaření povlaků z niklové slitiny typu 625 s příměsí SiC na součást z austenitické nerezové oceli za účelem zlepšení funkčních vlastností povrchu. V první části práce je popsána technologie PTA, stroje a materiály při ní používané a jevy, které nastávají během navařování. Ve druhé části jsou popsány provedené experimenty, jejich metodika a stroje a přístroje na kterých byly provedeny. Třetí část práce je tvořena výsledky jednotlivých experimentů.

## Klíčová slova

PTA navařování, abrazivzdorné povlaky, SiC, kompozity s kovovou maticí

## Annotation

This thesis is focused on the hardfacing of abrasive-resistant coatings based on composites with a metal matrix (MMC). The aim of the thesis is to verify the possibilities of welding coatings made of nickel alloy type 625 with SiC admixture on a part made of austenitic stainless steel in order to improve the functional properties of the surface. The first part of the thesis describes the PTA technology, the machines and materials used in it, and the phenomena that occur during surfacing. The second part describes the experiments performed, their methodology and the machines and devices on which they were performed. The third part of the thesis consists of the results of these experiments.

## Key words

PTA hardfacing, abrasive resistant coatings, SiC, metal matrix composites

# Obsah

Úvod .....	7
1. Technologie navařování .....	8
1.1. PTA navařování.....	10
1.1.1. Podstata a princip PTA navařování .....	10
1.1.2. Hořák pro PTA navařování.....	11
1.1.3. Promísení při PTA navařování .....	12
1.1.4. Stroje pro PTA navařování.....	14
1.1.5. Materiály pro PTA navařování.....	16
1.2. Kompozity s kovovou maticí .....	17
2. Experimentální část.....	18
2.1. Použité stroje, přístroje a postupy .....	18
2.1.1. Použitý stroj pro PTA navařování .....	18
2.1.2. Výběr základního a přídatných materiálů.....	19
2.1.3. Procesní plyny pro PTA.....	21
2.1.4. Příprava před navařováním .....	21
2.1.5. Měření teplotních průběhů.....	22
2.1.6. Navařování vzorků.....	23
2.1.7. Nastavené parametry procesu navařování .....	24
2.1.8. Příprava vzorků pro experimenty.....	25
2.1.9. Pozorování mikrostruktury.....	26
2.1.10. Měření mikrotvrdosti.....	26
2.1.11. Pozorování mikrostruktury a chemického složení .....	28
2.2. Výsledky a diskuze .....	29
2.2.1. Vzorek 10.....	29

2.2.2. Vzorek 11.....	36
2.2.3. Vzorek 12.....	39
2.2.4. Vzorek 13.....	43
2.2.5. Vzorek 14.....	48
2.2.6. Vzorek 15.....	53
2.2.7. Měření tvrdosti.....	58
Závěr .....	59
Seznam obrázků .....	60
Seznam tabulek .....	62
Bibliografie .....	63
Přílohy:.....	66

# Úvod

Problematika odolnosti povrchu strojních součástí vede ke snaze o zavedení nových materiálů. Výroba celých součástí z takových materiálů je však velmi finančně náročná, a tudíž je vhodné, aby tyto drahé materiály byly použity pouze tam, kde budou jejich vlastnosti využity, tedy většinou na povrchu součástí. Toho lze docílit různými způsoby tvorby povlaků. Často používaným způsobem tvorby silných vrstev na povrchu součástí je navařování. Tato diplomová práce se zabývá konkrétně technologií pulzního plazmového navařování.

Pro součásti, které jsou provozovány za zvýšených teplot a je u nich předpokládána výrazná abraze, je nutné, aby byla navařená vrstva schopna odolávat oběma zmíněným jevům. Pro zvýšené teploty se často používají niklové slitiny, například niklová slitina typu 625. Ta je schopna při provozu odolat teplotám až do 980 °C. Jako abrazivzdorné materiály se používají keramiky jako například karbid křemíku či bóru. Karbid křemíku (SiC) má vysokou tvrdost 2600 HV a je schopen odolávat teplotám až 1600 °C, avšak sám o sobě je velmi křehký. Aby bylo dosaženo kýžených vlastností povrchu součástí, je zapotřebí tyto dva materiály zkombinovat. Hlavním cílem této práce je ověřit, zda je možné metodou navařování plasma transferred arc (dále jako PTA) navařit povlak složený z niklové slitiny typu 625 s příměsí SiC a prozkoumat vlastnosti takového návaru, a tedy i jeho možný přínos pro využití v praxi.

Cíle práce:

- Provést rešerši na téma navařování, niklové slitiny, karbid křemíku, cermety
- Provéřit možnosti navaření povlaků cermetů na základě niklové slitiny a SiC
- Charakterizovat materiál návaru z hlediska tvrdosti a struktury

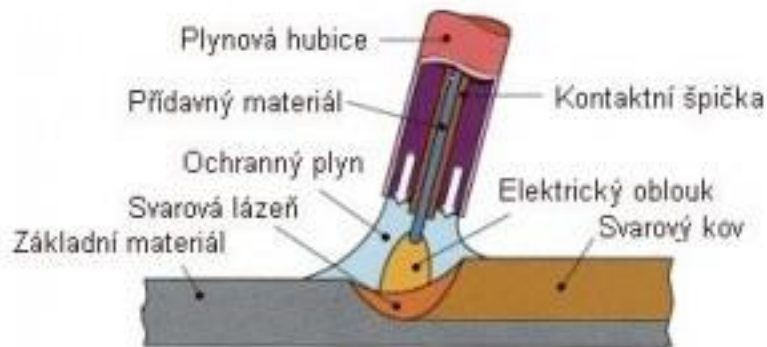
První část práce je věnována rešerši na téma materiálů, strojů a postupů PTA navařování. Ve druhé, experimentální části, je popsáno navařování vzorků návarů a experimenty na nich prováděné. Dále jsou zde popsány stroje, přístroje a zařízení, která byla k těmto experimentům potřebná. Třetí část práce se věnuje výsledkům experimentů. Výsledky jsou zde interpretovány a diskutovány.



# 1. Technologie navařování

Navařování je proces, při kterém je na základní materiál nanášena vrstva přídavného materiálu. Tato technologie se využívá zejména pro zlepšení funkčních vlastností povrchu navařované součásti. Takovými vlastnostmi je typicky tvrdost, otěruvzdornost nebo korozivzdornost. Jako přídavný materiál se v tomto případě používá kov s žádanými mechanickými vlastnostmi. Dále lze technologii navařování využít pro opravy strojních součástí, kdy je svarovým kovem nahrazen materiál, který na součásti z důvodu opotřebení chybí. V těchto případech bývá navařovaný materiál shodný se základním materiálem. Po dokončení opravného návaru je součást obrobena na požadovaný rozměr.

Pro navařování se dnes používá široká škála technologií, a to buď manuálním, nebo robotizovaným způsobem. Často využívanou skupinou technologií je obloukové navařování. Sem lze zařadit technologii MMA (navarování obalenou elektrodou), která se provádí výhradně manuálně a v průmyslu nemá příliš velké využití. Dále pak technologii MIG/MAG (navarování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou), kterou je vhodné provádět robotizovaným způsobem. Její výhodou je poměrně vysoká produktivita. Nevýhodou je velmi úzký výběr přídavných materiálů. Schéma navařování technologií MIG/MAG je uvedeno na Obrázku 1. Technologie TIG (navarování netavicí se wolframovou elektrodou) je pro navařování využívána jen omezeně. Vykazuje nízkou produktivitu práce, avšak škála přídavných materiálů je zde poměrně široká. Poslední technologií ze skupiny obloukového navařování je metoda SAW (navarování pod tavidlem), která je prováděna robotizovaným způsobem, dosahuje velmi vysoké produktivity a je vhodná zejména pro renovaci rotačních nebo rovinných součástí, ale pouze v poloze vodorovné shora.



Obrázek 1: Navařování metodou MIG/MAG (23)

Velmi rozšířenou metodou navařování je dnes laserové navařování. Při této technologii je využíván laserový paprsek s vysokou energií, který natavuje základní materiál i přídavný materiál ve formě jemného prášku. Velkou výhodou této technologie je nízké vnesené teplo do součásti, tedy i malá tepelně ovlivněná oblast pod návarem a kolem něj. Pomocí této metody lze navařovat širokou škálu přídavných materiálů. Těmi jsou typicky: (1)

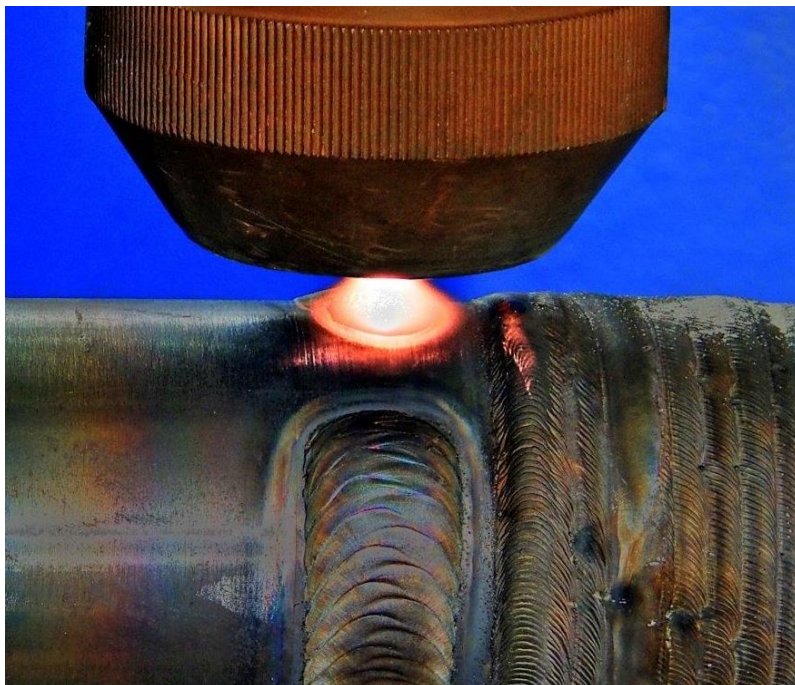
- Korozivzdorné oceli
- Konstrukční oceli
- Nástrojové oceli
- Kobaltové slitiny
- Niklové slitiny
- Bronzové slitiny
- Cermety

Laserovým navařováním lze deponovat velmi odolné, tvrdé a otěruvzdorné návary, například střižné hrany nástrojů, kladky, rolny, dorazové plochy, součásti turbín, čepy atp.

## 1.1. PTA navařování

### 1.1.1. Podstata a princip PTA navařování

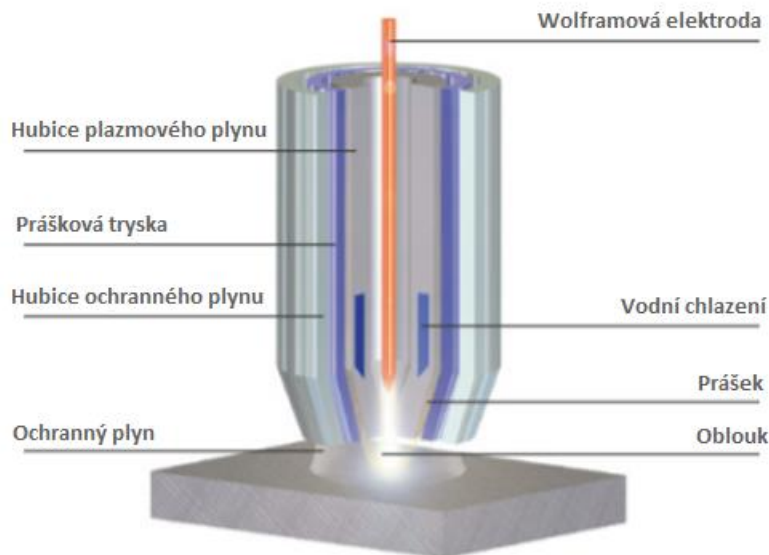
Technologie PTA je jednou z metod tavného navařování. Principem této technologie je vytvoření plazmového oblouku mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem. Tento jev je umožněn díky proudem inertního plazmového plynu. Ten je nejprve pomocí pilotního elektrického oblouku, zapáleného mezi wolframovou elektrodou a tryskou plazmového plynu, ionizován, tedy se stane vodivým, a je tedy potom možné svařovací proud přenášet tímto proudem plynu, čímž vzniká plazma. Plazmový oblouk s velmi vysokou energetickou hustotou taví základní materiál, na který je navařován přídavný materiál. Ten je do svarové lázně přiváděn v podobě prášku. Svarová lázeň musí být chráněna před vlivy okolního prostředí, k čemuž slouží ochranný plyn (nejčastěji argon). Plazmový oblouk dosahuje teplot v rozmezí 8000 až 18000 °C, proto je potřeba celou soustavu hořáku chladit pomocí vodního chlazení. Průběh PTA navařování na rotační součást je vyobrazen na Obrázku 2. (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8)



Obrázek 2: PTA navařování (27)

### 1.1.2. Hořák pro PTA navařování

Z Obrázku 3 je patrná konstrukce hořáku pro PTA svařování. Popisu jednotlivých částí hořáku se věnují následující odstavce postupně v radiálním směru od středu hořáku k jeho obvodu.



Obrázek 3: Hořák pro PTA navařování (26)

V centrální části hořáku je umístěna netavící se wolframová elektroda, podobně jako je tomu u technologie TIG. Tato elektroda je nabroušena do špičky, což napomáhá vzniku přímého a stabilního oblouku. Procházející proud je u PTA stejnosměrný (DC) s přímou polaritou. Wolframová elektroda je tedy připojená na záporný pól zdroje a navařovaná součást na kladný pól. (2) (3) (9)

Kolem elektrody proudí plazmový plyn, kterým je většinou argon nebo hélium. Jedná se tedy o inertní, za normálních podmínek nevodivý, plyn. Proud plazmového plynu je usměrněn plazmovou tryskou. Princip jeho ionizace a vzniku pilotního a plazmového oblouku je popsán výše. (2) (3) (9)

Další vrstvou hořáku je obvod vodního chlazení. Proces PTA je typický dosahováním velmi vysokých teplot, které se mohou pohybovat v rozmezí 8000 až 18000°C. Vodní chlazení je tedy u těchto hořáků nezbytné. (2) (3)

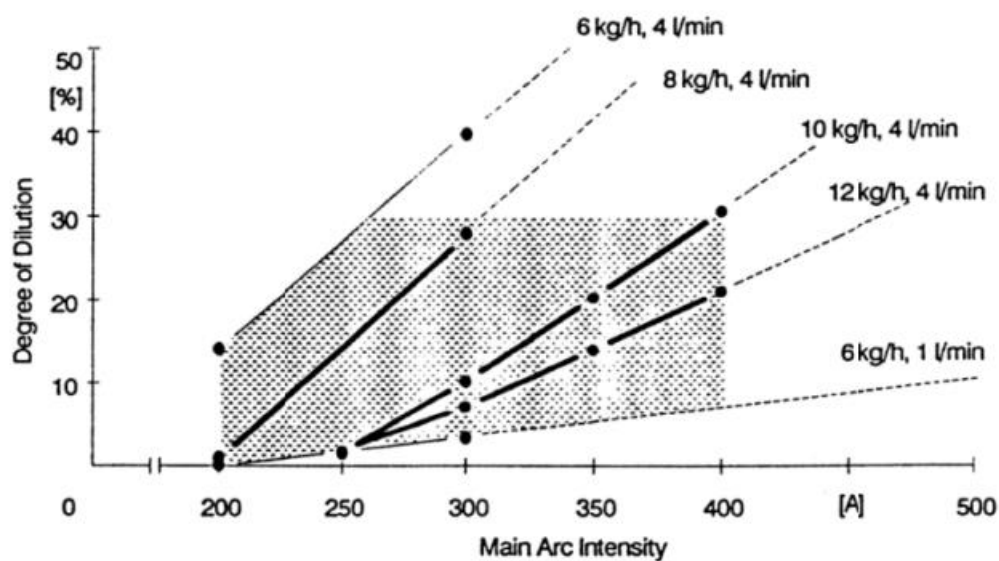
Za vodním chlazením následuje tryska pro přívod přídatného materiálu. Ten je u technologie PTA dodáván do svarové lázně v podobě prášku s rozměrem částic mezi 50 a 400  $\mu\text{m}$ . Díky vysoké energetické hustotě plazmového oblouku a malému rozměru částic prášku je možné dosáhnout roztavení přídatného materiálu ještě před jeho kontaktem se svarovou lázní. Optimální úhel proudu prášku, a tedy i sklonu trysky je  $60^\circ$  od čela hořáku. (2) (3) (9)

Poslední hlavní součástí hořáku, která je umístěna na jeho obvodu, je tryska ochranného plynu. Tím bývá nejčastěji argon. Tento plyn má dvě hlavní funkce, kterými jsou ochrana svarové lázně a roztavených částic přídatného materiálu před chemickou degradací (zejména před oxidací) a stabilizace plazmového oblouku. (2) (3)

### 1.1.3. Promísení při PTA navařování

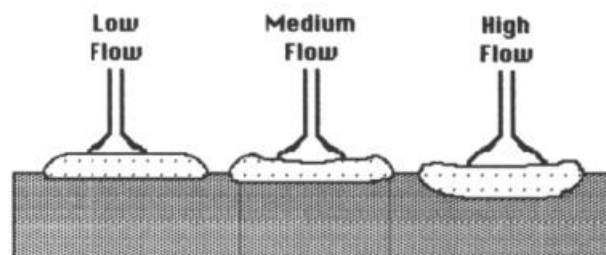
Během navařování dochází díky natavení základního materiálu k nalegování deponovaného povlaku různými prvky, nejvýrazněji však železem. Tomuto ději se říká promísení. Obecně jde o nežádoucí děj, neboť v jeho důsledku dochází ke ztrátě či snížení požadovaných vlastností navařovaného povlaku, především tvrdosti, korozní odolnosti a otěruvzdornosti. Promísení lze kvantifikovat pomocí veličiny *stupeň promísení* [%]. Pro zachování nízkého stupně promísení, a tedy i žádaných mechanických a fyzikálních vlastností povlaku je potřeba stanovit a nastavit vhodné parametry navařovacího procesu. (10)

Promísení je ovlivněno velkým množstvím parametrů. Velmi významný je vliv svařovacího proudu a průtoku plazmového plynu. Čím vyšší je svařovací proud a průtok plynu, tím větší je také oblast taveniny základního materiálu a tím vyšší je stupeň promísení. Opačný vliv má rychlost přidávání přídatného materiálu ve formě prášku. Pokud je prášek přidáván vysokou rychlostí, velká část dodávané tepelné energie je spotřebována na roztavení částic prášku, základní materiál je nataven méně a stupeň promísení je tudíž nižší. Popsané závislosti jsou patrné z Obrázku 4. (10)



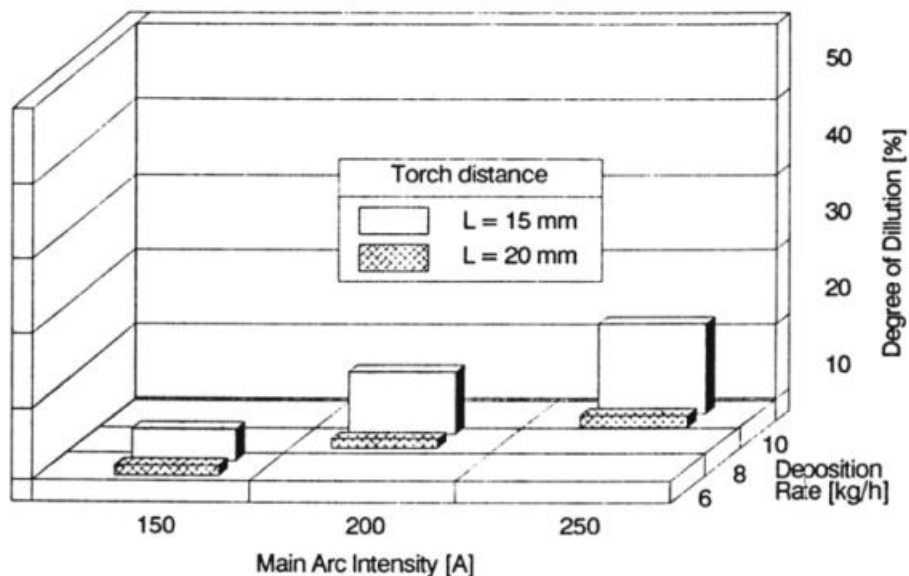
Obrázek 4: Vliv svařovacího proudu, průtoku plazmového plynu a rychlosti přidávání přídatného materiálu na stupeň promísení (10)

Na Obrázku 5 je vidět, jak je tvar návaru ovlivněn průtokem plazmového plynu. Protože vysoký průtok plazmového plynu nepříznivě ovlivňuje tvar a strukturu svaru a může způsobovat póry, používá se většinou průtok plazmového plynu v rozmezí 2-6 l/min. (10)



Obrázek 5: Vliv průtoku plazmového plynu na tvar návaru (10)

Výrazný vliv na promísení má také vzdálenost PTA hořáku od navařované součásti. Čím je vzdálenost vyšší, tím je stupeň promísení nižší, což je patrné z Obrázku 6. (10)



Obrázek 6: Závislost stupně promísení na vzdálenosti hořáku (10)

Promísení je ovlivněno i dalšími parametry svařovacího procesu, jako je velikost částic přídavného materiálu, průtok ochranného plynu nebo předehřev základního materiálu. Navařované součásti se v některých případech předehřívají na vysoké teploty (až 900 °C) aby se předešlo trhlinám a mikrotrhlinám v návaru při chladnutí. (10)

#### 1.1.4. Stroje pro PTA navařování

Kvalita plazmově deponovaných návarů závisí z velké části na přesném dodržení technologických specifikací. Proto aby byla umožněna přesnost a opakovatelnost při PTA navařování, je nezbytné využití CNC navařovacích automatů, které jsou schopny dodržet svařovací parametry jako jsou délka oblouku, úhel hořáku a rychlost posuvu. (11) (3)

Tyto automaty mohou být konstruovány jako jednoúčelové stroje pro sériovou výrobu, nebo jako univerzální stroje pro kusovou a malosériovou výrobu a pro opravování opotřebených součástí. Univerzální stroje mají větší počet stupňů volnosti. V případě navařovacího automatu PPC 250 R6 (KSK,s.r.o., Česká Třebová), který je na Obrázku 7, má polohovací systém hořáku 4 pohyblivé osy (X, Y, Z, N) a polohovadlo navařované součásti 2 pohyblivé osy (C, R).

