

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav strojírenské technologie

Plazmové navařování cermetu s niklovou matricí

Diplomová práce

Studijní program: Výrobní inženýrství

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

Autor: bc. Adam Novotný

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novotný** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **475074**
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 cermetu s niklovou maticí

Název diplomové práce anglicky:

Plasma surfacing of Ni - based cermets

Pokyny pro vypracování:

provedte rešerši literatury na téma plazmové navařování, niklové slitiny, B4C, cermety
provedte navaření zkušebních návarů cermetu na bázi inconelu 625
vyhodnoťte základní vlastnosti navařených povlaků

Seznam doporučené literatury:

Inconel and Nickel-based Superalloys [online]. Seattle: The MetalPress, 2011 [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: <https://metalpress.onlinemetals.com/inconel-uses/>
Boron Carbide (B4C) - Properties and Information about Boron Carbide. AZO Materials [online]. Staffordshire: AZOM, 2001 [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=75>
ROHAN, Pavel, Tomáš KRAMÁR a Jaroslav PETR. HSS DEPOSITION BY PTA – FEASIBILITY AND PROPERTIES. Advances in Science and Technology Research Journal [online]. 2016, 10(29), 57-61 [cit. 2022-01-28]. ISSN 2080-4075.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2022**

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

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis ošikana(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

Prohlášení o autorství:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma *Plazmové navařování cermetu s niklovou maticí* vypracoval samostatně pouze s využitím podkladů a literatury uvedených v seznamu použité literatury.

Prohlášení o udělení souhlasu s užitím:

Podle §60 zákona č.121/2000 Sb., O právu autorském a právu souvisejícím s právem autorským, O studiu na vysokých školách a zákona o závěrečných zkouškách, je diplomová práce duševním spoluvlastnictvím autora, vedoucího diplomové práce a Fakulty strojní ČVUT. Citace povoluje fakulta. Podmínkou externího použití je smlouva s řešiteli.

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval několika lidem, kteří umožnili vznik této práce a úspěšné provedení veškerých experimentů. V první řadě patří největší díky vedoucímu této práce **Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D.** za cenné rady při zpracovávání teoretické části a za pomoc a čas strávený během provádění experimentů. Dále bych chtěl poděkovat kolegům **Ing. Vladimíru Márovi, Ph.D.** a **Ing. Miroslavu Sahulovi, Ph.D.** za pomoc s vyhodnocováním, respektive přípravou vzorků. Potom patří díky společnosti Mikronex, s.r.o. za obětavou pomoc při přípravě vzorků pro abrazivní zkoušku a **Ing. Tomášovi Panáčkovi**, za pomoc s provedením této zkoušky. V neposlední řadě bych pak chtěl poděkovat svým rodičům, kteří mě podporují po celou dobu studia.

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Obor:	Výrobní inženýrství
Název diplomové práce:	Plazmové navařování cermetu s niklovou maticí
Autor:	bc. Adam Novotný
Vedoucí:	Ing. Pavel Rohan, PhD.
Rozsah:	Počet stran: 92
	Počet obrázků: 69
	Počet tabulek: 12
	Počet příloh: 5

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá plazmovým navařováním povlaků se speciálními vlastnostmi. V teoretické části je popsána problematika plazmového navařování a jeho srovnání s dalšími používanými technologiemi. Dále je zde věnována pozornost slitině Inconel 625[®] a jejím vlastnostem, karbidu boru a obecně problematice a možnostem využití cermetů. V neposlední řadě jsou v teoretické části zmíněny využívané zkoušky návarů.

Experimentální část se zabývá kompozitními návary na bázi niklové slitiny typu 625 navařenými technologií pulzního plazmového navařování. V rámci této části byly navařeny zkušební návary, na kterých byly provedeny vybrané zkoušky. Pro zjištění speciálních vlastností návarů byla provedena zkouška odolnosti proti abrazi. Dále byla měřena tvrdost návarů. Pro zjištění kvality návarů byla zkoumána jejich makrostruktura a pro objasnění vlastností byla zkoumána mikrostruktura a chemické složení (metodou SEM EDS). Závěrem je pak zhodnocení využitelnosti vybraného kompozitního materiálu v kombinaci se zvolenou metodou navařování.

Klíčová slova: plazmové navařování, niklové slitiny, karbid boru, cermet, kompozity s kovovou maticí, technologie navařování, práškový přídavný materiál, zkoušení návarů, SEM EDS

Czech technical university in Prague
Faculty of mechanical engineering

Field of study: **Manufacturing Engineering**
Diploma thesis: **Plasma surfacing of Ni – based cermets**
Author: **bc. Adam Novotný**
Supervisor: **Ing. Pavel Rohan, PhD.**

Extent of bachelor thesis:	Number of pages:	92
	Number of pictures:	69
	Number of tables:	12
	Number of attachments:	5

Abstract:

This diploma thesis deals with plasma surfacing of special property coatings. Theoretical part describes problematics of plasma surfacing and compares it with another surfacing technologies used. It also focuses on Inconel 625[®] alloy and its properties, boron carbide and in general problematics and usage possibilities of cermets. Finally, in theoretical part there are mentioned tests of coatings commonly used.

Experimental part deals with composite type 625 nickel alloy-based coatings created by pulsed plasma surfacing. Within this part testing coatings were created, on which have been done selected tests. To find out the special properties of coatings, the test of abrasive resistance has been performed. Next up hardness of coatings has been tested. To find out the quality of coatings their macrostructure has been examined and to explain macroscopic properties the microstructure and chemical composition (using SEM EDS method) have been examined. The conclusion is evaluation of usability of selected composite material in combination with chosen surfacing technology.

Key words: plasma surfacing, nickel alloys, boron carbide, cermet, metal matrix composites, surfacing technology, powder additional material, tests of coatings, SEM EDS

Obsah:

TEORETICKÁ ČÁST.....	9
1 Úvod.....	9
2 Niklové slitiny.....	9
2.1 Vlastnosti niklové slitiny typu 625	10
2.2 Mikrostruktura a tepelné zpracování.....	11
2.3 Výroba a zpracování.....	13
3 Karbid boru	14
4 Cermet	15
4.1 Využití.....	16
5 Technologie navařování.....	17
5.1 Promísení.....	17
5.2 Plazma	18
5.2.1 Strojírenské technologie využívající plazmatu	18
5.2.2 Princip fungování technologií využívajících plazma	19
5.2.3 Svařovací parametry	21
5.2.4 Plazmový hořák	23
5.2.5 Používané plyny.....	24
5.2.6 Technologie plazmového navařování	24
5.2.7 Využití pulzního proudu při navařování	27
5.2.8 Navařování povlaků se speciálními vlastnostmi.....	28
5.3 Navařování laserem	29
5.4 MIG/MAG navařování	31
5.5 Navařování elektronovým svazkem	32
6 Přídavné materiály	33
6.1 Výroba práškového materiálu.....	35
7 Zkoušky vlastností návarů	37
7.1 Nedestruktivní zkoušky	37
7.2 Destruktivní zkoušky	38
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	40
8 Použité přístroje a zařízení.....	40
8.1 Navařování vzorků.....	40

8.1.1	Navařovací zařízení	42
8.1.2	Snímání teploty	43
8.1.3	Použité přídavné materiály	44
8.1.4	Vzorky se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe®	44
8.1.5	Vzorky s 15 % B ₄ C	44
8.1.6	Vzorky s 30 % B ₄ C	45
8.2	Struktura návarů	45
8.2.1	SEM	48
8.3	Měření tvrdosti	49
8.4	Abrazivní zkouška	49
9	Výsledky experimentu a diskuze	50
9.1	Navařování vzorků	50
9.1.1	Vzorky se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe®	51
9.1.2	Vzorky s 15 % B ₄ C	53
9.1.3	Vzorky s 30 % B ₄ C	55
9.2	Struktura návarů	58
9.2.1	Makrostruktura	58
9.2.2	Mikrostruktura	60
9.2.3	SEM	66
9.3	Chemické složení návarů	68
9.4	Tvrdost návarů	71
9.5	Abrazivní zkouška	74
10	Závěr	80
	Bibliografie	83
	Seznam zkratk	87
	Seznam obrázků	88
	Seznam tabulek	91
	Seznam příloh	92

TEORETICKÁ ČÁST

1 Úvod

Rozšiřující se využívání práškových přídavných materiálů při navařování vytváří nové možnosti v oblasti návarů se speciálními vlastnostmi (žárovzdorné návary, abrazivzdorné návary atd.) Použitím práškových PM je možné navařovat různé slitiny materiálů, které konvenčními způsoby nelze vytvořit. Kromě kovových návarů jsou velkou oblastí výzkumu návary kompozitů s kovovou maticí a keramickými částicemi. Vzhledem k množství používaných slitin kovů a keramických materiálů existuje velké množství jejich kombinací, které ale nemusí vždy vést k požadovaným výsledkům. Na výsledné vlastnosti návaru má také velký vliv technologie, kterou je návar vytvořen.

Výše zmíněné skutečnosti vedly ke vzniku této práce, která se zabývá konkrétním materiálem (kompozit s maticí na bázi slitiny Nibasit 625[®] a B₄C jako keramické plnivo) navařovaným technologií pulzního plazmového navařování (PTA). Cílem diplomové práce je shrnout vlastnosti obou materiálů samostatně, vysvětlit problematiku navařování se zaměřením na technologii plazmového navařování a následně navrhnout a provést experiment, který ověří použitelnost zvolené kombinace materiálů a vhodnost technologie plazmového navařování pro nanášení povlaků z tohoto kompozitního materiálu.

Výše zmíněné cíle vychází ze zadání diplomové práce:

- 1) Provést rešerši literatury na téma plazmové navařování, niklové slitiny, B₄C a cermety.
- 2) Provést navaření zkušebních návarů na bázi niklové slitiny typu 625.
- 3) Vyhodnotit základní vlastnosti navařených povlaků.

2 Niklové slitiny

Pro slitiny niklu se nejčastěji používá obchodního označování. Tyto slitiny jsou rozdělovány do tří skupin: Inconely[®] (slitiny Ni, Cr, Fe a dalších prvků), Monely[®] (slitiny Ni, Cu, Fe a dalších prvků) a Incoloye[®] (slitiny Ni – max 30 %, Cr, Fe a dalších prvků). Dále se tento text zabývá pouze slitinami s obchodním názvem Inconel[®].

Inconel® obecně je označení slitin niklu, chromu, železa a dalších prvků jako je molybden, vanad, titan atd. s tím, že nikl představuje hlavní složku v těchto slitinách. V roce 1932 byly tyto materiály registrovány americkou společností International Nickel Company a své první využití našly v oblasti výroby proudových motorů. Jedná se o slitiny s velmi dobrou korozní odolností za zvýšených teplot. Většina těchto slitin vykazuje také velice dobrou žárovečnost. Jejich dobrá korozní odolnost za zvýšených teplot je způsobena vznikem velice silné a odolné pasivační vrstvy na povrchu a vysokých pevností i za vysokých teplot dosahují díky zpevnění v tuhém roztoku a precipitačnímu zpevnění.

[1]

2.1 Vlastnosti niklové slitiny typu 625

Tabulka 1: Chemické složení slitiny Inconel 625® [2]

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

Teplota likvidu této slitiny je 1350 °C a teplota solidu 1290 °C. I přes poměrně nízkou teplotu tavení (například ve srovnání s nízkouhlíkovými nízkolegovanými oceli, které mají teplotu tavení 1536 °C) je Inconel 625® možné používat až do teploty 700 °C (mez tečení se pohybuje okolo 950 °C). Při této teplotě se mez pevnosti pohybuje okolo 450 MPa. Maximální dosahovaná pevnost po tepelném zpracování se blíží 1400 MPa a mez kluzu dosahuje od 30 do 55% meze pevnosti (v závislosti na tepelném zpracování) při celkovém prodloužení 10-60 %. Pokud ovšem materiál neprojde tepelným zpracováním dosahuje mez pevnosti hodnoty 1100 MPa a mez kluzu pouze o desítky MPa nižší, tažnost tohoto materiálu pak dosahuje maximálně 6 %. Yangův modul pružnosti v tahu dosahuje 207 GPa. Tvrdost dosahuje hodnot až 72 HRC (v tepelně zpracovaném stavu). Z relevantních fyzikálních vlastností je koeficient tepelné vodivosti 9,8 W.m⁻¹.K⁻¹, hustota slitiny je 8,44 g.cm⁻³. [2] [3]

Inconel 625® má výbornou korozní odolnost, méně agresivní korozní prostředí (atmosféra, voda, mořská voda, neutrální soli) nemají prakticky žádný negativní efekt.

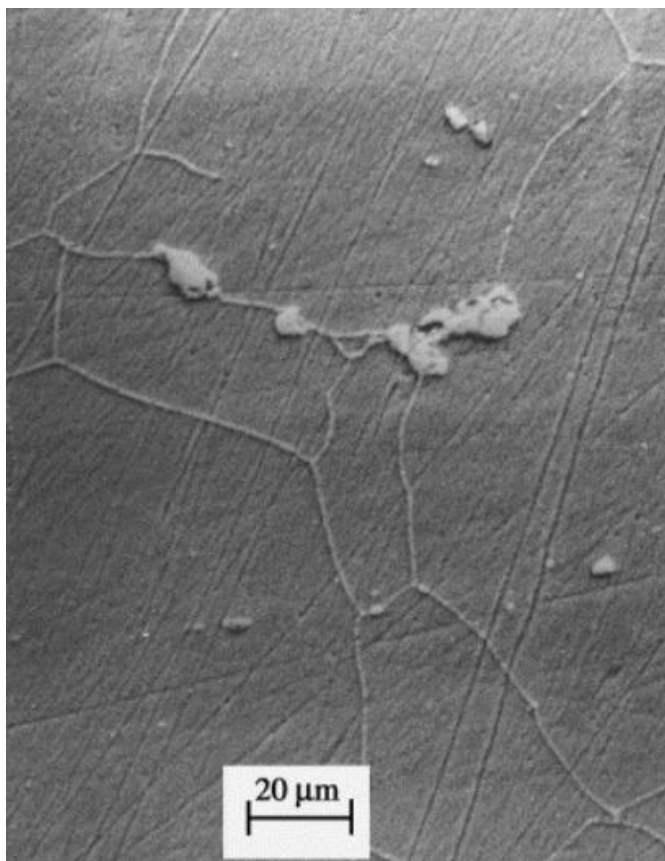
Zároveň velice dobře odolává širokému spektru korozních prostředí od kyselin až po zásady. Je odolný proti pittingu a koroznímu praskání po hranicích zrn.

Za zvýšených teplot vzniká na povrchu materiálu silná pasivační vrstva oxidu Cr_2O_3 , která brání další oxidaci. Velice dobrou žárovečnost způsobují precipitáty vyloučené uvnitř zrn základního materiálu (zpomalují odpeňovací pochody při zvyšování teploty). Obsah uhlíku do 0,1 % pak umožňuje vznik karbidů, které brání pokluzům po hranicích zrn a zpomalují creep. [2] [4]

2.2 Mikrostruktura a tepelné zpracování

Základem je tuhý roztok γ s krychlovou plošně středěnou mřížkou, ve které se vyskytují karbidy (nejčastěji typu MC a M_6C bohaté na nikl, molybden a niob, dále se v tuhém roztoku vyskytují karbidy typu M_{23}C_6 tvořené chromem) a intermetalické částice γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$) a γ'' (Ni_3Nb). Částice γ' jsou koherentní s mřížkou základního materiálu, díky tomu nemění plasticitu materiálu, ale zároveň výrazně zvyšují pevnost a odolnost proti creepu. V mřížce základního materiálu tvoří krychlové útvary. Problém je, že v rozmezí teplot 600-850 °C je tato fáze nestabilní. Částice γ'' vytváří hlavní vytvrzovací fázi, ale za vyšších teplot (nad 650 °C) dochází k jejich rozpouštění. Ve stavu před tepelným zpracováním je většina karbidů vyloučena na hranicích zrn v podobě silného souvislého filmu (viz. obrázek 1). Další částice se vyskytují uvnitř zrn základního materiálu v podobě hrubých, blokových, náhodně rozmístěných útvarů (viz. obrázek 1). Útvary na hranicích zrn mají vysoký obsah niobu a uhlíku, jedná se tedy o karbidy niobu. Tyto precipitáty nebyly rozpuštěny v základním materiálu během jeho výroby. [3] [4] [5]

Pro dosažení lepších mechanických vlastností je nutné dosáhnout rovnoměrného rozložení karbidů a intermetalických fází v celém objemu materiálu a jejich co nejpravidelnějšího tvaru a nejmenší velikosti. Proto se používá precipitační vytvrzování, během kterého dojde k rozpouštění stávajících částic a následně k jejich rovnoměrnému vyloučení uvnitř zrn. [6]

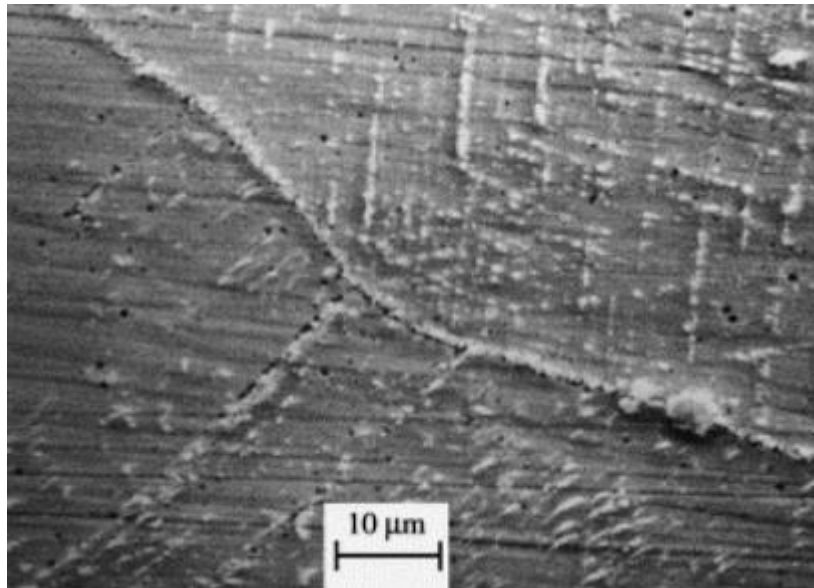


Obrázek 1: Mikrostruktura slitiny Inconel 625[®] zobrazená na světelném mikroskopu. [3]

Podle požadovaných vlastností se využívá rozpouštěcí žíhání při vysoké teplotě blízké se teplotě tavení (až 1250 °C), ochlazení nadkritickou rychlostí ochlazování (vznikne metastabilní přesycený tuhý roztok) a následné umělé stárnutí při teplotách 650 °C, 850 °C nebo 1150 °C. Během rozpouštěcího žíhání dochází k rozpuštění většiny (během experimentů provedených Shankarem, Rao a Mannanem bylo pozorováno, že větší primární karbidy NbC se zcela nerozpustí) částic vyloučených v matici. Nejzásadnější vliv má rozpuštění fáze γ'' a intermetalické fáze $Ni_2(Cr,Mo)$. Stárnutí pak zajistí rovnoměrné vyloučení jemných disperzních precipitátů uvnitř zrn základního tuhého roztoku. Časy umělého stárnutí se pohybují od jednotek hodin až po stovky hodin. S rostoucí dobou stárnutí dochází k růstu precipitovaných částic δ -fáze a dalších intermetalických částic (viz. obrázek 2). Růst těchto částic zapříčiňuje nárůst meze pevnosti a kluzu, ale také výrazný pokles plastických vlastností (hlavně tažnosti). [3] [4] [5]

Intermetalická fáze Ni_3Nb a fáze γ'' mají zásadní vliv na žárovevnost slitiny. Tyto fáze totiž tvoří malé kubické krystaly, které při zvýšených teplotách výrazně zpomalují

creep. Při teplotách nad 850 °C dochází k hrubnutí zrn fáze γ'' a z toho důvodu k poklesu mechanických vlastností. [3] [6]



Obrázek 2: SEM snímek protažených precipitátů δ -fáze (stárnutí 650 °C, 500 h). [3]

2.3 Výroba a zpracování

Vzhledem k vysokým požadavkům na čistotu a minimální obsah škodlivých prvků (S, P) a plynů, probíhá tavení těchto slitin nejčastěji v elektrických obloukových pecích, nebo v indukčních pecích, případně pak elektrostruskovým přetavováním. Zvýšený obsah titanu představuje nebezpečí znečištění taveniny oxidy TiO_2 , proto se tavení provádí ve vakuu. U součástí, které jsou velice tepelně a zároveň mechanicky namáhané (např. oběžné lopatky turbín proudových motorů) je možné dosáhnout monokrystalické struktury, která zásadně zvyšuje žárovevnost. U klasických polykrystalických odlitků lze dosáhnout výrazně orientované struktury díky řízenému tuhnutí taveniny. [4]

Dosahovaná vysoká tvrdost slitiny a přítomnost tvrdých karbidických částic zapříčiňuje špatnou obrábitelnost této slitiny. Proto je nutné obrábět díly ještě před procesem vytvrzování a po vytvrzování už obrábět pouze s minimálním úběrem materiálu.

Většina niklových slitin je pouze obtížně svařitelná z důvodu náchylnosti k praskání. Dále pak dochází v tepelně ovlivněné oblasti k segregaci legujících prvků a materiál je pak v okolí svarů nehomogenní. U vytvrzovaných slitin pak může docházet k hrubnutí precipitátů a je pak nutné znovu provádět celý proces tepelného zpracování.

Slitiny typu 625 a 718 mají ovšem upravené chemické složení tak, že jsou u nich výše uvedené negativní následky svařování eliminovány a tyto slitiny je možné, za správně zvolených podmínek, bez problému svařovat. Nejčastěji používané svařovací technologie jsou pak TIG a elektronové svařování (pouze pro menší součásti). [1] [2]

Často se tyto slitiny používají jako žáruvzdorné a žárovečné povlaky. Pro takové účely se využívá materiál v podobě prášku, který je nejčastěji taven a nanášen pomocí laseru nebo plazmatu. [1]

3 Karbid boru

Jedná se o keramickou látku černé barvy s chemickým složením B_4C . Byl objeven během 19. století, kdy vznikl jako postranní produkt při výrobě některých kovů, jeho chemické složení bylo zjištěno až ve 30. letech 20. století. Je to třetí nejtvrďší materiál na Zemi po diamantu a kubickém nitridu boru (tvrdost podle Vickerse dosahuje 38 GPa, 9,75 na Mohsově stupnici tvrdosti). Tepelná vodivost karbidu boru se pohybuje v rozmezí $30-42 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a jeho hustota je $2,52 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Teplota tavení je pak $2763 \text{ }^\circ\text{C}$. Modul pružnosti dosahuje 460 GPa. B_4C má romboedrickou krystalovou mřížku (patří do skupiny šesterečných mřížek). [7] [8] [9]



Obrázek 3: Karbid boru ve formě prášku. [9]

Díky výše zmíněným vlastnostem se karbid boru využívá pro vysoce abrazivně namáhané součásti (trysky pro řezání vodním paprskem a otryskávací zařízení). Vzhledem k jeho nízké hustotě se využívá jako výztuž neprůstřelných vest a plátování armádních letadel. Významné využití nachází B_4C také v energetice (konkrétně v jaderných elektrárnách), kde se využívá pro absorbování přebytečných neutronů během jaderné reakce (kontrolní tyče). V automobilovém průmyslu se využívá jako součást směsi brzdových destiček. V kombinaci s kovy (slitiny na bázi Ni, Co a Ti) se pak v podobě kompozitu využívá jako antiabrazivní povlak na vysoce tepelně a abrazivně namáhané součásti. [7] [8] [9]

4 Cermet

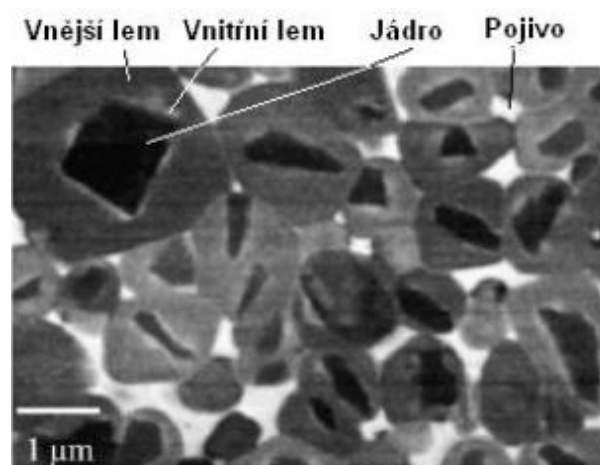
Cermet je označení kompozitního materiálu složeného z keramiky (**ceramic**) a kovu (**metal**). Díky spojení dvou různých materiálů je možné kombinovat jejich vlastnosti. Vysokou tepelnou odolnost a tvrdost keramiky ve spojení se schopností plasticky se deformovat. Používané kovy se svými vlastnostmi musí částečně přibližovat použité keramice, proto se využívají nejčastěji žáruvzdorné slitiny na bázi Ni, Co, Ti nebo W. Kovy jsou v cermetech převážně používány jako pojivo (jejich obsah bývá méně než 20 %), v některých případech ale může být obsah kovu více než 50 % - tyto obsahy platí převážně pro řezné nástroje pro třískové obrábění. V ostatních aplikacích je obsah kovu většinou větší než obsah keramické složky. [10]

Žáropevnosti a žáruvzdornosti cermetů se využívá hlavně v aplikacích, kde jsou díly vystaveny velkým teplotám a mechanickému zatížení. První zmínky o vývoji a využívání cermetů jsou z druhé Světové války. Po válce se začaly vyvíjet součásti do proudových motorů (spalovací komory a oběžné lopatky turbín) z cermetů, jejich výhodou, kromě žáropevnosti, je nižší měrná hmotnost, než má ocel (keramické materiály mají hustotu kolem $3\ 000\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Dnes se využívají v řadě různých aplikací od leteckého průmyslu přes strojírenství až po materiály používané na zubní náhrady. [10] [11]

Fyzikální a mechanické vlastnosti cermetů jsou velice rozdílné a závisí na mnoha proměnných (použitý kov a keramika, objemový podíl jednotlivých složek a technologie vytváření výsledné součásti). Podle způsobu výroby se může vyskytovat i nehomogenita vlastností. To je způsobeno výrazně rozdílnou hustotou kovové a keramické složky, při

delší době přípravy a vyšší teplotě (kov v tekutém stavu) může docházet k přesunu keramických částic a jejich zvýšené koncentraci u povrchu. [11] [12]

Mikrostruktura cermetů závisí na technologii výroby a na poměru množství jednotlivých složek. U slinovaných karbidů se mikrostruktura skládá z keramických částic (nejčastěji TiC nebo TiN), které drží pohromadě pomocí pojiva (nízký obsah kolem 15 %, nejčastěji Co nebo Ni – viz. obrázek 4). Keramické částice mají čisté jádro (obsah pouze TiN nebo TiC) a lem, kde se kromě toho vyskytují i další prvky (Ti, W, Mo atd.). [11] [12] [13]



Obrázek 4: Typická mikrostruktura slinovaného cermetu. [13]

4.1 Využití

Díky výše zmíněným vlastnostem (žáropevnost, dobré mechanické vlastnosti, vysoká tvrdost při zachování elasticity) jsou cermety vhodné pro aplikace, kde jsou součástí značně tepelně a mechanicky namáhané. Zároveň jejich vysoká tvrdost se využívá u součástí, kde dochází k intenzivnímu abrazivnímu opotřebení.

Celých součástí z cermetů se využívá v automobilovém průmyslu na výrobu brzdových destiček a spojkových lamel. V medicíně se využívají na výrobu kostních náhrad a implantátů (inertní materiál). Jak bylo zmíněno výše, v leteckém průmyslu jsou využívány na výrobu spalovacích komor proudových motorů a oběžné lopatky turbín. Rozšířené využití je také ve strojírenství, konkrétně v třískovém obrábění, kde se využívají jako materiál na řezné destičky (přechod mezi slinutými karbidy a řeznou keramikou). Další možností využití cermetů je na těla speciálních hodinek konstruovaných tak, aby vydržely extrémní podmínky (tlak, teplota atd.). [10] [12]

Kromě celých součástí je významné využití cermetů jako povlaků (především žárovevných a odolných proti abrazi). Různými technologiemi (fyzikálně – PVD, tepelně – navařováním) je možné vytvářet povlaky o tloušťkách od několika μm až po jednotky mm. Takové povlaky se pak využívají ve strojírenství v aplikacích, kdy by zhotovení celé součásti z cermetu bylo příliš drahé, nebo kde mechanické vlastnosti cermetu nejsou vhodné pro funkci součásti, ale je potřeba zajistit žáruvzdornost a abrazivzdornost. Dále se využívají ve vojenském průmyslu jako neprůstřelné povlaky na plátování armádních vozidel a tanků. [11]

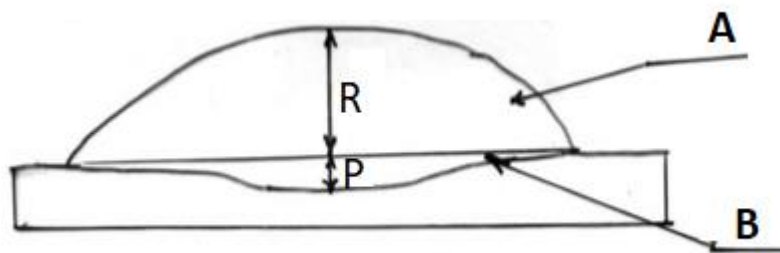
Materiály obsahující větší podíl kovového pojiva oproti keramické složce se nazývají kompozity s kovovou maticí (Anglicky metal matrix composite – MMC). Jak bylo již výše zmíněno, tak právě tyto materiály se využívají jako povlaky s různými funkčními vlastnostmi (odolnost proti různým druhům opotřebení, úprava kluzných a třecích vlastností atd.). [14]

5 Technologie navařování

Jedná se o technologie využívající různých tepelných zdrojů (plazma, laser, elektrický oblouk, elektronový svazek) k natavení základního a přídavného materiálu za účelem vytvoření plošného nebo 3D návaru na povrchu základního materiálu. Během tohoto procesu dochází k promíšení přídavného a základního materiálu a dochází k jejich metalurgickému spojení.

5.1 Promísení

Promísení (anglicky dilution) je důležitý parametr, který ovlivňuje vlastnosti výsledného návaru. Pro technologie navařování je typické, že přídavný materiál má výrazně rozdílné chemické složení od základního materiálu (na rozdíl od svařování, kdy je výhodné podobné chemické složení obou materiálů). Během procesu navařování dochází k promísení roztaveného přídavného a základního materiálu. Během tuhnutí mohou v promísené oblasti vznikat nežádoucí fáze a sloučeniny, které následně ovlivňují mechanické vlastnosti návaru. Z tohoto důvodu je důležité, aby promísení bylo co nejmenší. Velikost promísení závisí na použité technologii a nastavených parametrech. [15] [16]



Obrázek 5: Schéma návaru pro výpočet promísení. [15]

Na obrázku 5 jsou označeny následující charakteristiky návaru: R – výška návaru, P – hloubka natavení ZM, A – plocha návaru, B – plocha natavené oblasti ZM.

Promísení se vypočítá z ploch uvedených na obrázku 5 podle vzorce:

$$\text{Promísení (\%)} = \frac{B}{A+B} * 100 \text{ [15] [16]}$$

5.2 Plazma

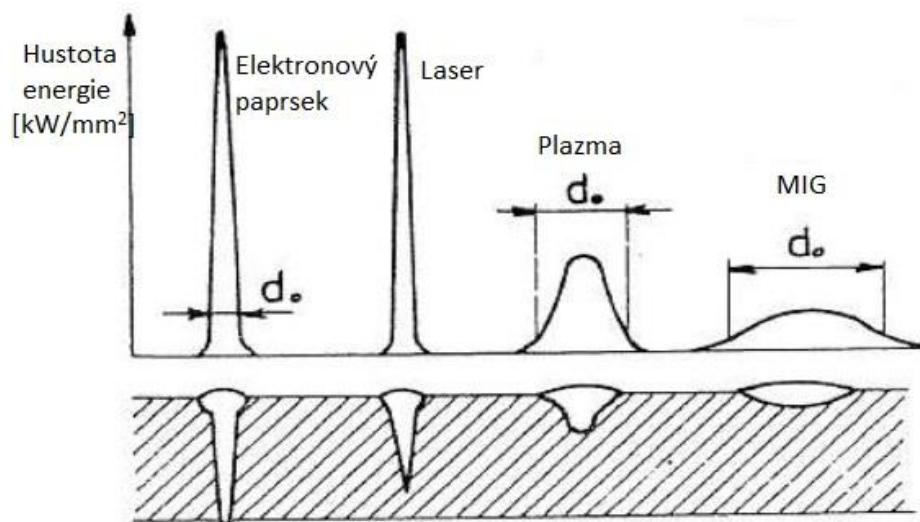
Jedná se o ionizovaný plyn složený z kationtů, elektronů a neutrálních molekul a atomů, který je z makroskopického pohledu elektricky neutrální. Plazma je čtvrté skupenství hmoty a ve vesmíru tvoří přes 99 % hmoty veškerých známých objektů. Její nejdůležitější vlastnosti jsou výborná elektrická vodivost a ovlivnitelnost elektrickým a magnetickým polem.

Dělí se podle stupně ionizace (slabě a silně ionizované) a podle teploty (nizko- a vysokoteplotní). Slabě ionizované plazma má malou koncentraci nabitých částic vůči neutrálním částicím. Vysokoteplotní plazma má velkou energii nabitých částic, jeho teplota dosahuje hodnot 10^6 °C a vyskytuje se v jádrech hvězd, kde probíhá termojaderná reakce. Nizkoteplotní plazma dosahuje výrazně nižších teplot, řádově v jednotkách $10^3 - 10^4$ °C a vyskytuje se například v zářivkách a elektrickém oblouku. Ve strojírenství se využívá jako zdroj energie pro různé technologie. [17]

5.2.1 Strojírenské technologie využívající plazmatu

Ve strojírenství je plazma využíváno hned v několika technologiích. Při dělení materiálu (řezání plazmatem – PAC - Plasma Arc Cutting), spojování materiálu (svařování plazmatem – PAW - Plasma Arc Welding), aditivní technologie (plazmové navařování – PTA - Plasma Transferred Arc) a v různých technologiích tepelného zpracování (např.

povrchové kalení). Obecně se technologie využívající plazmový oblouk řadí mezi technologie se zvýšenou hustotou energie, mezi které se také řadí technologie využívající laser a elektronový svazek. Oproti laseru má plazma nižší hustotu energie (viz obrázek 6), ale výrazně lepší účinnost přenosu energie a nižší celkové náklady na technologii. První byly vynalezeny technologie PAC a PAW v 60. letech 20. století. Další využití plazmatu ve strojírenství se rozvíjelo v druhé polovině 20. století.



