

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní
Ústav strojírenské technologie



Plazmové navařování kompozitu s
kovovou maticí plněného neoxidickou
keramikou

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: **Bc. Daniel-John Rowland**
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Rohan, Ph.D, IWE**
Rok: **2024**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rowland** Jméno: **Daniel-John** Osobní číslo: **487141**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Plazmové navařování kompozitu s kovovou maticí plněného neoxidickou keramikou

Název diplomové práce anglicky:

PTA deposition of metal matrix composite reinforced with non-oxide ceramic particles

Pokyny pro vypracování:

Provést literární rešerši na téma navařování pulzním plazmatem, niklové slitiny, kompozity s kovovou maticí a neoxidická keramika
Experimentálně prověřit tvorbu kovokeramických návarů
Charakterizovat navařené materiály - struktura, tvrdost, další vlastnosti

Seznam doporučené literatury:

CARDOZO, Eloisa Pereira, Sergio RÍOS, Supriyo GANGULY a Ana Sofia C. M. D'OLIVEIRA. Assessment of the effect of different forms of Inconel 625 alloy feedstock in Plasma Transferred Arc (PTA) additive manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2018, 98(5-8), 1695-1705 [cit. 2020-11-14]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-018-2340-z
DUPONT, J. N. Solidification of an alloy 625 weld overlay. Metallurgical and Materials Transactions A [online]. 1996, 27(11), 3612-3620 [cit. 2020-08-28]. ISSN 1073-5623. Dostupné z: doi:10.1007/BF02595452
FAUCHAIS, Pierre a Armelle VARDELLE. Thermal Plasmas Surface Treatment. Materials Surface Processing by Directed Energy Techniques. Elsevier, 2006, s. 311-344.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Ing. Adam Novotný ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **05.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2024**

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou 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 vyjádřil svou vděčnost Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D., IWE za jeho cenné rady a odborné konzultace, které mi poskytl během přípravy této diplomové práce. Zároveň bych chtěl poděkovat Ing. Tomášovi Burketovi za jeho čas, který mi věnoval při provádění experimentální části.

.....

Jméno a Příjmení

Název práce: Plazmové navařování kompozitu s kovovou maticí plněného neoxidickou keramikou

Autor: Bc. Daniel-John Rowland

Obor: Výrobní Inženýrství

Druh práce: Diplomová práce

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

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

Konzultant: —

Abstrakt: Diplomová práce se zaměřuje na pulzní plazmové navařování kompozitu s kovovou maticí složeného z niklové superslitiny Inconel 625[®] a karbidu křemíku s cílem vytvořit návar, kde je karbid křemíku rovnoměrně rozložen v povlaku a který je metalurgicky spojen se základním materiálem. V teoretické části je zahrnutý popis PTA metody, charakteristiky karbidu křemíku, charakteristiky niklu, jeho slitin a popis, rozbor a analýza studií zahrnující podobné keramické kompozity. Experimentální část se zaměřuje na navaření povlaků tohoto typu. V průběhu procesu byl sledován teplotní průběh. Po vizuálním hodnocení byla analyzována mikrostruktura, chemické složení fází dle metody EDS a následně byla změřena mikrotvrdost.

Klíčová slova: pulzní plazmové navařování, kompozity s kovovou maticí, neoxidická keramika, karbid křemíku, niklové slitiny

Title: PTA deposition of metal matrix composite reinforced with non-oxide ceramic particles

Author: Bc. Daniel-John Rowland

Abstract: The thesis focuses on the pulsed plasma hardfacing of composites with metal matrix composed of Inconel 625[®] type nickel superalloy and silicon carbide. The aim is to create a coating where the silicon carbide is uniformly distributed, and metallurgically bonded to the base material. The theoretical section includes a description of the PTA method, the characteristics of silicon carbide, the characteristics of nickel, and a description, dissection and analysis of studies involving similar ceramic composites. The experimental part focuses on the hardfacing of ten coatings of this type. The temperature fluctuation was monitored during the process. After visual evaluation, the microstructure and chemical composition of the phases were analysed according to the EDS method and then the microhardness was measured.

Key words: pulsed plasma hardfacing, metal matrix composites, non-oxide ceramics, silicon carbide, nickel alloys

Obsah

Obsah	1
Seznam obrázků	5
Seznam tabulek	8
Seznam grafů.....	10
Úvod.....	11
1 Teoretická část	12
1.1 Technologie navařování	12
1.1.1 Technologie navařování plazmatem	13
1.1.2 Plazma	14
1.1.3 Metody PTA a PAW	15
1.1.4 Princip PTA.....	16
1.1.5 PTA plazmatrony	17
1.1.6 Využívané plyny	18
1.2 Přídavné materiály	19
1.2.1 Nikl a jeho slitiny	19
1.2.2 Křemík	21
1.3 Kompozity.....	22
1.4 Kompozity s kovovou maticí Ni slitin + SiC.....	23
2 Experimentální část.....	31
2.1 Využitá zařízení	31
2.1.1 PPC 250 R6.....	31
2.1.2 Ahlborn Almemo 5690-2M.....	32
2.1.3 Labotom -3	32
2.1.4 Citopress -1	33
2.1.5 QPOL 250 A2-ECO	33
2.1.6 Buehler IndentaMet 1104.....	34
2.1.7 Zeiss Axio Observer D1M	34
2.1.8 JEOL JSM-IT510	35

2.2	Příprava ZM a poloha termočlánků.....	35
2.3	Navařování	36
2.4	Příprava metalografických výbrusů	37
2.5	Měření mikrotvrdosti	38
2.6	Výsledky a diskuze	39
2.7	Vzorek č. 1	39
2.7.1	Zvolené parametry	39
2.7.2	Vizuální hodnocení	39
2.7.3	Teplotní průběh	40
2.7.4	Mikrostruktura	41
2.7.5	Rozbor chemického složení viditelných fází	43
2.7.6	Mikrotvrdost.....	46
2.8	Vzorek č. 2	47
2.8.1	Zvolené parametry	47
2.8.2	Vizuální hodnocení	48
2.8.3	Teplotní průběh	49
2.8.4	Mikrostruktura	49
2.8.5	Rozbor chemického složení viditelných fází	51
2.8.6	Mikrotvrdost.....	52
2.9	Vzorek č. 3	52
2.9.1	Zvolené parametry	52
2.9.2	Vizuální hodnocení	53
2.9.3	Teplotní průběh	54
2.9.4	Mikrostruktura	55
2.9.5	Mikrotvrdost.....	57
2.10	Vzorek č. 4	57
2.10.1	Zvolené parametry	57
2.10.2	Vizuální hodnocení	58
2.10.3	Teplotní průběh	59
2.10.4	Mikrostruktura	60
2.10.5	Mikrotvrdost.....	63

2.11	Závěry z první řady vzorků	63
2.12	Vzorky č. 5 a 6	64
2.12.1	Zvolené parametry	64
2.12.2	Vizuální hodnocení	64
2.12.3	Teplotní průběh	65
2.12.4	Mikrostruktura	66
2.12.5	Mikrotvrdomost.....	67
2.13	Vzorek č. 7	68
2.13.1	Zvolené parametry	68
2.13.2	Vizuální hodnocení	69
2.13.3	Teplotní průběh	69
2.13.4	Mikrostruktura	70
2.13.5	Mikrotvrdomost.....	71
2.14	Vzorek č. 8	71
2.14.1	Zvolené parametry	71
2.14.2	Vizuální hodnocení	72
2.14.3	Teplotní průběh	73
2.14.4	Mikrostruktura	73
2.14.5	Mikrotvrdomost.....	74
2.15	Vzorek č. 9	74
2.15.1	Zvolené parametry	74
2.15.2	Vizuální hodnocení	75
2.15.3	Teplotní průběh	76
2.15.4	Mikrostruktura	77
2.15.5	Mikrotvrdomost.....	78
2.16	Vzorek č. 10	78
2.16.1	Zvolené parametry	78
2.16.2	Vizuální hodnocení	79
2.16.3	Teplotní průběh	80
2.16.4	Mikrostruktura	80
2.16.5	Mikrotvrdomost.....	82

2.17 Závěry z druhé řady vzorků	83
Závěr	84
Zdroje	86
Přílohy	90

Seznam obrázků

Obrázek 1 Metody obloukového navařování	13
Obrázek 2 Formy plazmatu.....	14
Obrázek 3 Proces PTA navařování	15
Obrázek 4 Přenesený x nepřenesený oblouk.....	16
Obrázek 5 Schéma plazmatronu.....	18
Obrázek 6 Mikrografický snímek SiC	22
Obrázek 7 Mikrostruktura litého kompozitu AlSi10/SiC	23
Obrázek 8 Růst pyramidových struktur při tavení EB (SEM, 500x).....	24
Obrázek 9 Růst pinzetových a eutektické fází (SEM, 1390x).....	25
Obrázek 10 Sloupcový graf znázorňující tvrdost modifikovaných slitin	25
Obrázek 11 Pevnost SiC spojů ve smyku při pokojové teplotě	26
Obrázek 12 Mikrostruktura SiC spojů pájených při 1400 °C slitinou Inconel 625® s různým množstvím přídavku Zr.....	27
Obrázek 13 Pevnost ve smyku spojů SiC před a po oxidaci při 800 °C po různou dobu	28
Obrázek 14 Mikrostruktury spojů SiC s přídavkem 0 % hm. Si po oxidaci při 800 °C po různou dobu.....	29
Obrázek 15 Mikrostruktury spojů SiC s přídavkem 23,1 % hm. Si po oxidaci při 800 °C po různou dobu.....	29
Obrázek 16 Profil koncentrace složení hlavních prvků ve vzorku s povlakem SiC po 188hodinové expozici při 1000 °C.....	30
Obrázek 17 XRD pro a) vzorky s povlakem SiC a b) vzorky bez povlaku po 65 hodinách oxidace při 1000 °C.....	30
Obrázek 18 Schéma umístění termočlánků.....	35
Obrázek 19 Navařené vzorky	37
Obrázek 20 Vzorek č. 1	39
Obrázek 21 Vzorek č. 1, 200x zvětšení – povrch	41
Obrázek 22 Vzorek č. 1, 200x zvětšení – rozhraní	42
Obrázek 23 Vzorek č. 1, 200x zvětšení – kraje.....	42
Obrázek 24 Vzorek č.1, 1200x zvětšení - částice	43

Obrázek 25 Poloha a body snímání kraje vzorku č. 1 pomocí SEM	44
Obrázek 26 Vzorek č. 1, 950x zvětšení – střed návaru	45
Obrázek 27 Poloha a body snímání středu vzorku č. 1 pomocí SEM.....	45
Obrázek 28 Vzorek č. 2.....	48
Obrázek 29 Vzorek č. 2, 200x zvětšení – povrch	50
Obrázek 30 Vzorek č. 2, 200x zvětšení – rozhraní	51
Obrázek 31 Vzorek č. 2, 200x zvětšení – kraje.....	51
Obrázek 32 Vzorek č. 3.....	53
Obrázek 33 Vzorek č. 3, 200x zvětšení – povrch	55
Obrázek 34 Vzorek č. 3, 200x zvětšení – rozhraní	56
Obrázek 35 Vzorek č. 3, 200x zvětšení – kraje.....	56
Obrázek 36 Vzorek č. 4.....	58
Obrázek 37 Vzorek č. 4, 200x zvětšení – povrch	60
Obrázek 38 Vzorek č. 4, 200x zvětšení – rozhraní	61
Obrázek 39 Vzorek č. 4, 550x zvětšení – dendrity	61
Obrázek 40 Vzorek č. 4, 200x zvětšení – shluky SiC.....	62
Obrázek 41 Vzorek č. 4, 200x zvětšení – kraje.....	62
Obrázek 42 Vzorky č. 5 a 6.....	64
Obrázek 43 Vzorek č. 5, 200x zvětšení – povrch + rozhraní.....	66
Obrázek 44 Vzorek č. 6, 200x zvětšení – povrch + rozhraní.....	66
Obrázek 45 Vzorek č. 5, 200x zvětšení – kraje.....	67
Obrázek 46 Vzorek č. 6, 200x zvětšení – kraje.....	67
Obrázek 47 Vzorek č. 7.....	69
Obrázek 48 Vzorek č. 7, 200x zvětšení – povrch + rozhraní.....	70
Obrázek 49 Vzorek č. 7, 200x zvětšení – kraje.....	71
Obrázek 50 Vzorek č. 8.....	72
Obrázek 51 Vzorek č. 8, 200x zvětšení – povrch + rozhraní.....	73
Obrázek 52 Vzorek č. 8, 200x zvětšení – kraje.....	74
Obrázek 53 Vzorek č. 9.....	75
Obrázek 54 Vzorek č. 9, 200x zvětšení – povrch + rozhraní.....	77
Obrázek 55 Vzorek č. 9, 200x zvětšení – pravý kraj	77

Obrázek 56 Vzorek č. 10.....	79
Obrázek 57 Vzorek č. 10, 200x zvětšení – povrch	81
Obrázek 58 Vzorek č. 10, 200x zvětšení – rozhraní	81
Obrázek 59 Vzorek č. 10, 200x zvětšení – kraje.....	82

Seznam tabulek

Tabulka 1 Nastavované parametry při procesu navařování metodou PTA.....	17
Tabulka 2 Využívané plazmové plyny.....	19
Tabulka 3 Chemické složení slitiny Inconel 625®	20
Tabulka 4 Mechanické vlastnosti slitiny Inconel 625®	21
Tabulka 5 Parametry PPC 250 R6	31
Tabulka 6 Parametry polohovadla PPC 250 R6.....	32
Tabulka 7 Maximální možný rozsah manipulace plazmatronu PPC 250 R6.....	32
Tabulka 8 Specifikace QPOL 250 A2-ECO	34
Tabulka 9 Specifikace brusné hlavy ECO	34
Tabulka 10 Navařovací parametry pro zkušební vzorek	36
Tabulka 11 Využité brusné papíry	37
Tabulka 12 Parametry broušení	38
Tabulka 13 Parametry leštění.....	38
Tabulka 14 Parametry navařování vzorku č. 1.....	39
Tabulka 15 Chemické složení v bodech snímaných z obrázku 25	44
Tabulka 16 Chemické složení v bodech snímaných z obrázku 27	46
Tabulka 17 Mikrotvrdost vzorku č. 1.....	47
Tabulka 18 Parametry navařování vzorku č. 2.....	47
Tabulka 19 Mikrotvrdost vzorku č. 2.....	52
Tabulka 20 Parametry navařování vzorku č. 3.....	52
Tabulka 21 Mikrotvrdost vzorku č. 3.....	57
Tabulka 22 Parametry navařování vzorku č. 4.....	57
Tabulka 23 Mikrotvrdost vzorku č. 4.....	63
Tabulka 24 Parametry navařování vzorků č. 5 a 6.....	64
Tabulka 25 Vzorek č. 6, 200x zvětšení – kraje	68
Tabulka 26 Mikrotvrdost vzorku č. 6.....	68
Tabulka 27 Parametry navařování vzorku č. 7.....	68
Tabulka 28 Mikrotvrdost vzorku č. 7.....	71

Tabulka 29 Parametry navařování vzorku č. 8.....	72
Tabulka 30 Mikrotvrdost vzorku č. 8.....	74
Tabulka 31 Parametry navařování vzorku č. 9.....	75
Tabulka 32 Mikrotvrdost vzorku č. 9.....	78
Tabulka 33 Parametry navařování vzorku č. 10.....	78
Tabulka 34 Mikrotvrdost vzorku č. 10 - podélně.....	82
Tabulka 35 Mikrotvrdost vzorku č. 10 - příčně	83

Seznam grafů

Graf 1 Teplotní průběh vzorku č. 1	40
Graf 2 Teplotní průběh vzorku č. 2	49
Graf 3 Teplotní průběh vzorku č. 3	54
Graf 4 Teplotní průběh vzorku č. 4	59
Graf 5 Teplotní průběh vzorku č. 5	65
Graf 6 Teplotní průběh vzorku č. 6	65
Graf 7 Teplotní průběh vzorku č. 7	70
Graf 8 Teplotní průběh vzorku č. 8	73
Graf 9 Teplotní průběh vzorku č. 9	76
Graf 10 Teplotní průběh vzorku č. 10	80

Úvod

Zvyšující se potřeby průmyslu i techniky a přísnější požadavky na udržitelnost strojírenské výroby vyžadují nové přístupy v tvorbě materiálů i postupů. Využití plazmatu v oblasti zpracování a syntézy nových materiálů je výhodné především z důvodů vysoké energetické účinnosti, schopnosti vytvářet vysoké teploty a možnosti řízení chemického složení výsledných materiálů. Plazmové technologie umožňují vytvoření materiálů s unikátními vlastnostmi, které by bylo obtížné dosáhnout tradičními metodami.

Vysoké nároky průmyslu často nelze splnit na základě vlastností jednotlivých materiálů, proto je třeba kombinovat vlastnosti rozdílných komponent například vytvořením kompozitních materiálů (MMC – Metal Matrix Composites). Jednou z perspektivních kombinací je použití karbidu křemíku (SiC) s niklovou slitinou typu 625, jako je Nibasit 625[®]. Tato kombinace materiálů je zajímavá z hlediska vysoké tvrdosti a odolnosti vůči opotřebení, kterou poskytuje SiC, a zároveň vynikající odolnosti vůči vysokým teplotám a korozi, kterou nabízí slitina Inconel 625[®].

Pulzní plazmové navařování (Plasma Transferred Arc, PTA) je jednou z moderních technologií, která umožňuje vytvářet kompozitní vrstvy s vysokou přesností a kontrolou nad složením materiálu. Tato metoda využívá vysokoteplotní plazma k roztavení materiálů, které jsou následně nanášeny na povrch základního materiálu. 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.

Hlavním cílem této práce je využít pulzního plazmového navařování k výrobě kompozitu s kovovou maticí. Úkolem je rovnoměrně v celém objemu návaru zachovat karbid křemíku v matici tvořenou slitinou typu Inconel 625[®], konkrétně Nibasitem 625[®].

Cíle práce:

Provést rešerši na téma navařování, niklové slitiny typu Inconel 625, karbid křemíku a kompozity s kovovou maticí.

Vyhotovit návary vizuálně vyhovující.

Charakterizovat finální návary z hlediska struktury a mechanických vlastností.

Vyhodnotit výsledky a interpretovat vhodnost a efektivitu navařovacího procesu.

1 Teoretická část

1.1 Technologie navařování

Proces navařování je technologický postup odvozený z metody svařování, přičemž základní principy jsou obdobné, avšak liší se v parametrech a aplikaci. Navařování spočívá v nanášení přídavného materiálu na povrch základního materiálu za účelem vzniku metalurgického spojení z důvodu zlepšení jeho povrchových vlastností nebo obnovení původních rozměrů součásti. Na rozdíl od svařování, kde je snaha o dokonalé promísení materiálů, při navařování se preferuje menší průvar a promísení s cílem zachovat požadované vlastnosti jak základního materiálu, tak i navařovaného povlaku. Zvolení vhodného tepelného zdroje a přídavného materiálu je klíčové pro dosažení kvalitního návaru.[1]

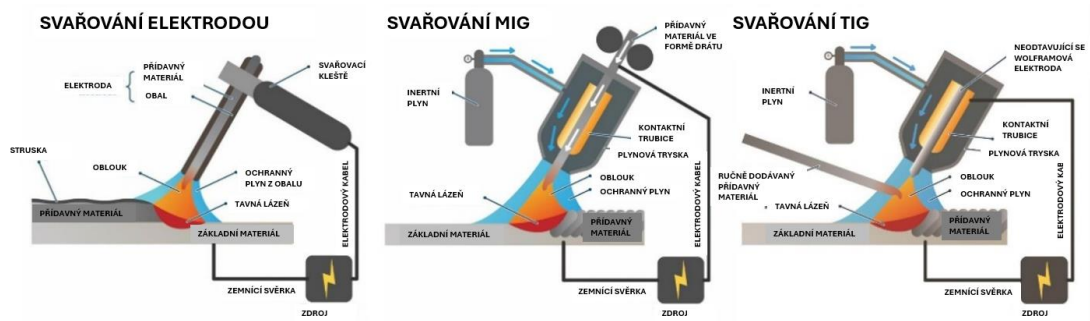
Přídavný materiál se do tavné lázně aplikuje ve formě prášku či drátu. Nejvyužívanější zdroj je elektrický oblouk, který je základem pro procesy jako je např. navařování pomocí MMA, MIG/MAG a TIG. Další využívané zdroje tepla jsou např. plamen hořlavého plynu, laser, plazma nebo elektronový svazek. Volba zdroje tepla ovlivňuje efektivitu a kvalitu výsledného návaru. Navařování se využívá především ke zlepšení povrchových vlastností součástí nebo k jejich údržbě a obnově. Typicky se jedná o zvýšení tvrdosti, odolnosti proti otěru nebo korozivzdornosti. V případě oprav a nahrazení opotřebeného materiálu je součást po navaření obráběna na požadovaný rozměr. Automatizace procesu zvyšuje produktivitu a kvalitu výsledného návaru, zatímco ruční navařování se často uplatňuje při kusové výrobě. Tepelné ovlivnění během navařování může vést ke změně struktury materiálu, což je nutné brát v úvahu při zajištění požadované kvality návaru.[1][2][3]

Proces navařování obvykle zahrnuje následující kroky:

Příprava: Základní materiál a nanášený materiál se připraví, často čištěním a opracováním, aby se zajistilo pevné spojení.

Nanášení: Samotné navařování přídavného materiálu na základní materiál se provádí zvolenou svařovací technikou. Při obloukovém svařování elektrický oblouk roztaví základní i přídavný materiál a vytvoří tavnou lázeň roztavených materiálů, která ztuhne do chtěného povlaku.

Chlazení a dokončovací práce: Nově navařený povlak se nechá vychladnout a často se opracovává nebo upravuje, aby se dosáhlo požadované povrchové kvality a rozměrů.[2][3]



Obrázek 1 Metody obloukového navařování [4]

1.1.1 Technologie navařování plazmatem

Technologie navařování plazmatem vznikla jako další vývojový stupeň z metody TIG a využívá svazek vysokotlakého plazmatu k tavení materiálu. Oproti jiným metodám se plazmové navařování vyznačuje vyšší teplotou oblouku, což umožňuje dosáhnout vyššího navařovacího výkonu a menšího průvaru do základního materiálu. Na rozdíl od TIG oblouku, který přestává být stabilní při nižších proudcích, umožňuje plazmová technologie využívat i velmi nízké proudy.[2][5]

Další výhodou plazmového navařování je široké spektrum materiálů, které lze zpracovat, včetně železných slitin, slitin niklu, kobaltu, mědi a různých kompozitních materiálů. Tato technologie nabízí i vyšší produktivitu při nižší finanční náročnosti ve srovnání s laserovým navařováním.[2][6]

Princip metody spočívá v disociaci a částečné ionizaci molekul plynu při vysokých teplotách, kdy se uvolněná energie rekombinuje jako teplo při dopadu na povrch materiálu. Hořák pro navařování plazmatem je podobný hořáku pro metodu TIG a funguje ve dvou elektrických zapojeních: zapojení závislé a nezávislé.[5][6]

Zapojení závislé se používá pro svařování, navařování a řezání, zatímco zapojení nezávislé je vhodné pro žárové nástřiky, navařování tenkých vrstev a povrchové kalení.[7]

Technologie navařování plazmatem lze dále rozlišit podle formy přídavného materiálu. PAW (Plasma Arc Welding) se aplikuje ve formě drátu, zatímco PTA (Plasma Transferred Arc) využívá práškovou formu přídavného materiálu. Obě metody lze využít při navařování ochranného povlaku na součást, kterou chrání před extrémními podmínkami a zvyšuje její odolnost vůči různým typům opotřebení.[2][6]

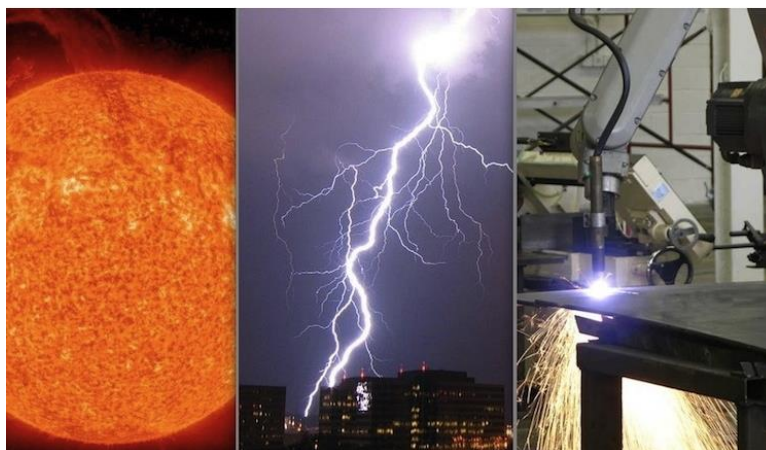
1.1.2 Plazma

Plazma se často označuje jako "čtvrté skupenství hmoty", vedle pevné, kapalné a plynné fáze. Jedná se o směs elektronů a kladně nabitých iontů. Tento stav hmoty je široce rozšířen ve vesmíru. Na Zemi jsou jeho hlavním zdrojem především elektrické výboje v atmosféře. Během procesu navařování vzniká plazma ionizací plynu.[8]

Plazma tvoří základ mnoha kosmických jevů, jako jsou blesky, polární záře, mlhoviny a hvězdy, a vzniká dodáním energie plynu a jeho následnou ionizací (viz Obr. 2). V plazmatu se nacházejí volné nosiče náboje, což mu umožňuje reagovat na elektrická a magnetická pole a vytvářet je samo.[8][9]

Existují dva hlavní typy plazmatu podle teploty: nízkoteplotní a vysokoteplotní. Vysokoteplotní plazma může dosahovat extrémní teploty až 10^6 K a vyskytuje se zejména v jádrech hvězd. Naopak nízkoteplotní plazma je běžnější a nachází se například v zářivkách nebo elektrických obloucích.[8][9]

Plazma hraje významnou roli v mnoha technologických procesech, jako je svařování, navařování a chemické a tepelné ovlivňování povrchu plastů. Jeho schopnost reagovat na elektrická a magnetická pole jej činí užitečným pro řízené termonukleární reakce, raketové pohony a další aplikace ve vědě. V průmyslových aplikacích se plazma využívá například při výrobě elektronických součástek, v leteckém a automobilovém průmyslu a ve zdravotnictví. Produkty zpracované pomocí plazmatu jsou běžně dostupné a mají široké využití i v domácnostech.[8][9]



Obrázek 2 Formy plazmatu [10]

V poslední době roste zájem o využití plazmatu ve zpracování odpadu, protože neprodukuje popel a má menší negativní dopad na životní prostředí než tradiční spalování. Tato technologie nabízí možnosti pro účinnější a šetrnější zpracování nebezpečného odpadu.[9]

1.1.3 Metody PTA a PAW

Plasma Transferred Arc (PTA) (viz Obr. 3) a Plasma Arc Welding (PAW) jsou pokročilé svařovací procesy, které využívají plazmový oblouk k dosažení vysoce kvalitních návarů. Tyto metody se liší svým fungováním a použitím, zejména pokud se jedná o přídavné materiály a řízení svařovacích parametrů. Mezi běžně používané plyny těchto technologií patří argon (Ar), vodík (H₂), dusík (N₂) a helium (He).[11][13]

Metoda PAW využívá jako přídavný materiál drát a metoda PTA využívá prášek. Drát je mechanicky posouván do místa svaru u metody PAW, zatímco u metody PTA je prášek transportován do tavné lázně pomocí proudu plynu.[11][13]

PTA v porovnání s PAW vytváří povlaky s lepší kvalitou povrchu, vyšší homogenitou a lepší smáčivostí, což je výhodné pro renovaci např. opotřebovaných lopatek hydraulických turbín. [12]

Použití pulzního proudu při PTA vede k jemnější mikrostruktuře a vyšší tvrdosti naneseného povlaku při nižším ředění než u metod s kontinuálním proudem, což znamená výhodu ve zlepšení povrchových vlastností.[12]

PAW disponuje obecně vyšší účinností procesu. Také lze výrazně měnit chování přenosu návarového materiálu a rychlost tavení drátu nastavením poměru proudu a průtoku plazmového plynu.[11][12]

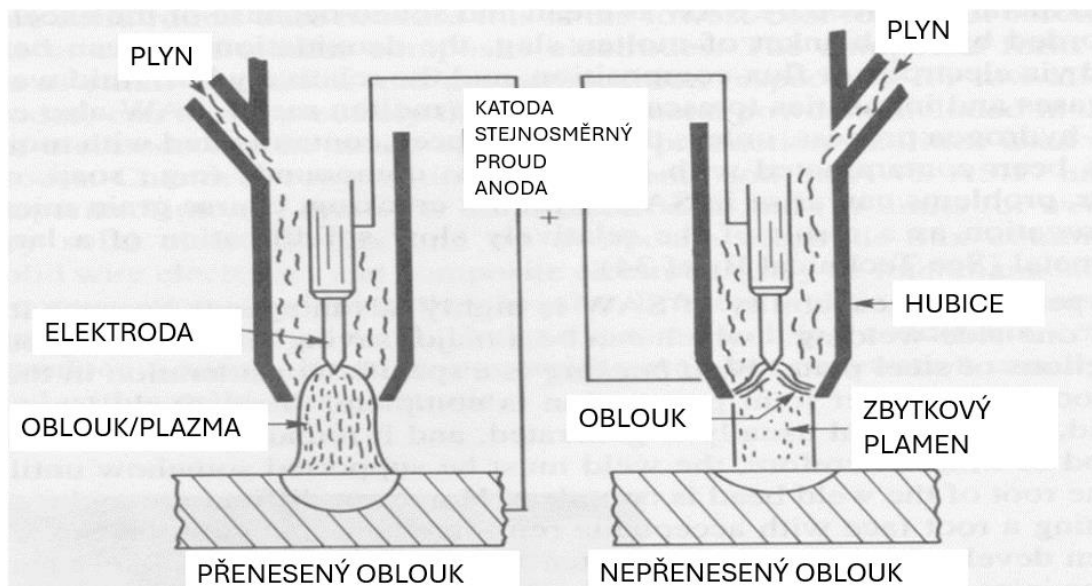
Parametry svařování, jako je rychlost posuvu drátu, svařovací napětí a svařovací proud, mají u PAW přímý vliv na mechanické vlastnosti svaru, přičemž vyšší proud a nižší napětí zlepšují pevnost v tahu a rázovou houževnatost. [11][13]



Obrázek 3 Proces PTA navařování [15]

Navařování plazmatem sdílí některé charakteristiky s technologií laserového navařování, jako je minimální promísení přídavného materiálu se základním materiálem a možnost automatizace. Oproti laserovému svařování však navařování plazmatem nabízí vyšší variabilitu v nastavení parametrů oblouku a nižší pořizovací náklady. [13]