Jednúčelové stroje mívají jednodušší konstrukční uspořádání přizpůsobené požadavkům výroby, což přispívá k vyšší tuhosti stroje a nižším pořizovacím nákladům. Automat PPC 250 WH, který je na Obrázku 8, je uzpůsobený pro navařování dlouhých rotačních součástí s jednodušší geometrií. Porovnání vlastností jednúčelového a univerzálního navařovacího automatu je uvedeno v Tabulce 1. (11) (3)



Obrázek 8: Univerzální navařovací automat PPC 250 R6 (11)



Obrázek 8: Jednúčelový navařovací automat PPC 250 WH (11)

Tabulka 1: Porovnání univerzálního a jednúčelového PTA automatu (11)

	PPC 250 R6	PPC 250 WH
<b>Počet pohyblivých os hořáku</b>	4	2
<b>Počet pohyblivých os polohovadla</b>	2	1
<b>Maximální hmotnost součásti [kg]</b>	70	2000
<b>Způsob programování</b>	Dialog PPC, Teach in	Dialog PPC
<b>Předehřev součástí stroje</b>	NE	ANO



### 1.1.5. Materiály pro PTA navařování

#### *Karbid křemíku (SiC)*

Karbid křemíku je materiál, jehož tvrdost je podobně jako u karbidu bóru velmi vysoká (2600 HV), a tudíž má i dobrou otěruvzdornost. Vyniká také vysokou pevností a nízkou hustotou ( $3,2 \text{ kgm}^{-3}$ ). Stěžejní jsou pro využití karbidu křemíku jeho tepelné vlastnosti, zejména vysoká tepelná vodivost a velmi nízká tepelná roztažnost a dále pak jeho schopnost pasivace, což je umožněno tvorbou vrstvy  $\text{SiO}_2$  na povrchu součásti. Díky těmto vlastnostem je možné součásti z karbidu křemíku používat i pro teplosměnné aplikace a také tam, kde je zapotřebí kombinovat abrazivzdornost se schopností pracovat při vysokých teplotách (až  $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Běžnými aplikacemi jsou díky vlastnostem tohoto materiálu především: (12) (13)

- Pohyblivé a statické součásti turbín
- Těsnění a ložiska
- Součásti kulových ventilů
- Teplosměnné aplikace
- Abrazivní materiál (brusné kotouče a pásy, lapovací kameny)
- Polovodičové součástky v elektronice

Velkou předností SiC je tedy široký interval provozních teplot, odolnost proti teplotním šokům a dobrá tepelná vodivost. (12)

#### *Niklová slitina typu 625*

Niklová slitina typu 625 vyniká svou vysokou pevností, výbornou žárupevností a velmi dobrou odolností proti koroznímu napadení, a to i v chemicky agresivních prostředích (kyseliny, slaná voda). Základními prvky chemické kompozice niklové slitiny typu 625 jsou nikl, chrom, molybden a niob. Úplné složení včetně procentuálního zastoupení jednotlivých prvků je patrné z Tabulky 2. (14)

Tabulka 2: Chemické složení niklové slitiny typu 625 (14)

Prvek	Ni	Cr	Mo	Nb (Ta)	Si	Al	Ti	Fe	P	S
Zastoupení [%]										
min.	58,0	20,0	8,0	3,15	-	-	-	-	-	-
max.	-	23,0	10,0	4,15	0,5	0,4	0,4	5,0	0,015	0,015

Mez pevnosti v tahu niklové slitiny typu 625 ve vyžíhaném stavu je rovna přibližně 1030 MPa. Může být dosaženo tažnosti až 60 %. Tvrdost této slitiny je až 230 HV. Maximální provozní teplota součástí z této slitiny je až 980 °C. Hustota této slitiny činí 8440 kg/m<sup>3</sup>. Tyto vlastnosti předurčují Inconel 625 ke speciálním aplikacím, jakými jsou například tyto: (14) (15)

- Komponenty vystavené chemicko-fyzikálnímu působení mořské vody
- Potrubní systémy letadel
- Krycí kroužky turbín
- Komponenty pro chemický průmysl
- Trysky plynových hořáků

Vzhledem k vyšší ceně této slitiny je i v tomto případě velmi výhodné vytvořit funkční povlak požadovaných vlastností na součásti jen v místech, kde je skutečně potřebný.

## 1.2. Kompozity s kovovou maticí

Kompozity s kovovou maticí jsou materiály, které vznikly přidáním pevných keramických částic do houževnaté kovové matrice. Pro přípravu těchto materiálů se používá postupů práškové metalurgie, ale i jiných způsobů, jako například přímé depozice plazmatem nebo laserem. Další možností je metoda spark plasma sintering. (16) (17) (18) (19)

Příprava plazmovou depozicí byla publikována v několika pracích, ale studie na téma přípravy MMC na základě niklové slitiny a karbidu křemíku nebyla v odborné literatuře nalezena.

## 2. Experimentální část

Cílem experimentální části práce je ověřit možnost navaření povlaku z niklové slitiny typu 625 a SiC metodou pulzního PTA na základní materiál, nerezovou ocel AISI 303. První část experimentu je zaměřena na samotné zhotovení vzorků s různým procentuálním zastoupením SiC v návaru. Bylo zvoleno číslování vzorků číselnou řadou 10 – 15, za účelem předejití záměnám vzorků se vzorky z ostatních experimentů probíhajících současně na stejných pracovištích. Ve druhé části jsou na vzorcích návarů zkoumány mechanické vlastnosti a jejich struktura. Získaná data o tvrdosti a struktuře návaru by měla být vhodným ukazatelem využitelnosti tohoto typu návarů v praxi.

### 2.1. Použité stroje, přístroje a postupy

#### 2.1.1. Použitý stroj pro PTA navařování

Pro navaření vzorků byl použit univerzální navařovací automat PPC 250 R6 (KSK, s.r.o.), který byl zmíněn již v teoretické části práce. Uvedené zařízení umožňuje navařovat jak rovinné návary například na čela rotačních součástí nebo na ploché díly nebo návary na válcových plochách, případně i jiné, tvarově složitě návary, což je umožněno díky hořáku, který je řízen CNC a může se pohybovat v 6 osách. Navařovaná součást je upnuta na polohovadle (kruhovém stole), který může rotovat kolem své osy a naklápět se (pohybuje se ve dvou osách). Tento stroj je pro svou univerzalitu a vysokou tvarovou variabilitu návarů často užíván pro výrobu a opravárenství sklářských i jiných forem.

Podávání přídavného materiálu ve formě prášku je zajištěno pomocí rotačního podavače poháněného krokovým motorem, jehož pohyb je přesně řízen v závislosti na zvolených parametrech podávání. Vzhledem k tomu, že pro navařování vzorků pro tuto diplomovou práci vyžadovalo dva různé přídavné materiály, které se mají v daném poměru smíchat, byly využity dva podavače, z nichž v jednom byl prášek niklové slitiny typu 625 a v druhém práškový SiC. Na ovládacím panelu stroje byla poté nastavena rychlost podávání prášku a objemová koncentrace SiC v niklové slitině, tedy poměr rychlosti obou podavačů vůči sobě. Pro ověření správnosti nastavení podávání prášku bylo provedeno u obou přídavných materiálů měření

objemu prášku při jednotlivých rychlostech za jednotku času. Výsledky měření jsou uvedeny v grafu na Obrázku 9.



Obrázek 9: Graf závislosti rychlosti podávání prášku na počtu dílků na nastavovací stupnici

### 2.1.2. Výběr základního a přídatných materiálů

Jako základní materiál pro provedení návarů zkušebních vzorků byla zvolena austenitická korozivzdorná ocel AISI 303 (X8CrNiS18-9) ve formě pásoviny o rozměru 40x10. Chemické složení oceli AISI 303 je uvedeno v Tabulce 3. Chemické složení bylo ověřeno RTG analýzou. (20)

Tabulka 3: Chemické složení oceli AISI 303 (20)

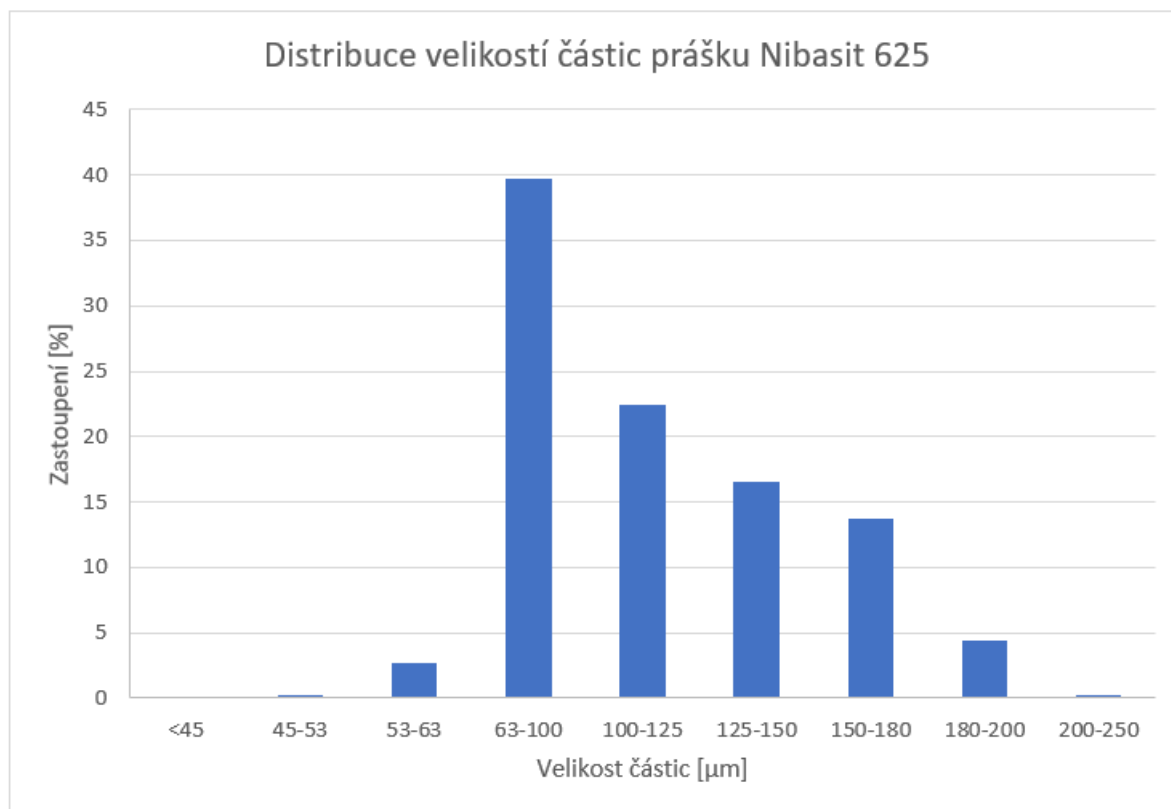
Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
Obsah [%]	0,12	1	6,5	0,2	0,15-0,35	16-19	0,7	5-10	1,75-2,25

Jako kovová matrice, tedy niklová slitina typu 625, byl zvolen prášek Nibasit 625-P/LFe od společnosti *Deutsche Edelstahlwerke* (DEW, Německo). Chemické složení tohoto prášku je uvedeno v tabulce 4. Materiálový list prášku Nibasit 625-P/LFe je uveden v Příloze 1.

Tabulka 4: Chemické složení prášku Nibasit 625-P/LFe

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

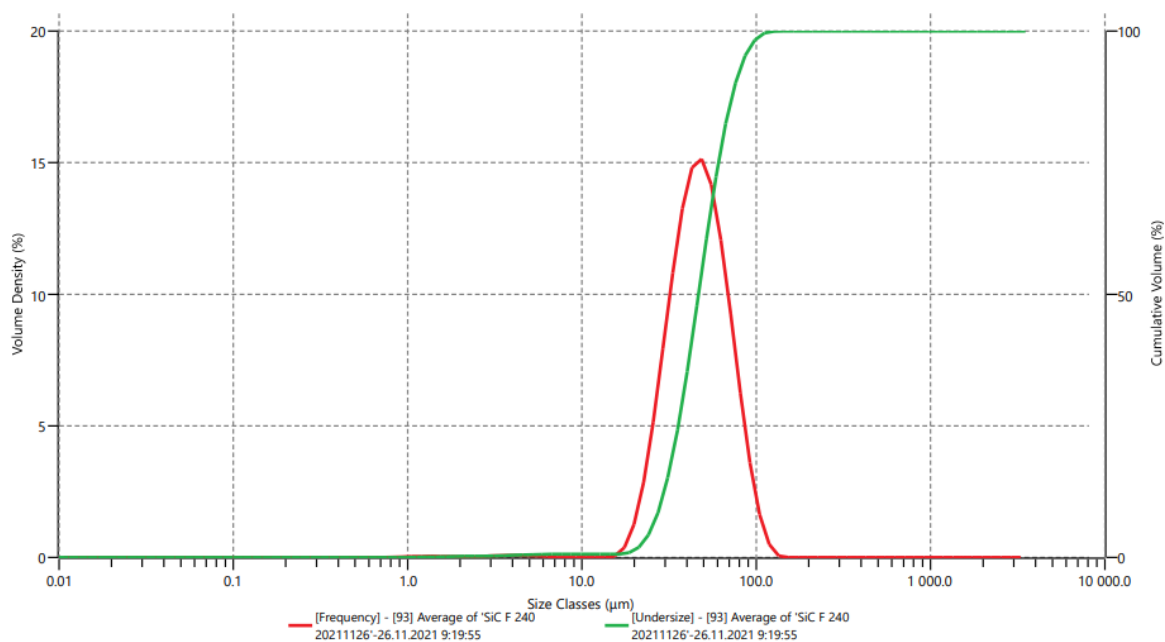
Zastoupení částic různých velikostí v prášku je patrné z grafu na Obrázku 10.



Obrázek 10: Graf distribuce velikostí částic prášku Nibasit 625-P/LFe

Keramický materiál, který byl přidáván do kovové matrice byl karbid křemíku. Tento materiál byl také ve formě prášku.

Distribuce velikostí částic prášku je patrná z grafu na Obrázku 11. Tento graf je součástí produktového listu. Celý produktový list je uveden v Příloze 2.



Obrázek 11: Graf distribuce velikostí částic prášku SiC

### 2.1.3. Procesní plyny pro PTA

Jako plazmový plyn a zároveň plyn pro podávání prášku byl použit směsný plyn Argon 4.8 + 30 % He. Jako ochranný plyn byl použit Argon 4.8 bez příměsí.

Argon 4.8 je plyn nejčastěji používaný pro MIG a TIG svařování železných i neželezných kovů. Čistota, tedy objemová koncentrace argonu v tomto plynu je 99,998 %. Nečistoty tvoří  $H_2O$  ( $<5 \text{ ml/m}^3$ ),  $O_2$  ( $<3 \text{ ml/m}^3$ ) a  $CO_2$  ( $<1 \text{ ml/m}^3$ ). (21)

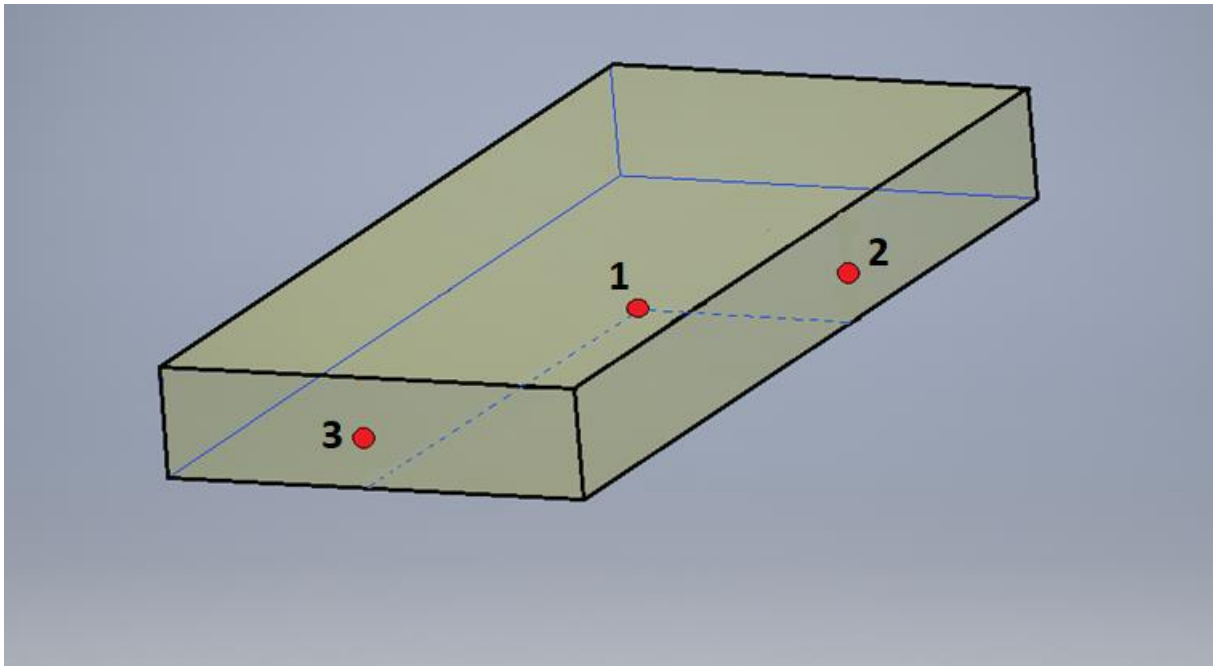
### 2.1.4. Příprava před navařováním

Pásovina z korozivzdorné oceli AISI 303 s rozměrem 40x10 mm byla na strojní pásové pile rozřezána na kvádry o délce 90 mm. Strana, na kterou byl později proveden návar, byla důkladně očištěna drátěným kartáčem.

Zásobníky pro přídavný materiál na navařovacím automatu byly důkladně vyčištěny, aby nedošlo ke kontaminaci prášků materiály, které byly v zásobníku předtím. Následně byly do zásobníků po přesušení v peci nasypány oba prášky (Nibasit 625-P/LFe a SiC).

### 2.1.5. Měření teplotních průběhů

Na nařezané vzorky byly navařeny termočlánky, aby bylo možné později během PTA navařování monitorovat a zaznamenávat teplotu v různých místech vzorku. Na každý vzorek se navařovaly tři termočlánky, a to na čelní, pravou boční a spodní stěnu vždy do geometrického středu těchto stěn. Rozmístění termočlánků na vzorku je patrné z Obrázku 12.



Obrázek 12: Umístění termočlánků na vzorku

Před zahájením navařování byly termočlánky navařené na vzorku připojeny k univerzální měřicí ústředně s datalogerem Ahlborn Almemo 5690-2M, která je vidět na Obrázku 13.

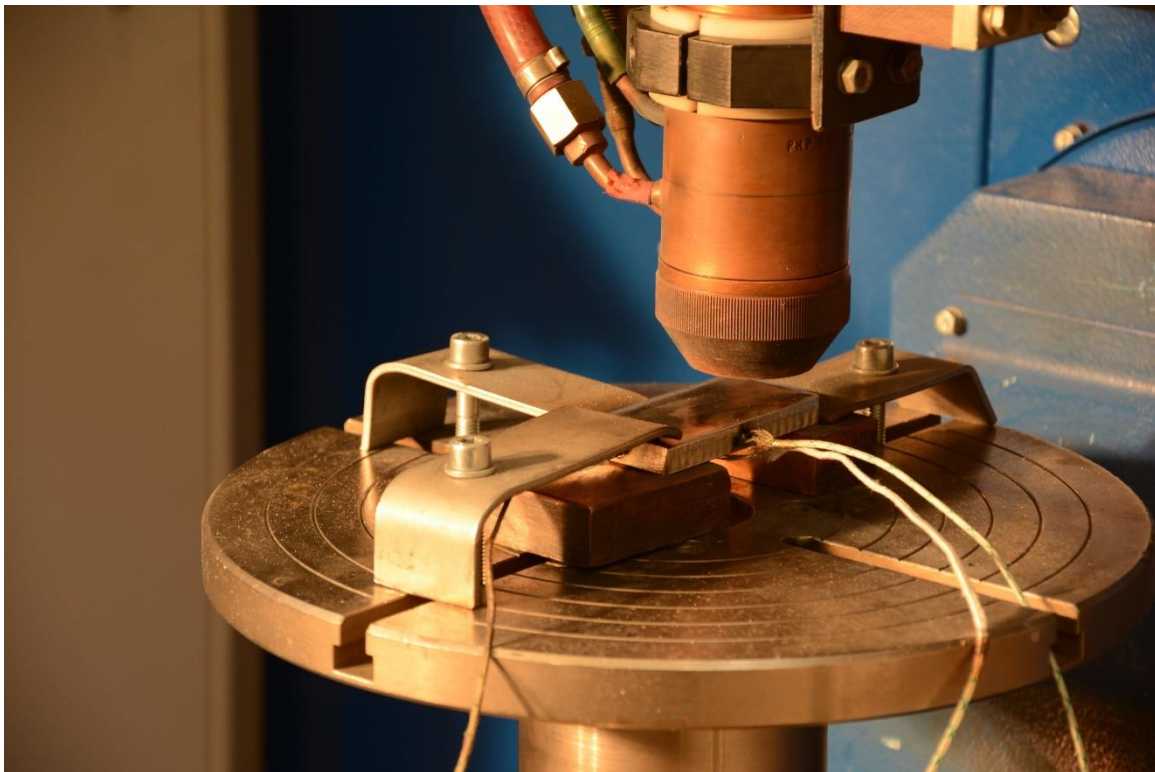


Obrázek 13: Univerzální měřicí ústředna Ahlborn Almemo 5690-2M (25)

Pomocí měřicí ústředny byly v intervalech po 0,06 s zapisovány hodnoty aktuální teploty, a to jak během navařování, tak i během chladnutí vzorků. Ukončení záznamu teplot bylo stanoveno na 7 minut, neboť v tomto čase již byly teploty vzorků jen přibližně 350 °C a teplotní vývoj pod touto teplotou již není pro experiment důležitý. Naměřené hodnoty byly pomocí programu excel převedeny do grafů závislosti teploty [°C] na čase [min].

### 2.1.6. Navařování vzorků

Připravené vzorky základního materiálu byly upnuty na polohovací stůl pomocí upínek. Vzorky byly podloženy dvěma měděnými kvádry, které uprostřed vytvořily místo pro středový termočlánek. Jejich hlavní funkcí bylo odvádět dostatečně rychle teplo ze základního materiálu. Pro tento účel je měď vhodným materiálem díky své velmi dobré tepelné vodivosti. Při upevňování vzorku je nutné postupovat velmi opatrně, aby nedošlo k poškození upevnění termočláneků, a tím k selhání měření tepelného průběhu během navařování. Upnutý vzorek připravený k zahájení navařování je vidět na Obrázku 14.