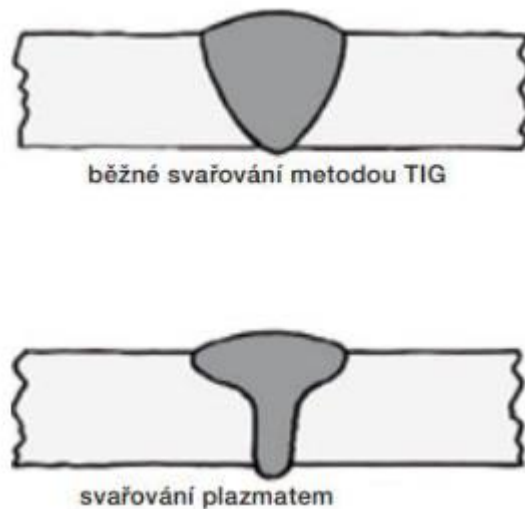
Obrázek 6: Porovnání hustoty energie vybraných technologií svařování. [18]

5.2.2 Princip fungování technologií využívajících plazma

Technologie plazmového svařování (respektive navařování) je podobná technologii TIG. Elektrický oblouk hoří mezi základním materiálem a netavící se wolframovou elektrodou. Svarový kov je pak chráněn ochranným plynem přiváděným z hořáku. Svařuje se buď bez přídavného materiálu, nebo je přídavný materiál v podobě drátu přiváděn do svarové lázně pomocí podavače (případně dodává přídavný materiál svářeč ručně). U technologií využívajících plazma je upravený hořák, kterým kromě ochranného plynu proudí ještě plyn plazmový. Plazmový plyn vystupuje z trysky nadzvukovou rychlostí a usměrňuje elektrický oblouk. Vysoké výstupní rychlosti plynu je dosaženo díky tepelné roztažnosti plynu. Při jeho ohřevu dochází k výraznému nárůstu objemu a tím také k zvýšení rychlosti jeho proudění. Teplota plazmatu se pohybuje v rozmezí 10 000 – 30 000 K a závisí na použitém plazmovém plynu (více viz

kapitola 4.2.5). Díky usměrnění oblouku do velice úzkého svazku je dosaženo vysoké hustoty energie. K zúžení oblouku přispívá také úzká tryska hořáku. [19] [20]

Oproti technologii TIG mají svary vytvořené technologií PAW rozdílný příčný průřez (viz obrázek 7). Je to způsobeno vyšší hustotou energie. Díky tomu je technologií PAW dosahováno lepšího průvaru, je možnost svařovat větší tloušťky základního materiálu a není nutné podkládat kořen svaru až do tlouštěk 10 mm (v závislosti na svařovaném materiálu).



Obrázek 7: Srovnání tupého svaru vytvořeného metodou TIG a PAW. [21]

Vznik plazmatu je rozdělen na několik fází. Nejdříve dochází k disociaci (pouze u víceatomových plynů), kdy se jednotlivé atomy v molekule oddělí od sebe. K tomu dochází při teplotách kolem 5 000 – 10 000 K. Při teplotách 10 000 – 30 000 K dochází k ionizaci disociovaného plynu. Při ionizaci se oddělí elektrony z elektronového obalu atomů, vznikne tak ionizovaný plyn složený z elektronů a kladně nabitých iontů původního plynu. Celý tento proces je velice energeticky náročný a dochází k velké spotřebě tepla, proto se pro iniciaci využívá pilotního oblouku. Tento pomocný oblouk je zapálen mezi wolframovou elektrodou a měděnou tryskou hořáku. Tím se vytvoří dostatečně vodivé prostředí pro zapálení hlavního plazmového oblouku. [20]

Při kontaktu plazmového svazku se základním materiálem (o relativně nízké teplotě) dochází k rekombinaci, což je proces opačný k ionizaci a disociaci. Dochází k navrácení atomů a molekul do jejich původní podoby (všechny elektrony jsou

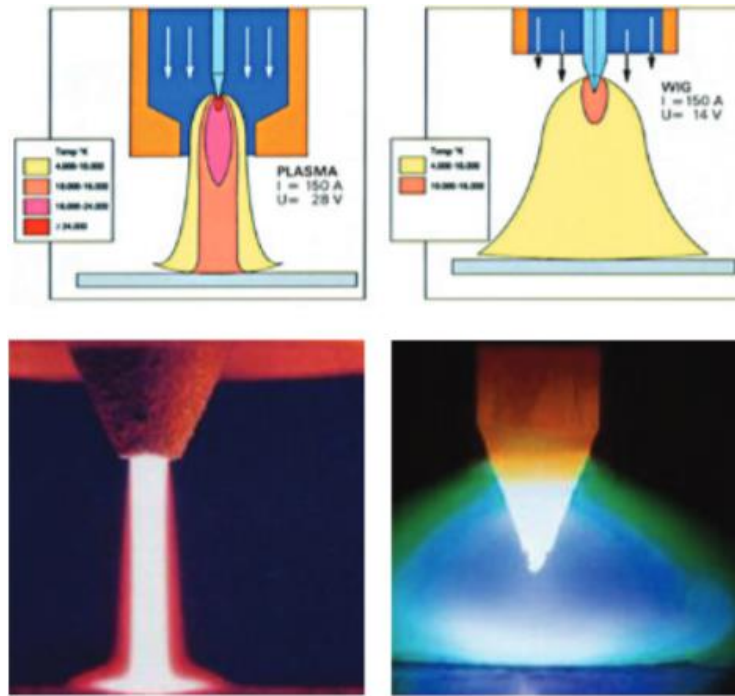
v elektronových obalech atomů a dvouatomové plyny opět tvoří molekuly). Při tomto procesu se uvolňuje velké množství energie a tím dochází k zahřívání základního materiálu. Zároveň díky velké rychlosti proudění plazmového plynu se využívá také jeho dynamického účinku. Při svařování plazmatem technologií keyhole, kdy se svařuje často i bez přídavného materiálu, je důležitá rovnováha mezi dynamickými silami plazmového oblouku a povrchovým napětím taveniny. Pokud by byl dynamický účinek silnější, došlo by k vyfouknutí taveniny ze spáry (toho se využívá při řezání plazmatem-PAC).

Princip fungování je pro všechny výše zmíněné technologie stejný, existují pouze určité modifikace. Mezi hlavní modifikace patří druh zapojené elektrických pólů (závislé a nezávislé). U závislého zapojení hoří elektrický oblouk mezi elektrodou hořáku (záporný pól-katoda) a základním materiálem (kladný pól-anoda). Toto zapojení se využívá při svařování, navařování a řezání elektricky vodivých materiálů. U nezávislého zapojení hoří elektrický oblouk mezi elektrodou hořáku (katoda) a jeho tryskou (anoda). Toto zapojení se používá pro žárové nástřiky a při řezání elektricky nevodivých materiálů, dochází při něm k velkému tepelnému zatížení hořáku. [19] [20] [21]

5.2.3 Svařovací parametry

Nejdůležitější z nastavovaných svařovacích parametrů je svařovací proud, který má vliv na teplotu a tlak plazmového oblouku. S rostoucím svařovacím proudem dochází k rozšiřování svaru a zvýšení penetrace základního materiálu. Nastavení svařovacího proudu se provádí podle tloušťky základního materiálu a svařovací rychlosti. Další parametr je velikost průtoku plazmového plynu, která musí narůstat s tloušťkou základního materiálu a rychlostí svařování. Svařovací rychlost většinou dosahuje hodnot do $0,3 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Kromě těchto parametrů je samozřejmě mnoho dalších vlivů, které ovlivňují svařovací proces (složení plynů a přídavného materiálu, napětí oblouku, konstrukce hořáku atd.). Všechny výše zmíněné parametry závisí na vlastnostech svařovaného materiálu a výrobci svařovacích zařízení mají většinou přednastaveny parametry podle zadaných vstupních hodnot tak, aby bylo dosaženo maximální efektivity a kvality svarů. [19] [20]

Konstrukce hořáku bývá často přímo navrhována pro konkrétní aplikace (svařování vnitřních ploch, svařování v úzkých místech atd.).



Obrázek 8: Porovnání oblouku PAW (vlevo) a TIG (vpravo). [20]

Podle velikosti svařovacího proudu se technologie dělí na mikroplazmové svařování (svařovací proud se pohybuje od desetin A po 20 A), středněplazmové svařování (svařovací proud 20-100 A) a svařování metodou keyhole (svařovací proud nad 100 A), malé tloušťky základního materiálu bez přídavného materiálu, vysoká teplota plazmového oblouku odpaří malý objem materiálu a v místě kontaktu vzniká paroplynový kanál, kolem je materiál nataven a díky povrchovému napětí taveniny dochází k uzavírání kanálu. [19] [21]

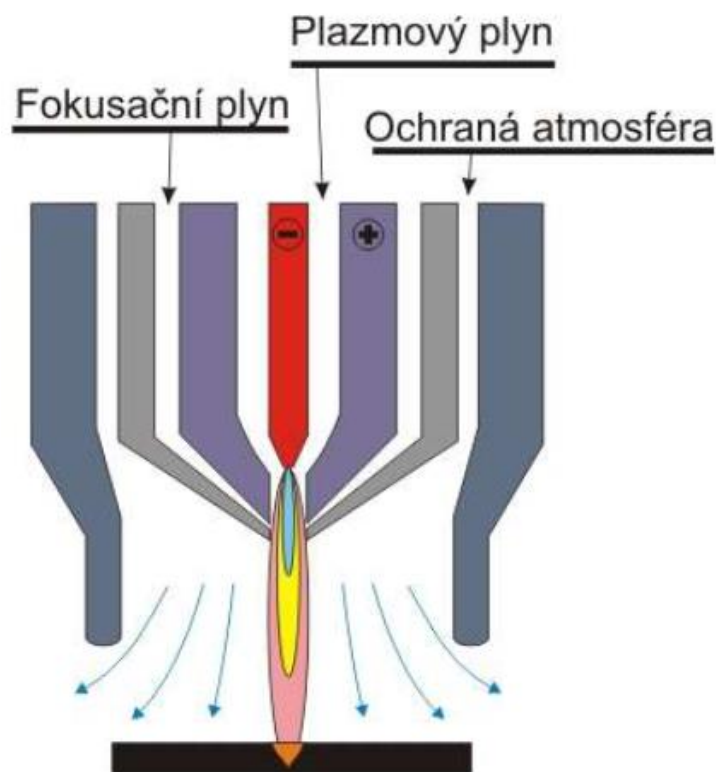
Oproti konvenčním technologiím svařování (MIG/MAG, TIG) přináší plazmové technologie několik výhod: vysoká rychlost svařování, menší tepelné ovlivnění základního materiálu (a tím pádem lepší mechanické vlastnosti svařenců), snížený výskyt vad ve svarech, možnost svařovat větší tloušťky základního materiálu, lepší reprodukovatelnost a lepší estetické vlastnosti svarů.

Většina materiálů běžně používaných ve strojírenství – od slitin hliníku až po korozivzdorné oceli, niklové a kobaltové slitiny a slitiny titanu – vykazuje dobrou svařitelnost plazmatem. Svařitelnost různých materiálů závisí (kromě materiálu samotného) na nastavených svařovacích parametrech, použitém zařízení a plynech. [19] [20] [21]

5.2.4 Plazmový hořák

Plazmový hořák vznikl úpravami z hořáku používaného pro TIG svařování. Používá také netavící se wolframovou elektrodu, na rozdíl od hořáku pro TIG má ale kovovou trysku chlazenou vodou, nebo plynem. Tryska má velice úzké hrdlo, které umožňuje maximální zúžení plazmového sloupce. Dále jsou v hořáku (stejně jako u TIG hořáku) kanály pro přívod ochranného plynu. Tyto kanály ústí mezi kovovou trysku a keramickou hubici hořáku. Kromě ochranného a plazmového plynu je v hořáku ještě kanál pro fokusační plyn, který usměrňuje a dále zužuje plazmový svazek. [20] [19]

V případě použití práškového přídavného materiálu obsahuje hořák ještě kanál pro jeho přívod (viz obrázek 10). Při použití přídavného materiálu v podobě drátu je drát přiváděn do plazmového oblouku externě, jako při svařování metodou TIG s přídavným materiálem.



Obrázek 9: Schéma svařovacího hořáku PAW-nezávislé zapojení. [19]

5.2.5 Používané plyny

Ochranné plyny se používají stejně jako při svařování metodami MIG/TIG – inertní plyny, převážně argon a helium a jejich směsi – v závislosti na svařovaném materiálu. Plazmový plyn se nejčastěji používá argon v kombinaci s příměsí dalších plynů. Argon se používá z důvodu nízkých nákladů a jeho nízké ionizační energie. V závislosti na aplikaci se ale používají i další plyny (dusík, vodík, helium atd.). Hlavní rozdíl je pak v maximální dosahované teplotě pro jednotlivé plazmové plyny (např. N_2 – 9 000 K a plazma stabilizované vodou – 35 000 K). [20] Použití argonu s příměsí helia do 30 % umožňuje použití nižšího svařovacího proudu, což vede ke snížení opotřebení hořáku a elektrody. Jako fokusační plyn se nejčastěji používá opět argon, díky jeho nízké ceně.

Každý z výše zmíněných plynů má svůj vlastní okruh a jejich průtok se liší v závislosti na ostatních svařovacích parametrech. Obecně lze ale říci, že největší průtok má ochranný plyn, potom fokusační a nejmenší plazmový. [20]

5.2.6 Technologie plazmového navařování

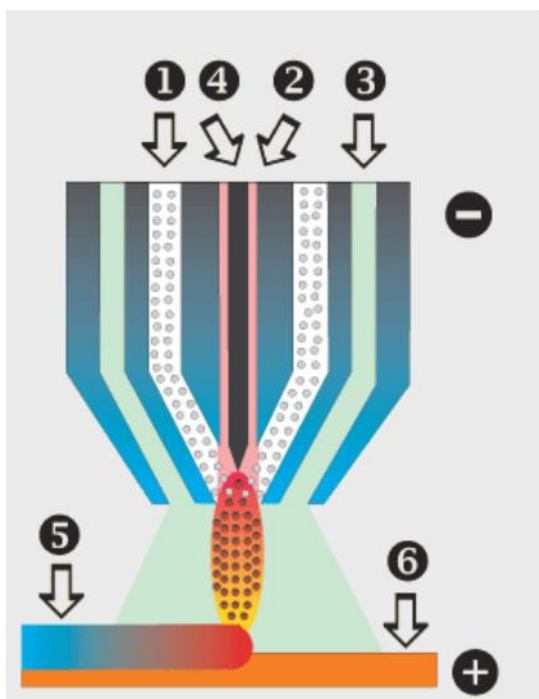
Tato technologie vznikla modifikací plazmového svařování v 60. letech 20. století. Jedná se o aditivní technologii, která se využívá převážně k vytváření plošných návarů. Trojrozměrné návary je také možné vytvářet, ale častěji se pro tyto účely využívají jiné technologie. Patří do skupiny technologií nazývané zkratkou DMD (=Direct Metal Deposition). Plazmové navařování je velice progresivní technologie a je využívána díky velké rychlosti depozice, které je dosahováno z důvodu vysoké hustoty energie. Oproti standardním metodám navařování (TIG, MIG/MAG atd.) je výhodou vysoká rychlost navařování, nižší vnesené teplo, menší stupeň promísení přídavného a základního materiálu a možnost použití více různých materiálů (včetně jejich kombinací – kompozitní povlaky). [15] [22] [23]

Parametr promísení je u navařování velice důležitý, protože ovlivňuje výsledné vlastnosti návaru. Při navařování plazmatem je dosahováno promísení do 10 %. Je to způsobeno možností nezávislého nastavení množství přídavného materiálu a vneseného tepla a zároveň vysokým součinitelem přenosu energie. Na stupeň promísení má vliv několik faktorů: rychlost proudění plazmového plynu, elektrický proud plazmového oblouku, množství přídavného materiálu a velikost jeho částic, vzdálenost hořáku od

základního materiálu atd. Elektrický proud a rychlost proudění plazmového plynu mají podobný efekt na stupeň promísení – s jejich narůstajícími hodnotami roste stupeň promísení. To je způsobeno nárůstem tepla vneseného do základního materiálu. Zvyšováním množství přídavného materiálu se stupeň promísení snižuje, protože se víc energie spotřebuje na roztavení přídavného materiálu. Zvětšování částic přídavného materiálu má opačný efekt – větší částice mají nižší efektivitu přenosu energie, takže je vyšší teplo vnesené do základního materiálu. S rostoucí vzdáleností hořáku od základního materiálu stupeň promísení klesá. Dále může mít na stupeň promísení vliv teplota přehřevu. [22] [23] [24]

Princip navařování plazmatem je stejný jako u plazmového svařování (popsáno v kapitole 4.2.2). Vysoce koncentrovaný paprsek plazmatu natavuje přídavný materiál, který může být ve formě drátu nebo prášku. Velkou výhodou této technologie je nezávislé nastavení množství přídavného materiálu a množství vneseného tepla. Díky tomu lze dosáhnout minimálního natavení a tepelného ovlivnění základního materiálu při vytvoření kompaktního návaru požadované výšky, který je dobře metalurgicky spojen se základním materiálem. Tloušťka návaru se běžně pohybuje v rozmezí 1-5 mm. [14]

Technologie plazmového navařování se nejčastěji využívá pro vytváření povlaků specifických vlastností (žáruvzdornost, otěruvzdornost, odolnost proti korozi atd.). Výhodou je, že umožňuje kombinaci různých materiálů základního dílu a povlaku, takže jako základ je možno použít například obyčejnou konstrukční ocel, na kterou se navaří vrstva korozivzdorné oceli. Tímto pak lze získat požadované vlastnosti (korozivzdornost) funkčního povrchu a zároveň je díl výrazně levnější, než kdyby byl celý z korozivzdorné oceli. Dalším příkladem je možnost navaření velice tvrdého, otěruvzdorného povlaku na měkčím základním materiálu, tak je možné získat houževnatou součást, která bude zároveň odolná proti abrazi. Je nutné dávat pozor na přilnavost povlaku k základnímu materiálu, u některých kombinací (např. ocelový základní materiál a titanový povlak) nedojde ke správnému metalurgickému spojení obou materiálů a povlak se pak při zatížení odloupne z povrchu základního materiálu. [20] [22] [23] [25]



1. Přídavný materiál - prášek
2. Plazmový plyn - argon
3. Ochranný plyn - dusík
4. Wolframová elektroda
5. Návar
6. Podklad

Obrázek 10: Schéma hořáku pro plazmové navařování s práškovým přídavným materiálem. [23]

Kvalita povlaků závisí na mnoha parametrech: proud a napětí plazmového oblouku, rychlost navařování, použité plyny a jejich průtok, množství přídavného materiálu, vzdálenost hořáku od základního materiálu a jeho naklopení a také konstrukce hořáku. Většina těchto parametrů má stejný vliv na kvalitu návaru, jako při svařování (viz kapitola 4.2.3). Konstrukce hořáku je velice důležitá hlavně při použití práškového přídavného materiálu, protože v ideálním případě je požadováno, aby přídavný materiál vstupoval do svazku plazmového oblouku v polovině vzdálenosti mezi tryskou hořáku a základním materiálem. Tak lze dosáhnout dostatečného natavení a přenosu přídavného materiálu a zároveň jeho dobrého spojení se základním materiálem. Tento parametr závisí na průtoku transportního plynu, při příliš vysokém průtoku dojde ke vstupu přídavného materiálu do plazmového oblouku blíže k základnímu materiálu. To pak způsobí, že některé částice přídavného materiálu nebudou uneseny svazkem plazmatu a dojde k jejich rozptýlení v okolní atmosféře (ztráty materiálu). [14] [25]

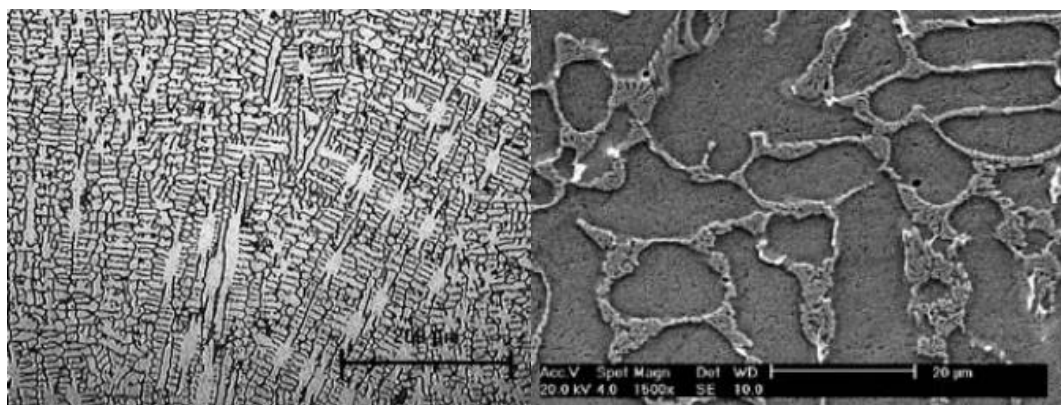
Důležitým faktorem, který ovlivňuje kvalitu návaru, je také kinetika pohybu hořáku. Standardně se navařuje v poloze PA (shora dolů). Navařované plochy jsou

ale často složitě tvarované (kulové, válcové, kuželové atd.), proto je nutné přesné řízení pohybu hořáku, aby byly zachovány konstantní podmínky.

5.2.7 Využití pulzního proudu při navařování

Pulzního svařovacího proudu se v dnešní době využívá u většiny svařovacích technologií, které využívají k tavení materiálu elektrický oblouk (MIG/MAG, TIG atd.). Důvodů je hned několik, tím hlavním je teplo vnesené do svařence. Vzhledem k nízkému základnímu proudu (desítky A) a úzkým pulzům (stovky A) je vnesené teplo nižší, ale materiál se natavuje stejně rychle. Zároveň je možné parametry pulzů (šířka, velikost a frekvence) mnohem lépe řídit celý svařovací proces. Například při svařování (navarování) dlouhých housenek se svařenec postupně zahřívá, takže řídicí systém upravuje parametry tak, aby se postupně snižovala intenzita pulzů a nedocházelo k přehřívání svarového kovu a zvýšenému tepelnému zatížení celé konstrukce. [22] [26]

Snížení vneseného tepla má zásadní vliv na mikrostrukturu svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Při vyšším tepelném zatížení dochází k hrubnutí zrna (viz obrázek 11) a u některých slitin může docházet k segregaci jednotlivých fází, což pak vede k nehomogenitě vlastností. Nižší vnesené teplo zvyšuje teplotní gradient mezi návarem a základním materiálem, díky tomu dochází k většímu podchlazení při tuhnutí taveniny. Tím pádem pak vzniká více krystalizačních zárodků a výsledná struktura má jemnější zrna. [22] [26]



Obrázek 11: Rozdíl v mikrostruktuře při použití pulzního (vlevo) a konstantního proudu (vpravo). [26]

U silně reaktivních materiálů se s teplotou zároveň zvyšuje afinita ke kyslíku a dalším škodlivým prvkům, které pak mohou způsobovat korozi svaru. Zároveň s vyšším vneseným teplem dochází k větším tepelným deformacím základního materiálu a s tím spojeným větším pnutím, které může v krajních případech způsobovat trhliny a praskliny.

U navařování je správné řízení procesu velice důležité, protože je nutné kvalitní spojení návaru se základním materiálem. S využitím pulzního proudu je možné dosáhnout menšího tepelného ovlivnění základního materiálu a zároveň kvalitního metalurgického spojení základního materiálu s návarem. [22] [26]

5.2.8 Navařování povlaků se speciálními vlastnostmi

Jak již bylo výše zmíněno, jedním z hlavních využití plazmového navařování je vytváření povlaků, které zlepšují různé vlastnosti základního materiálu. Velkou výhodou této technologie je možnost navařovat i materiály, které jsou konvenčními technologiemi (MIG/MAG, TIG) obtížně svařitelné. Zároveň díky minimálnímu ovlivnění základního materiálu nedochází ke změnám jeho vlastností. Návary jsou pak kvalitní s minimálním obsahem vad (při správně nastaveném procesu). Dobré metalurgické spojení přídatného a základního materiálu zaručuje výborné mechanické vlastnosti návaru. [14] [25]

Jako základní materiál je možno použít prakticky jakákoli kov. Hlavní podmínkou je přilnavost návaru (tj. metalurgická kompatibilita), která je v případě kombinací některých materiálů velice špatná, a proto pak takové kombinace nelze používat. Nejčastěji se jako základní materiály využívají různé druhy ocelí (uhlíkové i legované). Důvodem je jejich nízká cena, dobrá svařitelnost a plastické vlastnosti. Přídatné materiály jsou nejčastěji na bázi kobaltu, niklu nebo železa. Jako legury se používají různé materiály (Cr, V, W, C, Al, Si atd.) v závislosti na slitině a požadovaných vlastnostech.

Nejčastější využití technologie plazmového navařování je pro vytváření tvrdých abrazivzdorných povlaků. Materiály s takovými vlastnostmi jsou těžko obrobitelné a velice drahé, proto je výhodné vytvořit pouze povlak na základním materiálu, který má lepší zpracovatelnost a nižší cenu. Další možností použití je oprava součástí a jejich povrchů, ať už poškozených, nebo opotřebovaných. [22] [14] [25] [26]

Mezi povlaky se speciálními vlastnostmi je také možné zařadit kompozitní návary. Ať už jde o kombinaci různých, vzájemně nemísitelných kovů nebo kombinaci kovů a keramiky (cermety, MMC). Pro vytváření takových návarů musí být uzpůsobeno navařovací zařízení, které musí mít 2 zásobníky na přídavný materiál. Nutností je samozřejmě použití práškového přídavného materiálu. V hořáku dojde ke smísení obou materiálů. Výhodou je možnost nastavení přesného poměru jednotlivých složek. U kovových materiálů je také možné tímto způsobem legovat návar přesným množstvím konkrétního legujícího prvku. [25] [26]

Návary z cermetů se využívají čím dál častěji hned z několika důvodů. Keramické materiály jsou velice tvrdé, ale křehké. V kombinaci s kovovým pojivem je ovšem dosaženo větší houževnatosti při velice dobré odolnosti proti abrazi. Další výhodou je chemická stálost keramických materiálů, která zapříčiňuje dobrou korozní odolnost. Cermety se chovají podobně jako ostatní kompozitní materiály, u kterých je výrazně rozdílná teplota tavení matrice a výztuže. Nejde pouze o vlastnosti obou složek, ale o jejich vzájemnou interakci. Při vytváření návaru dochází k roztavení matrice, ale keramická výztuž zůstává v tuhé fázi. [22] [25]

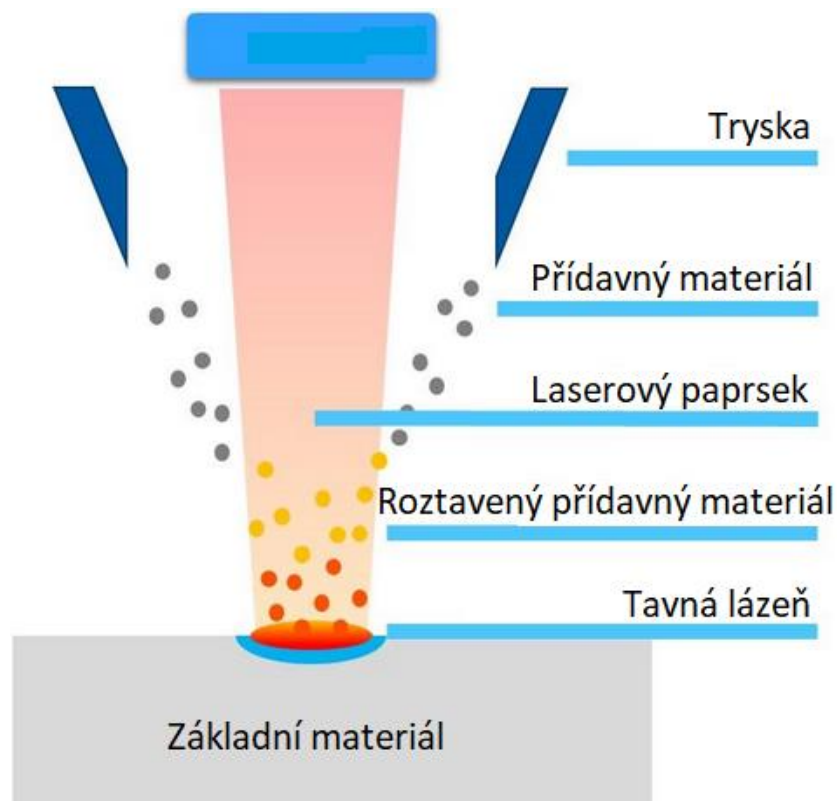
Další možností využití plazmatu je vytváření kompozitních vrstev, kdy je přídavný materiál pouze keramika. Princip je takový, že dojde k natavení základního materiálu a do tavné lázně jsou přidávány keramické částice. Po ztuhnutí získáváme díl, který prakticky nezměnil své rozměry, ale jeho povrch je kompozitní. Zvýší se tím tvrdost a odolnost proti abrazi součásti při zachování houževnatosti. Je tak možné upravovat vysoce namáhané plochy bez nutnosti úprav geometrie a dalšího obrábění (jak je tomu u klasického navařování). [14] [25] [26]

5.3 Navařování laserem

Technologií laserového navařování (v angličtině označované Laser Cladding) je možné vytvářet plošně i 3D návary. Jako přídavný materiál lze použít drát i prášek (viz obrázek 12). Nevýhodou použití práškového přídavného materiálu jsou výrazně větší ztráty. Návary dosahují velice vysoké kvality a výskyt vad je minimální. Laserový svazek má vysokou hustotu energie (vyšší než plazma – viz obrázek 5), takže dochází k minimálnímu ovlivnění základního materiálu. Oproti plazmatu má ale laser výrazně nižší součinitel přenosu energie do základního materiálu, takže se snižuje jeho účinnost.