Dosavadní výzkum naznačuje, že metoda PTA je vhodnější pro navařování tvrdých povrchových vrstev. Toto je dáno menší tepelně ovlivněnou oblastí, menším průvarem a nižším promísením navařovaného materiálu se základním. Dále PTA nabízí vyšší čistotu povrchu, kvalitu a rozměrovou přesnost. Automatizace je u obou metod relativně snadná, ale největší výhodou metody PTA je možnost použití směsí prášků téměř libovolného složení, což umožňuje splnit požadavky na různé povrchové vlastnosti navařovaného dílce. Rozdíl mezi přeneseným a nepřeneseným obloukem je zobrazen na obrázku 4.[11][13]



Obrázek 4 Přenesený x nepřenesený oblouk [14]

1.1.4 Princip PTA

Při metodě Plazma Transferred Arc (PTA) se vytváří přenesený plazmový oblouk mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem. Proces začíná vznikem pilotního oblouku mezi měděným tělem hořáku a elektrodou pomocí vysokofrekvenčního výboje. Plazma se tvoří ionizací plazmového plynu, který prochází plazmovým hořákem. Toto plazma je elektricky vodivé a uzavírá elektrický obvod mezi hlavním obloukem, který hoří mezi wolframovou elektrodou (katodou) a navařovaným materiálem (anodou).[11][13][15]

Při navařování metodou PTA je dosahována vysoká teplota plazmatu, pohybující se mezi 9000 až 20000 °C. Pro účinné chlazení hořáku při samotném navařování jsou využity interní kanálky propojené s chladicím systémem vody.[11][13]

Klíčovými faktory pro úspěšné provedení navařovacího procesu jsou parametry zahrnující průtok plazmového, ochranného a podávacího plynu, kinematiku pohybu plazmatronu, velikost a tvar částic prášku a délku hlavního oblouku. Další nastavované parametry při procesu navařování metodou PTA jsou:

Tabulka 1 Nastavované parametry při procesu navařování metodou PTA[15]

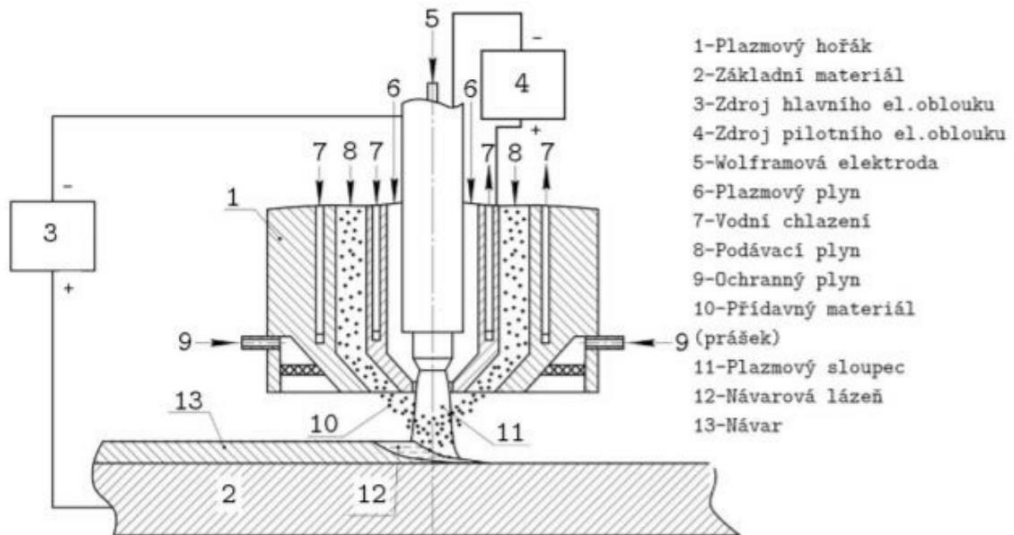
IH	IL	Frekvence	Rychlost podávání	Rychlost navařování	Rozkyv	Pauza (negativ/ pozitiv)
proud horní	proud dolní	při jaké frekvenci dochází k změně proudu	rychlost hmotnostního průtoku přidavného prášku	rychlost posuvu hořáku	šířka rozkyvu/ rychlost rozkyvu	doba udržení v krajní poloze rozkyvu

1.1.5 PTA plazmatrony

Plazmové hořáky (viz Obr. 5) jsou klíčovými nástroji v procesech navařování, právě například u technologie PTA, a dalších technologií využívajících plazma jako tepelný zdroj. Jejich konstrukce zahrnuje, mimo zmíněnou netavící se wolframovou elektrodu, kanálky pro plazmový plyn, systém chlazení vodou a zařízení pro přívod přidavného materiálu ve formě prášku. Hlavním úkolem těchto hořáků je vytvářet stabilní plazmový oblouk, který dosahuje extrémně vysokých teplot nezbytných pro proces navařování.[11][15]

Elektroda je připojena k zápornému pólu zdroje proudu, zatímco navařovaná součást je na kladném pólu. [11][15]

Konstrukce plazmatronů je navržena tak, aby vyhovovala různým geometriím navařovaných povrchů a formám materiálů. Důležitou součástí je již zmíněný systém chlazení, který je nezbytný pro udržení optimálních provozních teplot. [16]



Obrázek 5 Schéma plazmatronu [17]

1.1.6 Využívané plyny

Při navařování plazmatem se využívají tři typy plynů, z nichž každý má specifickou roli. Plazmový plyn je zodpovědný za vytváření samotného plazmatu, zatímco podávací plyn slouží k dopravě přídavného materiálu do tavné lázně. Ochranný plyn je důležitý pro ochranu lázně.[18]

Nejběžněji používaným plazmovým plynem je argon, případně jeho směsi s jinými plyny (viz Tab. 2). Klíčovým parametrem plynu je jeho ionizační energie, která ovlivňuje snadnost ionizace. Nižší ionizační energie umožňuje snazší zapálení oblouku. Výstupní rychlost plazmatu se při navařování obvykle pohybuje mezi 200-500 m.s⁻¹. [18]

Ochranné plyny používané při navařování plazmatem jsou obvykle stejné jako při svařování metodami MIG/TIG, tedy inertní plyny jako argon a helium, a jejich směsi. Argon je často volbou číslo jedna kvůli nízkým nákladům. Další plyny, jako dusík, vodík nebo helium, se používají v závislosti na konkrétní aplikaci. Argon s příměsí helia do 30 % umožňuje použití nižšího svařovacího proudu, což snižuje opotřebení hořáku a elektrody.[18]

Podávacím plynem je opět často argon, z důvodu jeho dostupnosti a nízké ceny. Každý z těchto plynů má svůj vlastní okruh a množství plynu se upravuje v závislosti na ostatních svařovacích parametrech. Obecně platí, že ochranný plyn má největší průtok, následuje podávací plyn a nejmenší průtok má plazmový plyn.[18]

Tabulka 2 Využívané plazmové plyny [15]

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

1.2 Přídavné materiály

Výběr práškového materiálu má výhodu ve velké rozmanitosti složení. Materiál může obsahovat směsi různých prvků, přičemž se preferují ty, které zajišťují vhodné finální parametry návaru za přijatelnou cenu. Nejčastěji používané materiály jsou na bázi kobaltu, niklu nebo železa. Mohou být kombinovány s dalšími prvky jako chrom, vanad, wolfram, uhlík, bór nebo křemík. Volba přídavného materiálu závisí na mechanických a tribologických požadavcích i na ceně.[19][20]

Při výběru drátového přídavného materiálu se bere v úvahu jeho nižší cena ve srovnání s práškem, standardní použití svařovacích drátů a možnost dodržování norem pro testování čistoty a kvality. Práškové přídavné materiály pak kromě výhody v možnosti kombinace různých materiálů nabízí přesné dávkování složek pro dosažení požadovaného chemického složení návaru.[19][20]

V praxi se používají různé materiály pro navařování plazmatem v závislosti na fyzikálně-chemických vlastnostech a odolnosti vůči zátěži. Tyto materiály se dělí do dvou hlavních skupin: materiály s matricí na bázi železa a slitinové materiály na bázi neželezných kovů. Mezi nejčastěji používané patří rychlořezné, nízkolegované, korozivzdorné, vysoce chromové oceli a niklové slitiny.[19][20]

1.2.1 Nikl a jeho slitiny

Nikl, chemicky označovaný jako Niccolum, je kov s významnou rolí v průmyslových aplikacích, především díky své schopnosti být legován širokou škálou dalších kovů. Tato vlastnost mu umožňuje poskytovat významné inženýrské vlastnosti, zejména ve formě slitin a niklových ocelí. Nikl je známý svou bílou barvou a feromagnetickými vlastnostmi, což ho odlišuje od mnoha jiných kovů. Jeho tepelná a korozní odolnost je

významná, což je výhodné pro mnoho aplikací v průmyslovém a technologickém sektoru.[21]

V průmyslovém kontextu se nikl často využívá v slitinách s cílem zvýšit jejich korozivzdornost, žárupevnost a houževnatost. Slitiny s vyšším obsahem niklu jsou obzvláště ceněny pro svou schopnost odolávat extrémním teplotám a korozním podmínkám. Při výrobě parních turbín, například, se slitiny niklu využívají v lopatkách a hřídelích díky své odolnosti a pevnosti.[21]

V průběhu času bylo vyvinuto mnoho značek slitin niklu, které se v průmyslu běžně používají a jsou dobře známé. Značky, jako je Inconel[®], Incoloy[®], Nimonic[®], Brightray[®], Nilo[®], Hastelloy[®], jsou spojeny s výrobcí a označují specifické vlastnosti jednotlivých slitin, což usnadňuje výběr materiálu pro konkrétní aplikace.[21]

1.2.1.1 Inconel[®] slitiny

Slitiny Inconel[®] jsou známé svou vynikající odolností proti oxidaci, která je činí ideálními pro korozní prostředí, typicky v průmyslových tepelných procesech. Díky obsahu niklu, chromu a případně hliníku jsou tyto slitiny schopny odolávat extrémním teplotám, což ještě lze zvýšit precipitačním vytvrzováním. Mezi typické slitiny Inconel[®] patří Inconel 600[®] a 625[®], které mají dobrou odolnost vůči suchým plynům a jsou proto vhodné pro vakuové pece a chlorační zařízení.[21]

Niklová slitina typu 625 (viz Tab. 4) vyniká svou vysokou pevností, výbornou žárupevností a velmi dobrou odolností proti koroznímu napadení, a to i v chemicky agresivních prostředích (kyseliny, slaná voda). Obsahuje nikl, chrom, molybden a niob (viz Tab. 3).[21]

Slitiny Ni-Cr, známé pod komerčním názvem Inconely[®] zahřátím vytvářejí silnou stabilní pasivující vrstvu oxidu, která slouží jako ochrana povrchu před dalším poškozením. Využívají se například u lopatek a těsnění plynových turbín.[21]

Vlastnosti niklové slitiny typu 625 jsou dále charakterizovány teplotním rozsahem (použití při teplotách do 1000 °C) a mechanickými vlastnostmi (v teplotním rozsahu od přibližně 650 °C do 850 °C se tato slitina stává velmi křehkou). Tato slitina má teplotu likvidu 1350 °C a teplotu solidu 1290 °C. Při teplotě 700 °C dosahuje pevnost okolo 450 MPa, po tepelném zpracování až 1400 MPa. Obsahuje také precipitáty, které zlepšují žárupevnost a odolnost proti koroznímu praskání.[21]

Tabulka 3 Chemické složení slitiny Inconel 625[®] [21]

	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	Nb [%]	Fe [%]	C [%]	Ti [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	P [%]
Inconel 625 [®]	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 4 Mechanické vlastnosti slitiny Inconel 625[®] [21]

Mechanické vlastnosti	Inconel 625 [®]
Hustota [g.cm ⁻¹]	8,44
Teplota tání [°C]	1290
Pevnost v tahu [MPa]	760
min. Výnosová síla [MPa]	345
Prodloužení [%]	25
min. Tvrdost [HB]	220

1.2.2 Křemík

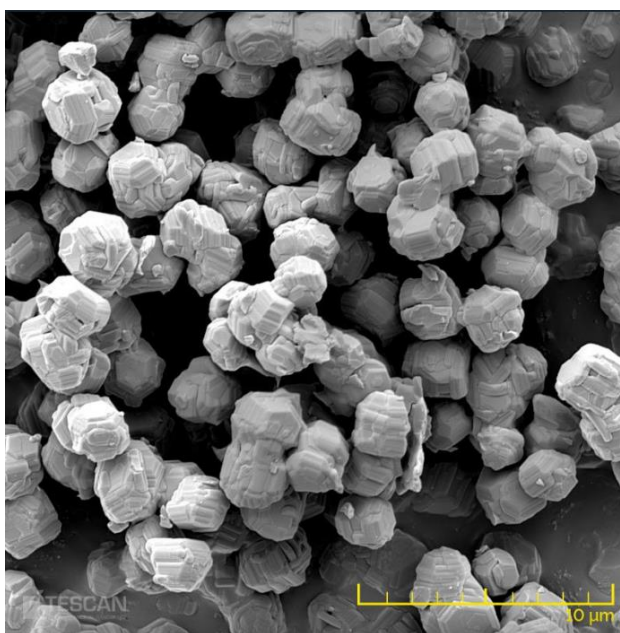
Elementární křemík je modrošedá, lesklá, a relativně tvrdá látka, dosahující hodnoty 7 na Mohsově stupnici tvrdosti. Tato křehká krystalická látka má teplotu tání 1420 °C a teplotu varu 3280 °C, přičemž její hustota je přibližně 2,33 g.cm⁻³. Elektrický odpor křemíku klesá s rostoucí teplotou, což odpovídá jeho polovodičové povaze.[22]

Křemík krystaluje v kubické soustavě, s meziatomovou vzdáleností 235 pm, a má strukturu podobnou diamantu. Za vysokých tlaků může dojít k tvorbě druhé kubické modifikace křemíku, která má vyšší hustotu (přibližně 2,55 g.cm⁻³) a deformované tetraedrické uspořádání atomů křemíku, s meziatomovými vzdálenostmi mezi 230 a 239 pm.[22]

1.2.2.1 SiC

Karbid křemíku (SiC) (viz Obr. 6) je známý jako extrémně tvrdý abrazivní materiál s vysokou tvrdostí dosahující až 2600 HV, hodnoty 9,5 na Mohsově stupnici, což mu zajišťuje vynikající ořezuvzdornost. Jeho nízká hustota přibližně 3,2 kg.m⁻³ a vysoká pevnost dávají tomuto materiálu široké spektrum využití.[23]

Výroba karbidu křemíku probíhá reakcí uhlíku s křemíkem nebo oxidem křemičitým za vysokých teplot. Tato sloučenina uhlíku a křemíku, nachází uplatnění v průmyslových procesech. Je využívána jak k otryskávání, tak k výrobě podlah pro speciální použití (příměsový materiál pro podlahy odolné vůči oděru a pro podlahy odvádějící elektrický náboj). Díky své vynikající tvrdosti se karbid křemíku používá i jako brusný materiál a jako kotvící úprava před eloxováním. Také při výrobě žárovzdorných cihel a jako polovodič. [22][23]



Obrázek 6 Mikrografický snímek SiC [24]

Karbid křemíku se rovněž používá pro grafitizační očkování litin, kde jeho obsah ovlivňuje vlastnosti litiny. Ekonomicky výhodnější než použití ferosilicia, přispívá ke snížení sklonu litiny k tvorbě ředin a zvyšuje podíl ocelového odpadu ve vsázce. Stabilizuje tím mechanické vlastnosti litiny.[22][23]

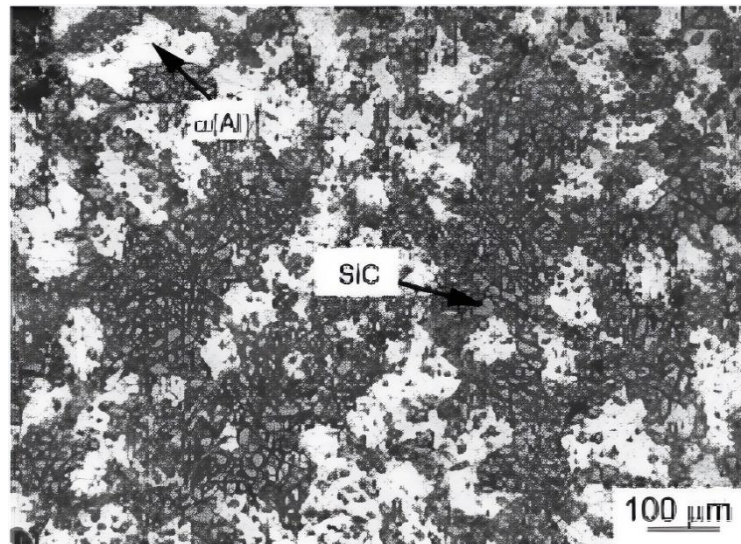
V průmyslové výrobě se karbid křemíku využívá ve formě brusných zrn pro výrobu brousících nástrojů a pomůcek, tryskání, výrobu žárovzdorných materiálů a elektrotechnické izolace. Jeho široká aplikace zahrnuje i použití jako plnivo do epoxidových pryskyřic pro zvýšení odolnosti vůči opotřebení.[22][23]

1.3 Kompozity

Kompozitní materiály jsou heterogenní materiály, které se skládají ze dvou nebo více fází, z nichž každá má odlišné mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Matrice představuje spojitou fázi, zatímco výztuž je nespojitá fáze s obvykle vylepšenými

mechanickými vlastnostmi. Tento princip vyztužení je klíčovým faktorem pro zlepšení vlastností kompozitního materiálu.[25][26]

Existuje tzv. synergismus mezi složkami kompozitu, kdy vlastnosti výsledného materiálu jsou lepší, než by odpovídalo pouhému součtu vlastností jednotlivých složek. Tato vlastnost je klíčová pro získávání materiálů s novými a kvalitativně odlišnými vlastnostmi.[25][26]



Obrázek 7 Mikrostruktura litého kompozitu AlSi10/SiC [26]

Kompozitní materiály se vyrábějí postupy mechanického mísení nebo spojování jednotlivých složek, což je odlišuje od slitin, které vznikají fázovými přeměnami blízko termodynamické rovnováhy.[25][26]

Matrice kompozitu může být kovová (viz Obr. 7), polymerní nebo na bázi skla či keramiky. Vyztužující fáze může být částicová, vláknová nebo skeletová.[25][26]

Pro spojení jednotlivých dílů kompozitních materiálů se používají metody mechanického spojování, lepení, svařování nebo pájení, přičemž každá metoda má své výhody a omezení. Pro vytvoření konstrukčních celků je důležité, aby vzniklé spoje zachovávaly dostatečnou pevnost a tuhost, což může být někdy obtížné, zejména u vláknových kompozitních materiálů.[25][26]

1.4 Kompozity s kovovou maticí Ni slitin + SiC

Kompozity využívající keramické částice v kovovém pojivu kombinující Ni slitiny a SiC se v průmyslu běžně nepoužívají. Studie [27] zkoumá, jak vylepšit povrch

Inconelu 625[®], přidáním částic karbidu křemíku (SiC), výsledné mikrostruktury a jejich vliv na tvrdost materiálu. Přítomnost částic SiC během procesu tavení vedla k vytvoření rozmanitých a nových struktur na povrchu slitiny, včetně drátěných, tyčových, trubkových, pyramidových, bambusových a pinzetových morfologií. Kromě toho byla pozorována vláknitá struktura a tenké uhlíkové vrstvy, zejména v místech rozkladu částic SiC.[27]

Tyto nové struktury hrají zásadní roli při zlepšování vlastností materiálu. Modifikovaný povrch vykazoval výrazné zvýšení tvrdosti – až dvojnásobné oproti nemodifikované slitině (viz. Obrázek 10). Toto zlepšení se připisuje jak novým mikrostrukturám, tak integraci atomů křemíku (Si) a uhlíku (C) do mřížky Inconelu 625[®]. [27]

Studie rovněž uvádí, že morfologie opětovně zpevněného materiálu je ovlivněna složením slitiny a rychlostí chlazení po vybraném procesu navařování – EBM. Unikátní struktury vzniklé během procesu působí jako bariéry pro pohyb dislokací. Bráněním pohybu dislokací se zvyšuje tvrdost.[27]

Experimentální studie prokázala, že tavení elektronovým svazkem, pokud je použito pro vyztužení částicemi SiC, může výrazně zvýšit povrchovou tvrdost slitiny Inconel 625[®] (viz. Obrázek 10). [27]

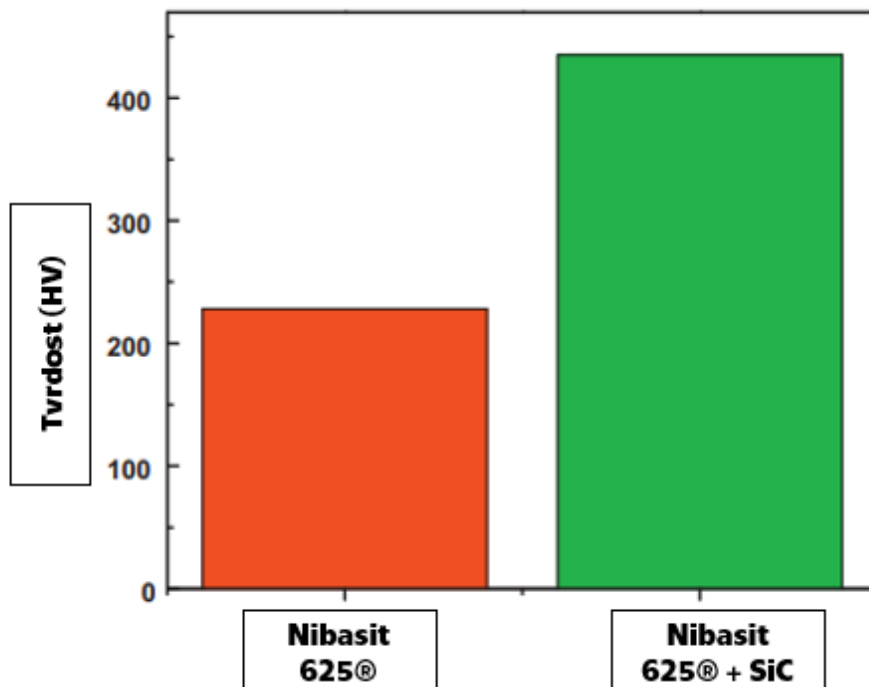
Obrázek 8 ukazuje růst pyramidových struktur při tavení elektronovým svazkem a obrázek 9 zobrazuje vznik různých struktur různých tvarů připomínajících bambusy, terasy, pinzetové struktury a eutektické fáze.[27]



Obrázek 8 Růst pyramidových struktur při tavení EB (SEM, 500x)[27]



Obrázek 9 Růst pinzetových a eutektické fázi (SEM, 1390x)[27]



Obrázek 10 Sloupcový graf znázorňující tvrdost modifikovaných slitin[27]

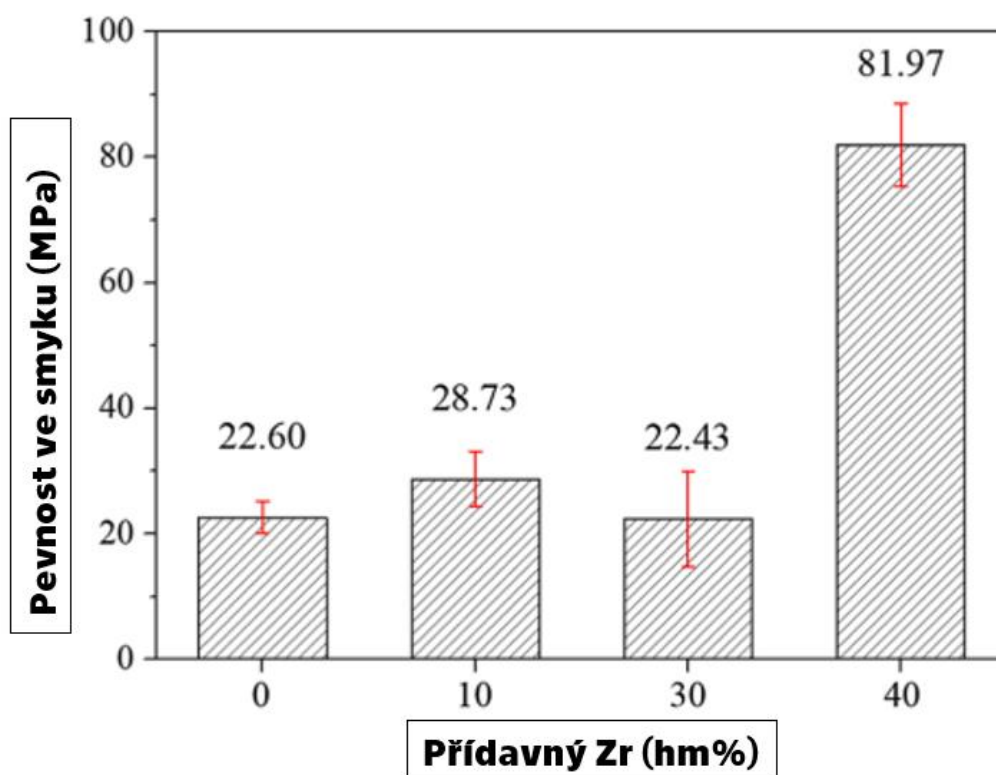
Jedna z mála publikovaných studií s tematikou přidavku SiC do Inconelu zkoumá použití zirkonia (Zr) jako přísady, která zabraňuje tvorbě grafitu a zvyšuje mechanickou pevnost spoje. Samotná reakce niklu s SiC za vysokých teplot vede ke vzniku grafitu, který oslabuje pájený spoj.[28]

Studie zkoumá, jak různé množství Zr ovlivňuje kvalitu spoje, se zaměřením na mikrostrukturu, mechanické vlastnosti a teoretický vliv zbytkového napětí.[28]

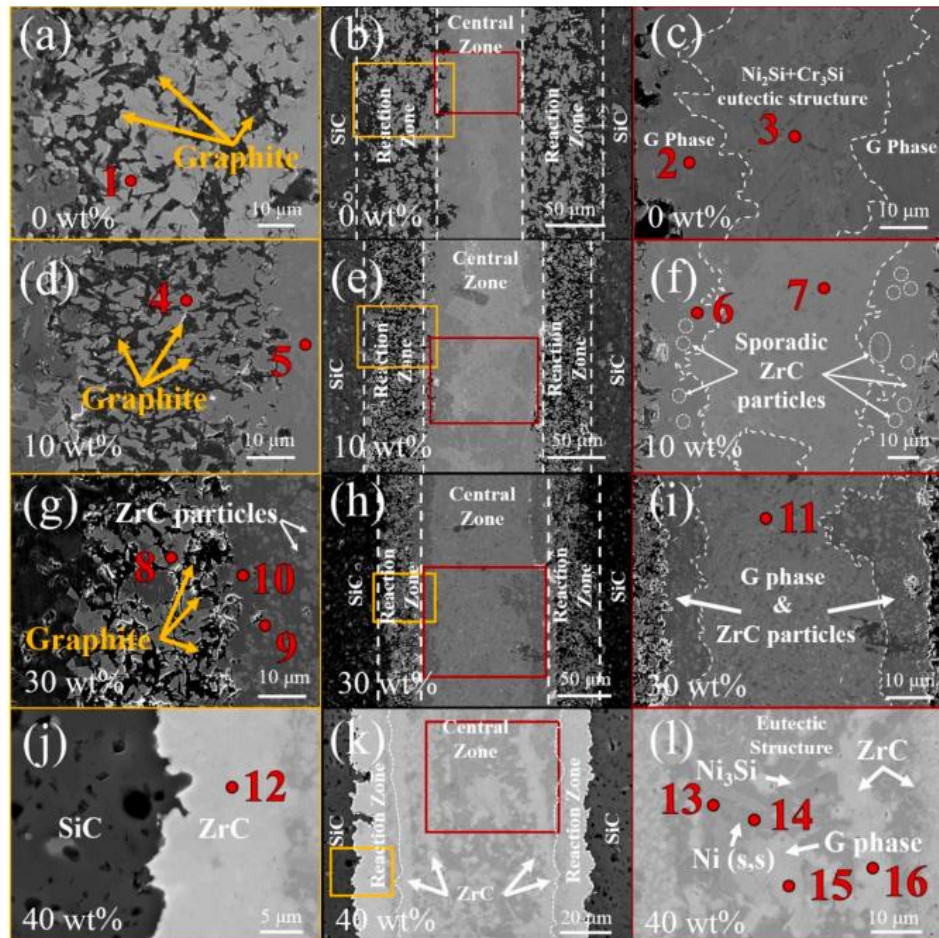
Studie zjistila, že přidavek Zr ve výši 40 hmotnostních procent je mezní hodnotou, při které již grafit ve spoji není přítomen. Tato absence grafitu vedla k výraznému zvýšení pevnosti spoje ve smyku, která dosáhla 81,97 MPa – téměř trojnásobku pevnosti spojů, kde byl grafit přítomen (viz Obrázek 11).[28]

Ukázalo se, že přidavek Zr do plniv slitin na bázi Ni je úspěšnou strategií při eliminaci tvorby grafitu při pájení SiC keramiky, což vede k mnohem pevnějšímu spoji. Výsledky studie naznačují, že obsah Zr 40 % je optimální pro dosažení nejlepších mechanických vlastností, což má potenciál významně zvýšit životnost a spolehlivost keramických komponent SiC v různých aplikacích.[28]

Obrázek 11 ukazuje pevnost SiC spojů ve smyku při pokojové teplotě a obrázek 12 znázorňuje mikrostrukturu spojů SiC pájených při 1400 °C slitinou Inconel 625[®] s různým množstvím přidavku Zr.[28]



Obrázek 11 Pevnost SiC spojů ve smyku při pokojové teplotě[28]



Obrázek 12 Mikrostruktura SiC spojů pájených při 1400 °C slitinou Inconel 625[®] s různým množstvím přídavku Zr[28]

