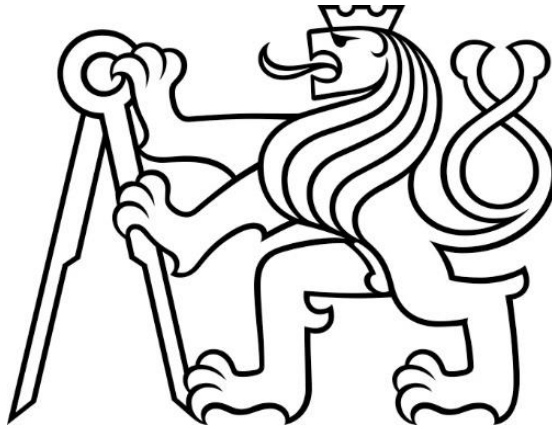


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

PLAZMOVÉ NAVAŘOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO
TVÁŘENÍ ZA STUDENA

PLASMA HARDFACING OF COLD FORMING
TOOLS

Autor: Bc. Jakub Karmáček

Studijní obor: Výrobní inženýrství

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

2023

Zadání



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Karmáček** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **473446**
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 nástrojů pro tváření za studena

Název diplomové práce anglicky:

Plasma hardfacing of cold forming tools

Pokyny pro vypracování:

Proveďte literární rešerši na téma materiály nástrojů pro tváření za studena, navařování činných ploch.
Proveďte navaření zkušebních návarů na polotovar segmentu pro ohráňovací lisý. Vyhodnoťte základní vlastnosti navařených vrstev v porovnání se stávajícím materiálem.
Proveďte závěrečné zhodnocení navařených ploch

Seznam doporučené literatury:

Brezinová J, Viňáš J, Guzanová A, Živčák J, Brezina J, Sailer H, Vojtko M, Džupon M, Volkov A, Kolařík L, Rohan P, Puchý V. Selected Properties of Hardfacing Layers Created by PTA Technology. *Metals*. 2021; 11(1):134. <https://doi.org/10.3390/met11010134>
Z. Gronostajski, Z. Pater, L. Madej, A. Gontarz, L. Lisiecki, A. Łukaszek-Solek, J. Łuksza, S. Mróz, Z. Muskalski, W. Muzykiewicz, M. Pietrzyk, R.E. Śliwa, J. Tomczak, S. Wiewiórowska, G. Winiarski, J. Zasadziński, S. Ziólkiewicz, Recent development trends in metal forming, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Volume 19, Issue 3, 2019, Pages 898-941, ISSN 1644-9665, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2019.04.005>
Hirpara KP, Valaki JB, Chaudhari MD, Siddhpura MA. A comprehensive review on recent developments in materials and technological parameters for plasma transferred arc hardfacing process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2023;0(0). doi:10.1177/09544089231153363

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a v seznamu uvedl veškerou použitou literaturu.

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

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu panu Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D., za cenné rady při psaní práce a za pomoc při provádění měření. Chtěl bych mu poděkovat za čas, který se mnou strávil, a za trpělivost, kterou se mnou měl.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Miroslavu Sahulovi, Ph.D., za pomoc v metalografické laboratoři a při práci s elektronovým mikroskopem. Mé poděkování patří také paní doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., za pomoc při práci s optickými mikroskopy.

Kromě lidí z ČVUT bych chtěl poděkovat paní prof. Ing. Evě Schmidové, Ph.D., za poskytnutí konzultace ohledně kontaktní únavy.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Teoretická část.....	10
2.1	Nanášení ochranných povlaků a vrstev pro zvýšení životnosti.....	10
2.1.1	Nanášení tenkých povlaků.....	11
2.1.2	Žárový nástřik	13
2.1.3	Navařování	14
2.2	Materiály nástrojů pro tváření za studena	17
2.2.1	Materiály použité pro navařování segmentů ohraňovacích lisů	18
2.3	Kontaktní únava	27
3	Experimentální část	28
3.1	Použité přístroje a zařízení.....	31
3.1.1	Plazmový navařovací automat.....	31
3.1.2	Univerzální měřicí ústředna	32
3.1.3	Světelný mikroskop.....	33
3.1.4	Tvrdoměr.....	34
3.1.5	Skenovací elektronový mikroskop	35
3.2	Uspořádání pracoviště navařování	36
3.3	Rozvržení experimentu	39
4	Výsledky a diskuse.....	42
4.1	Navařování	42
4.2	Mikrostruktura	52
4.2.1	Hadfieldova ocel	52
4.2.2	HSS 23	63
4.3	Mikrotvrdoměr	67
4.3.1	Návary	67
4.3.2	Nástrojová ocel 19 520.....	70
5	Závěr.....	71
	Seznam použité literatury.....	73
	Seznam obrázků	80
	Seznam tabulek	82
	Seznam grafů.....	83
	Seznam příloh.....	84

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá plazmovým navařováním nástrojů pro práci za studena, konkrétně navařováním polotovarů segmentů pro ohraňovací lisy. Práce má za cíl vhodnými materiály provést navaření polotovarů segmentů pro ohraňovací lisy. Je provedeno vyhodnocení kvality výsledných navařů z pohledu geometrie a kvality metalurgického spojení. Návary jsou analyzovány z pohledu mechanických vlastností a struktury.

Klíčová slova

Plazmové navařování (PTA), povlaky, metalurgické spojení, nástrojové materiály, rychlořezná ocel, manganové oceli.

Abstract

The master thesis deals with plasma hardfacing of cold forming tools, specifically hardfacing of semi-finished segments for bending presses. The thesis aims to hardface semi-finished segments for bending presses using suitable materials. An evaluation of the quality of the resulting hardfacing layers in terms of geometry and quality of the metallurgical connection is carried out. The hardfacing layers are analysed in terms of mechanical properties and structure.

Keywords

Plasma transferred arc (PTA), coatings, metallurgical connection, tool materials, high speed steel, manganese steels.

Seznam zkratek

PTA	Plasma Transferred Arc
PVD	Physical Vapor Deposition
CVD	Chemical Vapor Deposition
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition
MOCVD	MetalOrganic Chemical Vapor Deposition
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
TIG	Tungsten Inert Gas
MMC	MultiMediaCard
STEM	Scanning Transmission Electron Microscopy
WDS	Wave Dispersive Spectroscopy
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
IH	Horní proud (High – metoda PTA)
IL	Spodní proud (Low – metoda PTA)
DIC	Differential Interference Contrast
SEM	Scanning Electron Microscope
HV	Hardness Vickers

1 Úvod

Tváření za studena hraje v současném světě zásadní roli ve strojírenské výrobě, a to především díky automobilovému průmyslu, kde je tváření za studena zastoupeno ve velké míře. Jedno z nejvýznamnějších odvětví tváření za studena je lisování. Při lisování jsou velmi namáhanou komponentou lisů lisovací nástroje.

V důsledku namáhání lisovacích nástrojů zapříčiněného například vysokým počtem cyklů, které nástroje vykonají, nebo materiálem, ze kterého jsou lisované součásti vyráběny, dochází k rychlému opotřebení či destrukci lisovacích nástrojů. Lisy nadále nemohou plnit svoji funkci, a proto musí dojít k výměně nebo renovaci lisovacího nástroje.

Ohraňovací lisy nejsou výjimkou. I zde dochází k poškození nástroje. Obecně se nástroje pro ohraňovací lisy vyrábí z materiálů, které jsou dražší (nástrojová ocel) a výměna nástroje není ekonomicky výhodná, takže se často přechází k renovacím lisovacích nástrojů.

Renovace se provádí mnoha způsoby, z nichž je navařování jedním z nejvíce perspektivních. Plazmové navařování (PTA) je vhodnou metodou, jelikož je možné vytvořit návar z materiálu, který se výrazně liší od základního materiálu svými vlastnostmi i odolností. Metodu PTA lze dobře automatizovat, což má za následek minimální vliv lidského faktoru na výsledek.

Právě možnosti vytvoření heterogenního spojení přídavného materiálu a základního materiálu bylo využito ve zmíněném případě nástrojů pro ohraňovací lisy. Myšlenka byla následující. Pro snížení nákladů spojených s materiálem na výrobu nástroje bude jako základní materiál použita levnější varianta a pouze na funkční plochu dojde k navaření dražšího materiálu, což by mělo snížit jak náklady na materiál, tak zároveň prodloužit životnost nástroje.

V teoretické části práce jsou popisovány metody možného nanášení povlaků a vrstev s cílem zvýšení životnosti nástroje. Zároveň jsou zde popsány materiály vhodné pro nástroje pro tváření za studena a skupiny materiálů zvolené pro navařování. Je zde zmíněna kontaktní únava. V experimentální části práce je popsáno pracoviště, samotné navaření funkčních ploch a jejich následná analýza.

2 Teoretická část

V teoretické části diplomové práce bude rozebrána problematika nanášení ochranných povlaků a vrstev, kde budou přiblížena témata jako nanášení tenkých povlaků (PVD a CVD) a žárový nástřik. Na závěr teoretické části bude popsána technologie navařování, konkrétně plazmového navařování.

Poté budou popsány obecně materiály používané pro nástroje pro tváření za studena. Následně budou podrobněji rozebrány vysokolegované oceli a rychlořezné oceli a jejich druhy.

Poslední část bude zaměřena na problematiku kontaktní únavy, která je úzce spjata s ohraňovacími lisami.

2.1 Nanášení ochranných povlaků a vrstev pro zvýšení životnosti

Existuje mnoho způsobů, kterými lze zvýšit životnost součástí. Jedním z nich je nanášení ochranných povlaků na povrch součástí. V případě využití kovů se používají pro nanášení ochranných povlaků technologie navařování nebo technologie žárového nástřiku. Kromě technologie navařování a technologie žárových nástřiků budou popsány i metody PVD a CVD, které též slouží k zvýšení životnosti součástí.

Zásadní rozdíl mezi navařováním a žárovými nástřiky, popřípadě tenkými povlaky, je ve výsledné tloušťce. Tenké povlaky zastoupené metodou PVD a CVD dosahují tloušťky kolem jednotek až desítek mikrometrů. Žárové nástřiky jsou charakteristické tloušťkou okolo jednoho milimetru. Návary jsou tlustší a svojí tloušťkou se pohybují až do několika milimetrů, z čehož vyplývá větší objem materiálu, který může být ztracen opotřebením, a stále nedojde k výraznému omezení funkčnosti ochranného povlaku.

2.1.1 Nanášení tenkých povlaků

Do kategorie nanášení tenkých povlaků lze zařadit metody PVD a CVD. Obecně tenké povlaky slouží ke zvýšení životnosti součásti, ke snížení tření nebo například ke zvýšení produktivity výrobního procesu [1] [2] [3].

PVD

Metoda PVD je řazena mezi fyzikální metody. Jde o proces relativně bezúdržbový a ekologický v porovnání s ostatními metodami nanášení tenkých povlaků. PVD funguje na principu nanášení tenké vrstvy atomů. Tyto částice jsou odpařovány z pevné nebo kapalně fáze na součást, kde kondenzují. Celý proces probíhá nejčastěji ve vakuu, kdy dosahovaná teplota v komoře je zhruba do 500 °C. Může probíhat i v prostředí, které je tvořeno nízkotlakými plyny. Výsledná tloušťka povlaku je několik až tisíce nanometrů [1] [2] [3].

Metoda PVD se používá pro součásti, u kterých je žádoucí zvýšení odolnosti proti opotřebení, vysoká tvrdost nebo odolnost proti korozi. Hlavní použití nachází metoda PVD u povlakování obráběcích nástrojů. Kromě obráběcích nástrojů může PVD sloužit i k povlakování forem pro slévání nebo zápustek při tváření. Využívá se také pro povlaky, které mají hlavně estetickou funkci. Zde se jedná například o hodinky [1] [2] [3].

Metoda PVD se dále dělí na podskupiny jako jsou vakuové napařování, naprašování, iontové povlakování [1] [2] [3].

CVD

Metoda CVD je řazena mezi chemické metody tvorby tenkých vrstev. Metoda CVD funguje stejně jako metoda PVD pro nanášení tenkého povlaku na součást. U metody CVD ovšem dochází k rozkladu molekul plynu přiváděného do místa povlakování a následným chemickým reakcím částic s povrchem součásti, na které se tím tvoří povlak. Výsledkem chemických reakcí jsou nežádoucí vedlejší produkty. Tyto produkty je nutné odvádět z místa nanášení. Proces CVD probíhá za zvýšených teplot, teplota v komoře při nanášení může dosahovat až 1100 °C, z čehož vyplývá větší energetická náročnost než u metody PVD. Výsledná tloušťka povlaku se pohybuje do 30 mikrometrů [1] [2] [3].

Technologie CVD má hlavní využití v elektrotechnice, u polovodičů nebo pro žáruvzdorné materiály [4].

CVD se dále dělí na podskupiny jako je například PECVD a MOCVD, které se mimo jiné snaží snížit teplotu nanášení a tím snížit energetickou náročnost procesu. Další modifikace je metoda LPCVD, která využívá snížení tlaku v komoře při nanášení. [1] [2] [3].

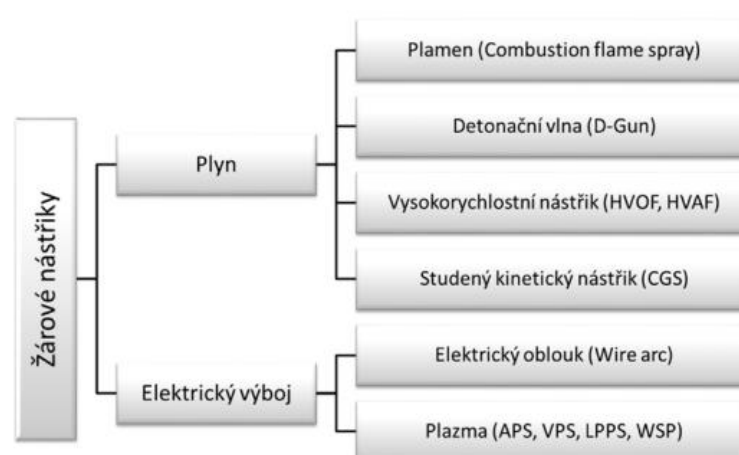
2.1.2 Žárový nástřik

Hlavní rozdíl mezi návarem a povlakem vytvořeným žárovým nástřikem je v tom, že u žárového nástřiku povlak vzniká natavením či roztavením částic materiálu, které se přichycují na podložku (součást). Podložka je nahřívána pouze působením kinetické energie dopadajících částic, nebo zbytkovým teplem ze zdroje, který natavuje částice. Částice jsou nataveny nebo zahřívány na teplotu blízkou teplotě tání. Nedochozí ke vzniku metalurgického spojení. V okamžiku dopadu ohřátých částic na podložku dochází k jejich deformaci do tvaru lamel (splatů), vychladnutí a přichycení na povrchu podložky. Jednotlivé částice dohromady (prostřednictvím překrývání a spojování částic) tvoří kompaktní povlak [5] [6] [7].

Částice pro tvorbu výsledného povlaku jsou často kovové, ovšem používá se i keramika nebo plast. Tyto částice jsou transportovány z hořáku nebo pistole na základní materiál za pomoci plynu, který částice urychluje a nahřívá [5] [6] [7].

Žárové nástřiky se používají zejména v leteckém a automobilovém průmyslu. Své uplatnění nachází i v energetice. Využívají se pro tvorbu povlaků se zvýšenou odolností proti opotřebení a odolností proti korozi [5] [6] [7].

Žárové nástřiky se dělí podle zdroje tepla, který slouží k ohřívání prášku, drátů nebo tyčinek, ze kterých se tvoří natavené částice (Obrázek 1) [5] [6] [7].



Obrázek 1 Rozdělení technologie žárového nástřiku [5]

2.1.3 Navařování

Jde o technologii, která byla odvozena ze svařování, ovšem pro navařování se volí nižší parametry pro snížení závaru. Dochází k natavení jak přídavného, tak základního materiálu a vzniká metalurgické spojení. Vznik metalurgického spojení je výhodný z pohledu lepší přilnavosti návaru na základním materiálu v porovnání s žárovým nástřikem. Přídavný materiál je nanášen ve formě drátu, prášku nebo tyčinky na základní materiál.