Z tohoto důvodu se nedosahuje tak vysoké rychlosti navařování jako u plazmatu. Součinitel přenosu energie má také vliv na promísení, které dosahuje mírně vyšších hodnot (8 – 15 %) než u plazmového navařování. Dříve se využívaly lasery na bázi plynů (CO_2), ale dnes se nejčastěji používají pevnolátkové lasery (Nd:YAG). [16] [27] [28]

Podle šířky laserového svazku a jeho energie je možné technologii rozdělit na několik modifikací. Pro navařování velkých ploch a silných vrstev se využívá širokého svazku a vysoké energie, naopak pro navařování velice tenkých vrstev, které mohou nahrazovat povrchové úpravy (chromování atd.), se používá vysoké rychlosti navařování (vznikne menší tavná lázeň). Při standardním laserovém navařování dosahuje rychlost jednotek $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, oproti tomu při navařování tenkých vrstev je rychlost až přes $100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Tloušťka navařené vrstvy pak dosahuje hodnot desítek až stovek μm . [28]



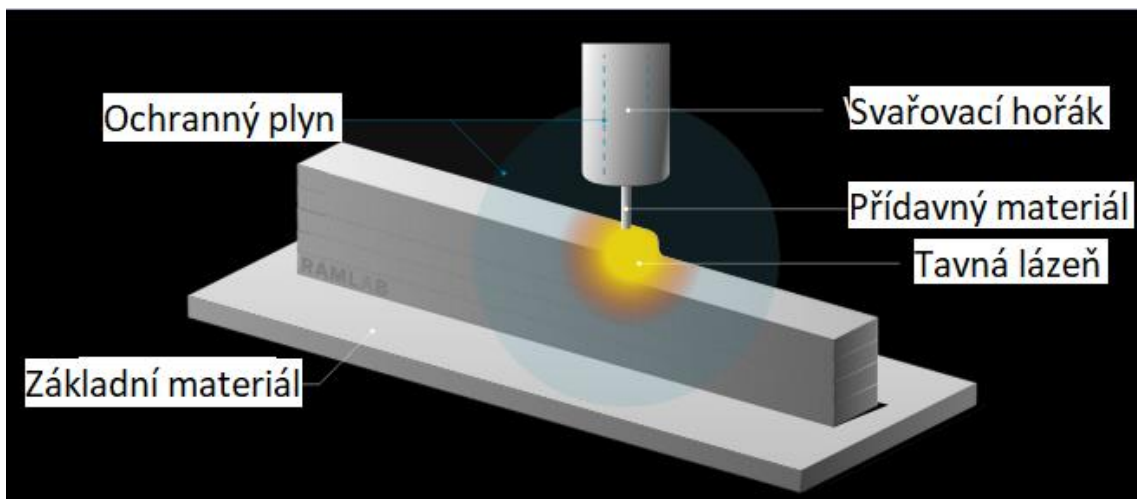
Obrázek 12: Schéma laserového navařování s použitím práškového přídavného materiálu. [27]

Výhodami jsou mimo jiné snadná automatizace, velice přesná modulace vneseného tepla pomocí výkonu laseru, vysoce kvalitní návary (až 99,99 % teoretické hustoty materiálu) a široká škála použitelných materiálů. [27]

Mezi nevýhody patří vysoké pořizovací náklady zařízení, vzhledem k rozměrům celé sestavy je obtížně přemístitelná a u materiálů s nízkou tepelnou vodivostí je náchylnost ke vzniku trhlin způsobená vysokou hustotou energie (v takovém případě je nutné sledování teploty tavné lázně a chladnoucího návaru). [27] [28]

5.4 MIG/MAG navařování

Původně byly touto technologií vytvářeny plošné návary, postupně ale došlo k nahrazení vhodnějšími technologiemi. Nevýhodou je vysoká hodnota promísení, která dosahuje hodnot až 40 %. Proto vytvořené plošné návary nedosahují takové kvality, jako při použití jiných technologií. Z výše uvedených důvodů se technologie MIG/MAG používá v současnosti převážně pro vytváření 3D návarů (viz obrázek 13). Tato technologie se nejčastěji označuje **WAAM** (z anglického **Wire and Arc Additive Manufacturing**). Jedná se o vysoce produktivní technologii (nanesení až 10 kg materiálu za hodinu). Největší výhodou této technologie (kromě produktivity) je použití konvenčních svařovacích zařízení používaných pro technologie svařování MIG/MAG, které se pouze připevní na manipulátor (nejčastěji robotické rameno). Díky tomu je pořizovací cena velice nízká ve srovnání s jinými technologiemi. Pro zajištění vysoké kvality návarů se připojují další senzory, které snímají teplotu (často se předepisuje teplota interpass). Pro dosažení co nejmenšího tepelného ovlivnění se využívá pulzního řízení elektrického proudu. Velice časté je i využití technologie CMT (Cold Metal Transfer), kdy je pomocí speciálního hořáku pohybováno přidavným drátem tak, že dochází ke zjednodušení odkapávání přidavného materiálu do svarové lázně i při nižších teplotách – hardwarevé řešení. Dále někteří výrobci využívají softwarové řešení snížení vneseného tepla do svařence – navařování modifikovanou vlnou (IAC, Cold Arc). U těchto technologií dochází k řízení velikosti pulzů svařovacího proudu. [15] [29] [30]



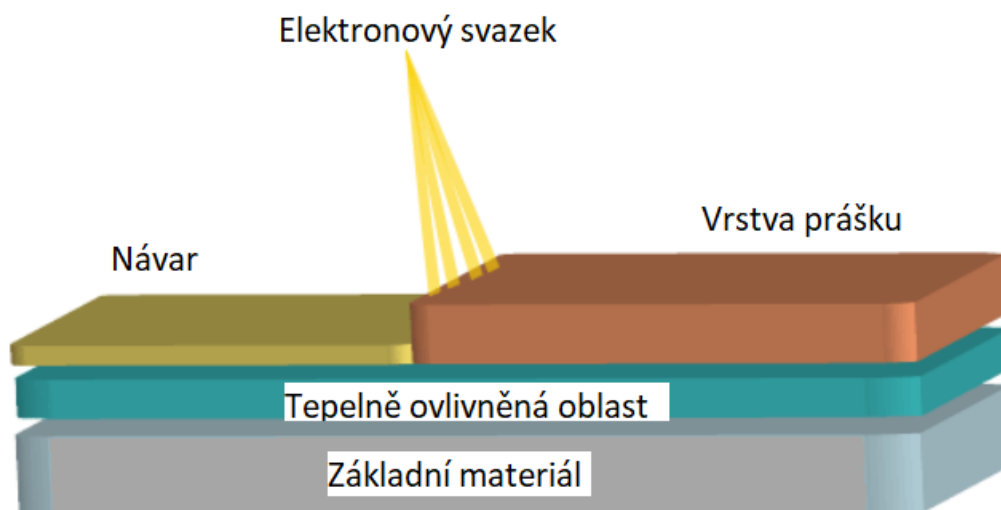
Obrázek 13: Schéma navařování metodou WAAM. [30]

Hlavní využití této technologie je při vytváření 3D návarů, kdy lze dosáhnout výrazné úspory materiálu oproti konvenčnímu obrábění (díly je stále nutné obrábět pro dosažení požadované přesnosti). Návary nedosahují takové kvality jako při použití technologie plazmového navařování. Použitelné materiály jsou všechny, které se vyrábí v podobě svařovacích drátů. [29]

5.5 Navařování elektronovým svazkem

Tato technologie (v angličtině nazývaná Electron Beam Cladding) se využívá pro vytváření plošných i trojrozměrných návarů. Ze všech technologií zmíněných v této práci má elektronový svazek největší hustotu energie (viz obrázek 6). Návary vytvořené touto technologií dosahují vysoké kvality a jsou prakticky bez vad. Vysoká kvalita návarů je dosažena díky dokonalé ochraně svarové lázně pomocí vakua. To ovšem přináší i nevýhodu v podobě velice vysoké ceny celého zařízení (vakuová pumpa, elektronové dělo, fokusační optika atd.). Promísení je nejvíce závislé na použitých materiálech a obecně dosahuje hodnot do 25 %. [31]

Existují dvě modifikace této technologie. V prvním případě se využívá přídavný materiál v podobě drátu, který je podáván pomocí externího podavače (jako u metody TIG). Rychlost navařování je potom omezena rychlostí podavače přídavného materiálu. Nevýhodou je, že lze používat pouze přídavné materiály, které se vyrábí v podobě svařovacího drátu. Zároveň tímto způsobem nelze kombinovat různé materiály a vytvářet kompozitní návary. [31] [32]



Obrázek 14: Schéma navařování elektronovým paprskem. [32]

Druhá možnost je pak tavení prášku, který je předem nanesen na základní materiál a s ním je vložen do pracovního prostoru (viz obrázek 14). Práškový přídavný materiál nelze používat stejným způsobem jako u laseru nebo plazmatu (dodávání prášku přímo do laserového paprsku nebo sloupce plazmatu), protože musí být unášen pomocí plynu. Částice prášku a unášecí plyn by pak rozptylovaly elektronový svazek a výrazně snižovaly jeho účinnost. [31] [32]

Velkou výhodou této technologie je dokonalá ochrana roztaveného kovu před vlivem okolního prostředí (oxidace, vznik nežádoucích sloučenin a fází). To předurčuje elektronové navařování k použití na vysoce reaktivní materiály (titan atd.). Mezi další výhody patří možnost přesně kontrolovat vnesenou energii v závislosti na požadovaných vlastnostech a tloušťce návaru. [32]

6 Přídavné materiály

Jak již bylo zmíněno v předchozím textu, při navařování výše zmíněnými technologiemi je možné používat přídavné materiály v podobě drátu nebo prášku. Každá možnost má jisté výhody i nevýhody.

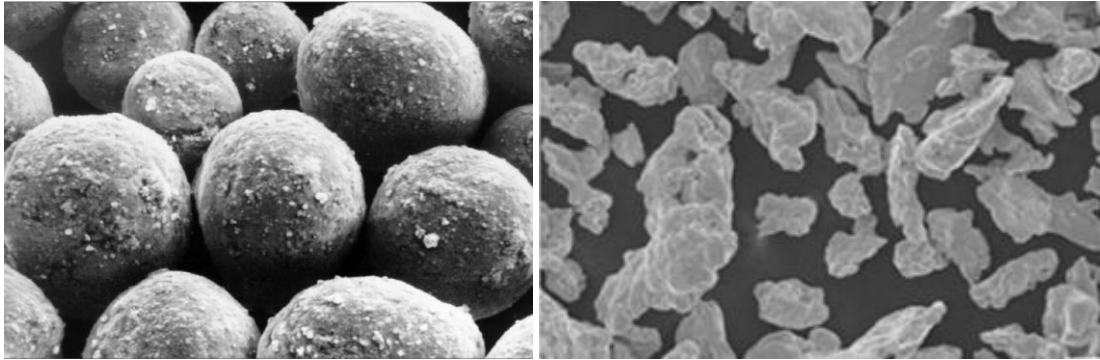
Co se týká přídavného materiálu v podobě drátu, tak jeho hlavní výhodou je cena, která je mnohonásobně nižší než cena práškového materiálu. Další výhodou je použití standardních svařovacích drátů a podavačů v kombinaci se základním plazmovým

hořákem. A v neposlední řadě je výhodou drátového přídavného materiálu také legislativa, protože se tato podoba přídavného materiálu používá již desítky let. Díky tomu existují normy na testování čistoty a kvality přídavných materiálů, takže je pak zaručena metalurgická čistota a přesné chemické složení návarů. To je především důležité v oblastech průmyslu, kde se nepřipouští žádné vady a nehomogenity v materiálech (hlavně letectví). [18] [23]

Díky nástupu práškových přídavných materiálů se ovšem otevřely nové možnosti. Problémem je zatím nezavedená legislativa pro testování kvality práškových materiálů (vyřešení tohoto problému je pouze otázkou času). V aplikacích, kde není kladen tak velký důraz na čistotu materiálů, dochází k výraznému rozvoji používání práškových materiálů. Jejich hlavní výhodou je možnost kombinovat různé materiály, které doposud nebylo možné kombinovat (kompozitní materiály, cermety atd.). Zároveň je možné přesně dávkovat množství jednotlivých složek za účelem dosažení konkrétního chemického složení návaru. Nevýhodou prášku je jeho cena, která je mnohanásobně vyšší než jakýkoli jiný polotovar. U reaktivních materiálů jako hliník a titan je nutné s prášky zacházet velice opatrně kvůli jejich vysoké reaktivitě (velký povrch), prášky mohou v důsledku nesprávného zacházení degradovat (oxidace), ale také existuje nebezpečí jejich výbuchu. Zároveň je nutné použít speciální navařovací hořák (viz obrázek 10). [33] [34] [35]

Pro různé technologie se využívají prášky s různým tvarem a velikostí částic. Prášky pro navařování plazmatem mají zpravidla částice o velikosti 50-200 μm . U menších částic by docházelo k jejich odpařování a ztrátám materiálu. Takto velké částice neproniknou do lidského těla póry v kůži, ale jejich inhalace stále může způsobit vážné zdravotní potíže. Proto je nutné dodržovat bezpečnostní předpisy a používat ochranné pomůcky při práci s práškovými materiály.

Volba přídavného materiálu závisí na mnoha faktorech. V některých případech je výhodnější použití prášku (např. u navařování kobaltových slitin, kdy je prášek dokonce levnější než drát nebo elektroda) a někdy naopak použití prášku nepřináší žádné výrazné výhody (např. u ocelí, kde je prášek dražší a jeho použití nijak výrazně nezlepšuje vlastnosti návaru). [23] [36]

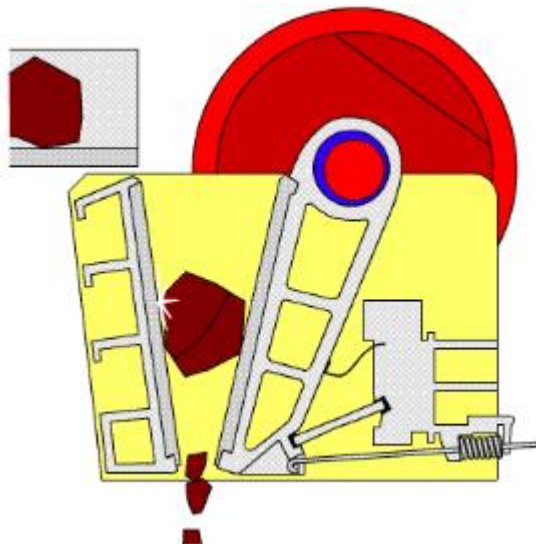


Obrázek 15: Kulovitý tvar částic (vlevo) a ostrohranné částice (vpravo). [33] [35]

6.1 Výroba práškového materiálu

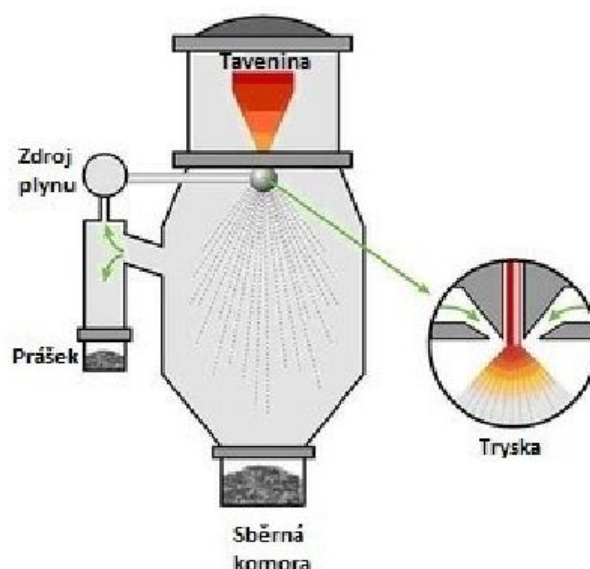
U práškových materiálů je kromě velikosti částic zásadní vlastností tvar částic. Různými způsoby výroby prášků je dosahováno různých tvarů částic (mechanické způsoby-nepravidelné tvary, fyzikální způsoby-oblé tvary, chemické a elektrochemické-dendritický tvar – viz obrázek 15). Ideální je kulovitý nebo elipsoidní tvar částic, z důvodu jejich lepšího přívodu hořákem do svarové lázně. Proto se nejčastěji využívají fyzikální způsoby výroby práškových materiálů. [14] [33] [35] [36]

V případě mechanických způsobů výroby prášků jde nejčastěji o různé drcení (viz obrázek 16) a mletí, kdy z větších částic se postupně získávají menší. Výhodou tohoto procesu je nižší nákladovost a méně náročná technologie.



Obrázek 16: Princip drcení prášků pomocí čelistového drtiče. [33]

Častěji se ale využívá fyzikálního způsobu výroby prášků, kdy je roztavený materiál rozstříkáván v proudu plynu (volba plynu závisí na vyráběném materiálu – nejčastěji argon, dusík atd.). Kapičky taveniny ztuhnou, než dopadnou na stěny nádoby a v podobě částic prášku potom padají do sběrné nádoby. Problém je, že každý materiál musí mít specificky nastavené parametry tohoto procesu (teplota taveniny a plynu, rychlost proudění plynu, vzájemný úhel rozstříkované taveniny a plynu), proto je tento proces velice náročný a drahý. Tento proces výroby prášků se nazývá atomizace plynem (viz obrázek 17). Kromě tohoto způsobu se ovšem využívá i mnoho dalších, např. atomizace odstředivou silou (tavenina je vystřikována na rotující těleso), ultrazvuková atomizace (kapičky taveniny se oddělují od povrchu pomocí vibrací), vakuová atomizace atd. [33] [34] [36]



Obrázek 17: Princip atomizace plynem. [33]

Před procesem atomizace je materiál velice často elektrostruskově přetavován. Materiál (nejčastěji v podobě tyče) je odtavován, jeho malé kapičky procházejí tekutou struskou, kde dochází k dezoxidaci a rafinaci taveniny. Vzhledem k tomu, že celý proces probíhá ve velice malém objemu taveniny, je výsledkem velice metalurgicky a chemicky čistý materiál s minimálním obsahem nežádoucích nečistot. Takto vyčištěná tavenina je pak přímo atomizována a práškový materiál je uskladněn ve speciálních kapslích, aby nedošlo k kontaminaci. [33] [35] [36]

Celý výše popsaný proces je velice náročný jak technologicky, tak energeticky, proto jsou práškové materiály výrazně dražší (alespoň většinou) než jiné polotovary.

7 Zkoušky vlastností návarů

Kovové a kompozitní návary se nejčastěji používají pro zlepšení odolnosti součástí proti opotřebení, korozi, ale také pro zlepšení kluzných vlastností (snížení koeficientu tření). Tomu také odpovídají zkoušky kvality, odolnosti a mechanických vlastností, které se nejčastěji provádějí. Základem jsou nedestruktivní zkoušky a pro podrobnější informace o vlastnostech a kvalitě návaru se pak provádějí různé destruktivní zkoušky.

7.1 Nedestruktivní zkoušky

Nedestruktivní zkoušky se používají nejčastěji pro zjištění povrchových vad. Pomocí ultrazvuku a zkoušky vířivými proudy je možné indikovat i vnitřní vady.

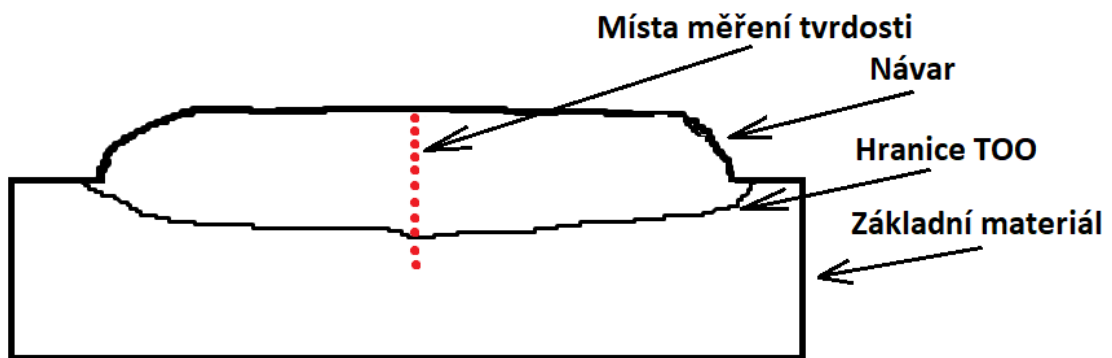
Nejjednodušší nedestruktivní zkouškou je vizuální kontrola podléhající normě *EN ISO 17637 – Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů - princip zkoušky, kvalifikace personálu, dokumentace, pomůcky pro VT*. Může se provádět přímo (bez použití snímacího zařízení), nebo nepřímo (pomocí různých kamerových systémů – používá se pro špatně dostupná místa). Provádí se na všech součástech a zjišťuje se dodržení požadovaných rozměrů, výskyt studených spojů a prasklin ústících na povrch návaru. Další často používanou zkouškou je kapilární zkouška, dle normy *ČSN EN ISO 3452-1 Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení kapilární metodou - Část 1: Obecné zásady*. Touto zkouškou se zjišťuje nejčastěji výskyt prasklin (případně dalších vad necelistvosti) ústících na povrch návaru. V případě návarů se nejčastěji kontrolují začátky, konce a případně okraje návaru, kde je největší pravděpodobnost výskytu vad. [37]

Pro indikaci vnitřních vad (nejčastěji trhliny a póry) je možné využít ultrazvuk a vířivé proudy. V případě návarů se tyto zkoušky ale nevyužívají příliš často, protože je pro jejich provedení potřeba hladký povrch, kterého se u návarů dosahuje až po obrobení.

7.2 Destruktivní zkoušky

Tyto zkoušky se provádí nejčastěji za účelem zjištění mechanických vlastností návarů, jejich odolnosti proti korozi a opotřebení. Během samotné výroby nejsou tak důležité jako ve fázi vývoje a optimalizace technologie.

Základní mechanickou vlastností návarů je jejich tvrdost, která určuje odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Nejčastěji používaná metoda měření tvrdosti návarů je podle Vickerse (dle normy ČSN EN ISO 6507-1). Základní vyhodnocení je průběh tvrdosti od povrchu návaru do hloubky směrem k základnímu materiálu (viz obrázek 18) a dále je důležité vyhodnocení tvrdosti povrchu návaru po přebroušení (určuje vlastnosti při používání součásti). [38]

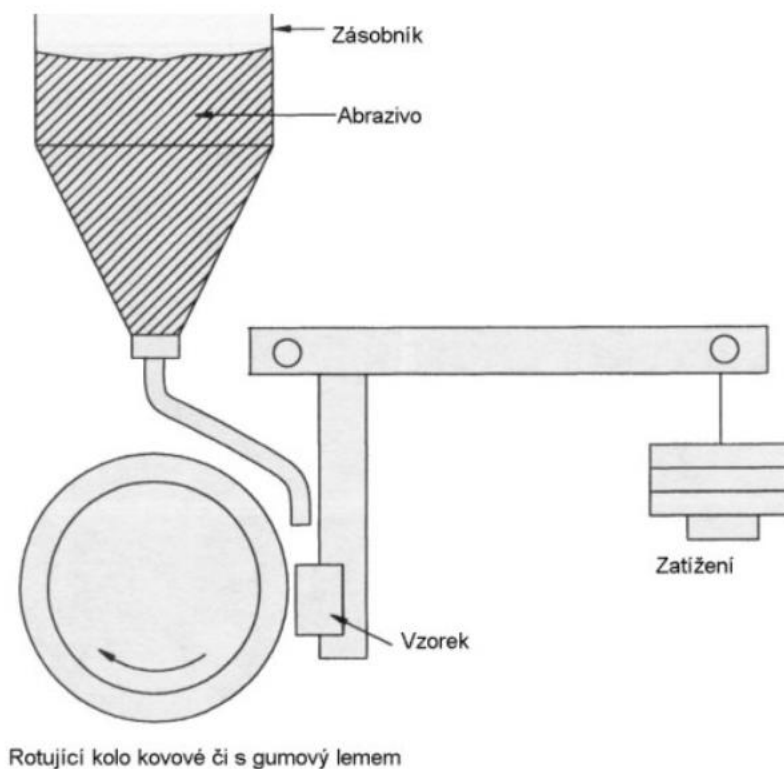


Obrázek 18: Schéma měření tvrdosti návaru.

Pro důkladné zkoumání vlastností a možnost predikovat chování návarů je důležitá znalost makrostruktury a mikrostruktury. Ty se zkoumají nejčastěji pomocí světelných mikroskopů na metalografických výbrusech vytvořených ze vzorků. Pro podrobnější informace o struktuře návarů je možné použít i skenovací elektronový mikroskop, na kterém lze mimo jiné i zjišťovat chemické složení vzorků. To je výhodné pro zjištění přítomnosti a rozložení různých částic (karbidy, intermetalické částice, keramické plnivo), které mohou výrazně ovlivňovat vlastnosti návaru. [38]

U korozivzdorných návarů se provádí korozní zkoušky, kdy se materiál vystaví určitému prostředí a sleduje se jeho úbytek za určitý čas. Případně je možné sledovat vliv určitého prostředí působícího na materiál. Tyto zkoušky bývají velice časové náročné, mohou trvat řádově až roky (častěji spíše měsíce).

Další velice důležitou zkouškou, pomocí které lze velice přesně zjistit odolnost návaru proti abrazi, je abrazivní zkouška (ČSN EN ISO 28080 (420848) *Tvrdokovy-Abrazivní zkoušky tvrdokovů*). Princip této zkoušky je přitlačení vzorku definovanou silou na otáčející se pryžový válec, kde se mezi vzorek a válec sype písek nebo jiné abrazivo. Po dané době (většinou kolem 1 hodiny) se pak zkoumá velikost a charakter vzniklého opotřebení. Velikost opotřebení se nejčastěji určuje pomocí hmotnostního nebo objemového úbytku materiálu. U součástí pracujících za zvýšených teplot je pak možné provádět různé zkoušky opotřebení za zvýšených teplot. Takové zkoušky se často upravují tak, aby jejich zatížení odpovídalo zatížení jako během následného používání součásti. [39]



Obrázek 19: Schéma provedení abrazivní zkoušky. [39]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

8 Použité přístroje a zařízení

V této kapitole jsou popsány přístroje, zařízení a postupy, které byly použity během zpracování experimentální části práce.

8.1 Navařování vzorků

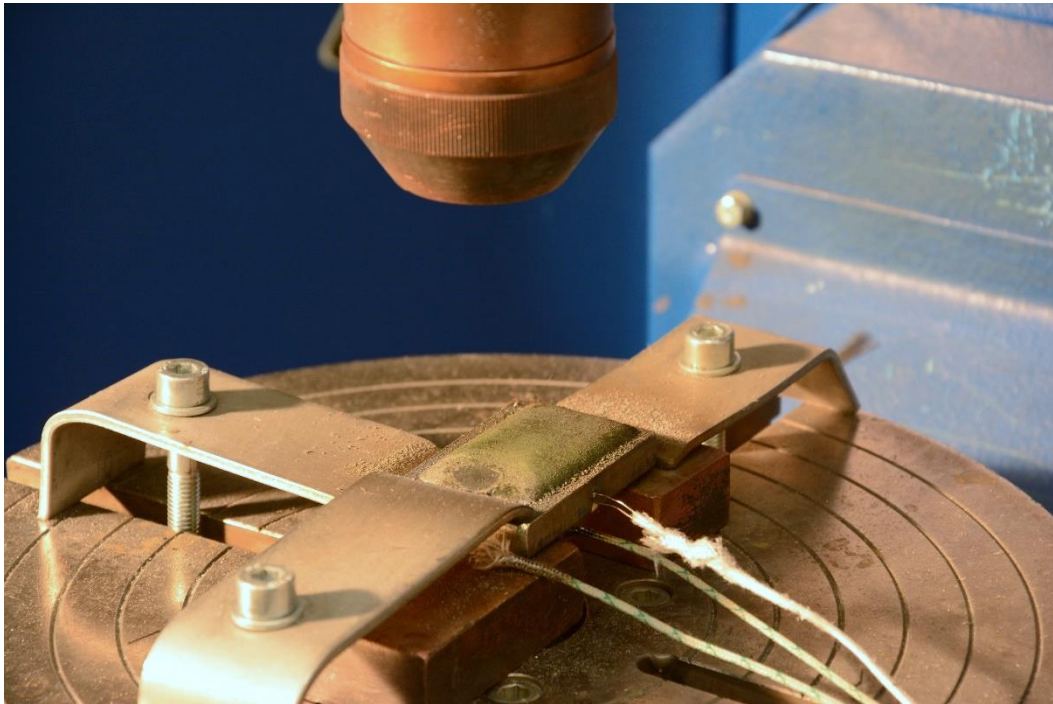
Vzorky byly navařeny na automatu PPC 250 R 6 (KSK, s.r.o., Česká Třebová – viz obrázek 20) technologií PTA (přenesený oblouk) s využitím pulzního proudu. Během navařování byla snímána teplota ve třech místech vzorku (viz obrázek 23) pomocí termočlánků a veškerá data byla zaznamenávána pomocí měřící ústředny Almemo 5690-2 (viz obrázek 22).



Obrázek 20: Plazmový navařovací automat PPC 250 R 6 (KSK, s.r.o.).

Navařovací parametry (proud, rychlosti posuvů atd.) byly upravovány pro každou variantu z důvodu rozdílných vlastností obou práškových materiálů. Vzdálenost hořáku od vzorku byla použita pro všechny vzorky stejná a to 12 mm. Jako plazmový a podávací plyn byl použit Ar + 30 % He, jako ochranný plyn byl použit Ar 4.8. Hořák je chlazený destilovanou vodou.

Při navařování byly vzorky uloženy na dvou měděných blocích (viz obrázek 21) z důvodu lepšího odvodu tepla. Pro navařování větších vzorků by bylo ideální použití chlazeného stolu s vnitřními chladícími kanály. Po navaření byly vzorky ponechány na vzduchu do poklesu teploty pod 300 °C a poté dochládaly v zásypu tavidla. Před navařováním byly podložky očištěny kartáčem z korozivzdorné oceli a následně odmaštěny technickým lihem.



Obrázek 21: Uchycení vzorku během navařování.

Jako základní materiál byly použity destičky z austenitické korozivzdorné oceli X5CrNi18-10 (AISI 304 – chemické složení viz tabulka 2) o rozměrech 60x40x10 mm řezané na pásové pile z pásu válcovaného za tepla. Pro srovnání vlastností návarů byly navařeny vzorky se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe® (viz kapitola 8.1.3) a následně s 15 %

a 30 % B₄C. Uvedená % udávají hmotnostní průtok jednotlivých prášků přídavného materiálu. Skutečný obsah B₄C ve vzorcích je popsán v kapitole 9.2.1.

Tabulka 2: Chemické složení oceli X5CrNi18-10 [40]

Prvek	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	N	Fe
Obsah [hm. %]	Max. 0,07	17,5- 19,5	8- 10,5	1	2	Max. 0,05	Max. 0,03	Max. 0,11	Zbytek

8.1.1 Navařovací zařízení

Během experimentu byl pro navaření zkušebních vzorků použit navařovací automat PPC 250 R 6 (viz obrázek 20) od českého výrobce KSK, s.r.o. Česká Třebová. Jedná se o plazmový navařovací automat určený pro navařování rotačních součástí (armatury, ventily, středící kroužky, závěrové hlavy sklářských forem apod.) technologií PTA s použitím přídavného materiálu v podobě prášku. Celý systém má šest řízených os (hořák – X, Y, Z a N; stůl – C, R). Zařízení umožňuje programování drah v ručním režimu, nebo možnost výběru předprogramovaných cyklů. Další parametry zařízení jsou uvedeny v tabulce 3. [41]

Tabulka 3: Parametry navařovacího automatu PPC 250 R6

Parametr	Hodnota
Maximální proud [A]	250
Maximální frekvence pulzů [Hz]	200
Průměr stolu [mm]	300
Maximální nosnost [kg]	70
Rozměry zařízení [mm]	1770x1700x2185
Celková hmotnost [kg]	1100

Společnost KSK, s.r.o. Česká Třebová se zabývá zakázkovou výrobou speciálních a jednoúčelových strojů a zařízení (svařování a navařování). Kromě výroby a montáže samotných zařízení nabízí také vývoj potřebné technologie a následné zaškolení obsluhy stroje. Samozřejmostí je pak dodávání přídavných materiálů a různého příslušenství (filtry apod.). [41]

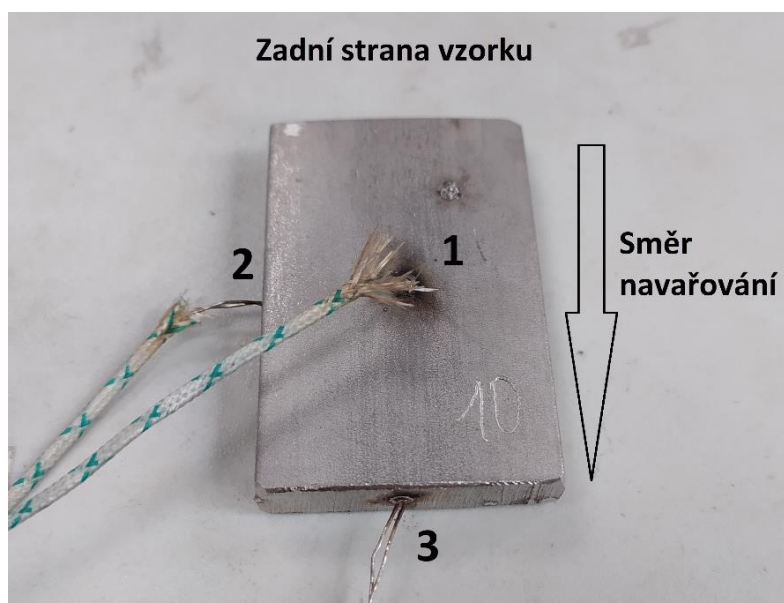
8.1.2 Snímání teploty

Teplota v různých místech vzorku byla snímána pomocí soustavy 3 termočlánků (umístění na vzorku viz obrázek 23). Výstupy z termočlánků pak byly zaznamenávány pomocí univerzální měřicí ústředny Almemo 5690-2 (viz obrázek 22). Zaznamenaná data se ukládají na paměťovou kartu, nebo je ústřednu možné připojit přímo k počítači. [42]



Obrázek 22: Univerzální měřicí ústředna Almemo 5690-2. [42]

Ústředna Almemo 5690-2 má 20 možných vstupů a nastavení připojených snímačů lze provádět ručně, nebo pomocí softwaru AMR-Control. Maximální frekvence záznamu je 100 Hz. [42]



Obrázek 23: Umístění termočlánků na vzorku.

8.1.3 Použitý přídavný materiál

Pro navařování byl použit přídavný materiál Nibasit 625 – P/LFe[®] (chemické složení viz tabulka 4) je od výrobce Deutsche Edelstahlwerke (DEW, Německo) ve formě prášku. Velikost částic prášku 63-200 μm, výrobní šarže 258042 (viz příloha 1). Tento konkrétní práškový materiál je vyráběn atomizací, takže částice mají kulovitý tvar.

Tabulka 4: Chemické složení prášku Nibasit 625 – P/LFe[®].

Prvek	Cr	Mo	Fe	Nb	Si	Mn	Co	C	Ni
Obsah [hm. %]	20,9	8,9	0,5	3,2	0,5	0,2	Max. 0,1	Max. 0,03	Zbytek

8.1.4 Vzorky se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe[®]

Navařovací parametry použité při navařování těchto vzorků jsou uvedeny v tabulce 5. Parametry byly upravovány v průběhu experimentu pro dosažení lepší kvality návarů.

Tabulka 5: Parametry použité při navařování vzorků se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe[®].

Vzorek	Proud [A] horní/dolní	Lineární posuv [mm*s ⁻¹]	Posuv rozkyvu [mm*s ⁻¹]	Šířka rozkyvu [mm]	Hmotnostní průtok PM [g*min ⁻¹]
1	120/50	0,4	22,4	28	18,17
2	110/45	0,38	22,4	28	18,17

8.1.5 Vzorky s 15 % B₄C

Při navařování kompozitních návarů vzniká řada problémů způsobených nejen rozdílnými vlastnostmi jednotlivých materiálů, ale také práškových materiálů. Práškový B₄C je vyráběn drcením, takže jeho částice mají nepravidelný tvar s ostrými hranami, zatímco částice Nibasitu[®] mají kulovitý tvar. Tvar částic B₄C způsobuje nižší tekutost prášku a způsobuje problémy při mísení s práškem Nibasitu[®].

Aby bylo možné dosáhnout požadovaného efektu (zvýšení tvrdosti a abrazivzdornosti návaru), musí být docíleno rovnoměrného rozložení částic B₄C v matici Nibasitu[®]. Kvůli výrazně rozdílné hustotě obou materiálů (hustota B₄C je 2,52

$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a hustota Nibasitu 625 – P/LFe[®] je $8,44 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) dochází k segregaci částic B₄C u povrchu návaru. Při vyšších teplotách zároveň dochází k rozkladu B₄C na bor a uhlík a jejich slučování s prvky matrice Nibasitu[®]. Z těchto důvodů je ideální udržovat minimální vnesené teplo a vysokou rychlost navařování. To ovšem způsobí vyšší viskozitu lázně a horší smáčení základního materiálu, které povede ke vzniku studených spojů. Proto je nutné nalézt kompromis mezi výše zmíněnými požadavky.

Tabulka 6: Parametry použité při navařování vzorků s 15 % B₄C.