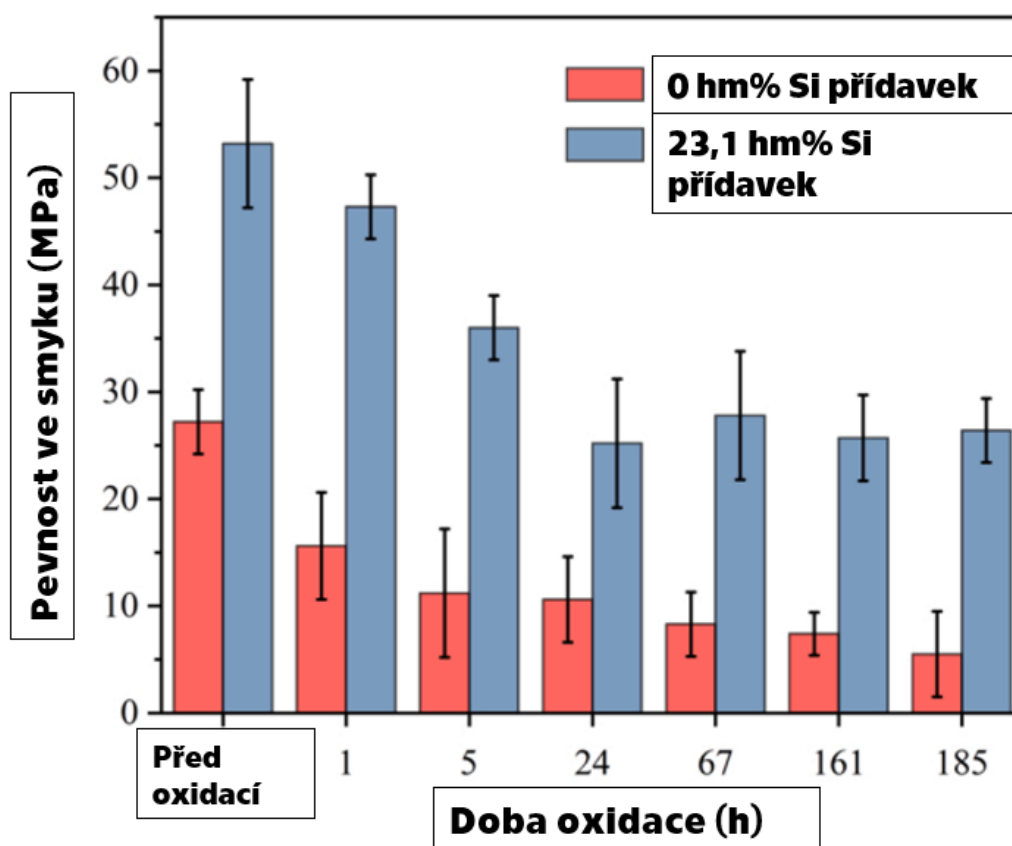
Studie [29] problematiku tvoření grafitu řeší strategickým přidáváním elementárního křemíku do pájeného spoje. Výzkum ukazuje, že když obsah Si ve tavné lázni dosáhne určité hodnoty hmotnostních procent, reakce mezi přídavným Inconelem 625[®] a základním SiC se změní, což vede ke vzniku spojů bez grafitu se zvýšenou odolností proti oxidaci a mechanickou pevností. Cílem bylo nejen zabránit tvorbě grafitu, ale také zlepšit mechanické vlastnosti a odolnost vůči oxidaci spojů pomocí vzniku SiO₂. [29]

Výsledky byly porovnány se spoji vytvořenými s použitím konvenčního plniva Inconel 625[®] bez přídavku Si. Analýza potvrdila, že spoje modifikované Si vykazovaly čisté rozhraní, netvořil se v nich grafit a výrazně se zlepšily mechanické vlastnosti, přičemž si zachovaly pevnost 25,7 MPa i po 185 hodinách oxidace na vzduchu ve srovnání s drastickým poklesem na 5,5 MPa u spojů s grafitem (viz. Obrázek 13). [29]

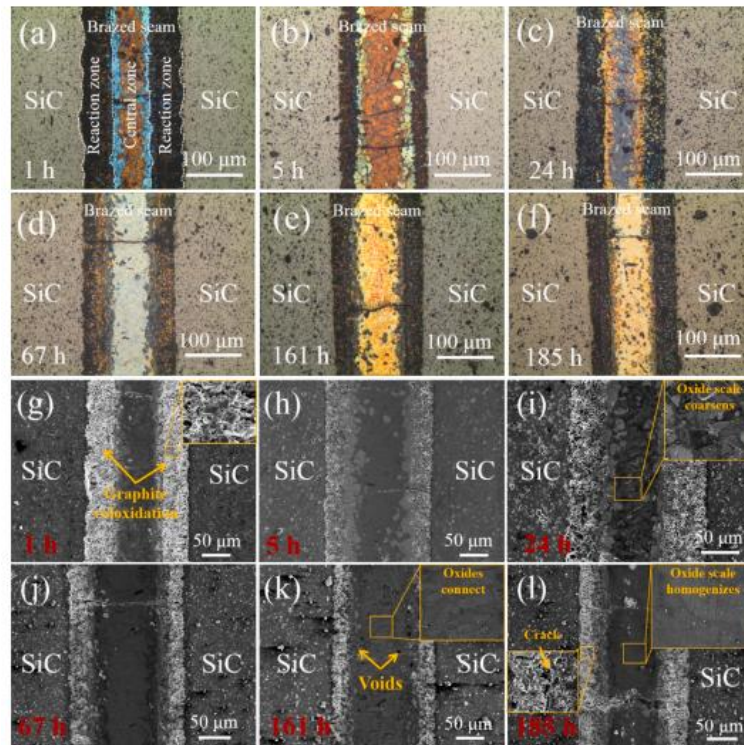
SiO₂ hraje klíčovou roli v oxidační odolnosti bez grafitového spoje SiC. Na povrchu spoje vytváří ochrannou vrstvu oxidu, která brání pronikání kyslíku a chrání vnitřní strukturu před oxidací. SiO₂ chrání více než NiO a Cr₂O₃ a vykazuje vynikající schopnost bránit proti difúzi kyslíku. [29]

SiO₂ se tvoří jako sekundární vrstva oxidu v spoji za vysokých teplot. Výsledky analýzy XPS ukázali, že se SiO₂ tvoří na povrchu a jeho koncentrace se zvyšuje s dobou oxidace. Tento vznik se přičítá přítomnosti Si v silicidu Ni-Si, což vede ke zvyšování množství SiO₂ během oxidace.[29]

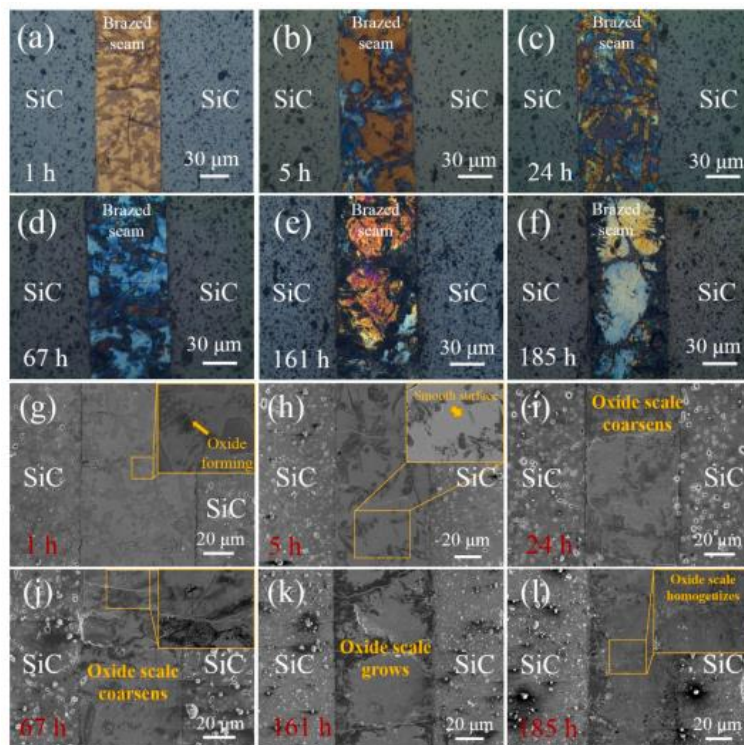
Podle studie je ideální přídavek Si pro dosažení požadovaných výsledků 23,1 % hmotnostních procent (viz Obr. 14 a 15) Tento podíl umožňuje, aby svarová lázeň dosáhla termodynamické rovnováhy s SiC, což zabraňuje tvorbě grafitu a vede k jasnému a zřetelnému rozhraní bez grafitu. Zároveň Si napomáhá k tvorbě SiO₂ na úkor jiných oxidů.[29]



Obrázek 13 Pevnost ve smyku spojů SiC před a po oxidaci při 800 °C po různou dobu[29]



Obrázek 14 Mikrostruktury spojů SiC s přísávkem 0 % hm. Si po oxidaci při 800 °C po různou dobu [29]

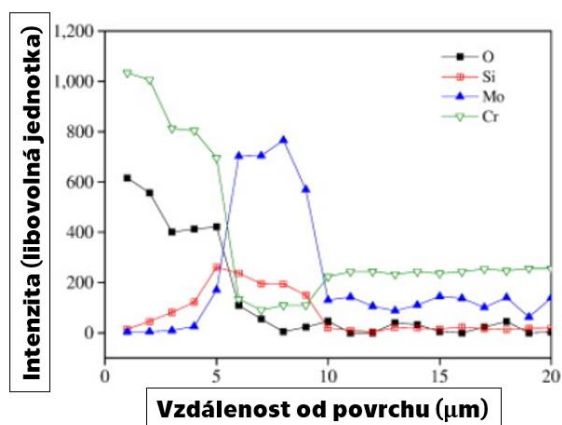


Obrázek 15 Mikrostruktury spojů SiC s přísávkem 23,1 % hm. Si po oxidaci při 800 °C po různou dobu [29]

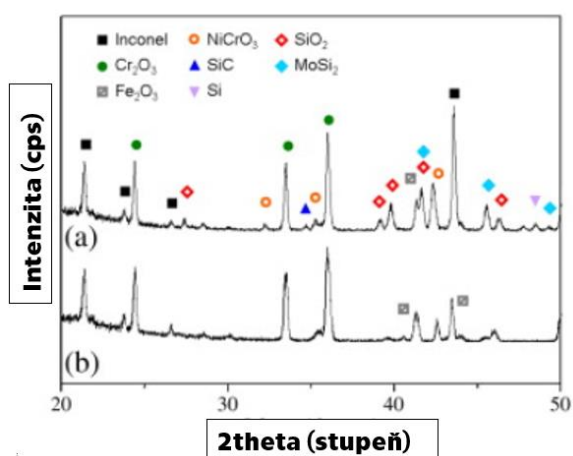
Další studie využívající SiO_2 pro oxidickou ochranu naneseného povlaku je studie [30]. Tradiční ochranné vrstvy, jako je Cr_2O_3 , jsou sice účinné, ale při teplotách nad $1000\text{ }^\circ\text{C}$ se odpařují, takže finální povlaky jsou náchylné k oxidaci (viz Obr. 16 a 17).[30]

Procesem studeného nástřiku prochází základní Inconel 625[®] plastickou deformací vnikem částic SiC. Tím se zajistí nejen pevná fyzická vazba mezi povlakem a základním materiálem, ale také se vytvoří podmínky pro vznik vrstev MoSi_2 a SiO_2 pod vrstvou SiC. Tyto vrstvy snižují rychlosti oxidace tím, že působí jako bariéry pro vnější difúzi chromu.[30]

Zkoušky čtyřbodovým ohybem potvrzují silnou přilnavost oxidových šupinek, která je nezbytná pro prevenci další oxidace. Tato pevná přilnavost je rozhodujícím faktorem pro dlouhou životnost povlaku, a tím i pro odolnost podložky (základního materiálu) vůči oxidaci v prostředí s vysokými teplotami.[30]



Obrázek 16 Profil koncentrace složení hlavních prvků ve vzorku s povlakem SiC po 188hodinové expozici při $1000\text{ }^\circ\text{C}$. [30]



Obrázek 17 XRD pro a) vzorky s povlakem SiC a b) vzorky bez povlaku po 65 hodinách oxidace při $1000\text{ }^\circ\text{C}$. [30]

2 Experimentální část

2.1 Využitá zařízení

2.1.1 PPC 250 R6[31]

PPC 250 R6 (KSK s.r.o., Česká Třebová, Česká republika). Plazmové navařovací zařízení je určeno pro navařování rotačních i nerotačních dílů metodou PTA. Díly mohou být navařovány na čele nebo po jejich obvodu. Stroj umožňuje pulzní navařování s proudem 50–250 A a frekvencí 0–200 Hz. Jeho navařovací část s hořákem je uzavřena krytem s ochranným sklem. Hořák stroje je veden ve čtyřech osách, X, Y, Z a N, takže posuv je umožněn ve třech osách s otáčením celého systému, zatímco polohovadlo je řízeno ve dvou osách, C a R. Zařízení je vybaveno dvěma podavači přídavného materiálu ve formě prášku. Zařízení lze ovládat manuálně nebo automaticky pomocí programovací konzoly.

Tabulka 5 Parametry PPC 250 R6

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

2.1.1.1 Jednotlivé části PPC 250 R6:

Systém řízení

Systém řízení disponuje 15" dotykovou obrazovkou XVGA umístěnou v klimatizovaném boxu se systémem B&R a řídicím softwarem vyvinutým společností KSK. Programování stroje je možné na obrazovce, či za využití metody „teach-in“ pomocí dálkového ovládání. Diagnostiku stroje lze provádět online přes internet.

Polohovadlo

Polohování stolu lze uskutečnit v osách R a C. Osa R umožňuje polohovadlu rotaci a osa C naklápění.

Tabulka 6 Parametry polohovadla PPC 250 R6

Průměr polohovací desky [mm]	Nosnost polohovadla [kg]
300	max 30

Systém pro podávání prášku

Zajišťuje stabilní a regulované dodávání přídatného materiálu do hořáku pomocí podávacího plynu. V základní konfiguraci je stroj vybaven pouze jedním podavačem, který má kapacitu až 10 kg. Výrobce se doporučuje zrnitost prášku 50-200 µm.

Plazmatron

Hořák (anoda) i wolframová elektroda (katoda) jsou během navařování chlazeny vodou. Hořák se pohybuje za pomoci servo motorů.

Tabulka 7 Maximální možný rozsah manipulace plazmatronu PPC 250 R6

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

2.1.2 Ahlborn Almemo 5690-2M[32]

Měřicí jednotka Ahlborn Almemo 5690-2M slouží k záznamu teploty vně základního materiálu v určitých bodech během navařování. Pomocí termočlánků zaznamenává průběh ohřevu. Data jsou zaznamenána na MMC – kartu ve formátu FAT16. Ústředna Ahlborn Almemo 5690-2M má až dvacet vstupů. Jednotka provádí až sto měření za vteřinu pomocí A/D převodníku Delta-Sigma. Programování lze uskutečnit manuálně, či pomocí softwaru AMR-Control.

2.1.3 Labotom -3[33]

Metalurgická pila od společnosti Struers je určena především pro materiálové laboratoře k dělení vzorků určených pro tvorbu metalografických výbrusů. Základem řezacího výkonu stroje Labotom-3 je třífázový motor o výkonu 3/3,2 kW. Tento motor poskytuje stroji sílu k řezání materiálů o průměru až 90 mm. Řezací stůl vyrobený z nerezové oceli a vybavený integrovanými T-drážkami nabízí stabilní a univerzální

platformu pro upevnění a polohování vzorků. Začlenění jasného LED světla do řezací komory zlepšuje viditelnost, která napomáhá k dosažení přesných řezů. Stroj je také vybavený řezací rukojetí a hadicí na proplachování a čištění, které přispívají nejen k uživatelské přívětivosti stroje, ale také ke kvalitě vyráběných vzorků.

2.1.4 Citopress -1[34]

Metalografický lis Citopress -1 od firmy Struers je určen pro tepelné zapékání a lisování vzorků. Tento plně automatický elektro-hydraulický stroj má průměr válce 40 mm. U jednokomorového zařízení je možné nastavit až tři různé režimy chlazení. Vyniká velmi krátkou dobou zapékání – spolu s chlazením trvá proces méně než 5 minut. Vzorky jsou zalévány do pryskyřice, přičemž Struers nabízí široký výběr pryskyřic. Ty mohou být čiré nebo barevné, poskytují vynikající zachování hran zapékaných vzorků a mohou být například i elektricky vodivé nebo ve formě tablet pro zalévání sériového typu.

2.1.5 QPOL 250 A2-ECO[35]

Toto zařízení od společnosti QATM se konstrukčně odlišuje od tradičních zařízení pro přípravu metalografických výbrusů. Jedním z rozlišujících prvků je odstranění ochranného kroužku proti stříkající vodě, což umožňuje přímý přístup k pracovní ploše. Tato konstrukční volba zjednodušuje proces výměny nebo čištění pracovní plochy a také zlepšuje celkovou přístupnost vnitřních součástí stroje. Stroj vybaven montážním systémem, který automaticky aretuje plochu před umístěním brusného/leštícího papíru.

Zařízení brousící a leštící hlavy ECO disponuje možností nastavitelnými mezemi otáčení. Programování stroje umožňuje řídicí systém s 4,3" dotykovým displejem s možností ukládání metod přípravy. Stroj nabízí možnost jak manuální, tak i automatické přípravy vzorků.

Tabulka 8 Specifikace QPOL 250 A2-ECO

Qpol 250 A2-ECO	Pracovní plocha	Přípojně zatížení	Napájení	Rychlost	W x H x D	Hmotnost
	Ø 200/250 mm	2.3 kVA	200-240 V /50/60 Hz (1Ph/N/PE) 100-120 V /50/60 Hz (1Ph/N/PE)	30-600 rpm	901 x 530-610 x 710 mm	78-85 kg

Tabulka 9 Specifikace brusné hlavy ECO

Brusná hlava ECO	Jednotkový tlak	Centrální tlak	Rychlost	Síla na vzorek	Jednotková síla	Centrální síla
	1-6 vzorků, max. Ø 40 mm	Závislé na držáku	30-160 rpm	Nastavitelná	5-80 N	20-350 N

2.1.6 Buehler IndentaMet 1104[36]

Buehler IndentaMet 1104 je částečně automatizovaný měřič tvrdosti, který je vybaven až třemi objektivy a dvěma indentory. Tento přístroj používá systém s nitkovým odečítáním k automatickému měření úhlopříček vtisku a výpočtu odpovídající hodnoty tvrdosti. Tvrdoměr může, v závislosti na tvaru indentoru, měřit tvrdost podle stupnic HV, HRC, HK. Pro potřeby této práce byl použit indentor ve tvaru čtyřbokého jehlanu s úhlem skosení 136°, což odpovídá měření tvrdosti podle Vickerse. Před samotným měřením se nastaví síla vtisku a doba, po kterou indentor působí na vzorek. Naměřené hodnoty úhlopříček se dosadí do vzorce $HV=0,189.(F.d-2)$.

2.1.7 Zeiss Axio Observer D1M[37]

Tento světelný inverzní mikroskop má objektivy umístěné pod vzorkem, který se zkoumá. Je navržen pro pozorování a fotodokumentaci mikrostruktury materiálů

z metalografických výbrusů. Mikroskop nabízí zvětšení v rozsahu 100x až 1000x a umožňuje také zkoumání struktur pod lineárně polarizovaným světlem.

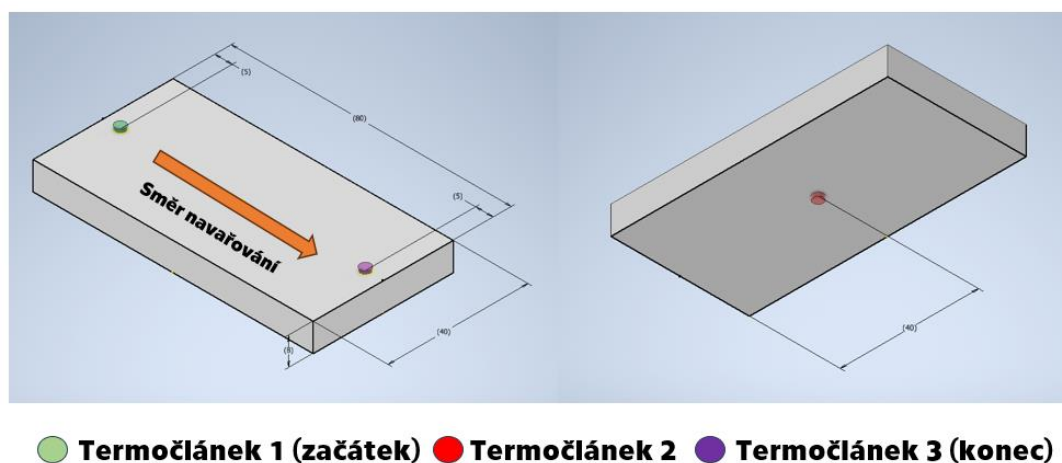
2.1.8 JEOL JSM-IT510[38]

JEOL JSM-IT200 je skenovací elektronový mikroskop s rozlišením <10 nm, který lze provozovat při vysokém i nízkém vakuu, až do ~120 Pa. Detektory sekundárních elektronů a zpětně rozptýlených elektronů poskytují doplňují informace o morfologii a složení zkoumaných vzorků. Lze využít energiově disperzní spektrometrie (EDS) pro prvkovou analýzu s identifikací bodu, plošným skenováním, liniovým skenováním a mapováním. Zařízení disponuje motorizovaným stolem XY s ručním otáčením a naklápěním. V elektronovém mikroskopu jsou čočky nahrazeny elektromagnetickými poli, které mají vhodný tvar. Pozorovaný předmět je prozařován svazkem elektronů. Tento svazek se při průchodu rozptyluje a dopadá na stínítko.

Zkoumané vzorky musí být zpravidla vodivé, aby se vytvořily dobré snímky, a musí být připevněny k podložce, aby nedošlo k poškození především elektronové pistole.

2.2 Příprava ZM a poloha termočlánků

Jako základní materiál byla zvolena korozivzdorná ocel AISI 303. Ze zvolené oceli byly vyhotoveny destičky o rozměrech 80x40x8 mm. Plochy destiček byly mechanicky očištěny a chemicky odmaštěny pomocí lihu. Před samotným procesem navařování byly na destičky základního materiálu přivařeny termočlánky snímající teplotní cyklus vzorku. Na každou destičku byly přivařeny 3 termočlánky, jejichž rozmístění je vyobrazené na obrázku 18.



Obrázek 18 Schéma umístění termočlánků

Během navařování a pozdějšího chladnutí měřicí jednotka Ahlborn Almemo 5690-2M snímala teplotu v daných místech a v intervalech 1 sekundy tyto hodnoty zapisovala. Záznam hodnot byl ukončen tehdy, když teplota termočlánu č. 2 dosáhla hodnoty 200 °C, cca 8 minut po zahájení navařování. Naměřené hodnoty byly pomocí programu Excel převedeny do grafů závislosti teploty na čase.

2.3 Navařování

Připravené destičky s navařenými termočlánu byly upnuty pomocí upínek na polohovací stůl navařovacího automatu PPC 250 R6. Z důvodu odvodu tepla byly vzorky podloženy dvěma měděnými podložkami.

Během celého experimentu bylo variabilních jedenáct různých parametrů. Pro všechny vzorky byly použity stejné procesní plyny při navařování. Argon 4.8 (99,998 % Ar) sloužil jako ochranný a podávací plyn, zatímco Alumaxx[®] Plus (Air Products), tedy směs argonu a hélia (Ar + 30 % He), byl použit jako plyn plazmový.

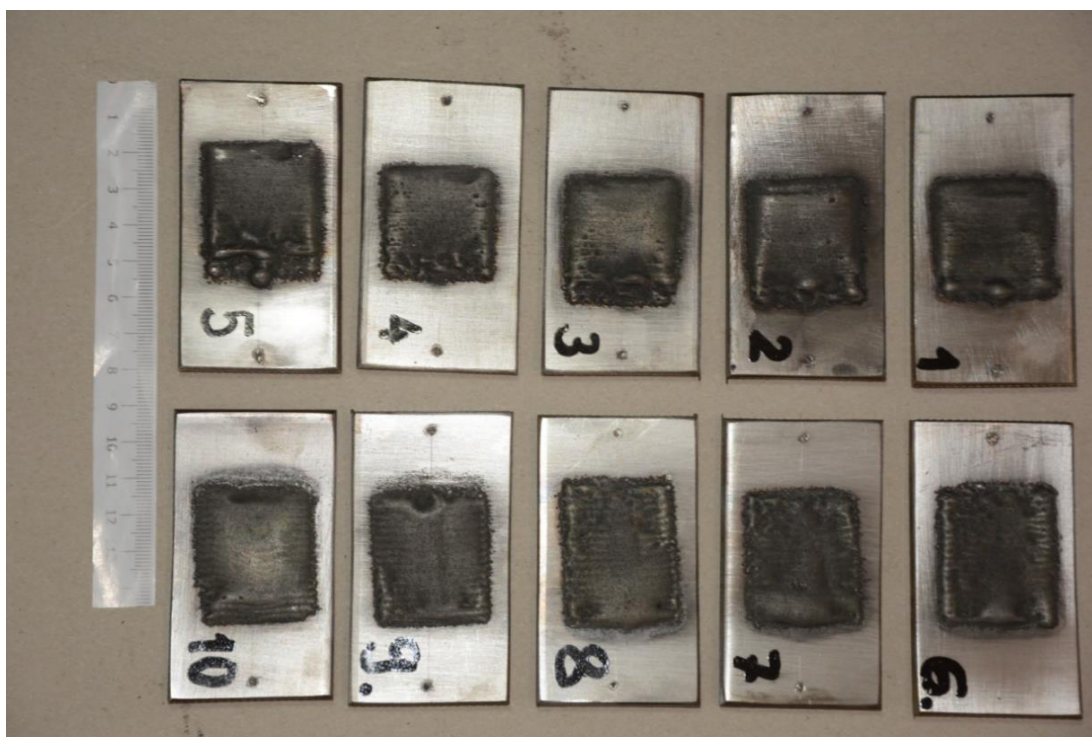
Úvodní navařovací parametry byly zvoleny na základě předešlé zkušenosti s navařováním Nibasitu 625[®] (viz Tab. 10). Tyto parametry byly využity při navaření zkušební vzorku.

Tabulka 10 Navařovací parametry pro zkušební vzorek

IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min ⁻¹]	Lin. Rychlost [mm.s ⁻¹]	Šířka rozkyvu [mm]	Rychlost rozkyvu [mm.s ⁻¹]	Pauza N/P [s]	SiC [%]
123	55	28,7	14	0,38	28	28	0,2	30

Po vizuální kontrole zkušební návaru bylo zřejmé, že parametry proudů byly nastaveny příliš vysoko. Naznačovalo tomu příliš velké natavení základního materiálu a hromadění materiálu přídavného. Finální návar tedy nekorespondoval s požadavkem zachování totožné geometrie napříč povlakem. Před navařením prvního vzorku byly tedy upraveny parametry horního a dolního proudu, rychlosti posuvu hořáku a rychlosti rozkyvu.

Navařené vzorky jsou na obrázku 19.



Obrázek 19 Navařené vzorky

2.4 Příprava metalografických výbrusů

Po navaření všech vzorků byly návary důkladně mechanicky očištěny od oxidů a od přebytečného nenataveného přídavného prášku. Následně byly vzorky číselně označeny a nařezány na metalurgické pile Labotom -3. Ze středu vzorku byl vyříznut příčně proužek přibližně 10 mm tlustý v místě umístění středového termočlánku. Poté byly vyříznuté plátky po dvou zalisovávány do „puků“ pomocí metalografického lisu Citopress -1. Papírek s označením byl zalisován na nebroušenou stranu puku pomocí čiré pryskyřice „ClaroFast transparent“. Na straně broušené byla využita černá pryskyřice „MultiFast black“. Následoval proces broušení a leštění. Broušení probíhalo za opačné rotace brusné hlavy vůči brusnému papíru. Vzorky byly broušeny pětkrát pomocí SiC papírů se systematicky se zvětšující zrnitostí, upnuté pomocí papíru „Gekko“.

Tabulka 11 Využití brusné papíry

SiC 180	SiC 500	SiC 1200	SiC 2000	SiC 4000
---------	---------	----------	----------	----------

Tabulka 12 Parametry broušení

Rychlost brusné hlavy	Rychlost brusného papíru	Síla [N]	Čas broušení [s]	Médium
65 rpm	300 rpm	30	60	voda

Leštění probíhalo ve dvou etapách. Hrubší leštění pomocí MD-Dac papíru + smáčedlo a 1 μm diamantové abrasivo a dokončení pomocí Nanocloth 0,5 μm + MasterPrep[®] 0,05 μm Al₂O₃ abrasivo.

Tabulka 13 Parametry leštění

Rychlost brusné hlavy	Rychlost brusného papíru	Síla [N]	Čas broušení [s]	Médium
65 rpm	150 rpm	30	210	smáčedlo

Finální výbrusy byly před makroskopickou analýzou uchovávány v exikátoru z důvodu minimálního vystavení vnějším vlivům. Leptány nebyly z důvodu pozdějšího pozorování pomocí elektronové mikroskopie.

2.5 Měření mikrotvrlosti

Na metalografických výbrusech bylo provedeno měření mikrotvrlosti. Mikrotvrdot byla určována dle Vickerse, tedy měřením úhlopříček zanechaných vtiskem diamantového indentoru v podobě čtyřbokého jehlanu v materiálu. Síla působící na indentor byla 1 kg a doba vtlačování 10 vteřin. Vtisky byly prováděny buď 1 mm, nebo 0,5 mm (závislé na tloušťce finálního povlaku) od vrchu návaru podélně, s odstupem 0,5 mm. U vzorků č. 1 a 10 bylo též provedeno měření vzorku příčně, tedy první dva vtisky byly umístěny do základního materiálu (0,6 mm a 0,1 mm pod hranicí mezi ZM a PM) a následně byly provedeny tři vtisky do materiálu návaru směrem k jeho povrchu.

2.6 Výsledky a diskuze

2.7 Vzorek č. 1

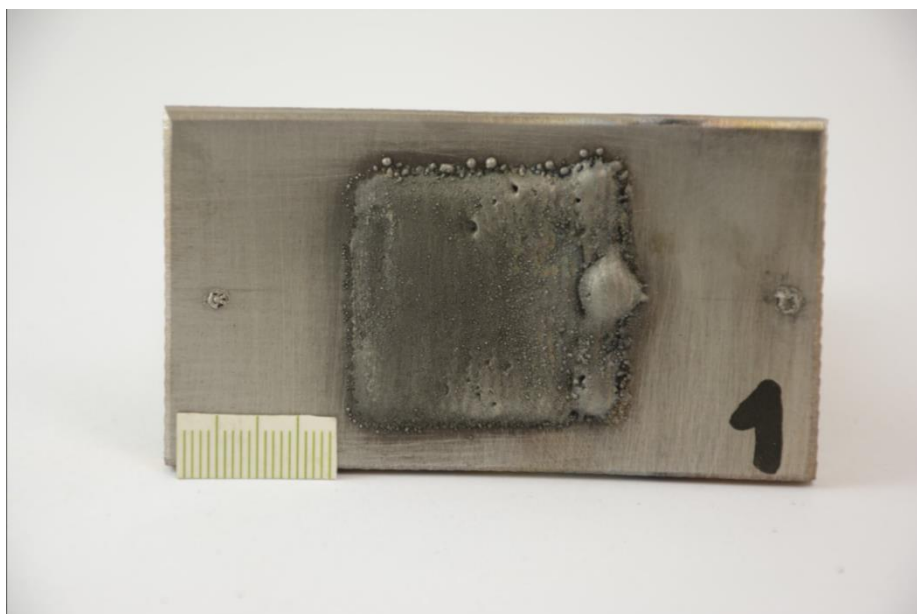
2.7.1 Zvolené parametry

Navařovací parametry vzorku č. 1 jsou zaznamenány v Tabulce 14. U prvních čtyřech vzorků byla snaha zachovat vizuálně fungující parametry, pouze měnit vzdálenost plazmatronu od základního materiálu.