Technologie navařování se používá pro zvýšení tvrdosti povrchu součástí, zlepšení odolnosti proti opotřebení i zvýšení korozní odolnosti. Velké zastoupení má navařování při renovaci používaných dílů. Metoda navařování WAAM (Wire + Arc Additive Manufacturing) nachází využití v technologii 3D tisku, kde se používá pro výrobu rozměrných dílců složitě vyrobitelných jinou metodou.

Navařování se dělí nejčastěji dle způsobu ohřevu základního a přídavného materiálu, což se shoduje s technologií svařování. Mezi základní druhy navařování se řadí navařování plamenem, elektrickým obloukem, laserem, plazmatem [8].

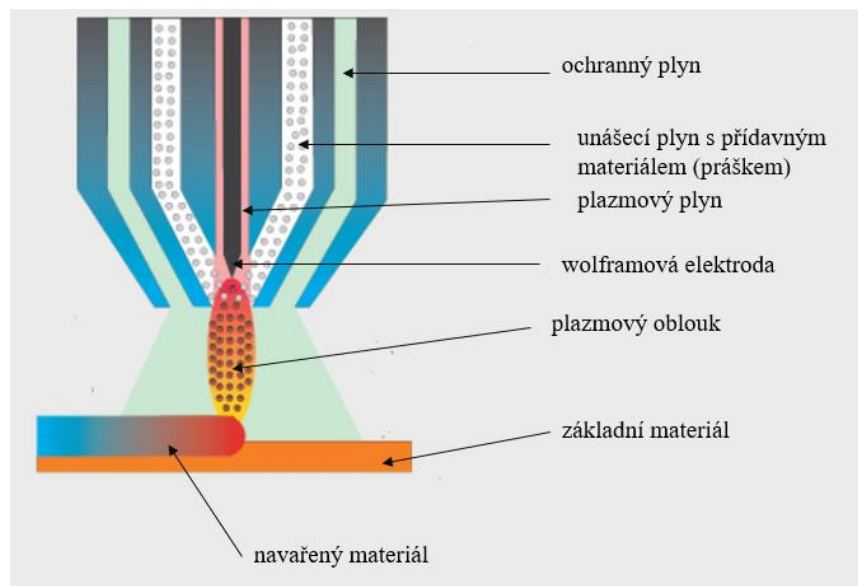
Plazmové navařování

Při metodě plazmového navařování vzniká při vysoké koncentraci energie z přídavného materiálu návar na základním materiálu. Technologie plazmového navařování používá jako přídavný materiál prášek nebo drát. Plazmovým navařováním je možné dosáhnout teploty až 20 000 K [9] [10] [11] [12] [13] [14].

Plazmové navařování bylo vyvinuto ze svařování metodou TIG. Používá se speciální, vodou chlazený, hořák (viz Obrázek 2). Metoda funguje na principu vzniku elektrického oblouku (proudu plazmatu) mezi netavicí se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Pro plazmové navařování se používá konfigurace s přeneseným obloukem (PTA), kdy je wolframová elektroda zapojená jako katoda a základní materiál jako anoda. Kolem elektrody protéká plazmový plyn. Jako plazmový plyn jsou používány inertní plyny, nejpoužívanějším je argon. (viz Obrázek 2) [9] [10] [11] [12] [13] [14].

Přídavný materiál v podobě prášku je přiváděn dalším kanálem, který ústí pod wolframovou elektrodou a přivádí prášek do proudu plazmatu. Pro transport prášku se používají inertní plyny, kdy nejpoužívanější je opět argon. Lze použít i směs aktivních plynů nebo kombinaci aktivních a inertních plynů (viz Obrázek 2) [12] [13] [14].

Třetí přívod je určen pro ochranný plyn, který chrání celý proces plazmového navařování před vlivy okolního prostředí (viz Obrázek 2). V tomto případě se nejčastěji používá argon nebo dusík [12] [13] [14].



Obrázek 2 Schéma technologie PTA [14]

Hlavními výhodami plazmového navařování jsou vysoká produktivita a možnost automatizace. Proces plazmového navařování je vysoce účinný. Běžně se dosahuje účinnosti nad 95 %. Při plazmovém navařování vzniká malá tepelně ovlivněná oblast. Nejsou nutné zásadní dokončovací operace po navařování. Je možné použít širokou škálu přídavných materiálů (prášků). Prášky lze mezi sebou i různě kombinovat, což umožňuje navařovat kompozitní materiály jako jsou například částice neoxidické keramiky v kovové matici. Výsledné metalurgické spojení při metodě PTA dosahuje vysoké kvality. Technologie PTA má výhodu v minimálním výsledném promíšení základního materiálu a vzniklého návaru oproti ostatním technologiím [12] [14].

Nevýhody plazmového navařování jsou vysoká zbytková napětí a omezené možnosti polohy navařování (svislá poloha). [12] [13] [14].

Metoda PTA má nezastupitelné místo při renovaci nebo zvyšování životnosti strojních součástí v mnoha průmyslových odvětvích. Díky možnosti navařovat širokou škálu materiálů a možnosti mísení prášků nachází PTA uplatnění například při navařování funkčních ploch tvářecích nástrojů, navařování kolejnic nebo při navařování ploch, na které dopadá tavenina kovu. Další uplatnění nachází metoda PTA v energetice pro navařování třecích ploch průmyslových armatur či pro ochranu hran sklářských forem ve sklářském průmyslu.

Přídavné materiály používané pro plazmové navařování

Materiály, které se nejčastěji používají pro navařování plazmatem, jsou slitiny na bázi železa, niklu a kobaltu [15] [16].

Materiály s matricí na bázi železa mají díky karbidům, které se tvoří díky legujícím prvkům (chrom, molybden), vysokou odolnost proti abrazi. Odolnost proti oxidaci zajišťuje vysoký obsah chromu, který podporuje vznik oxidických vrstev na povrchu. Slitiny na bázi železa jsou zpravidla levnější varianta než slitiny s niklovou a kobaltovou matricí [17] [18].

Slitiny na bázi niklu se používají zejména z důvodu zlepšení odolnosti proti opotřebení za vysokých teplot. Materiály jsou to korozně odolné a používají se jako náhrada kobaltových slitin z důvodu snížení ceny. Jejich nevýhodou je nízká odolnost proti nárazu kvůli vzniklým intermetalickým fázím. Používají se například pro ventily a čerpadla v potravinářském průmyslu [17] [18].

Materiály s matricí na bázi kobaltu jsou odolné proti opotřebení a zadírání. Dále jsou odolné proti korozi. Mají dobrou odolnost proti vysokým teplotám a dobré kluzné vlastnosti za vysokých teplot. Jedná se o materiály s vyšší cenou. Jejich použití je typické pro armatury nebo kovací zápustky. Nejtypičtějším zástupci této skupiny jsou Stellity (např. Stellite 6) [15] [17] [18].

Jako další skupiny přídavných materiálů pro navařování plazmatem se používají slitiny s matricí na bázi titanu, mědi nebo wolframu [17] [18].

2.2 Materiály nástrojů pro tváření za studena

Materiály používané pro nástroje určené k tváření za studena lze rozdělit na dvě kategorie. První kategorie jsou materiály používané pro části nástrojů, které nejsou tolik namáhané, a druhá kategorie jsou materiály pro části, které jsou namáhány více. Přehled materiálů uvádí ve své práci „Přehled materiálů nástrojů v tvářecích procesech“ kolega Tomáš Horník [19].

Pro méně namáhané části, jako jsou například vodící lišty, vodící desky, základní desky nebo opěrné a přidržovací desky, se používají litiny například dle ČSN litiny 42 2456 nebo 42 2425, což jsou litiny s lupínkovým grafitem [19].

Dominantní zastoupení mají ovšem konstrukční oceli, kde se používají oceli třídy 11. Zástupci těchto ocelí jsou například oceli 11 700 (dle EN ISO E360), 11 600 (dle EN ISO E335), 11 500 (dle EN ISO E295) [19] [20].

Pro druhou kategorii více namáhaných částí jako jsou například střižníky a střižnice, ohybníky, tažníky a tažnice, průtláčnick se používají zejména nástrojové oceli. Jsou to konkrétně oceli třídy 19. Zástupci těchto ocelí jsou například oceli 19 191 (dle EN ISO C105U), 19 436 (dle EN ISO X210Cr12) nebo pro náročnější aplikace oceli 19 312 (dle EN ISO 90MnCrV8) nebo 19 573 (dle EN ISO X153CrMoV12) [19] [20].

2.2.1 Materiály použité pro navařování segmentů ohraňovacích lisů

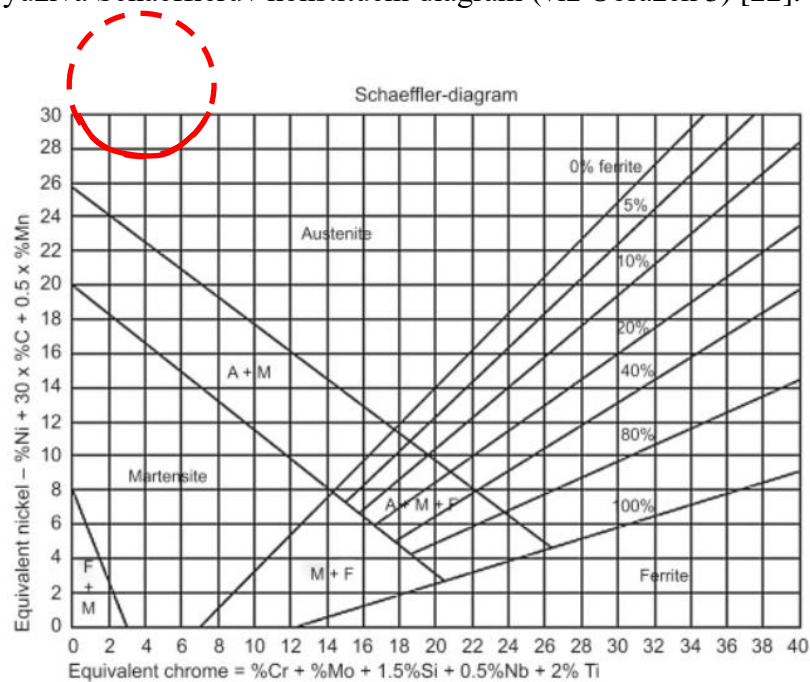
Hlavní požadavky na materiály pro segmenty ohraňovacích lisů jsou vysoká povrchová tvrdost a odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Tyto vlastnosti musí být v kombinaci s dobrou houževnatostí materiálu. V této části budou popsány vysokolegované oceli (austenitické manganové oceli), u kterých je jako konkrétní zástupce vybrána Hadfieldova ocel. Jako další materiály budou popsány rychlořezné oceli (konkrétně rychlořezná ocel 1.3395 a rychlořezná ocel 1.3207).

Vysokolegované oceli

Vysokolegované oceli jsou materiály, u nichž obsah legujících prvků musí dosáhnout minimálně 10 %. Důvody využívání vysokolegovaných ocelí jsou zvýšení korozní odolnosti, lepší žárupevnost a žáruvzdornost, zlepšení odolnosti proti opotřebení nebo možnost dosáhnout specifických elektrických a magnetických vlastností.

Pro korozivzdorné oceli se používá rozdělení, kdy se materiály dělí dle struktury na feritické oceli, austenitické oceli, martenzitické oceli, duplexní oceli. Případně lze zařadit i skupiny jako super-austenitické oceli, super-duplexní oceli a super-martenzitické oceli [21].

Pro zobrazení, jak chemické složení korozivzdorných ocelí ovlivňuje výslednou strukturu, se využívá Schaefflerův konstituční diagram (viz Obrázek 3) [22].



Obrázek 3 Schaefflerův diagram – červený kruh značí oblast Hadfieldovy oceli [22]

Chromový ekvivalent (vodorovná osa) zahrnuje feritotvorné prvky jako je chrom, molybden, křemík, niob. Může zahrnovat i wolfram, vanad, titan. Vztahy pro chromový ekvivalent se můžou lišit podle toho, jaké prvky jsou do výpočtu zahrnuty [22].

Niklový ekvivalent (svislá osa) zahrnuje austenitotvorné prvky nikl, uhlík, mangan [22].

U obou vztahů jsou obsahy prvků násobeny předem danými koeficienty a do grafu je vynesena součet. Niklový a chromový ekvivalent určí souřadnice v diagramu, které definují bod, podle kterého je možné zjistit strukturu dané korozivzdorné oceli [22].

Feritické oceli

Pro feritické oceli je zásadní nízký obsah uhlíku, který se pohybuje v setinách procent, dále obsah chromu a molybdenu, obsah niklu, případně obsah niobu a titanu [21] [23] [24].

Feritické oceli patří mezi levnější materiály v kategorii korozivzdorných ocelí. Mají nízkou mez kluzu a dobré plastické vlastnosti. Jsou důležité svojí žáruvzdorností do 1100 °C. Dobře odolávají korozi pod napětím. Mají vysokou teplotní vodivost [21] [23] [24].

Používají se jako materiály pro automobilový průmysl, chemický průmysl a potravinářský [21] [23] [24].

Martenzitické oceli

Martenzitické oceli mají zastoupení prvků prakticky totožné jako oceli feritické, ovšem zásadní rozdíl je v obsahu uhlíku, který je u martenzitických ocelí až 0,5 %. To z toho důvodu, aby bylo možné dosáhnout martenzitické struktury [21] [23] [24].

Martenzitické oceli jsou nejlevnější materiály z korozivzdorných ocelí. Jejich hlavní výhodou je možnost ovlivnit vlastnosti tepelným zpracováním a dosáhnout různých pevností. Nevýhodami jsou výskyt vodíkové křehkosti, praskání pod napětím a výskyt popouštěcí křehkosti [21] [23] [24].

Jsou používány jako materiály pro vodní turbíny, čerpadla a chirurgické nástroje, jako jsou například nůžky nebo žiletky [21] [23] [24].

Austenitické oceli

Austenitické oceli jsou typické opět nízkým obsahem uhlíku, který je v setinách procent. Často se v austenitických ocelích objevuje také chrom a molybden. Zásadní pro tvorbu austenitickou strukturu jsou ovšem austenitotvorné prvky. Mezi austenitotvorné prvky se řadí uhlík, nikl, mangan, měď a dusík. Pro austenitické oceli se nejčastěji jako austenitotvorný prvek používá nikl, který má v austenitických ocelích obsah 6 až 16 %. V případě, že není použit nikl, používá se mangan, kdy typickým zastupitelem austenitických manganových ocelí je Hadfieldova ocel [21] [23] [24].

Austenitické oceli mají dobré korozní vlastnosti, výbornou svařitelnost. Jsou houževnaté, žárupevné do 750 °C a žáruvzdorné do 1150 °C. Mají nízkou mez kluzu, špatnou tepelnou vodivost a nejsou dobře obrobitelné. Nejsou magnetické a praskají pod napětím. Patří mezi dražší materiály v kategorii korozivzdorných ocelí [21] [23] [24].

Používají se jako materiály pro chemický průmysl, energetický průmysl, papírenský průmysl, pro nádoby pracující s pitnou vodou [21] [23] [24].

Hadfieldova ocel

Hadfieldova ocel je austenitická manganová ocel. Byla pojmenována po R. A. Hadfieldovi, který ji roku 1882 vynalezl. Jde o ocel s vysokou houževnatostí, tažností, odolností proti opotřebení. Zásadní vlastností Hadfieldovy oceli je schopnost se deformačně zpevňovat, kdy při dynamickém namáhání rázy a při vysokých tlacích, dochází ke zpevňování povrchu. Výsledný materiál má vysokou tvrdost na povrchu a jádro zůstává houževnaté [25] [26] [27] [28] [29] [30].

Díky schopnosti se deformačně zpevňovat a vysoké odolnosti proti opotřebení je Hadfieldova ocel používána zejména v těžebním průmyslu (např. rypadla, zuby bagrů), v železničním průmyslu (např. srdcovky), pro těžbu ropy (např. vrtáky) nebo ve vojenském průmyslu (např. pancíř) [25] [26] [27] [28] [29] [30].