Vzorek	Proud [A] horní/dolní	Lineární posuv [mm*s ⁻¹]	Posuv rozkyvu [mm*s ⁻¹]	Šířka rozkyvu [mm]	Hmotnostní průtok PM [g*min ⁻¹]
4	120/50	0,38	22,4	28	18,17
5	120/50	0,38	22,4	28	18,17

8.1.6 Vzorky s 30 % B₄C

Oproti předchozím vzorkům, musely být upraveny navařovací parametry (viz tabulka 7) z důvodu problému vznikajících během navařování (viz kapitola 9.1.3).

Tabulka 7: Parametry použité při navařování vzorků s 30 % B₄C.

Vzorek	Proud [A] horní/dolní	Lineární posuv [mm*s ⁻¹]	Posuv rozkyvu [mm*s ⁻¹]	Šířka rozkyvu [mm]	Hmotnostní průtok PM [g*min ⁻¹]
7	120/50	0,58	22,4	28	20,64
8	120/50	0,58	22,4	28	20,64

8.2 Struktura návarů

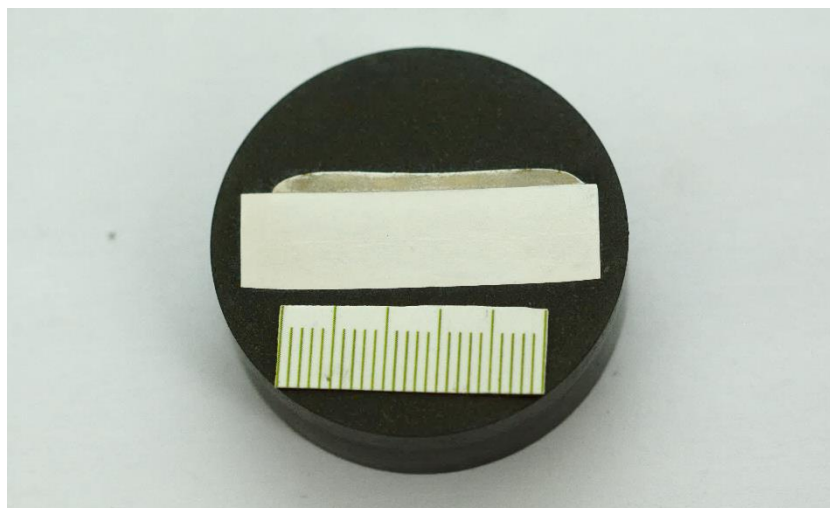
Pro zkoumání struktury návarů byl použit mikroskop Neophot 21 od společnosti Zeiss (viz obrázek 24) využívající převrácený horní osvit. Pro zkoumání makrostruktury bylo použito zvětšení 12,5x a pro zkoumání mikrostruktury se zvětšení pohybovalo v rozmezí 125x – 1000x.

V rámci vyhodnocení makrostruktury návarů byla pomocí softwaru ImageJ měřena výška návarů a podíl nerozpuštěných částic B₄C v kompozitních návarech.



Obrázek 24: Mikroskop Zeiss Neophot 21.

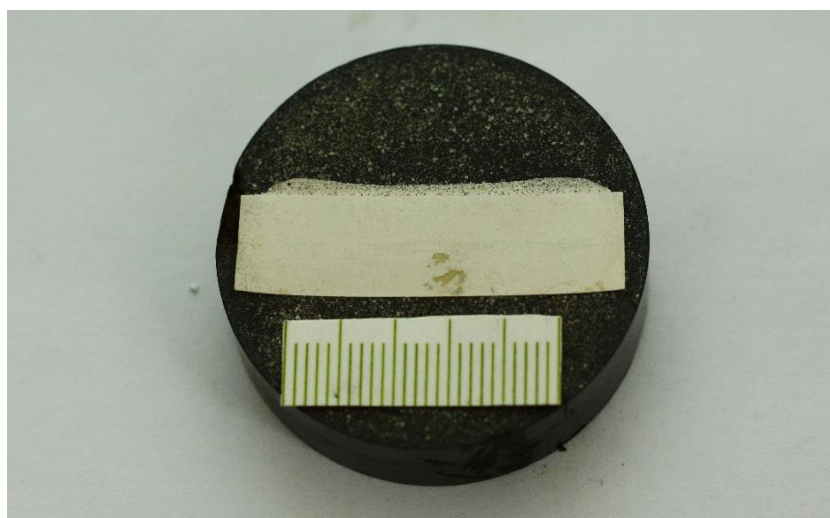
Pozorování struktury návarů probíhalo na metalografických výbrusech vzorků (viz obrázky 25-27), které byly vyříznuty ze zkušebních návarů na metalografické brusce od společnosti Struers (použitý kotouč 66A25). Vzorky byly následně zalisovány do vodivé hmoty Struers ConduFast. Vodivá hmota byla použita z důvodu následného zkoumání vzorků na elektronovém mikroskopu. Dále byly vzorky broušeny a leštěny na metalografické brusce/leštičce Buehler Beta vybavené automatickou přítlačnou hlavicí. Pro zvýraznění mikrostruktury byly vzorky následně chemicky leptány pomocí leptadla na niklové superslitiny (směs kyseliny octové, HCl a HNO₃). Leptání vzorku se 100 % IN625 bylo problematické z důvodu vysoké chemické odolnosti této slitiny a návar se nepodařilo naleptat ani elektrolyticky. V tomto případě jde ale pouze o srovnávací vzorek, a proto není jeho mikrostruktura důležitá.



Obrázek 25: Metalografický výbrus návaru (vzorek 1).



Obrázek 26: Metalografický výbrus návaru (vzorek 5).

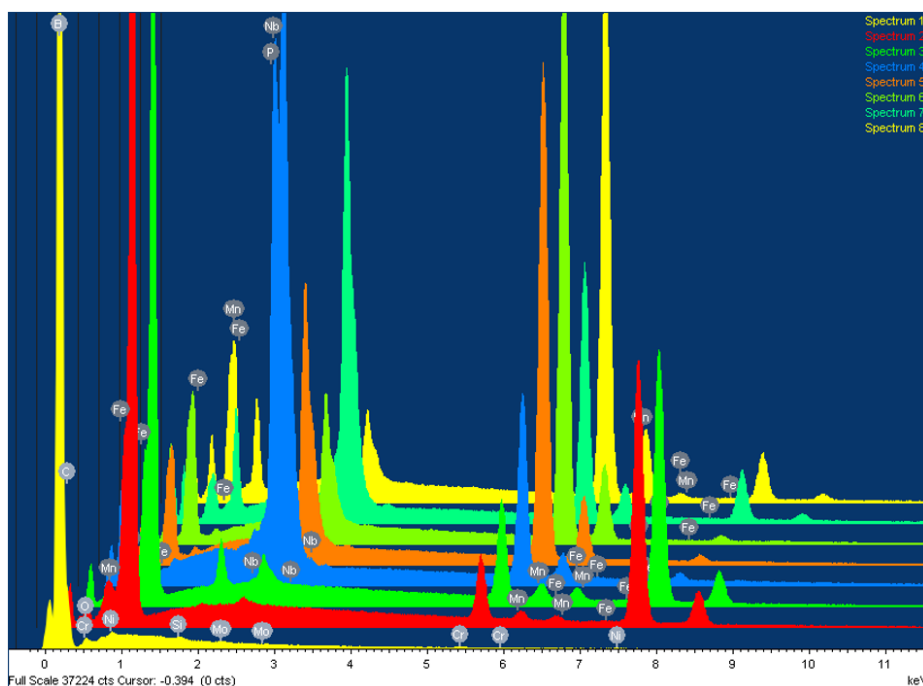


Obrázek 27: Metalografický výbrus návaru (vzorek 7).

8.2.1 SEM

Mikrostruktura (zároveň s chemickým složením – viz kapitola 9.3) návarů byla také zkoumána na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM). Použitý mikroskop je od společnosti Jeol (JSM-7600F). Výhodou SEM oproti světelnému mikroskopu je lepší rozlišení jednotlivých částic a precipitátů podle jejich chemického složení. Prvky s nižším atomovým číslem (např. C, B, O atd.) vyzářují elektrony a charakteristické záření o nižší energii, a proto se na snímcích zobrazují tmavší barvou. Naopak prvky s vyšším atomovým číslem (např. Nb, Sn, Pt atd.) jsou pak na snímcích světlejší. Proto je SEM analýza ideální pro zkoumání cizích částic v základní matici.

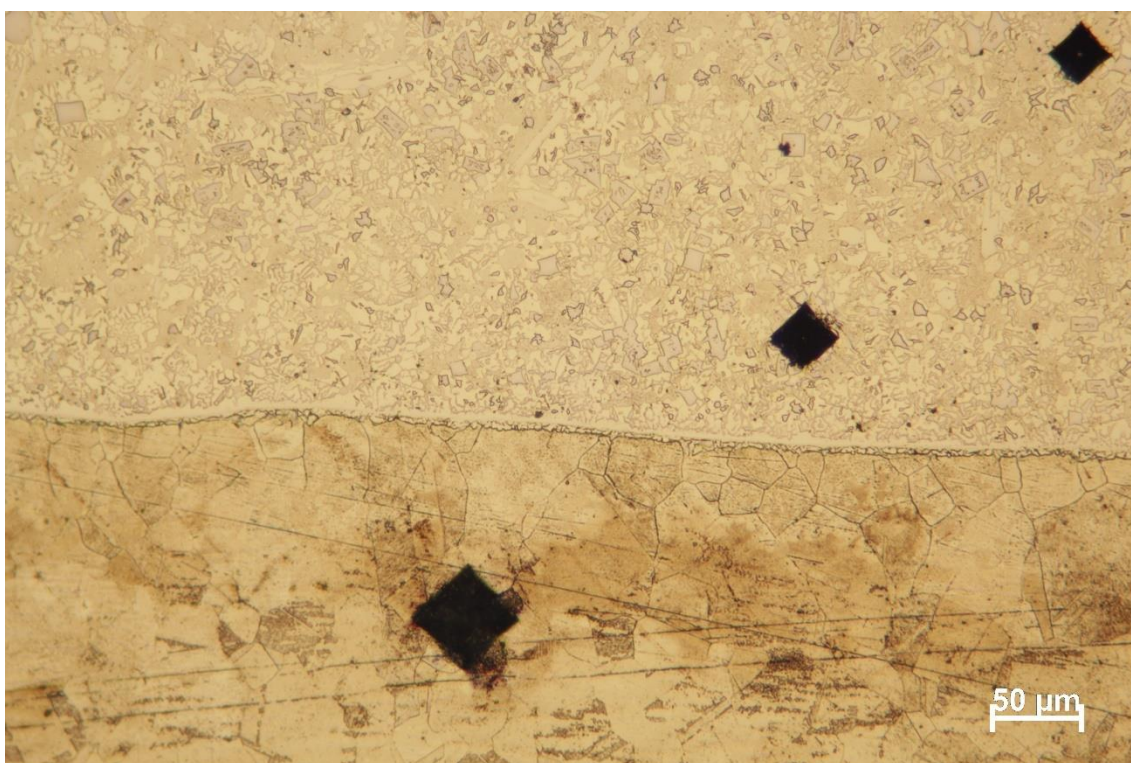
V rámci pozorování na elektronovém mikroskopu bylo také zkoumáno chemické složení vzorků. Pro zkoumání chemického složení byla využita metoda SEM EDS (Energy-dispersive X-Ray spectroscopy). Princip této metody je takový, že snímací zařízení zaznamenává charakteristické rentgenové záření, které je vyzářeno ze vzorku. Toto charakteristické záření má specifickou hodnotu energie pro každý prvek v periodické tabulce (viz obrázek 28) a podle toho pak software vyhodnocuje obsah jednotlivých prvků ve vzorku. Nevýhodou této metody je méně přesné zaznamenávání prvků s nižším atomovým číslem (v případě této práce by mohlo docházet k problémům s C a B).



Obrázek 28: Příklad záznamu z EDS analýzy s vyznačenými píky jednotlivých prvků.

8.3 Měření tvrdosti

Tvrdot návarů byla měřena na tvrdoměru od společnosti Buehler (IndetaMET 1104). Vyhodnocení proběhlo metodou podle Vickerse, konkrétně HV1 s dobou zatížení 10 s. Měření probíhalo na metalografických výbrusech návarů před leptáním (viz obrázky 25-27). Tvrdot byla měřena ještě před leptáním vzorků (vyleštěné vzorky) z důvodu lepší viditelnosti vtisků po indentoru (viz obrázek 29 – již naleptaný vzorek) pro dosažení přesnějších výsledků.



Obrázek 29: Snímek ze světelného mikroskopu s viditelnými vtisky po měření tvrdosti.

8.4 Abrazivní zkouška

Pro lepší představu o abrazivzdornosti návarů byla provedena zkouška odolnosti proti abrazivnímu opotřebení na přístroji s pryžovým kotoučem podle normy *ASTM G65: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*.

Použité zkušební zařízení bylo vyrobeno v rámci diplomové práce kolegy Ing. Tomáše Panáčka (*Studium degradačních procesů na návarech při interakci s tvrdými částicemi*). [43] Princip zkoušky je takový, že se vzorek upne do držáku a je definovanou silou přitlačován k pryžovému kolu. Kolo se pak otáčí a mezi něj a vzorek se sype abrazivo

ze zásobníku. Použité abrazivo byl křemenný písek s velikostí částic 0,3 mm, ostatní parametry zkoušky jsou uvedeny v tabulce 8. [43]

U všech zkoušených vzorků (i u etalonů) byla zaznamenána jejich hmotnost před zkouškou a po ní. Hmotnost byla zaznamenávána s přesností na tisíce gramů pomocí digitálních vah Sartorius PCB2000. Výsledkem zkoušky je pak hmotnostní úbytek jednotlivých vzorků.

Tabulka 8: Parametry abrazivní zkoušky. [43]

Parametr	Hodnota
Průměr kotouče [mm]	240
Obvodová rychlost [$m \cdot s^{-1}$]	2,68
Přítlačná síla [N]	130
Průtok abraziva [$g \cdot min^{-1}$]	310
Doba zkoušky [min:s]	6:13
Ujetá vzdálenost [m]	1000

Dalším výstupem z této zkoušky je objemový úbytek materiálu měřený na optickém 3D profilometru VR-6000 od společnosti Keyence. V rámci tohoto měření byla také zaznamenána maximální hloubka opotřebované stopy. Ostatní měřené parametry jsou zaznamenány ve výstupních protokolech z měření (viz příloha 5). Pomocí tohoto přístroje byly také pořízeny snímky opotřebovaných ploch pro srovnání opotřebování jednotlivých vzorků (viz obrázky 67-69).

9 Výsledky experimentu a diskuze

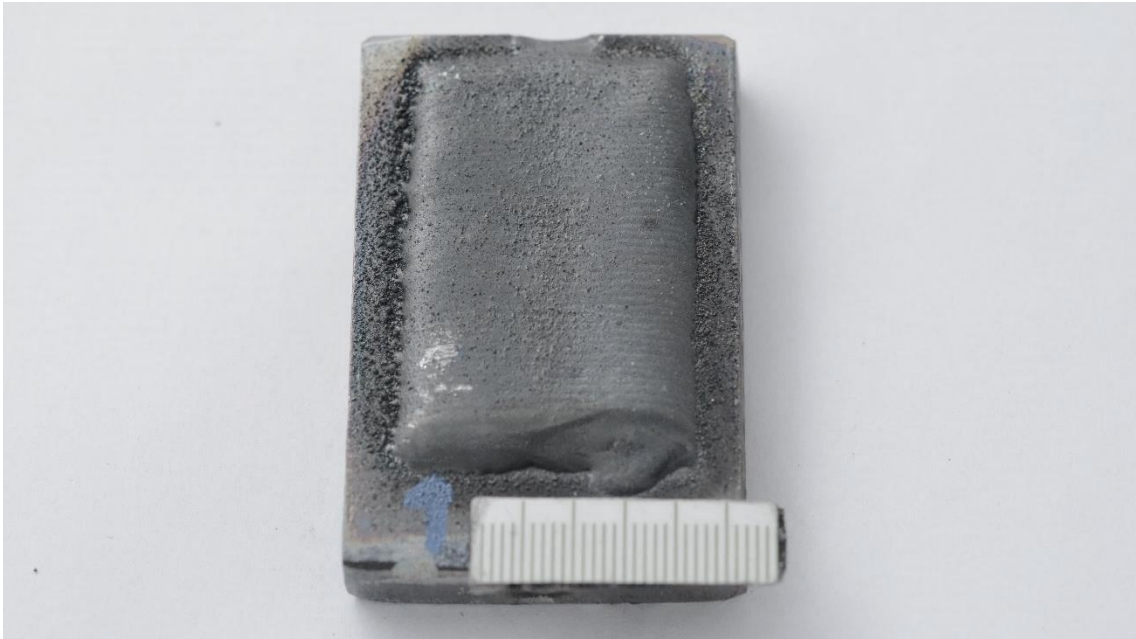
Tato kapitola popisuje veškeré provedené experimenty a zkoušky, jejich průběhy a zjištěné výsledky.

9.1 Navařování vzorků

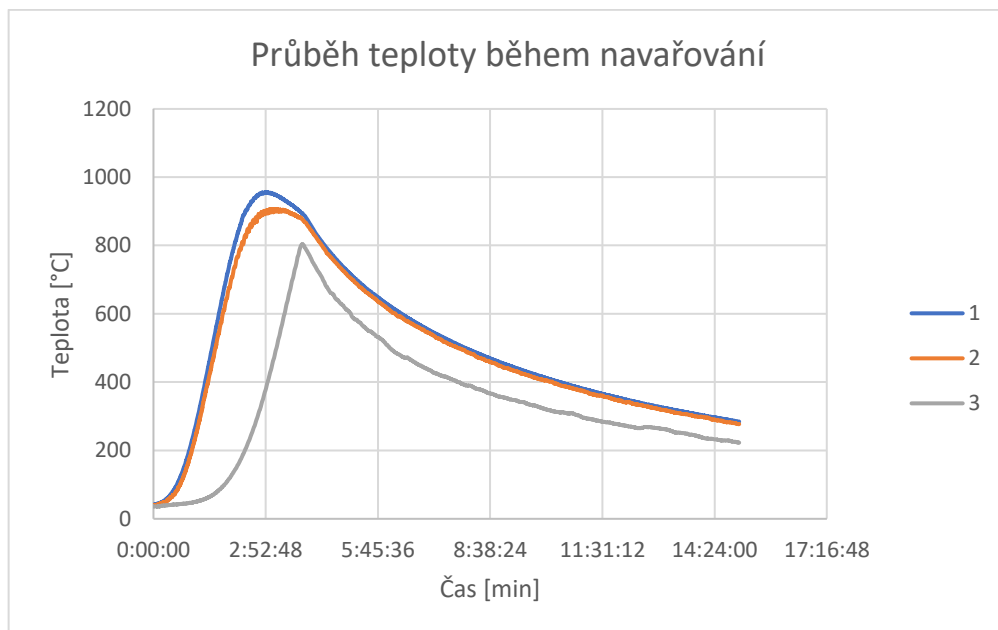
Během navařování vzorků byly upravovány navařovací parametry (viz tabulky 5-7) tak, aby bylo dosaženo ideálního průběhu navařovacího procesu a aby výsledné návary dosahovaly dostatečné kvality.

9.1.1 Vzorky se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe®

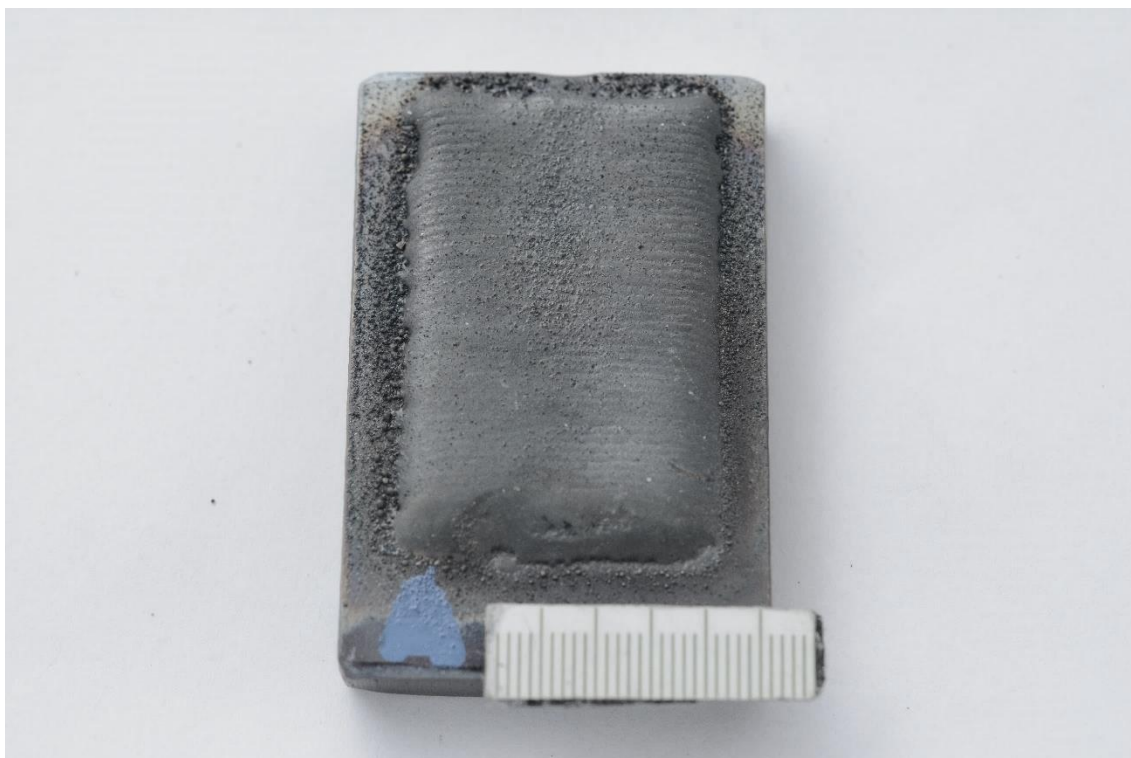
Při použití nižšího proudu docházelo k nedostatečnému smáčení základního materiálu taveninou. Je to způsobeno nižší teplotou návaru (viz obrázky 30 a 32), roztavený přídatný materiál má vyšší viskozitu a může docházet ke vzniku studených spojů. Snížením rychlosti posuvu a zvýšením proudu bylo dosaženo zvýšení vneseného tepla a tím také lepšího smáčení a natavení základního materiálu.



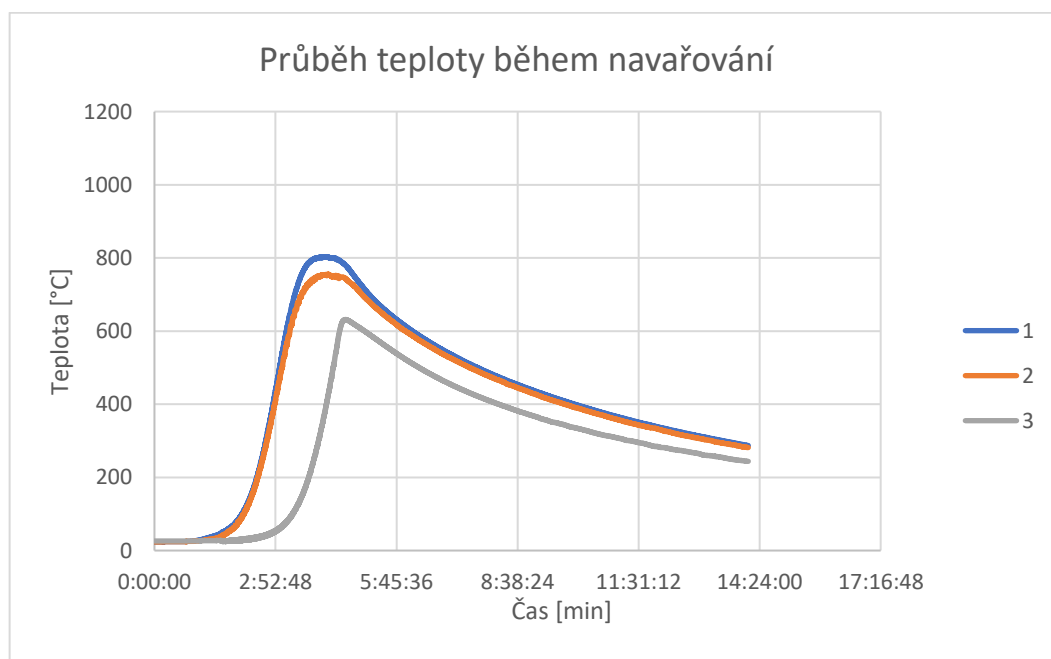
Obrázek 30: Vzorek číslo 1, 100 % Nibasit 625 – P/LFe®.



Obrázek 31: Graf průběhu teploty ve vzorku. Vzorek číslo 1, 100 % Nibasit 625 – P/LFe®.



Obrázek 32: Vzorek číslo 2, 100 % Nibasit 625 – P/LFe®.



Obrázek 33: Graf průběhu teploty ve vzorku. Vzorek číslo 2, 100 % Nibasit 625 – P/LFe®.

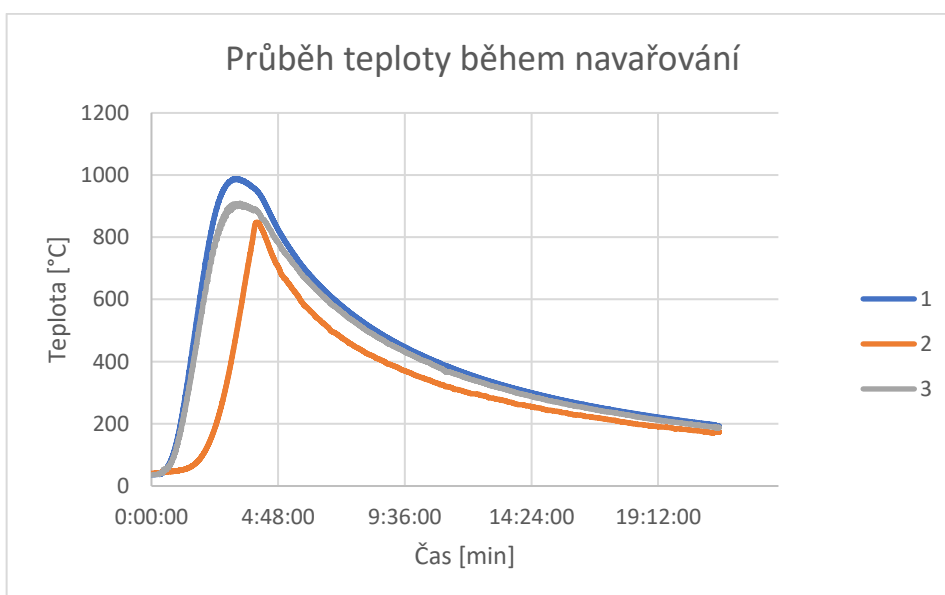
V grafech průběhů teplot jsou číselně označeny termočlánky podle jejich umístění na vzorku (viz obrázek 23).

9.1.2 Vzorky s 15 % B₄C

Na fotografiích navařených vzorků (viz obrázky 34 a 36) je vidět drsnější a méně pravidelný povrch ve srovnání se vzorky se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe® (viz obrázky 30 a 32). V některých místech vzorků se objevovalo zelené zbarvení, které bylo pravděpodobně způsobeno rozkladem B₄C a vznikem nových sloučenin. V kapitole 9.3 je popsáno, o jaké sloučeniny se jedná.



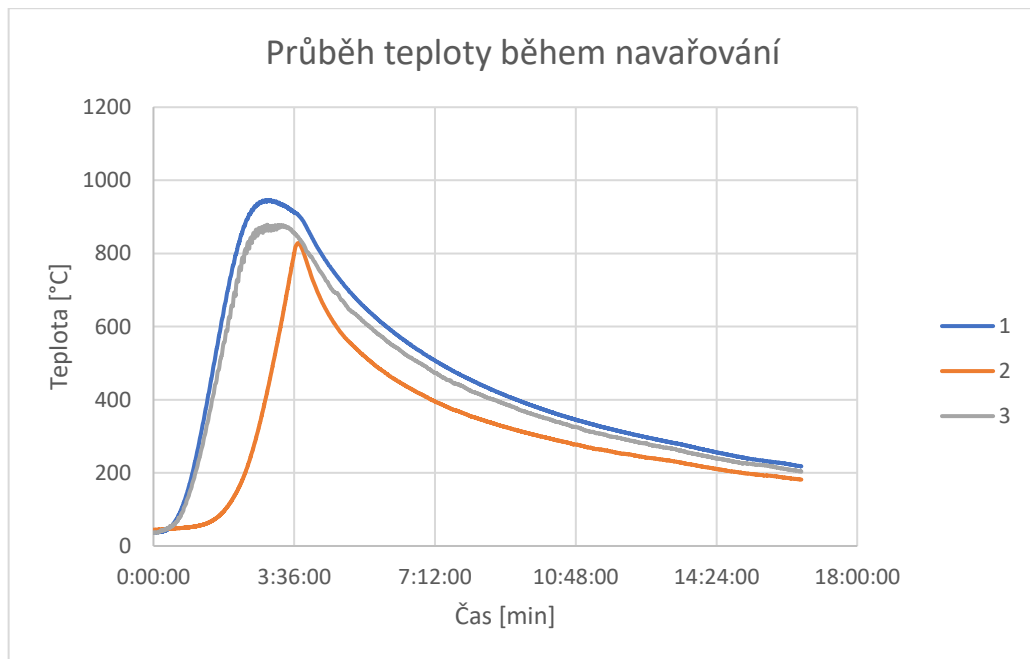
Obrázek 34: Vzorek číslo 4, 85 % Nibasit 625 – P/LFe®, 15 % B₄C.



Obrázek 35: Graf průběhu teploty ve vzorku. Vzorek číslo 4, 85 % Nibasit 625 – P/LFe®, 15 % B₄C.



Obrázek 36: Vzorek číslo 5, 85 % Nibasit 625 – P/LFe[®], 15 % B₄C.



Obrázek 37: Graf průběhu teploty ve vzorku. Vzorek číslo 5, 85 % Nibasit 625 – P/LFe[®], 15 % B₄C.

9.1.3 Vzorky s 30 % B₄C

Při zvýšení poměru B₄C k Nibasitu® došlo ke značnému zhoršení průběhu navařování. Docházelo ke vzniku pórů a bublin ve svarové lázni a výraznému zvýšení drsnosti povrchu návaru. Na obrázku 38 je vidět návar, u kterého nebyly upraveny parametry navařování.

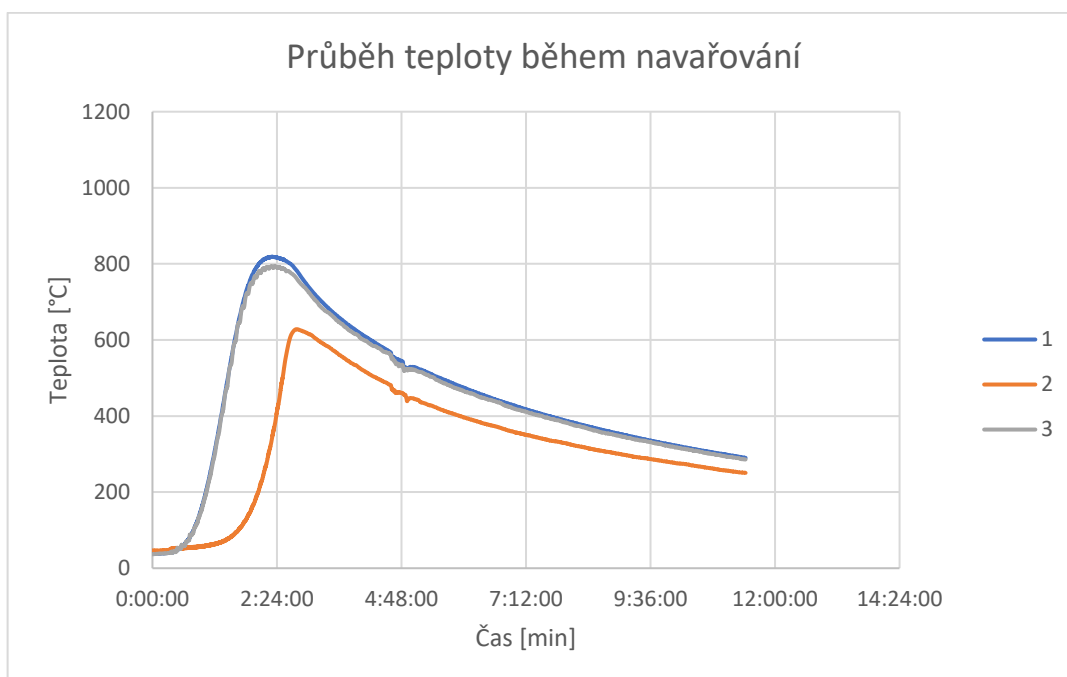


Obrázek 38: Vzorek v 30 % B₄C před úpravou parametrů navařování.