Tabulka 14 Parametry navařování vzorku č. 1

IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min ⁻¹]	Lin. Rychlost [mm.s ⁻¹]	Šířka rozkyvu [mm]	Rychlost rozkyvu [mm.s ⁻¹]	Pauza N/P [s]	SiC [%]	Vzdálenost hořáku od ZM [mm]
75-90	45	28,7	15	0,45	28	22	0,2	30	10

2.7.2 Vizuální hodnocení



Obrázek 20 Vzorek č. 1

Obrázek 20 ukazuje vzorek po navaření. Během vizuální kontroly byl nejprve posouzen vzhled návaru. Povrch návaru disponuje viditelnými nerovnostmi, což naznačuje nedokonalému zvolení parametrů navařování. Až na začátek (pravá strana – nehodnocená) je návar rovnoměrný po celé své délce. Šířka návaru se pohybuje kolem 36 mm a jeho výška dosahuje 1,3 mm.

Dále byla posouzena geometrie návaru. Návar je dostatečně rovnoběžný s povrchem nerezové destičky. Celkový vzhled návaru je symetrický s mírnými odchylkami. Na povrchu jsou viditelné póry, každý o průměru cca 0,5 mm.

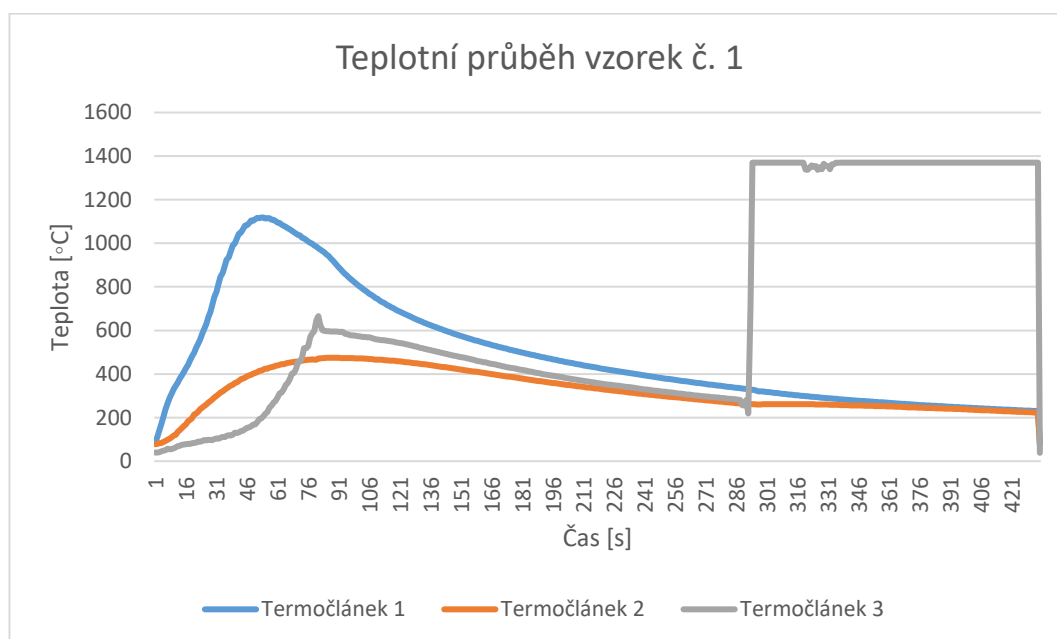
Zkouška dále odhalila drobnou deformaci základního materiálu v okolí návaru. Je způsobena vneseným teplem a neovlivňuje celkovou pevnost a stabilitu návaru. Důležitým aspektem zkoušky bylo také hodnocení rozstříku materiálu kolem návaru. Mírný rozstřík byl zaznamenán, ale jeho množství je považováno za přijatelné a neovlivňuje kvalitu návaru.

Penetrace návaru je dostatečná. Nebyly zjištěny žádné viditelné trhliny na povrchu návaru ani v tepelně ovlivněné oblasti.

Spojitosť a souvislost návaru byla rovněž posouzena. Návar je spojitý bez viditelných přerušení, což zajišťuje jeho celkovou pevnost. Přílnavost návaru k základnímu materiálu je výborná, bez známek delaminace.

I přes drobné nedostatky je dle vizuální kontroly návar vyhodnocen jako vyhovující.

2.7.3 Teplotní průběh

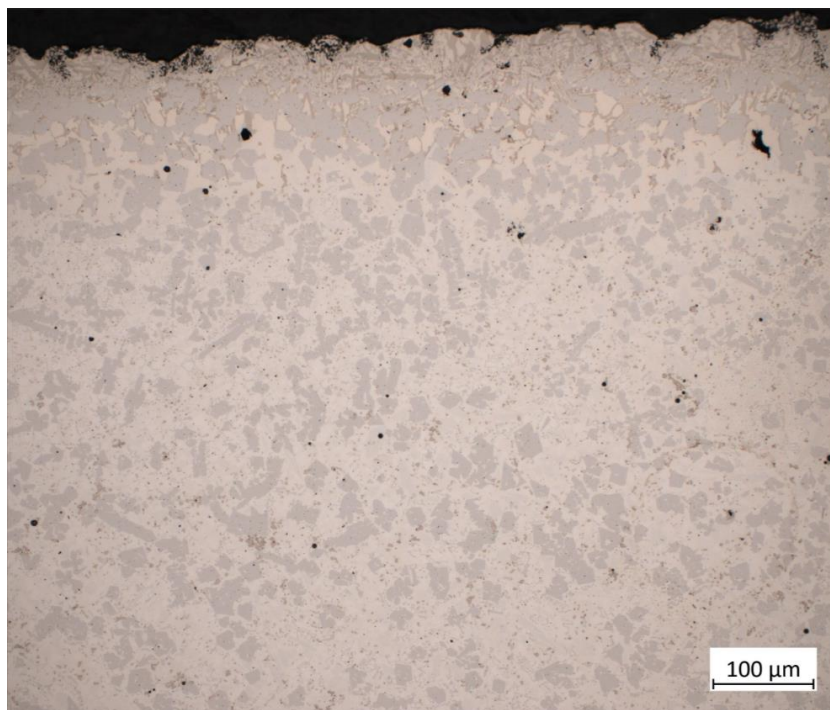


Graf 1 Teplotní průběh vzorku č. 1

Průběh teplot na termočláncích prvního vzorku (viz Graf 1) ilustruje změnu teploty během navařování. První termočlánek, označený jako Termočlánek 1, byl umístěn 0,5 mm od kraje základního materiálu. Tento termočlánek byl nejblíže k návaru na začátku procesu, proto jako první zaznamenal změnu teploty a dosáhl nejvyšších hodnot, až 1119 °C. Druhý termočlánek byl umístěn na opačné straně návarové plochy, a proto nedosahoval tak vysokých teplotních maxim. Trvalo déle, než se celý vzorek prohřál. Třetí termočlánek byl umístěn nejdále od počátečního bodu návaru, což vedlo k pozdějšímu zaznamenání změny teploty. Termočlánek 2 byl po většinu času procesu nejdál od zapáleného oblouku, dosahuje maxima 473 °C a jeho křivka odpovídá předpokladům. Vychýlení dat zaznamenaných Termočlánekem 3 v průběhu chlazení na vzduchu má za příčinění odpadnutí termočláneku z důvodu manipulace. Finální návar dosahoval výšky přibližně 1,3 mm.

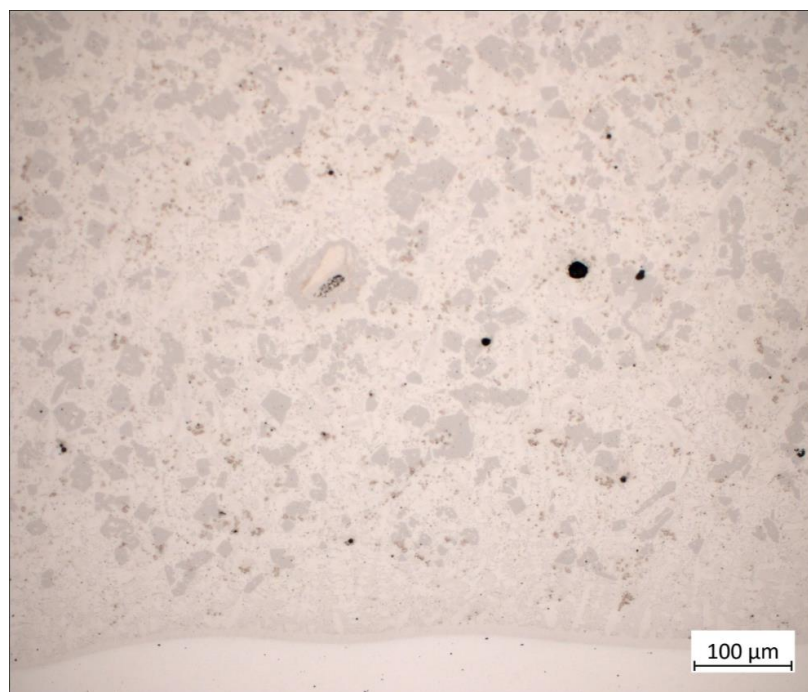
2.7.4 Mikrostruktura

Na obrázku struktury horní části návaru vzorku č. 1 (viz obr. 21) je zřejmá určitá nerovnoměrnost geometrie. V celém průřezu jsou různě velké póry. Objektív disponující 200x zvětšením umožňuje vidět hojně zastoupenou „fázi světle šedé barvy“, která je zřetelná zejména blíže k povrchu. Nejspíše se jedná o jistou formu křemíku rozpuštěného v matrici z SiC.



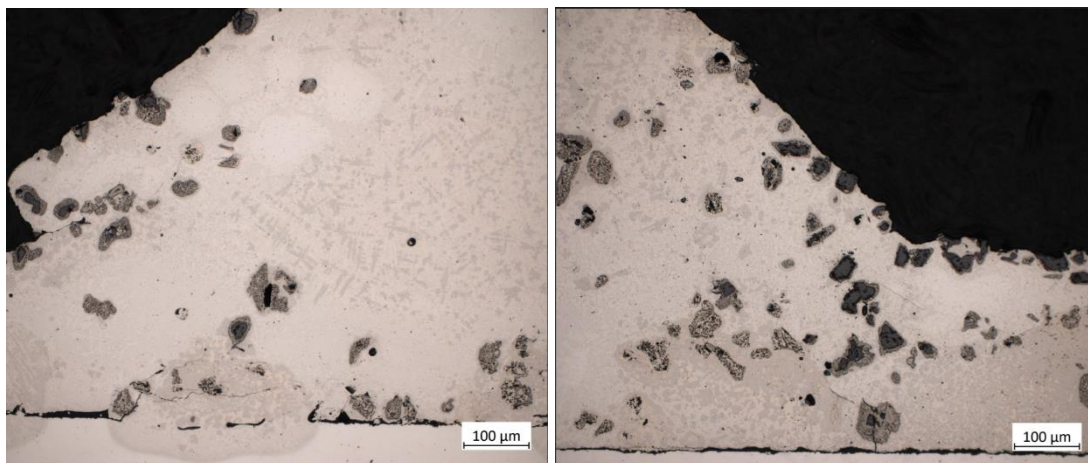
Obrázek 21 Vzorek č. 1, 200x zvětšení – povrch

Na zvětšeném snímku rozhraní vzorku č. 1 (viz obr. 22) je viditelné dobré metalurgické propojení se základním materiálem. Kromě zmíněných pórů se uprostřed snímku vyskytuje „tmavě šedá fáze“. Barva napovídá, dle předpokladů ze studií [28][29], že se jedná o určitou formu uhlíku, s velkou pravděpodobností jde o grafit.



Obrázek 22 Vzorek č. 1, 200x zvětšení – rozhraní

Blíže ke krajům povlaku je metalurgické spojení se základním materiálem méně kvalitní. Tmavě šedá fáze je hustěji zastoupena s vzdáleností od středu návaru, z velké části obklopující viditelné černé částice. Pokud se jedná o grafit, napovídalo by to, že v případě těchto částic se jedná o nenatavené částice SiC (viz obr. 23).

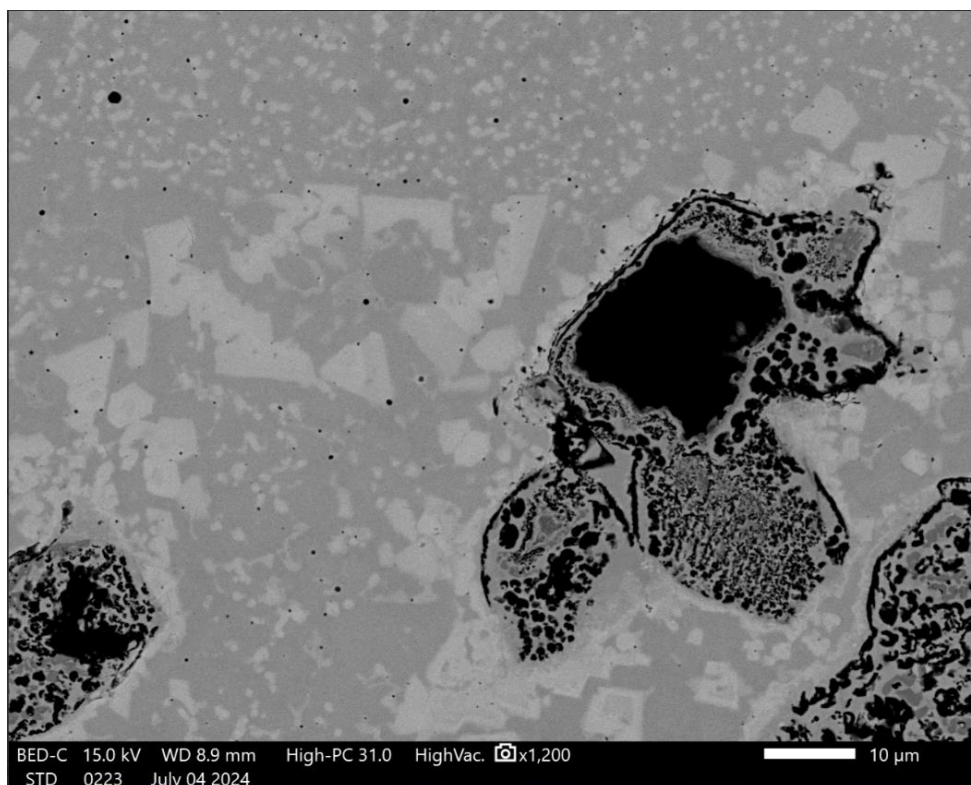


Obrázek 23 Vzorek č. 1, 200x zvětšení – kraje

2.7.5 Rozbor chemického složení viditelných fází

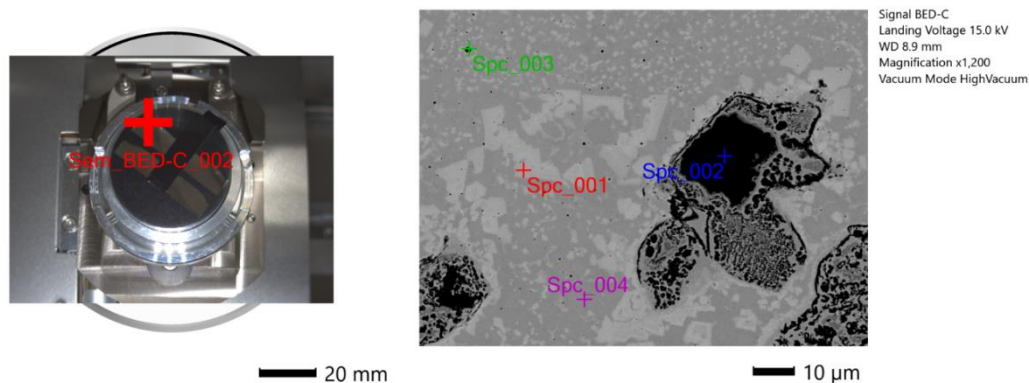
Oblast z horní části návaru obsahuje tmavé částice jejichž pravděpodobné chemické složení bylo zjištěno analýzou EDS (obrázek č. 24 1200x).

Z povahy měření nelze porovnávat objemové zastoupení uhlíku v poměru s jinými prvky, pouze ho brát v potaz při porovnávání jednotlivých měření mezi sebou.



Obrázek 24 Vzorek č.1, 1200x zvětšení - částice

Pomocí EDS (energy dispersion spectrography) analýzy vzorku č. 1 bylo definováno chemické složení v čtyřech různých bodech odlišného zbarvení. (viz Obr. 25 a Tab. 15)



Obrázek 25 Poloha a body snímání kraje vzorku č. 1 pomocí SEM

Tabulka 15 Chemické složení v bodech snímaných z obrázku 25

Název	C [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Ni [%]	Nb [%]	Mo [%]	Celkem [%]
Spc 1	11,6	-	5,94	22,34	-	-	32,51	-	27,57	100
Spc 2	44,5	0,07	54,79	-	-	-	0,64	-	-	100
Spc 3	8,67	22,11	4,32	26,32	1,51	2,21	34,85	-	-	100
Spc 4	8,6	-	3,12	19,81	-	0,47	64,78	0,96	2,26	100

Z Tabulky č. 15 je zřejmé, že většina SiC částic se během navařování rozložila za vzniku jiných karbidů, nebo se při procesu do matrice Nibasitu 625[®] vůbec nedostala.

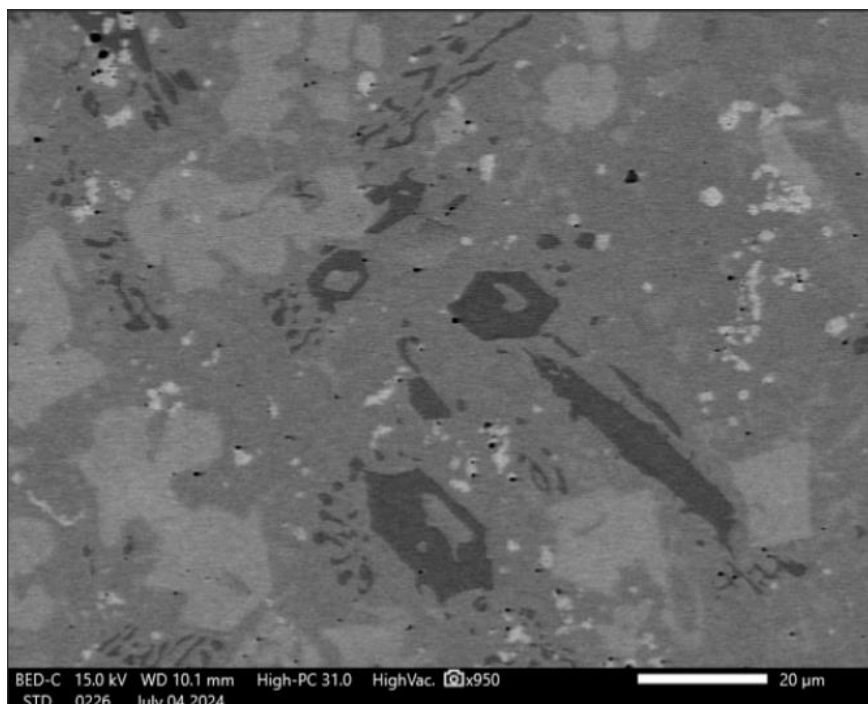
Chemické složení snímání Spc 1 charakterizuje řídce zastoupenou světlou fází, především vznikající v blízkosti černé částice. Chemické složení udává vysoké zastoupení chromu, niklu a molybdenu. Tyto prvky mohou být z části zastoupeny ve formě karbidů, především molybden navázaný z okolních fází. Nikl a chrom může být nasnímaný z matrice. To může být zapříčiněno velkou zkoumanou oblastí. Tato fáze se podobá CrMo-Ni fázi popisované v studii [27] (viz Obr. 8 a 9).

Snímání Spc 2 potvrzuje domněnku, že se v případě viditelné částice opravdu jedná o částici SiC. Černě zbarvená oblast okolo SiC naznačuje problematickou grafitizaci. Dle zbarvení se může jednat o oblast s až 90 % zastoupením uhlíku, tedy oblast velmi křehkou.

Snímání Spc 3 v černé sférovité oblasti více vzdálené od částice SiC opět ukazuje vysoké zastoupení chromu a niklu buď z matrice, nebo ve formě karbidů. Zarážející je velký objem hliníku ve struktuře. Předpokládá se, že se hliník do struktury nemohl

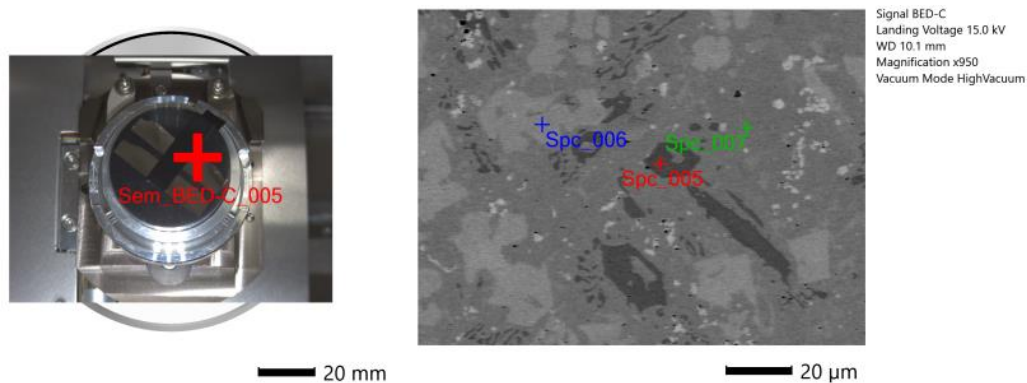
dostat ze základního, ani přídavného materiálu. Je možné, že se jedná o pevnou částici Masterprep® suspenze (Al₂O₃) využitě k finálnímu leštění výbrusu.

Spc 4 popisuje chemické složení matrice. Naměřené hodnoty prvků chromu, niklu, železa, niobu a molybdenu odpovídají teoretické hodnotě. Zvýšené hodnoty uhlíku a křemíku jsou dány difundováním prvků do matrice z SiC částic.



Obrázek 26 Vzorek č. 1, 950x zvětšení – střed návaru

Snímek příčného řezu struktury (viz Obr. 26) byl pořízen ve středu návaru. Obrázek 27 udává polohu měření a body snímání. Chemické složení strukturních komponent bylo stanoveno bodově v oblastech charakteristických fází (viz. tabulka 16)



Obrázek 27 Poloha a body snímání středu vzorku č. 1 pomocí SEM

Tabulka 16 Chemické složení v bodech snímaných z obrázku 27

Název	C [%]	Si [%]	Cr [%]	Fe [%]	Ni [%]	Nb [%]	Mo [%]	Celkem [%]
Spc 5	13,5	-	72,65	1,84	5,46	-	6,55	100
Spc 6	12,17	6,44	24,29	-	32,12	-	24,99	100
Spc 7	10,94	3,45	12,91	3,44	67,61	0,45	1,20	100

Kompozice chemického složení v snímaných bodech středu odpovídá oblastem naměřeným na krajích vzorku (viz Tab. 16).

Výsledky Spc 5 udávají mimo jiné velké objemové množství chromu v snímané oblasti (72 %). Chrom se v snímané oblasti pravděpodobně nachází ve formě karbidů, naznačuje tomu i objemové zastoupení uhlíku bez nulových hodnot křemíku.

Snímání Spc 6 v světlé fázi odpovídá měření Spc 1. Opět se jedná o CrMo-Ni fázi, uvnitř které jsou chrom i molybden navázány v karbidech. Oproti matici snížené objemové zastoupení niklu je nejspíše zapříčiněno snímáním mimo hranice fáze zasahující do matrice.

Spc 7 je opětovné snímání fáze matrice. Výkyv zastoupení prvku železa v oblasti (3 %) může být zapříčiněno navázáním prvku ze základního materiálu.

2.7.6 Mikrotvrдость

Při zkoušce mikrotvrlosti vzorku č. 1 podle Vickerse bylo vytvořeno celkem 10 vtisků čtyřbokým jehlanovým diamantovým indentorem s rozestupy 0,5 mm.

Pět vtisků bylo vytvořeno 1 mm pod povrchem návaru podélně v řadě a pět příčně skrz celý návar, z toho dva do materiálu základního (viz Tab. 17).

Tabulka 17 Mikrotvrдость vzorku č. 1

Měření:	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4	PM 5	Průměr:
Podélné HV1	546,5	618,6	587,1	444,4	456,3	530,6
Měření:	ZM 1	ZM 2	PM 1	PM 2	PM 3	Průměr:
Příčné HV1	169,7	187,9	483,2	443	411,9	446,1

Hodnoty mikrotvrđosti vzorku Nibasit 625[®] + 30 % SiC jsou sice vyšší, než je tabulková hodnota pro samotný Nibasit 625[®] (± 220 HV1), avšak předpokládaná mikrotvrđost pro návar s rovnoměrným zastoupením SiC ve struktuře by měla odpovídat hodnotám přibližně dvakrát vyšším, než hodnoty naměřené u vzorku č. 1.

2.8 Vzorek č. 2

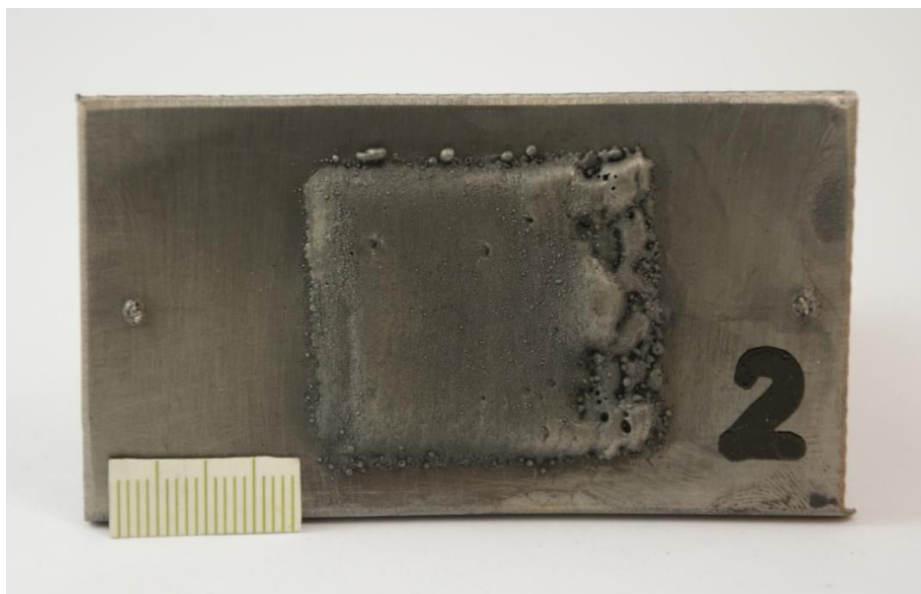
2.8.1 Zvolené parametry

Navařovací parametry vzorku č. 2 jsou zaznamenány v Tabulce 18. Vzdálenost plazmatronu od základního materiálu při navařování byla změněna na 8 mm. Ostatní parametry zůstaly totožné.

Tabulka 18 Parametry navařování vzorku č. 2

IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min ⁻¹]	Lin. Rychlost [mm.s ⁻¹]	Šířka rozkyvu [mm]	Rychlost rozkyvu [mm.s ⁻¹]	Pauza N/P [s]	SiC [%]	Vzdálenost hořáku od ZM [mm]
75-90	45	28,7	15	0,45	28	22	0,2	30	8

2.8.2 Vizuální hodnocení



Obrázek 28 Vzorek č. 2

Povrch návaru vzorku č. 2, který je zobrazen na obrázku 28, je velmi hladký s konzistentní kresbou. Návar je po celé délce rovnoměrný. Šířka návaru se pohybuje kolem 35 mm a jeho výška dosahuje 1,4 mm.

Návar je rovnoběžný s povrchem nerezové destičky. Celkový vzhled návaru je symetrický s minimálními odchylkami. Jsou viditelné drobné póry na povrchu návaru.

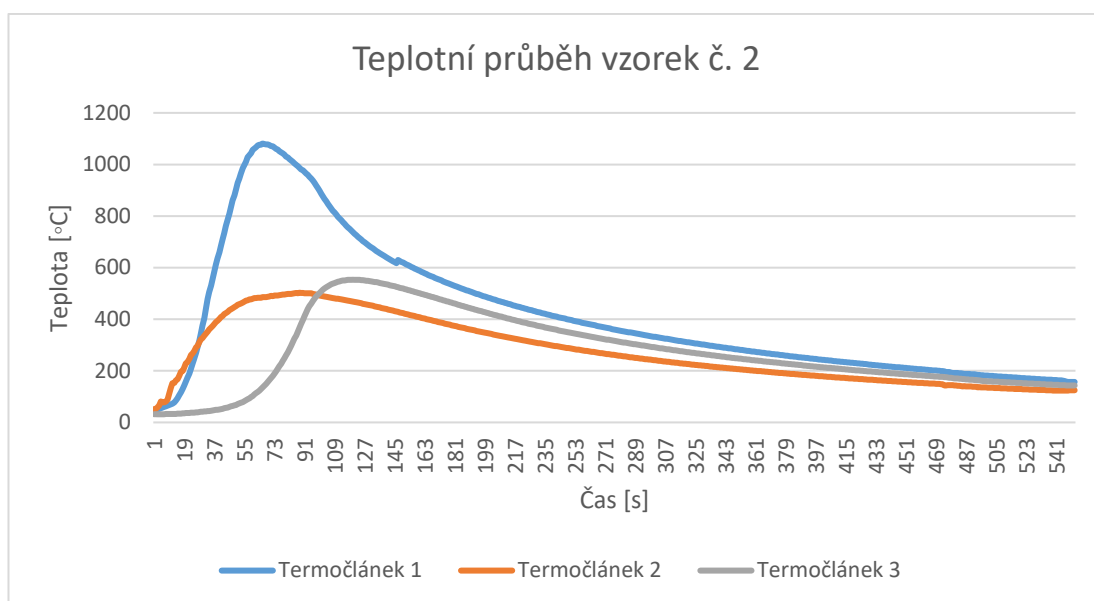
Viditelná je mírná deformace základního materiálu. Je zde přítomen mírný rozstřík.

Penetrace návaru je dostatečná. Nebyly zjištěny žádné viditelné trhliny na povrchu návaru ani v oblasti ZM.

Spojitosť a souvislost návaru byla rovněž posouzena. Návar je spojitý bez viditelných přerušení. Přílnavost návaru k základnímu materiálu je dobrá.

Dle vizuální kontroly je návar vyhovující.