Obrázek 14: Vzorek připravený k navařování



## 2.1.7. Nastavené parametry procesu navařování

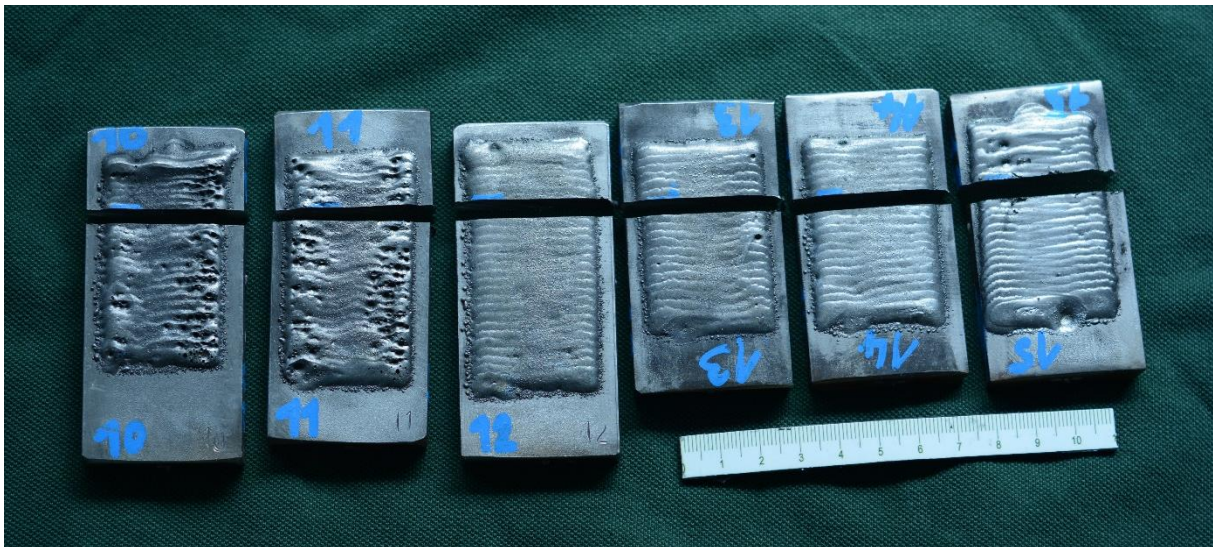
Parametry procesu navařování jednotlivých vzorků jsou zaznamenány v Tabulce 5.

Tabulka 5: Parametry procesu navařování

<b>Vzorek</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
Horní proud oblouku [A]	140	170	130	169	156	230
Dolní proud oblouku [A]	55	55	55	55	55	55
Průtok plazmového plynu						
Průtok ochranného plynu						
Frekvence pulzace [Hz]	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7
Rychlost podávání [dílky stupnice]	15	15	15	15	15	14
Koncentrace SiC [%]	30	30	15	22	10	0
Šířka návaru [mm]	28	28	28	28	28	28
Lineární rychlost [mm/s]	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Pauza v krajních polohách [s]	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Přehřev [°C]	Bez přehřevu	200	200	110	140	Bez přehřevu

### 2.1.8. Příprava vzorků pro experimenty

Navážené vzorky byly pečlivě označeny číslem na několika místech a následně na metalografické pile rozřezány kolmo na osu návaru. Z každého vzorku vznikly dva okrajové kusy a jeden středový kus s tloušťkou 7 mm. Tento středový kus byl ihned po odříznutí označen číslem vzorku a jedna jeho strana byla zakonzervována vrstvou laku, aby nedošlo k oxidaci před broušením a leštěním. Poté co byly takto nařezány a ošetřeny všechny vzorky, byly zality do pryskyřice a byl na nich proveden metalografický výbrus a leštění. Po tomto procesu již byly vzorky připraveny pro světelnou mikroskopii a měření tvrdosti. Leptání na vzorcích provedeno nebylo, přestože by nejspíše přineslo možnost kvalitnějšího pozorování pomocí světelné mikroskopie, ale mohlo by být významným negativním činitelem při pozorování vzorků pomocí elektronové mikroskopie. Před prováděním elektronové mikroskopie byly vzorky na 24 hodin umístěny do vakua, aby došlo k odsání vzduchu z porézní struktury pryskyřice. Rozřezový plán vzorků bez částí určených pro metalografický výbrus je vidět na Obrázku 15.



Obrázek 15: Rozřezový plán

### 2.1.9. Pozorování mikrostruktury

Pro pozorování mikrostruktury návaru, jeho spojení se základním materiálem, pórovitosti a distribuce různých částic, byla využita světelná mikroskopie. Vzorky, které byly zality do pryskyřice a byl na nich proveden metalografický výbrus, byly pozorovány na světelném mikroskopu Axio Observer D1m od společnosti ZEISS, který je vidět na Obrázku 16. Tento mikroskop je uzpůsobený pro pozorování mikrostruktury materiálů a maximální zvětšení je 1000x. (22)



Obrázek 16: Světelný mikroskop ZEISS Axio Observer D1m (22)

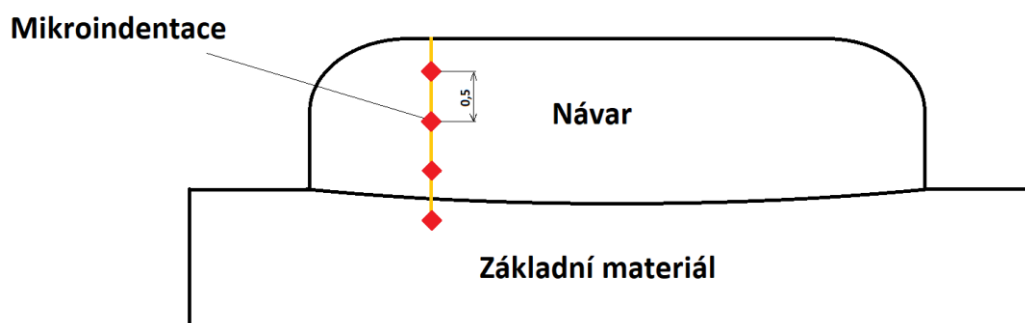
### 2.1.10. Měření mikrotvrdosti

Na metalografických vzorcích bylo provedené také měření mikrotvrdosti. Mikrotvrdost se měří nepřímo, tedy měřením úhlopříček jehlanu, který zůstane jako otisk diamantového indentoru v materiálu. Pro měření mikrotvrdosti byl využit tvrdoměr od společnosti Buehler typu IndentaMET 1104, který je vidět na Obrázku 17.



Obrázek 17: Tvrdoměr Buehler IndentaMET 1104

Hmotnost vlačující indentor do materiálu byla 1 kg a doba vlačování 10 s. Vtisky byly prováděny po 0,5 mm od sebe. První vtisk byl proveden do základního materiálu (0,2 mm pod hranicí ZM a PM) a následně 3 vtisky do materiálu návaru směrem k jeho povrchu. V každé hloubkové hladině byly takto změřeny 3 hodnoty a do výsledků potom zapsán jejich aritmetický průměr. Umístění bodů měření tvrdosti na řezu vzorkem je patrné z Obrázku 18, kde je pro zjednodušení v každé hloubkové hladině nakreslena jen jedna mikroindentace.

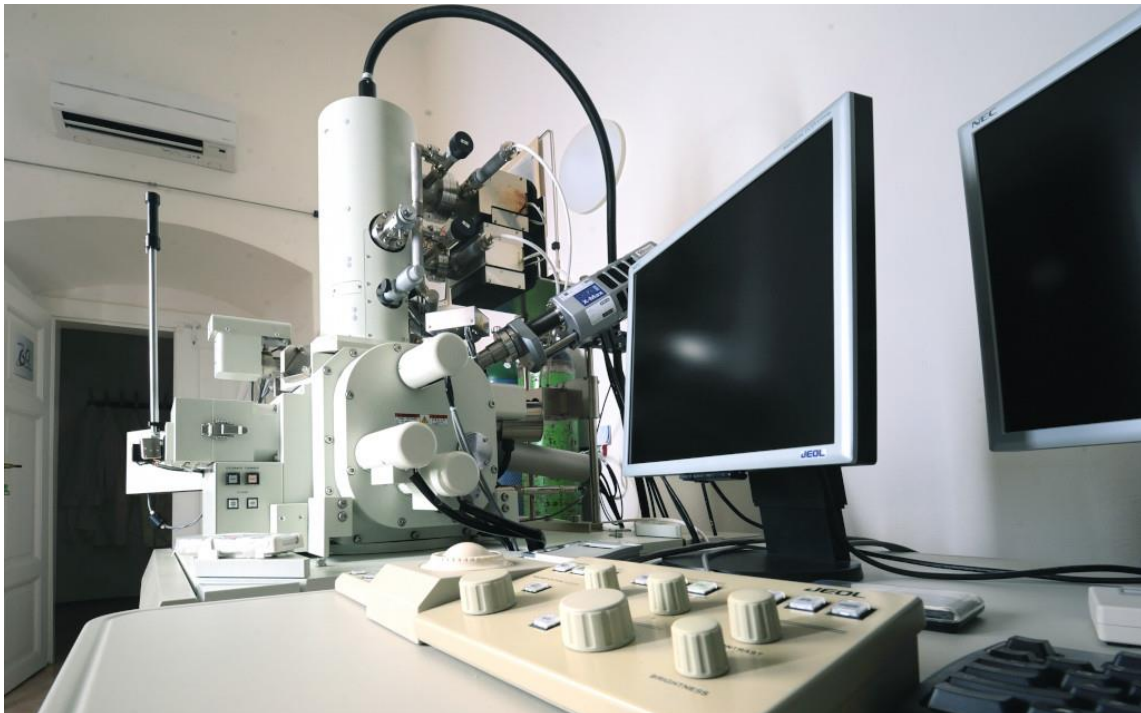


Obrázek 18: Umístění mikroindentací při měření tvrdosti

### 2.1.11. Pozorování mikrostruktury a chemického složení

Pro zjištění chemického složení jednotlivých fází v mikrostruktuře byl vzorek číslo 10 podroben také skenovací elektronové mikroskopii. Pozorování bylo provedeno pouze na jednom vzorku, neboť lze předpokládat, že výsledky tohoto experimentu jsou aplikovatelné na všechny zbylé vzorky a na fotografie jejich mikrostruktury pořízené na světelném mikroskopu.

Skenovací elektronový mikroskop, který je na FS ČVUT k dispozici je přístroj od Japonské firmy JEOL. Typ mikroskopu je JSM-7600F. Tento mikroskop je k vidění na Obrázku 19.



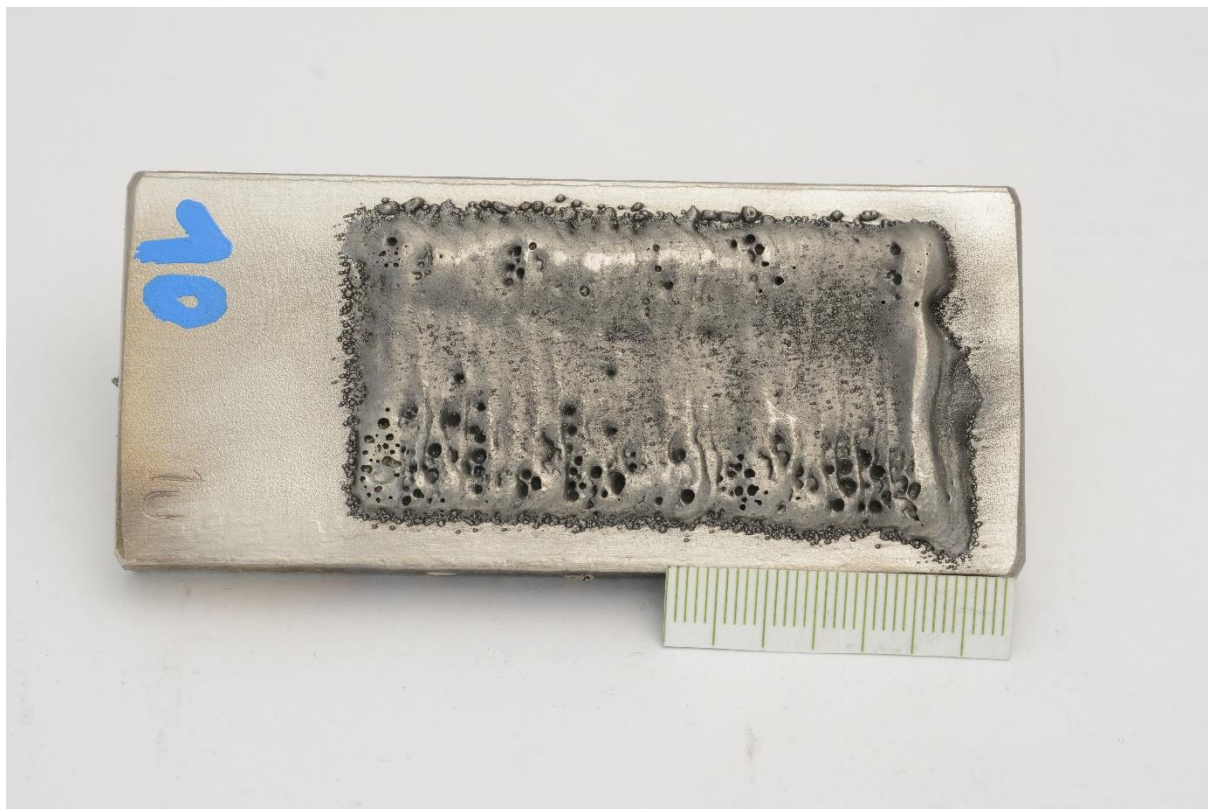
Obrázek 19: Skenovací elektronový mikroskop JEOL JSM-7600F (24)

Pomocí elektronového mikroskopu byly pořízeny fotografie mikrostruktury s podstatně větším zvětšením, než tomu bylo u mikroskopie světelné. Hlavním výstupem tohoto experimentu je však mapa mikrostruktury návaru, která přináší informace o procentuálním zastoupení jednotlivých prvků v různých fázích a částicích mikrostruktury.

## 2.2. Výsledky a diskuze

### 2.2.1. Vzorek 10

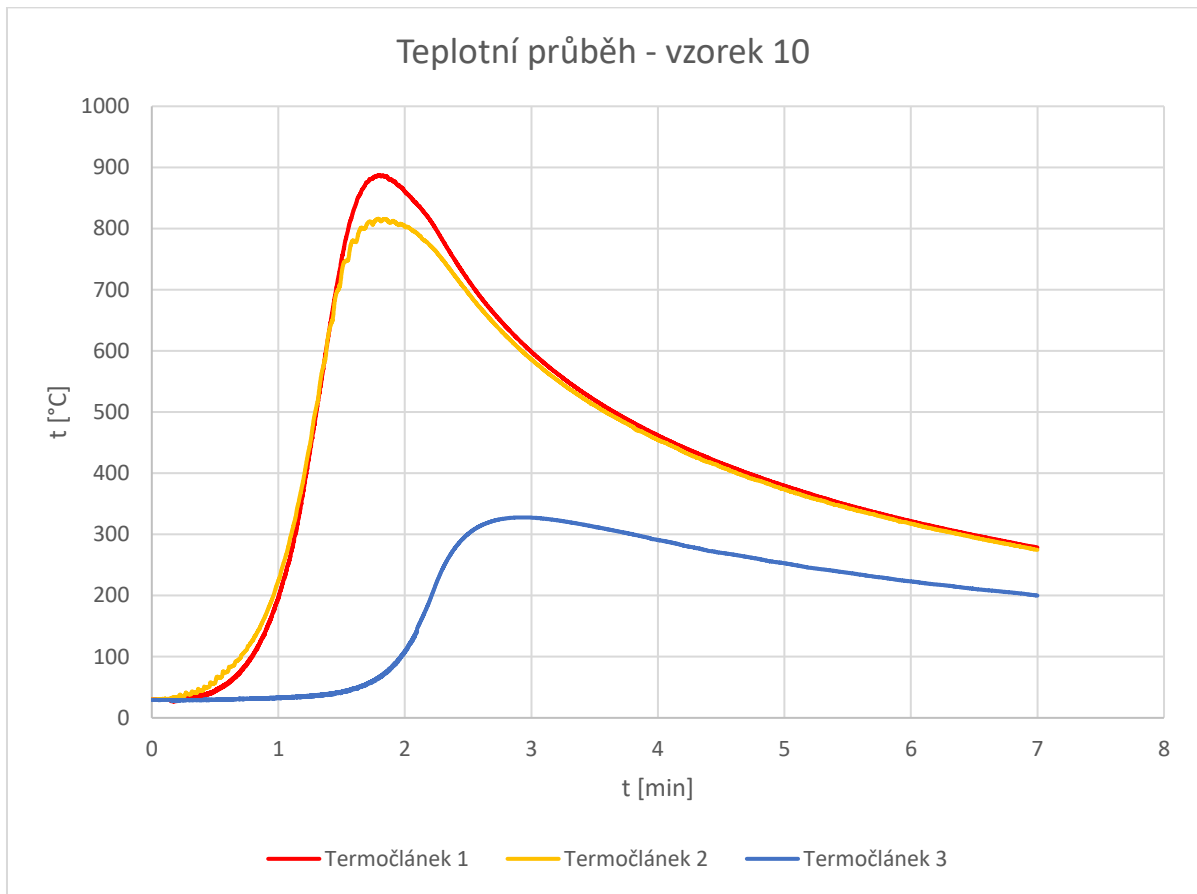
Vizuální hodnocení



Obrázek 20: Vzorek 10, vizuální kontrola

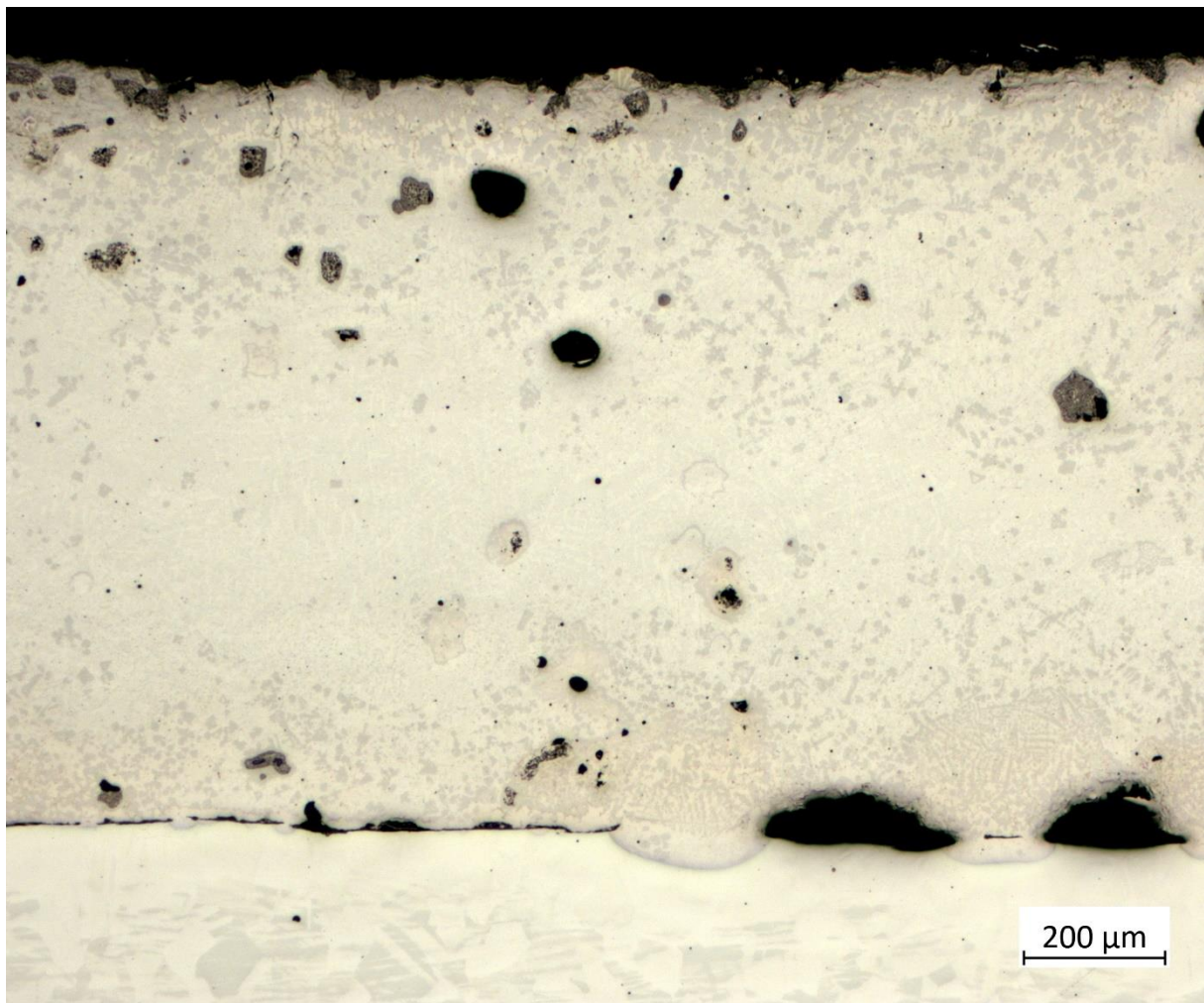
Vzorek číslo 10, který obsahuje 30 % SiC v přídavném materiálu, a který byl navařován bez předehřevu základního materiálu, má velmi mnoho pórů, které vystupují na povrch návaru. To může být způsobeno vysokou vlhkostí prášku, nízkou teplotou základního materiálu nebo přílišnou koncentrací SiC v návaru. Před příštím návarem je nutné použité práškové přídavné materiály důkladně přesušit. Pro využití v praxi je takovýto návar z důvodu pórovitosti nepřijatelný, pro provedení experimentů je však jeho kvalita dostatečná.