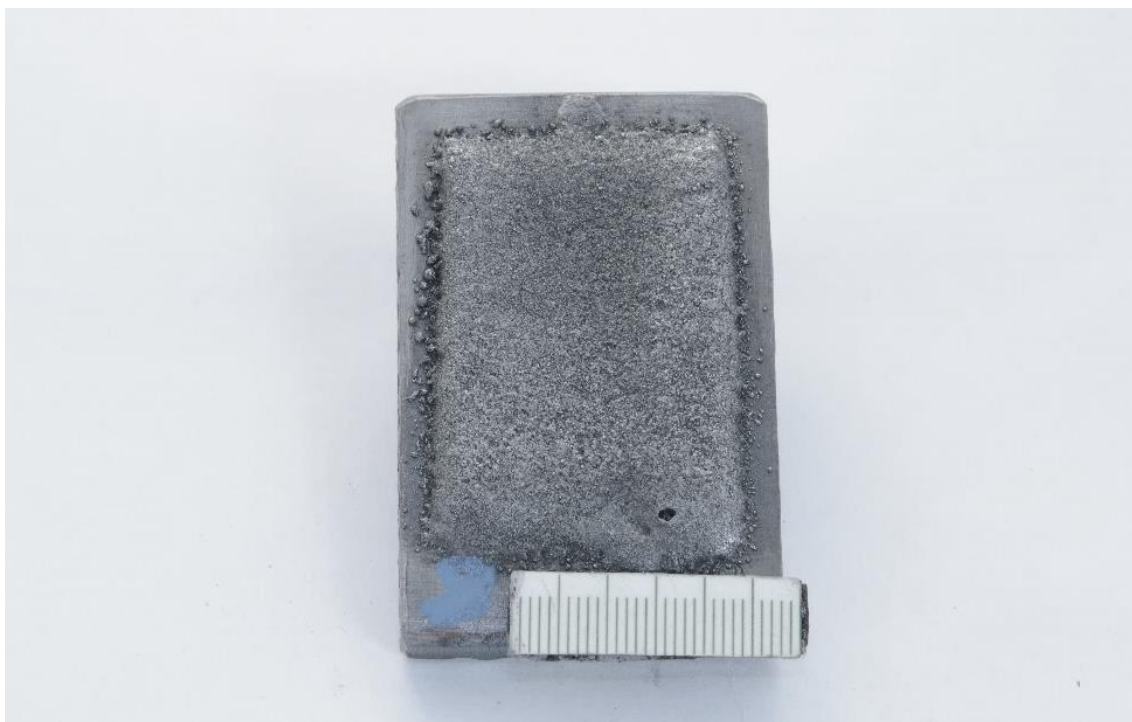
Pro dosažení lepších výsledků byl zrychlen lineární posuv (viz tabulka 8). Průběh navařování se tak zlepšil a stabilizoval. Odstranění pórů se ale stále nepodařilo (viz obrázky 39 a 41 – kráter v místě ukončení návaru). Lepší informace o stavu návaru jsou uvedeny v kapitole 9.2. V důsledku zvýšení posuvu ale došlo ke zmenšení výšky návaru.



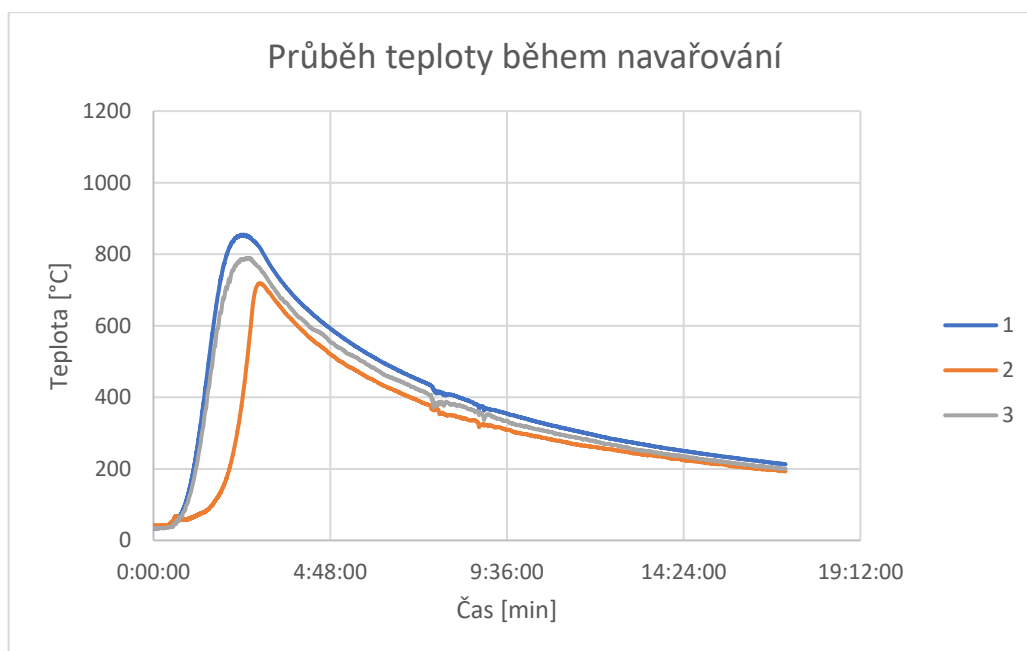
Obrázek 39: Vzorek číslo 7, 70 % Nibasit 625 – P/LFe[®], 30 % B₄C.



Obrázek 40: Graf průběhu teploty ve vzorku. Vzorek číslo 7, 70 % Nibasit 625 – P/LFe[®], 30 % B₄C.



Obrázek 41: Vzorek číslo 8, 70 % Nibasit 625 – P/LFe[®], 30 % B₄C.



Obrázek 42: Graf průběhu teploty ve vzorku. Vzorek číslo 8, 70 % Nibasit 625 – P/LFe[®], 30 % B₄C.

Zvýšením rychlosti posuvu došlo také ke snížení celkového množství vneseného tepla (viz obrázky 40 a 42, kde je vidět nižší maximální teplota naměřená na vzorcích).

Tato změna může mít vliv na propojení návaru se základním materiálem a vznik studených spojů.

9.2 Struktura návarů

Cílem zkoumání struktury materiálů je objasnění jejich makroskopických vlastností. Zároveň je díky tomu možné lépe porozumět dějům, které v materiálech probíhají během jejich výroby a působení tepla.

9.2.1 Makrostruktura

Na snímcích makrostruktury bylo vyhodnocováno propojení návaru se základním materiálem, tvar návaru a jeho homogenita (v případě vzorků obsahujících B₄C).

Ze snímku makrostruktury návaru se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe[®] (viz obrázek 43) je vidět kontrastní hranice přechodu mezi návarem a základním materiálem. To značí nedostatečné natavení ZM a jeho nedostatečné propojení s materiálem návaru. Zvýšení kvality návaru by bylo možné dosáhnout úpravou navařovacích parametrů (zvýšení proudu, úpravou pulzace, náklon hořáku atd.). Dále je vidět mírné zvyšování návaru směrem od středu k okrajům. Výška uprostřed návaru je 1,4 mm a ve vzdálenosti 1,5 mm od kraje je výška 1,72 mm (nejvyšší místo návaru). Výška návaru byla měřena od hranice se ZM.



Obrázek 43: Makrostruktura návaru se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe[®] (vzorek 1).

Při navařování vzorku s 15 % B₄C byly použity stejné navařovací parametry jako v případě vzorku 1 (100 % Nibasit 625 – P/LFe[®]), vzhledem k vysoké tepelné vodivosti B₄C je ale ze snímku makrostruktury vidět lepší spojení návaru se ZM (viz obrázek 44). Na okrajích návaru jsou stále vidět studené spoje. Vzhledem k malé velikosti zkušebního vzorku lze ale konstatovat, že při navařování větších ploch by byl tento problém

eliminován. Pro odstranění studených spojů při navařování menších vzorků by byla potřeba upravit parametry navařování, nebo použít předehřev.

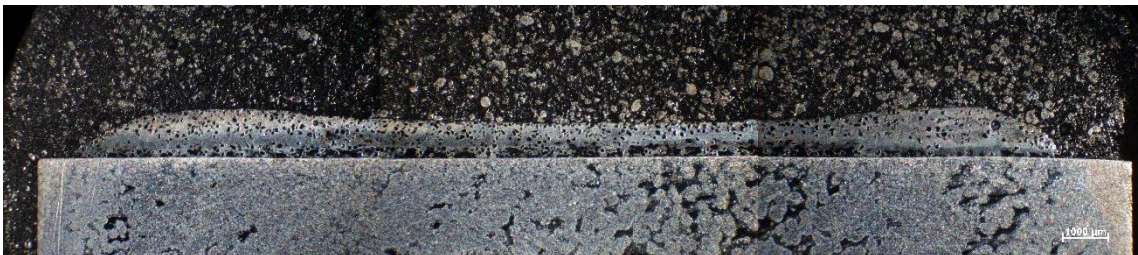
V tomto případě je výška návaru maximální přibližně uprostřed (2,06 mm) a klesá směrem ke krajům (1,7 mm ve vzdálenosti 1,5 mm od okraje návaru).



Obrázek 44: Makrostruktura návaru s 15 % B₄C (vzorek 5).

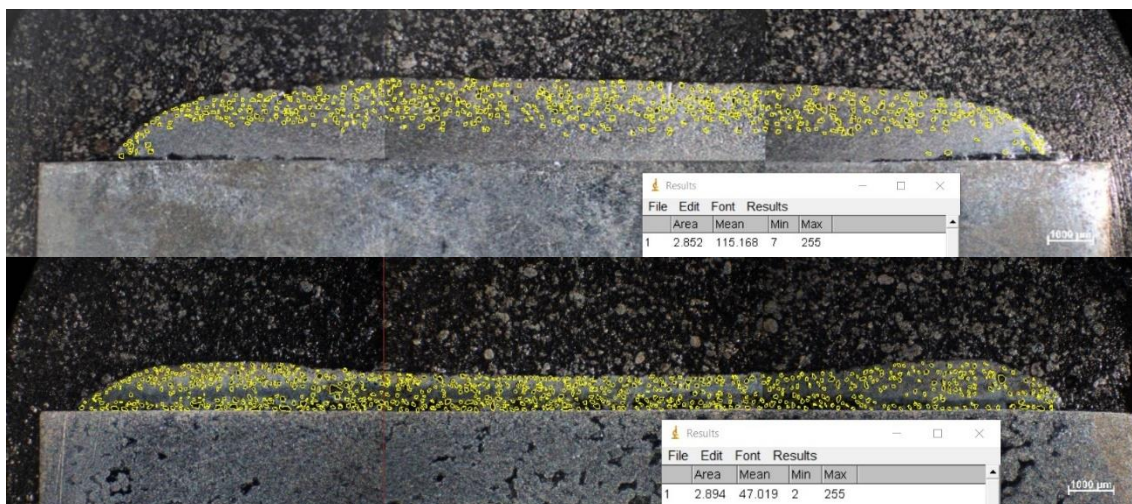
Na snímku makrostruktury návaru s 30 % B₄C (viz obrázek 45) je opět vidět problém s nedostatečným natavením ZM a vznikem studených spojů (kontrastní hranice mezi návarem a ZM). V tomto případě je vznik studených spojů zapříčiněný úpravou navařovacích parametrů oproti ostatním vzorkům (popsáno v kapitole 8.3). Pro odstranění tohoto problému by bylo nutné dále experimentovat s úpravami navařovacích parametrů a použít předehřev ZM.

Změnou navařovacích parametrů došlo také k výraznému zmenšení výšky návaru a tendence je podobná jako u vzorku se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe® (návar se od středu k okrajům zvyšuje). Naměřená výška uprostřed návaru je 1,04 mm a v nejvyšším místě (přibližně 1 mm od okraje) 1,32 mm. Po přebroušení návaru by byla jeho využitelná výška přibližně 0,9 mm, a proto by v tomto případě bylo ideální vytvářet návar na několik vrstev (2-3).



Obrázek 45: Makrostruktura návaru s 30 % B₄C (vzorek 7).

Pro vyhodnocení rozložení a obsahu částic B_4C v návaru byla využita analýza částic v programu ImageJ (viz obrázek 46). Na obrázcích jsou žlutě označeny zkoumané částice B_4C . U návaru s 15 % B_4C je patrný pokles koncentrace částic směrem od povrchu návaru k ZM, ve vzdálenosti přibližně 0,5 mm od hranice natavení je výskyt částic prakticky nulový. U vzorku s 30 % B_4C je vzhledem k menší výšce návaru a většímu podílu B_4C v přídatném materiálu rozložení částic rovnoměrné.



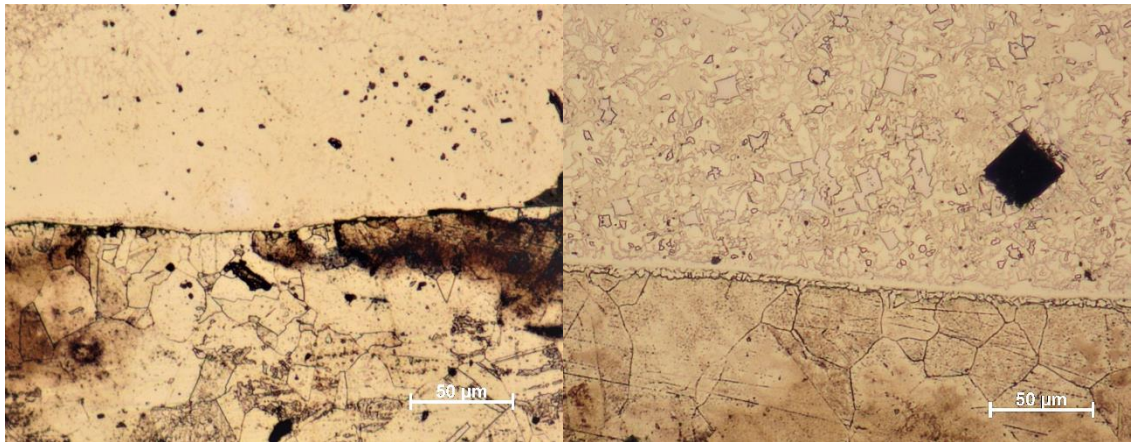
Obrázek 46: Analýza částic v programu ImageJ (vzorek 5 nahoře a vzorek 7 dole)

V obou případech zabírají částice přibližně stejnou plochu (viz tabulky na obrázku 46). Vzhledem k menší ploše návaru s 30 % B_4C je ale podíl částic v tomto vzorku vyšší. Vypočítané koncentrace částic B_4C jsou 8,5 % pro vzorek 5 a 15,7 % pro vzorek 7. Tyto hodnoty odpovídají přibližně polovině obsahu B_4C v přídatném materiálu. Jedná se ovšem o plošný obsah, takže objemový poměr může být mírně odlišný. Zároveň je ale nutné uvažovat rozpouštění částic B_4C během procesu navařování, takže lze předpokládat, že skutečný obsah boru a uhlíku v návarech je vyšší než vypočítané hodnoty.

9.2.2 Mikrostruktura

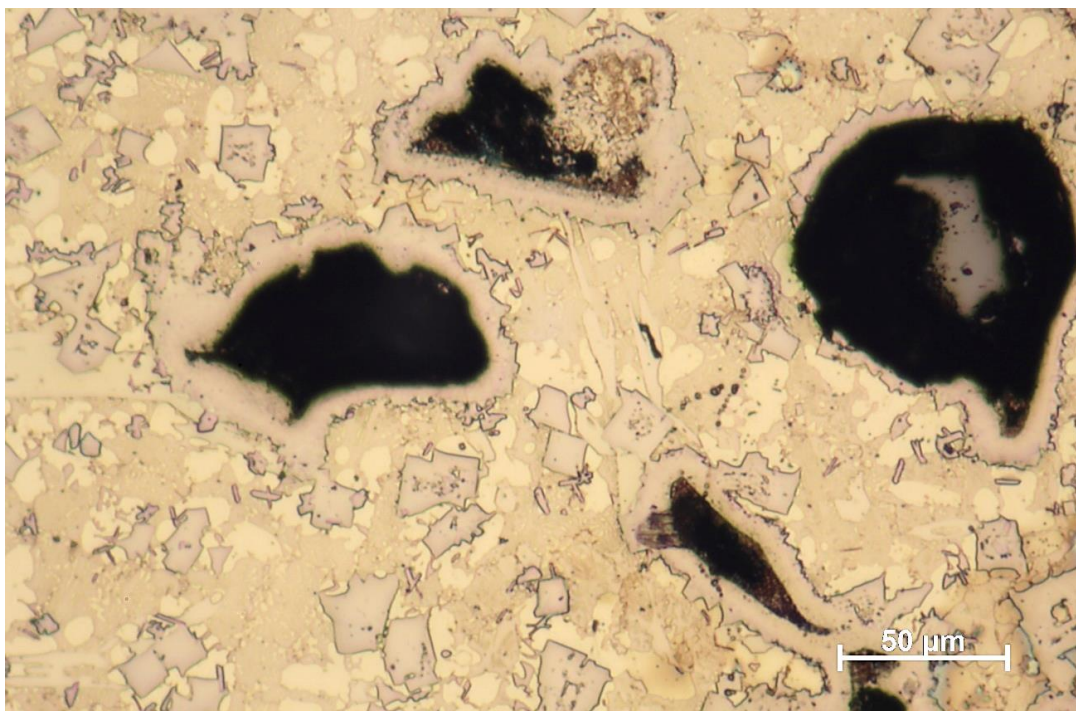
V rámci pozorování mikrostruktury návarů byla zkoumána velikost a tvar zrn matrice, homogenita návaru a spojení návaru se základním materiálem. Dále byly zkoumány částice, které v návaru vznikly, jejich tvar a rozložení v matrici. Další důležitou oblastí jsou částice B_4C , jejich okolí a interakce s matricí. Na snímcích z elektronového

mikroskopu jsou jednotlivé částice rozlišeny a jejich chemické složení je popsáno v kapitole 9.3.



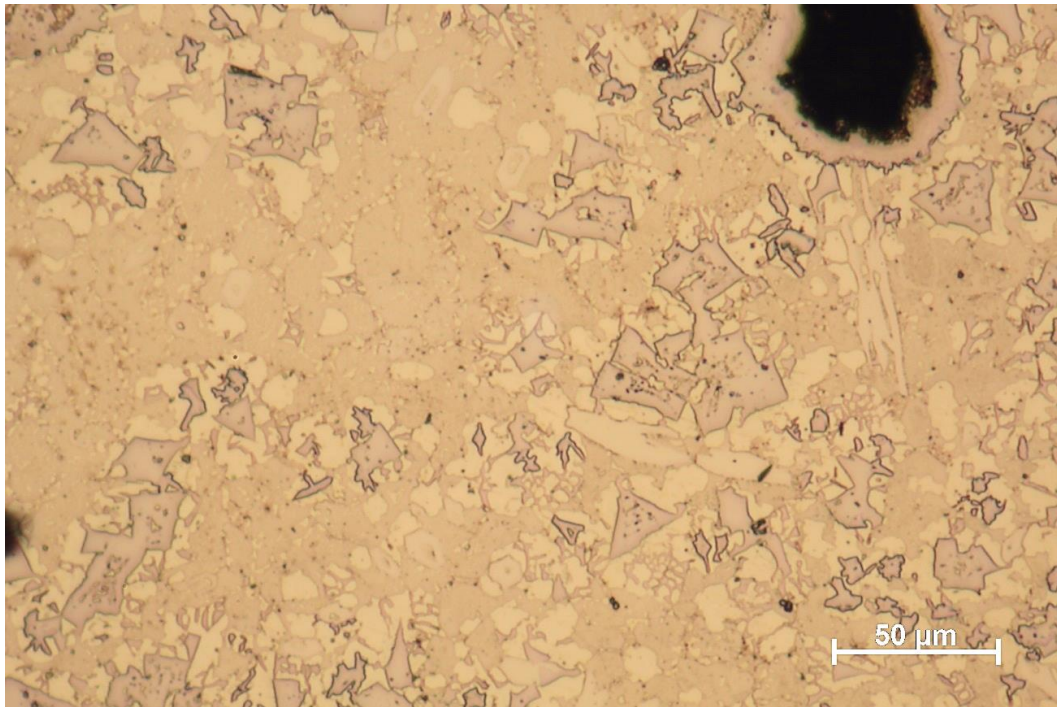
Obrázek 47: Hranice mezi návarem a ZM, kraj návaru vlevo a střed návaru vpravo (vzorek 5) – OM, 240x.

Na snímcích mikrostruktury hranice mezi návarem a ZM u vzorku s 15 % B_4C (viz obrázek 47) je vidět studený spoj ve vzdálenosti přibližně 1 mm od okraje návaru. Uprostřed návaru je propojení obou materiálů již dostatečně kvalitní a ZM je dostatečně natavený. Zároveň je vidět výrazný rozdíl ve struktuře návaru na jeho okraji a uprostřed. Na kraji je jemnozrnná homogenní mikrostruktura bez výskytu částic. Uprostřed návaru má matrice hrubší zrna a obsahuje množství ostrohranných i globulárních částic. Na obrázku 46 vpravo je také vidět vtisk po měření tvrdosti.



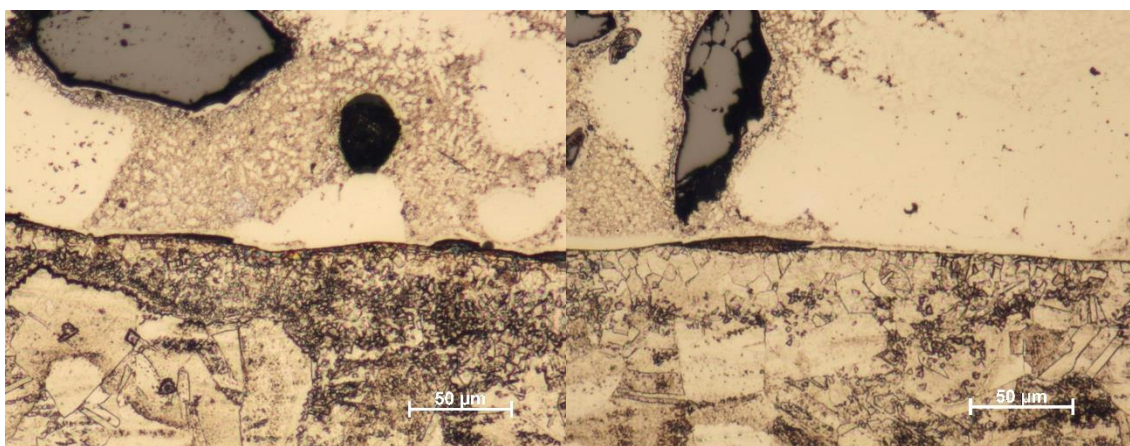
Obrázek 48: Mikrostruktura návaru pod povrchem (vzorek 5) – OM, 240x.

Na snímku mikrostruktury pod povrchem návaru s 15 % B₄C (viz obrázek 48) jsou vidět tmavé částice B₄C, které jsou výrazně větší než zrna základní matrice a další částice obsažené v matrici. Kolem těchto částic je obal, který vznikl během navařování, kdy docházelo k rozpouštění částic za vysokých teplot. V matrici je pak množství převážně ostrohranných částic, které jsou nerovnoměrně rozloženy. Hůře viditelné jsou pak světlé globulární a elipsoidní částice, které se shlukují ve stejných místech, jako výše zmíněné ostrohranné částice. Chemické složení těchto částic a jejich vliv na vlastnosti návaru jsou popsány v kapitole 9.3.



Obrázek 49: Mikrostruktura ve středu návaru (vzorek 5) – OM, 240x.

Mikrostruktura uprostřed návaru s 15 % B₄C (viz obrázek 49) se příliš neliší od mikrostruktury na jeho povrchu a v místě rozhraní se ZM. Kromě menšího množství tmavých částic B₄C obsahuje matrice Nibasitu® množství ostrohranných a globulárních částic, které jsou nerovnoměrně rozloženy. Velikost těchto částic se řádově pohybuje v jednotkách až desítkách μm.



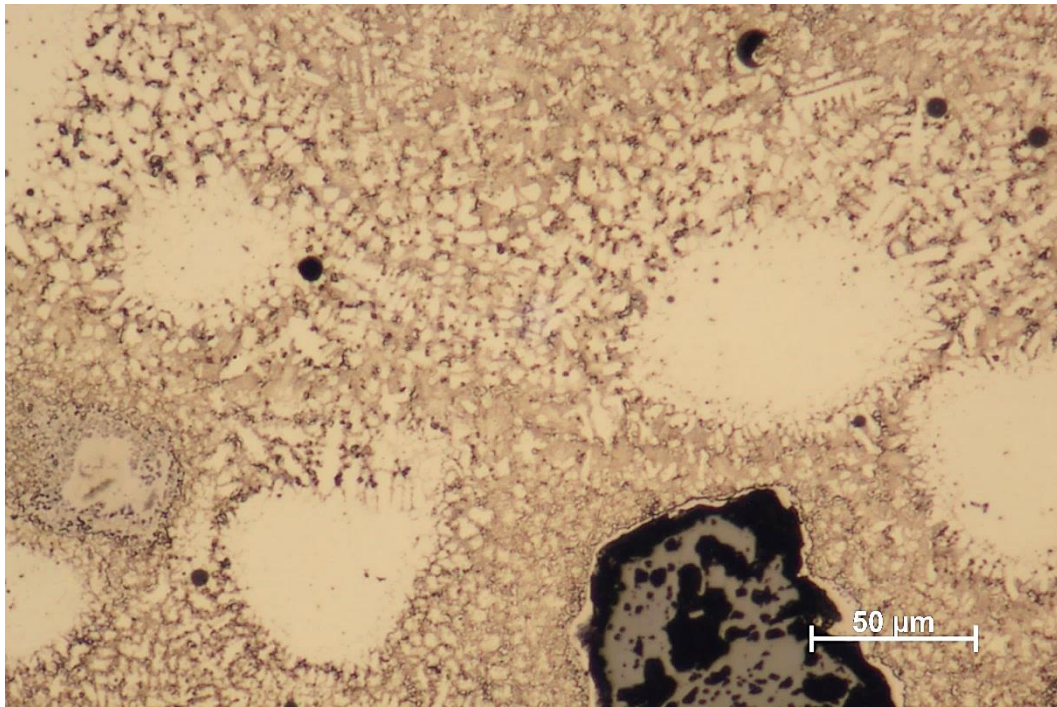
Obrázek 50: Hranice mezi návarem a ZM, kraj návaru vlevo a střed návaru vpravo (vzorek 7) – OM, 240x.

Ná snímčích mikrostruktury rozhraní mezi návarem a ZM u vzorku s 30 % B₄C (viz obrázek 50) je vidět minimální rozdíl v natavení ZM mezi okrajem a středem návaru. Tyto snímky potvrzují vznik studeného spoje ztíženého v kapitole 9.2.1. V oblasti návaru jsou na obou snímčích vidět tmavé částice B₄C, které se na rozdíl od vzorku 5 vyskytují v celém objemu návaru. Struktura matrice je podobná okraji návaru s 15 % B₄C, jemnozrná, bez ostrohranných částic.



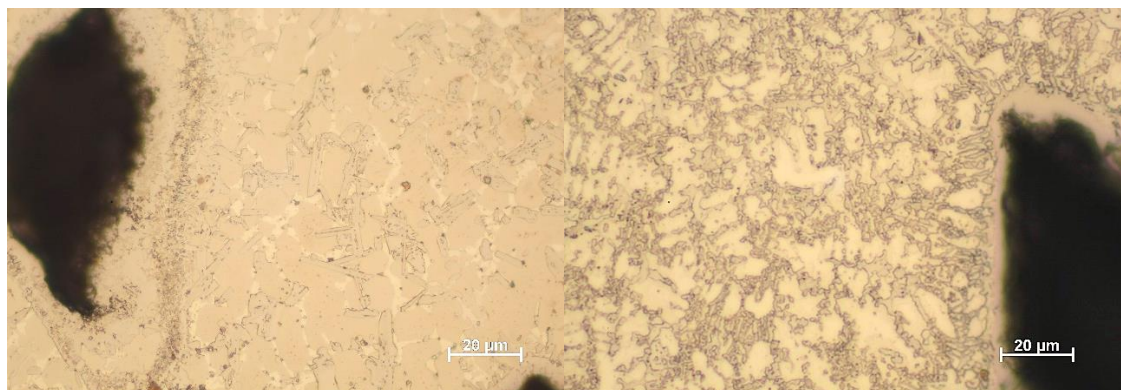
Obrázek 51: Mikrostruktura návaru pod povrchem (vzorek 7) – OM, 240x.

Ze snímku mikrostruktury návaru s 30 % B₄C (viz obrázek 51) je vidět značný rozdíl oproti mikrostruktuře vzorku s nižším obsahem B₄C (viz obrázek 48). Struktura je jemnozrná a zrna matrice mají dendritický tvar. Obal kolem tmavých částic B₄C je výrazně užší, což je způsobeno nižší teplotou návaru během procesu navařování (částice se pomaleji rozpouští). Částice obsažené v matrici (karbidy atd.) mají převážně oválný tvar a jsou v matrici rovnoměrně rozloženy.



Obrázek 52: Mikrostruktura ve středu návaru (vzorek 7) – OM, 240x.

Snímek mikrostruktury ze středu návaru s 30 % B_4C (viz obrázek 52) ukazuje homogenitu návaru (při srovnání s obrázky 50 a 51 je vidět stejná mikrostruktura v celé výšce návaru). Opět je zde vidět jemnozrná struktura s dendritickými zrny bez dalších částic (kromě tmavých částic B_4C s rozměry řádově desítek μm).



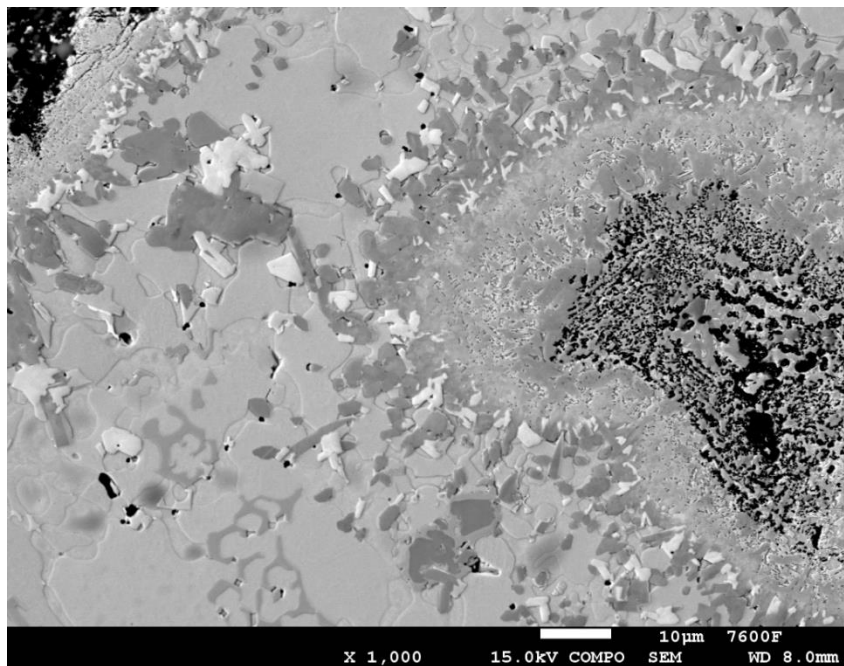
Obrázek 53: Porovnání okolí částic B_4C (vzorek 5 vlevo a vzorek 7 vpravo) – OM, 500x.

Na obrázku 53 je vidět porovnání interakce částic B_4C s okolní maticí u vzorku s 15 resp. 30 % B_4C . Na snímku ze vzorku 5 je vidět výrazně širší oblast okolí částice.

V této oblasti došlo k difuzi B a C vlivem rozpouštění částice během procesu navařování. Chemické složení těchto oblastí je popsáno v kapitole 9.3.

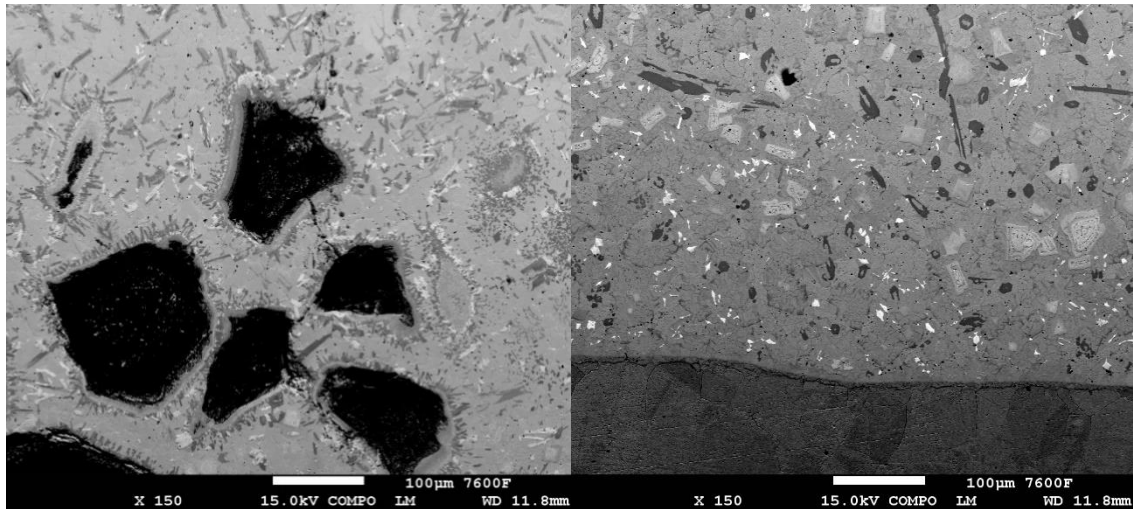
9.2.3 SEM

Vzhledem k podobnosti mikrostruktur jednotlivých návarů byl zkoumán pouze vzorek s 15 % B_4C (vzorek 5). Pro získání detailnějších výsledků lze doporučit stejným způsobem prozkoumat i vzorek s 30 % B_4C (vzorek 7) a porovnat zjištěné skutečnosti.



Obrázek 54: SEM snímek částice B_4C a jejího okolí – EM, 1000x.

Na obrázku 54 je vidět částice B_4C (černě na pravé straně snímku a v levém horním rohu) a její okolí, které již bylo popsáno v kapitole 9.2.2. Na SEM snímku jsou rozlišitelné různé druhy částic vyloučené v okolní matici. Zároveň v přímém okolí částic B_4C jsou vidět oblasti s odlišným chemickým složením (různé odstíny šedé). Přesné chemické složení těchto oblastí je popsáno v kapitole 9.3.