2.8.3 Teplotní průběh

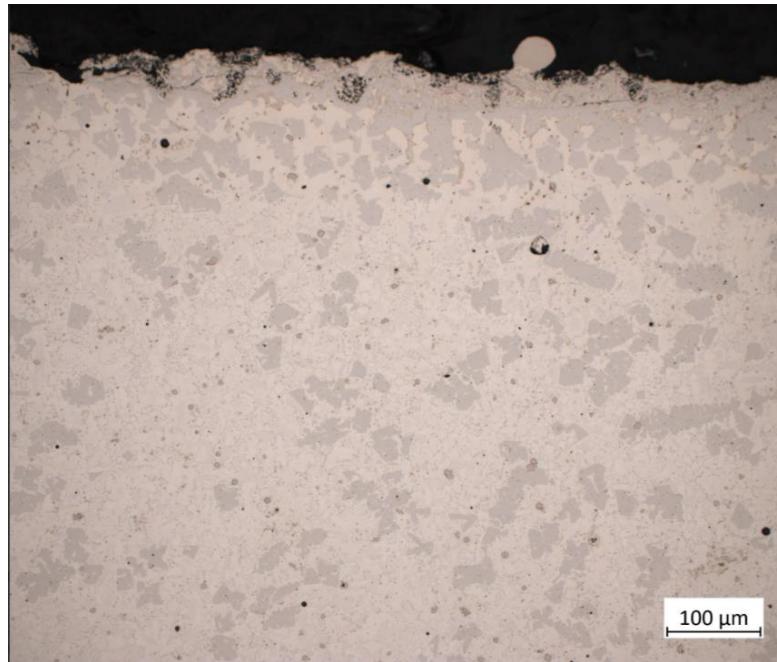


Graf 2 Teplotní průběh vzorku č. 2

Teplotní průběh navařování vzorku č. 2 (viz Graf 2) je obdobný vzorku č. 1. Termočlánek 1 zaznamenal maxima v bodě korespondujícím s teplotou 1081 °C. To je zapříčiněno buď delší dobou držení pilotního oblouku, či pozdějším zapnutím lineárního posuvu hořáku. Termočlánek 2 dosáhl maximální snímané teploty 503 °C. Největší rozdíl teplotních maxim nasnímaných na vzorcích se projevil u termočláneku 3. 547 °C naměřených na vzorku se od předešlého vzorku (665 °C) liší o 118 °C. To neodpovídá předpokladu, že kratší oblouk rovná se vyšší teplota hoření. Může to být zapříčiněné zastavením procesu navařování ve větší vzdálenosti před termočlánekem. Vzdálenost ZM od katody v plazmatronu významně ovlivňuje rozložení teploty plazmového oblouku. Tento vztah dále komplikují pulzace oblouku, které ovšem zůstaly stejné. Návar dosahoval výšky přibližně 1,4 mm.

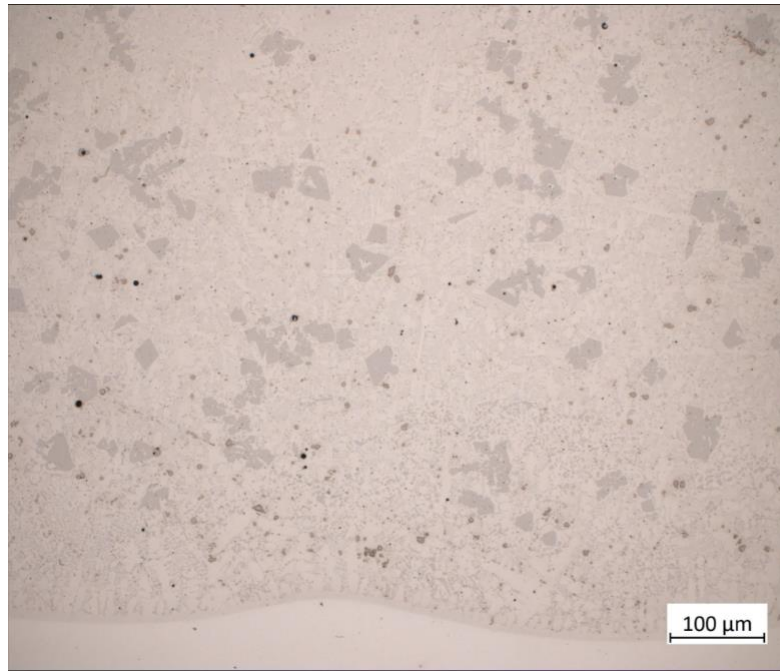
2.8.4 Mikrostruktura

Nerovnoměrnost geometrie návaru u vzorku č. 2 přetrvává (viz Obr. 29). Tento trend se opakuje i u vzorků zbylých. Póry jsou tu též hojně zastoupeny. Viditelné fáze jsou obdobné fázím pozorovaným na vzorku č. 1, tedy velké zastoupení oblasti CrMo-Ni a matrice.



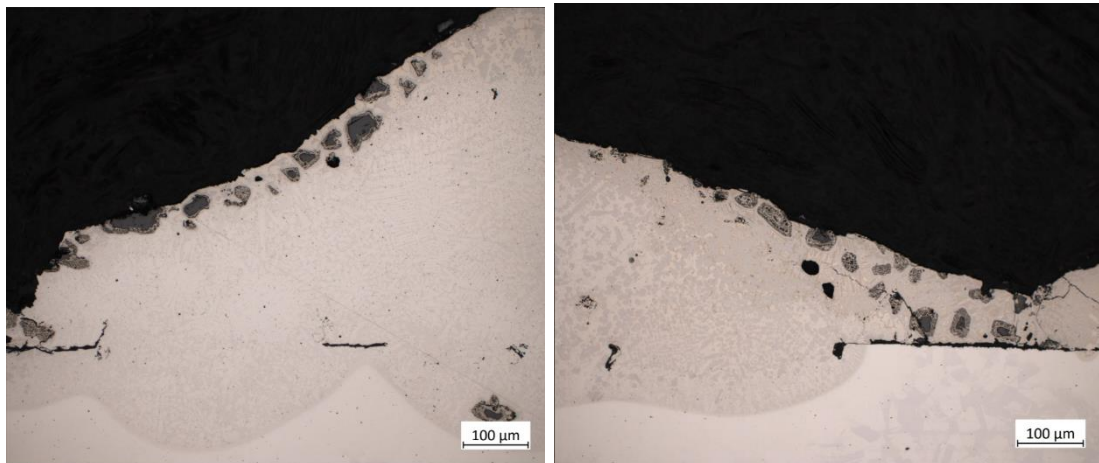
Obrázek 29 Vzorek č. 2, 200x zvětšení – povrch

Na obrázku 30 je viditelná hranice mezi návarem a základním materiálem. Ve středu návaru vzorek disponuje dobrým metalurgickým spojem. V blízkosti přechodu jsou lépe viditelné dendritické útvary. Dendritický povrch fázového rozhraní vzniká při vysokých koncentračních rozdílech v obsahu příměsí v krystalizující látce a tavenině. Dendrity se také tvoří při malém teplotním gradientu. Lepší viditelnost těchto útvarů koresponduje s nižší teplotou naměřenou při zaznamenávání teplotního průběhu.



Obrázek 30 Vzorek č. 2, 200x zvětšení – rozhraní

Kraje povlaku vzorku č. 2 (viz Obr. 31) disponují lepším metalurgickým propojením než u vzorku předchozího, stále ale nepřípustným. Opět jsou tu viditelné shluky nenatavených částic SiC obklopené grafitem.



Obrázek 31 Vzorek č. 2, 200x zvětšení – kraje

2.8.5 Rozbor chemického složení viditelných fází

Z důvodu zaznamenávání totožných fází jako u předchozího vzorku, rozbor chemického složení nutný nebyl. Toto platí i u vzorků zbylých.

2.8.6 Mikrotvrdost

Měření mikrotvrdosti vzorku č. 2 dle Vickerse probíhalo vytvořením pěti podélných vtisků s rozestupy 0,5 mm, 1 mm pod povrchem návaru.

Výsledky jsou zaznamenány v tabulce č. 19

Tabulka 19 Mikrotvrdost vzorku č. 2

Měření:	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4	PM 5	Průměr:
Podélné HV1	372,6	430,3	396,4	447,1	427,7	414,82

Aritmetický průměr hodnot mikrotvrdosti naměřených na vzorku č. 2 (414,2 HV1) je prokazatelně nižší než průměr hodnot naměřených u vzorku č. 1 (530,6 HV1).

Hodnoty se mohou lišit například z důvodů nedostatku přídavného materiálu v tavné lázni či neideálnímu upnutí vzorku před měřením.

2.9 Vzorek č. 3

2.9.1 Zvolené parametry

Parametry využití v průběhu navařování vzorku č. 3 jsou zapsány v tabulce 20. Jediná změna v parametrech je opět přiblížení navařovacího hořáku k základnímu materiálu. Plazmatron byl přiblížen o 2 mm tedy na celkovou vzdálenost 6 mm.

Tabulka 20 Parametry navařování vzorku č. 3

IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min ⁻¹]	Lin. Rychlost [mm.s ⁻¹]	Šířka rozkyvu [mm]	Rychlost rozkyvu [mm.s ⁻¹]	Pauza N/P [s]	SiC [%]	Vzdálenost hořáku od ZM [mm]
75-90	45	28,7	15	0,45	28	22	0,2	30	6

2.9.2 Vizuální hodnocení

Vzorek č. 3 zobrazený na obrázku 32 byl vizuálně zkontrolován. Povrch návaru vzorku se podobá vzorku č. 2. Je rovnoměrný a hladký. Šířka povlaku se pohybuje kolem 34 mm a výška kolem 1,2 mm.

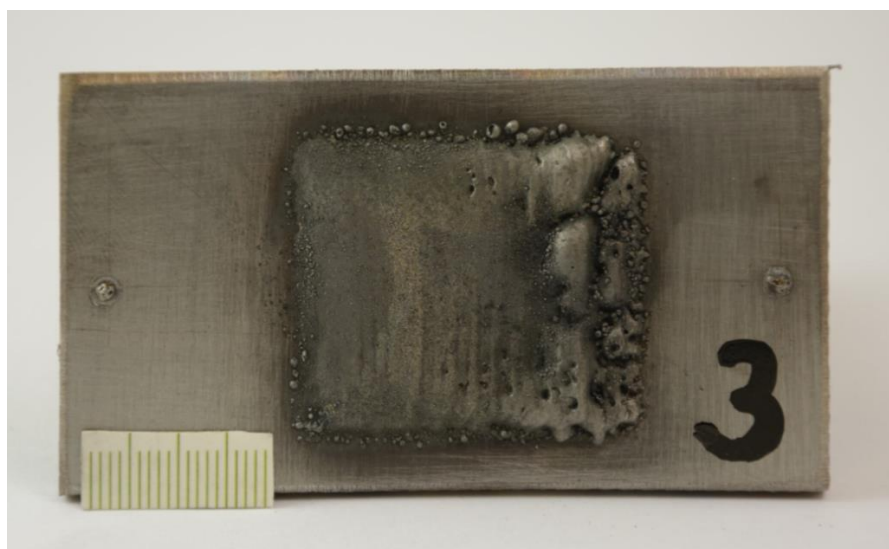
Výška návaru se lehce zvyšuje směrem od místa začátku navařování. Povlak je symetrický. Jsou zde opět přítomny drobné póry, přibližně 0,3 mm velké.

Mírná deformace základního materiálu a rozstřík jsou přítomny.

Průvar je adekvátní. Ve zkoumané oblasti nejsou viditelné trhliny.

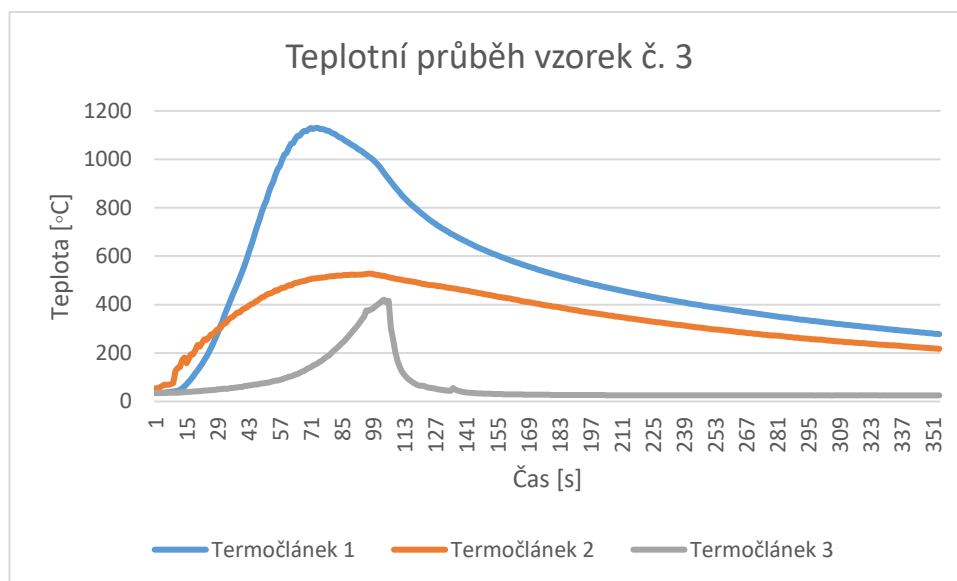
Návar je spojitý bez přerušení. Přílnavost návaru k základnímu materiálu vyhovuje.

Vzorek je vyhovující.



Obrázek 32 Vzorek č. 3

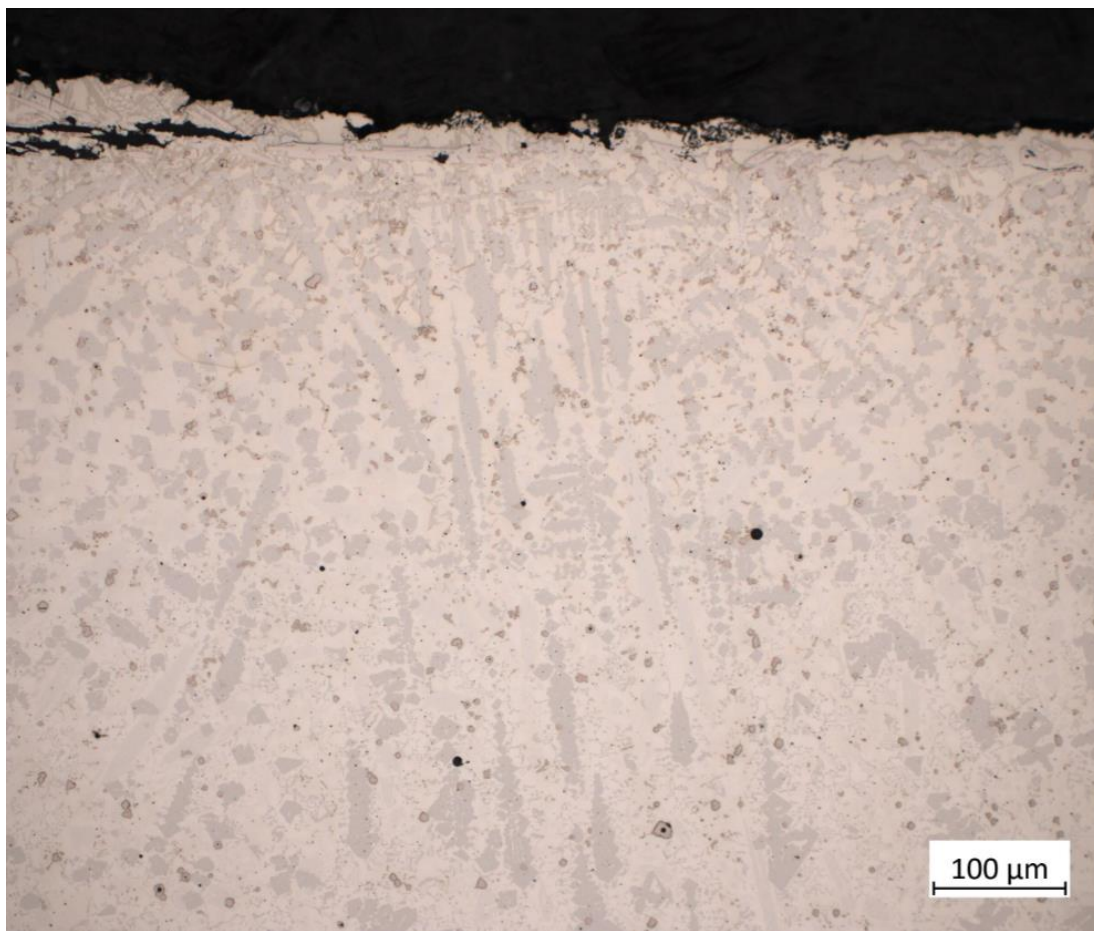
2.9.3 Teplotní průběh



Graf 3 Teplotní průběh vzorku č. 3

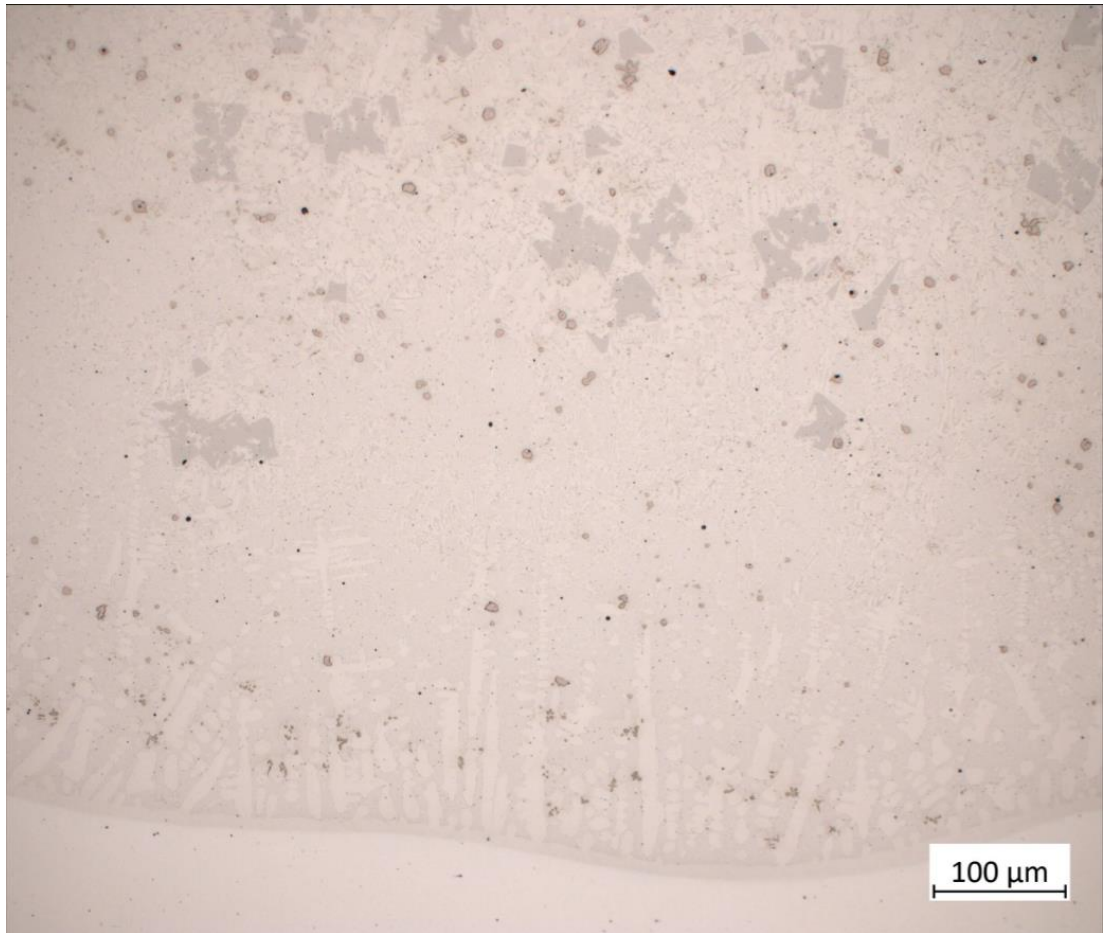
Hodnoty naměřené na termočlánek 1 a 2 během navařování jsou obdobné jako u měření předchozích, s minimální fluktuací (± 30 °C) (viz Graf 3). Velká změna byla zaznamenána opět na termočlánek 3. Maximální teplota zde dosahovala 415 °C. To se od hodnot měření vzorku č. 1 liší o 250 °C a od hodnot vzorku č. 2 o 132 °C. Opět výsledky měření nekorespondují s předpokladem, že s přibližováním plazmatronu k základnímu materiálu by měla být na termočlánek snímána teplota vyšší.

2.9.4 Mikrostruktura



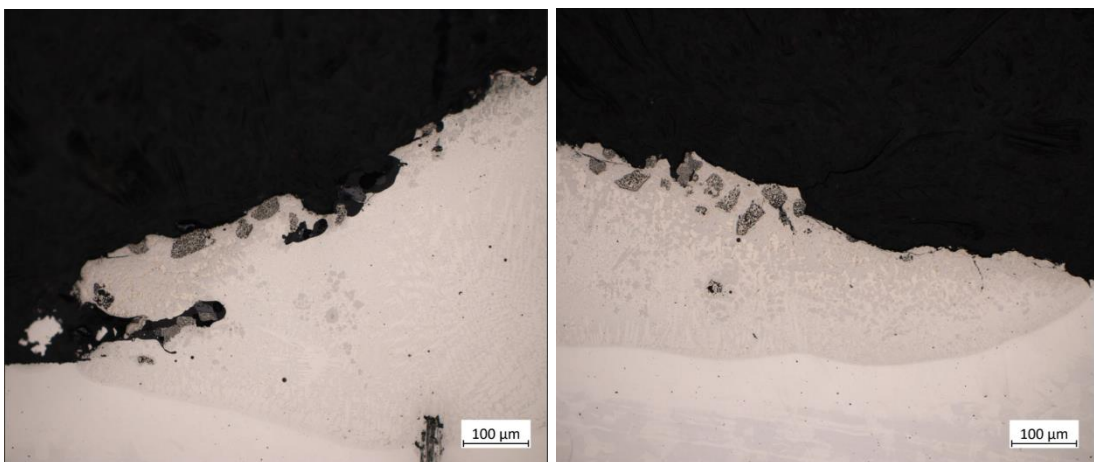
Obrázek 33 Vzorek č. 3, 200x zvětšení – povrch

Viditelné fáze jsou obdobné, jak u předchozích vzorků. Převažuje fáze matrice s velkým zastoupením CrMo-Ni. Viditelné jsou zde i karbidy chromu. Velký rozdíl je zde v geometrii CrMo-Ni fáze, která je zde obsažena především v podobě dendritů. Dendritické mikrostruktury významně ovlivňují mechanické vlastnosti a korozní odolnost materiálů. Jemnější dendritické struktury obecně zlepšují mechanické vlastnosti, jako je mez pevnosti v tahu a mez kluzu. Velikost a rozložení dendritů ovlivňují také tažnost. Menší vzdálenosti mezi rameny sekundárních dendritů zvyšují i odolnost proti korozi. Vznik těchto dendritických mikrostruktur může být zapříčiněn přiblížením plazmatronu. Nižší teplotní gradienty a vyšší rychlost chlazení během tuhnutí vedou k menším rozstupům dendritických ramen a vyšším rychlostem jejich růstu. Jednotlivá dendritická ramena jsou lépe viditelná na obrázku 33.



Obrázek 34 Vzorek č. 3, 200x zvětšení – rozhraní

Na snímku rozhraní (viz Obr. 34) je viditelný dobrý metalurgický spoj se základním materiálem. Kromě stejných fází jsou zde vidět i dendritické útvary na přechodu základního materiálu a návaru.



Obrázek 35 Vzorek č. 3, 200x zvětšení – kraje

Metalurgické spojení se základním materiálem na krajích vzorku č. 3 je doposud nejlepší (viz Obr. 35). Nejsou zde ovšem vidět celé částice SiC, pouze oblasti vzniklého grafitu.

2.9.5 Mikrotvrдость

Mikrotvrđostní měření vzorku č. 3 probíhalo obdobně jak u vzorku předchozího, tedy vytvořením šesti vtisků s rozestupy 0,5 mm, 1 mm pod povrchem návaru. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce č. 21.

Tabulka 21 Mikrotvrđost vzorku č. 3

Měření:	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4	PM 5	PM 6	Průměr:
Podélné HV1	418,1	416,2	453,4	423,1	418,7	420,6	425

Hodnoty jsou podobné hodnotám měření vzorku č. 2 (± 10 HV1)

2.10 Vzorek č. 4

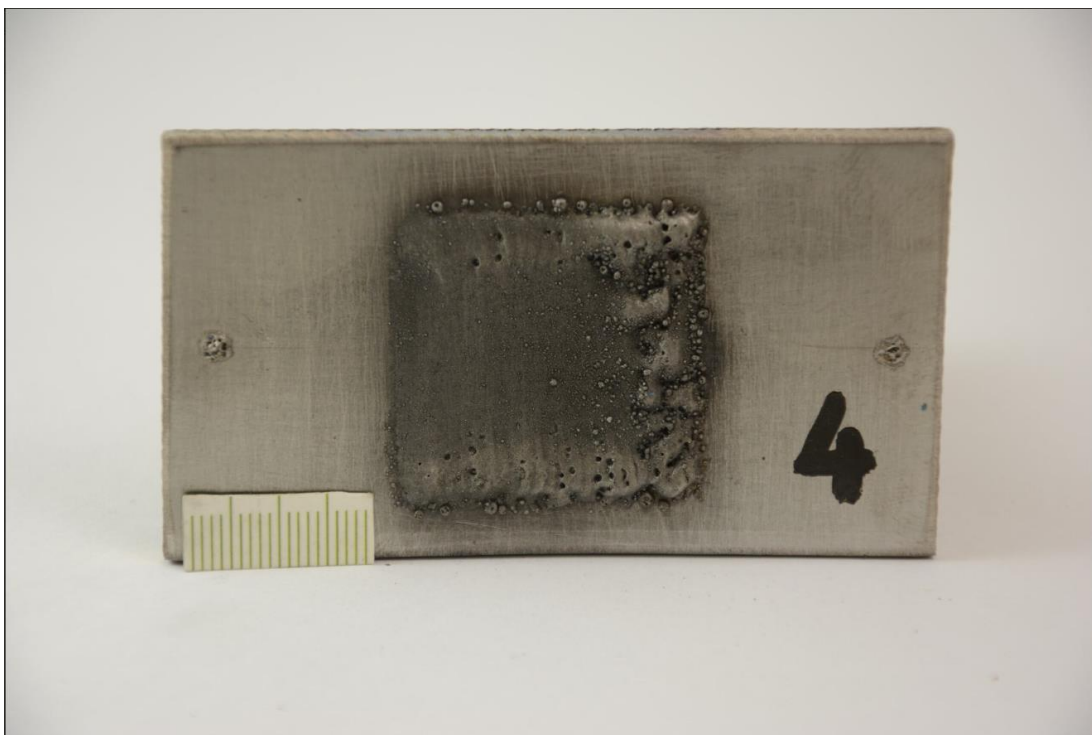
2.10.1 Zvolené parametry

V tabulce 22 jsou zaznamenány parametry navařování vzorku č. 4. Tento vzorek byl poslední z řady, kde se měnil pouze parametr vzdálenosti plazmatronu od základního materiálu. Hořák byl posunut na celkovou vzdálenost 4 mm.

Tabulka 22 Parametry navařování vzorku č. 4

IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min ⁻¹]	Lin. Rychlost [mm.s ⁻¹]	Šířka rozkyvu [mm]	Rychlost rozkyvu [mm.s ⁻¹]	Pauza N/P [s]	SiC [%]	Vzdálenost hořáku od ZM [mm]
75-90	45	28,7	15	0,45	28	22	0,2	30	4

2.10.2 Vizuální hodnocení



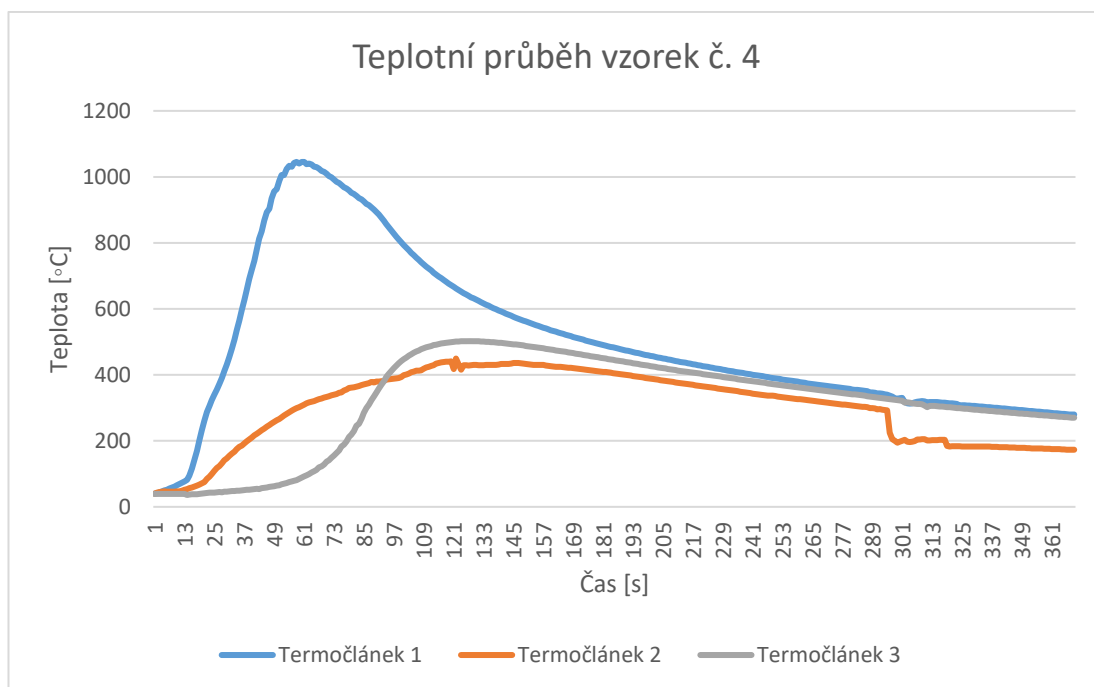
Obrázek 36 Vzorek č. 4

Vizuální kontrola vzorku č. 4 (viz Obr. 36) proběhla stejně jak u vzorků předchozích. Povrch návaru je rovnoměrný, ale drsný. Šířka návaru je 33 mm a výška je cca 0,8 mm.

Návar je symetrický se značnými póry. Deformace základního materiálu je opět viditelná. Rozstřík je mírný po stranách návaru i na povrchu. Povlak disponuje dostatečným průvarem a nejsou zde přítomny žádné trhliny v návaru, ani v tepelně ovlivněné oblasti. Návar je bez přerušení a přilnavost k ocelové destičce je v pořádku.

Vizuálně vzorek vyhovuje.