## Teplotní průběh při navařování



Obrázek 21: Vzorek 10 - teplotní průběh

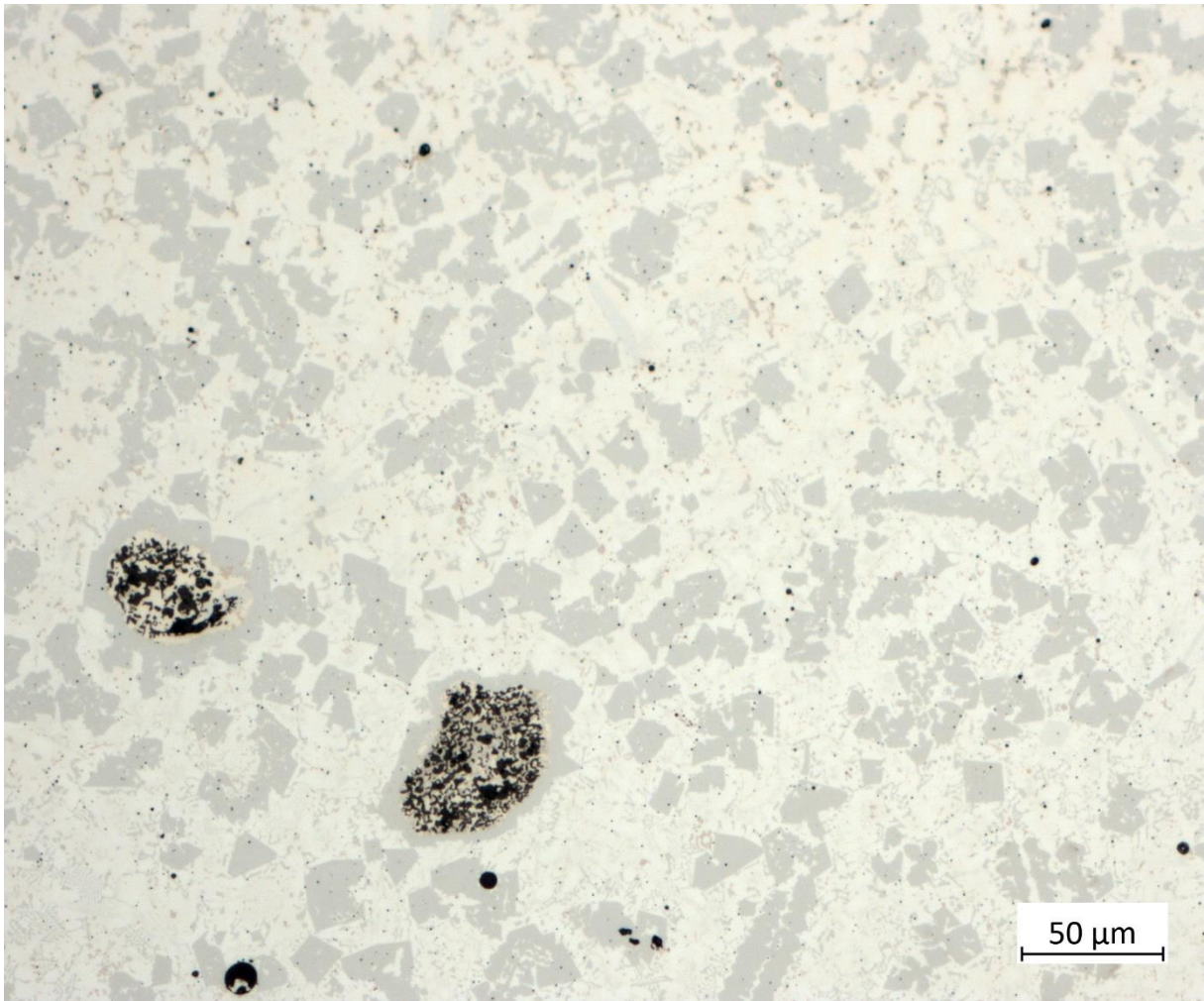
## Pozorování mikrostruktury návaru



Obrázek 22: Vzorek 10, zvětšení 50x

Povrch je nerovnoměrný. Celý objem návaru značně pórovitý. Hranice základního materiálu a návaru je neprovařená. Kvalitu návaru lze hodnotit jako nedostatečnou.

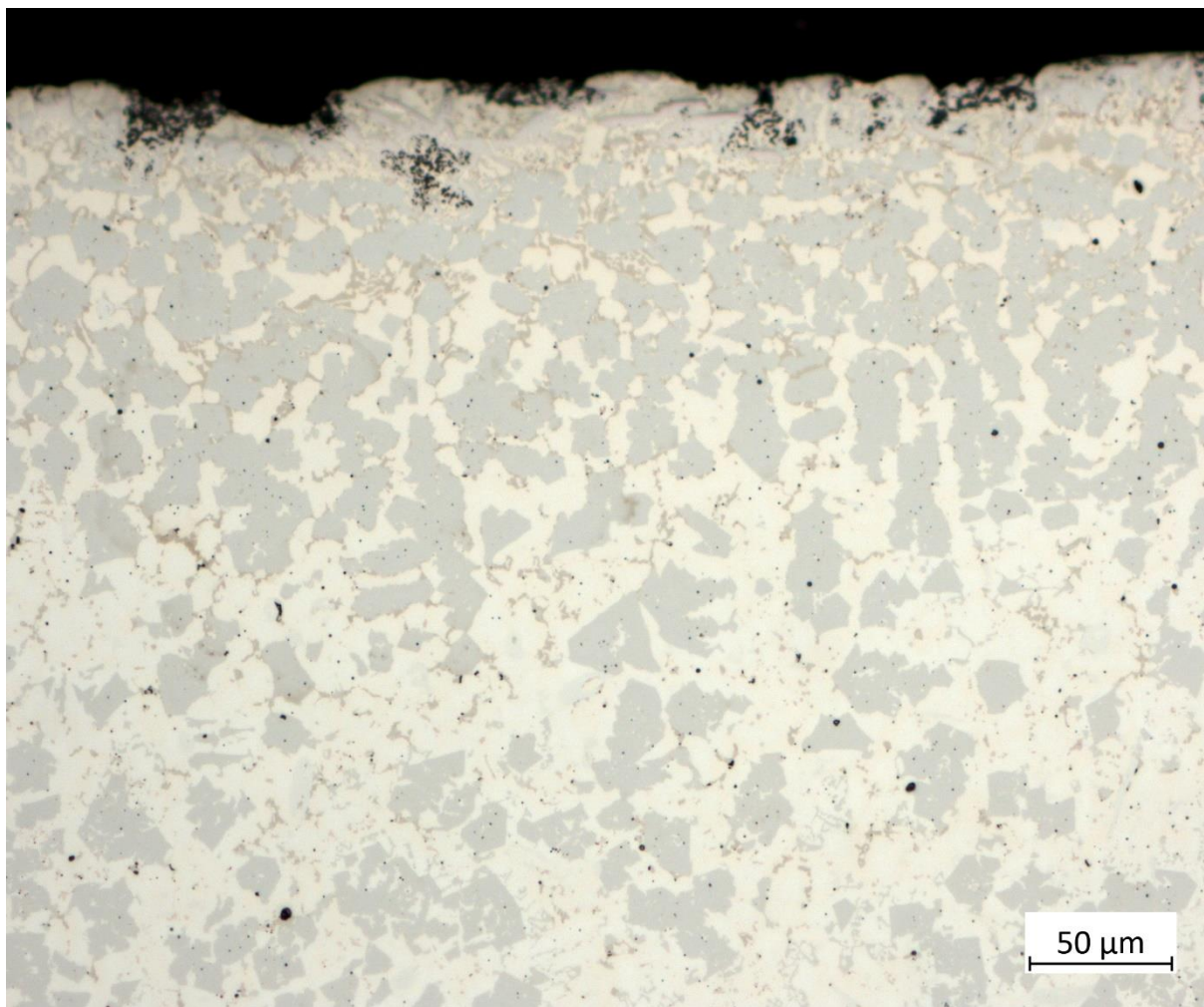




Obrázek 23: Vzorek 10, zvětšení 200x

V mikrostruktuře je hojně zastoupená fáze šedé barvy, o níž se lze domnívat, že v nějaké formě obsahuje rozpuštěný křemík z původního SiC. Dále jsou zde vidět částice s výrazným černým tečkováním, což indikuje vysoký obsah uhlíku v jejich struktuře. Šedě zbarvená fáze je více shromážděna v okolí těchto částic. Na několika místech je zde patrné mírné dendritické uspořádání šedé fáze.

Poznámka: pro popis mikrostruktury na obrázcích používám označení „šedá fáze“, neboť bližší informace o jejím složení je možné získat až pozorováním vzorku metodou SEM.

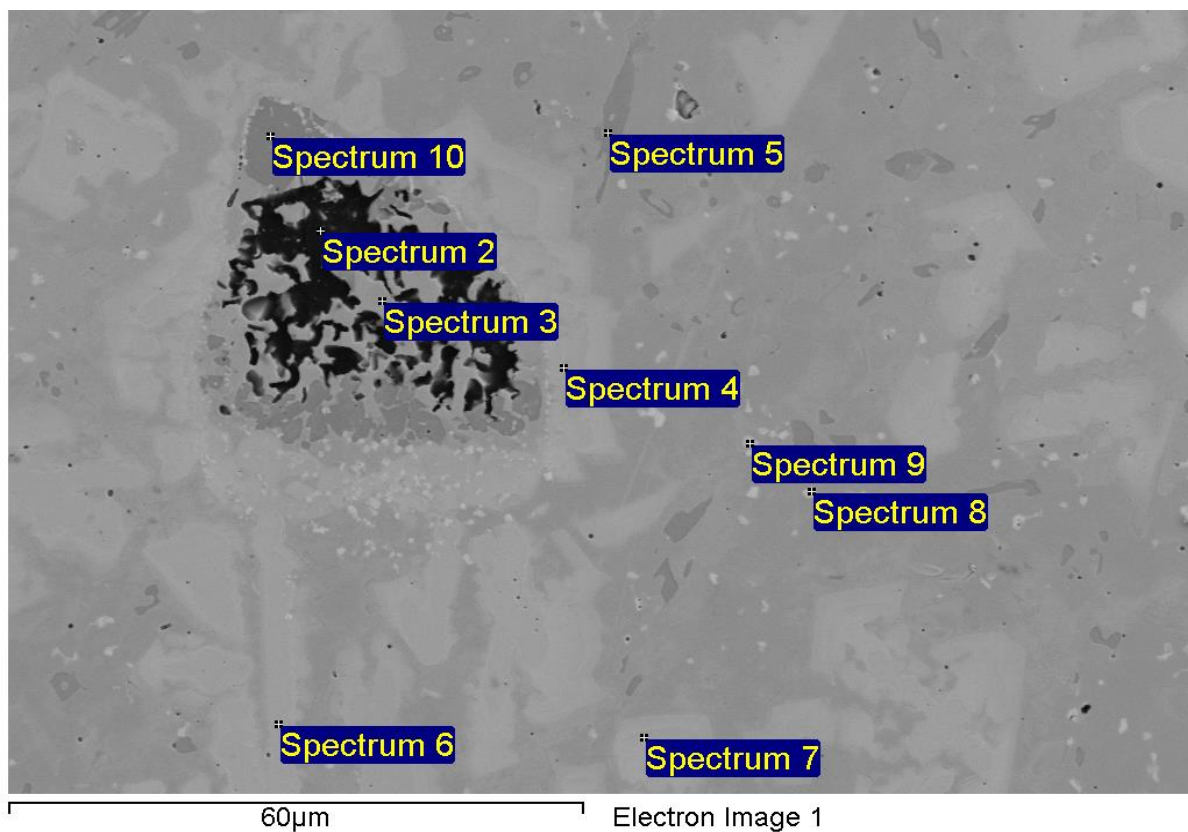


Obrázek 24: Vzorek 10, zvětšení 200x

Fáze zbarvená do šeda je více zastoupena v blízkosti povrchu návaru, z čehož lze usuzovat, že její hustota je nižší než hustota okolí, a tedy že tato fáze stoupá k povrchu ve svarové lázni.

Rozbor mikrostruktury a chemického složení strukturních fází

Na Obrázku 25 je vidět snímek z elektronového mikroskopu s vyznačenými body, ve kterých bylo zjišťováno chemické složení strukturních fází.



Obrázek 25: Snímek SEM s vyznačenými body pro zjišťování chemického složení fází vzorku 10

Tabulka 6: Chemické složení strukturních fází na Obrázku 25

Spectrum	C [%]	O [%]	Al [%]	Si [%]	Ti [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Ni [%]	Nb [%]	Mo [%]	Total [%]
Spectrum 2	86,99	6,84	0,1	0,5		0,36	0,13	0,94	3,49	0,16	0,5	100
Spectrum 3	5,47	1,15		7,11		5,44	0,38	0,59	79,25		0,62	100
Spectrum 4	10,5	1,12		6,95		21,3			29,9	5,23	25	100
Spectrum 5	14,33	1,39		0,13		71,66		0,27	7,45	0,17	4,6	100
Spectrum 6	10,63	0,92		6,66		22,09		0,15	28,81	5,01	25,72	100
Spectrum 7	10,57	0,95		7,54		25,52		0,14	32,16		23,12	100
Spectrum 8	13,89	1,3		1,94	0,14	9,21	0,14	0,35	29,33	36,14	7,56	100
Spectrum 9	22,81	0,93		0,24	0,17	3,56		0,17	4,39	60	7,73	100
Spectrum 10	20			0,04		67,19		0,14	1,61	0,87	10,16	100
Max.	86,99	6,84	0,1	7,54	0,17	71,66	0,38	0,94	79,25	60	25,72	
Min.	5,47	0,92	0,1	0,04	0,14	0,36	0,13	0,14	1,61	0,16	0,5	

Na základě EDS (energy dispersion spectrography) analýzy vzorku číslo 10 bylo zjištěno, že většina SiC se během procesu navařování rozložila a vznikly karbidy a částice čistého SiC.

Fáze charakterizována spektrem 2 obsahuje téměř čistý uhlík.

Fáze charakterizována spektrem 3 je matrice uvnitř uhlíkové částice, která je složena především z niklu a obsahuje přibližně 7 % křemíku. Tato fáze je značně ochuzena o uhlík (pouze 5,5 %), který pravděpodobně difundoval do částice čistého uhlíku. Je otázkou, zda se matrice dostala do uhlíkové částice opravdu při navařování, nebo zda tam byla zanesena během přípravy vzorku, tedy nejspíše při leštění.

Spektrum 4 charakterizuje světle zbarvenou fázi, která se zformovala kolem uhlíkové částice. Je také ochuzena o uhlík. Obsahuje větší množství chromu, niklu a molybdenu, a přibližně 7 % křemíku, podobně jako spektrum 3.

Spektrum 5 odpovídá fázi, která obsahuje velké množství chromu (72 %). Část chromu se zde pravděpodobně nachází ve formě karbidů. Obsah uhlíku je přibližně 15 %. Je zde obsaženo 7,5 % niklu, který pochází z matrice.

Spektra 6 a 7 jsou podobná spektra světlých strukturních fází, které jsou složeny zejména z chromových a molybdenových karbidů. Zároveň také obsahují značné množství niklu, což je pravděpodobně způsobeno tím, že oblast analýzy chemického složení zasahuje i mimo hranice dané fáze.

Spektra 8 a 9 jsou částice niobových karbidů. Tyto karbidy vznikají při výrobě niklových slitin. V případě spektra 8 probíhalo měření chemického složení zřejmě na rozhraní částice a matrice, a tudíž je zde obsaženo 29 % niklu. Ve spektru 9 jsou příměsi ostatních kovů ve struktuře zastoupeny méně.

Spektrum 10 je podobné spektru 5. Obsahuje tedy chromové karbidy, menší množství molybdenových karbidů a přibližně 10 % niklu, což je pravděpodobně důsledkem oblasti analýzy přesahující hranice fáze.

## 2.2.2. Vzorek 11

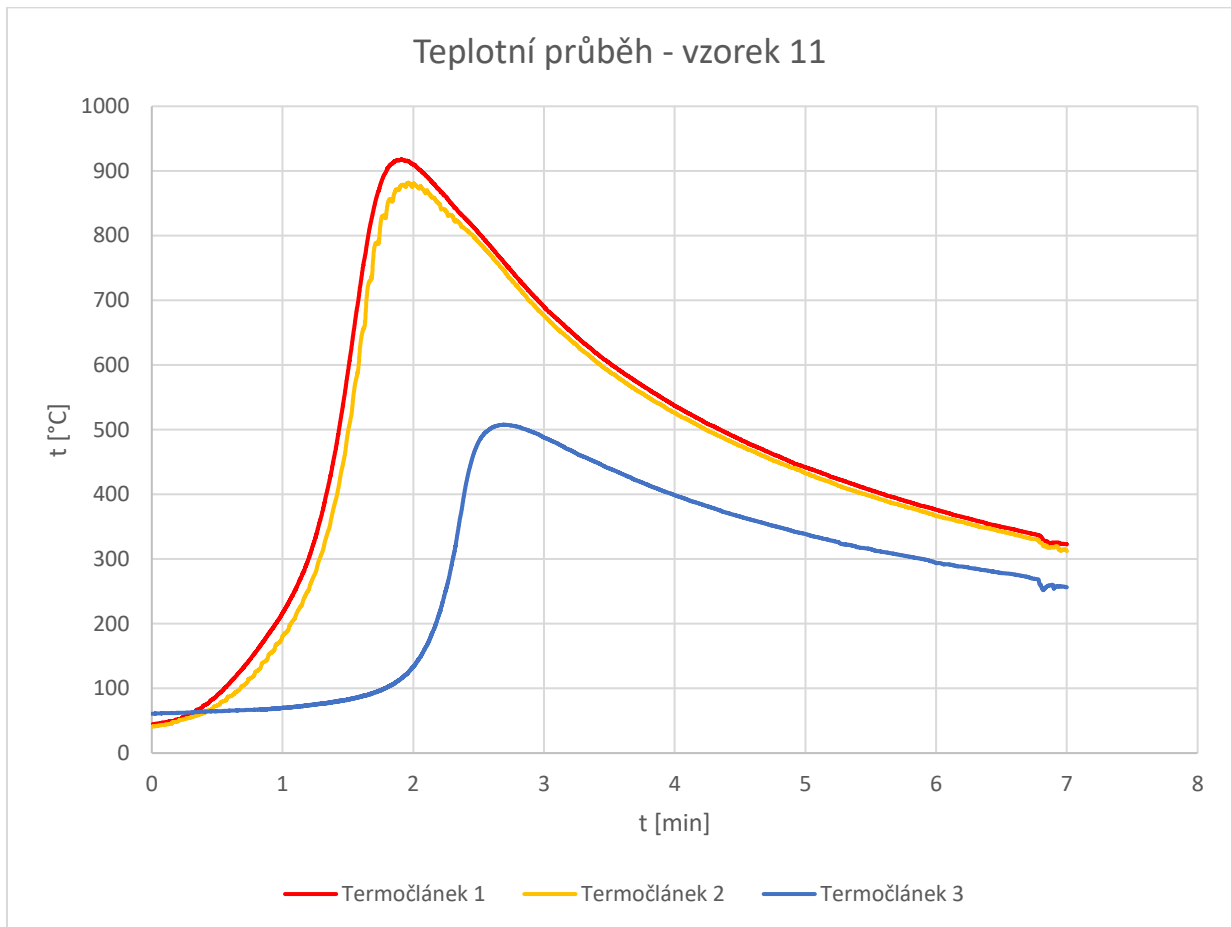
### Vizuální hodnocení



Obrázek 26: Vzorek 11, vizuální kontrola

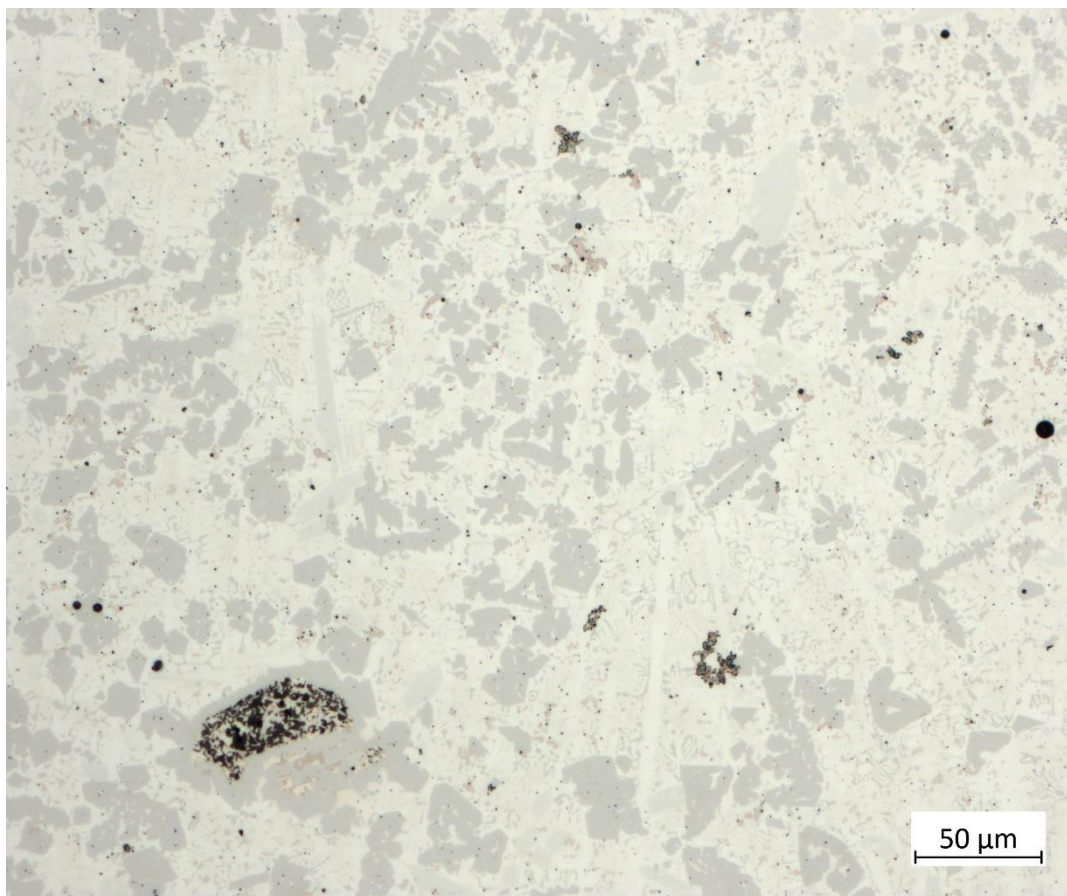
U vzorku číslo 11, který obsahuje v přídavném materiálu 30 % SiC, byl zvýšen horní proud oblouku z 140 A na 170 A s cílem dosáhnout lepšího smáčení základního materiálu svarovou lázní, čehož bohužel stejně dosaženo nebylo. Přídavný materiál byl přesušen. Vzorek byl v místě startu navařování předeřhát na cca. 200 °C pomocí pendlování navařovacího hořáku se zapáleným obloukem bez dodávání přídavného materiálu. Na pórovitost však provedené změny neměly významný vliv.