Hadfieldova ocel se vyrábí nejčastěji technologií odlévání. Hadfieldovu ocel vyrobenou odléváním nelze ve stavu po odlití přímo použít pro technické aplikace. Je tvrdá, ale křehká. Křehkost je zapříčiněna precipitací karbidů $(\text{FeMn}_3)\text{C}$ na hranicích zrn austenitu. Vznik těchto karbidů je zapříčiněn nízkou rychlostí ochlazování odlitku [25] [26] [27] [28] [29] [30].

Svařování a navařování Hadfieldovy oceli je komplikované. Dochází zde, stejně jako u technologie slévání, k precipitaci karbidů. Proto by měla být teplota Hadfieldovy oceli udržována pod $300\text{ }^\circ\text{C}$ [27].

Pro odstranění karbidů a zlepšení mechanických vlastností je nutné provést tepelné zpracování. Jako tepelné zpracování se volí rozpouštěcí žihání, kdy se materiál ohřívá na teplotu 950 až $1050\text{ }^\circ\text{C}$. Výsledná struktura je homogenní a je tvořena austenitem. Karbidy na hranicích zrn se nevyskytují [25] [26] [27] [28] [29] [30].

Mechanické vlastnosti jsou rozdílné v odlitém stavu a po tepelném zpracování. Po odlití dosahuje Hadfieldova ocel meze pevnosti 345 až 500 MPa . Tažnost se pohybuje maximálně do 1% a tvrdost se pohybuje okolo 200 HV [25] [26] [27] [28] [29] [30].

Po tepelném zpracování jsou hodnoty mechanických vlastností příznivější, kdy se mez pevnosti pohybuje mezi 850 až 950 MPa . Tažnost se radikálně zvýší na 35 až 40% . Po deformačním zpevnění lze dosáhnout povrchové tvrdosti až 400 HV [25] [26] [27] [28] [29] [30].

Chemické složení Hadfieldovy oceli není striktně dáno. Jednotlivé normy udávají každá nepatrně odlišné složení. Obecně ovšem lze tvrdit, že materiál s názvem Hadfieldova ocel obsahuje 0,7 až 1,5 % uhlíku, 11,5 až 14 % manganu, do 0,7 % křemíku, do 0,08 % síry, do 0,1 % fosforu (Tabulka 1). Hodnoty jsou uvedeny v hmotnostních procentech. U Hadfieldovy oceli je nejvýznamnějším prvkem mangan, který je austenitotvorný a umožňuje stabilizaci austenitu ve struktuře až do teploty okolí. Dále se využívají prvky jako je hliník, chrom, nikl a molybden [25] [26] [27] [28] [29] [30].

Tabulka 1 Chemické složení Hadfieldovy oceli [21]

C [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]
0,7-1,45	11-14	1,5-2,5	3-4	0,8-2,1

Pro svařování Hadfieldovy oceli je doporučeno dodržovat předepsané podmínky. Měl by být použit přídatný materiál s obsahem chromu niklu, manganu nebo typově podobný materiál. Měl by být svařován bez přehřevu [27].

Duplexní oceli

Duplexní oceli nesou název podle struktury, kdy se ve struktuře objevují dvě fáze. Největší zastoupení mají duplexní oceli, kde se vyskytuje austenit a ferit (austenito-feritické, feriticko-austenitické). Tyto oceli kombinují vlastnosti ocelí austenitických a feritických [21] [23] [24].

Tento typ duplexních ocelí se používá v chemickém či ropném průmyslu. V papírenském průmyslu se využívá na zařízení pro výrobu papíru a celulózy. Vyrábí se z něj tepelné výměníky [21] [23] [24].

Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli jsou podskupina nástrojových ocelí. Nástrojové oceli patří do skupiny vysokolegovaných ocelí. Rychlořezné oceli se jako materiál začaly používat v průmyslu na začátku dvacátého století. Jejich hlavním využitím je výroba nástrojů, které jsou schopny obrábět vysokou rychlostí.

Jde o materiály v dnešní době vyráběné nejčastěji práškovou metalurgií. Jedná se o slitinu železa a uhlíku, která obsahuje legující prvky jako jsou chrom, wolfram, molybden, vanad a kobalt. Tyto legující prvky až na kobalt jsou v materiálu obsaženy z důvodu tvorby karbidů. Množství uhlíku se pohybuje od 0,75 až do 2 %. Celkové množství legujících prvků se udává v rozmezí 10 až 30 % [31] [32] [33] [34].

Požadavky na rychlořezné oceli jsou tvrdost, pevnost a zároveň houževnatost. Rychlořezné oceli by měly mít dobrou prokalitelnost a kalitelnost. Měly by být odolné proti popuštění a proti otěru. U rychlořezných ocelí se požaduje také rozměrová stálost a odolnost při vyšších teplotách [31] [32] [33] [34].

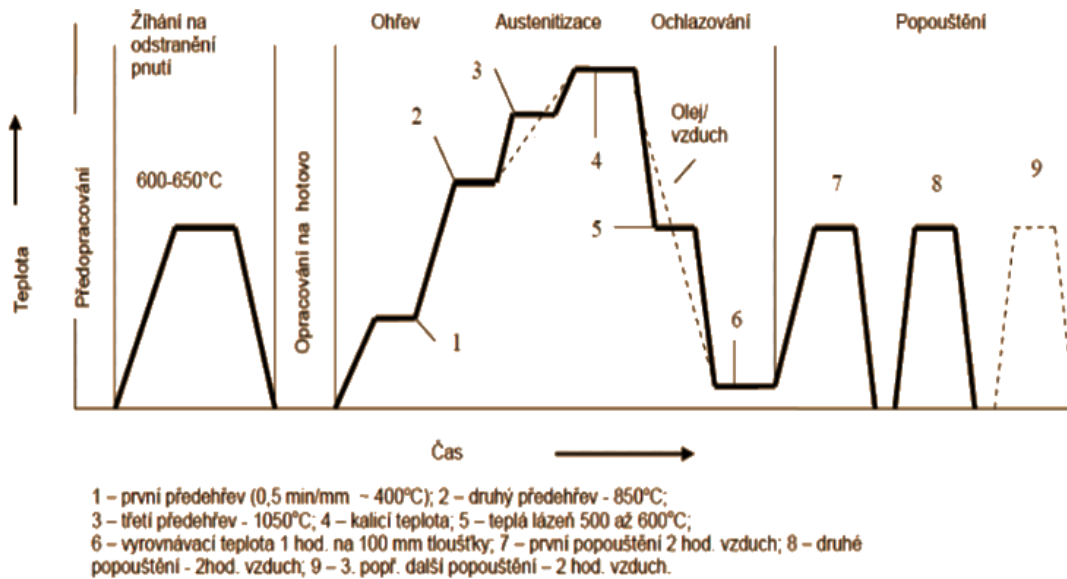
Pro značení rychlořezných ocelí se využívá nejrůznějších systémů. Systémy mohou být ČSN, W.Nr., AISI, Boehler, DIN. Příkladem je ocel 19 851, takto značená dle ČSN EN 10027-1 (420011). Dle systému W.Nr. je označená 1.3246. V systému AISI je její značení M 41. Dle značení DIN se jedná o rychlořeznou ocel S 7-4-2-5 [35] [36].

Tepelné zpracování je pro rychlořezné oceli zásadní a trvá často i desítky hodin (Obrázek 4). Nejprve se provede žíhání. Zde se dostupné zdroje rozcházejí, kdy se udává žíhání na měkko nebo žíhání na snížení pnutí na teplotě 600 až 650 °C [34] [37] [38].

Následně dochází k ohřevu materiálu, který je stupňovitý. Nejprve se materiál ohřeje na 400 °C, následuje výdrž. Poté dojde k zahřátí z 400 °C na cca 850 °C, následuje výdrž. V posledním stupni dojde k ohřevu z 850 °C na 1050 °C a následuje výdrž. V posledním stupni dochází k ohřevu z teploty 1050 °C na teplotu austenitizace, která dosahuje až 1300 °C. Tato teplota se volí na základě požadované tvrdosti součásti po tepelném zpracování. Ohřev je volen stupňovitě kvůli teplotnímu gradientu mezi jádrem a povrchem, kde musí dojít k vyrovnání teplot. Při nedodržení stupňovitého ohřevu by mohlo docházet k vzniku napětí a následné deformaci [34] [37] [38].

Po dosažení teploty austenitizace se ocel kalí. Kalení probíhá do oleje nebo na vzduchu, případně lze použít stlačený plyn (dusík N₂) [34] [37] [38].

Po kalení je nutné okamžitě zařadit popouštění. K popouštění dochází ve dvou až čtyřech krocích. Každé popouštění trvá minimálně 2 hodiny a provádí se na vzduchu. Popouštění má za účel snížit množství zbytkového austenitu [34] [37] [38].



Obrázek 4 Schéma tepelného zpracování rychlořezných ocelí [37]

Rychlořezná ocel 1.3395

Materiál 1.3395 je vyráběn práškovou metalurgií. Jedná se o rychlořeznou ocel. 1.3395 je číselné označení vycházející z německé normy W.Nr. Komerční názvy tohoto materiálu jsou například HSS 23 nebo Vanadis 23 (společnost Uddeholm (Böhler), Rakousko) [39] [40].

Jedná se o materiál s vysokou odolností proti opotřebení, vysokou mezí pevnosti v tlaku a dobrou houževnatostí určený především pro práci za studena. Je lépe obrobitelný a brousitelný v porovnání s jinými rychlořeznými oceli. Rozměrová stálost po tepelném zpracování je také lepší než u ostatních rychlořezných ocelí [40].

Rychlořezná ocel 1.3395 (Tabulka 2) je typický materiál pro aplikace, u kterých musí nástroje odolávat abrazivnímu a adheznímu opotřebení, a při kterých je vysoká pravděpodobnost vzniku plastické deformace na funkční ploše nástroje [40].

Vyrábí se z ní nástroje pro formy na vstřikování plastů. Dále součásti pro zpracování plastů jako jsou například nože granulátoru [40].

Tabulka 2 Chemické složení rychlořezné oceli HSS 23 [40]

C [%]	Cr [%]	Mo [%]	W [%]	V [%]
1,28	4,2	5,0	6,4	3,1

Rychlořezná ocel 1.3207

Materiál 1.3207 je také vyráběn práškovou metalurgií. Zásadní u rychlořezné oceli 1.3207 je vyšší obsah kobaltu, který je zhruba 8,5 %. Komerční názvy tohoto materiálu jsou například HSS 30 nebo Vanadis 30 (společnost Uddeholm (Böhler), Rakousko) [39] [41].

Charakteristické vlastnosti materiálu jsou vysoká pevnost v tlaku, vysoká tvrdost (až 67 HRC), vynikající odolnost proti abrazi. Rychlořezná ocel 1.3207 je určena především pro náročnější aplikace pro práci za tepla. Stejně jako rychlořeznou ocel 1.3395 ji lze dobře obrábět a brousit. Má dobrou rozměrovou stálost během tepelného zpracování [41].

Na rozdíl od rychlořezné oceli 1.3395 má materiál 1.3207 díky kobaltu lepší pevnost a tvrdost za vyšších teplot, lepší odolnost proti popouštění a vyšší modul pružnosti. Kobalt způsobuje nižší houževnatost oceli. Netvoří karbidy, tím pádem nezvyšuje odolnost proti opotřebení, která je u materiálů 1.3207 v porovnání s materiálem 1.3395 stejná [41].

Používá se na nástroje pro tváření, kde dochází k velkému opotřebení nástroje. K tomuto opotřebení může docházet například v důsledku vysokých otáček tvářecího stroje nebo zvýšené teploty. Teplota nástroje se může pohybovat nad 200 °C [41].

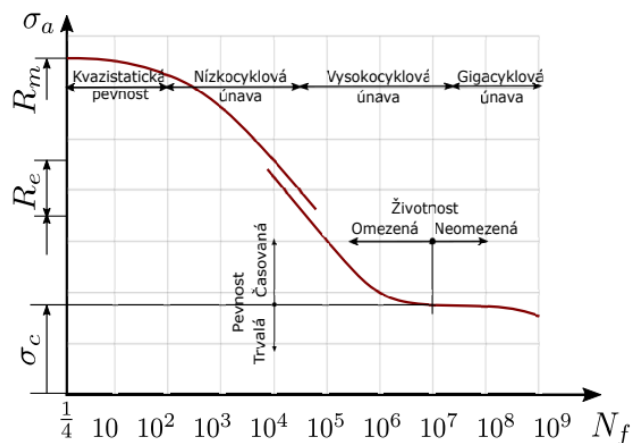
Chemické složení rychlořezné oceli 1.3207 je až na kobalt totožné s ocelí 1.3395 (viz Tabulka 3) [41].

Tabulka 3 Chemické složení rychlořezné oceli HSS 30 [41]

C [%]	Cr [%]	Mo [%]	W [%]	V [%]	Co [%]
1,28	4,2	5,0	6,4	3,1	8,5

2.3 Kontaktní únava

Únava materiálu je děj, při kterém dochází při cyklickém zatěžování k vyčerpání plasticity materiálu a vzniku trhlin. Následuje porušení materiálu únavovým lomem. Napětí, při kterém následně dochází k porušení, je nižší než mez pevnosti materiálu a s narůstajícím počtem cyklů se snižuje až do meze únavy. Mez únavy materiálu je napětí, při kterém materiál zvládne bez porušení neomezený počet cyklů. Únava materiálu a průběh napětí je znázorněn na Wöhlerově křivce (viz Obrázek 5).



Obrázek 5 Wöhlerova křivka [58]

Kontaktní únava je druh únavy, ke kterému dochází při kontaktu součástí. Při tomto kontaktu dochází k působení velkého tlaku na malou plochu. Kontaktní únava je typická pro valivý kontakt [42] [43].

Mechanismus kontaktní únavy je často odlišný a záleží na konkrétním případě. Mezní stavy mohou směřovat například k pittingu, kdy je na povrchu součásti minimální smykové napětí. Další možnost je ratcheting, který je řízen skluzovou složkou a vyčerpáním plasticity. Typický příklad je zde kolo-kolejnice. Jestliže dochází k přenosu zatížení jako u případu lisovacího spoje, výsledkem je fretting [44] [45] [46] [47].

Oblastí, ve které je nutné počítat s kontaktní únavou, je například poškození železničních kol ve vlakové dopravě. Dále se kontaktní únava vyskytuje při tváření u válcovacích stolic, kdy dochází ke kontaktu válcovaného materiálu a válců. Zásadní je kontaktní únava také u ložisek [42] [43].

3 Experimentální část

V experimentální části diplomové práce budou nejdříve popsány použité přístroje a zařízení. Následně bude přiblíženo uspořádání pracoviště a rozvržení samotného experimentu. Výsledky a diskuse budou popsány v samostatné kapitole.

Dominantním materiálem pro experiment byla ocel typu Hadfield (SZW 5049). Jako první způsob navaření polotovarů byla zvolena metoda podélných housenek a bylo opuštěno od standardnějšího oscilačního navařování. Zde se vycházelo z poznatků, které vyplývaly z experimentů navařování kolejnic. U způsobu s podélnými housenkami byl předpoklad menšího vneseného tepla než u oscilačního navařování v důsledku vyšší rychlosti ve směru osy X. Současně mezi každou housenkou by materiál měl být schopný se částečně ochladit, což by mohlo vést k úplné eliminaci, případně alespoň redukci částic, nejspíše karbidů, které precipitují v Hadfieldově oceli již při přechodu materiálu z taveniny. Při navařování okolo teploty cca 300 °C dochází ke zvýšení množství precipitujících částic. Stejný předpoklad platil i pro ocel SZW 5049.

Metalografické výbrusy byly připravovány v metalografické laboratoři. Byly připraveny pro oba materiály jak pro rychlořeznou ocel, tak pro ocel SZW 5049, ovšem nebyly vytvořeny výbrusy ze všech návarů, které vznikly. Výbrusy vznikly jen z návarů, které byly navařeny na polotovary, ne na zkušební tělesa.