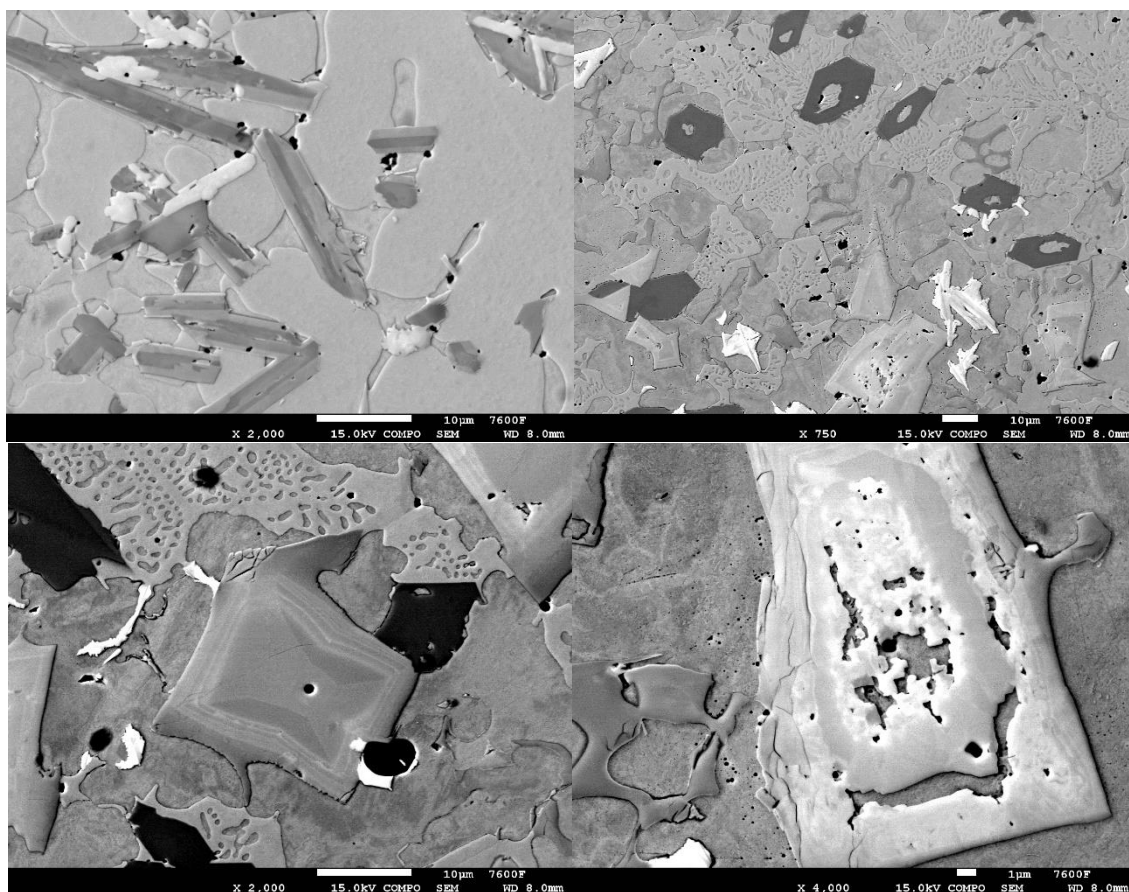


Obrázek 55: SEM snímek mikrostruktury u povrchu návaru (vlevo) a na rozhraní se základním materiálem (vpravo) – EM, 150x.

Obrázek 55 porovnává mikrostrukturu návaru u jeho povrchu a na rozhraní se základním materiálem. Jedná se o snímky přibližně se středu návaru, takže je vidět již výše zmíněný kvalitní průvar. Hlavním, na první pohled viditelným rozdílem mezi povrchem návaru a jeho rozhraním se ZM je tvar a rozložení částic vyloučených v základní matici.

Částice u povrchu návaru mají převážně jehlicovitý tvar (viz obrázek 56), nejsou nijak specificky orientovány, vytvářejí shluky a jejich největší rozměr se pohybuje řádově v jednotkách μm . Na tvar a velikost částic má velký vliv teplota a teplotní gradient.

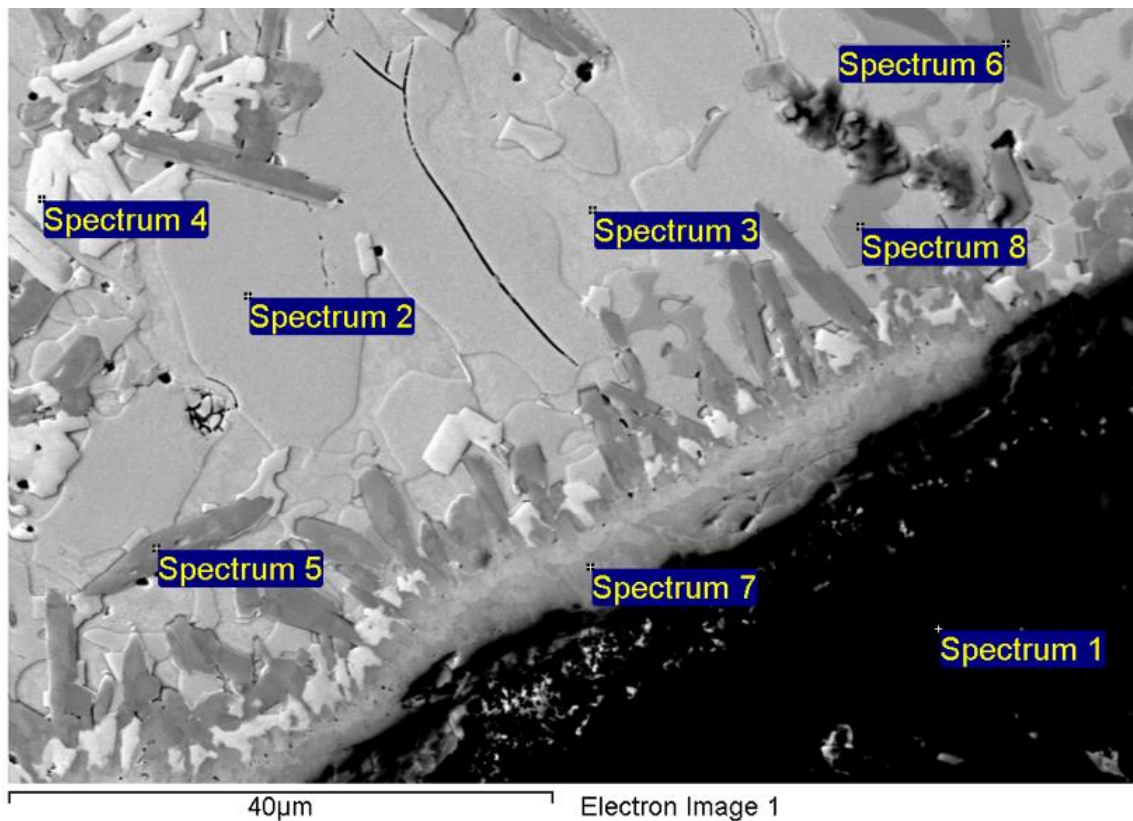
Na rozhraní návaru se ZM se vyskytuje více různých druhů částic (tvarově i podle odstínu – chemickým složením). Částice zde mají různé tvary (viz obrázek 56) nepravidelné, globulární, šestihranné. Jehlicovité částice jsou v této oblasti minimálně. Rozložení částic je pravidelnější než u povrchu návaru a největší rozměr částic dosahuje řádově až desítek μm .



Obrázek 56: Druhy částic vyskytující se v návaru – EM, 750-4000x.

9.3 Chemické složení návarů

Zkoumání chemického složení materiálů je obecně velice důležité, protože napomáhá lépe porozumět dějům (přesuvy hmoty), které v nich probíhají. Keramické částice se chovají různě podle jejich materiálu a podle materiálu základní matrice, mohou se v matrici rozpouštět (za vzniku nových fází), může docházet k jejich tavení během procesu navařování, nebo nemusí s matricí vůbec reagovat. Tato interakce keramických částic s matricí má velký vliv na mechanické a další vlastnosti návaru (korozní odolnost atd.) a zjištění chemického složení pomáhá tuto problematiku objasnit.



Obrázek 57: SEM snímek s vyznačenými místy měření chemického složení.

Na obrázku 57 je vidět vybraná zkoumaná oblast s vyznačenými místy měření chemického složení. Přístroj vyhodnocuje objem ve vzdálenosti přibližně 5 µm kolem zvolených bodů, proto je nutné volit dostatečně velké částice, aby výsledek nebyl zkreslen jejich okolím.

Pro tuto analýzu byla vybrána částice B_4C a její okolí. Jednotlivé body jsou zvoleny tak, aby pokryly všechny útvary a složky (částice, matrice atd.) vyskytující se v dané oblasti. Pro potvrzení předpokladu, že nedošlo k rozpuštění všech částic B_4C je jeden bod měření umístěn na tuto částici (Spectrum 1 na obrázku 57).

Tabulka 9: Výsledky měření chemického složení metodou SEM EDS.

Spectrum	In stats.	B	C	O	Si	P	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb	Mo	Total
Spectrum 1	Yes	82.15	17.27	0.41	0.02		0.05			0.05		0.05	100.00
Spectrum 2	Yes	6.88	5.66	1.09	0.06		6.71	0.08	0.75	78.13		0.64	100.00
Spectrum 3	Yes		5.06	1.18	1.72		10.80	0.42	1.93	75.97	0.31	2.61	100.00
Spectrum 4	Yes	-6.07	18.47		0.06	0.41	20.29		0.12	2.04	33.50	31.19	100.00
Spectrum 5	Yes	23.62	6.02	0.71			50.79			1.68		17.18	100.00
Spectrum 6	Yes		17.38	0.81			69.33		0.15	1.76		10.57	100.00
Spectrum 7	Yes	26.74	7.29	0.82			25.34		0.35	12.95		26.50	100.00
Spectrum 8	Yes		12.55				65.25	0.15	0.93	15.09		6.02	100.00
Max.		82.15	18.47	1.18	1.72	0.41	69.33	0.42	1.93	78.13	33.50	31.19	
Min.		-6.07	5.06	0.41	0.02	0.41	0.05	0.08	0.12	0.05	0.31	0.05	

V tabulce 9 jsou uvedeny výsledky EDS analýzy chemického složení vybraných oblastí. Analýza potvrdila předpoklad, že tmavý útvar v pravém dolním rohu (viz obrázek 57) je částice B₄C. Spektra 2 a 3 ukazují složení základní matrice. Na výsledcích je vidět pokles koncentrací Cr, Mo, a Nb a zvýšený obsah C a B oproti chemickému složení Nibasit 625 – P/LFe[®] udávaného výrobcem (viz tabulka 4). Poklesy koncentrací některých prvků jsou způsobeny difuzí těchto prvků do částic vyloučených v matrici. Nárůst koncentrace C a B je způsobený rozpouštěním částic B₄C a difuzí těchto prvků do matrice.

V případě spekter 4, 6 a 8 se jedná o komplexní karbidy. Tyto částice vznikly vyloučením ze základní matrice Nibasitu[®] a částečně rozpuštěných částic B₄C. Výrazný nárůst tvrdosti návarů oproti srovnávacímu vzorku se 100 % Nibasit 625 – P/LFe[®] (viz kapitola 9.4) je pravděpodobně způsoben právě přítomností těchto karbidů. Spektrum 4 je komplexní Cr-Nb-Mo karbid, záporná koncentrace B ve výsledcích je způsobena rušením způsobeným přítomností Nb. Spektrum 6 je Cr-Mo karbid, v jeho okolí je viditelná světlejší oblast, která ukazuje na jeho částečné rozpouštění v matrici. Spektrum 8 je pak karbid na bázi Cr-Ni-Mo.

Spektrum 5 je komplexní sloučenina na bázi B a C a obsahem převážně Cr a Mo. Vzhledem k blízkosti okolí částice B₄C se může ještě stále jednat o součást této oblasti, vyšší obsah Cr a Mo pouze ukazuje na promísení rozpuštěných částic B₄C s matricí

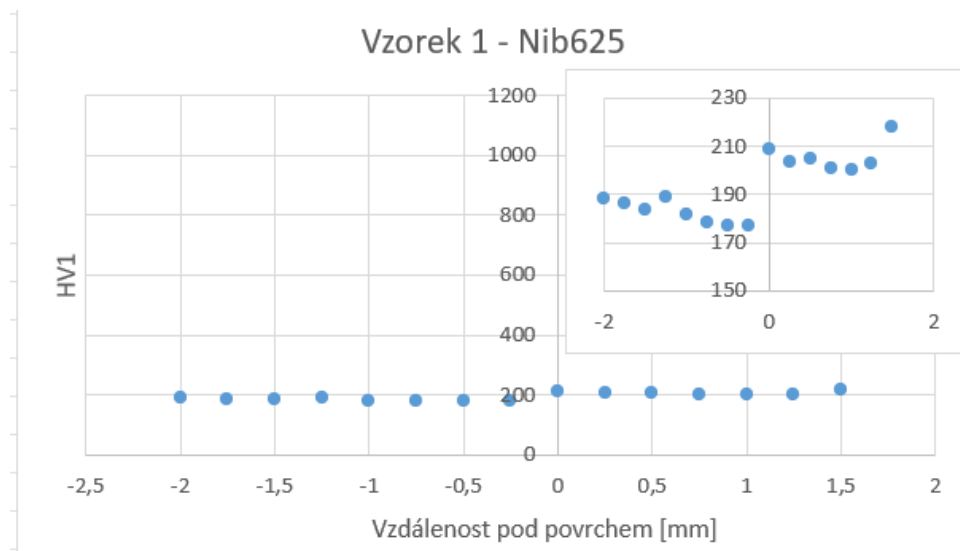
Nibasitu®. Podobný případ je pak spektrum 7, které ukazuje chemické složení přímého okolí částice B₄C. Je zde nižší obsah Cr a Mo oproti spektru 5, ale vyšší obsah Ni.

Výše popsané skutečnosti ukazují kvalitní propojení částic B₄C s matricí Nibasitu 625 – P/LFe®. Během mechanického namáhání by nemělo docházet k vydrolování těchto částic, které by mohlo vést ke snížení kvality návaru při jeho opotřebování, případně i k poškození jiných součástí, které by přišly do styku s vydrolenými částicemi.

Kromě bodové analýzy chemického složení byly vytvořeny také mapy chemického složení (viz přílohy 2 a 3) z vybraných oblastí návaru. Na těchto mapách je barevně zobrazena koncentrace jednotlivých vybraných prvků, sytější barva značí vyšší koncentraci daného prvku, černá pak jeho nedostatek. Na mapách je dobře vidět snížená koncentrace Cr v matrici způsobená jeho difuzí do karbidů. Dále jsou dobře rozlišitelné jednotlivé druhy strukturních fází popsané výše.

9.4 Tvrdost návarů

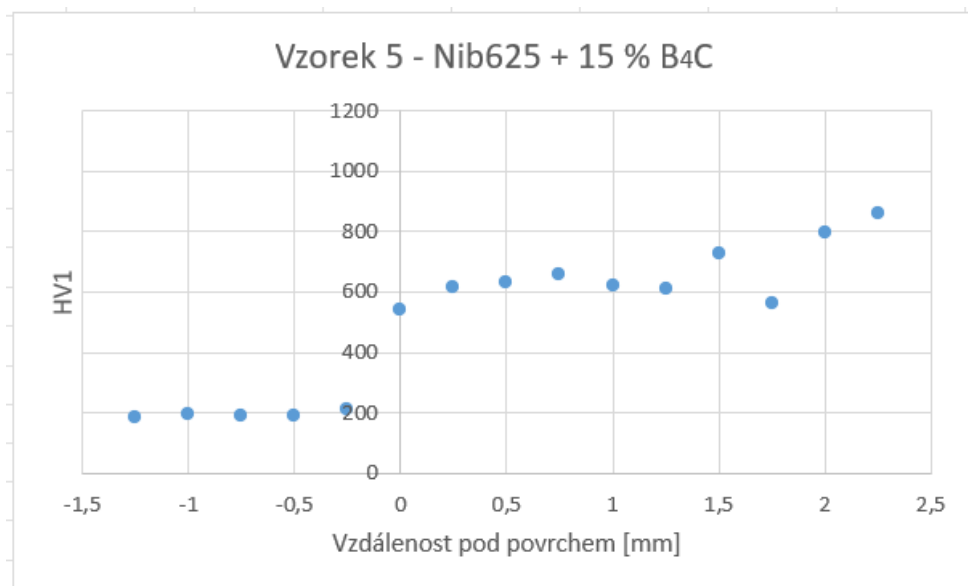
Na každém vzorku bylo naměřeno 15 hodnot tvrdosti směrem od povrchu návaru k základnímu materiálu. Místa měření byla volena se vzdáleností 0,25 mm od sebe, aby nedocházelo ke vzájemnému ovlivnění jednotlivých měření. Naměřené průběhy tvrdosti jsou vidět na obrázcích 58-60. Místo měření u vzorků 1 a 5 bylo zvoleno přibližně uprostřed návarů, u vzorku 7 byla tvrdost měřena přibližně 15 mm od okraje návaru (z důvodu menší výšky návaru v jeho středu). Vzhledem k rozdílné výšce jednotlivých návarů se počty naměřených hodnot v návaru a v základním materiálu liší.



Obrázek 58: Průběh tvrdosti návaru Nib625.

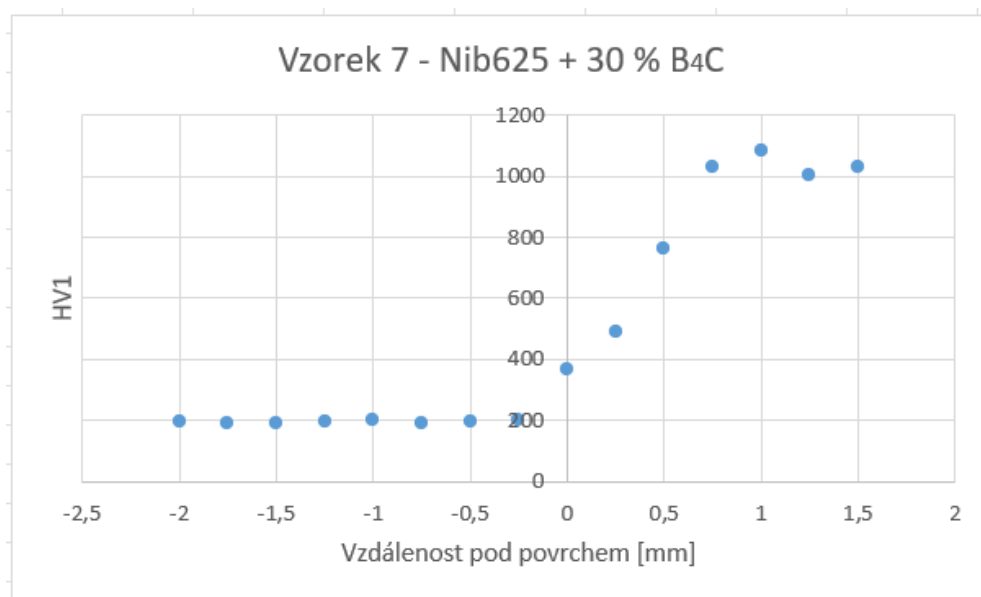
Hodnoty tvrdosti návaru se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe[®] (viz obrázek 58) se pohybují kolem hodnot 200 HV1. Z grafu je vidět minimální rozptyl hodnot v celé tloušťce návaru, mírný pokles tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti a tvrdost základního materiálu (austenitická korozivzdorná ocel) pohybující se kolem 180 HV1.

Naměřené hodnoty tvrdosti jsou velice nízké (blíží se tvrdosti základního materiálu). Pomocí tepelného zpracování by bylo možné dosáhnout vyšších hodnot a tím také vyšší odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Vzhledem k vysokým teplotám rozpouštěcího žhání by ale mohlo docházet k výraznému ovlivnění vlastností základního materiálu. [3]



Obrázek 59: Průběh tvrdosti návaru Nib625 + 15 % B₄C.

U návaru s 15 % B₄C jsou naměřené hodnoty tvrdosti výrazně vyšší než u návaru se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe[®] (viz obrázek 59). Zároveň jsou ale vidět velké rozdíly v naměřených hodnotách (řádově stovky HV1). Tyto rozdíly jsou způsobené nehomogenitou materiálu vzniklou rozpouštěním B₄C v základní matici Nibasitu[®]. Vznikají tak tvrdé strukturní fáze (viz kapitola 9.2.2), které jsou ale nepravidelně rozmístěny, a proto vznikají velké rozdíly v naměřených hodnotách.



Obrázek 60: Průběh tvrdosti návaru Nib625 + 30 % B₄C.

U návaru s 30 % B₄C je vidět další nárůst tvrdosti (viz obrázek 60 a tabulka 10). Maximální naměřená tvrdost dosahuje přes 1100 HV₁, ale směrem k základnímu materiálu hodnoty rychle klesají. Rozptyl hodnot tvrdosti v návaru je ještě výraznější než u vzorku s 15 % B₄C. Je to opět způsobeno rozpouštěním B₄C v matici Nibasitu® a nerovnoměrným rozdělení vzniklých tvrdých fází.

Tvrdost směrem od povrchu návaru obou kompozitních vzorků rychle klesá. To je způsobeno výrazně rozdílnou hustotou B₄C a Nibasitu 625 – P/LFe®, takže dochází k vyplouvání B₄C k povrchu návaru během navařování. Tato zvýšená koncentrace B₄C u povrchu návaru pak způsobuje větší množství tvrdých fází a tím pak větší tvrdost.

Tabulka 10: Naměřené hodnoty podpovrchové tvrdosti HV₁.

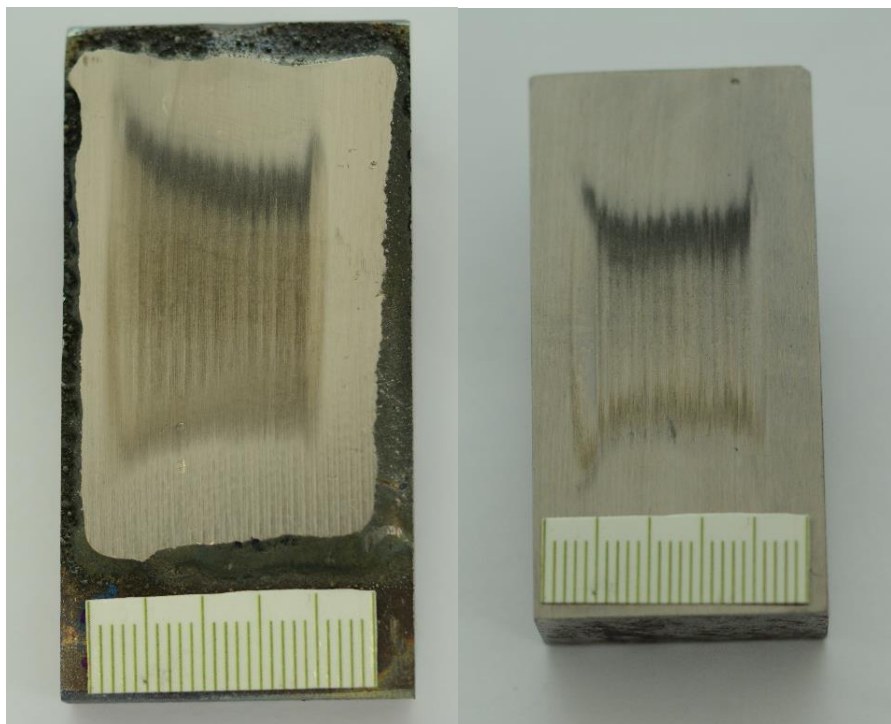
Číslo měření	vzorek 1 – 100 % Nib625	vzorek 5 – Nib625+15 % B ₄ C	vzorek 7 – Nib625+30 % B ₄ C
1	217,7	862,2	1031,5
2	227,7	755,3	1032,7
3	200,2	839,5	1049,4
4	215,6	778,7	1093,4
5	209	887,9	1030,9
průměr	214	824	1047

Kromě průběhu tvrdosti návarem bylo provedeno u každého vzorku 5 měření podpovrchové tvrdosti ve vzdálenosti přibližně 0,25 mm pod povrchem návaru. Výsledky

těchto měření jsou uvedeny v tabulce 10. Z výsledků je vidět výše zmíněná tendence růstu tvrdosti s rostoucím podílem B_4C v přídavném materiálu. V rámci podpovrchové tvrdosti jsou největší rozdíly naměřených hodnot u vzorku s 15 % B_4C . Je to pravděpodobně způsobeno rostoucí homogenitou struktury s rostoucím podílem B_4C v přídavném materiálu. V matrici návaru s 30 % B_4C mohlo dojít k maximálnímu možnému nasycení, a to způsobuje větší homogenitu. Všechny naměřené hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v příloze 1.

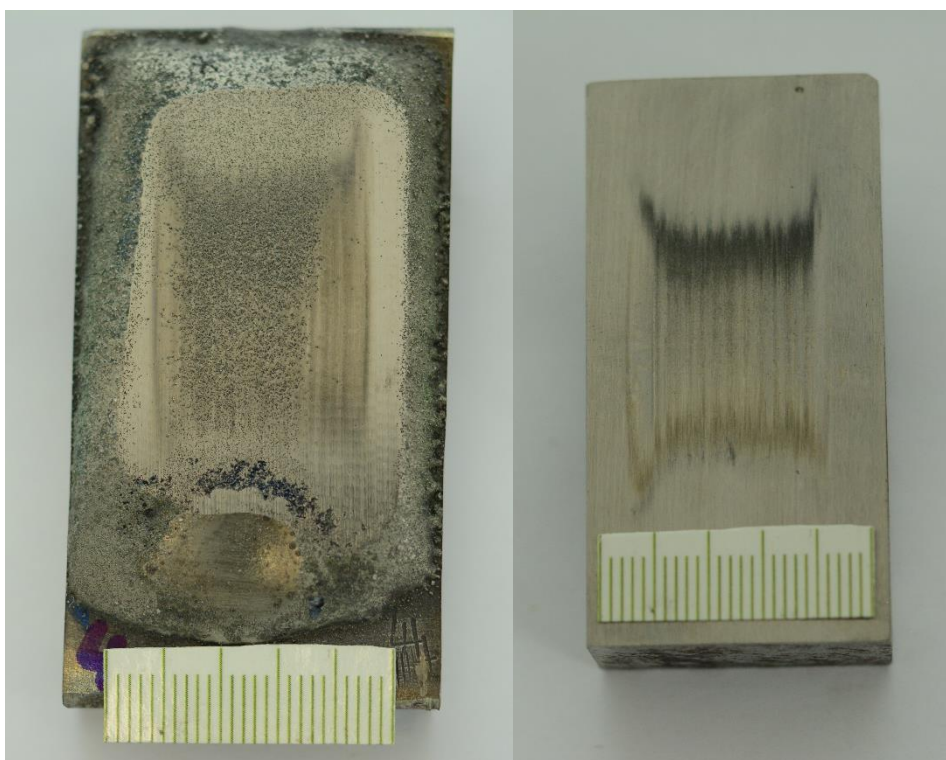
9.5 Abrazivní zkouška

Zkouška podle normy *ASTM G65: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus* byla provedena na třech vzorcích (2 – 100% Nib625, 4 – 15 % B_4C a 8 – 30 % B_4C), parametry zkoušky byly pro všechny vzorky stejné (viz tabulka 3). Před každým vzorkem byl zkoušen shodně označený etalon pro porovnání opotřebení pryžového kotouče, který se opotřebovává nesouměrně (větší opotřebení uprostřed). Kotouč nebyl mezi zkouškami orovnáván. Jak je ale patrné z výsledků (viz tabulka 10), nemá tato skutečnost velký vliv na výsledky zkoušky. Etalony jsou v podobě hranolů o rozměrech 65 x 28 x 16 mm z oceli ČSN 12 050 ve stavu normalizačně žíhaném. [43]



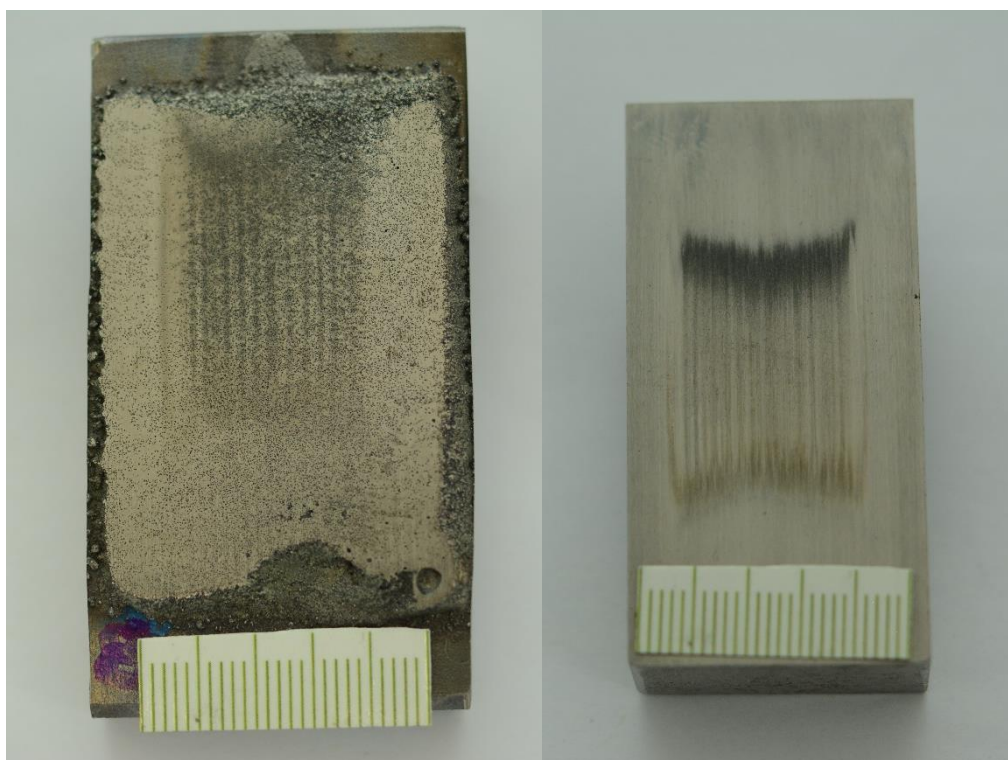
Obrázek 61: Vzorek 2 (vlevo) s etalonem po abrazivní zkoušce.

Vzorek se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe® (viz obrázek 61) byl zkoušen jako poslední a na stopě opotřebení je vidět výše zmíněné nerovnoměrné opotřebení pryžového kotouče (kotouč se v jeho středu opotřebovává rychleji, a proto je stopa opotřebení na vzorku ve středu nejužší a rozšiřuje se směrem do stran). Stopa opotřebení na vzorku je srovnatelná s tou na etalonu, což ukazuje na velice podobné vlastnosti (odolnost proti abrazi) obou materiálů. Opotřebení vzorku má jednotný charakter, rýhy ve směru otáčení pryžového kotouče vytvořené použitým abrazivem (viz obrázek 64).



Obrázek 62: Vzorek 4 (vlevo) s etalonem po abrazivní zkoušce.

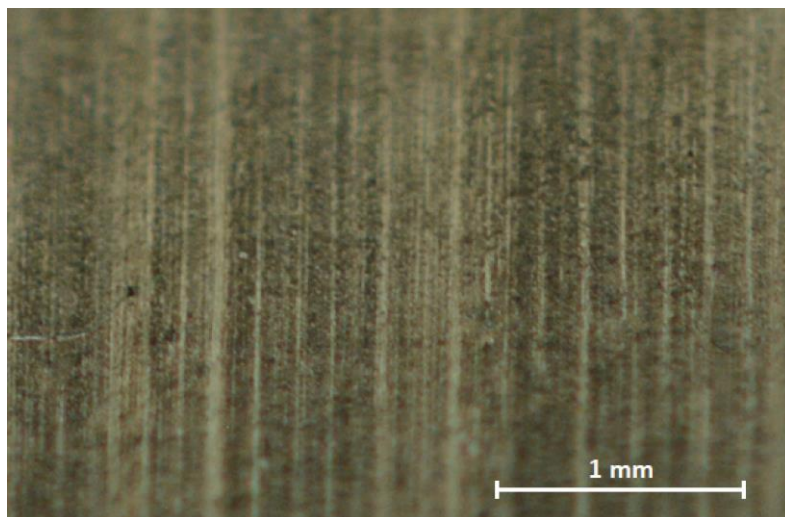
U vzorků 4 a 8 (s 15 % a 30 % B₄C) je na první pohled viditelný rozdíl v charakteru opotřebení oproti vzorku 2. U obou vzorků jsou také znatelné rýhy ve směru otáčení kotouče, které jsou ovšem nepravidelné s množstvím důlků a prohlubní. Po důkladnějším prozkoumání (viz obrázky 65 a 66) bylo zjištěno, že se jedná o okolí částic B₄C, které se z matrice uvolňují jen minimálně a vzhledem k jejich vysoké tvrdosti se prakticky neopotřebovávají. Opotřebení kotouče je na stopách opotřebení vzorků stále viditelné, ale je méně výrazné (to je částečně způsobeno narůstajícím opotřebením kotouče během jednotlivých zkoušek).



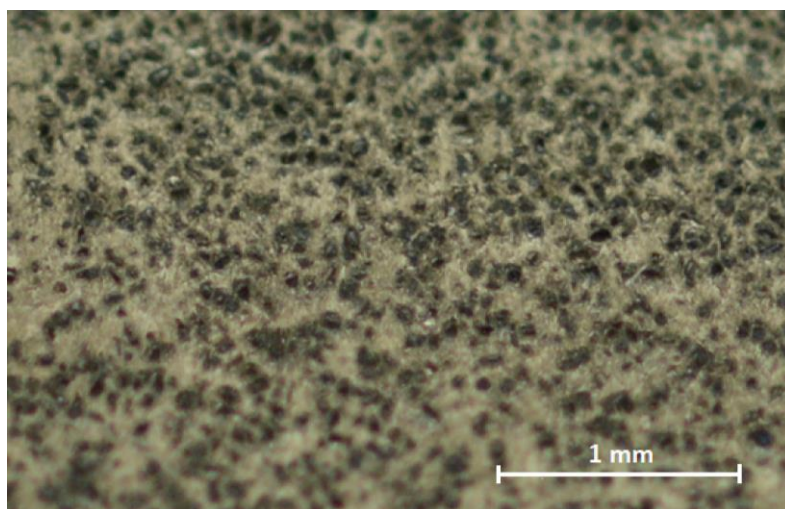
Obrázek 63: Vzorek 8 (vlevo) s etalonem po abrazivní zkoušce.