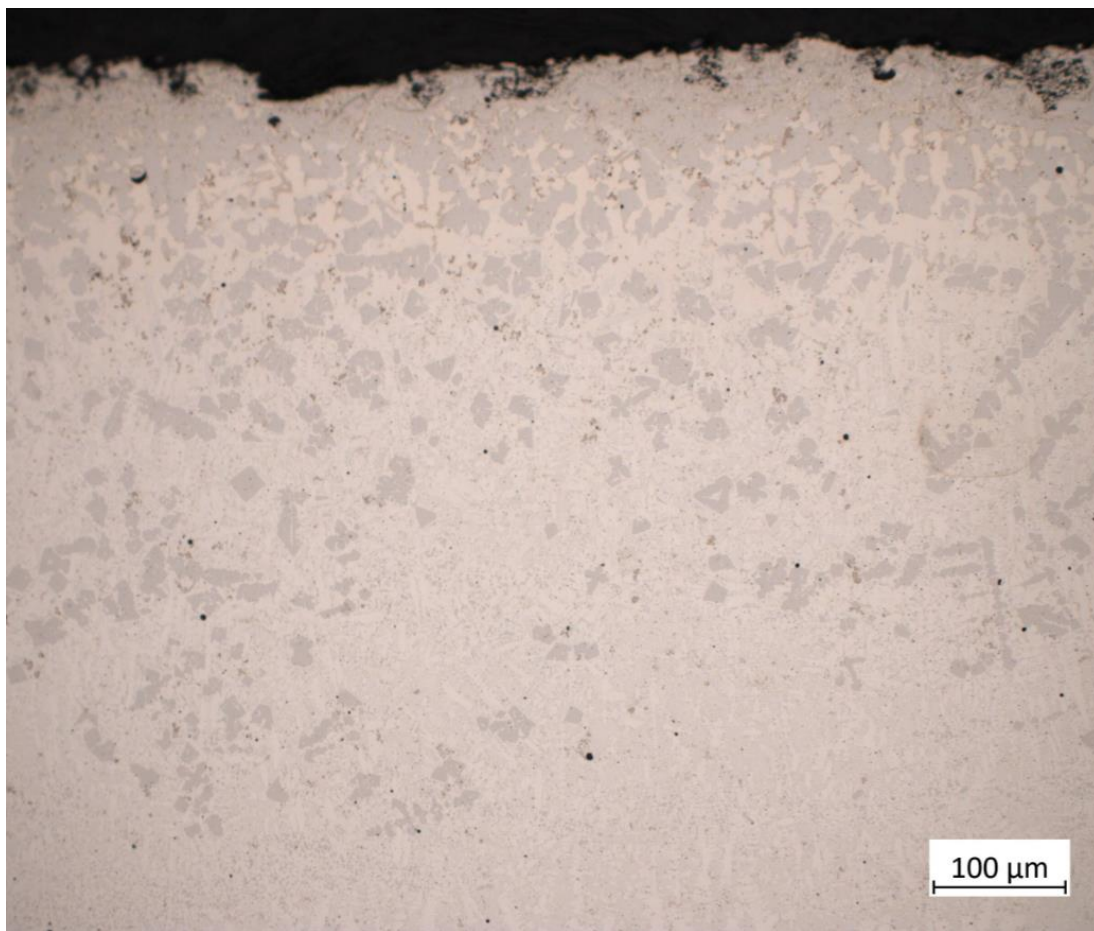
2.10.3 Teplotní průběh



Graf 4 Teplotní průběh vzorku č. 4

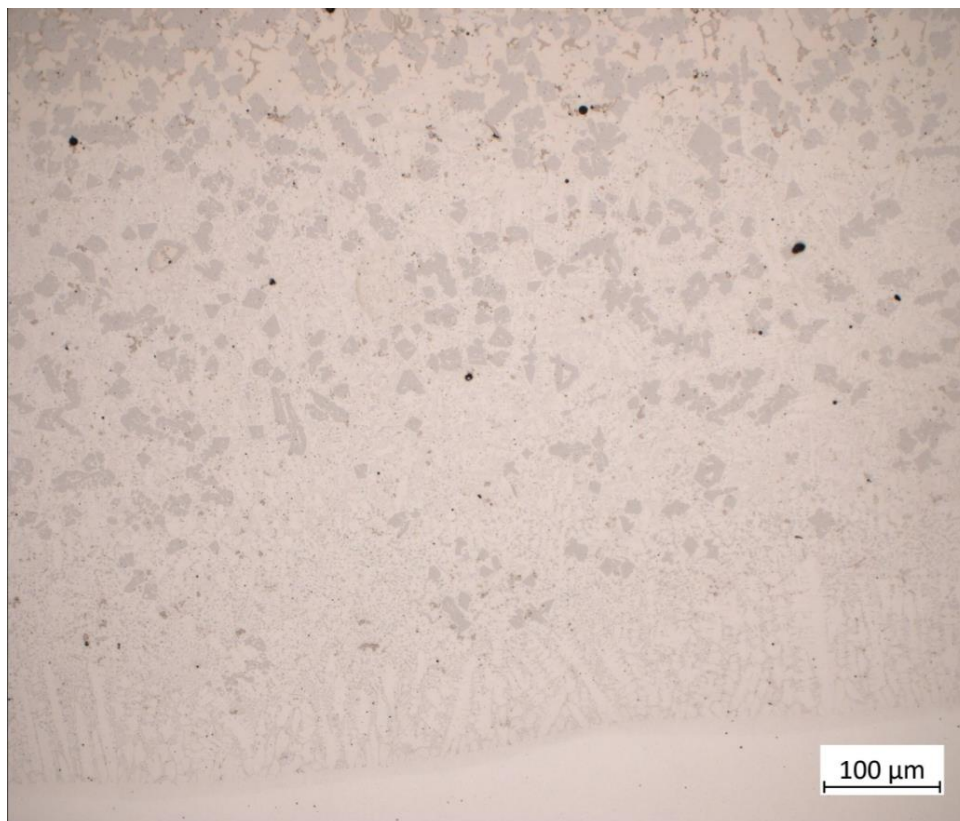
Viditelné rozdíly na grafu č. 4, který popisuje teplotní průběh vzorku č. 4, v porovnání s předchozími vzorky jsou v hodnotách termočláneků 2 a 3. Termočlánek 1 dosahuje obdobných hodnot (± 40 °C). Teplotní maxima na termočlánek 2 se od předchozího měření liší výrazněji. Maximum na tomto termočlátku je o 100 °C nižší, než teplota zaznamenaná během snímání vzorku č. 3. Hodnoty termočlánek 3 naopak vystoupaly až na hodnotu 502 °C, teplota se tedy zvýšila skoro o 100 °C. Snížení maximálních hodnot na termočlátku umístěným na opačné straně návarové plochy může být zapříčiněno vznikem kratšího návaru, tedy nižší dobou působení plazmového oblouku na základní materiál.

2.10.4 Mikrostruktura



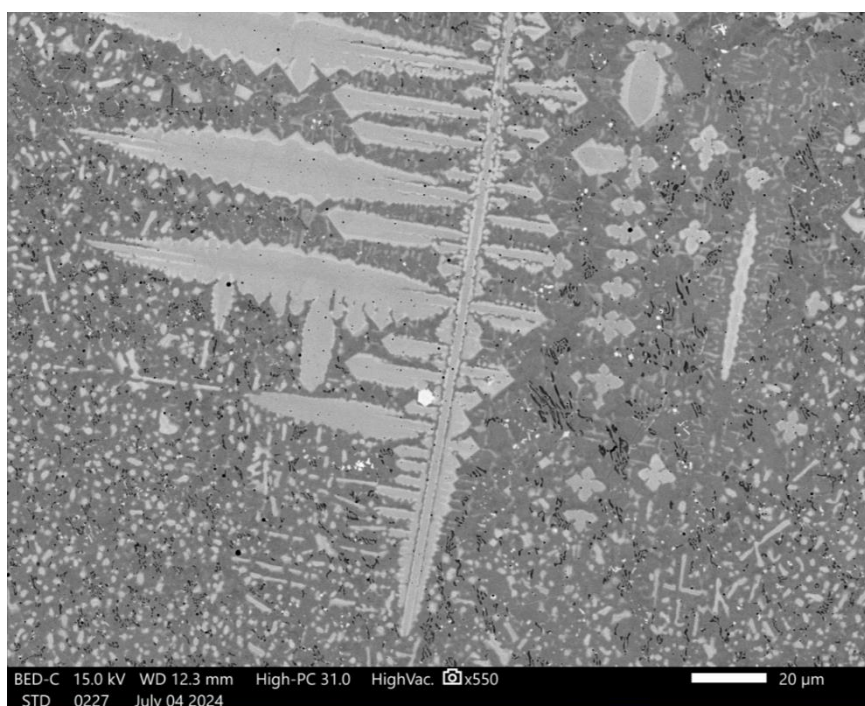
Obrázek 37 Vzorek č. 4, 200x zvětšení – povrch

Na mikrostrukturním snímku povrchu vzorku č. 4 (viz Obr. 37) lze pozorovat stejné fáze, jako na snímcích předchozích návarů. Dominantní je opět fáze matrice s velkým zastoupením fáze CrMo-Ni. Skrz celou strukturu jsou též rozprostřeny karbidy chromu. Na tomto snímku nejsou na první pohled tak viditelné dendritické struktury fáze CrMo-Ni, avšak dendritické útvary můžeme pozorovat na obrázku 38 na rozhraní základního materiálu a návaru.



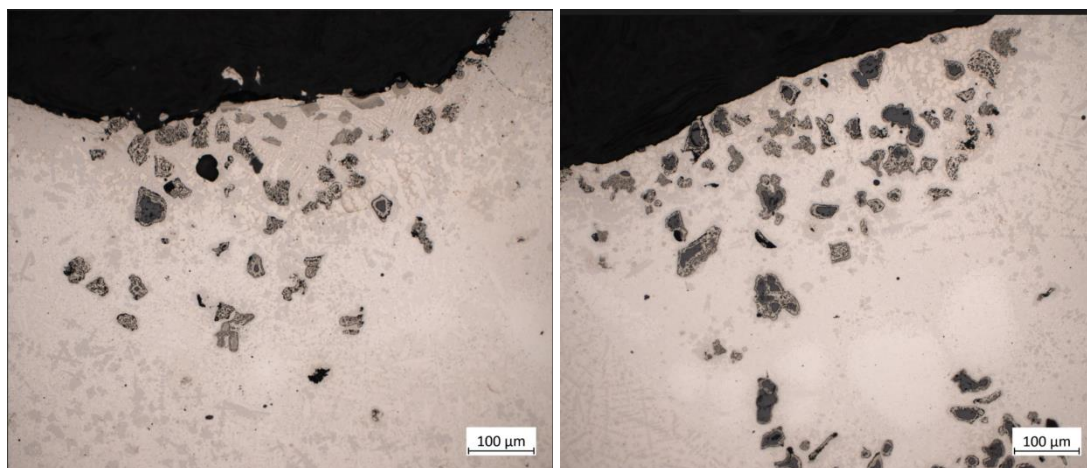
Obrázek 38 Vzorek č. 4, 200x zvětšení – rozhraní

Snímek 39 ukazuje 550x zvětšení dendritů na hranici základního materiálu.

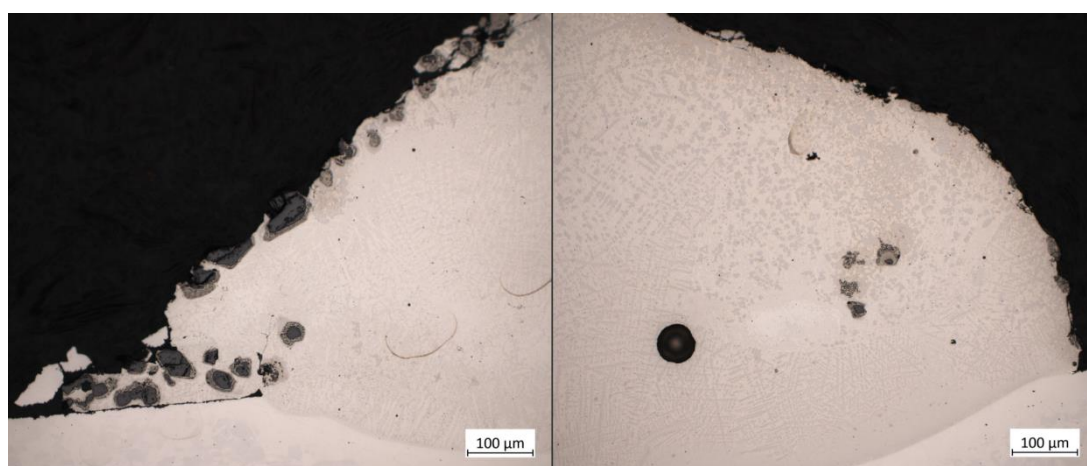


Obrázek 39 Vzorek č. 4, 550x zvětšení – dendrity

Na rozdíl od předchozích vzorků se na povrchu nachází výrazné shluky SiC částic viditelné na obrázku 40. Nachází se především na vysokých hodnotách parametru drsnosti W_t – tedy u nejhlubšího bodu profilu vlnitosti.



Obrázek 40 Vzorek č. 4, 200x zvětšení – shluky SiC



Obrázek 41 Vzorek č. 4, 200x zvětšení – kraje

Kraje vzorku č. 4 jsou viditelné na obrázku 41. Levý kraj se podobá předchozím vzorkům. Na snímku pravého kraje jsou vidět dendritické struktury fáze CrMo-Ni. Tyto dendrity jsou strukturované a velikostně menší naproti dendritům této fáze pozorované u povrchu vzorku č. 3.

Menší dendritické struktury, které se vyznačují jemností a velikostí zrn, obecně vykazují vyšší mikrotvrdot v důsledku zvětšených hranic mezi zrny a fázemi a rovnoměrnějšího rozložení rozpuštěných látek.

Mechanické vlastnosti, jako je Vickersova mikrotvrdość, se zvyšují se zjemňováním dendritických struktur, ale rychlost zvyšování se zpomaluje, jakmile rychlost růstu dendritů dosáhne určité prahové hodnoty.

Větší dendritické struktury mají tendenci mít hrubší zrna, což může vést k nižší mikrotvrdości ve srovnání s menšími dendritickými strukturami.

2.10.5 Mikrotvrdość

Během měření vzorku č. 4 bylo provedeno pět podélných vtisků s rozestupy 0,5 mm, 0,5 mm pod povrchem návaru. (tabulka č. 23)

Tabulka 23 Mikrotvrdość vzorku č. 4

Měření:	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4	PM 5	Průměr:
Podélné HV1	491,1	433,6	410	430,3	430,3	439,1

Naměřená data se shodují s hodnotami naměřenými na vzorku č. 3 (± 15 HV1).

2.11 Závěry z první řady vzorků

Jediný parametr, který se během navařování první série vzorků měnil, je vzdálenost plazmatronu od základního materiálu. Vizuální kontrola zaznamenala u všech vzorků na povrchu póry, obecně ale kvalitní návar. Drsnost povrchu vzorku č. 4 (4 mm vzdálenost od ZM) je největší. To zapříčinilo největší množství nenatavených shluků částic SiC na povrchu struktury. Mikrostrukturní fáze nacházející se napříč vzorky a jejich zastoupení jsou obdobné. Na snímcích vzorků č. 3 a 4 (6 mm a 4 mm vzdálenost od ZM) jsou viditelné dendritické struktury. Tyto vzorky mají největší potenciál udržení SiC ve struktuře.

2.12 Vzorky č. 5 a 6

2.12.1 Zvolené parametry

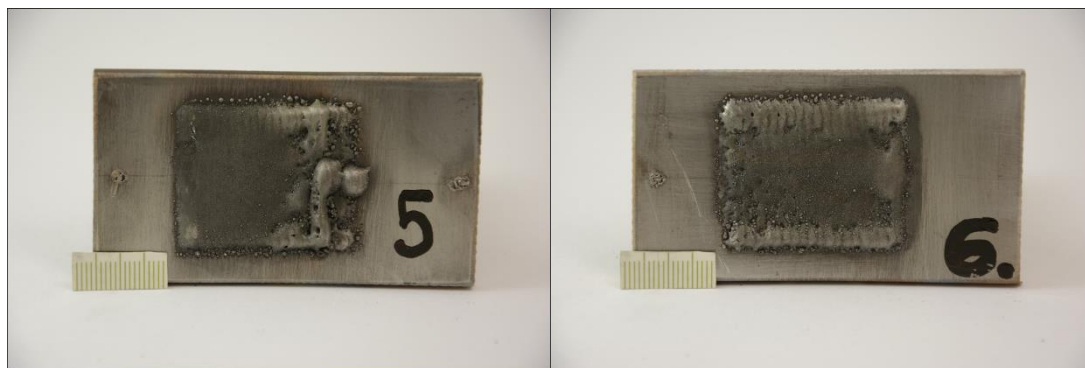
K porovnání byly vyhotoveny dva vzorky s vyšší lineární rychlostní hořáku, rychlostí rozkyvu a rychlostí podávání přídatného materiálu za účelem snížit tendenci SiC k vyplouvání na povrch vlivem nízké hustoty. Parametry využity při navařování obou vzorků jsou zaznamenány v tabulce 24.

Tabulka 24 Parametry navařování vzorků č. 5 a 6

IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min ⁻¹]	Lin. Rychlost [mm.s ⁻¹]	Šířka rozkyvu [mm]	Rychlost rozkyvu [mm.s ⁻¹]	Pauza N/P [s]	SiC [%]	Vzdálenost hořáku od ZM [mm]
75	45	28,7	16-20	0.65-0.85	28	28-32	0,2	30	8

Před navařením vzorku č. 6 byla navařovací plocha předeřhřata na teplotu termočláčku 2 (320 °C).

2.12.2 Vizuální hodnocení

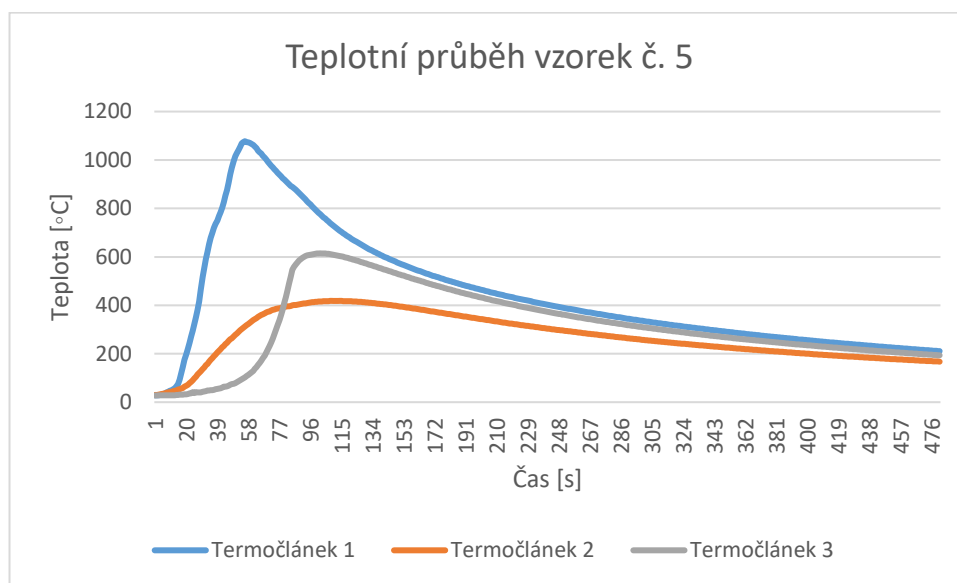


Obrázek 42 Vzorky č. 5 a 6

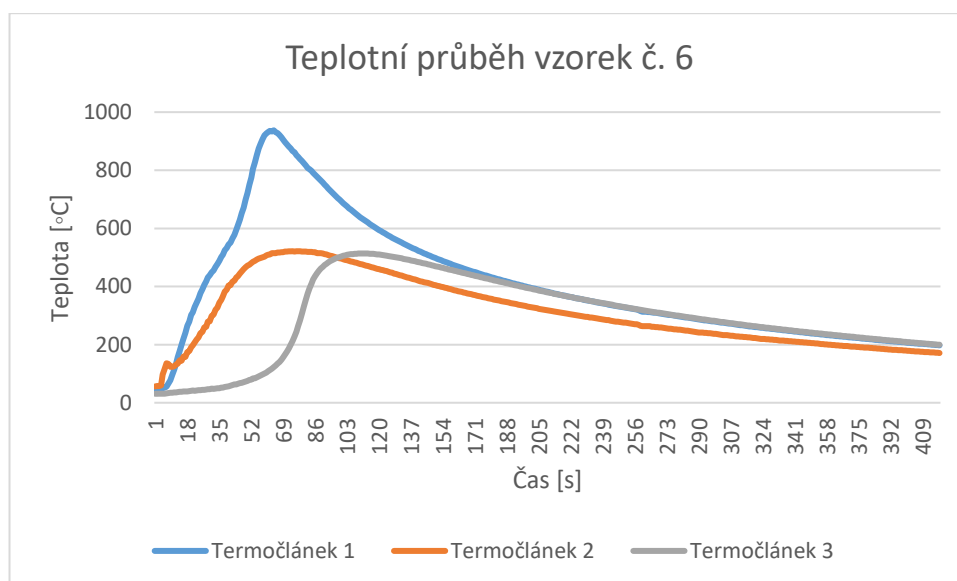
Oba vzorky (viz Obr. 42) disponují konzistentním a rovnoběžným návarem menší velikosti. Geometrie návaru je z důvodu rychlosti navařování konkávní. Šířka povlaku vzorku č. 5 je 34 mm a výška přibližně 0,7 mm. Povlak č. 6 má šířku 33 mm a výšku 0,7 mm.

Deformace základního materiálu je přítomna spolu s drobnými póry, které jsou viditelné spíše u kraje návarů. Rozstřík je přítomný. Penetrace obou návarů je dostatečná. Vzorky jsou bez trhlin a bez viditelných přerušení. Přílnavost povlaku k základnímu materiálu je adekvátní.

2.12.3 Teplotní průběh



Graf 5 Teplotní průběh vzorku č. 5

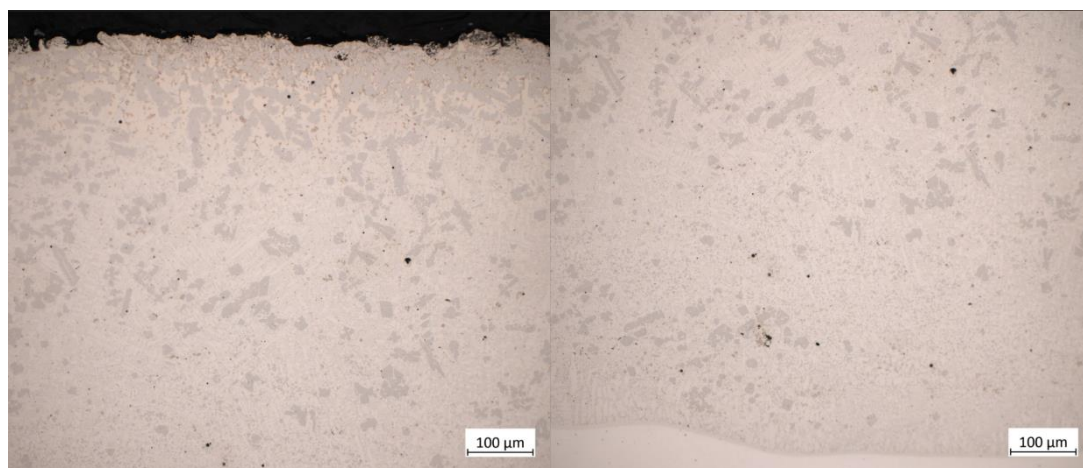


Graf 6 Teplotní průběh vzorku č. 6

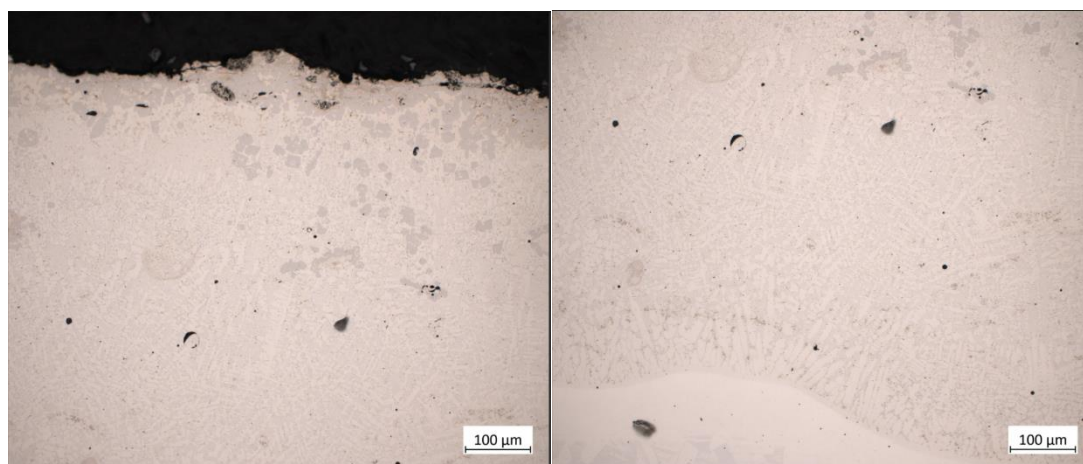
Graf 5 ukazuje teplotní průběh vzorku č. 5 během navařování. Maximální hodnota naměřena na termočlátku 1 se shoduje s předchozími měřeními ($\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Hodnota na termočlátku 3 dosahuje maxima $620\text{ }^{\circ}\text{C}$. To je zapříčiněno zastavením procesu navařování blíže samotného termočlátku. Termočlánek 2 dosahuje doposud nejnižších hodnot ($415\text{ }^{\circ}\text{C}$). To odpovídá předpokládaným hodnotám při zvýšení rychlostních parametrů.

Ocelová destička vzorku č. 6 byla před návarem přehřáta v celé délce. Teplotní průběh vzorku č. 6 (viz Graf 6) toto zaznamenal. Maximum naměřené na termočlátku 2 ($520\text{ }^{\circ}\text{C}$) naznačuje, že se destička dostatečně prohřála. Hodnoty termočlátku 1 a 3 odpovídají předpokladům rychlejšího procesu navařování.

2.12.4 Mikrostruktura

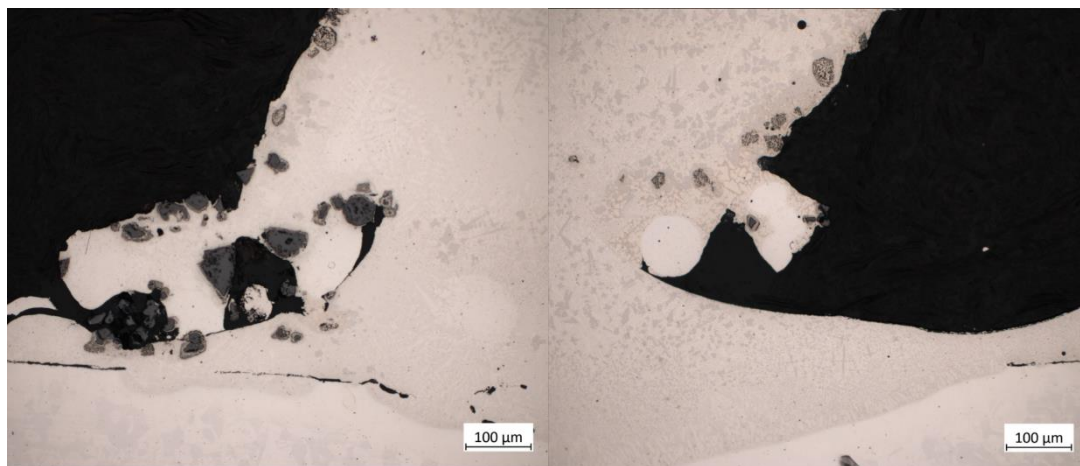


Obrázek 43 Vzorek č. 5, 200x zvětšení – povrch + rozhraní

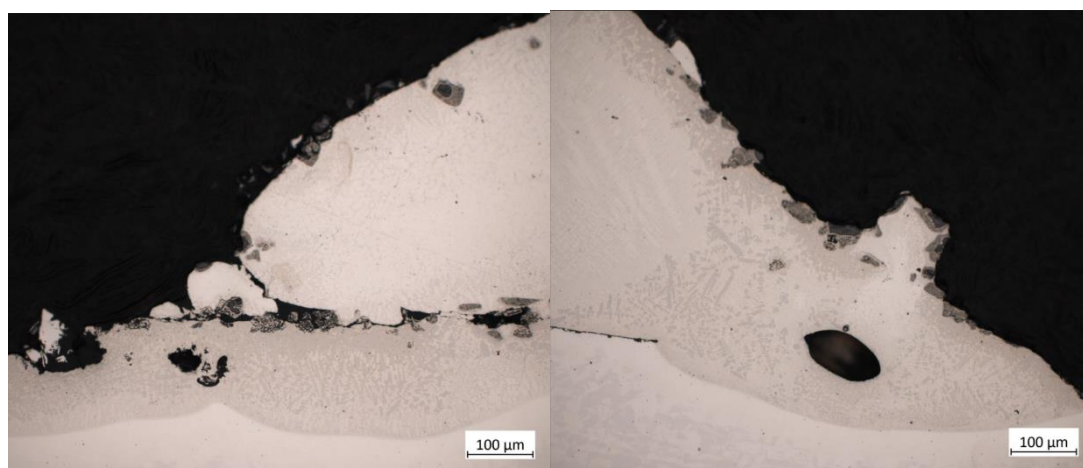


Obrázek 44 Vzorek č. 6, 200x zvětšení – povrch + rozhraní

Porovnání mikrostrukturních snímků vzorků č. 5 (viz Obr. 43) a 6 (viz Obr. 44) ukazuje totožné fáze v jiném zastoupení. U obou snímků se nachází matrice v dendritickém uspořádání. Fáze CrMo-Ni je méně zastoupena u na snímku 44, tedy ve vzorku č. 6.



Obrázek 45 Vzorek č. 5, 200x zvětšení – kraje



Obrázek 46 Vzorek č. 6, 200x zvětšení – kraje

Na snímcích 45 a 46 jsou vidět kraje návarů těchto vzorků. Především na obrázku 46 jsou viditelné dendritické struktury fáze CrMo-Ni v samotném návaru i v oblasti průvaru.

2.12.5 Mikrotvrdot

U obou vzorků bylo vytvořeno šest vtisků, 0,5 mm pod povrchem návaru v vzdálenosti od sebe 0,5 mm. Hodnoty mikrotvrdotí jsou zaznamenány v tabulkách 25 a 26.