Výbrusy pro oba materiály byly realizovány až do fáze leptání totožným způsobem. Nejprve došlo k nařezání návarů, kdy byly řezy provedeny v rovině, ve které byly při navařování umístěny termočlánky. Příčné výbrusy byly zalisovány do směsi Multifast (bakelit). Následně byly zařazeny tři stupně broušení na kotoučích odlišných hrubostí zrn. Poté bylo přikročeno ke dvěma stupňům leštění, než bylo dosaženo zrcadlově lesklého povrchu.

Fáze, kdy byly vzorky leptány, se lišily pro jednotlivé materiály. Rychlořezná ocel HSS 23 byla leptána chemicky Nitalem, což je roztok kyseliny dusičné a určitého alkoholu (např. metanolu). Ocel SZW 5049 byla leptána elektrolyticky.

Analýza na skenovacím elektronovém mikroskopu byla zvolena z důvodu, aby bylo zjištěno chemické složení návaru a základního materiálu. Dalšími důvody, proč byla provedena SEM analýza, bylo zjištění povahy tenké vrstvy vytvořené v návaru těsně nad metalurgickým spojením a identifikace částic viditelných při pozorování optickým mikroskopem. Zde mělo být zjištěno, zda se jedná o vyprecipitované karbidy. SEM analýza byla provedena pro finální návar materiálu SZW 5049 (parametry z Tabulka 12).

Mikrotvrdot byla měřena z finálního návaru oceli SZW 5049, kdy byly vytvořeny dva výbrusy, a z finálního návaru rychlořezné oceli HSS 23, kdy byly také vytvořeny dva výbrusy. Dále byla naměřena ještě mikrotvrdot u dalších dvou metalografických výbrusů materiálu SZW 5049. Tyto vzorky byly vytvořeny při volbě finálních parametrů pro navaření oceli SZW 5049 za pomoci oscilačního navaření, přičemž parametry při jejich navaření jsou následující (Tabulka 4).

Tabulka 4 Parametry navařování oceli SZW 5049, kde byla měřena mikrotvrdot

	IH [A]	IL [A]	f [Hz]	podávání [g.min ⁻¹]	krok [mm]	rychlost kroku [mm.s ⁻¹]	rychlost hořáku [mm.s ⁻¹]
SZW 1,3	110	55	117	5,7	1,3	4	8
SZW 0,9	110	55	117	5,7	0,9	4	8

Měření probíhalo dle Vickerse, kdy jako indentor byl zvolen čtyřboký diamantový jehlan. Zvolená zátěžná síla byla 100 gramů, což odpovídá mikrotvrdoti HV 0,1. Doba zatěžování byla zvolena 12 sekund.

Mikrotvrdot byla měřena u každého vzorku podpovrchová, kdy bylo cca 0,5 mm pod povrchem návaru provedeno ve stejné hladině pod povrchem sedm vtisků, které byly vždy 0,5 mm vzdáleny od sebe, a byla odečtena mikrotvrdot. Následně bylo v průřezu celým návarem až do základního materiálu po 0,5 mm provedeno několik vtisků. Vtisků bylo vždy tolik, aby v základním materiálu byly vytvořeny 3 vtisky.

Byly stanoveny hodnoty mikrotvrdosti stávajícího materiálu oceli 19 520 (Tabulka 5), ze kterého byly segmenty ohraňovacích lisů původně vyrobeny.

Tabulka 5 Chemické složení oceli 19 520

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Ni [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Fe [%]
0,4	1,41	0,4	0,12	0,1	1,75	0,176	95,67

3.1 Použité přístroje a zařízení

3.1.1 Plazmový navařovací automat

Pro experiment byl využit plazmový navařovací automat PPC 250 R6 (Obrázek 6), který vyvinula společnost KSK, s.r.o. se sídlem v České Třebové. Automat navařuje metodou PTA, kdy využívá přídavný materiál ve formě prášku. Kromě lineárního navařování je možné navařovat i rotační součásti (čelo, obvod) [48].

Hořák je polohovatelný kartézským polohovacím systémem ve třech osách X, Y, Z s možností naklápění v ose N. Navařovaná součást je polohovatelná ve dvou osách (rotace a naklápění) označených C a R [48].

Plazmový navařovací automat umožňuje programovatelné i ruční vedení plazmatronu. Program lze zadávat ručně bod po bodu nebo generovat za pomoci přednastavených možností. Průměr stolu automatu je 300 mm a má maximální nosnost 70 kg [48].



Obrázek 6 Plazmový navařovací automat PPC 250 R6 [48]

3.1.2 Univerzální měřicí ústředna

Pro měření průběhu teplot při navařování i při následném chladnutí byla použita univerzální měřicí ústředna ALMEMO 5690-2M (Ahlborn GmbH, Německo) (Obrázek 7) [49].

Na zadní straně ústředny jsou vstupy, do kterých se přes konektory zapojí termočlánky. Ústředna je schopná snímat 20 měřících kanálů, kdy rychlost snímání teploty je 2,5 až 100 měření za sekundu. Aktuální hodnoty teplot je možné online sledovat na přehledném grafickém displeji. Měřené hodnoty se ukládají na MMC kartu s minimální kapacitou 32 MB. Data z ústředny je možné nahrát do počítače a zde je dále zpracovávat [49].



Obrázek 7 Univerzální měřicí ústředna ALMEMO 5690-2M [49]

3.1.3 Světelný mikroskop

Metalografické vzorky byly pozorovány a vyfoceny na světelném mikroskopu Zeiss Axio Observer D1m (Obrázek 8). Tento typ mikroskopu je inverzní, což znamená, že objektivy se nachází pod sledovaným vzorkem, jsou otočeny a vzorek se pokládá nad ně [50] [51].

Je možné použít zvětšení 25x až 1000x. Obraz je možné pozorovat buď v okuláru, nebo na monitoru počítače. Kromě pozorování ve světlém poli je možné využít i pozorování v tmavém poli nebo polarizovaném světle či použít tzv. DIC filtr (diferenciální interferenční kontrast) [50] [51].

Úpravy obrazu a pořizování fotografií je možné provést přímo na řídicím počítači, jelikož k mikroskopu je dostupné softwarové rozhraní [50] [51].



Obrázek 8 Optický mikroskop Zeiss Axio Observer D1m [50]

3.1.4 Tvrdoměr

K měření mikrotvrdomosti bylo použito zařízení Buehler IndentaMet 1104 (Obrázek 9). Zařízení je poloautomatické. Je možné nasadit 3 objektivy a 2 indentory zároveň. Samotné zařízení je odolné proti vibracím [52].

Displej tvrdoměru zobrazuje vypočtenou mikrotvrdomost, která je vypočtena z úhlopříček vtisku, ty jsou také zobrazeny na displeji. Úhlopříčky jsou změřeny uživatelem přes okulár. Dále displej obsahuje počet vtisků a dobu zatěžování. Dobu zatěžování i zátěžnou sílu volí uživatel [52].



Obrázek 9 Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104 [52]

3.1.5 Skenovací elektronový mikroskop

Analýza na elektronovém mikroskopu byla provedena na přístroji JSM-7600F od společnosti JEOL Ltd. (Obrázek 10). Jedná se o skenovací elektronový mikroskop. Urychlovací napětí pro tento mikroskop je 0,1 až 30 kV. Zvětšení mikroskopu je 25x až 1 000 000x. Rozlišení pro JSM-7600F je 1 nm při 15 kV a 1,5 nm při 1 kV. V módu STEM je možné při 30 kV dosáhnout rozlišení až 0,6 nm [53] [54].

Hlavními možnostmi, které lze využívat u zmíněného elektronového mikroskopu, jsou detektor zpětně odražených elektronů, vlnově disperzní spektrometrie (WDS), energiově disperzní spektrometrie (EDS). Dále je možné na mikroskopu zanalyzovat difrakci zpětně odražených elektronů. Lze použít detektor pro metodu STEM (skenovací transmisní elektronová mikroskopie) [53] [54].



Obrázek 10 Elektronový mikroskop JSM-7600F [53]

3.2 Uspořádání pracoviště navařování

Na stůl plazmového navařovacího automatu byl přes šrouby připevněn speciální přípravek (viz Obrázek 11). Jeho funkce byla zafixovat polotovar pro segment ohraňovacího lisu (základní materiál) ve stabilní poloze a zároveň tento přípravek zajišťoval opakovatelnost navařování, kdy se základní materiál ustavoval vždy do totožné polohy.



Obrázek 11 Uspořádání pracoviště navařování

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 1 – plazmový hořák | 6 – zapojení termočlánků |
| 2 – polohovatelný stůl automatu | 7 – ústředna ALMEMO 5690-2M |
| 3 – polotovar | |
| 4 – řídicí panel automatu | |
| 5 – dotyková obrazovka | |

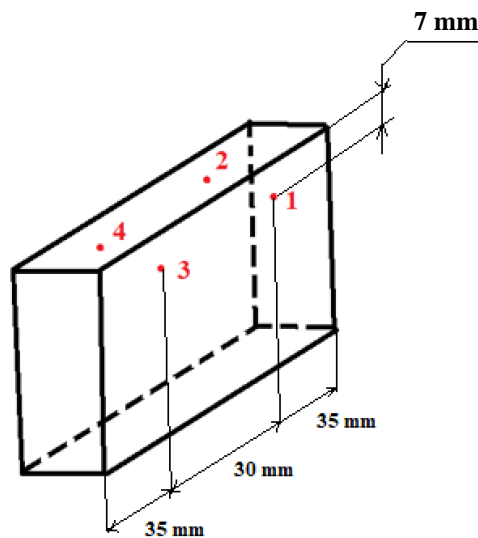
Stůl navařovacího automatu s navařovaným materiálem byl po celou dobu experimentu ve statické pozici, pohyb při navařování vykonával plazmový hořák. Pohyb hořáku byl buď lineární nebo oscilační a při navařování se hořák pohyboval stále ve stejné souřadnici Z a nenatáčel se.

Samotné navařování probíhalo plně automaticky, kdy hořák vykonával trajektorii pohybu, která byla předem naprogramována v softwarovém rozhraní navařovacího automatu. Programování probíhalo přes dotykový displej automatu (Obrázek 11).

Naprogramovaná trajektorie byla zkoušena bez zapáleného plazmového oblouku. To sloužilo jako kontrola, zda je trajektorie naprogramovaná správně a bude navařena předem zvolená oblast polotovaru.

Spuštění procesu navařování bylo provedeno zapálením pilotního oblouku a spuštěním programu navařování při zavřených dveřích zařízení, které byly vybaveny ochranným sklem.

Měřicí ústředna byla umístěna v blízkosti navařovacího zařízení na zvláštním stole (Obrázek 11). K ústředně byly přes konektory připojeny čtyři termočlánky, které byly kondenzátorovým výbojem přivařeny na základní materiál (viz Obrázek 12). Termočlánky se nacházely 0,7 mm pod plochou, která byla navařována, a zároveň byly umístěny tak, že dělily polotovar zhruba na třetiny.



Obrázek 12 Schéma zapojení termočlánků

Termočlánky byly umístěny blízko pod povrchem, aby bylo možné co možná nejpřesněji zdokumentovat teploty při navařování, a zároveň musely být dostatečně vzdáleny od plochy, na kterou bylo navařováno, aby nedošlo k úplnému odtavení termočlánků při navařování v důsledku vysokých teplot nebo při případné kolizi termočlánků s hořákem.

I přes zmíněné umístění bylo nutné termočlánky před vlivem vysoké teploty ochránit. Byly voleny dva způsoby. U prvního způsobu byly na termočlánky v místě spojení s polotovarem (Obrázek 13) nasunuty keramické kroužky, které odizolovaly termočlánky od přímého účinku blízko se pohybujícího plazmového svazku. Tato varianta byla preferována.



Obrázek 13 Termočlánky s keramickými kroužky

U druhého způsobu byly termočlánky obaleny keramickým materiálem ve formě vaty. Následně byly překryty destičkou s naneseným nástřikem Al_2O_3 (Obrázek 14).



Obrázek 14 Termočlánky překryty destičkami

3.3 Rozvržení experimentu

Pro navaření polotovarů segmentů pro ohraňovací lisy byla zvolena jako přídavný materiál ocel typu Hadfield, což je vysokolegovaná austenitická manganová ocel. Jednalo se o materiál SZW, který je blízký Hadfieldově oceli, ovšem má zvýšený obsah chromu na 14 % (viz Tabulka 6). Jako druhý přídavný materiál pro porovnání s touto ocelí byla vybrána rychlořezná ocel 1.3395 neboli HSS 23.

Tabulka 6 Chemické složení oceli SZW 5049 [55]

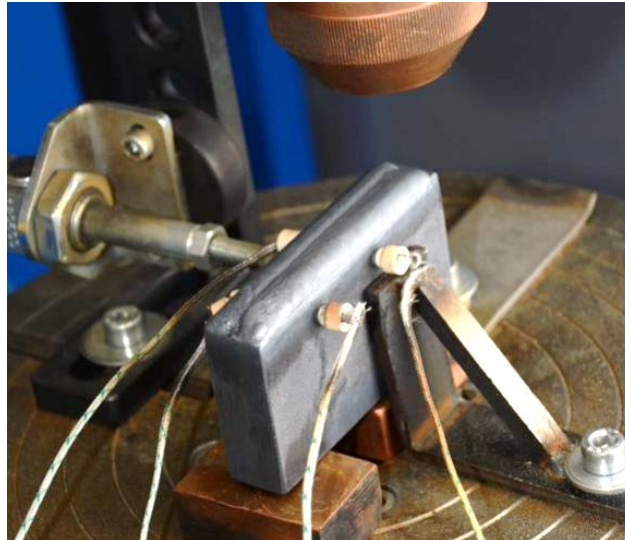
C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	V [%]	B [%]	Fe [%]
0,6	14,2	0,6	0,01	max 0,01	14,2	0,4	1,2	0,3	max 0,01	zbytek

Polotovary, které sloužily jako základní materiál a na které se navařoval přídavný materiál, byly dodány ve tvaru kvádrů, kdy navařovaná plocha měla rozměry 100 x 20 mm nebo 95 x 20 mm. Základní materiál pro navařování byl vyroben z konstrukční uhlíkové oceli třídy 11 (11 523). Tato ocel patří mezi nelegované konstrukční oceli. (Tabulka 7).

Tabulka 7 Chemické složení oceli 11 523 [56]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]
max. 0,2	max. 1,6	max. 0,550	max. 0,040	max. 0,045

Byly zvoleny dva postupy navařování. První postup bylo navařování podélných housenek, kdy program byl sestaven tak, že plazmový hořák vždy navařil jednu prostřední housenku pohybem v ose X, následně přešel do výchozí pozice, kde se posunul o předem definovanou vzdálenost v ose Y a navařil další housenku. Tímto způsobem se hořák vždy posouval od prostřední housenky na obě strany do doby, než byla celá plocha navařena (Obrázek 15).



Obrázek 15 Metoda navařování podélných housenek

Jako druhý způsob navařování byla zvolena metoda oscilačního navařování, kdy plazmový hořák vykonává pohyb v ose X a zároveň osciluje, vykonává pohyb v ose Y, po celé šířce navařované plochy (Obrázek 16).



Obrázek 16 Metoda oscilačního navařování

Přídavný materiál pro navaření, kterým se experiment zabýval, byla výše zmíněná ocel typu Hadfield SZW 5049. Z rešerše, která byla provedena, vyplývá, že navařování Hadfieldovy oceli je problematické, jelikož při zvýšení teploty materiálu nad 300 °C dochází k precipitaci částic, pravděpodobně karbidických, na hranicích zrn, což zhoršuje mechanické vlastnosti oceli. Zároveň je ovšem žádoucí dodat dostatečné množství tepla, aby došlo ke kvalitnímu metalurgickému spojení přídavného a základního materiálu.

Při znalosti těchto skutečností byl při volbě navařování zvolen postup navaření pouze jedné vrstvy.

Pro minimalizaci vneseného tepla a získání kvalitního metalurgického spojení bylo zásadní zvolit adekvátní parametry navařování. Jelikož nebyl dostupný žádný podobný předešlý experiment, byly první parametry zvoleny empiricky a následně k nim bylo dopočítáno vnesené teplo.