## Teplotní průběh při navařování



Obrázek 27: Vzorek 11 - teplotní průběh

## Pozorování mikrostruktury návaru

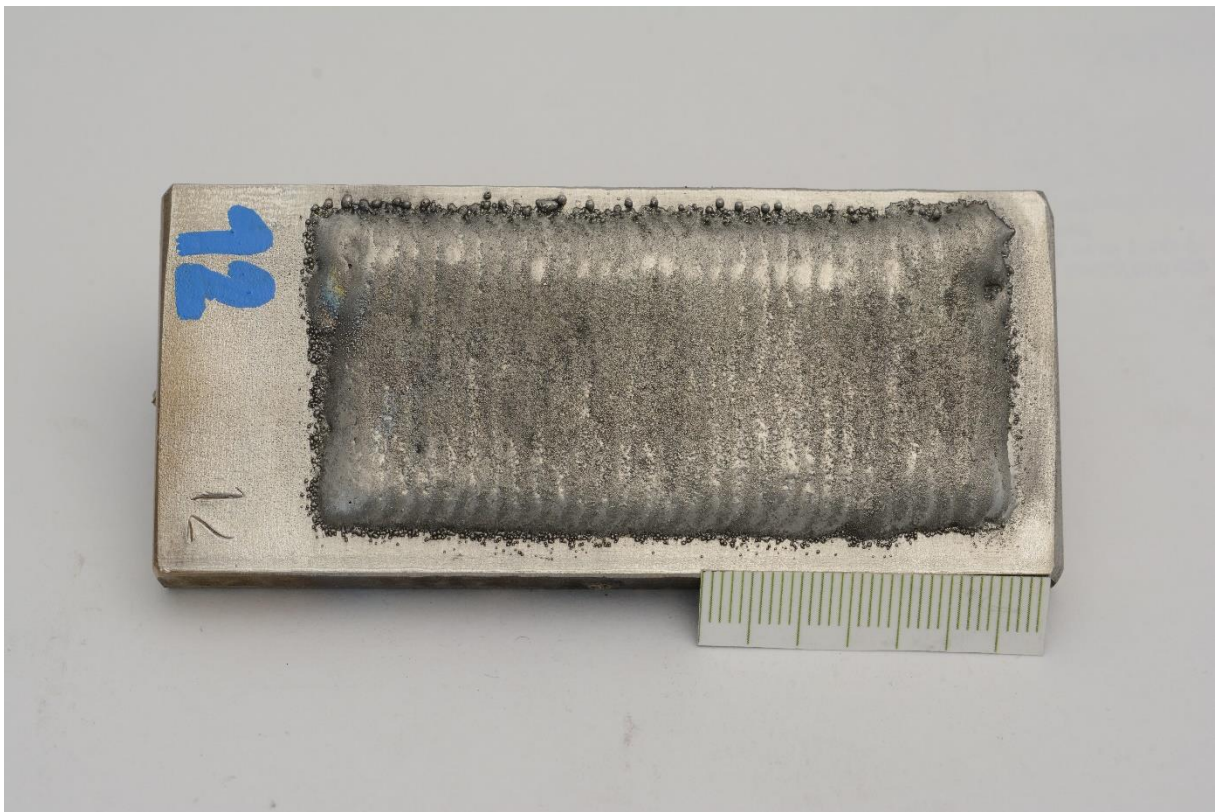


Obrázek 28: Vzorek 11, zvětšení 200x

Mikrostruktura návaru v případě vzorku číslo 11 je velmi podobná vzorku 10. To je dáno stejným procentuálním zastoupením SiC v přídatném materiálu. Jsou zde vidět útvary šedé fáze, které se místy formují do tvaru krátkých dendritů.

### 2.2.3. Vzorek 12

#### Vizuální hodnocení

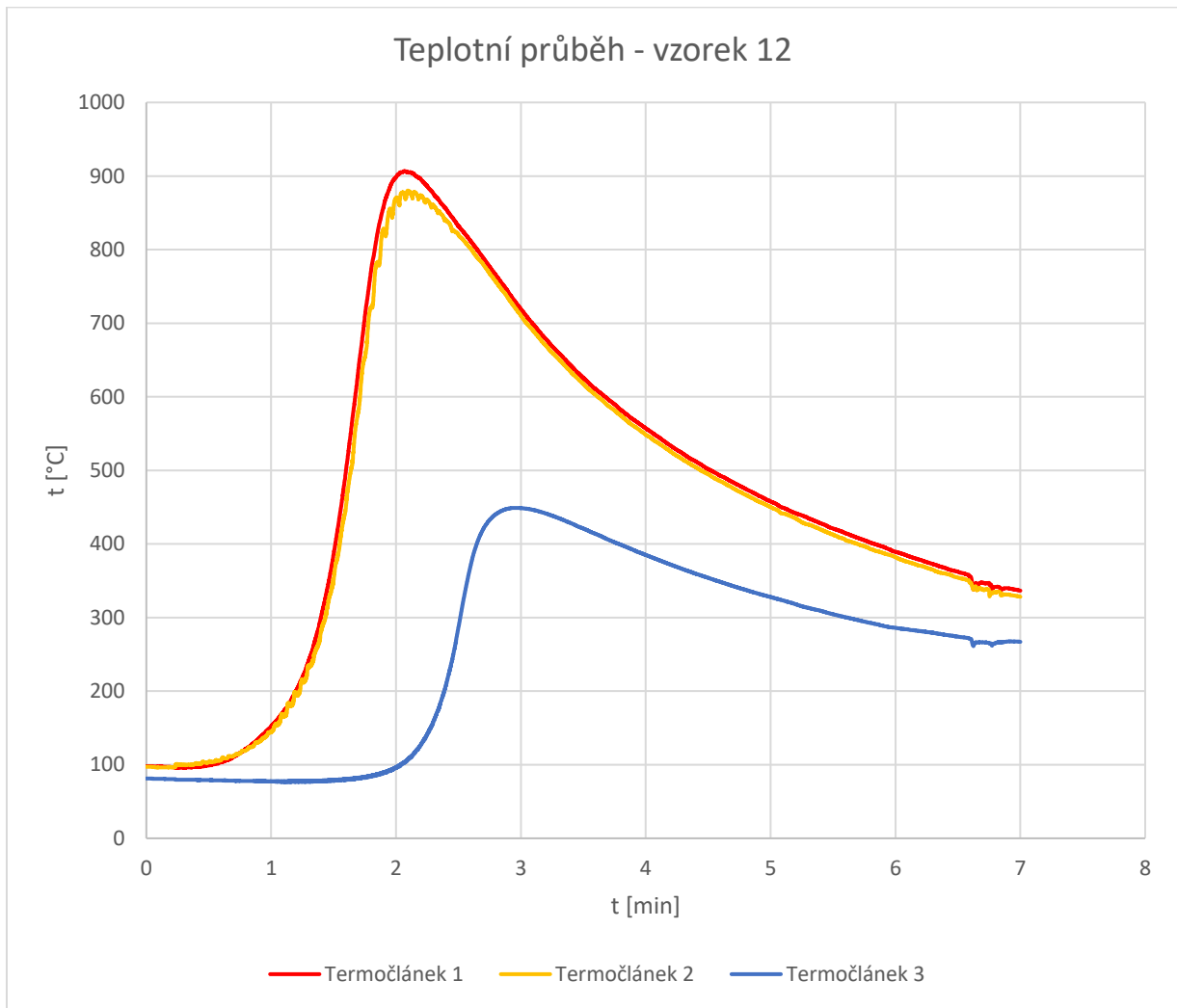


Obrázek 29: Vzorek 12, vizuální kontrola

Vzorek číslo 12 měl v přídavném materiálu oproti prvním dvěma vzorkům pouze poloviční koncentraci SiC, tedy 15 %. Před navařováním byl základní materiál opět na startu predehřát na cca. 200 °C. Horní navařovací proud byl snížen na 130 A. Vizuální kontrola tentokrát neodhalila povrchovou pórovitost vzorku, což je pravděpodobně dáno snížením koncentrace SiC v přídavném materiálu.

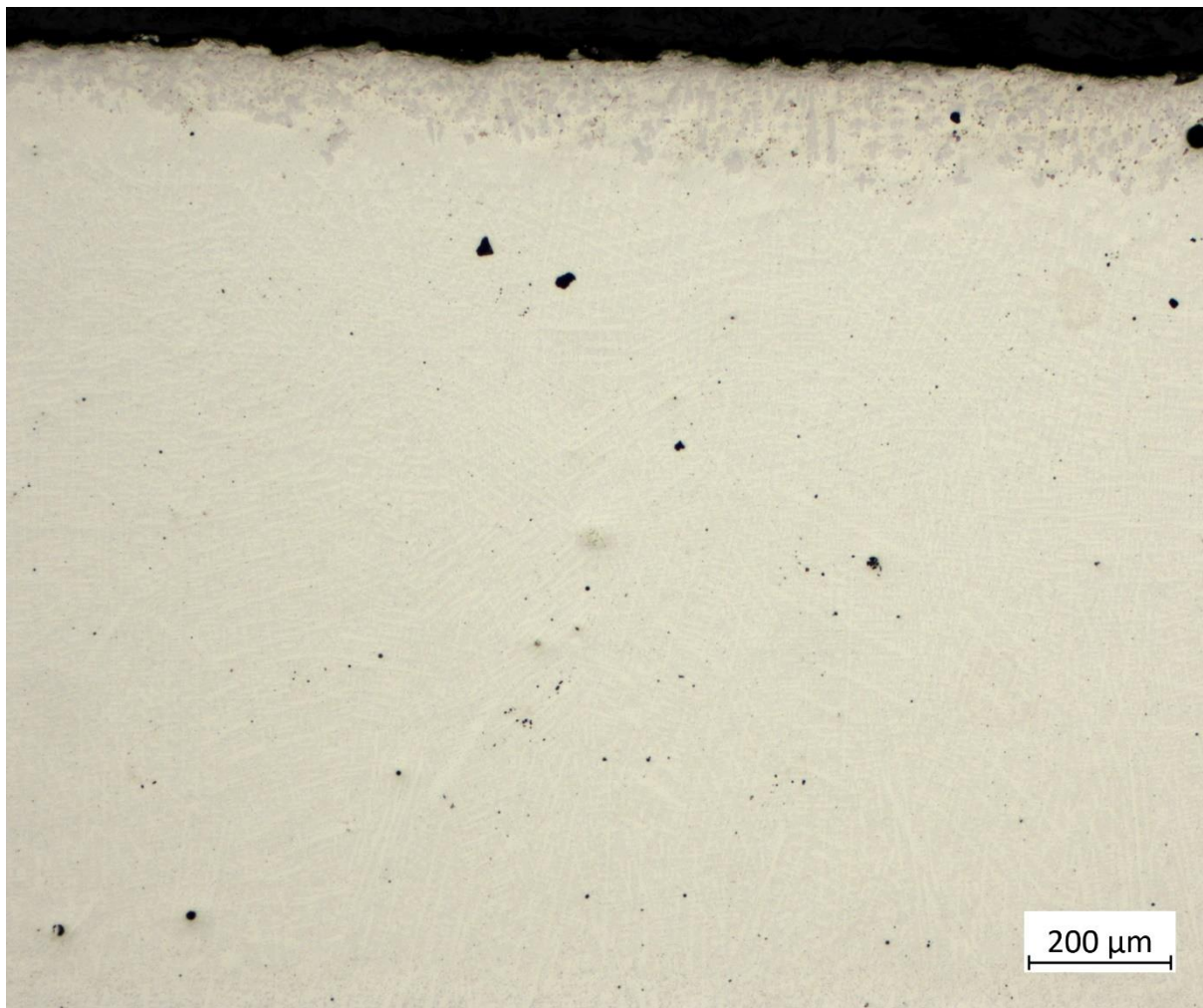


## Teplotní průběh při navařování



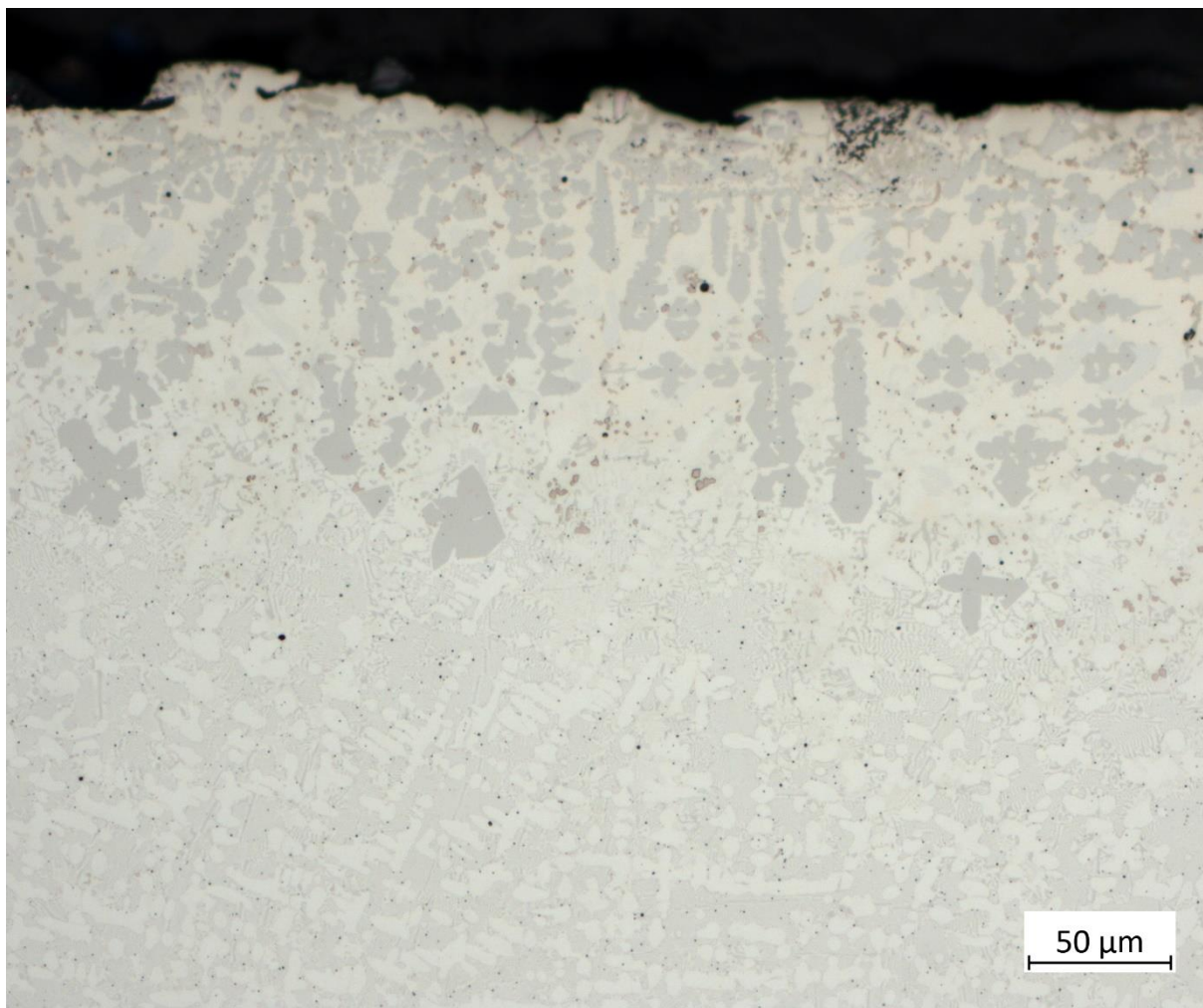
Obrázek 30: Vzorek 12 - teplotní průběh

## Pozorování mikrostruktury návaru



Obrázek 31: Vzorek 12, zvětšení 50x

Snímky vzorku 12 ukazují, že návar již není zdaleka tolik pórovitý, jako v předešlých případech. Na mikrosnímku je vidět jen malé množství pórů, a to malých rozměrů (řádově desítky  $\mu\text{m}$ ).

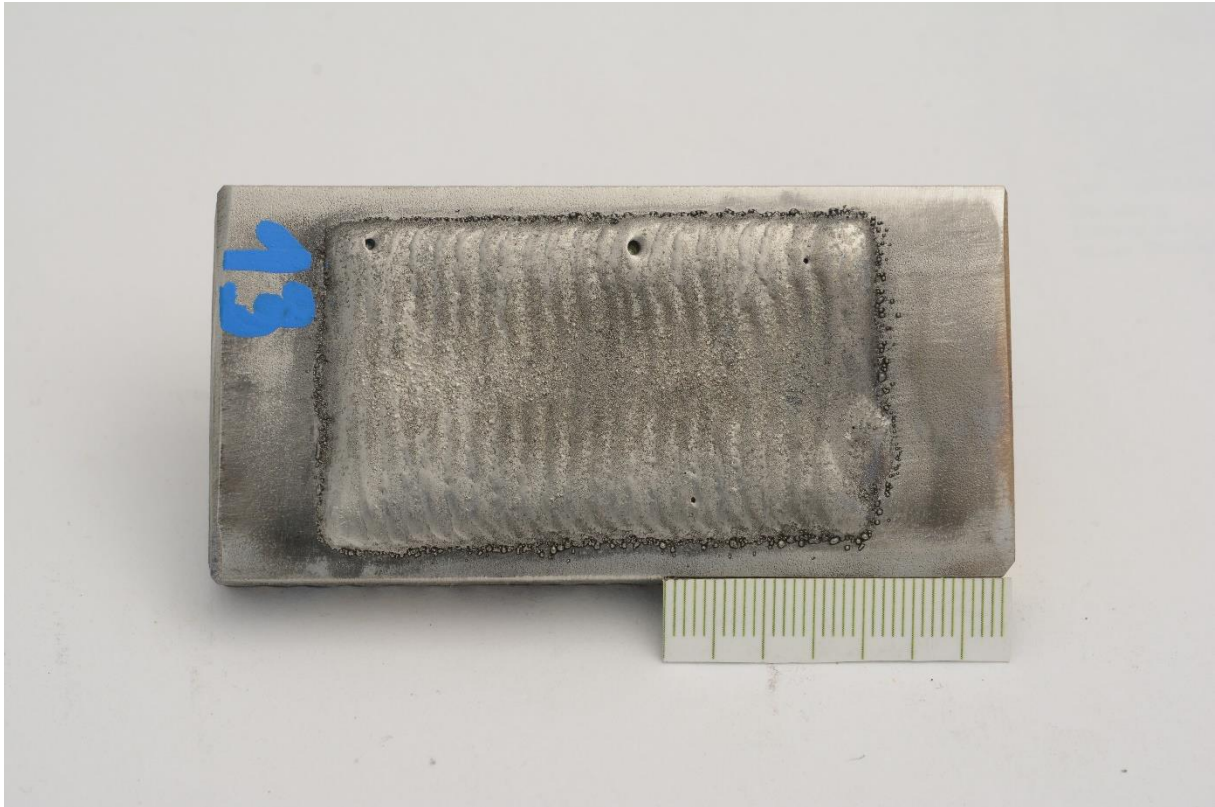


Obrázek 32: Vzorek 12, zvětšení 200x

Na Obrázku 32 je dobře patrné, že se zde šedě zbarvená fáze vyskytuje jen těsně pod povrchem, tedy do hloubky přibližně 200  $\mu\text{m}$ . Zbytek návaru je o tuto fázi ochuzen. Dále zde můžeme vidět, že se tato fáze vyloučila dendritickým uspořádáním. Křížové útvary viditelné na obrázku jsou pravděpodobně dendrity, které mají směr kolmý na rovinu řezu.