Tabulka 25 Vzorek č. 6, 200x zvětšení – kraje

Měření:	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4	PM 5	PM 6	Průměr:
Podélné HV1	396,4	427	400,4	421,2	443,7	420,6	413,7

Tabulka 26 Mikrotvrdost vzorku č. 6

Měření:	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4	PM 5	PM 6	Průměr:
Podélné HV1	382,3	362,7	386,7	388,9	345,1	326,6	365,3

Naměřená data vzorku č. 5 se shodují s hodnotami naměřenými na vzorku č. 4 (± 25 HV1). Mikrotvrdostní hodnoty vzorku č. 6 jsou menší o ± 50 HV1, než hodnoty vzorku č. 5. To je zapříčiněno viditelně nízkým zastoupením fáze CrMo-Ni.

2.13 Vzorek č. 7

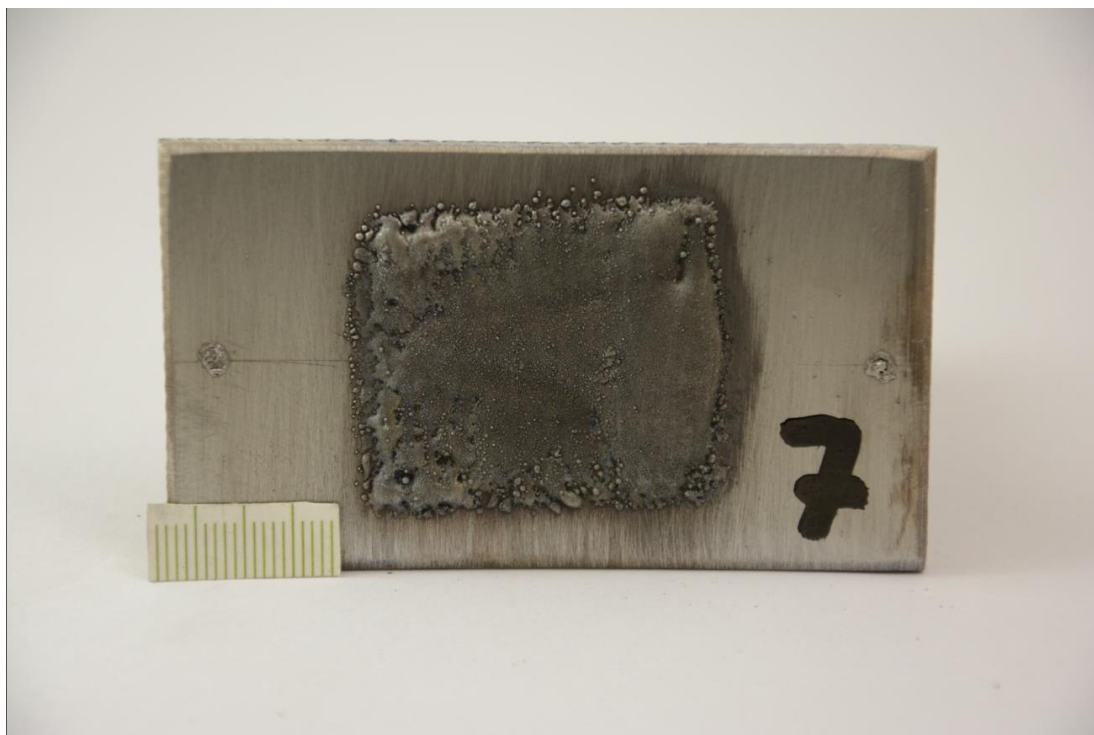
2.13.1 Zvolené parametry

Po navaření vzorků č. 5 a 6 bylo usouzeno, že jsou výšky návarů dostačující. Byl vyhotoven vzorek č. 7 jako řídicí pro změnu parametru frekvence pulzace. Parametr lineární rychlosti byl zvýšen na $1,05 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a podávací rychlost na $23 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$. Z důvodu konkávní geometrie byla pauza na okrajích návaru snížena na 0,1 s. Předehřev v celé ploše destičky byl aplikován do doby, než termočlánek 2 dosáhl hodnoty $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Parametry jsou zaznamenány v tabulce 27.

Tabulka 27 Parametry navařování vzorku č. 7

IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [$\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$]	Lin. Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	Šířka rozkyvu [mm]	Rychlost rozkyvu [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	Pauza N/P [s]	SiC [%]	Vzdálenost hořáku od ZM [mm]
75	45	28,7	23	1,05	28	32	0,1	30	8

2.13.2 Vizuální hodnocení

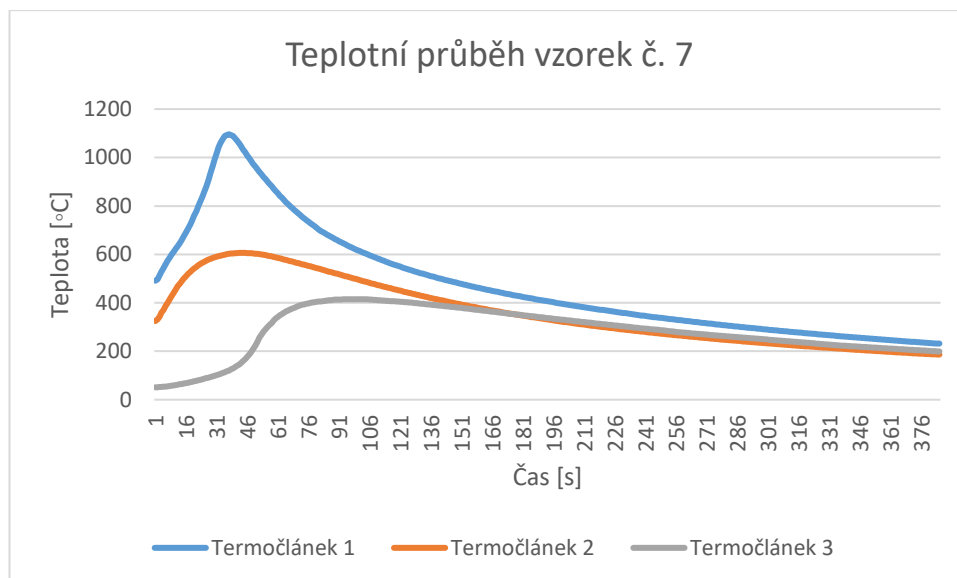


Obrázek 47 Vzorek č. 7

Navařený vzorek má šířku návaru 36 mm a výšku 0,7 mm. Na vzorku jsou vidět drobné póry. Viditelná je deformace základního materiálu a rozstřík. Žádné trhliny ani praskliny nejsou viditelné. Ke konci návaru začíná být povlak nekonzistentní a přerušovaný (viz Obr. 47). Přílnavost samotného povlaku k ocelové destičce je dobrá.

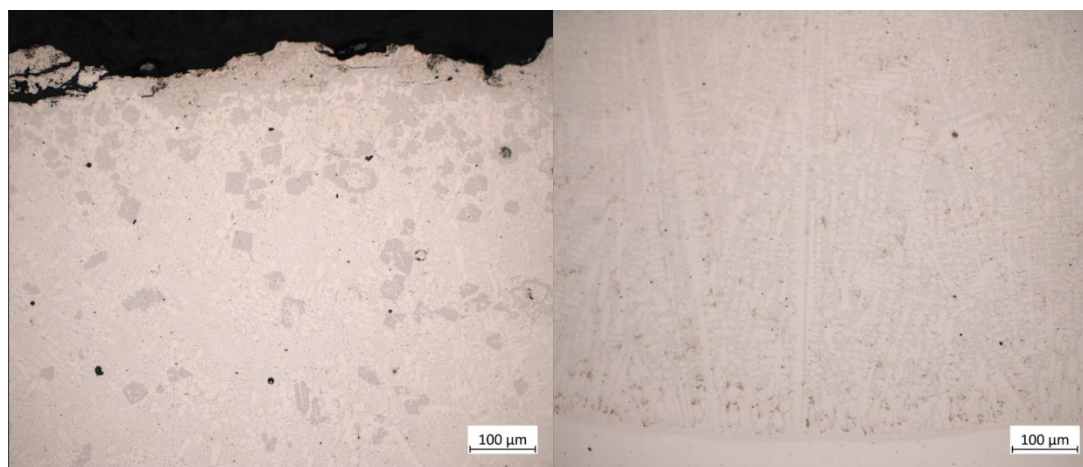
2.13.3 Teplotní průběh

Graf 7. ukazuje teplotní průběh vzorku č. 7. Hodnoty termočlánku 1 korespondují s měřením přechozích vzorků. S větším předehřátím teplota snímaná termočlánkem 2 vystoupala až na hodnotu 605 °C. Maximum hodnot termočlánku 3 dosahuje pouze 415 °C z důvodu brzkého zastavení procesu navařování.



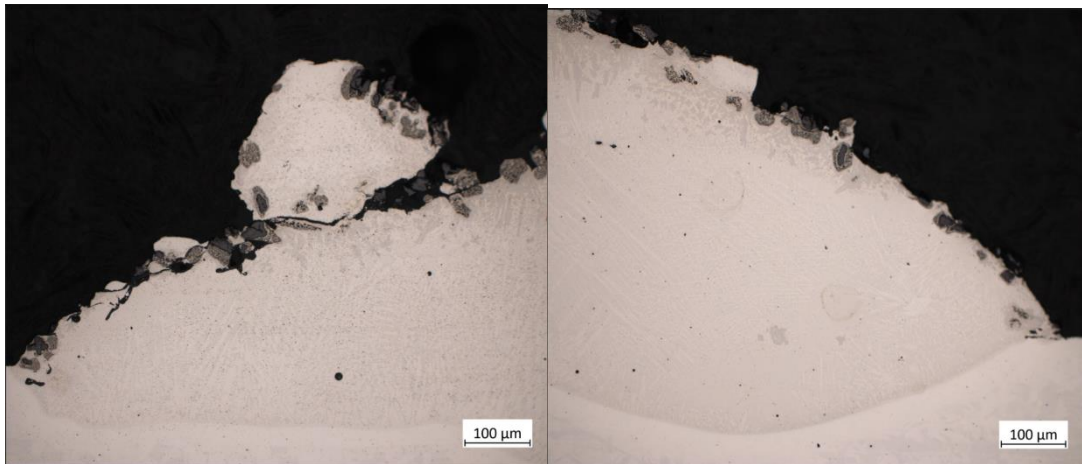
Graf 7 Teplotní průběh vzorku č. 7

2.13.4 Mikrostruktura



Obrázek 48 Vzorek č. 7, 200x zvětšení – povrch + rozhraní

Mikrostrukturální snímky vzorku č. 7 (viz Obr. 48) ukazují v poměru s předešlými vzorky opět malé zastoupení fáze CrMo-Ni. Na snímku rozhraní jsou dobře viditelné dlouhé dendritické struktury fáze matrice s malými vzdálenostmi mezi rameny sekundárních dendritů. Na snímku 49, který zobrazuje kraje vzorku, jsou tyto protáhlé dendritické struktury také zastoupeny. Znamená to, že se pravděpodobně nachází skrz celý návar.



Obrázek 49 Vzorek č. 7, 200x zvětšení – kraje

2.13.5 Mikrotvrdot

Tabulka 28. udává naměřené mikrotvrdotní hodnoty vzorku č. 7.

Tabulka 28 Mikrotvrdot vzorku č. 7

Měření:	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4	PM 5	PM 6	Průměr:
Podélné HV1	408,2	398,7	379	394,6	340,3	403,4	387,4

Hodnoty mikrotvrdoti naměřené na vzorku č. 7 se pohybují mezi hodnotami vzorků č. 5 a 6. Koresponduje to se zastoupením fáze CrMo-Ni ve struktuře.

2.14 Vzorek č. 8

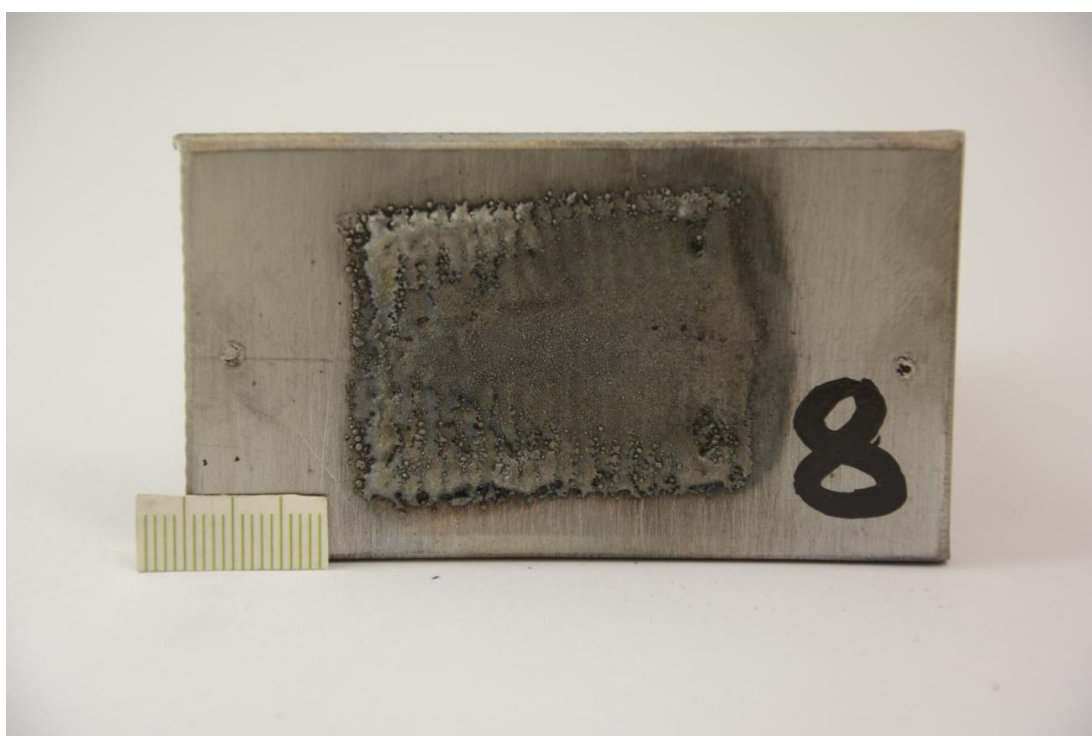
2.14.1 Zvolené parametry

K vzorku č. 7 byly navrženy tři vzorky postupně zvyšující se frekvence pulzace, tedy počet opakování periodické pulzace horního a dolního proudu za daný časový úsek. Frekvence vzorku č. 8 byla zvednuta na 83,3 Hz. Za účelem porovnání řady vzorku byly opět ostatní parametry zachovány (viz Tab. 29). Předehřev byl uplatněn na teplotu 400 °C.

Tabulka 29 Parametry navařování vzorku č. 8

IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min ⁻¹]	Lin. Rychlost [mm.s ⁻¹]	Šířka rozkyvu [mm]	Rychlost rozkyvu [mm.s ⁻¹]	Pauza N/P [s]	SiC [%]	Vzdálenost hořáku od ZM [mm]
75	45	83,3	23	1,05	28	32	0,1	30	8

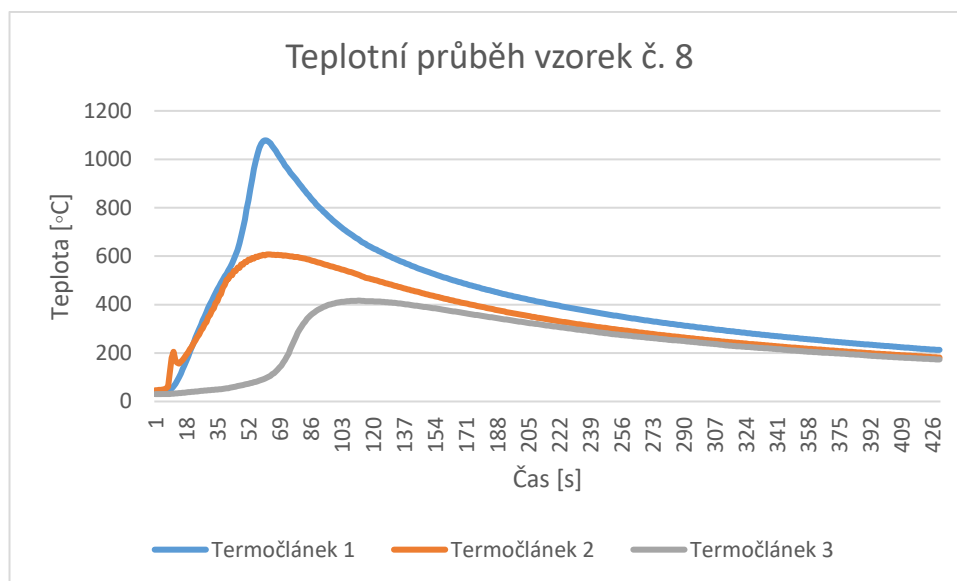
2.14.2 Vizuální hodnocení



Obrázek 50 Vzorek č. 8

Návar vzorku č. 8 (viz Obr. 50) je ke konci nekonzistentní a přerušovaný s minimálními póry. Návar má šířku 37 mm a výšku přibližně 0,65 mm. Povlak je bez trhlin v celém obsahu vzorku. Z důvodu teplotní roztažnosti je viditelná mírná deformace základního materiálu. Kresba návaru v středové části je rovnoměrná a mírným rozstříkem.

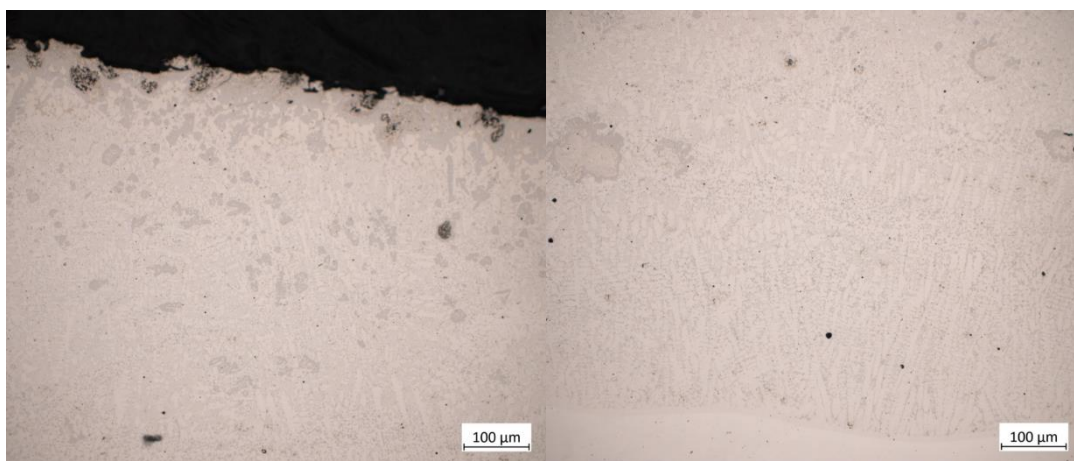
2.14.3 Teplotní průběh



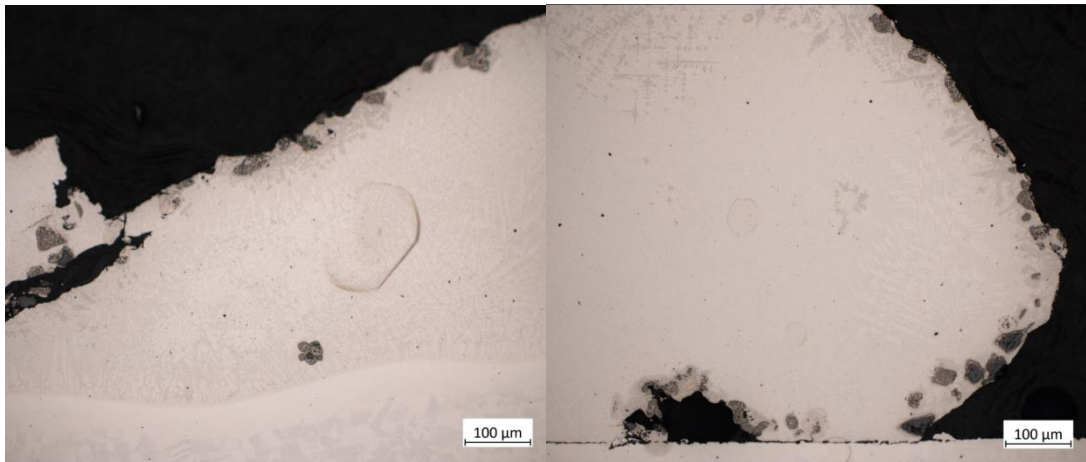
Graf 8 Teplotní průběh vzorku č. 8

Graf 8. znázorňující teplotní průběh vzorku č. 8 a koresponduje s grafem 7. ukazující teplotní průběh vzorku č. 7. Maximální hodnoty na termočláncích se minimálně liší (± 15 °C).

2.14.4 Mikrostruktura



Obrázek 51 Vzorek č. 8, 200x zvětšení – povrch + rozhraní



Obrázek 52 Vzorek č. 8, 200x zvětšení – kraje

Mikrostrukturní snímky středu (viz Obr. 51) a krajů návaru (viz Obr. 52) se podobají snímekům vzorku předchozího. Dendritické struktury matrice, malé zastoupení fáze CrMo-Ni a malý počet částic SiC v krajích návaru se shodují bez velkých rozdílů. Pravý kraj povlaku nedisponuje dobrým metalurgickým spojem.

2.14.5 Mikrotvrdost

Aritmetický průměr šesti vtisků, 0,5 mm pod povrchem návaru (388,5 HV1) (viz Tab. 30), se shoduje s průměrem hodnot řídicího vzorku č. 7.

Tabulka 30 Mikrotvrdost vzorku č. 8

Měření:	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4	PM 5	PM 6	Průměr:
Podélné HV1	365,8	385,6	409,4	376,8	401,6	391,8	388,5

2.15 Vzorek č. 9

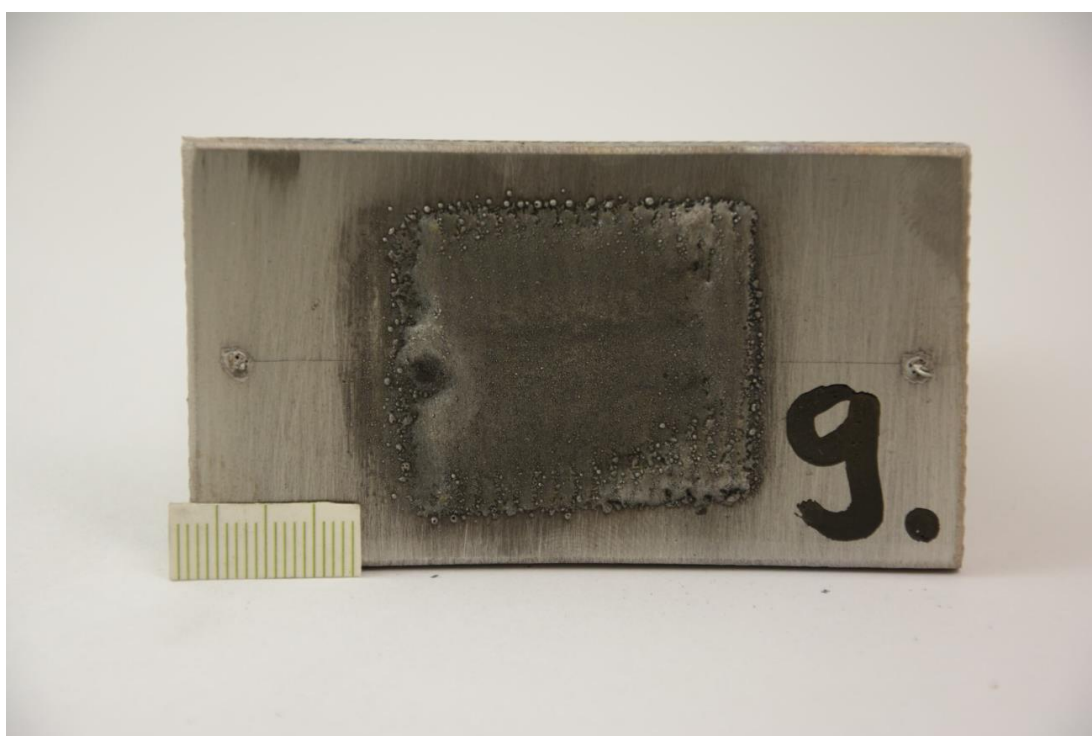
2.15.1 Zvolené parametry

Vzorek č. 9 se navařoval se změnou parametru frekvence na 142,9 Hz (viz Tab. 31).

Tabulka 31 Parametry navařování vzorku č. 9

IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min ⁻¹]	Lin. Rychlost [mm.s ⁻¹]	Šířka rozkyvu [mm]	Rychlost rozkyvu [mm.s ⁻¹]	Pauza N/P [s]	SiC [%]	Vzdálenost hořáku od ZM [mm]
75	45	142,9	23	1,05	28	32	0,1	30	8

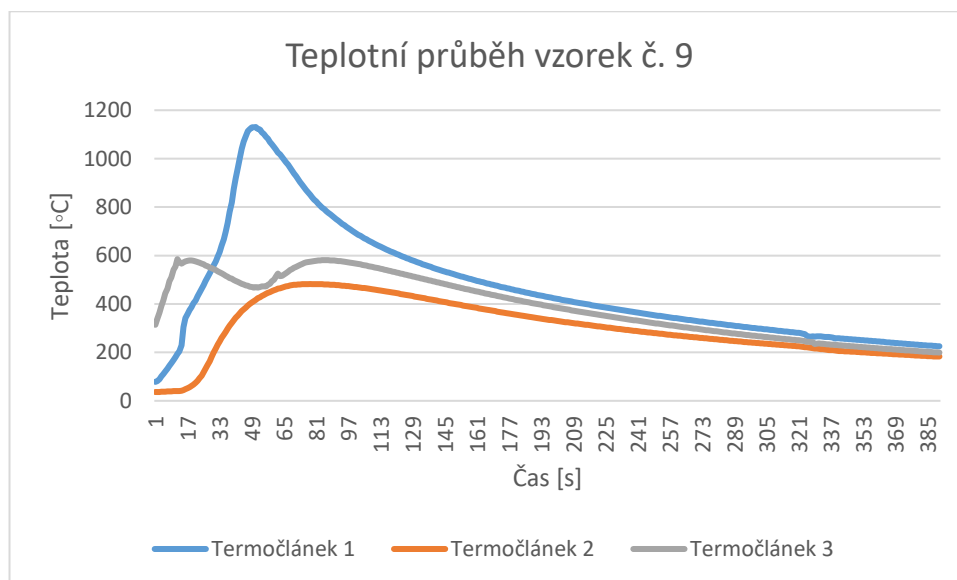
2.15.2 Vizuální hodnocení



Obrázek 53 Vzorek č. 9

Vzorek č. 9 vyfocený na snímku 53 je doposud vizuálně nejatraktivnější. Disponuje konzistentní kresbou, rovnoměrností, spojitostí a je bez viditelných pórů. Přítomna je minimální deformace základního materiálu a rozstřík. Návar je bez viditelných povrchových vad. Povlak je 36 mm široký a 0,9 mm vysoký.

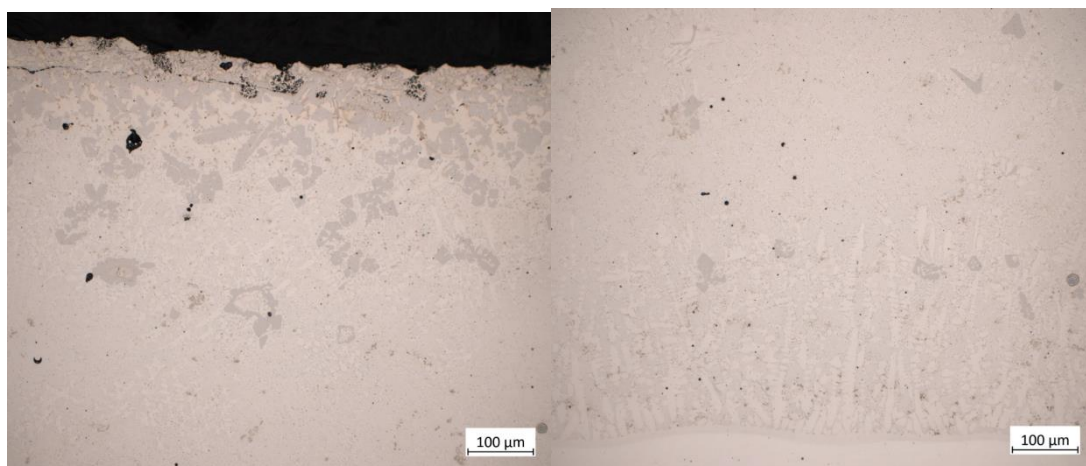
2.15.3 Teplotní průběh



Graf 9 Teplotní průběh vzorku č. 9

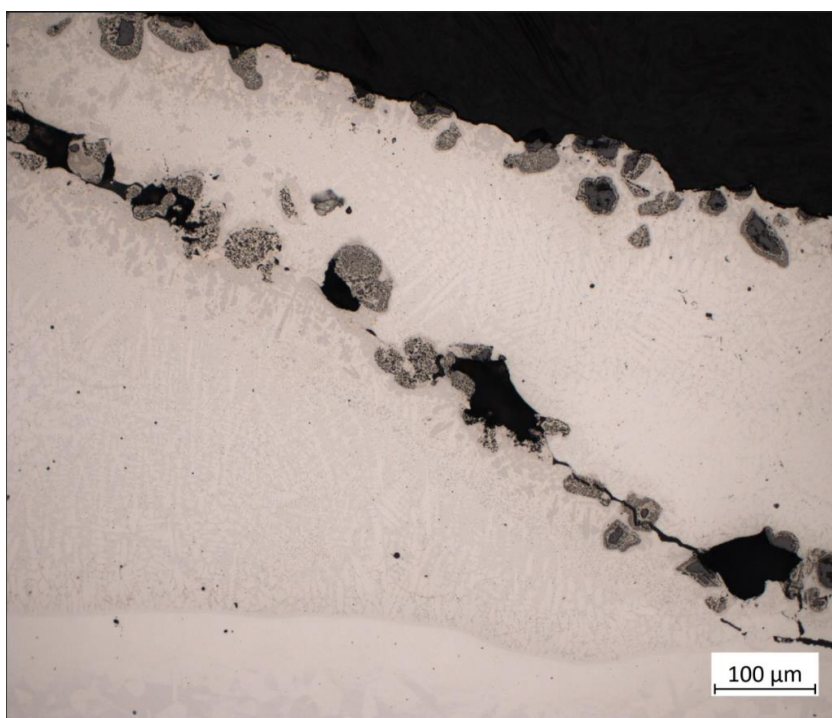
Maximální dosažená teplota termočlánu 1 odpovídá předchozím měřením. Viditelná změna na termočlánu 3 v rozmezí 17 a 81 sekund je zapříčiněna nahříváním ocelové destičky před navařováním, prvních 17 sekund měřeného procesu byla nahřívána strana termočlánu 3, poté byla nahřívána strana termočlánu 1 do sekundy 49. Proces navařování byl ukončen přibližně v 90 sekundě. Tento přehřev zapříčinil vyšší teploty snímání termočlánekem 3 až na 580 °C. Změna frekvence pulzace zapříčinila menší teplotní hodnoty snímání na termočlánu 2 (540 °C).