Následovalo několik cyklů iterací, kdy bylo optimalizováno vnesené teplo, které bylo porovnáváno na základě softwarového ekvivalentu. Tato optimalizace probíhala na zkušebních vzorcích ze stejného materiálu jako byl základní materiál pro finální navaření. Během optimalizace parametrů nebyl zaznamenáván průběh teplot. Optimalizace parametrů proběhla jak u navařování pomocí podélných housenek, tak u metody oscilačního navařování.

Výsledné parametry, které splňovaly minimální vnesené teplo a zároveň s nimi bylo dosaženo dostatečného závaru, byly následně použity jak pro ocel Hadfieldova typu (SZW 5049), tak i pro rychlořeznou ocel HSS 23. Během navařování výslednými parametry byly připevněny termočlánky a byl snímán průběh teplot.

4 Výsledky a diskuse

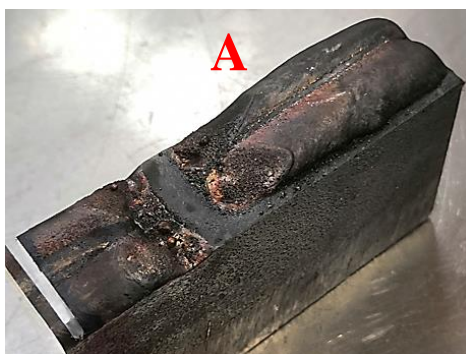
Po provedení optimalizace parametrů byly navařeny návary na polotovary pro segmenty ohraňovacích lisů pro ocel SZW 5049 a ocel HSS 23. Byl zanalyzován průběh teplot při navařování a chladnutí.

Byly vytvořeny metalografické vzorky, na kterých byla za pomoci světelného mikroskopu hodnocena kvalita výsledného metalurgického spojení základního materiálu s přídatným materiálem (návarem). Poté byla na světelném mikroskopu hodnocena mikrostruktura vytvořených návarů.

Kromě vyhodnocení metalografie bylo provedeno měření mikrotvrdosti a byla provedena analýza na skenovacím elektronovém mikroskopu.

4.1 Navařování

Návary vytvořené během optimalizace parametrů tvořily jednotlivé housenky navařované na polotovar konstrukční oceli v uspořádání simulující výsledný návar.



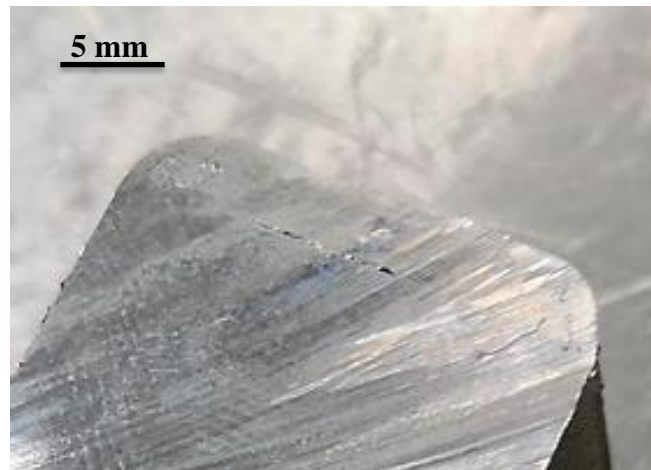
*Obrázek 17 Geometrie návaru A
(délka návaru 50 mm šířka návaru 20 mm)*

Geometrie návaru (Obrázek 17), kdy jsou housenky posunuty v ose Y. Jedna hrana navařované plochy je utavená. Oproti tomu u druhé hrany není ani navařený materiál. Návar je vyboulený, je zde nerovnoměrně rozložený materiál.

U způsobu navařování za pomoci podélných housenek byla nutná detailní optimalizace pulzace navařovacího proudu. Tento parametr byl hlavní, který ovlivňoval vnesené teplo.

Další parametry, které bylo nutné optimalizovat, a ovlivňovaly jak vnesené teplo, tak geometrii výsledného návaru, byly rychlost hořáku v ose X, množství podávaného prášku a rozteč jednotlivých housenek v návaru. Na základě rozteče jednotlivých housenek byl určen počet housenek.

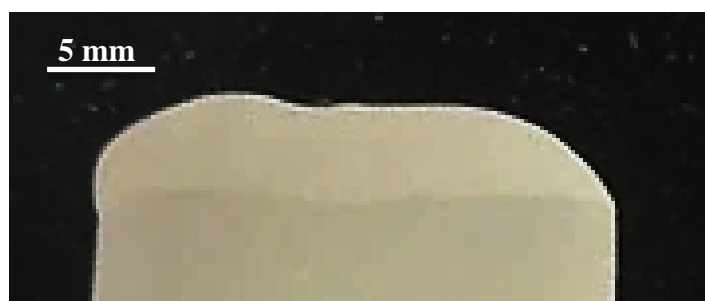
V několika případech při optimalizaci parametrů navařování nedošlo k vytvoření kvalitního metalurgického spojení (viz Obrázek 18).



Obrázek 18 Metalurgické spojení

U další skupiny návarů na druhou stranu došlo ke kvalitnímu metalurgickému spojení, ovšem nevyhovující byla geometrie návaru.

Po řadě iterací navařovacích parametrů byly zvoleny parametry, při kterých bylo dosaženo kvalitního metalurgického spojení a zároveň přijatelné geometrie návaru (Obrázek 19).



Obrázek 19 Kvalitní metalurgické spojení

Zvolené parametry byly následující (viz Tabulka 8). Horní proud byl zvolen 215 A, spodní proud 75 A. Rychlost posuvu 3 mm.s⁻¹ a podávání prášku 8,5 g.min⁻¹. Při vyšších hodnotách proudů byl návar přehřátý, hrany polotovaru byly utavené, návar nadržel požadovanou geometrii. Při nižších proudech nebylo dosaženo dostatečného propojení se základním materiálem.

Při zvýšení rychlosti lineárního posunu hořáku v ose X docházelo k roztrhávání svarové lázně a návar nebyl kompaktní.

Podávání prášku nemělo na geometrii svaru a vnesené teplo zásadní vliv, ovšem při zvýšení této hodnoty docházelo k neroztavení prášku a výsledný návar měl na svém povrchu částice neroztaveného prášku.

Navarovací program pro navařování podélnými housenkami se do plazmového navařovacího automatu zadával pomocí jednotlivých řádků.

Při rozteči 1,6 mm vycházelo vytvoření návaru na celkový počet sedmi housenek.

Tabulka 8 Parametry navařování podélnými housenkami

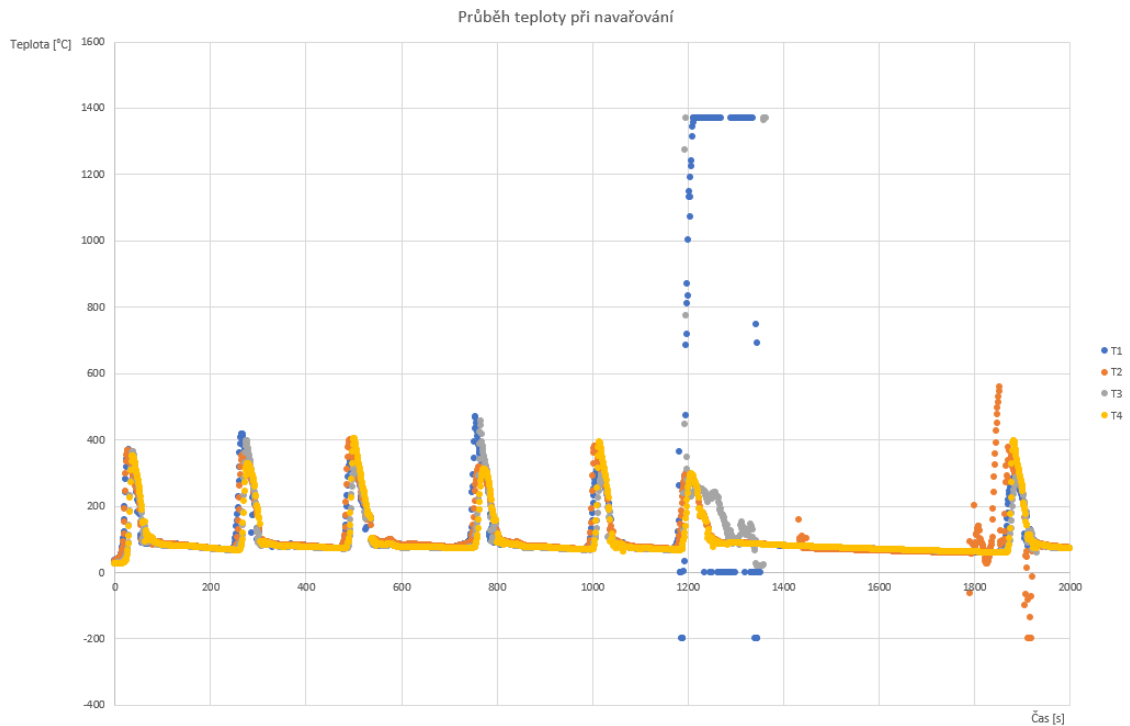
IH [A]	IL [A]	f [Hz]	lineární rychlost [mm.s ⁻¹]	podávání [g.min ⁻¹]	rozteč [mm]
215	75	29	3	8,5	1,6

Pro porovnání s vytvořeným návarem z materiálu SZW 5049 pomocí podélných housenek byly zcela totožné parametry (Tabulka 8) zvoleny i pro navaření rychlořezné oceli HSS 23.

Návar z rychlořezné oceli HSS 23 vytvořil kvalitní metalurgické spojení, ovšem v návarech se objevovaly póry a trhliny (viz metalografie).

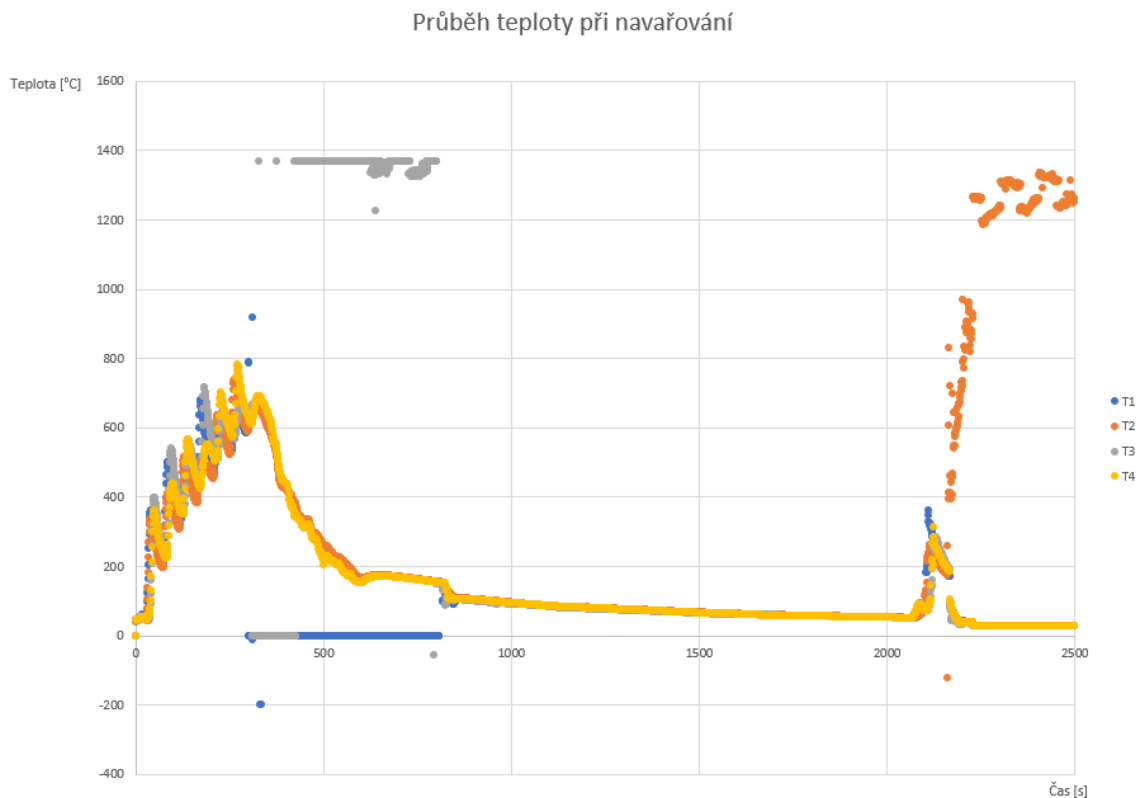
Po vyhotovení výše zmíněných návarů z materiálu SZW 5049 a rychlořezné oceli HSS 23 byl dále zkoumán materiál SZW 5049. Jelikož návar z materiálu SZW 5049, který byl vytvořen, měl tloušťku 4 mm a obsahoval vyprecipitované částice (viz metalografie), byla zde snaha o jejich eliminaci.

Byly zachovány parametry z tabulky výše (Tabulka 8). Jeden návar byl navařen tak, že po každé ze sedmi housenek byl materiál ochlazen vodou na zhruba 70 °C a následně se pokračovalo v navařování. Tento způsob navařování nevedl k eliminaci vyprecipitovaných částic. Maximální teplota materiálu při metodě ochlazování po jednotlivých housenkách se pohybovala okolo 400 °C (Graf 1).



Graf 1 Průběh teploty při navařování podélných housenek, ochlazení po každé housence

Druhý pokus o eliminaci částic spočíval v přetavení výsledného návaru, kdy byly opět zachovány parametry (Tabulka 8) výše, ovšem po vytvoření návaru a jeho ochlazení byl celý návar přetaven a následně ve vodě prudce ochlazen. Zde bylo dosaženo maximální teploty materiálu 800 °C (viz Graf 2).



Graf 2 Průběh teploty při navařování podélných housenek, přetavení

Zde byla snaha dosáhnout rozpuštění vyprecipitovaných částic v materiálu SZW 5049 a prudkým ochlazením zamezit jejich opětovnému vyprecipitování. U tohoto pokusu opět nebyla precipitace částic odstraněna, ovšem nad metalurgickým spojením základního materiálu s návarem byla vyzorována tenká oblast, místy s tloušťkou 0,2 mm, která obsahovala čistou austenitickou strukturu (viz metalografie).

Při zjištění, že v tomto experimentu není dosažitelná úplná eliminace částic, byla snaha upřena na ztenčení navařované vrstvy. Tenká vrstva se jevila být výhodná jak z hlediska snížení poměru vyprecipitovaných částic v návaru, tak z ekonomického hlediska, kdy by došlo k ušetření přídavného materiálu.

Následovaly pokusy o navaření tenké vrstvy metodou podélných housenek, kdy byly modifikovány parametry (Tabulka 8). Byla zvyšována lineární rychlost hořáku z $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ postupně až na $6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, bylo snižováno podávání prášku z $8,5 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ postupně na $5,7 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$. Byla zvýšena rozteč mezi housenkami z 1,6 mm na 2,2 mm, což způsobilo úbytek ze sedmi na 5 housenek.

Všechny tyto změny vedly ke zhoršení předem daných kritérií, což bylo kvalitní metalurgické spojení a rovnoměrná, přesná a plochá geometrie návaru. Tudíž bylo opuštěno od způsobu navařování metodou podélných housenek a přešlo se oscilačnímu navařování.

Pro oscilační navařování byly navrženy empiricky první parametry stejně jako u metody navařování podélných housenek. První parametry pro oscilační navařování byly následující (viz Tabulka 9). Řádky programu byly generovány softwarem po zadání parametrů.