## 2.2.4. Vzorek 13

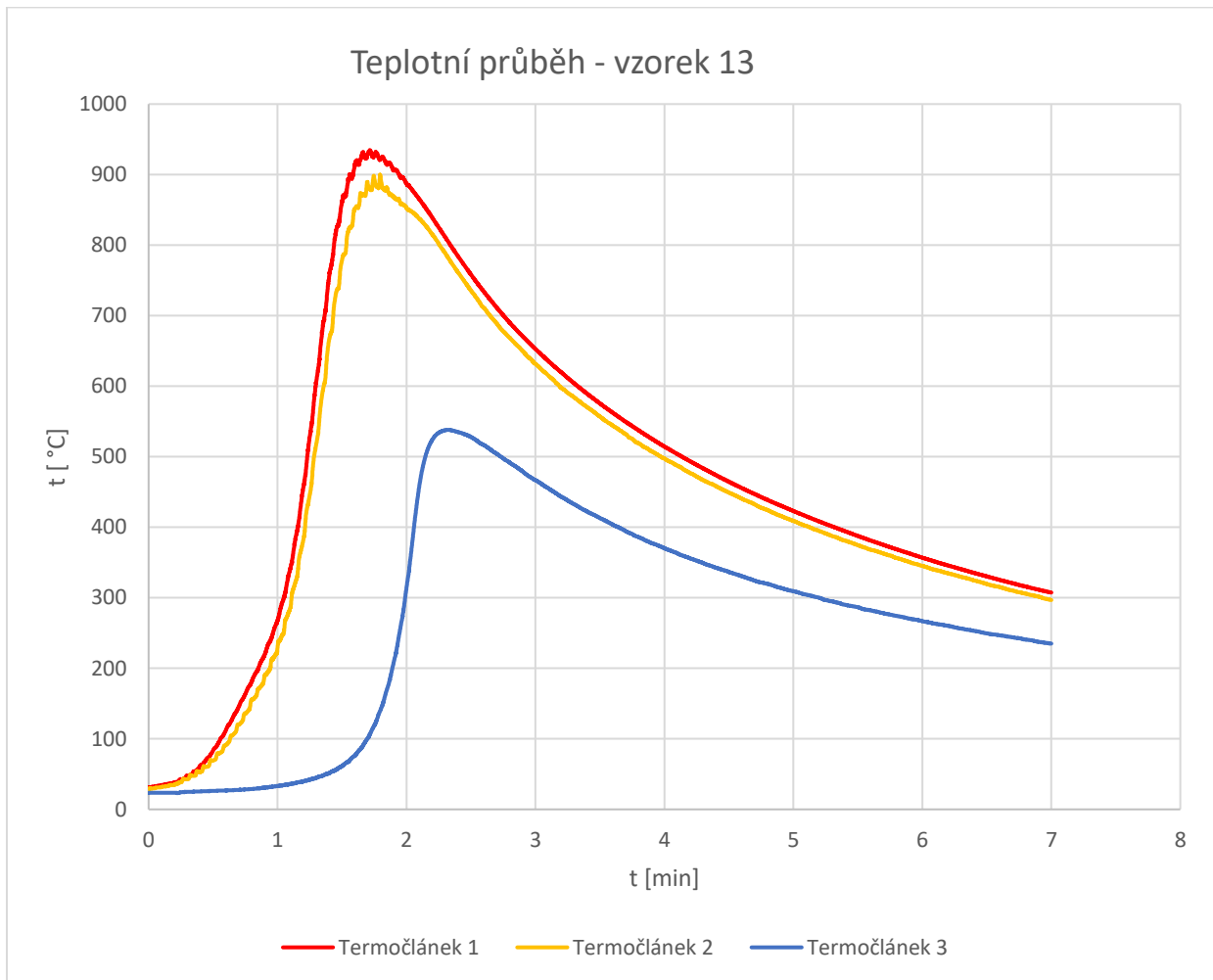
### Vizuální hodnocení



Obrázek 33: Vzorek 13, vizuální kontrola

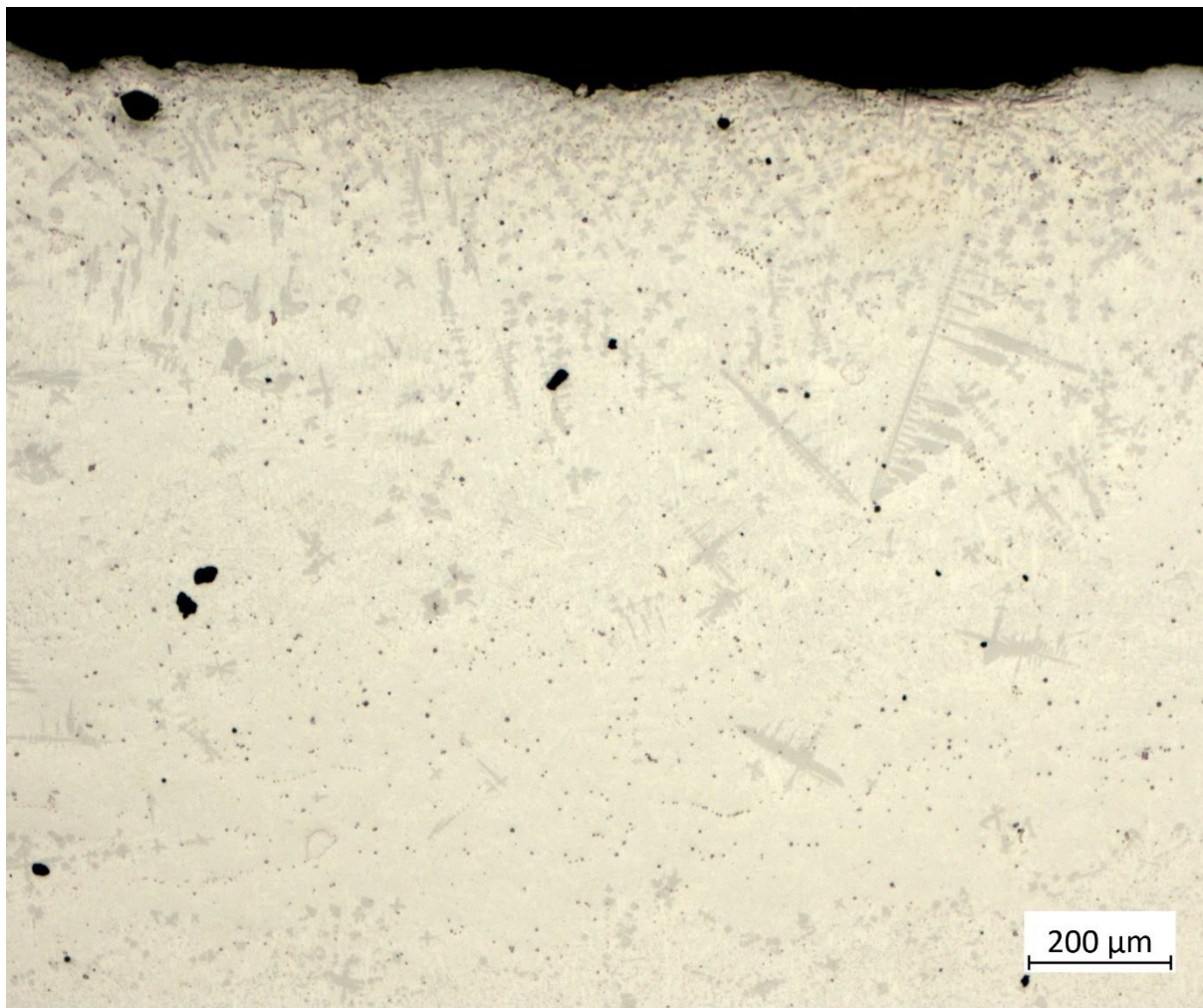
Koncentrace SiC v přídavném materiálu návaru byla stanovena přibližně na polovinu intervalu vymezeného již zkoušenými vzorky (15 % a 30 %), tedy na 22 %. Byl použit vyšší horní proud oblouku, a to 169 A. Předehřátí vzorku v místě startu stejným způsobem jako u předešlých vzorků, ale jen na teplotu cca. 110 °C. Povrchová pórovitost návaru je opět dobře patrná, i když póry nejsou zdaleka tak četné jako v případě vzorků 10 a 11.

## Teplotní průběh při navařování



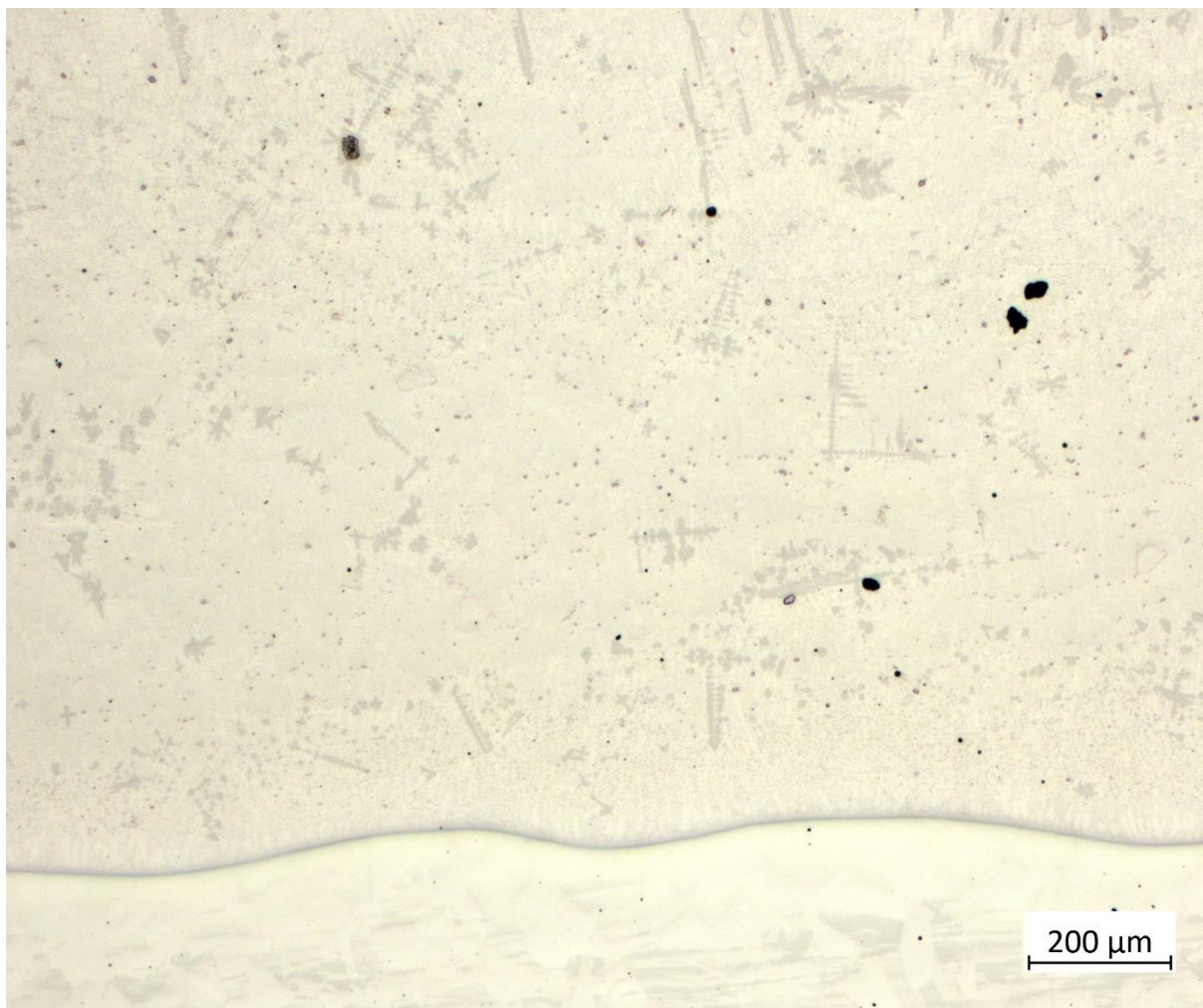
Obrázek 34: Vzorek 13 - teplotní průběh

## Pozorování mikrostruktury návaru



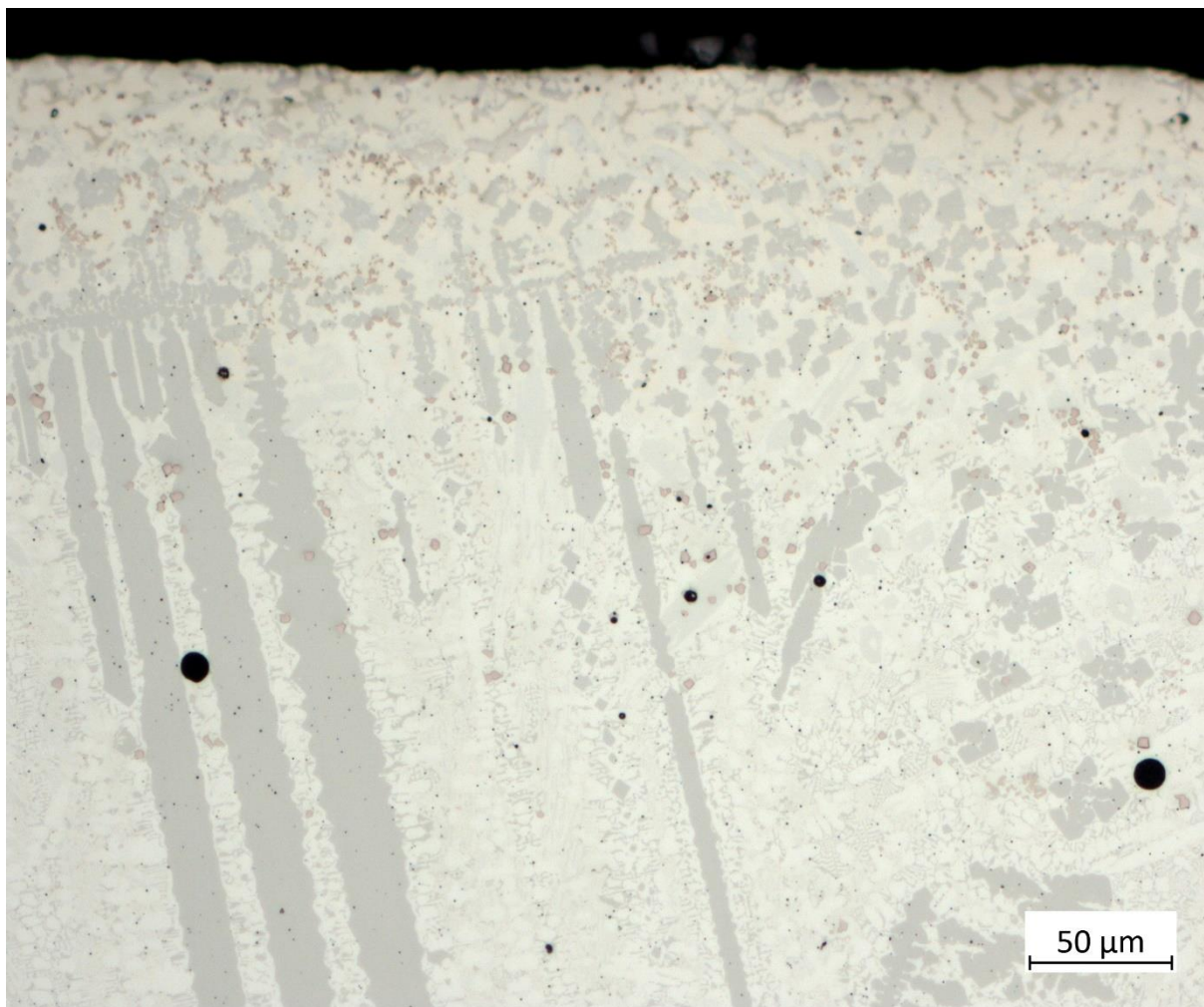
Obrázek 35: Vzorek 13, zvětšení 50x

Mikroskopický snímek vzorku 13 odhaluje mírnou podpovrchovou pórovitost. Fáze šedé barvy je opět výrazně soustředěna pod povrchem návaru.



Obrázek 36: Vzorek 13, zvětšení 50x

Hranice základního a přídatného materiálu je provařena.



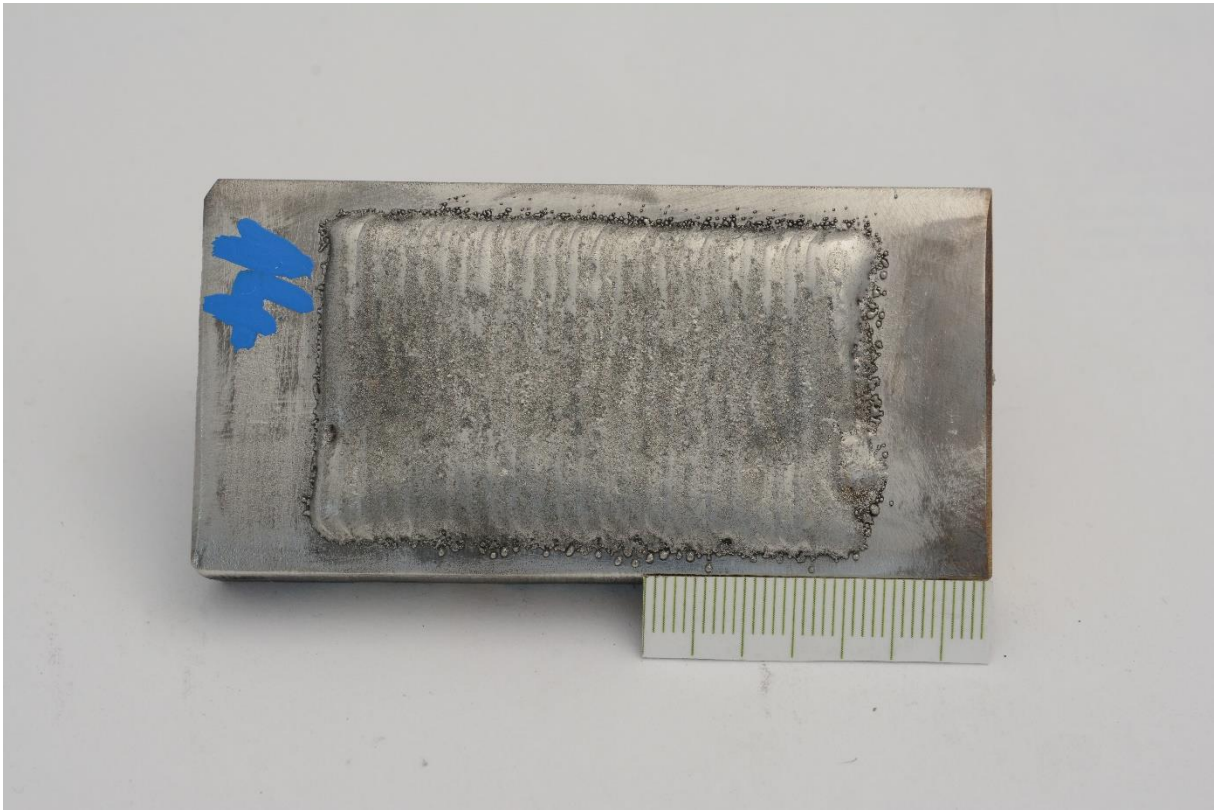
Obrázek 37: Vzorek 13, zvětšení 200x

Na Obrázku 37 jsou vidět velmi dlouhé a široké dendritické struktury vzniklé z šedé fáze. Domnívám se, že toto uspořádání je způsobeno kombinací vhodné koncentrace SiC v přídatném materiálu a teplotního průběhu navařování. Z diagramu tepelného průběhu při navařování vzorku 13 vyplývá, že maximální dosažená teplota základního materiálu byla v místech umístění termočlánků až o 40 °C vyšší než v předchozích případech, což může být důvodem tohoto zvláštního dendritického uspořádání.



## 2.2.5. Vzorek 14

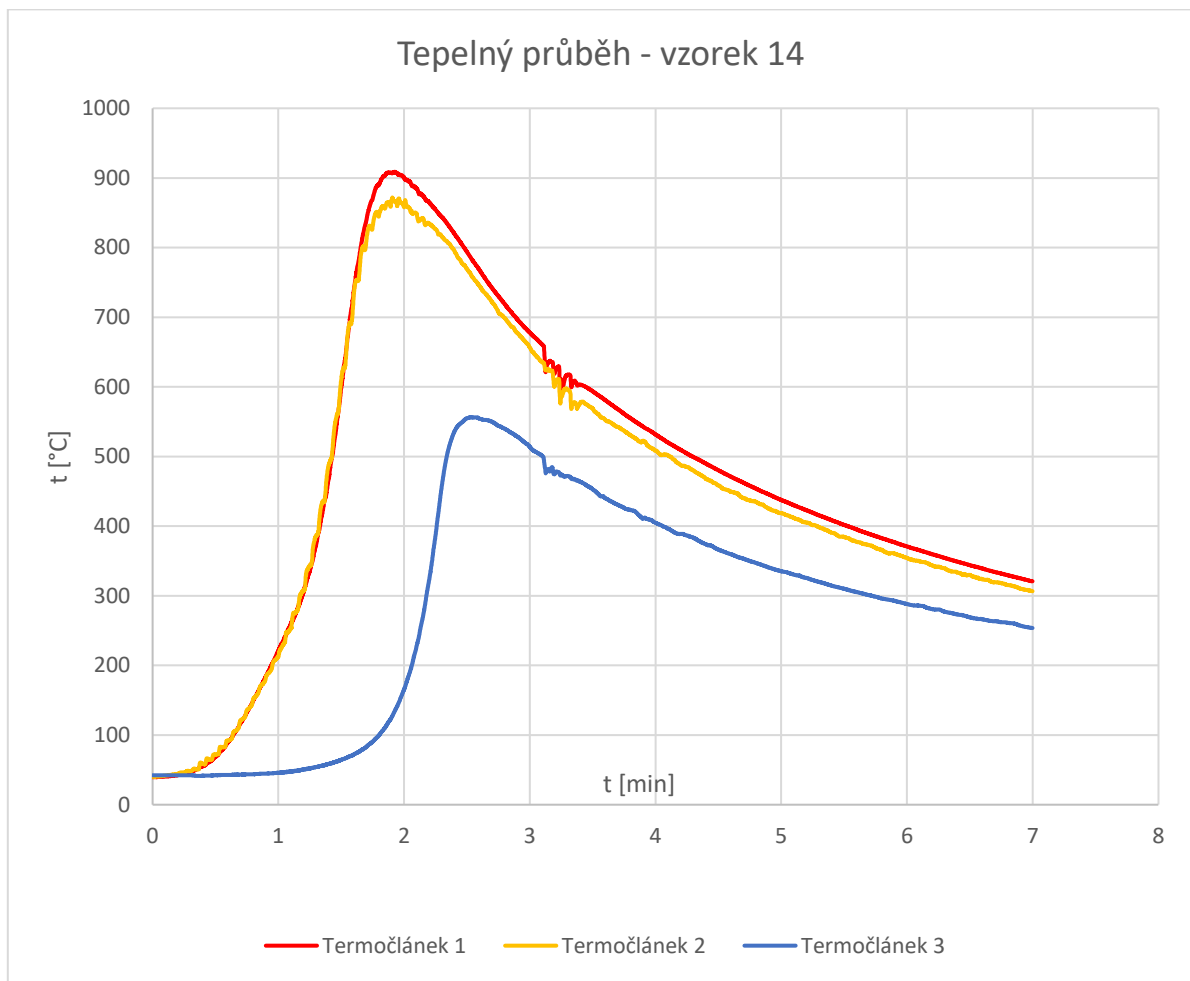
### Vizuální hodnocení



Obrázek 38: Vzorek 14, vizuální kontrola

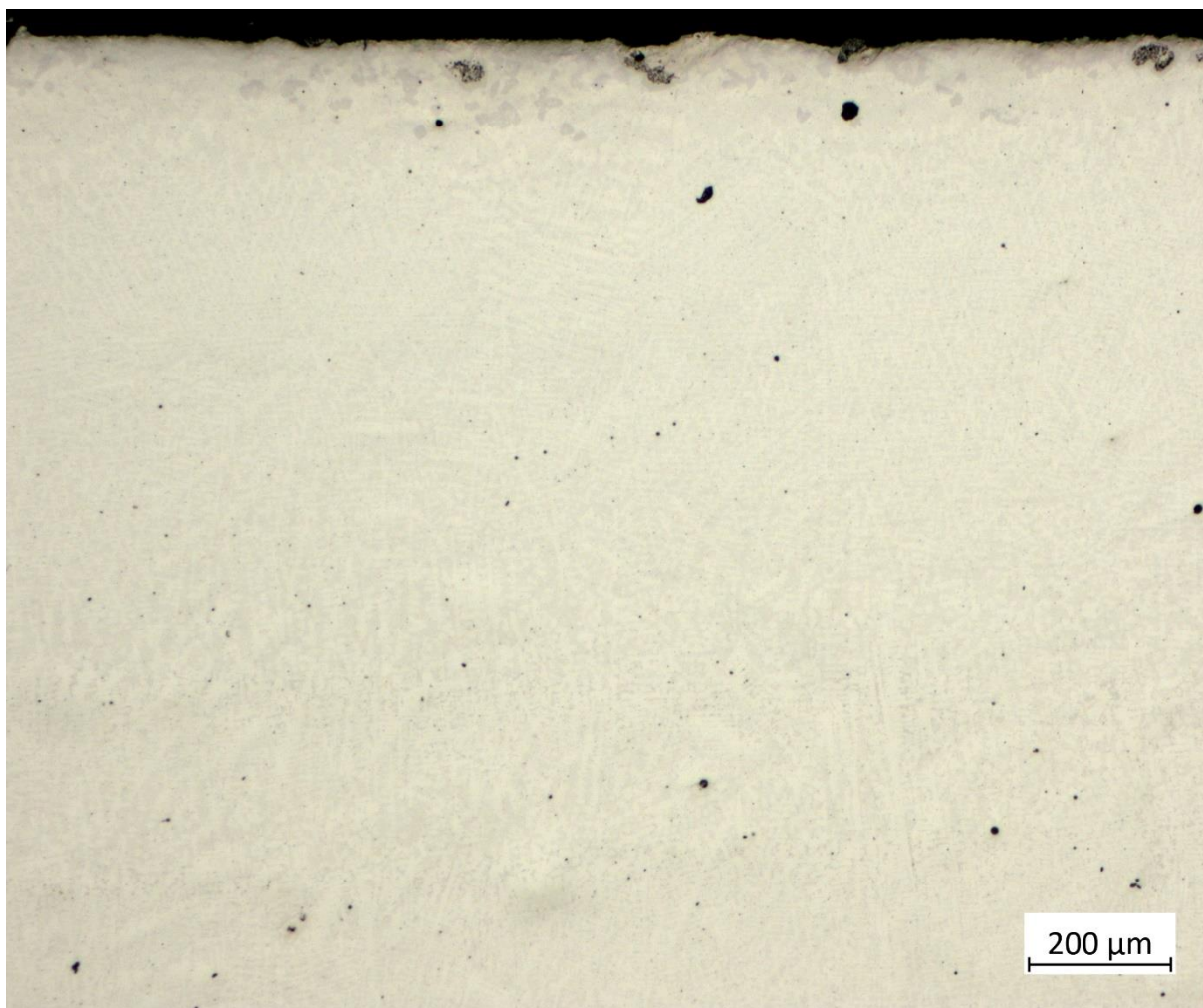
Vzorek číslo 14 obsahuje 10 % SiC v přídatném materiálu. Horní proud oblouku byl snižen na 156 A. Předehřátí místa startu navařování bylo v tomto případě na cca. 140 °C a bylo opět provedeno pendlováním hořáku s vypnutým podáváním přídatného materiálu. Na vzorku není viditelná povrchová pórovitost.