2.15.4 Mikrostruktura



Obrázek 54 Vzorek č. 9, 200x zvětšení – povrch + rozhraní

Na první pohled se zdá, v porovnání s předchozími vzorky této řady, že je na snímcích mikrostruktury (viz Obr. 54) fáze CrMo-Ni objemově více zastoupená, nedosahuje ovšem takového zastoupení, jak u vzorků první série. Na snímku 55, pravého kraje vzorku, je dobře vidět dendritické uspořádání fáze matrice.



Obrázek 55 Vzorek č. 9, 200x zvětšení – pravý kraj

2.15.5 Mikrotvrdość

V porovnání s mikrotvrdořtním měřením vzorku č. 8 se průměr naměřených hodnot zvýřil o 57 HV1 (viz Tab. 32). Napovídá tomu zvýřené zastoupení CrMo-Ni fáze, avřak mikrotvrdořtní hodnoty odpovídají tvrdořtem vzorků první řady, kde je vizuálně zastoupení této fáze vyšří.

Výpočet objemového podílu mikrostrukturní fáze ze snímku lze provést různými metodami. Například automatizovaným zpracováním obrazu, které může segmentovat mikroskopické snímky na různé fáze a vypočítat jejich objemové podíly, případně metodou RVE (representative volume element), která se používá pro mikromechanické modelování a lze s ní předpovídat objemový podíl a morfologii fází v materiálech. Tato metoda zahrnuje statistickou analýzu zrn a dokáže přesně předpovědět mechanické vlastnosti.[39][40]

Tabulka 32 Mikrotvrdořť vzorku č. 9

Měření:	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4	PM 5	PM 6	Průměr:
Podélné HV1	399,9	435,6	483,2	457	443,7	454,9	445,7

2.16 Vzorek č. 10

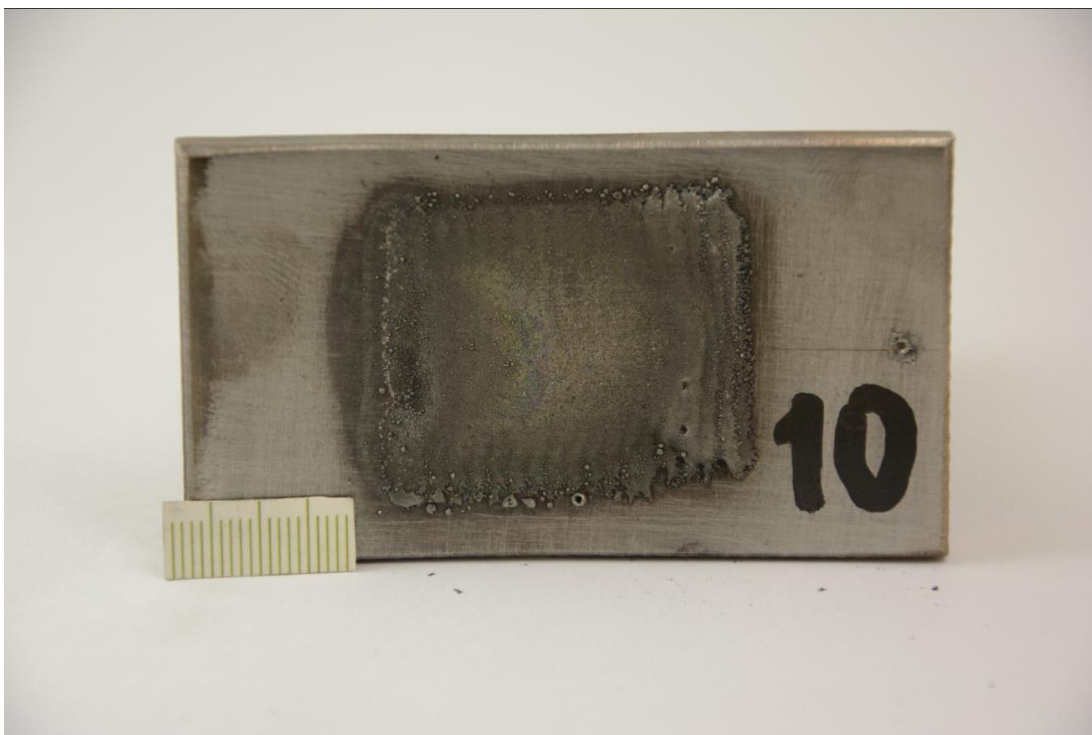
2.16.1 Zvolené parametry

Parametr frekvence se u vzorku č. 10 zvedla na 200 Hz. Parametr vzdálenosti plazmatronu od základního materiálu se posunul na 10 mm (viz Tab. 33). Materiál byl přehřátý na snímanou teplotu 500 °C.

Tabulka 33 Parametry navařování vzorku č. 10

IH [A]	IL [A]	Frekvence [Hz]	Rychlost podávání [g.min ⁻¹]	Lin. Rychlost [mm.s ⁻¹]	Šířka rozkyvu [mm]	Rychlost rozkyvu [mm.s ⁻¹]	Pauza N/P [s]	SiC [%]	Vzdálenost hořáku od ZM [mm]
75	45	200	23	1,05	28	32	0,1	30	10

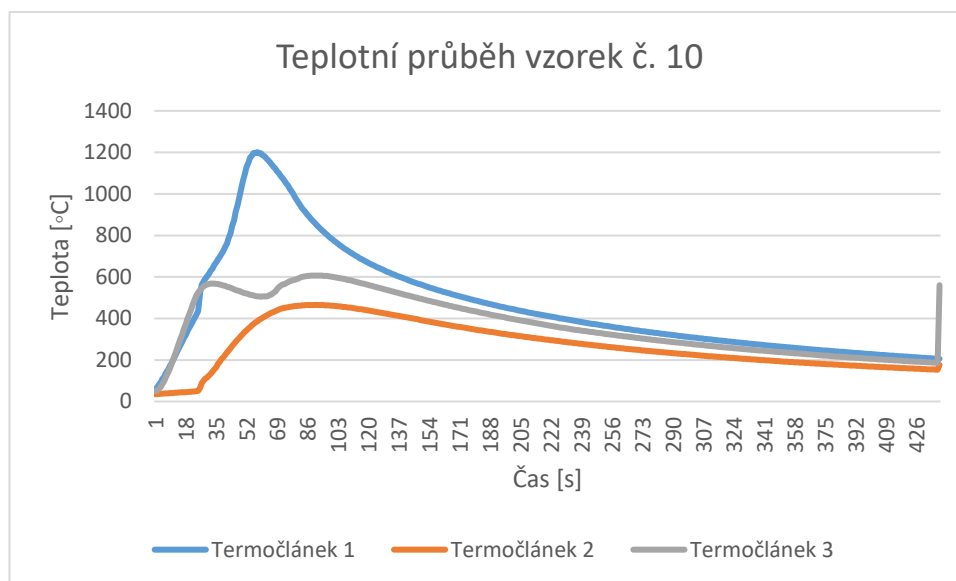
2.16.2 Vizuální hodnocení



Obrázek 56 Vzorek č. 10

Návar č. 10, zobrazený na obrázku 56, se vizuálně podobá návaru vzorku č. 9. Návar má konzistentní a rovnoměrnou kresbu bez viditelných pórů v hodnocené části. Povlak je spojitý bez viditelných kontinuálních vad. V ploše návaru ani v tepelně ovlivněné oblasti nejsou žádné trhliny ani praskliny. Základní materiál je mírně tepelně deformován a v oblasti návaru je viditelný jemný rozstřík. Povlak je 37 mm široký a 1,3 mm vysoký.

2.16.3 Teplotní průběh



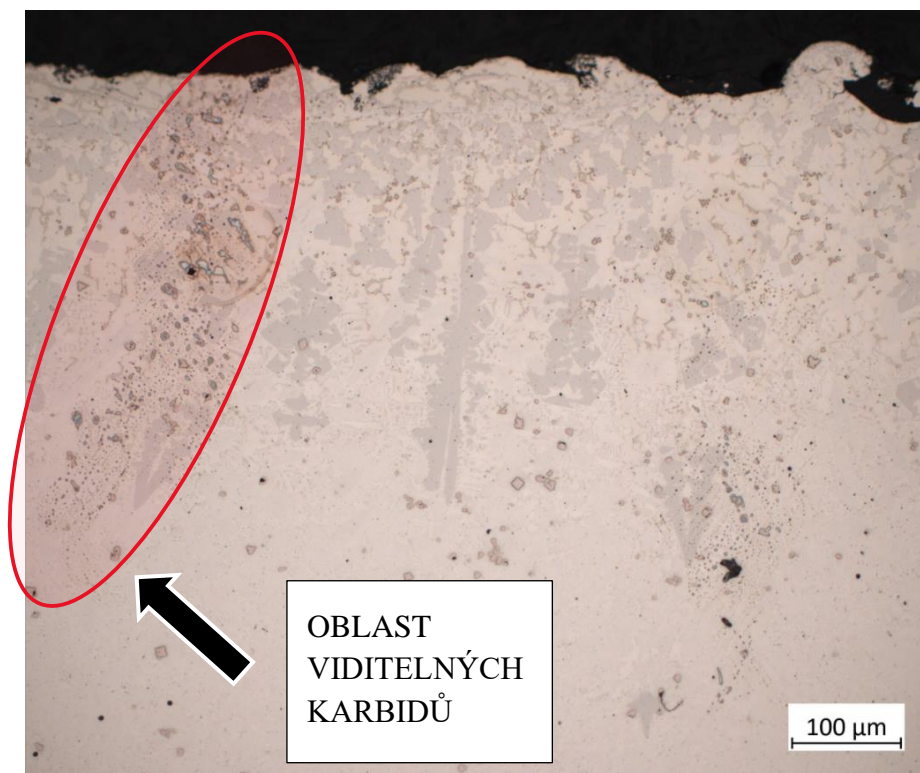
Graf 10 Teplotní průběh vzorku č. 10

Maximální hodnoty naměřené na termočlánek 1 (1190 °C), termočlánek 2 (605 °C) a termočlánek 3 (465 °C) během navařovacího procesu vzorku č. 10 (viz. Graf 10) odpovídají hodnotám naměřeným při navařovacím procesu vzorku č. 9. Výkyv hodnot, snímaných na termočlánek 3, je zapříčiněn přehřátím celé plochy základního materiálu.

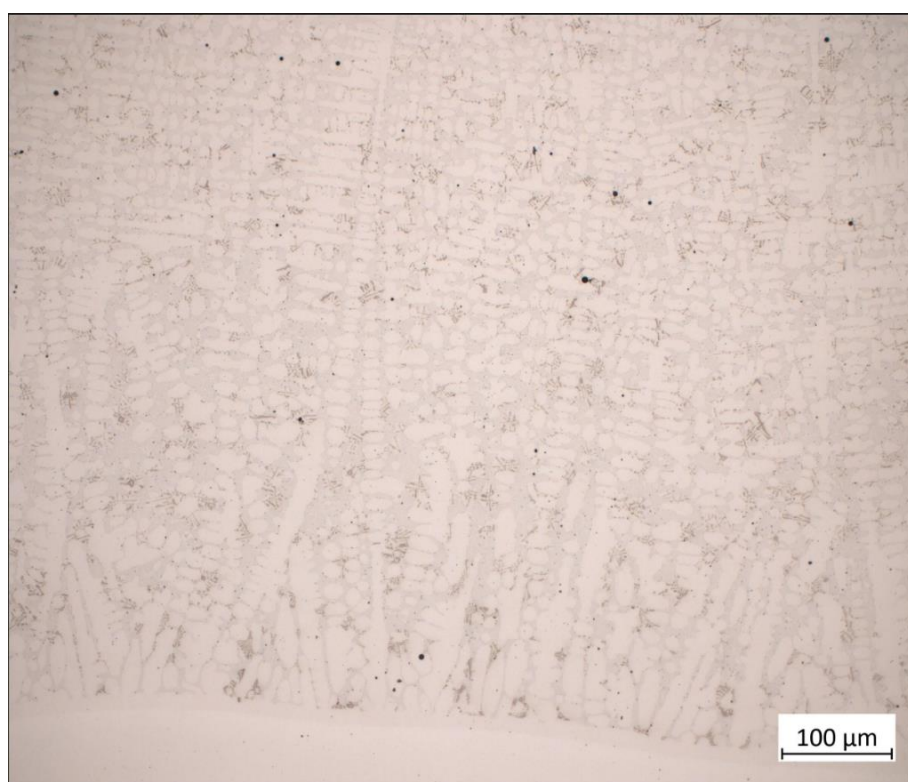
2.16.4 Mikrostruktura

Na mikrostrukturním snímku povrchu vzorku č. 10 (viz Obr. 57) se nachází již známé fáze, tedy fáze matrice, fáze CrMo-Ni a zastoupení prvků v formě karbidů, především karbidy chromu. Jak na snímcích vzorku č. 3, se zde nachází fáze CrMo-Ni v dendritických strukturách, avšak s menším objemovým zastoupením. Zarážející je hojné zastoupení viditelných struktur karbidů, doposud nejlépe rozpoznatelné.

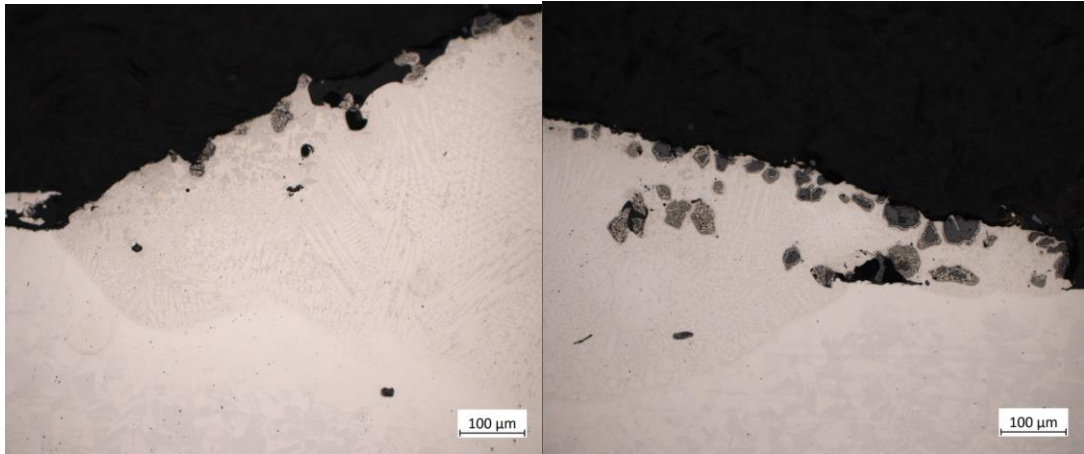
Na snímku rozhraní (viz Obr. 58) již dendritické struktury CrMo-Ni fáze, ani karbidy pomocí přiblížení 200x nevidíme. Nachází se zde dendritické struktury matrice, jak je pozorovatelné u navařených vzorků této řady.



Obrázek 57 Vzorek č. 10, 200x zvětšení – povrch



Obrázek 58 Vzorek č. 10, 200x zvětšení – rozhraní



Obrázek 59 Vzorek č. 10, 200x zvětšení – kraje

Dendritické fáze matrice jsou viditelné in na okrajích povlaku (viz Obr. 59). Nachází se zde i celé částice SiC.

2.16.5 Mikrotvrdot

Měření mikrotvrdoti na vzorku č. 10 probíhalo následovně:

1. Pět vtisků bylo provedeno 0,5 mm pod povrchem návaru podélně.
2. Šest vtisků bylo provedeno 1 mm pod povrchem návaru podélně.
3. Šest vtisků bylo provedeno příčně vzorkem, z toho se dva vtisky nacházely v základním materiálu.

Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce č. 34 a 35.

Tabulka 34 Mikrotvrdot vzorku č. 10 - podélně

Měření: 0.5 mm	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4	PM 5	PM 6	Průměr:
Podélné HV1	436,2	443	427	436,9	423,1		433,2
Měření: 1 mm	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4	PM 5	PM 6	Průměr:
Podélné HV1	365,3	390,1	359,7	354,3	340,9	348,9	359,9

Tabulka 35 Mikrotvrдость vzorku č. 10 - příčně

Měření:	ZM 1	ZM 2	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4	Průměr:
Příčné HV1	213,3	216,5	329,2	334,6	369,9	398,1	358

Z tabulek č. 34 a 35 je zřejmé, že se mikrotvrдость povlaku zvyšuje od základního materiálu směrem k povrchu. To odpovídá skutečnosti, že hustota SiC částic je nižší než kovová matrice, tudíž se jejich mechanické vlastnosti projevují blíže k horní hraně návaru.

2.17 Závěry z druhé řady vzorků

Řídící parametr druhé řady vzorku byla frekvence pulzace plazmového oblouku. Všechny 4 vzorky navařené v této sérii dle vizuální kontroly vyhovují. Vzorky č. 9 a 10 nedosahovaly takových teplotních maxim na opačné straně návarové plochy, což odpovídá předpokladu. U povlaků navařovaných za zvýšené frekvence se na mikrostrukturních snímcích objevují hustější a rozlehlejší dendritické struktury matrice s dlouhými sekundárními rameny. Na snímcích je zřejmé, že tvrdá fáze CrMo-Ni je v celém objemu méně zastoupena, avšak v porovnání s vzorky první řady je naměřená mikrotvrдость vzorku č. 9 a 10 podobná. Na mikrostrukturních snímcích vzorku č. 10 jsou doposud nejvíce viditelné oblasti karbidů, avšak pouze u povrchu povlaku. To odpovídá trajektorii mikrotvrđostních hodnot.

Závěr

V úvodní části diplomové práce je detailně popsána technologie navařování s důrazem na plazmové navařování, které je využito během části experimentální. Dále jsou zde popsány využití materiály a je přiblížena problematika navařování kompozitů s kovovou maticí. Je zde provedena analýza studií zabývajících se konkrétně navařováním slitiny typu Inconel 625[®] a SiC částic. Na začátku experimentální části jsou popsána všechna využívaná zařízení, proces samotného navařování vzorků a finální studie vlastností návaru.

Samotný cíl práce bylo vyhotovit povlak ze slitiny Nibasit 625[®] a karbidu křemíku tak, aby bylo SiC rovnoměrně rozprostřeno napříč celým návarem. Problematika zvolení vhodných navařovacích parametrů se řešila pomocí zkušebního návaru a pozvolného měnění během navařovacího procesu. Celkem se navařily dvě série vzorků po čtyřech vzorcích s měnícím se jedním parametrem (vzdálenost plazmatronu od základního materiálu a změna frekvence pulzace proudu) a dva vzorky pro doladění ostatních parametrů (lineární rychlostní hořáku, rychlost rozkyvu a rychlost podávání přídavného materiálu).

Během samotného navařování byla u každého vzorku sledována teplotní změna základního materiálu. Po dokončení povlaků byly z jednotlivých vzorků vytvořeny metalografické výbrusy, na kterých se zkoumala mikrostruktura, chemické složení fází a byla provedena zkouška mikrotvrlosti podle Vickerse.

Všechny vzorky byly úspěšně navařeny a vizuálně vyhovovaly. Data zaznamenaná termočlánky odpovídají předpokladům, tedy že vzorky navařované s vysokou frekvencí změny horního a dolního proudu, konkrétně vzorky č. 9 a 10, zaznamenaly nižší teplotní maxima. To se odráželo i v mikrostruktuře těchto vzorků i když dle EDS analýzy se většina SiC částic v matici buď kompletně rozpustila, či se do tavné lázně ani nedostala. Nižší teplotní gradient umožnil fázi matrice vytvářet dendritické struktury, avšak omezil vznik tvrdé fáze CrMo-Ni za vzniku většího množství karbidů. Mikrostrukturní snímky vzorku první série, konkrétně vzorku č. 3 (6 mm od ZM), zaznamenaly hojné zastoupení CrMo-Ni fáze ve formě dendritů. Odpovídá tomu i vysoká naměřená mikrotvrдость (425 HV1).

Nejperspektivnější vzorek druhé série byl vzorek č. 10, díky svému vysokému zastoupení chromu a molybdenu ve formě karbidů. Disponuje také v porovnání velkou mikrotvrđostí (433 HV1). Z důvodu limitních počtů celých částic SiC ve struktuře jsou zvýšené mikrotvrđostní hodnoty v porovnání se základním materiálem zapříčiněny tvrdou fází CrMo-Ni a tvorbou karbidů. Tomu naznačuje fakt, že předpokládaná mikrotvrđost vzorku s rovnoměrným zastoupením SiC částic v kompozitu je až dvakrát vyšší, než je nejvyšší naměřená mikrotvrđost napříč vzorky (vzorek č. 1) (530 HV1).

Pro dosažení potřebné struktury povlaku je zapotřebí adekvátně nastavit navařovací parametry. Případně změnit systém podávání přídatného materiálu. Zachování SiC částic ve struktuře má velký potenciál ve tvorbě korozivzdorných a ošeruvzdorných návarových povlaků.

Zdroje

- [1] BAJDA, Miroslav. Navařování kovů. Svět svaru [online]. 1996 [cit. 2024-02-09]. ISSN 1214-4983
- [2] Laserové navařování [online]. Laser Therm s.r.o., 2019 [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kalenilaserem/laserove-navarovani-kovu>
- [3] HLAVATÝ, Ivo, Jiří HLAVATÝ a Lucie KREJČÍ. Navařování tvrdokovů. Svět svaru. Hadyna International s.r.o., 2007, 11(3), 18-19. ISSN 1214-4983
- [4] MIG vs TIG Welding – Main Differences Explained. In: *Fractory* [online]. Siim Sild, 2022, 30.06.2022, s. 3 [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://fractory.com/mig-vs-tig-welding/>
- [5] ROHAN, Pavel, Tomáš KRAMAR a Tomáš PANÁČEK. Diagnostika plazmového navařovacího procesu. KONSTRUKCE [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, 2015, 26.12.2015, 2016, 1-2 [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/diagnostika-plazmoveho-navarovaciho-procesu/>
- [6] SUDNIK, W. Arc Welding, Croatia: InTech. 2011. ISBN 978-953-307-642-3.
- [7] SCHWARZ, Drahomír a Ivo HLAVATÝ. Svařování plazmovým obloukem. Svět svaru [online]. 2014. ISSN 1214-4983. Dostupné z: <https://adoc.pub/svaovaniplazmovym-obloukem.html>
- [8] MARTIŠOVITŠ, Viktor. Základy fyziky plazmy: učebný text pre magisterské štúdium. 3. Bratislava: Vydavateľstvo UK, 2006. ISBN 80-223-1983-X
- [9] YORK, Thomas and Haibin TANG. Introduction to Plasmas and Plasma Dynamics [online]. London: Academic Press, 2015. [vid. 14. 5. 2020]. ISBN 9780128018002. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128016619/introduction-toplasmas-and-plasma-dynamics#book-description>.
- [10] Plasmas explained. In: *Science Learning Hub* [online]. s. 3 [cit. 2024-02-8]. Dostupné z: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/238-plasmas-explained>
- [11] GOLĄŃSKI, Dariusz, Tomasz CHMIELEWSKI, Beata SKOWROŃSKA a Damian ROCHAŁSKI. Advanced Applications of Microplasma Welding. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa [online]. 2018, 53–63. Dostupné z: [doi:10.17729/ebis.2018.5/5](https://doi.org/10.17729/ebis.2018.5/5)
- [12] Díaz, V., Dutra, J., & D'Oliveira, A. (2012). Hardfacing by plasma transfer arc process. *Welding International*, 26, 87 - 95. <https://doi.org/10.1080/09507116.2010.527486>.

- [13] VENKATRAMANI, N. INDUSTRIAL PLASMA TORCHES AND APPLICATIONS [online]. 2002, (83). Dostupné z: <https://www.currentscience.ac.in/Volumes/83/03/0254.pdf>
- [14] Hardfacing by Plasma Transferred Arc Process - Scientific Figure on ResearchGate. Dostupné též na https://www.researchgate.net/figure/Effect-of-plasma-gas-flow-rate-on-degree-of-dilution-in-PAW-and-PTA-processes_fig9_221921246 [accessed 10 Feb, 2024]
- [15] ROHAN, Pavel, Ladislav KOLAŘÍK, Tomáš KRAMÁR and Zdeněk KRŠKA. Navařování plazmatem - ochranné povlaky ve výrobě i výzkumu. MM Průmyslové spektrum [online]. 2015, (2015/1) [vid. 13. 5. 2020]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-plazmatem-ochrannepovlakyvevyrobe-i-vyzkumu.html>.
- [16] WEMAN, Klas. Welding processes handbook. 2nd ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2012. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-0-85709-510-7
- [17] Degterev, AS, SF Gnyusov a S Yu Tarasov. Structural modification in a reheated beadoverlapping 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/abs/pii/S0257897217309854>
- [18] MRŇA, Libor. Dělení a svařování plazmatem. In: [online]. FSI VUT Brno, obor strojírenské technologie. 2013. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_deleni_a_svarovani_plasmou_2013_mrna.pdf
- [19] ATAMERT, Serdar. Stability, Wear Resistance, and Microstructure of Iron, Cobalt and Nickel-based Hardfacing Alloys. 2009.
- [20] Kskct [online]. KSK s.r.o. [vid. 15. 7. 2020]. Dostupné z: <https://kskct.cz/cs>
- [21] Inconel 625, slitina 625. Iklalloy [online]. Gangwu Road, Si-an, Čína: Gangwu, 2019 [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://lkalloy.com/cs/nickel-based-alloys/inconel-625/>
- [22] *Křemík a křemičitany* [online]. In: . Muni, s. 2 [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/sci/podzim2004/C1441/skripta/kapitola0604.html>
- [23] AZO materials: Machining Of Boron Carbide (B4C) - Process, Applications and Benefits [online]. [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5809>
- [24] Keramika a tvrdé povlaky: MATERIÁLOVÉ VĚDY. In: *Tescan* [online]. s. 1 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.tescan.cz/aplikace/materialovevedy/keramika-a-tvrde-povlaky/>
- [25] Kompozitní materiály. In: TREJTNAR, Josef a Verlag DASHÖFER. *Tech Portal* [online]. 2018, 16.9.2018, s. 4 [cit. 2024-02-12]. Dostupné z:

<https://www.techportal.cz/33/kompozitni-materialy-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EmVQ-tjtEQspdUvErhgUiEFrJfTGJxQrnQ/>

[26] *Kompozitní materiály s kovovou maticí: Kovové materiály* [online]. In: D., Vojtěch. Vydavatelství VŠCHT Praha, s. 186 [cit. 2024-02-17]. ISBN 80-7080-600-1. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pages-img/159.html

[27] AHMAD, M.; ALI, G.; AHMED, Ejaz; HAQ, M.A. a AKHTER, J.I. Novel microstructural growth in the surface of Inconel 625 by the addition of SiC under electron beam melting. Online. *Applied Surface Science*. 2011, roč. 257, č. 17, s. 7405-7410. ISSN 01694332. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.02.067>. [cit. 2024-03-19].

[28] SHI, Haojiang; PENG, Huabei; CHAI, Yidi; LI, Ning; WEN, Yuhua et al. Effect of Zr addition on the interfacial reaction of the SiC joint brazed by Inconel 625 powder filler. Online. *Journal of the European Ceramic Society*. 2021, roč. 41, č. 13, s. 6238-6247. ISSN 09552219. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.06.047>. [cit. 2024-03-19].

[29] SHI, Haojiang; PENG, Huabei; YAN, Jiazhen; ZHANG, Ran; LI, Ning et al. Investigations of the effect of Si addition on graphite elimination and the oxidation behavior of SiC joint using Inconel 625 powder filler. Online. *Journal of the European Ceramic Society*. 2022, roč. 42, č. 4, s. 1258-1271. ISSN 09552219. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.11.055>. [cit. 2024-03-25].

[30] SEO, D.; SAYAR, M. a OGAWA, K. SiO₂ and MoSi₂ formation on Inconel 625 surface via SiC coating deposited by cold spray. Online. *Surface and Coatings Technology*. 2012, roč. 206, č. 11-12, s. 2851-2858. ISSN 02578972. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.12.010>. [cit. 2024-03-25].

[31] OMEGA CZECH - INFO@OMEGACZECH.CZ. PPC 250 R6. *Nenalezený vydavatel* [online]. Available at: <https://www.kskct.cz/en/weld-surfacing/plasma-weld-surfacing-automatic-machines/690-ppc-250-r6>

[32] AUTOR, Nenalezený. Univerzální měřicí ústředna - datalogger - AHLBORN ALMEMO 5690-2M - vícekanalová. *Ahlborn.cz* [online]. Available at: <https://www.ahlborn.cz/univerzalni-merici-ustredna-datalogger-ahlborn-almemo-5690-2m-vicekanalova.html>

[33] AUTOR, Nenalezený. Labotom. *Struers.com* [online]. Available at: <https://www.struers.com/en/Products/Cutting/Cutting-equipment/Labotom>

[34] AUTOR, Nenalezený. CitoPress mounting press. *Struers.com* [online]. Available at: <https://www.struers.com/en/Products/Mounting/Mounting-equipment/CitoPress>

[35] AUTOR, Nenalezený. Grinding. *Nenalezený vydavatel* [online]. Available at: <https://www.qatm.com/products/grinding-polishing-etching/automatic-grinder-polisher/qpol-250-a2-eco/>

- [36] AUTOR, Nenalezený. Hardness Testing. *Buehler - Metallography Equipment* [online]. Available at: <https://www.buehler.com/products/hardness-testing/>
- [37] AUTOR, Nenalezený. ZEISS Axio Observer for Materials. *Nenalezený vydavatel* [online]. Available at: <https://www.zeiss.com/microscopy/en/products/light-microscopes/widefield-microscopes/axio-observer-for-materials.html>
- [38] AUTOR, Nenalezený. JSM-IT510 InTouchScope™ Scanning Electron Microscope. *JSM-IT510 InTouchScope™ Scanning Electron Microscope | Products | JEOL Ltd* [online]. Available at: <https://www.jeol.com/>
- [39] BANERJEE, Siddhartha. Automated Methodology for Volume Fraction Measurement of Three Phase Steel Micrograph Using Image Processing Techniques. Online. *Iraqi Journal of Science*. 2022, s. 4601-4608. ISSN 2312-1637. Dostupné z: <https://doi.org/10.24996/ij.s.2022.63.10.41>. [cit. 2024-07-01].
- [40] AMIRMALEKI, Maedeh; SAMEI, Javad; GREEN, Daniel E.; VAN RIEMSDIJK, Isadora a STEWART, Lorna. 3D micromechanical modeling of dual phase steels using the representative volume element method. Online. *Mechanics of Materials*. 2016, roč. 101, s. 27-39. ISSN 01676636. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.07.011>. [cit. 2024-07-01].

Přílohy

Příloha 1: Produktový certifikát prášku Nibasit 625-P/LFe