Tabulka 9 První parametry navařování pro oscilační navařování

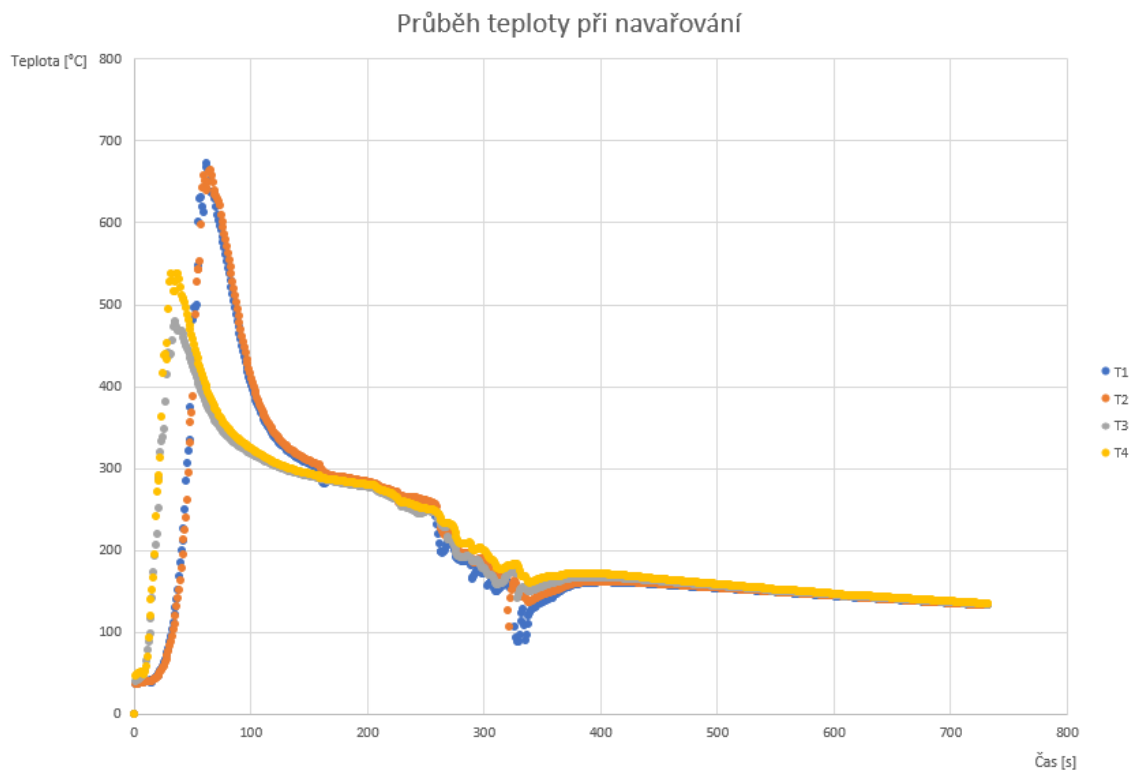
IH [A]	IL [A]	f [Hz]	podávání [g.min ⁻¹]	krok [mm]	rychlost kroku [mm.s ⁻¹]	rychlost hořáku [mm.s ⁻¹]
130	85	133	11,4	2,7	8	15

Návar vzniklý při parametrech (Tabulka 9) byl kvalitně metalurgicky spojen, a tak další snaha byla provedena za účelem zlepšení geometrie a snížení tloušťky návaru, tudíž bylo upraveno podávání a rychlosti (viz Tabulka 10).

Tabulka 10 Optimalizované parametry pro oscilační navařování

IH [A]	IL [A]	f [Hz]	podávání [g.min ⁻¹]	krok [mm]	rychlost kroku [mm.s ⁻¹]	rychlost hořáku [mm.s ⁻¹]
130	85	133	8,5	2,7	4	8

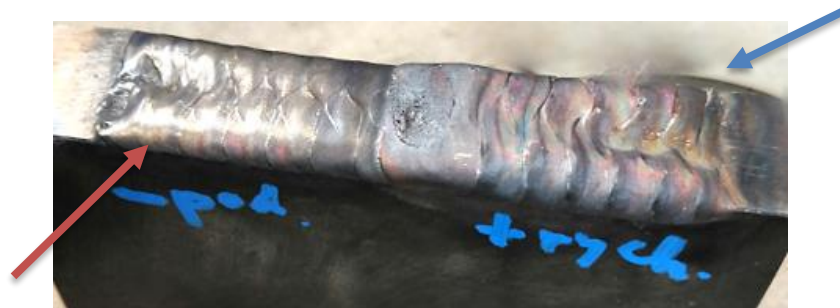
Parametry (Tabulka 10) byly výchozí pro následné iterace, kdy byla snaha dosáhnout vyhovující geometrie návaru při cílené snížené tloušťce návaru. Při parametrech (Tabulka 10) bylo dosaženo tloušťky návaru přibližně 2 mm. Maximální teplota dosažená pro parametry z Tabulka 10 byla 670 °C (viz Graf 3). U oscilačního navařování byla maximální teplota nižší než u metody navařování podélnými housenkami.



Graf 3 Průběh teploty při oscilačním navařování, parametry (Tabulka 10)

Základní úvahy pro snížení tloušťky vrstvy pod 2 mm byly snížení podávání prášku a zvýšení rychlosti pohybu hořáku při oscilačním navařování.

Nejprve bylo sníženo jen podávání prášku z 8,5 na 5,7 g.min⁻¹. Všechny ostatní parametry zůstaly stejné (Tabulka 10). Následně bylo podávání prášku vráceno na původní hodnotu (Tabulka 10) a rychlost hořáku zvýšena z 8 na 11 mm.s⁻¹. Ostatní parametry stále zůstávaly stejné (Tabulka 10). Třetí návar, který byl v této fázi proveden, byl kombinací předchozích parametrů, kdy bylo sníženo podávání prášku na 5,7 g.min⁻¹ i zvýšena rychlost na 11 mm.s⁻¹. Výsledný polotovar s návary je vidět na obrázku níže (Obrázek 20). Strana navařovaného kvádru, na kterou byly navařeny oba návary, má délku 100 mm a šířku 20 mm.



Obrázek 20 Polotovar s návary, navařovaná strana 100 x 20 mm

Návar se sníženým podáváním prášku (označený červenou šipkou), který je plošší, má menší tloušťku a je pravidelnější. Návar se zvýšenou rychlostí hořáku (označený modrou šipkou) není tak pravidelný. Zároveň z důvodu vyšší rychlosti hořáku docházelo k trhání svarové lázně, což způsobilo prohlubeň uprostřed návaru. Návar se snížením podáváním a zvýšenou rychlostí dopadl nejhůře z popsaných, jelikož byl plochý a zároveň se uprostřed tvořila prohlubeň.

Ze znalostí výsledků zmíněných tří návarů byly vybrány parametry, kterými se provede navaření celého segmentu, a bude zde snímána teplota. Tyto parametry byly totožné s návarem se sníženým podáváním, ovšem pro zlepšení geometrie a zvýšení tloušťky návaru na hranách byla rychlost kroku snížena z 4 mm.s⁻¹ na 3 mm.s⁻¹.

Byl navařen návar, kde byla tloušťka opět zhruba 2 mm. Na základě výše zmíněných výsledků bylo usouzeno, že kromě již uvedených parametrů, které byly

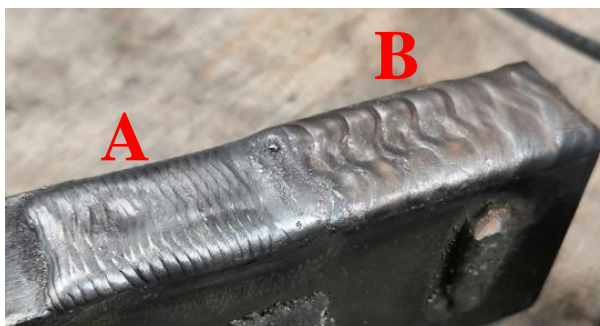
měněny, bude nutné změnit (zmenšit) i krok při oscilačním navařování, aby vznikl návar menší tloušťce a tím bylo v návaru dosaženo, co možná největšího poměru mezi čistou austenitickou strukturou a strukturou s vyprecipitovanými částicemi, což vyplývalo z předchozích návarů navařených v tomto experimentu.

Metodou půlení intervalů byl krok u oscilačního navařování ve směru osy X změněn z 2,7 mm na 1,3 mm. Tím pádem, aby bylo zachováno stejné vnesené teplo, bylo nutné změnit zbylé parametry. Přes dopočet výsledného vneseného tepla byly zvoleny následující parametry (viz Tabulka 11).

Tabulka 11 Optimalizované parametry navařování (Tabulka 10)

IH [A]	IL [A]	f [Hz]	podávání [g.min ⁻¹]	krok [mm]	rychlost kroku [mm.s ⁻¹]	rychlost hořáku [mm.s ⁻¹]
110	55	133	5,7	1,3	6	15

Návar vzniklý parametry z (Tabulka 11) je vidět níže (Obrázek 21). Návar s krokem při oscilačním navařování 1,3 mm je označen písmenem A (Obrázek 21). Návar s krokem 2,7 mm je označen písmenem B (Obrázek 21). Nový návar s krokem 1,3 mm měl vhodnou geometrii, ovšem bylo žádoucí zvolit parametry, u kterých bude dodáno menší vnesené teplo z důvodu přehřátí základního materiálu i návaru. Strana kvádru, na kterou byly navařeny oba návary, má opět délku 100 mm a šířku 20 mm.



Obrázek 21 Návary A (krok 1,3 mm) a B (krok 2,7 mm),
Strana kvádru 100 x 20 mm

V této části experimentu došlo opět k několika iteracím, kdy byly optimalizovány ostatní parametry navařování kromě velikosti kroku v ose X, který byl udržován na hodnotě 1,3 mm.

Po několika iteracích bylo nutné pro dosažení vyšší kvality návaru ustoupit i od velikosti kroku 1,3 mm.

Výsledné parametry, které byly vyhodnoceny jako nejvhodnější, a bylo jimi dosaženo v tomto experimentu nejkvalitnějšího návaru, což znamená vhodná geometrie návaru, kvalitní metalurgické spojení a minimální tloušťka, jsou zmíněny níže (Tabulka 12). Tloušťka, které bylo dosaženo, byla 1,5 mm. Při finálním návaru byl zaznamenán pomocí termočlánků průběh teplot.

Tabulka 12 Finální parametry pro oscilační navařování

I_H [A]	I_L [A]	f [Hz]	podávání [g.min ⁻¹]	krok [mm]	rychlost kroku [mm.s ⁻¹]	rychlost hořáku [mm.s ⁻¹]
90	55	117	3,8	0,9	3	8

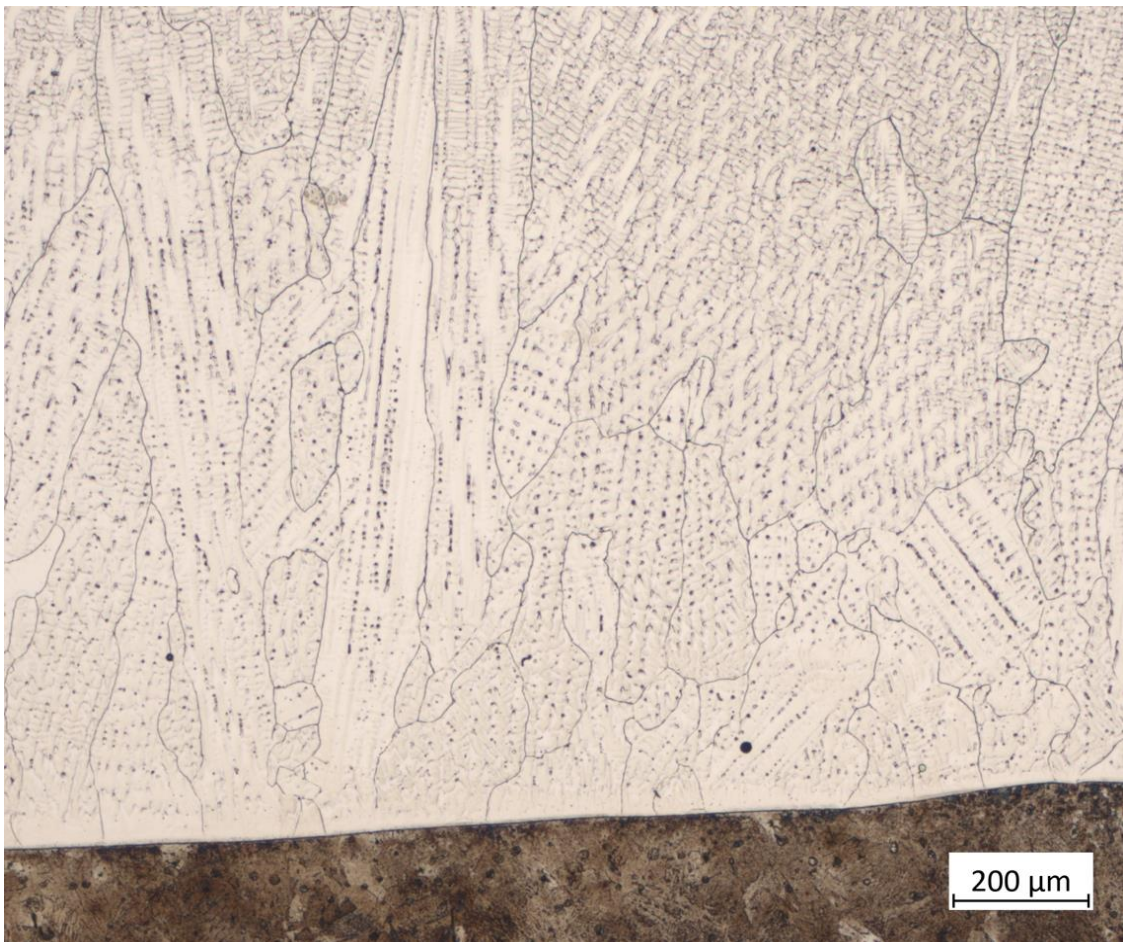
Ideálními parametry pro materiál SZW 5049 (Tabulka 12) byl navařen na segment i přídavný materiál HSS 23. Při navařování oceli HSS 23 byl zvolen předehřev v peci na teplotu cca 230 °C a následně po navaření bylo zvoleno ochlazení v peci. Předehřevu a ochlazení v peci bylo zvoleno z důvodu, aby nedošlo k vzniku trhlin, případně dalších vad návaru.

Návar z rychlořezné oceli HSS 23 měl vhodnou geometrii a došlo ke kvalitnímu metalurgickému spojení. Tloušťka návaru se pohybovala stejně jako u návaru z oceli SZW 5049 okolo 1,5 mm.

4.2 Mikrostruktura

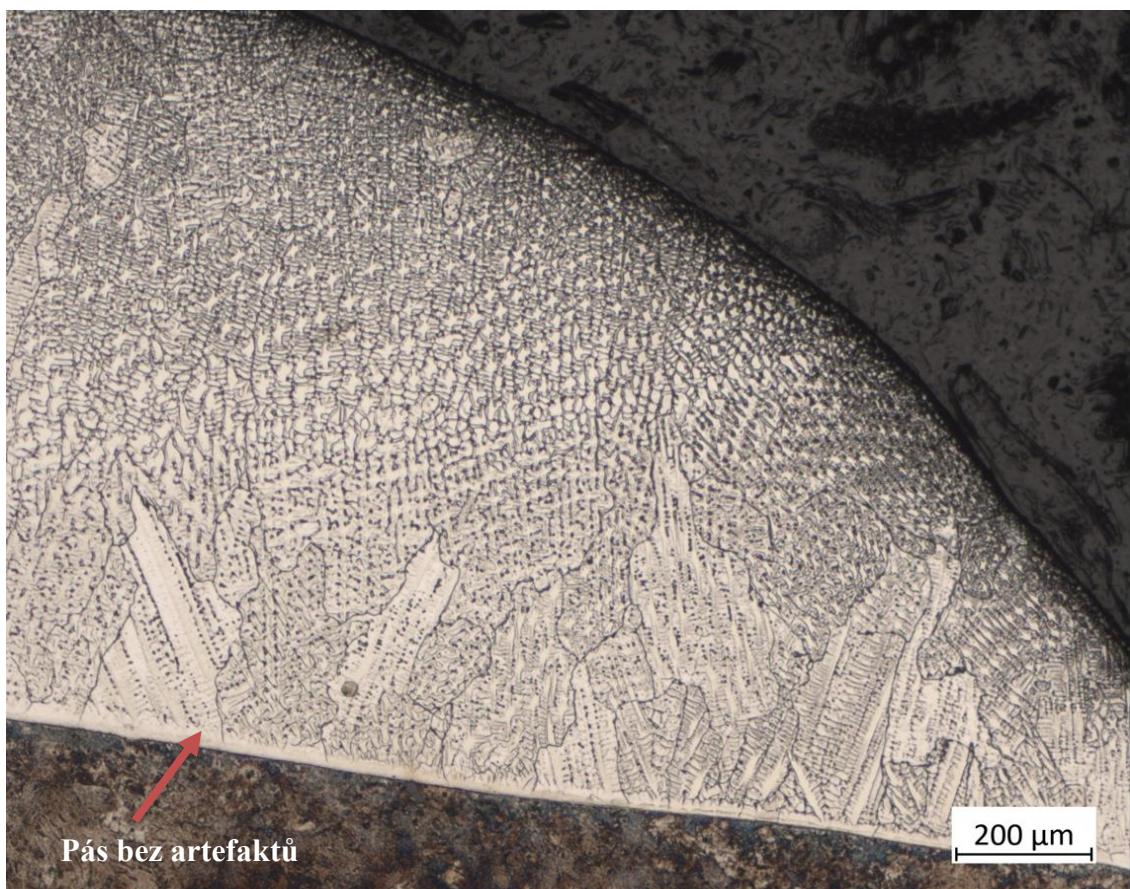
4.2.1 Hadfieldova ocel

Hlavní aspekty, které byly sledovány u oceli SZW 5049, byly kvalita metalurgického spojení, struktura matrice, hranice zrn, artefakty vzniklé v matrici. Při pohledu v menším zvětšení (zvětšení 50x) je patrné, že návar je tvořen austenitickou strukturou. Je zde vidět dendritická struktura, která vznikala při přechodu materiálu z taveniny. Kromě austenitické struktury je vidět mnoho artefaktů (černých teček), které se nacházejí uvnitř zrn (viz Obrázek 22). Hranice zrn se jeví čisté bez jakýkoli vyloučených částic. Metalurgické spojení návaru a základního materiálu se jeví jako kvalitní. Doposud popsané charakteristiky byly charakteristické pro všechny metalograficky zkoumané návary oceli SZW 5049.