Ve spodní části vzorků 4 a 8 je viditelná porozita v okolí ukončení návaru. Po přebroušení vzorků se ale ukázalo, že se to týká pouze míst v okolí ukončení návarů. U vzorku 4 se jedná o velké množství menších pórů v okolí ukončení návaru a u vzorku 8 jeden velký pór přesně v místě ukončení návaru. Možná příčina tohoto problému je rychlejší chladnutí této oblasti, protože po ukončení navařování již do vzorku není dodáváno další teplo. Řešení by bylo možné v podobě použití dohřevu po navařování, nebo úpravou použitých technologických parametrů.

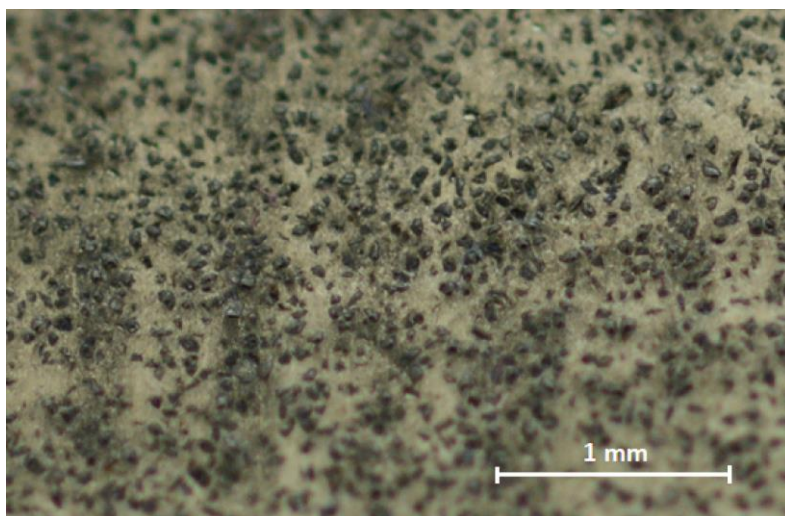
Při použití v praxi by se tento problém dal řešit ukončením navařování mimo upravovanou součást (přídavný plech, který by se následně odřízl). Toto řešení by bylo nejjednodušší, nejméně nákladné a vzhledem k výskytu porozity pouze v bezprostředním okolí ukončení návaru i dostatečně účinné.



Obrázek 64: Detaily stopy opotřebení (vzorek 2).



Obrázek 65: Detaily stopy opotřebení (vzorek 4).



Obrázek 66: Detaily stopy opotřebení (vzorek 8).

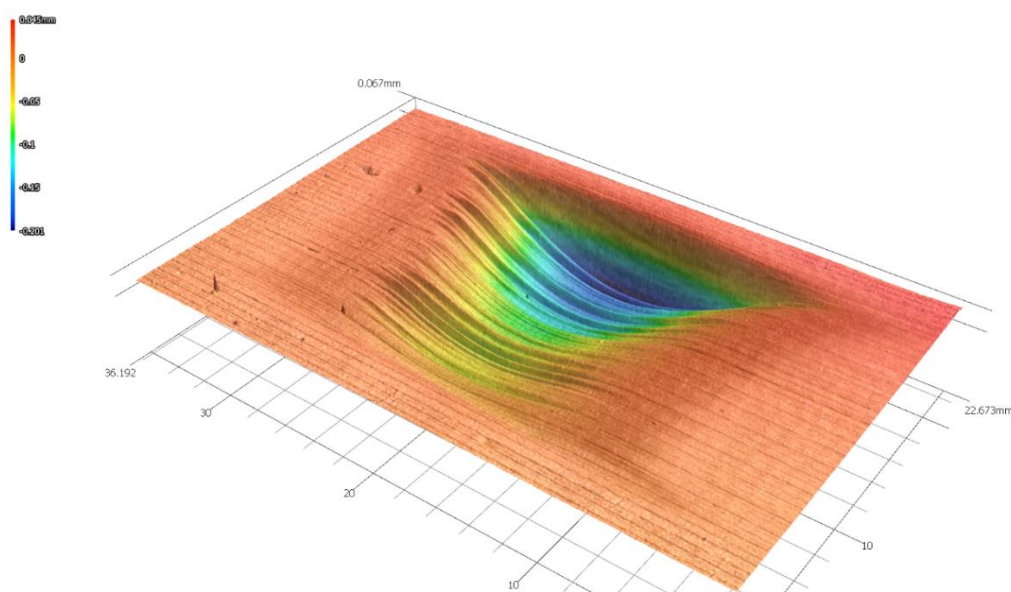
Tabulka 11: Výsledky abrazivní zkoušky – hmotnostní úbytky.

Vzorek	2	4	8
Hmotnost před zkouškou [g]	163,415	184,253	170,135
Hmotnost po zkoušce [g]	163,172	184,151	170,046
Hmotnostní úbytek [g]	0,243	0,102	0,089
Etalon	2	4	8
Hmotnost před zkouškou [g]	178,591	173,498	176,731
Hmotnost po zkoušce [g]	178,378	173,289	176,513
Hmotnostní úbytek [g]	0,213	0,209	0,218

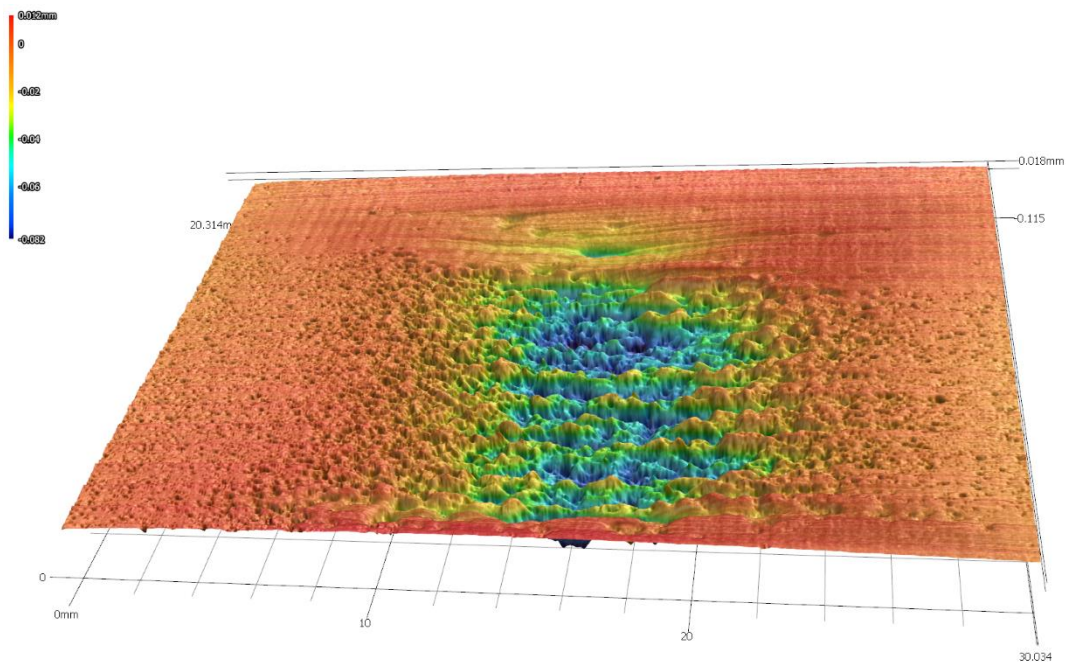
Vypočítané hmotnostní úbytky vzorků (viz tabulka 11) ukazují, že s rostoucím obsahem B₄C roste odolnost návarů proti abrazivnímu opotřebení. Rozdíl mezi hmotnostním úbytkem vzorku 4 a vzorku 8 je pouze 0,013 g, procentuálně je nárůst opotřebení 14,6 %. Je tedy zřejmé, že odolnost proti opotřebení návarů neroste ekvivalentně s nárůstem obsahu B₄C v návarech.

Nárůst opotřebení mezi vzorky 2 a 4 je 138,2 %. Vzhledem k nízké tvrdosti návarů se 100 % Nibasitu® (viz kapitola 9.4) byl takovýto výsledek očekávaný.

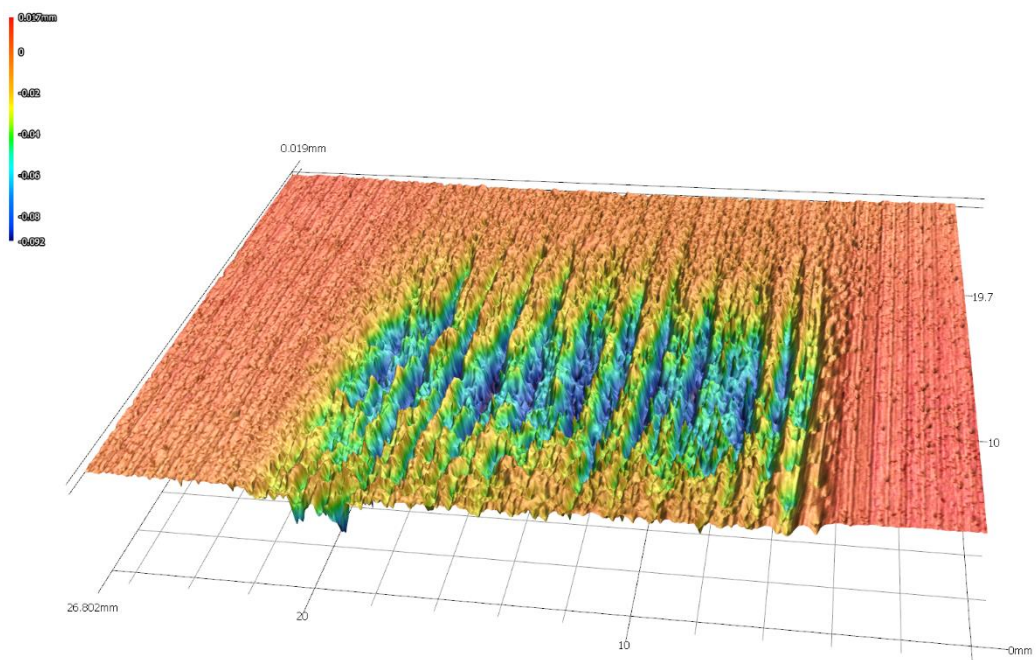
Z výsledků zkoušky je také vidět preciznost zkušebního zařízení, podle hmotnostních úbytků etalonů (maximální odchylka vypočítaných hodnot je 0,009 g), i přes narůstající opotřebení pryžového kotouče.



Obrázek 67: Opotřebení na vzorku 2, zvětšení výškového profilu 2000 %.



Obrázek 68: Opotřebení na vzorku 4, zvětšení výškového profilu 2000 %.



Obrázek 69: Opotřebení na vzorku 8, zvětšení výškového profilu 2000 %.

Na snímcích z optického profilometru (viz obrázky 67-69) je patrný velice výrazný rozdíl v charakteru opotřebení, který byl již zmíněný výše v textu. Na vzorcích 4 a 8 jsou zároveň lépe viditelné drážky ve směru otáčení kotouče, které byly na obrázcích 62 a 63 méně patrné.

Tabulka 12: Výsledky abrazivní zkoušky – objemové úbytky

Vzorek/obsah B ₄ C [%]	2/0	4/15	8/30
Objemový úbytek [mm³]	23,469	6,875	8,358

Z výsledků měření objemových úbytků (viz tabulka 12) je vidět rozdíl mezi vzorky 4 a 8 oproti měření hmotnostního úbytku. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben obtížným určením referenční roviny pro výpočet objemu v softwaru z důvodu minimálního úbytku. Výsledky měření objemového úbytku vzorku 2 jsou srovnatelné s měřením hmotnostního úbytku. Pro srovnání byl změřen i objemový úbytek na jednom z etalonů, který vyšel 16,039 mm³.

10 Závěr

V teoretické části diplomové práce je podrobně popsána problematika a vlastnosti niklové slitiny typu 625. Dále jsou zde popsány vlastnosti karbidu boru a problematika cermetů (respektive kompozitů s kovovou maticí) a možnosti jejich využití. Velká část teorie se věnuje problematice navařování, srovnání jednotlivých technologií se zaměřením na plazmové navařování (PTA) s použitím práškových přídavných materiálů. Na konci je pak zmíněna problematika přídavných materiálů a nedestruktivní i destruktivní zkoušky návarů, které se využívají pro zjišťování jejich vlastností.

V rámci experimentální části byly navařeny kompozitní návary na bázi niklové slitiny typu 625 (konkrétně materiálem Nibasit 625 – P/LFe[®]) s keramickým plnivem v podobě částic B₄C technologií pulzního plazmového navařování. Prvním krokem bylo navaření zkušebních návarů se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe[®] a následně s 15 % a 30 % B₄C (použitý navařovací automat PPC 250 R 6, KSK, s.r.o.). U vzorků s 15 % B₄C se podařilo navařit dostatečně vysoký návar na jednu vrstvu, ale u vzorků s 30 % B₄C bylo nutné výrazně upravit parametry navařování, aby bylo dosaženo dostatečně stabilního procesu. Na základě výsledků lze doporučit navařování na více vrstev.

Po navaření vzorků byla provedena série zkoušek pro zjištění vlastností návarů. Z metalografického hodnocení vzorku se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe[®] byl zjištěn

nedostatečný průvar. Pro dosažení optimálního průvaru je třeba dále upravit parametry navařování. Vzorek s 15 % B₄C měl nedostatečný průvar pouze na okrajích návaru.

Mikrostruktura kompozitních návarů je rozmanitá z důvodu částečného rozpouštění částic B₄C a vzniku velkého množství různých částic náhodně rozložených v základní matici. Mikrostruktura byla pozorována na světelném mikroskopu a následně na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM). V rámci EDS analýzy chemického složení bylo zjištěno chemické složení jednotlivých částic. Ukázalo se, že se ve většině případů jedná o karbidy a boridy, které se vyskytovaly v přímém okolí částic B₄C. Byla též pozorována změna chemického složení matrice způsobená difuzí jednotlivých prvků.

V průběhu přípravy metalografických výbrusů (konkrétně během leptání vzorků) bylo zjištěno, že s přidáním B₄C klesá korozní odolnost Nibasitu 625 – P/LFe[®], která je v čistém stavu vysoká. Proto by bylo vhodné udělat na návarech i zkoušky korozní odolnosti a případně provést tyto zkoušky i za zvýšených teplot (včetně zkoušky odolnosti proti abrazi za zvýšených teplot), aby se případně dokázala možnost použití těchto návarů i pro žáruvzdorné povlaky.

Z měření mikrotvrdosti vyplývá výrazný nárůst tvrdosti s přidáním B₄C. S rostoucím obsahem B₄C (rozdíl mezi vzorky s 15 a 30 %) už není nárůst tvrdosti tak značný.

Ze zkoušky odolnosti proti abrazi byl vyhodnocován hmotnostní úbytek materiálu návarů po jejich vystavení přesně definovanému abrazivnímu opotřebení. Při této zkoušce se potvrdila vysoká odolnost proti abrazi kompozitních návarů, která byla předpokládána po měření jejich tvrdosti. Hmotnostní úbytek vzorku se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe[®] byl více než dvojnásobný v porovnání s kompozitními návary. Dále byl na vzorcích měřen objemový úbytek materiálu pomocí optického 3D profilometru. Objemový úbytek vzorku s 15 % B₄C vyšel nižší, než u vzorku s 30 % B₄C (obráceně než hmotnostní úbytky), což může být způsobeno obtížným výběrem opotřebované oblasti v softwaru pro výpočet úbytku.

Z výsledků provedených zkoušek je zřejmé, že zkoumaný kompozitní materiál má velký potenciál v oblasti antiabrazivních povlaků. Zvolená technologie pulzního plazmového navařování je vhodná pro tuto aplikaci, pro dosažení co nejvyšší kvality návarů je vhodná další úprava parametrů navařování. Vzhledem k plynule rostoucí

tvrdosti směrem od základního materiálu u návaru s 30 % B_4C lze konstatovat, že se téměř jedná o funkčně gradovaný materiál, u něhož lze předpokládat vysokou odolnost proti opotřebení i proti oddělení naneseného povlaku například vlivem rozdílné tepelné roztažnosti. S rostoucím obsahem B_4C v návaru dochází k nárůstu tvrdosti a odolnosti proti abrazi, zároveň ale nastávají problémy během procesu navařování, proto se obsah 15 % B_4C v přídavném materiálu (jedná se o hmotnostní průtok přídavného materiálu) jeví jako optimální.

Bibliografie

- [1] *Inconel and Nickel-based Superalloys* [online]. Seattle: The MetalPress, 2011 [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: <https://metalpress.onlinemetals.com/inconel-uses/>
- [2] *Specialmetals INCONEL alloy 625* [online]. Special Metals Corporation, 2013 [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf>
- [3] SHANKAR, Vani, K BHANU SANKARA RAO a S.L MANNAN. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy. *Journal of Nuclear Materials*. 2001, **288**(2), 222-232. ISSN 0022-3115. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(00\)00723-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(00)00723-6)
- [4] MACEK, Karel, Jiří JANOVEC, Petr ZUNA a Peter JURČI. *Kovové materiály*. Praha, 2006. Skriptum. ČVUT v Praze.
- [5] MATHEW, M.D., P. PARAMESWARAN a K. BHANU SANKARA RAO. Microstructural changes in alloy 625 during high temperature creep. *Materials Characterization*. 2008, **59**(5), 508-513. ISSN 10445803. Dostupné z: doi:[10.1016/j.matchar.2007.03.007](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.03.007)
- [6] BELAN, Juraj. GCP and TCP Phases Presented in Nickel-base Superalloys. *Materials Today: Proceedings*. 2016, **3**(4), 936-941. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:[10.1016/j.matpr.2016.03.024](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.03.024)
- [7] Boron Carbide (B4C) - Properties and Information about Boron Carbide. In: *AZO Materials* [online]. Staffordshire: AZOM, 2001 [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=75>
- [8] DOMNICH, Vladislav, Sara REYNAUD, Richard A. HABER a Manish CHHOWALLA. Boron Carbide: Structure, Properties, and Stability under Stress. *Journal of the American Ceramic Society*. 2011, **94**(11), 3605-3628. ISSN 00027820. Dostupné z: doi:[10.1111/j.1551-2916.2011.04865.x](https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04865.x)
- [9] *Boron Carbide (B4C)* [online]. Manchester: Washington Mills, 2021 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://www.washingtonmills.com/products/boron-carbide-b4c>
- [10] MARI, D. Cermets and Hardmetals. *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys* [online]. Elsevier, 2016, **6**(10), 420-424 [cit. 2021-11-27]. ISBN 9780128197332. Dostupné z: doi:[10.1016/B978-0-12-803581-8.02365-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.02365-1)
- [11] DAS, Suman, Timothy P. FUESTING, Gregory DANYO, Lawrence E. BROWN, Joseph J. BEAMAN a David L. BOURELL. Direct laser fabrication of superalloy cermet abrasive turbine blade tips. *Elsevier* [online]. 2000, **21**(2), 63-73 [cit. 2021-11-27]. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:[10.1016/S0261-3069\(99\)00057-6](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(99)00057-6)
- [12] LEICHTFREID, G. a G. SOUTHOFF. *Hard and Intermetallic Materials*. 5. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2002. ISBN 3-540-42961-1.

- [13] MARI, D. a S. BOLOGNINI. TiMoCN based cermets Part II. Microstruktura and room temperature mechanical properties. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2003, **5**(21), 5-12. ISSN 0263-4368.
- [14] DEUIS, R.L., J.M. YELLUP a C. SUBRAMANIAN. Metal-matrix composite coatings by PTA surfacing. *Composites Science and Technology* [online]. 1998, **58**(2), 299-309 [cit. 2022-01-25]. ISSN 02663538. Dostupné z: doi:10.1016/S0266-3538(97)00131-0
- [15] LAKSHMINARAYANAN, A. K., V. BALASUBRAMANIAN, R. VARAHAMOORTHY a S. BABU. *Predicting the dilution of plasma transferred arc hardfacing of stellite on carbon steel using response surface methodology* [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: doi:10.3365/met.mat.2008.12.779
- [16] XI, Wenchao, Boxue SONG, Yu ZHAO, Tianbiao YU a Jun WANG. Geometry and dilution rate analysis and prediction of laser cladding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2019, **103**(9-12), 4695-4702 [cit. 2022-02-25]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-019-03932-7
- [17] MARTIŠOVITŠ, Viktor. *Základy fyziky plazmy: učebný text pre magisterské štúdium*. 3. Bratislava: Vydavateľstvo UK, 2006. ISBN 80-223-1983-X.
- [18] ŽÁK, Jan a Miroslav NOVÁK. *Teorie svařování*. Brno, 1988. 1. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.
- [19] *Svařování korozivzdorných ocelí* [online]. 1. Brusel: Euro Inox, 2007 [cit. 2022-01-23]. ISBN 978-2-87997-177-3. Dostupné z: https://www.worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_CZ.pdf
- [20] SCHWARZ, Drahomír a Ivo HLAVATÝ. Svařování plazmovým obloukem. *Svět svaru* [online]. 2014, **18**(5), 7-11 [cit. 2022-01-23]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/8914220-Svarovani-plazmovym-obloukem.html>
- [21] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 5. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
- [22] ROHAN, Pavel, Tomáš KRAMÁR a Jaroslav PETR. HSS DEPOSITION BY PTA – FEASIBILITY AND PROPERTIES. *Advances in Science and Technology Research Journal* [online]. 2016, **10**(29), 57-61 [cit. 2022-01-28]. ISSN 2080-4075. Dostupné z: doi:10.12913/22998624/61933
- [23] *Plazmové svařování (navarování)* [online]. Praha, 2010 [cit. 2022-01-25]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/1807039-Plazmove-svarovani-navarovani-15.html>
- [24] KERÄNEN, Marko. *EFFECT OF WELDING PARAMETERS OF PLASMA TRANSFERRED ARC WELDING METHOD ON ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF 12V TOOL STEEL DEPOSIT*. Espoo, 2010. Disertační práce. Aalto University.
- [25] ROHAN, Pavel, Ladislav KOLAŘÍK, Tomáš KRAMÁR a Zdeněk KRŠKA. Navařování plazmatem - ochranné povlaky ve výrobě i výzkumu. *MM Spektrum* [online]. 2015, **21**(11), 6-12 [cit. 2022-01-29]. Dostupné z:

- <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-plazmatem-ochranne-povlaky-ve-vyrobe-i-vyzkumu>
- [26] D'OLIVEIRA, A.S.C.M., R.S.C. PAREDES a R.L.C. SANTOS. Pulsed current plasma transferred arc hardfacing. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2006, **171**(2), 167-174 [cit. 2022-01-28]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.02.269
- [27] TWI [online]. Cambridge: TWI Ltd, 2019 [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-laser-cladding>
- [28] TOYSERKANI, Ehsan, Amir KHAJEPOUR a Stephen F. CORBIN. *Laser Cladding*. 1. Boca Raton: CRC Press, 2004. ISBN 9780429121890.
- [29] KOLAŘÍK, Ladislav, Jan SUCHÁNEK a Marie KOLAŘÍKOVÁ. Navařování metodou WAAM. *MM Spektrum* [online]. 2018, **24**(2), 4-11 [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam>
- [30] *WAAM explained* [online]. Rotterdam: Ramlab, 2019 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.ramlab.com/resources/waam-101/>
- [31] ABE, Nobuyuki, Junji MORIMOTO, Michio TOMIE a Chihiro DOI. Formation of WC-Co layers by an electron beam cladding method and evaluation of the layer properties. *Vacuum* [online]. 2000, **59**(1), 373-380 [cit. 2022-02-11]. ISSN 0042207X. Dostupné z: doi:10.1016/S0042-207X(00)00290-6
- [32] *Electron Beam Cladding* [online]. Nieder-Olm: Evobeam, 2020 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.evobeam.com/en/electron-beam/technology/cladding/>
- [33] SKOTNICOVÁ, Kateřina a Miroslav KURSA. *Prášková metalurgie*. První. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013, 153 s. ISBN 978-80-248-3378-1.
- [34] CHAIRA, Debasis. Powder Metallurgy Routes for Composite Materials Production. *Encyclopedia of Materials: Composites* [online]. Elsevier, 2021, **15**(4), 588-604 [cit. 2022-01-25]. ISBN 9780128197318. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.11703-5
- [35] CHEN, Wenchao, Jinghui WANG, Pengqi CHEN a Jigui CHENG. Microstructure and Property of Sintered Fe-2Cu-0.8C-0.6Mo-2W Materials Prepared From Prediffused Powders. *Frontiers in Materials* [online]. 2020, **7**(11) [cit. 2022-02-25]. ISSN 2296-8016. Dostupné z: doi:10.3389/fmats.2020.560569
- [36] Prášková metalurgie a její využití. *MM Spektrum* [online]. 2002, **8**(11), 10-18 [cit. 2022-01-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/praskova-metalurgie-a-jeji-vyuziti>
- [37] ANAND, Sandeep. Dye penetrant test. *Welding and NDT* [online]. 2015, **5** [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://www.weldingandndt.com/dye-penetrant-test-dpt-lpi-pt-non-destructive-test/>
- [38] PODHORA, Jiří. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. Brno: TDS Brno - SMS, 2005. ISBN 80-903-3864-X.

- [39] KAŠPAROVÁ, Michaela, František ZAHÁLKA a Šárka HOUDKOVÁ. HODNOCENÍ ABRAZIVNÍ A ADHEZIVNÍ ODOLNOSTI MATERIÁLŮ. ŠKODA VÝZKUM s.r.o. [online]. 2009 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z:
http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/metal_09/Lists/Papers/054.pdf
- [40] AISI 304 Stainless Steel. In: *Matmatch* [online]. Mnichov, 2021 [cit. 2022-07-26].
Dostupné z: <https://matmatch.com/learn/material/aisi-304-stainless-steel>
- [41] KSK [online]. Česká Třebová: KSK, s.r.o., 2021 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z:
<https://www.kskct.cz/cs/>
- [42] Univerzální měřicí ústředna. In: *Ahlborn* [online]. Praha: AHLBORN měřicí a regulační technika spol. s r.o., 2020 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z:
<https://www.ahlborn.cz/univerzalni-merici-ustredna-datalogger-ahlborn-almemo-5690-2m-vicekanalova.html>
- [43] PANÁČEK, Tomáš. *Studium degradačních procesů na návarech při interakci s tvrdými částicemi*. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.

+ normy uvedené v textu

Seznam zkratek

PM	Přídavný materiál
PTA	Plasma transfer arc
PAW	Plasma arc welding
PAC	Plasma arc cutting
MIG/MAG	Metal inert gas/Metal active gas
TIG	Tungsten inert gas
DMD	Direct metal deposition
DED	Direct energy deposition
WAAM	Wire and arc additive manufacturing
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
Nib625	Nibasit 625 – P/LFe®
B ₄ C	Karbid boru
Ni	Nikl
Cr	Chrom
Fe	Železo
Nb	Niob
Ta	Tantal
Mo	Molybden
Al	Hliník
Ti	Titan
B	Bor
Co	Kobalt
Mg	Hořčík
Mn	Mangan
Si	Křemík
Cu	Měď
C	Uhlík
N	Dusík
O	Kyslík
S	Síra
P	Fosfor

Seznam obrázků

Obrázek 1: Mikrostruktura slitiny Inconel 625 [®] zobrazená na světelném mikroskopu. [3].....	12
Obrázek 2: SEM snímek protažených precipitátů δ -fáze (stárnutí 650 °C, 500 h). [3]...	13
Obrázek 3: Karbid boru ve formě prášku. [9]	14
Obrázek 4: Typická mikrostruktura slinovaného cermetu. [13]	16
Obrázek 5: Schéma návaru pro výpočet promísení. [15]	18
Obrázek 6: Porovnání hustoty energie vybraných technologií svařování. [18].....	19
Obrázek 7: Srovnání tupého svaru vytvořeného metodou TIG a PAW. [21].....	20
Obrázek 8: Porovnání oblouku PAW (vlevo) a TIG (vpravo). [20]	22
Obrázek 9: Schéma svařovacího hořáku PAW-nezávislé zapojení. [19].....	23
Obrázek 10: Schéma hořáku pro plazmové navařování s práškovým přídavným materiálem. [23]	26
Obrázek 11: Rozdíl v mikrostruktuře při použití pulzního (vlevo) a konstantního proudu (vpravo). [26]	27
Obrázek 12: Schéma laserového navařování s použitím práškového přídavného materiálu. [27]	30
Obrázek 13: Schéma navařování metodou WAAM. [30].....	32
Obrázek 14: Schéma navařování elektronovým paprskem. [32].....	33
Obrázek 15: Kulovitý tvar částic (vlevo) a dendritické částice (vpravo). [33] [35]	35
Obrázek 16: Princip drcení prášků pomocí čelistového drtiče. [33].....	35
Obrázek 17: Princip atomizace plynem. [33].....	36
Obrázek 18: Schéma měření tvrdosti návaru.	38
Obrázek 19: Schéma provedení abrazivní zkoušky. [39]	39
Obrázek 20: Plazmový navařovací automat PPC 250 R 6 (KSK s.r.o.).....	40
Obrázek 21: Uchycení vzorku během navařování.	41
Obrázek 22: Univerzální měřicí ústředna Almemo 5690-2. [42]	43
Obrázek 23: Umístění termočlánků na vzorku.	43
Obrázek 24: Mikroskop Zeiss Neophot 21.....	46
Obrázek 25: Metalografický výbrus návaru (vzorek 1).....	47
Obrázek 26: Metalografický výbrus návaru (vzorek 5).....	47
Obrázek 27: Metalografický výbrus návaru (vzorek 7).....	47

Obrázek 28: Záznam z EDS analýzy s vyznačenými píky jednotlivých prvků.	48
Obrázek 29: Snímek ze světelného mikroskopu s viditelnými vtisky po měření tvrdosti.	49
Obrázek 30: Vzorek číslo 1, 100 % Nibasit 625 – P/LFe®.	51
Obrázek 31: Graf průběhu teploty ve vzorku. Vzorek číslo 1, 100 % Nibasit 625 – P/LFe®.	51
Obrázek 32: Vzorek číslo 2, 100 % Nibasit 625 – P/LFe®.	52
Obrázek 33: Graf průběhu teploty ve vzorku. Vzorek číslo 2, 100 % Nibasit 625 – P/LFe®.	52
Obrázek 34: Vzorek číslo 4, 85 % Nibasit 625 – P/LFe®, 15 % B ₄ C.	53
Obrázek 35: Graf průběhu teploty ve vzorku. Vzorek číslo 4, 85 % Nibasit 625 – P/LFe®, 15 % B ₄ C.	53
Obrázek 36: Vzorek číslo 5, 85 % Nibasit 625 – P/LFe®, 15 % B ₄ C.	54
Obrázek 37: Graf průběhu teploty ve vzorku. Vzorek číslo 5, 85 % Nibasit 625 – P/LFe®, 15 % B ₄ C.	54
Obrázek 38: Vzorek v 30 % B ₄ C před úpravou parametrů navařování.	55
Obrázek 39: Vzorek číslo 7, 70 % Nibasit 625 – P/LFe®, 30 % B ₄ C.	56
Obrázek 40: Graf průběhu teploty ve vzorku. Vzorek číslo 7, 70 % Nibasit 625 – P/LFe®, 30 % B ₄ C.	56
Obrázek 41: Vzorek číslo 8, 70 % Nibasit 625 – P/LFe®, 30 % B ₄ C.	57
Obrázek 42: Graf průběhu teploty ve vzorku. Vzorek číslo 8, 70 % Nibasit 625 – P/LFe®, 30 % B ₄ C.	57
Obrázek 43: Makrostruktura návaru se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe® (vzorek 1).	58
Obrázek 44: Makrostruktura návaru s 15 % B ₄ C (vzorek 5).	59
Obrázek 45: Makrostruktura návaru s 30 % B ₄ C (vzorek 7).	59
Obrázek 46: Analýza částic v programu ImageJ (vzorek 5 nahoře a vzorek 7 dole).	60
Obrázek 47: Hranice mezi návarem a ZM, kraj návaru vlevo a střed návaru vpravo (vzorek 5) – OM, 240x.	61
Obrázek 48: Mikrostruktura návaru pod povrchem (vzorek 5) – OM, 240x.	62
Obrázek 49: Mikrostruktura ve středu návaru (vzorek 5) – OM, 240x.	63
Obrázek 50: Hranice mezi návarem a ZM, kraj návaru vlevo a střed návaru vpravo (vzorek 7) – OM, 240x.	63

Obrázek 51: Mikrostruktura návaru pod povrchem (vzorek 7) – OM, 240x.	64
Obrázek 52: Mikrostruktura ve středu návaru (vzorek 7) – OM, 240x.....	65
Obrázek 53: Porovnání okolí částic B ₄ C (vzorek 5 vlevo a vzorek 7 vpravo) – OM, 500x.	65
Obrázek 54: SEM snímek částice B ₄ C a jejího okolí – EM, 1000x.	66
Obrázek 55: SEM snímek mikrostruktury u povrchu návaru (vlevo) a na rozhraní se základním materiálem (vpravo) – EM, 150x.	67
Obrázek 56: Druhy částic vyskytující se v návaru – EM, 750-4000x.	68
Obrázek 57: SEM snímek s vyznačenými místy měření chemického složení.	69
Obrázek 58: Průběh tvrdosti návaru Nib625.	71
Obrázek 59: Průběh tvrdosti návaru Nib625 + 15 % B ₄ C.	72
Obrázek 60: Průběh tvrdosti návaru Nib625 + 30 % B ₄ C.	73
Obrázek 61: Vzorek 2 (vlevo) s etalonem po abrazivní zkoušce.....	74
Obrázek 62: Vzorek 4 (vlevo) s etalonem po abrazivní zkoušce.....	75
Obrázek 63: Vzorek 8 (vlevo) s etalonem po abrazivní zkoušce.....	76
Obrázek 64: Detaily stopy opotřebení (vzorek 2).	77
Obrázek 65: Detaily stopy opotřebení (vzorek 4).	77
Obrázek 66: Detaily stopy opotřebení (vzorek 8).	77
Obrázek 67: Opotřebení na vzorku 2, zvětšení výškového profilu 2000 %.	78
Obrázek 68: Opotřebení na vzorku 4, zvětšení výškového profilu 2000 %.	79
Obrázek 69: Opotřebení na vzorku 8, zvětšení výškového profilu 2000 %.	79