## Teplotní průběh při navařování



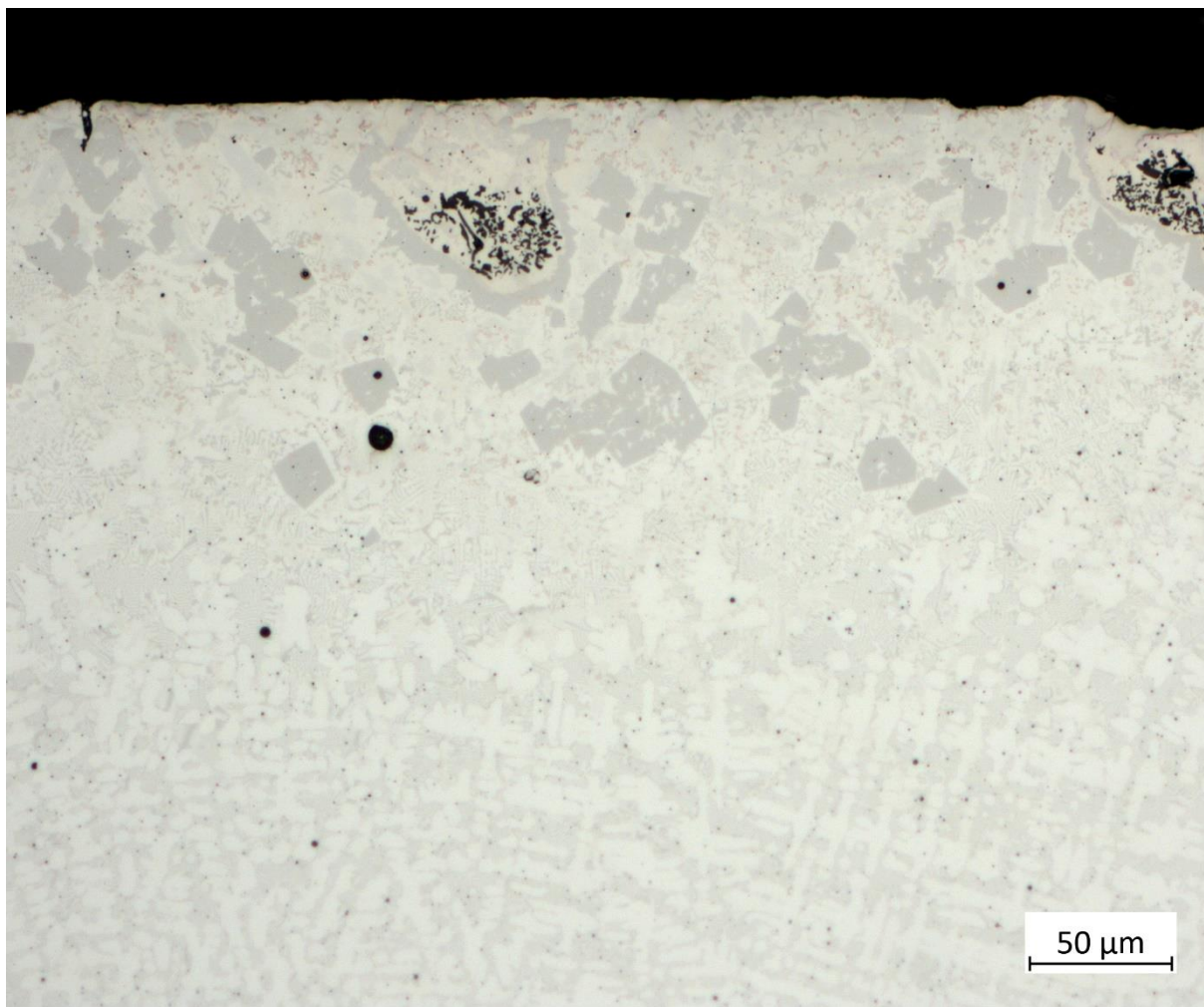
Obrázek 39: Vzorek 14 - teplotní průběh

## Pozorování mikrostruktury návaru



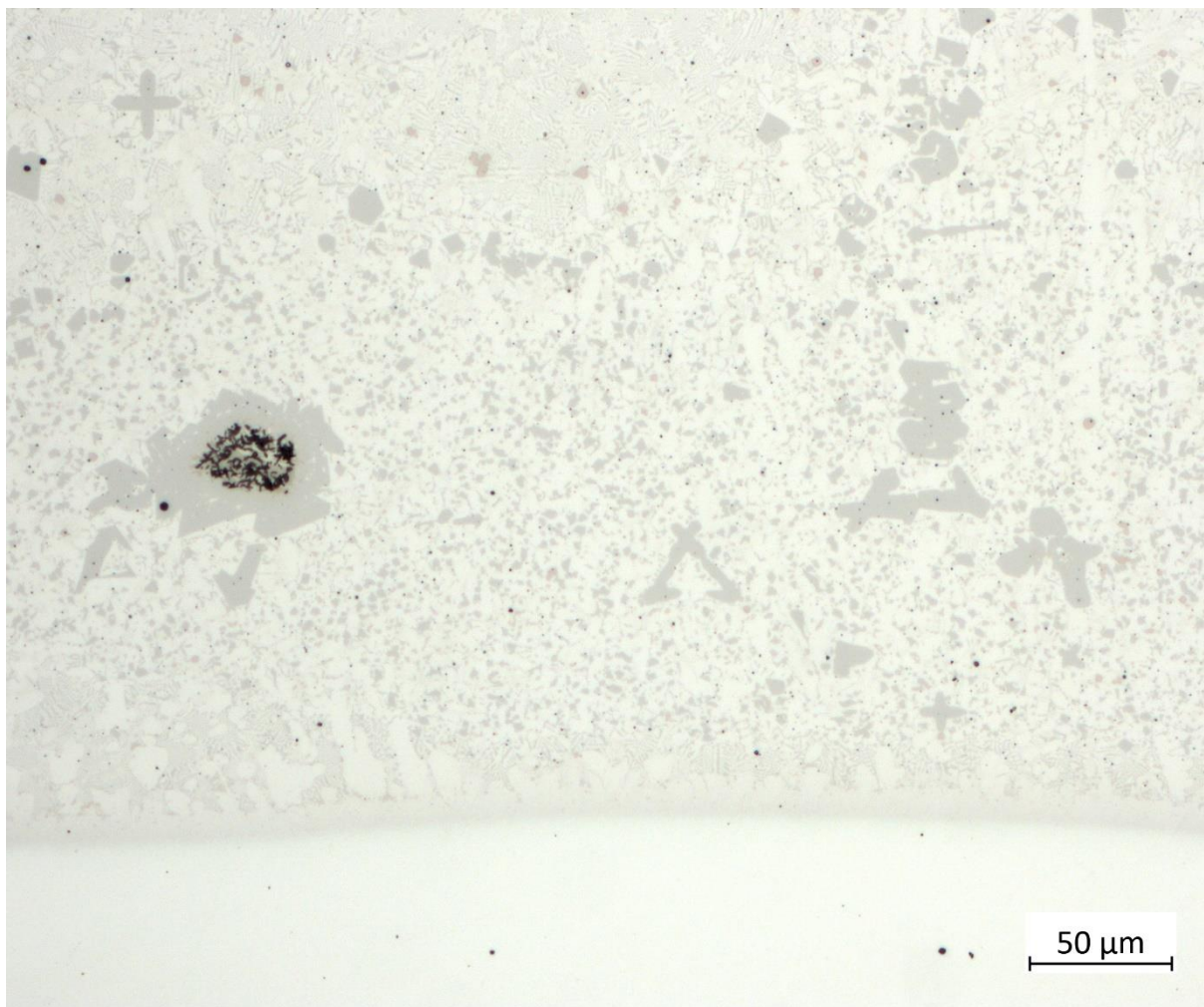
Obrázek 40: Vzorek 14, zvětšení 50x

Návar na vzorku číslo 14 obsahuje jen velmi málo šedé fáze, která je koncentrována téměř výhradně v blízkosti povrchu návaru. Podpovrchových pórů je jen velmi málo a jejich velikost se pohybuje v řádech jednotek až nižších desítek  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 41: Vzorek 14, zvětšení 200x

Obrázek 41, na kterém je vidět část návaru v blízkosti povrchu potvrzuje, že se šedá fáze výrazně shromažďuje těsně pod povrchem návaru (cca do 200  $\mu\text{m}$ ). Dále je z něj také patrné, že dochází k obalování černě tečkovaných částic touto fází, což bylo pozorováno již i v předchozích případech.

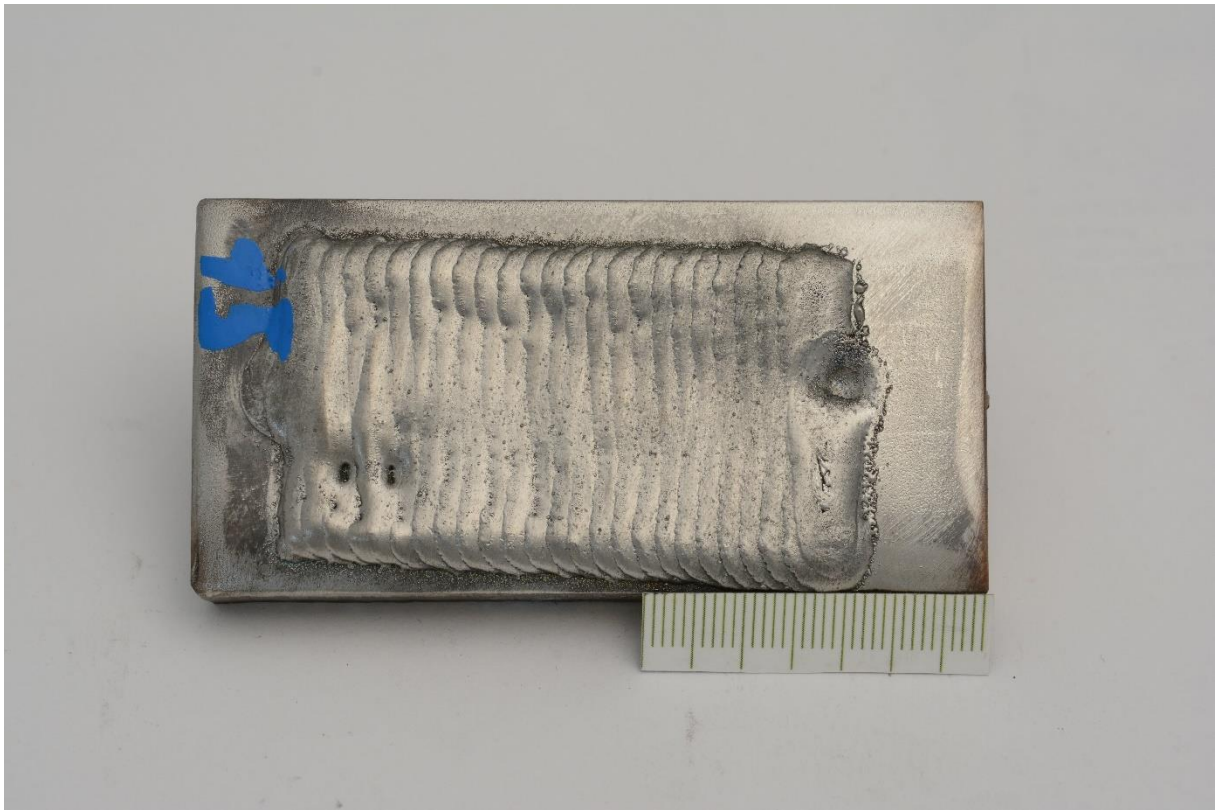


Obrázek 42: Vzorek 14, zvětšení 200x

Z Obrázku 42 je patrné, že se šedá fáze vyskytuje v omezené míře také v části návaru těsně nad hranicí základního a přídavného materiálu.

## 2.2.6. Vzorek 15

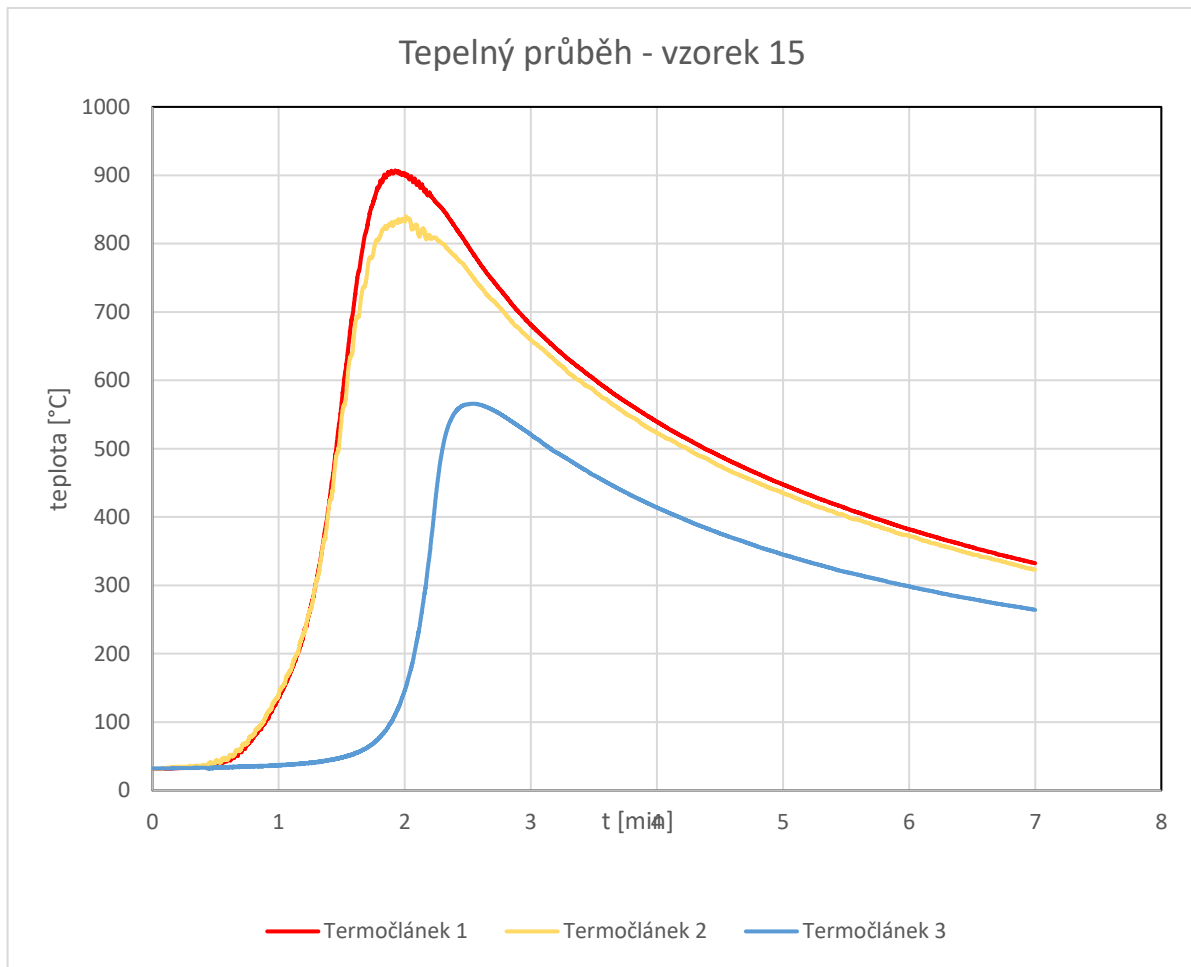
### Vizuální hodnocení



Obrázek 43: Vzorek 15, vizuální kontrola

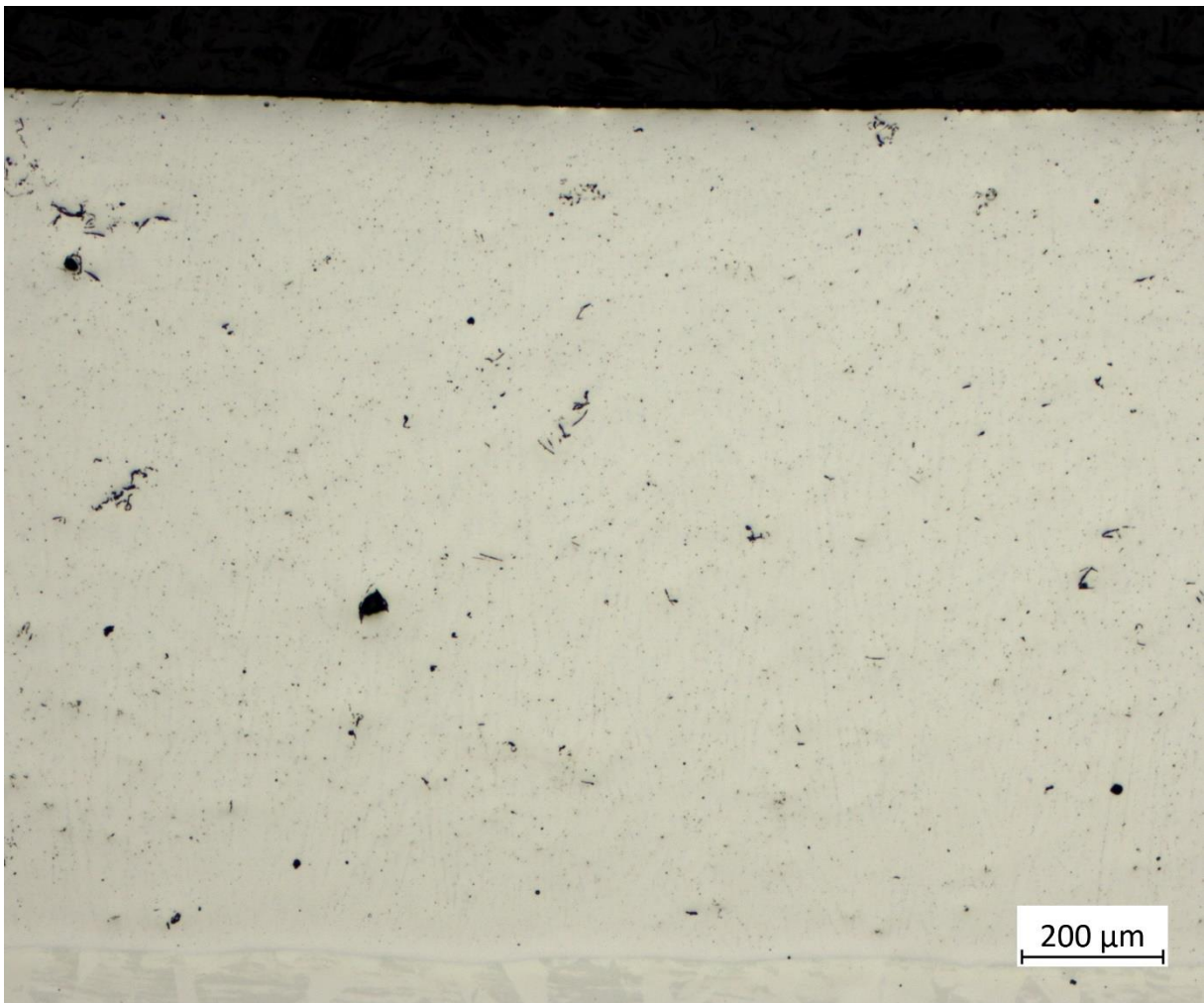
Vzorek číslo 15 byl navařován bez příměsi SiC v přídatném materiálu, aby bylo možné s ním porovnat vlastnosti ostatních vzorků. Horní proud oblouku byl ze začátku nastaven na 156 A a během navařování zvýšen na 230 A. Takto vysoká hodnota proudu má za následek výrazný kráter v místě ukončení návaru, avšak měla by zaručit vhodné spojení základního a přídatného materiálu. V začáteční části návaru jsou patrné dva velké povrchové póry.