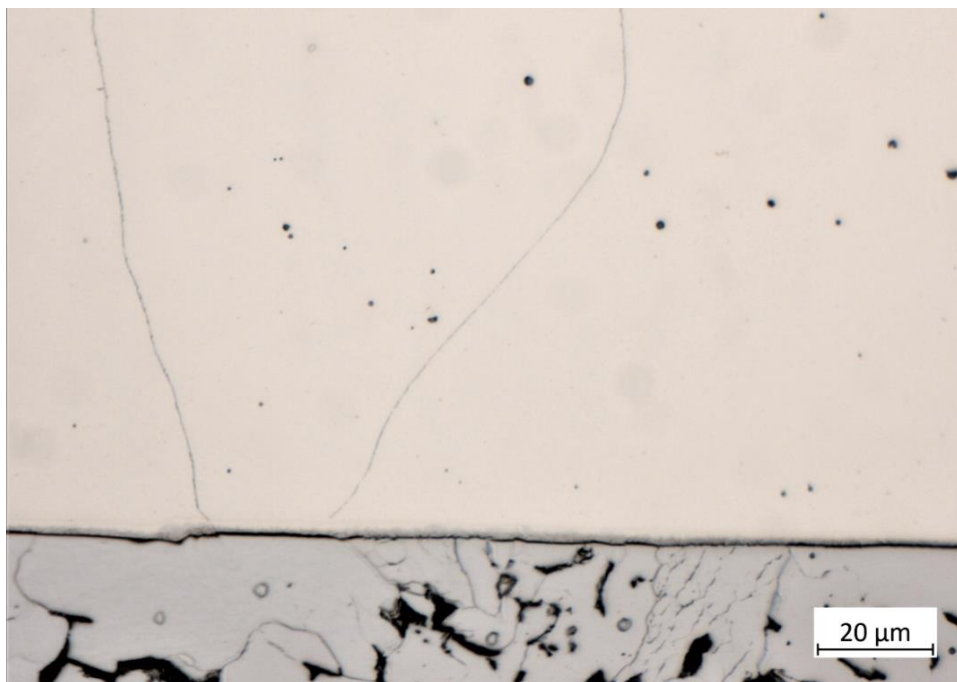
Obrázek 22 Struktura oceli SZW 5049, Zvětšení 50x

Pro finální návar z materiálu SZW 5049 (parametry Tabulka 12) budou rozebrány jednotlivé výše zmíněné aspekty (kvalita metalurgického spojení, struktura matrice, hranice zrn, artefakty vzniklé v matrici). Artefakty v podobě černých teček se objevovaly stále ve stejném množství. Ovšem směrem k povrchu návaru se jejich množství zvyšovalo v porovnání se středem návaru (viz Obrázek 23). Na obrázku je také vidět pás návaru nad základním materiálem, kde je artefaktů výrazně méně a struktura se jeví jako čistě austenitická. Jak vyplynulo z analýzy na elektronovém mikroskopu, jedná se o pás, kde došlo k promíšení základního materiálu s přídatným materiálem.



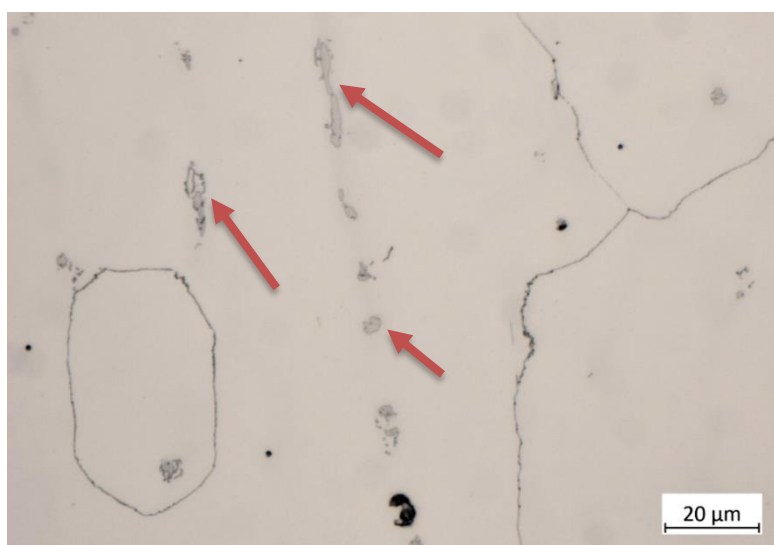
Obrázek 23 Pásmo čistého austenitu u oceli SZW 5049, Zvětšení 50x

Po zvolení většího zvětšení (zvětšení 500x) bylo zjištěno, že artefakty nejsou karbidy, ovšem se jedná o kombinaci pórů a oxidických vměstků. Oxidické vměstky i póry se pravděpodobně vyskytly v návaru kvůli plynným nebo pevným nečistotám (viz Obrázek 24).



Obrázek 24 Struktura oceli SZW 5049, oxidické vměstky, Zvětšení 500x

Kromě výše popsaných artefaktů v podobě černých teček byla při zvětšení 500x a 1000x pozorována další fáze v návaru. Zmíněná fáze se vyskytovala v návaru velmi ojediněle. Nevyskytovala se na hranicích zrn, ovšem uvnitř v austenitických zrnech (viz Obrázek 25).



Obrázek 25 Fáze v oceli SZW 5049, Zvětšení 500x

Vzniklé částice nejsou v podobě černých teček, mají oválný nepravidelný tvar. Při pozorování v optickém mikroskopu se jeví jako šedé. Jedná se nejspíše o karbidy. S největší pravděpodobností se jedná o karbidy manganu a chromu.

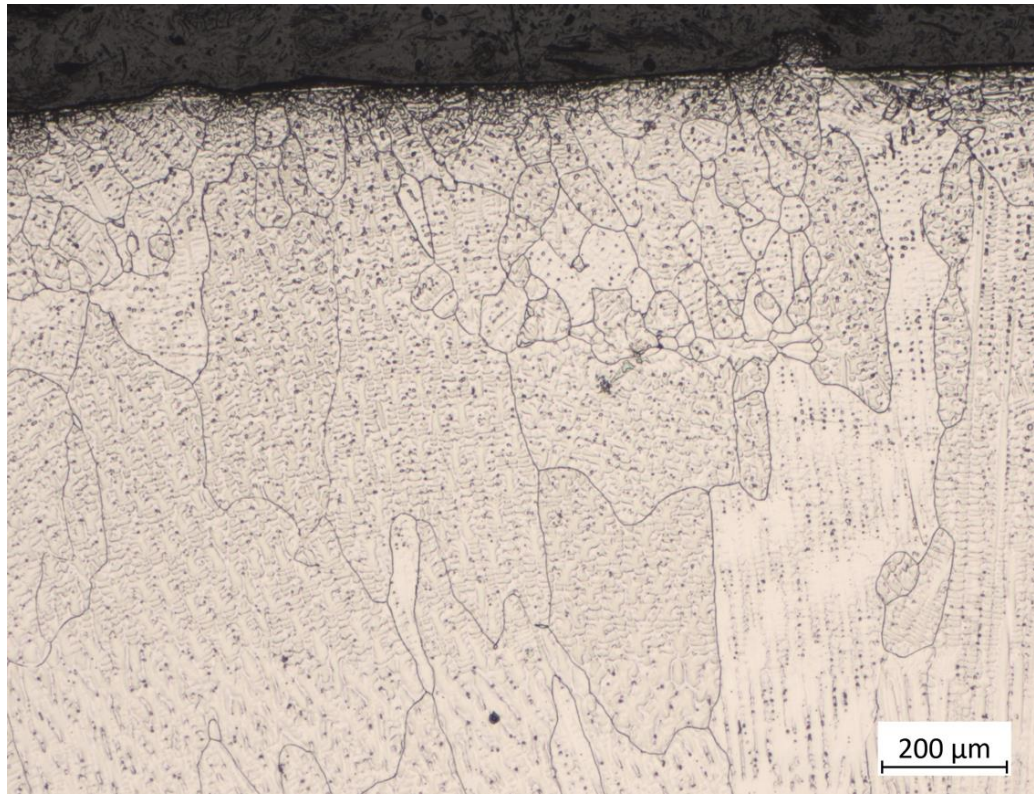
Z množství částic nacházejících se v návaru a jejich rozmístění lze usuzovat, že nebudou mít zásadní vliv na mechanické vlastnosti návaru a výslednou funkčnost navařeného polotovaru segmentu ohraňovacího lisu.

Hranice zrn byly čisté. Nenacházely se na nich žádné vyloučené fáze, které se na hranicích zrn očekávaly. To platilo pro celý objem návaru (viz Obrázek 26).



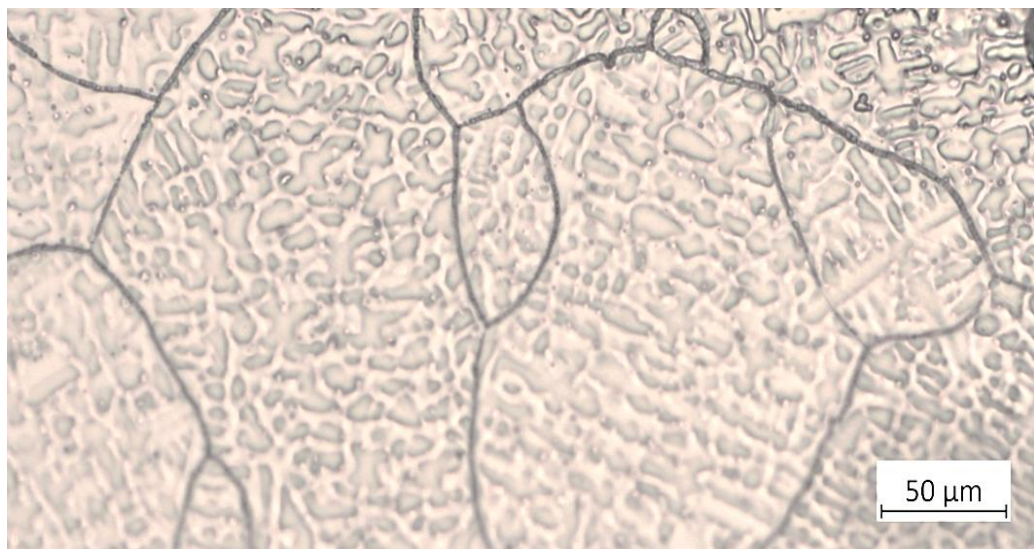
Obrázek 26 Hranice austenitických zrn oceli SZW 5049, Zvětšení 100x

Matrice byla austenitická dle očekávání. Velikost zrna nebyla konstantní. V návaru se nacházely různé velikosti zrn (viz Obrázek 27).



Obrázek 27 Rozdílná velikost austenitických zrn oceli SZW 5049, Zvětšení 50x

Samotná austenitická zrna jsou tvořena dendritickou strukturou (viz Obrázek 28).



Obrázek 28 Dendritická struktura v oceli SZW 5049, Zvětšení 200x

Metalurgické spojení bylo vytvořeno finálními parametry oscilačním navařováním ve všech místech. Došlo ke kvalitnímu spojení návaru se základním materiálem, což lze tvrdit jak při menším zvětšení (50x) (Obrázek 29), tak při větším zvětšení (500x) (Obrázek 30).



Obrázek 29 Metalurgické spojení oceli SZW 5049, Zvětšení 50x

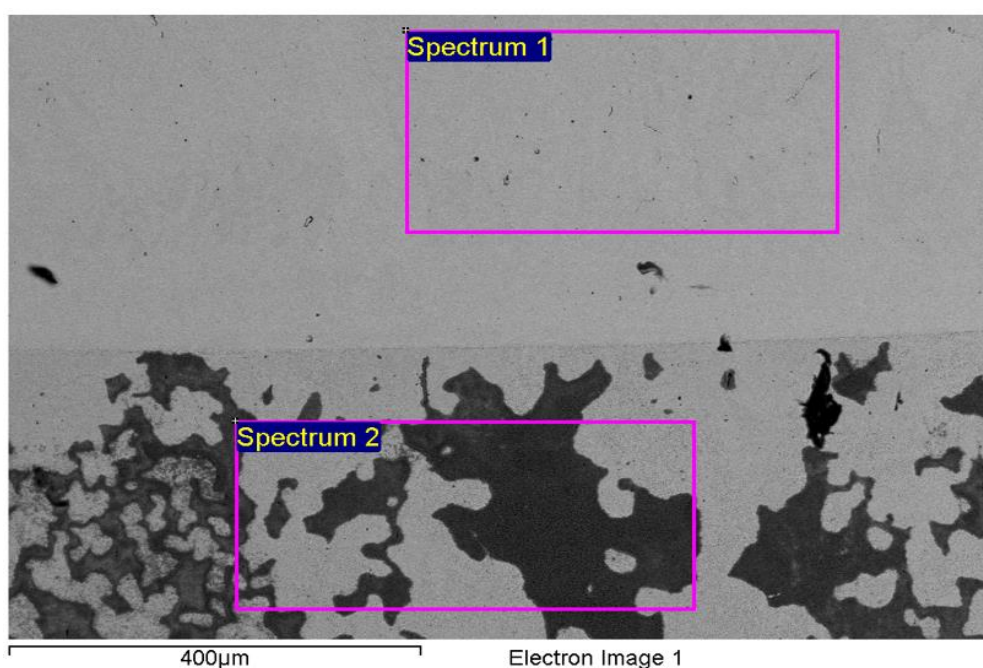


Obrázek 30 Metalurgické spojení oceli SZW, Zvětšení 500x

SEM analýza materiálu SZW 5049

Bylo určeno chemické složení návaru a základního materiálu. Z plošné analýzy chemického složení byl vzhledem k nerelevantním výsledkům vyloučen uhlík (například 17 % uhlíku v základním materiálu).

Byly vybrány dvě oblasti pro zkoumání chemického složení. První oblast (spektrum 1) v návaru a druhá oblast (spektrum 2) v základním materiálu (viz Obrázek 31).