Seznam tabulek

Tabulka 1: Chemické složení slitiny Inconel 625 [®] [2].....	10
Tabulka 2: Chemické složení oceli X5CrNi18-10 [40].....	42
Tabulka 3: Parametry navařovacího automatu PPC 250 R6.....	42
Tabulka 4: Chemické složení prášku Nibasit 625 – P/LFe [®]	44
Tabulka 5: Parametry použité při navařování vzorků se 100 % Nibasitu 625 – P/LFe [®] .	44
Tabulka 6: Parametry použité při navařování vzorků s 15 % B ₄ C.	45
Tabulka 7: Parametry použité při navařování vzorků s 30 % B ₄ C.	45
Tabulka 8: Parametry abrazivní zkoušky. [43]	50
Tabulka 9: Výsledky měření chemického složení metodou SEM EDS.	70
Tabulka 10: Naměřené hodnoty podpovrchové tvrdosti HV1.....	73
Tabulka 11: Výsledky abrazivní zkoušky – hmotnostní úbytky.....	78
Tabulka 12: Výsledky abrazivní zkoušky – objemové úbytky	80

Seznam příloh

Příloha 1: Certifikát práškového PM Nibasit 625 – P/LFe®	93
Příloha 2: Mapy chemického složení 1	94
Příloha 3: Mapy chemického složení 2	96
Příloha 4: Naměřené hodnoty tvrdosti návarů	98
Příloha 5: Zprávy z profilometru	99

Příloha 1: Certifikát práškového PM Nibasit 625 – P/LFe®

DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE



Sonderwerkstoffe

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

Seite/page 1 von/of 1

Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co. KG - 47803 Krefeld - Germany

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

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

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

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

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

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

Siebanalyse/Sieve analysis:

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

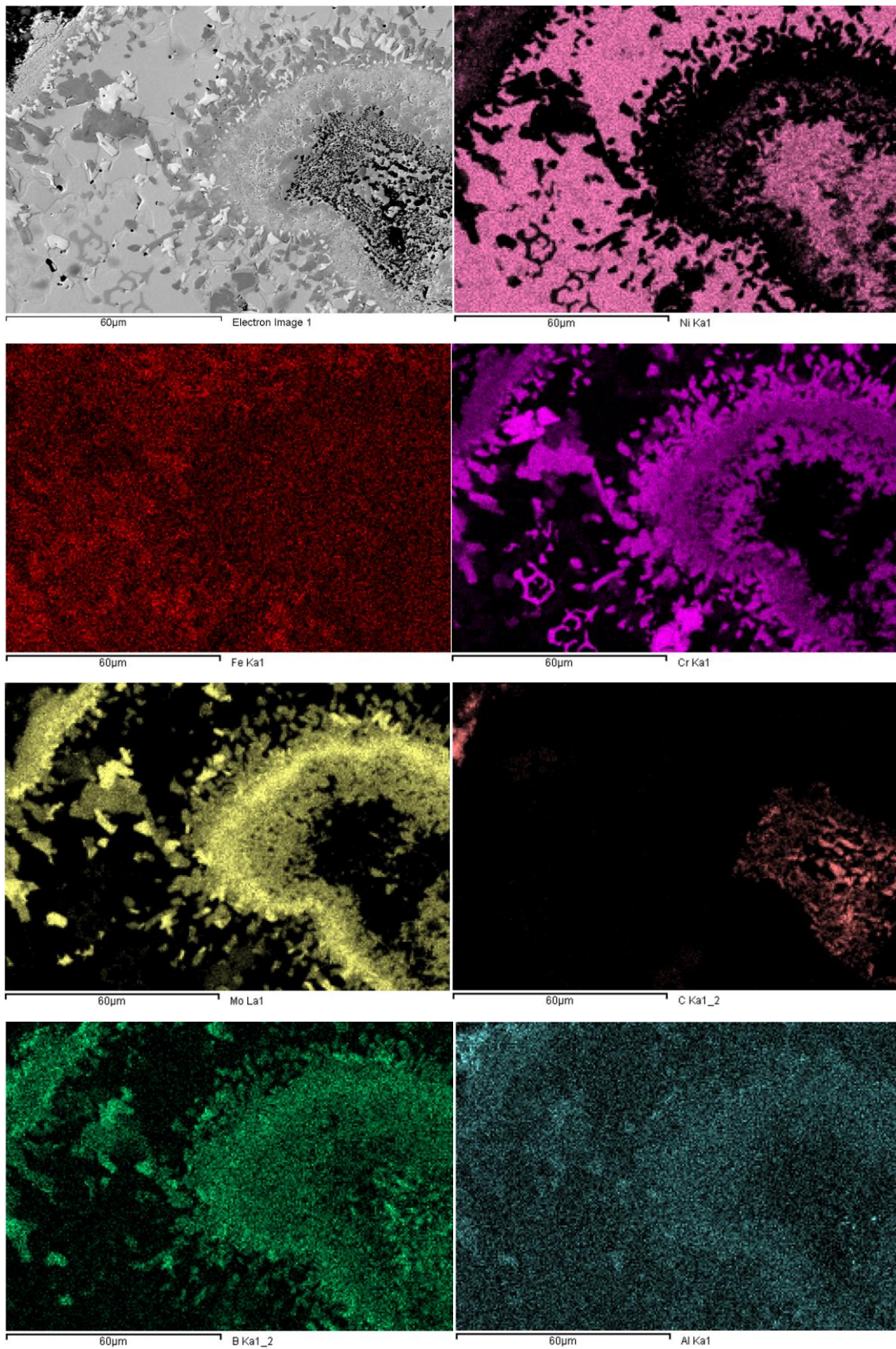
Sonstige Eigenschaften/Other characteristics:

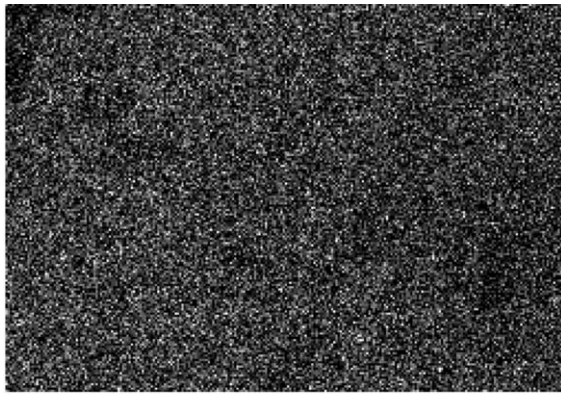
Charge Heat No.	Fließverhalten (s/50g) Flow rate (s/50g)	Schüttdichte (g/cm³) Apparent density (g/cm³)
258042	16,3	4,54

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

Der Abnahmebeauftragte/Authorized representative
Sinan Turan

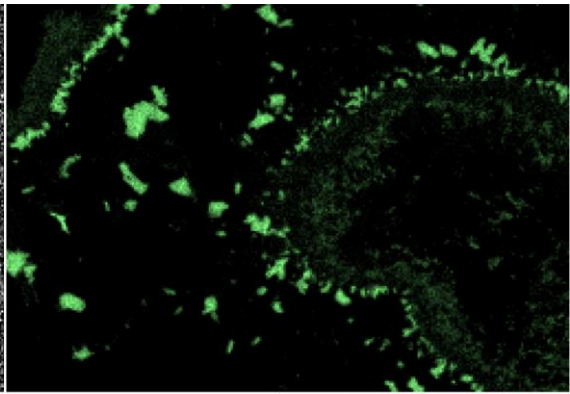
Příloha 2: Mapy chemického složení 1





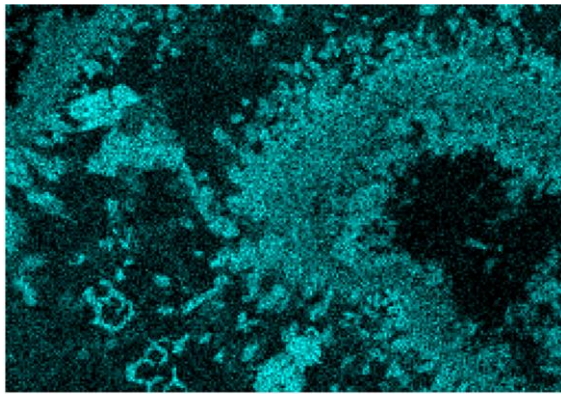
60µm

Co Ka1



60µm

Nb La1



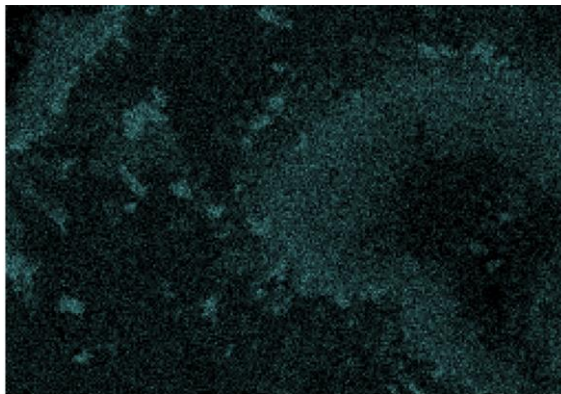
60µm

Mn Ka1



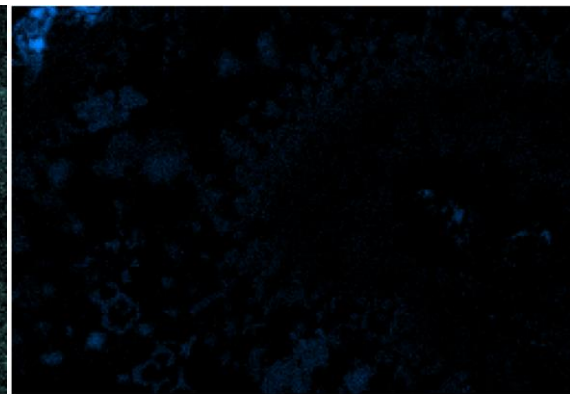
60µm

Si Ka1



60µm

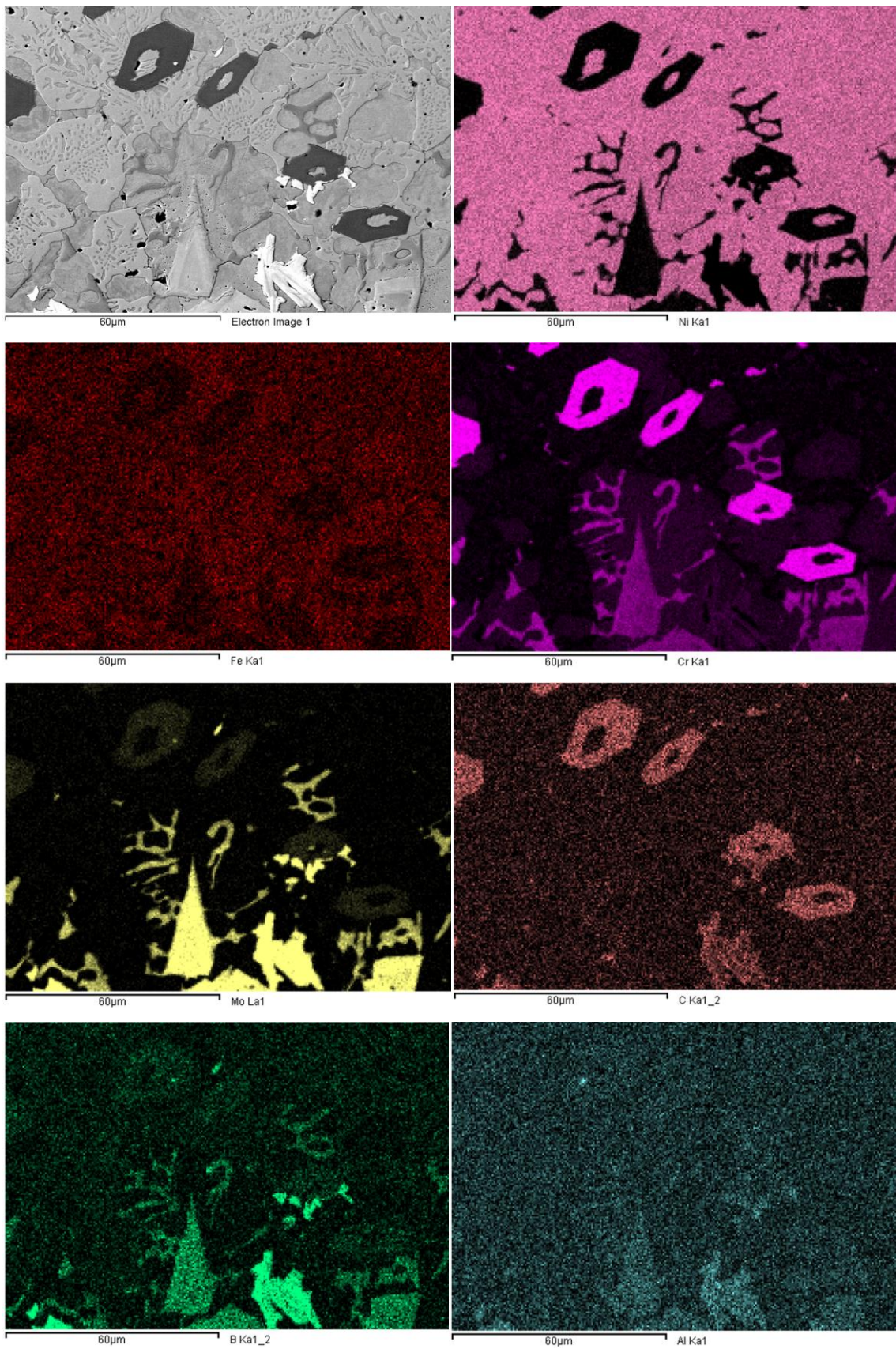
P Ka1

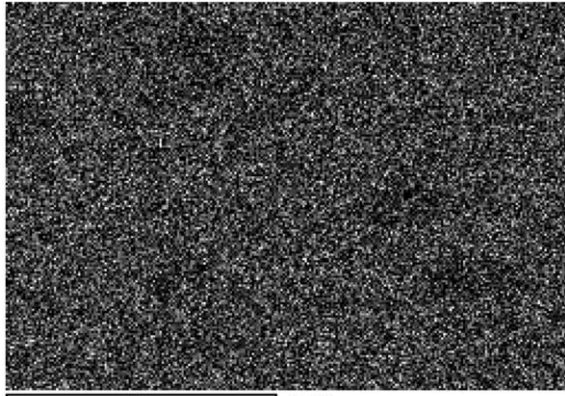


60µm

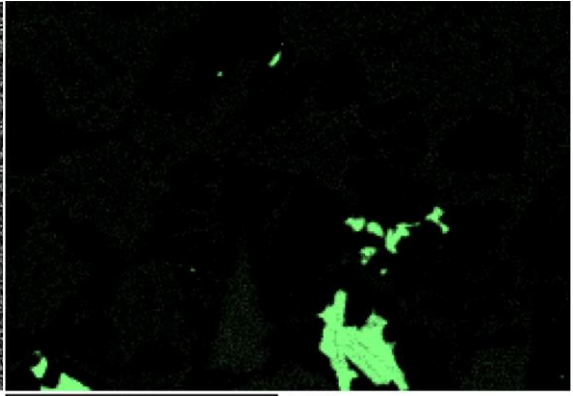
O Ka1

Příloha 3: Mapy chemického složení 2

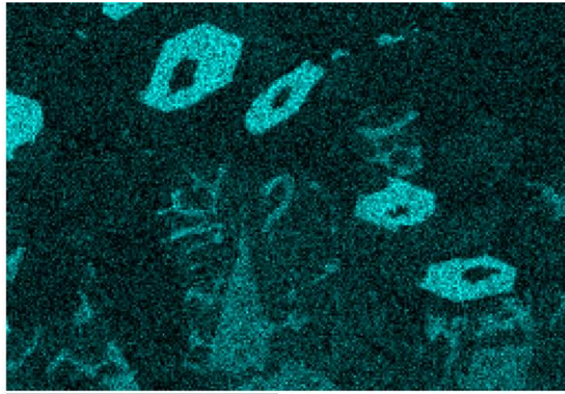




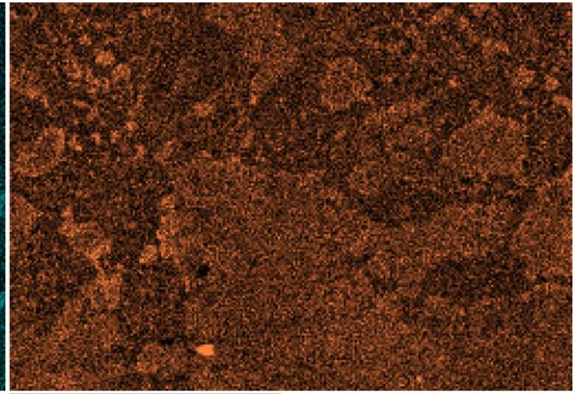
60µm Co Kα1



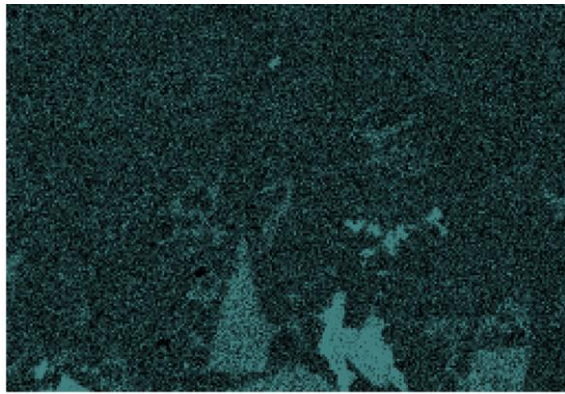
60µm Nb Lα1



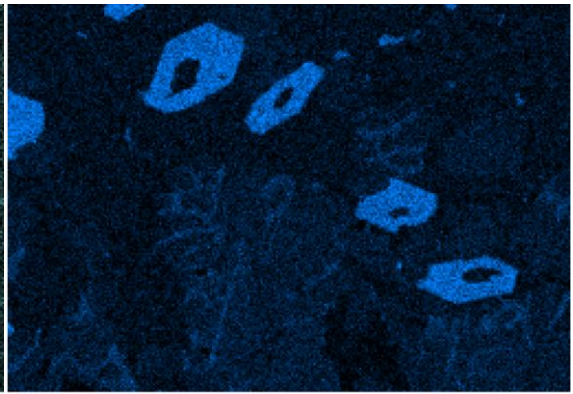
60µm Mn Kα1



60µm Si Kα1



60µm P Kα1



60µm O Kα1

Příloha 4: Naměřené hodnoty tvrdosti návarů

vzdálenost od hranice natavení [mm]	vzorek 1 Nib625	vzorek 5 Nib625+15 % B ₄ C	vzorek 7 Nib625+30 % B ₄ C
1,5	217,7	862,2	1031,5
1,25	202,9	798,2	1002,9
1	200,4	561,9	1084,6
0,75	200,8	730	1030,6
0,5	205	611,9	764,5
0,25	203,5	622	491,1
0	209	660,2	367,9
-0,25	176,8	632,4	203,3
-0,5	176,9	616,4	197
-0,75	178,5	542,8	190
-1	181,3	213,3	199,6
-1,25	188,6	189,6	194,3
-1,5	183,9	187,7	192,7
-1,75	186,5	197,3	192,1
-2	188,1	186,3	197,7

Hodnoty podpovrchové tvrdosti:

číslo měření	vzorek 1 Nib625	vzorek 5 Nib625+15 % B ₄ C	vzorek 6 Nib625+30 % B ₄ C
1	217,7	862,2	1031,5
2	227,7	755,3	1032,7
3	200,2	839,5	1049,4
4	215,6	778,7	1093,4
5	209	887,9	1030,9
průměr	214	825	1048

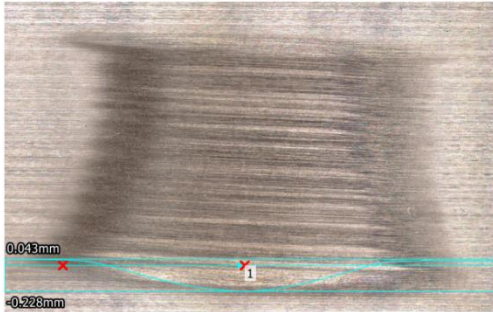
Příloha 5: Zprávy z profilometru

Vzorek 2

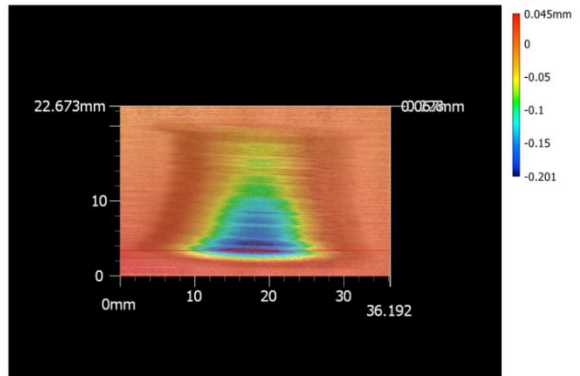
Profile measurement VR-20220729_094511

KEYENCE VR-6000 Series

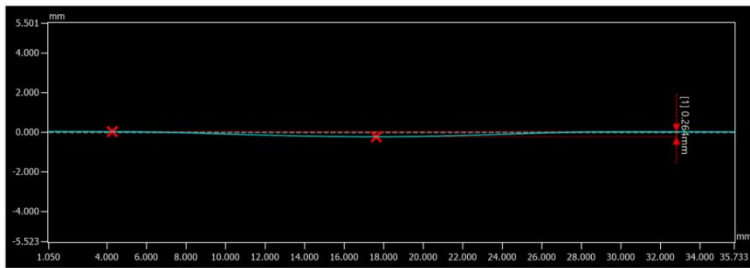
Main image



3D image



Profile



Measurement result

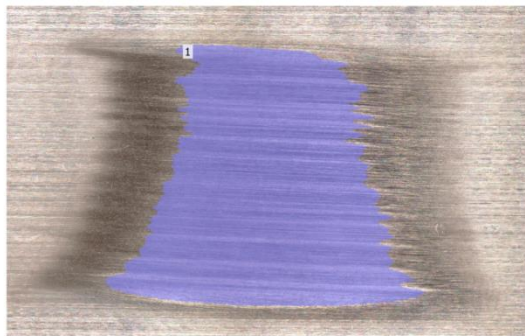
No.	Measurement name	Measured value	Unit
1	Max.-Min.(Vertical)1	0.264	mm

Measurement date and time: 7/29/2022 9:45:09 AM
Measurement conditions: 12x Standard

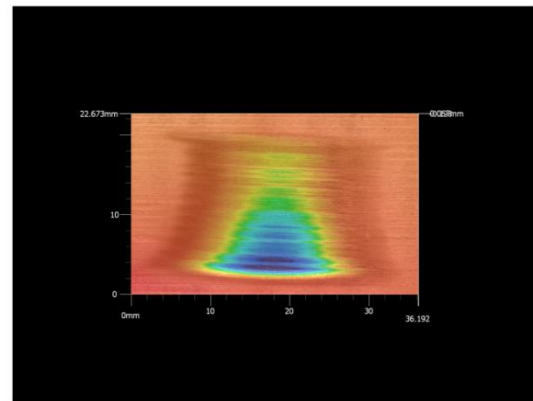
Volume & area measurement VR-20220729_094511

KEYENCE VR-6000 Series

Main image

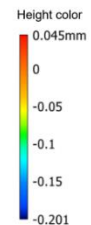


3D image



Measurement result

	Volume	C.S. area	Surface area	Surface area/C.S. area	Area ratio	Average depth	Max. depth
	mm ³	mm ²	mm ²		%	mm	mm
Total	23.469	253.438	254.048	1.002	30.832	-0.093	-0.249
Max.	23.469	253.438	254.048	1.002	30.832	-0.093	-0.249
Min.	23.469	253.438	254.048	1.002	30.832	-0.093	-0.249
Ave.	23.469	253.438	254.048	1.002	30.832	-0.093	-0.249
1	23.469	253.438	254.048	1.002	30.832	-0.093	-0.249



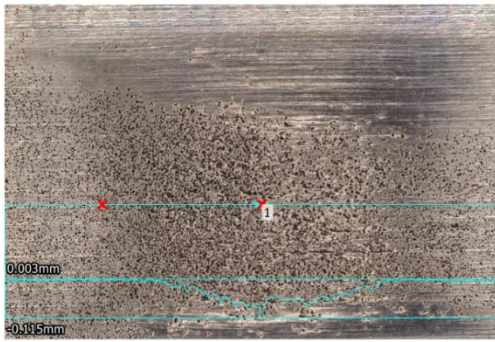
Measurement date and time: 7/29/2022 9:45:09 AM
Measurement conditions: 12x Standard

Vzorek 4

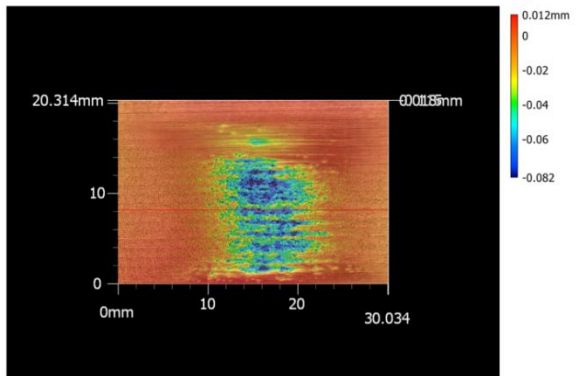
Profile measurement VR-20220729_095711

KEYENCE VR-6000 Series

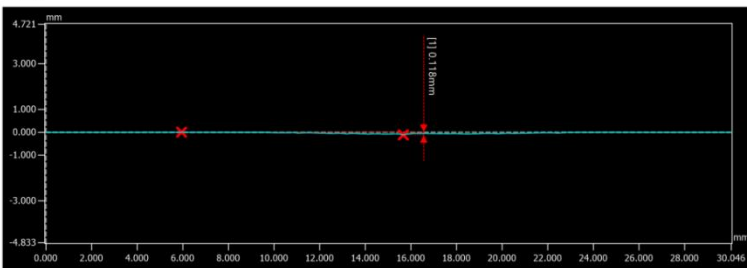
Main image



3D image



Profile



Measurement result

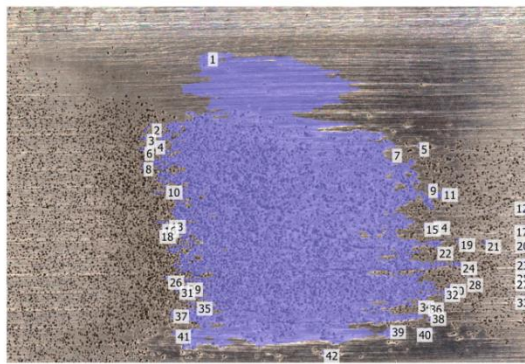
No.	Measurement name	Measured value	Unit
1	Max.-Min.(Vertical)1	0.118	mm

Measurement date and time: 7/29/2022 9:57:10 AM
Measurement conditions: 12x Standard

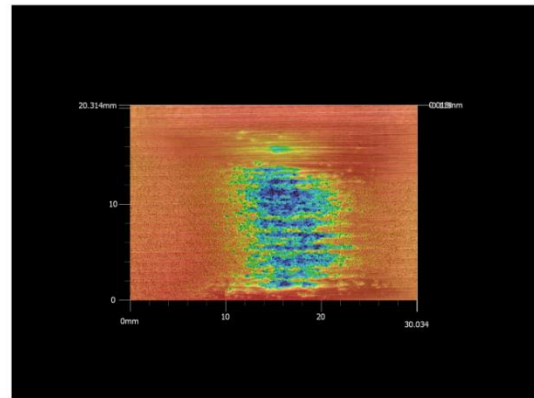
Volume & area measurement VR-20220729_095711

KEYENCE VR-6000 Series

Main image



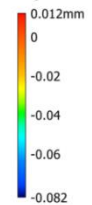
3D image



Measurement result

	Volume mm ³	C.S. area mm ²	Surface area mm ²	Surface area/C.S. area	Area ratio %	Average depth mm	Max. depth mm
Total	6.875	191.415	192.660	42.250	31.312	-0.529	-0.964
Max.	6.810	185.981	187.198	1.024	30.424	-0.009	-0.009
Min.	0.000	0.056	0.056	1.000	0.009	-0.037	-0.115
Ave.	0.164	4.557	4.587	1.006	0.746	-0.013	-0.023
1	6.810	185.981	187.198	1.007	30.424	-0.037	-0.115
2	0.002	0.132	0.133	1.005	0.022	-0.011	-0.017
3	0.001	0.119	0.119	1.005	0.019	-0.011	-0.021
4	0.001	0.058	0.058	1.004	0.009	-0.011	-0.015
5	0.001	0.087	0.088	1.004	0.014	-0.012	-0.019
6	0.001	0.070	0.071	1.010	0.011	-0.013	-0.021
7	0.001	0.125	0.125	1.003	0.020	-0.012	-0.017
8	0.002	0.120	0.122	1.013	0.020	-0.014	-0.030
9	0.002	0.128	0.129	1.010	0.021	-0.013	-0.032

Height color



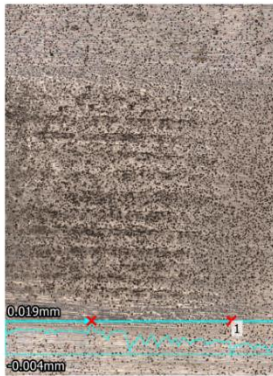
Measurement date and time: 7/29/2022 9:57:10 AM
Measurement conditions: 12x Standard

Vzorek 8

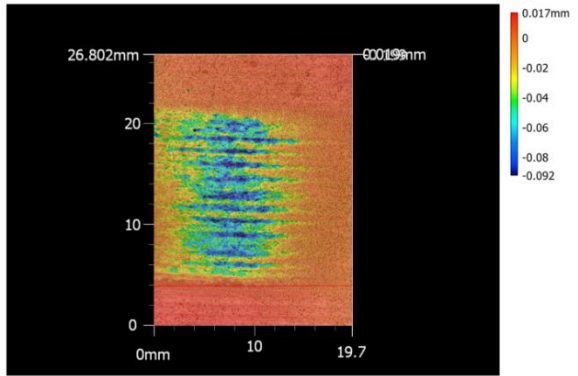
Profile measurement VR-20220729_095301

KEYENCE VR-6000 Series

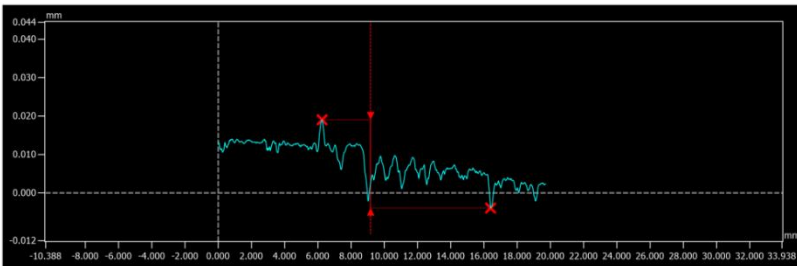
Main image



3D image



Profile



Measurement result

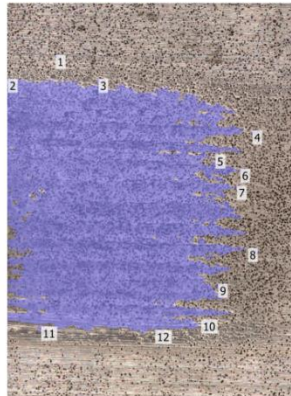
No.	Measurement name	Measured value	Unit
1	Max.-Min.(Vertical)1	0.023	mm

Measurement date and time: 7/29/2022 9:53:00 AM
Measurement conditions: 12x Standard

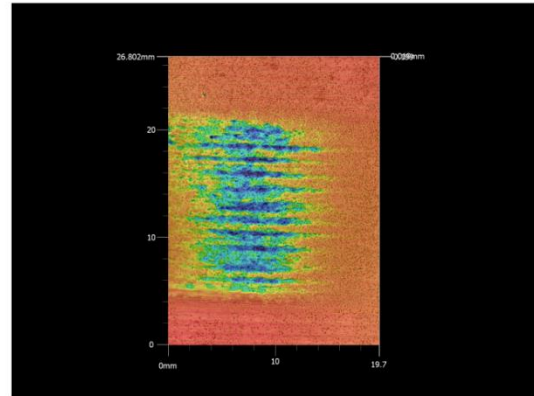
Volume & area measurement VR-20220729_095301

KEYENCE VR-6000 Series

Main image



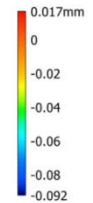
3D image



Measurement result

	Volume mm ³	C.S. area mm ²	Surface area mm ²	Surface area/C.S. area	Area ratio %	Average depth mm	Max. depth mm
Total	8.358	225.994	227.836	12.259	42.712	-0.173	-0.452
Max.	8.345	224.821	226.647	1.203	42.490	-0.008	-0.011
Min.	0.001	0.057	0.067	1.001	0.011	-0.037	-0.196
Ave.	0.697	18.833	18.986	1.022	3.559	-0.014	-0.038
1	0.002	0.057	0.068	1.203	0.011	-0.037	-0.087
2	8.345	224.821	226.647	1.008	42.490	-0.037	-0.196
3	0.001	0.122	0.122	1.001	0.023	-0.008	-0.011
4	0.001	0.087	0.087	1.004	0.016	-0.009	-0.016
5	0.001	0.090	0.090	1.006	0.017	-0.010	-0.016
6	0.001	0.067	0.067	1.005	0.013	-0.010	-0.018
7	0.001	0.080	0.080	1.007	0.015	-0.010	-0.017
8	0.001	0.126	0.126	1.005	0.024	-0.010	-0.019
9	0.002	0.163	0.164	1.007	0.031	-0.011	-0.024

Height color



Measurement date and time: 7/29/2022 9:53:00 AM
Measurement conditions: 12x Standard