## Teplotní průběh při navařování



Obrázek 44: Vzorek 15 - teplotní průběh

## Pozorování mikrostruktury návaru



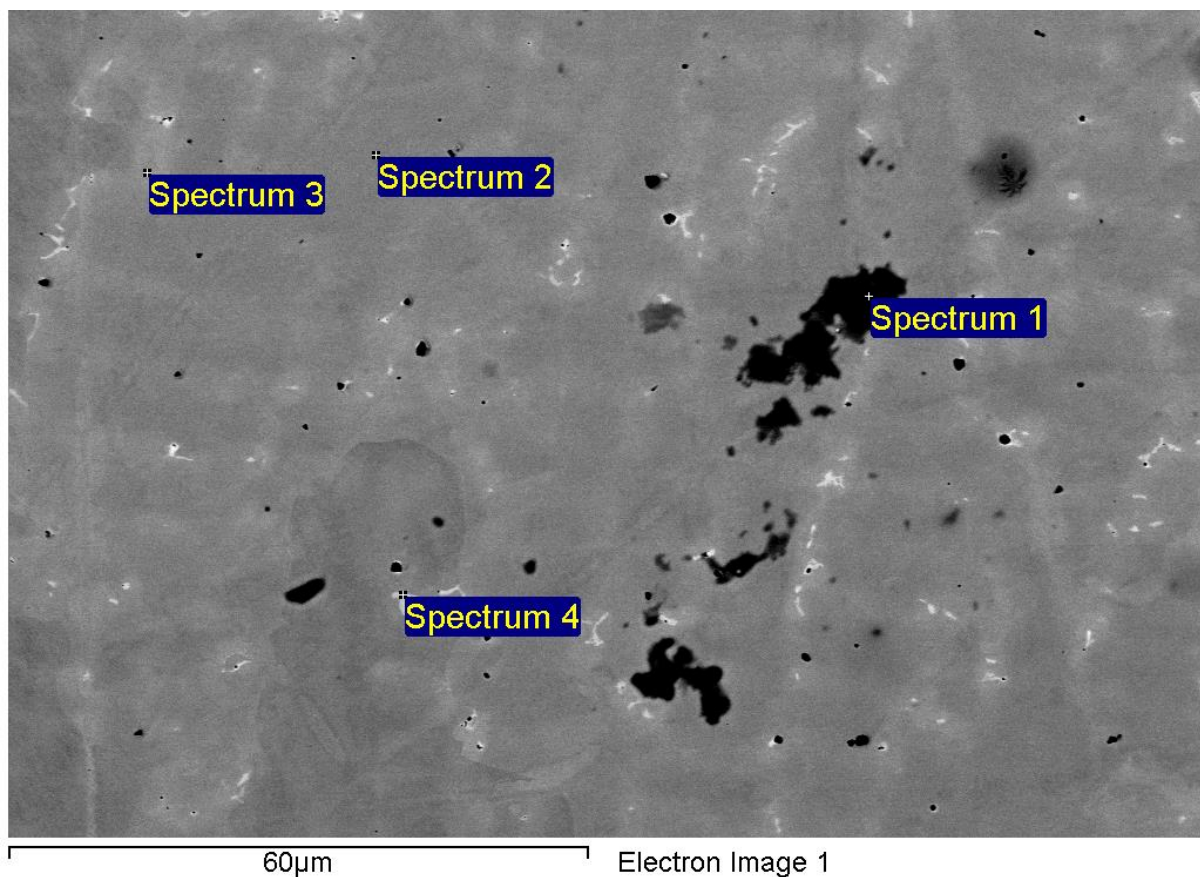
Obrázek 45: Vzorek 15, zvětšení 50x

Z Obrázku 45 je patrné, že vzorek číslo 15 má v porovnání s předchozími vzorky velmi hladký a rovnoměrný povrch. Návar je téměř bez pórů. Jsou zde obsaženy černé útvary, pravděpodobně uhlíkové, které mají většinou lamelární charakter. Hranice spojení základního a přídatného materiálu se zdá být dobře provařena.



## Rozbor mikrostruktury a chemického složení strukturních fází

U vzorku číslo 15 byla provedena analýza chemického složení jednotlivých strukturních fází.



Obrázek 46: Snímek SEM s vyznačenými body pro zjišťování chemického složení fází vzorku 15

Tabulka 7: Chemické složení strukturních fází na Obrázku 46

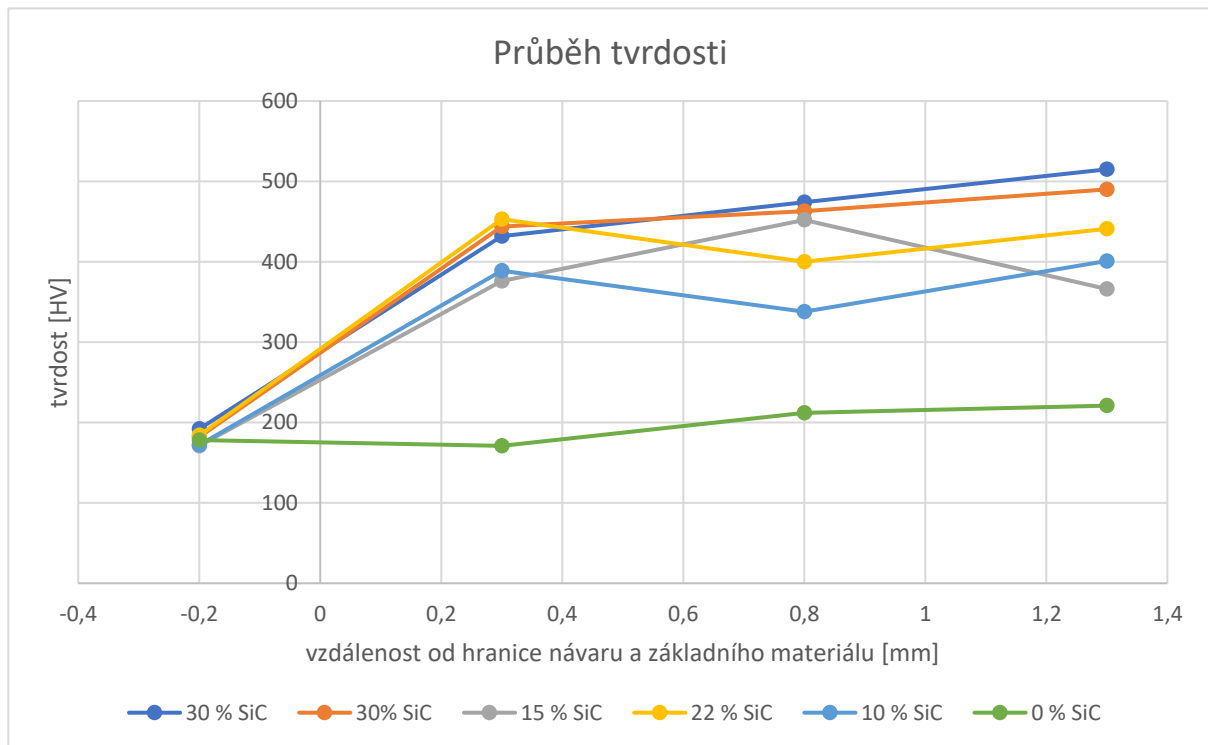
Spectrum	C [%]	O [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Ni [%]	Nb [%]	Mo [%]	Total [%]
Spectrum 1	51,77	3,42	0,26	10,14	0,15	1,83	26,93	1,37	4,14	100
Spectrum 2	3,64	3,14	0,37	20,1	0,28	4,33	59,4	1,26	7,48	100
Spectrum 3	4,14	3,29	0,7	19,23	0,4	3,54	54,48	4,59	9,64	100
Spectrum 4	6,16	3,07	1,94	12,99	0,23	2,02	39,11	21,08	13,41	100
Max.	51,77	3,42	1,94	49,82	0,4	11,52	59,4	21,08	15,96	
Min.	3,64	3,07	0,26	10,14	0,15	1,83	26,93	1,26	4,14	

Spektrum 1 charakterizuje chemické složení částice, která je z velké části tvořena uhlíkem. Vzhledem ke složení základního a přídatného materiálu, které uhlík neobsahují, je možné odhadovat, že byl uhlík do struktury zavlečen během přípravy vzorku.

Spektra 2 a 3 popisují chemické složení matrice návaru ve dvou různých místech. Majoritně zastoupenými prvky jsou zde tedy nikl, chrom a molybden, což odpovídá deklarovanému složení přídavného materiálu. Je zde také přítomno železo v koncentracích cca. 3,5 a 4,5 %, které se do matrice nejspíše dostalo promísením se základním materiálem.

Spektrum 4 popisuje částici, která obsahuje větší množství niobu, molybdenu a chromu. Tyto prvky mohou být z části vázány ve formě karbidů. Dále spektrum 4 uvádí vysoký obsah niklu, což je nejspíše opět způsobeno příliš širokou analyzovanou oblastí, která zahrnuje i část okolní matrice.

## 2.2.7. Měření tvrdosti



Obrázek 47: Průběh tvrdosti

Na grafu na Obrázku 47 je vidět naměřený průběh tvrdosti jednotlivých vzorků v závislosti na vzdálenosti od hranice základního a přídatného materiálu. První měření bylo provedeno vtlačení hrotu do základního materiálu ve vzdálenosti 0,2 mm pod hranicí. Následující indentace byly prováděny po 0,5 mm směrem k povrchu návaru.

Z grafu je patrné, že největšího nárůstu tvrdosti dosáhly vzorky s 30 % SiC. V porovnání se vzorkem číslo 15, který obsahuje 0 % SiC mají všechny ostatní vzorky výrazně vyšší tvrdost návaru. Tvrdost vzorků podle grafu klesá s klesajícím obsahem SiC ve struktuře. Jedinou výjimkou je vzorek číslo 12 (15 % SiC), u kterého vývoj tvrdosti nekoresponduje s vývojem u ostatních vzorků. Ani mikroskopické snímky vzorku číslo 12 nenasvědčují tomu, že by se u něj tvrdost měla vyvíjet takovýmto způsobem. Je tedy možné, že jde o chybu vzniklou při měření.

I přes nesrovnalost ve vývoji tvrdosti vzorku číslo 12 je tento graf přesvědčivým důkazem o výrazném zvýšení tvrdosti v důsledku přidání SiC do struktury, což hovoří ve prospěch původní domněnky a dokládá úspěch experimentu.

# Závěr

V teoretické části byla provedena rešerše zabývající se problematikou PTA navařování, strojů pro tuto technologii učených, dějů, které probíhají během navařování a materiálů, které byly dále využity v experimentální části diplomové práce. V experimentální části práce byl nejprve popsán proces přípravy a navařování vzorků. Dále pak zde byly popsány experimenty a pozorování, které byly provedeny pro zjištění materiálových a funkčních vlastností vytvořených návarů. Ve třetí části práce byly přineseny výsledky experimentů a pozorování. Tyto výsledky zde byly popsány a diskutovány.

Vzorky byly úspěšně navařeny. Postupnými změnami parametrů navařovacího procesu se podařilo dosáhnout navaření vizuálně vyhovujících návarů s dobrým průvarem do základního materiálu. Bylo zjištěno, že vyšší koncentrace SiC v přídatném materiálu způsobují nepříjemnou pórovitost návarů. Jako nejvyšší přípustná koncentrace se tedy jeví 22 % SiC, kde by bylo možné úpravou parametrů procesu dosáhnout uspokojivého výsledku.

Z měření tvrdosti návarů vyplývá, že přidávání SiC do přídatného materiálu zvyšuje tvrdost návaru. Čím byla vyšší koncentrace SiC v přídatném materiálu, tím vyšší byla tvrdost vzniklého návaru. Na základě tohoto experimentu lze tedy považovat pokus za úspěšný.

Zkoumáním chemického složení strukturních fází návaru EDS analýzou na elektronovém mikroskopu bylo zjištěno, že většina SiC se během procesu navařování rozložila a vznikly karbidy, zejména chromové a molybdenové, a ojedinělé částice čistého SiC. Vyšší tvrdost návarů tedy není po přidání SiC způsobena primárně přítomností částic SiC ve struktuře, ale tvorbou tvrdých karbidů.

Podařilo se dosáhnout vyšší tvrdosti přidáním SiC do struktury návaru. Vzhledem k tomu, že zvýšení tvrdosti je způsobeno tvorbou karbidů, a nikoliv samotným SiC, nebyl tento nárůst natolik výrazný, jak bylo očekáváno. Uvážíme-li ale, že vzorek, do kterého bylo přidáno 30 % SiC měl pod povrchem tvrdost 515 HV, zatímco vzorek bez přidaného SiC jen 221 HV, což je přibližně 130% nárůst tvrdosti, je zřejmé, že přidávání karbidu křemíku do návarů z niklových slitin má smysl a potenciál využití v praxi.

# Seznam obrázků

Obrázek 1: Navařování metodou MIG/MAG (23) .....	9
Obrázek 2: PTA navařování (27) .....	10
Obrázek 3: Hořák pro PTA navařování (26) .....	11
Obrázek 4: Vliv svařovacího proudu, průtoku plazmového plynu a rychlosti přidávání přídavného materiálu na stupeň promísení (10) .....	13
Obrázek 5: Vliv průtoku plazmového plynu na tvar návaru (10) .....	13
Obrázek 6: Závislost stupně promísení na vzdálenosti hořáku (10) .....	14
Obrázek 7: Univerzální navařovací automat PPC 250 R6 (11) .....	15
Obrázek 8: Jednouúčelový navařovací automat PPC 250 WH (11) .....	15
Obrázek 9: Graf závislosti rychlosti podávání prášku na počtu dílků na nastavovací stupnici	19
Obrázek 10: Graf distribuce velikostí částic prášku Nibasit 625-P/LFe .....	20
Obrázek 11: Graf distribuce velikostí částic prášku SiC .....	21
Obrázek 12: Umístění termočlánků na vzorku .....	22
Obrázek 13: Univerzální měřicí ústředna Ahlborn Almemo 5690-2M (25) .....	22
Obrázek 14: Vzorek připravený k navařování .....	23
Obrázek 15: Rozřezový plán .....	25
Obrázek 16: Světelný mikroskop ZEISS Axio Observer D1m (22) .....	26
Obrázek 17: Tvrdoměr Buehler IndentaMET 1104 .....	27
Obrázek 18: Umístění mikroindentací při měření tvrdosti .....	27
Obrázek 19: Skenovací elektronový mikroskop JEOL JSM-7600F (24) .....	28
Obrázek 20: Vzorek 10, vizuální kontrola .....	29
Obrázek 21: Vzorek 10 - teplotní průběh .....	30
Obrázek 22: Vzorek 10, zvětšení 50x .....	31
Obrázek 23: Vzorek 10, zvětšení 200x .....	32
Obrázek 24: Vzorek 10, zvětšení 200x .....	33
Obrázek 25: Snímek SEM s vyznačenými body pro zjišťování chemického složení fází vzorku 10 .....	34
Obrázek 26: Vzorek 11, vizuální kontrola .....	36
Obrázek 27: Vzorek 11 - teplotní průběh .....	37

Obrázek 28: Vzorek 11, zvětšení 200x .....	38
Obrázek 29: Vzorek 12, vizuální kontrola.....	39
Obrázek 30: Vzorek 12 - teplotní průběh.....	40
Obrázek 31: Vzorek 12, zvětšení 50x.....	41
Obrázek 32: Vzorek 12, zvětšení 200x .....	42
Obrázek 33: Vzorek 13, vizuální kontrola.....	43
Obrázek 34: Vzorek 13 - teplotní průběh.....	44
Obrázek 35: Vzorek 13, zvětšení 50x.....	45
Obrázek 36: Vzorek 13, zvětšení 50x.....	46
Obrázek 37: Vzorek 13, zvětšení 200x .....	47
Obrázek 38: Vzorek 14, vizuální kontrola.....	48
Obrázek 39: Vzorek 14 - teplotní průběh.....	49
Obrázek 40: Vzorek 14, zvětšení 50x.....	50
Obrázek 41: Vzorek 14, zvětšení 200x .....	51
Obrázek 42: Vzorek 14, zvětšení 200x .....	52
Obrázek 43: Vzorek 15, vizuální kontrola.....	53
Obrázek 44: Vzorek 15 - teplotní průběh.....	54
Obrázek 45: Vzorek 15, zvětšení 50x.....	55
Obrázek 46: Snímek SEM s vyznačenými body pro zjišťování chemického složení fází vzorku 15 .....	56
Obrázek 47: Průběh tvrdosti .....	58

# Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání univerzálního a jednoúčelového PTA automatu (11).....	15
Tabulka 2: Chemické složení niklové slitiny typu 625 (14).....	17
Tabulka 3: Chemické složení oceli AISI 303 (20) .....	19
Tabulka 4: Chemické složení prášku Nibasit 625-P/LFe .....	20
Tabulka 5: Parametry procesu navařování.....	24
Tabulka 6: Chemické složení strukturních fází na Obrázku 25.....	34
Tabulka 7: Chemické složení strukturních fází na Obrázku 46.....	56

# Bibliografie

- (1) *Laserové navařování* [online]. Laser Therm s.r.o., 2019 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-navarovani-kovu>
- (2) *Comersald: The PTA process* [online]. Modena, Itálie [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://www.commersald.com/the-pta-process-plasma-transferred-arc.htm>
- (3) DÍAZ, Víctor a Jair DUTRA. Hardfacing by Plasma Transferred Arc Process. *ResearchGate* [online]. [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: doi:10.5772/28802
- (4) *KUKA: Plasma transferred arc welding* [online]. Sterling heights, USA, 2022 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-ca/products/process-technologies/plasma-transferred-arc-welding>
- (5) ROHAN, Ph.D., Ph.D., KOLAŘÍK a Ph.D., KRAMÁR. Navařování plazmatem - ochranné povlaky ve výrobě i výzkumu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-plazmatem-ochrannepovlaky-ve-vyrobe-i-vyzkumu>
- (6) ELIEZER, Shalom a Yaffa ELIEZER. *The fourth state of matter: an introduction to plasma science: an introduction to plasma science*. CRC Press, 2001. ISBN 1420033433.
- (7) OLSON, David L. *ASM handbook: welding, brazing, and soldering: welding, brazing, and soldering*. 6. Asm Intl, 1993, . ISBN 0871703823.
- (8) FAUCHAIS, Pierre L, Joachim VR HEBERLEIN a Maher I BOULOS. Plasma-transferred arc. In: *Thermal Spray Fundamentals*. Springer, 2014, s. 631-673.
- (9) GAGE, Robert M. *Arc Torch and Process*.
- (10) KERÄNEN, Marko. *EFFECT OF WELDING PARAMETERS OF PLASMA TRANSFERRED ARC WELDING METHOD ON ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF 12V TOOL STEEL DEPOSIT*.



- Helsinki, 2010. Disertační práce. Aalto University. Vedoucí práce Prof. Hannu Hänninen.
- (11) *KSK: Česká Třebová* [online]. 2022 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://www.kskct.cz/cs/navarovani/plazmove-navarovaci-automaty>
- (12) *AZO materials: Machining Of Boron Carbide (B4C) - Process, Applications and Benefits* [online]. [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5809>
- (13) *Accuratus: Silicon Carbide, SiC Ceramic Properties* [online]. 2013 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <http://accuratus.com/silicar.html>
- (14) *Special metals: Inconel 625* [online]. [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/483909/Corrotherm-Oct2016-Theme/PDF%20Files/Inconel\\_alloy\\_625.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/483909/Corrotherm-Oct2016-Theme/PDF%20Files/Inconel_alloy_625.pdf)
- (15) *Corrotherm: Applications of Inconel 625 alloy* [online]. 2015 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://www.corrotherm.co.uk/blog/applications-of-inconel-625-alloy>
- (16) SAHEB, Nouari, Zafar IQBAL, Abdullah KHALIL, Abbas Saeed HAKEEM, Nasser AL AQEELI, Tahar LAOUI, Amro AL-QUTUB a René KIRCHNER. Spark Plasma Sintering of Metals and Metal Matrix Nanocomposites: A Review. *Journal of Nanomaterials* [online]. 2012, **2012**, 1-13 [cit. 2022-08-10]. ISSN 1687-4110. Dostupné z: doi:10.1155/2012/983470
- (17) CLYNE, TW a PJ WITHERS. *An introduction to metal matrix composites*. Cambridge university press, 1995. ISBN 0521483573.
- (18) HARRIGAN, William C. Commercial processing of metal matrix composites. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 1998, **244**(1), 75-79 [cit. 2022-08-10]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/S0921-5093(97)00828-9
- (19) SURESH, Subra. *Fundamentals of metal-matrix composites*. Elsevier, 2013. ISBN 0080523714.

- (20) *Nerezka* [online]. [cit. 2022-06-29]. Dostupné z: <https://www.nerezka.cz/chemicke-slozeni-nerez-oceli>
- (21) *Linde: Argon 48* [online]. Praha, 2017 [cit. 2022-06-29]. Dostupné z: [https://static.pr.d.echannel.linde.com/wcsstore/CZ\\_RME\\_Industrial\\_Gas\\_CatalogueAS/Attachment/DL/Plyny\\_A-Z/Argon/Argon%204.8.pdf](https://static.pr.d.echannel.linde.com/wcsstore/CZ_RME_Industrial_Gas_CatalogueAS/Attachment/DL/Plyny_A-Z/Argon/Argon%204.8.pdf)
- (22) *ZEISS: mikroskopy* [online]. In: . [cit. 2022-08-05]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/microscopy/int/products/light-microscopes/axio-observer-for-materials.html>
- (23) *Metoda svařování MIG/MAG* [online]. Schinkmann s.r.o., 2021 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mig-mag-svarovani-v-ochranne-atmosfere-plynu>
- (24) *Laboratoř elektronové mikroskopie* [online]. Praha: ČVUT, 2022 [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ustavy/sekce-ustav-materialoveho-inzenyrstvi/sekce-ustav-materialoveho-inzenyrstvi-12132/odborna-cinnost-12132/vybaveni-12132/em-12132/>
- (25) *Ahlborn: Přesná měřicí technika* [online]. Praha, 2022 [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/pristroje/stacionarni-pristroje/univerzalni-merici-ustredna-datalogger-ahlborn-almemo-5690-2m-19-vicekanalova.html>
- (26) *Deloro: Plasma power cladding technology* [online]. [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: [https://www.deloro.com/fileadmin/users/redakteur/006\\_Downloads/Product\\_Information/PTA\\_Welding\\_Systems\\_eng.pdf](https://www.deloro.com/fileadmin/users/redakteur/006_Downloads/Product_Information/PTA_Welding_Systems_eng.pdf)
- (27) *KSK, s.r.o.: firemní materiály*. Česká Třebová, 2012.

## Přílohy:

Příloha 1: produktový list prášku Nibasit 625-P/LFe

Příloha 2: produktový list prášku SiC