Obrázek 31 Metalurgické spojení oceli SZW 5049 na skenovacím elektronovém

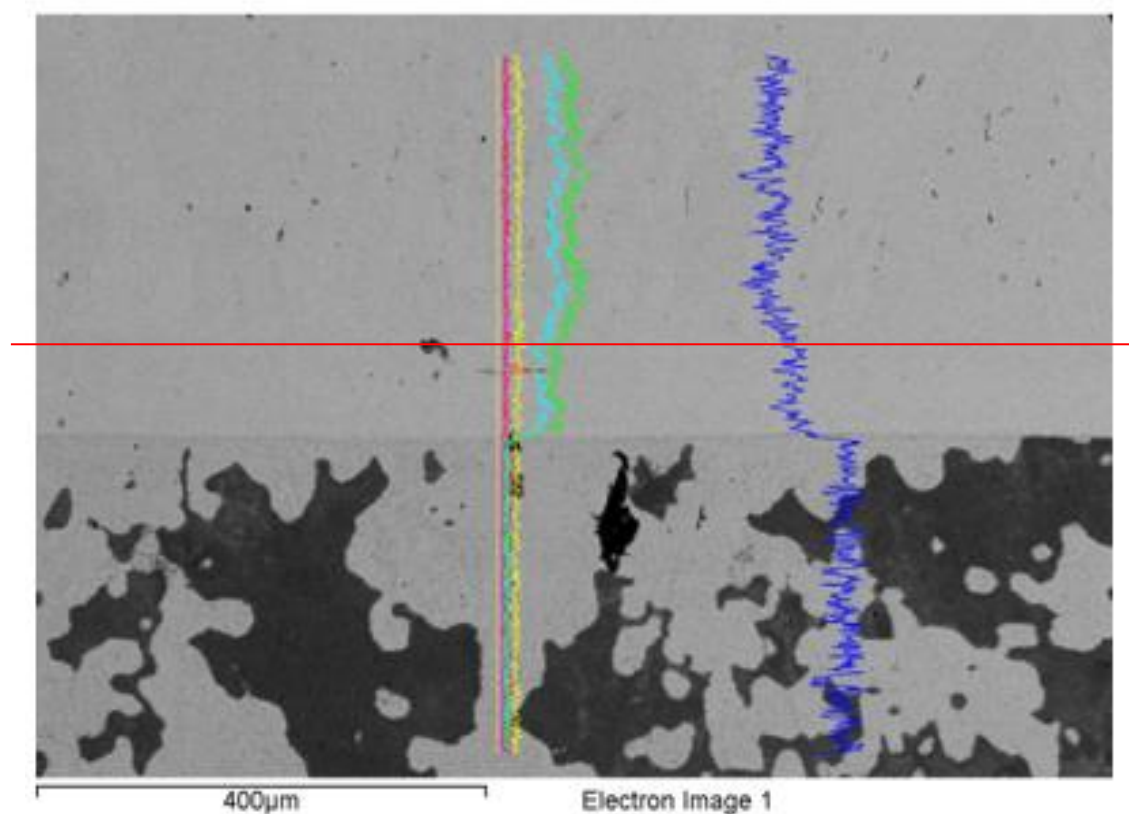
Chemické složení obou oblastí v hmotnostních procentech je vidět níže (Tabulka 13).

Tabulka 13 Chemické složení přídavného a základního materiálu, návar SZW 5049, SEM

Spectrum	In stats.	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Total
Spectrum 1	Yes	0.38	11.55	9.86	77.25	0.96	100.00
Spectrum 2	Yes	0.11		0.79	99.09		100.00

Návar obsahuje zhruba 12 % chromu a 10 % manganu, což odpovídá legujícím prvkům v oceli SZW 5049, ovšem chromu i manganu je předepsáno 14,2 %. Základní materiál vyšel jako prakticky čisté železo.

Byl analyzován průběh obsahů zásadních prvků od návaru přes vrstvu až do základního materiálu (viz Obrázek 32).



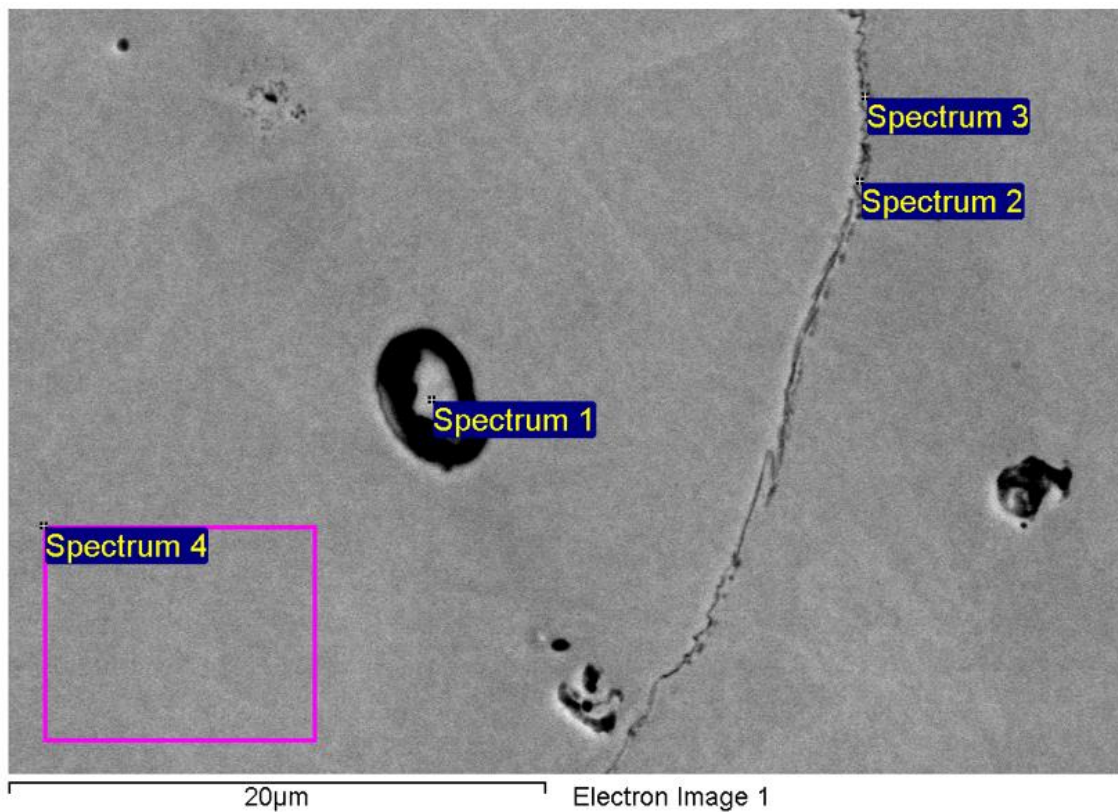
Obrázek 32 Průběh obsahů prvků v oceli SZW 5049

Je patrné, že v oblasti návaru pod červenou vodorovnou linií dochází k zvýšení obsahu železa (modrý průběh) až na hranici se základním materiálem, kde dochází opět k výraznému zvýšení obsahu železa. Se zvýšením obsahu železa dochází od stejného místa ke snížení obsahu legujících prvků manganu a chromu (světle modrý a světle zelený průběh), které v základním materiálu klesají na minimální hodnoty (Obrázek 32).

Ze zmíněných údajů lze usuzovat, že vrstva, která se jevila při pozorování optickým mikroskopem jako čistá austenitická struktura bez vměstků nebo karbidů, je vrstva, kde došlo k částečnému promíšení základního materiálu s návarem. Z čehož vyplývá, že v důsledku jiného chemického složení nedošlo ke vzniku zmíněných částic.

V následující části SEM analýzy je popsáno chemické složení na hranicích zrn, v oblasti částic (černých teček) pozorovaných na optickém mikroskopu a chemické složení austenitické matrice.

Byly zvoleny čtyři oblasti. Oblast 1 byla zvolena v místě, kde se nachází nebo se měla nacházet částice. Oblast 2 a 3 byly zvoleny na hranici zrn a oblast 4 byla zvolena jako plošná v matrici (viz Obrázek 33).



Obrázek 33 Chemická analýza černých artefaktů, matrice, hranic zrn oceli SZW 5049

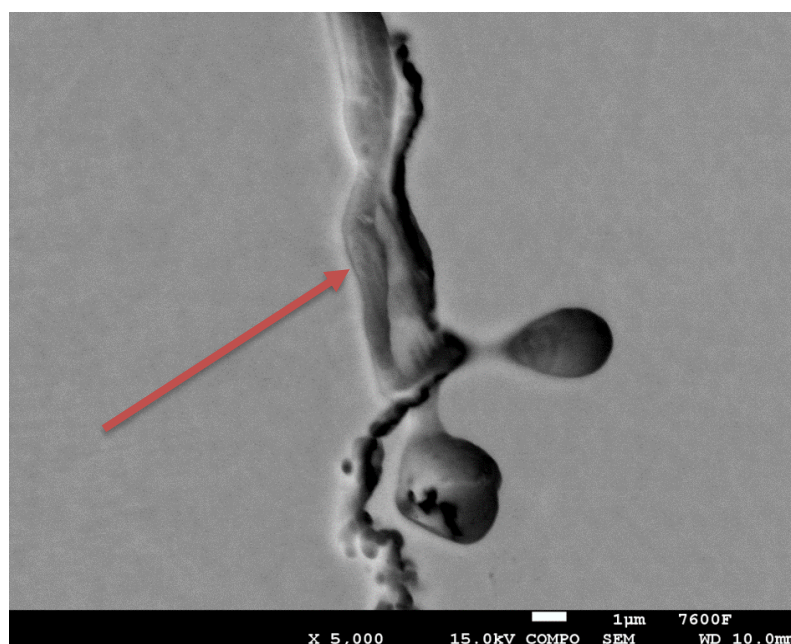
Chemické složení odpovídající výše zmíněným oblastem je vidět níže (Tabulka 14). Obsah uhlíku neodpovídá skutečnosti a jsou do něj započítány pravděpodobně i jiné prvky.

Tabulka 14 Chemické složení oblastí z Obrázek 33

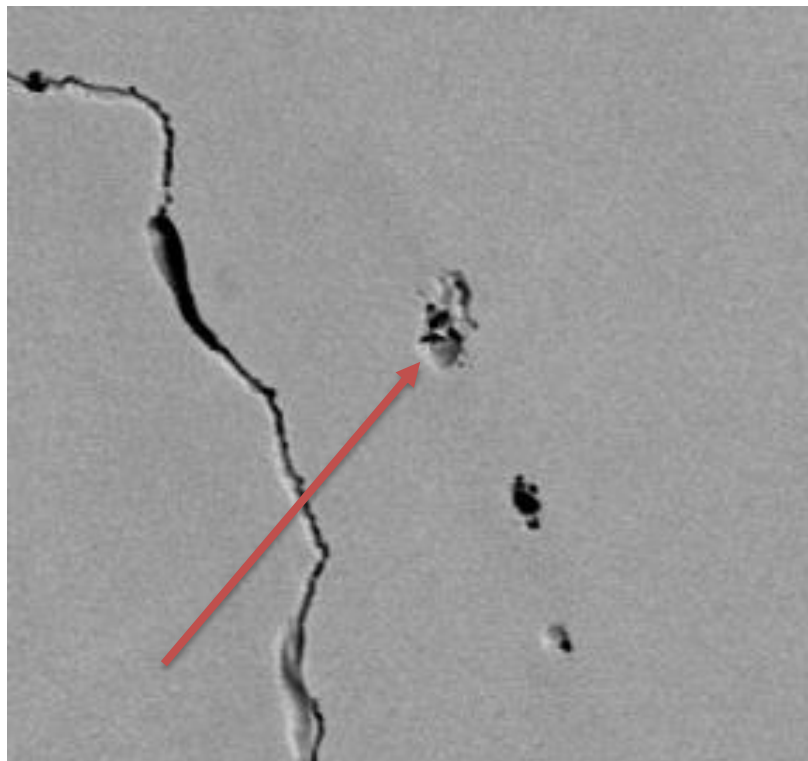
Spectrum	In stats.	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	Total
Spectrum 1	Yes	5.76	0.44	0.50	14.98	12.28	63.76	0.94	1.35	100.00
Spectrum 2	Yes	6.73	0.47	0.43	13.46	11.85	65.49	0.81	0.76	100.00
Spectrum 3	Yes	8.27	0.45	0.39	13.15	11.25	64.72	0.79	0.98	100.00
Spectrum 4	Yes	3.54	0.35	0.13	10.69	10.27	73.72	0.99	0.30	100.00

Z chemického složení (Tabulka 14) ostatních prvků kromě uhlíku lze usuzovat, že došlo k segregaci chromu a manganu a snížení obsahu železa na hranicích zrn.

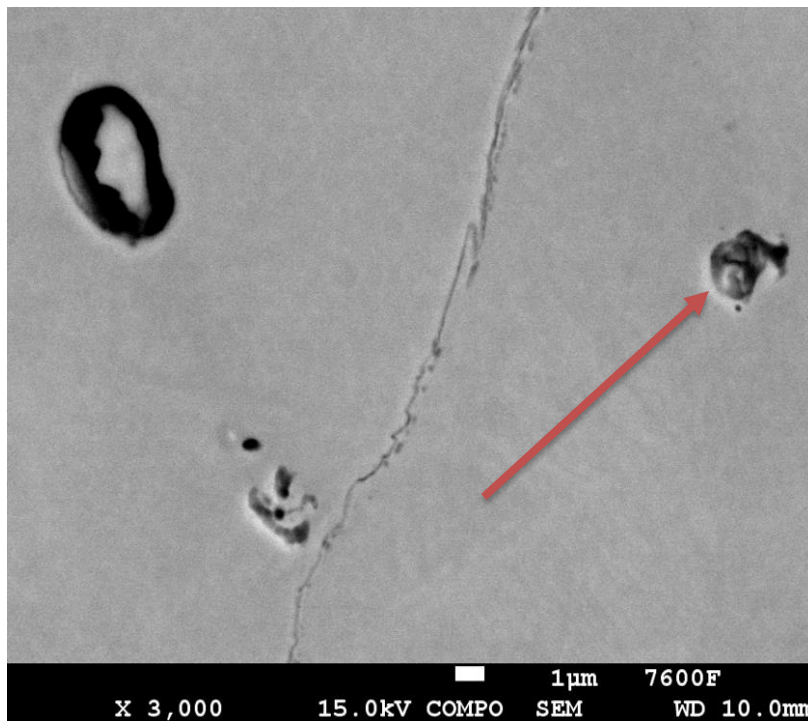
Ohledně částic, které se při pozorování v optickém mikroskopu jevily jako černé tečky, bylo pomocí SEM zjištěno, že se nejedná o karbidy, ovšem nejspíše o vměstky a póry. Fáze, které měly být s největší pravděpodobností karbidy, byly nejspíše odstraněny (vyleptány) nevhodnou přípravou metalografického vzorku. Při pozorování na elektronovém mikroskopu byly patrné díry po těchto fázích (viz Obrázek 34, Obrázek 35, Obrázek 36).



Obrázek 34 Díra po vyleptané fázi 1



Obrázek 35 Díra po vyleptané fázi 2

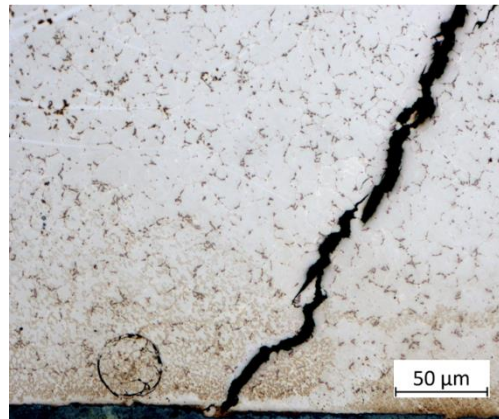


Obrázek 36 Díra po vyleptané fázi 3

4.2.2 HSS 23

Návary z rychlořezné oceli HSS 23 byly navařeny jako porovnání k oceli SZW 5049, tudíž nebylo vytvořeno tolik metalografických výbrusů jako pro výchozí materiál. Byl vytvořen výbrus jen z posledního návaru vytvořeného podélnými housenkami a z finálního návaru navařeného oscilačním navařováním.

U návaru vytvořeného podélnými housenkami bylo dosaženo kvalitního metalurgického spojení, ovšem návar obsahoval póry a došlo k vzniku trhliny v celém průřezu návaru (viz Obrázek 37).

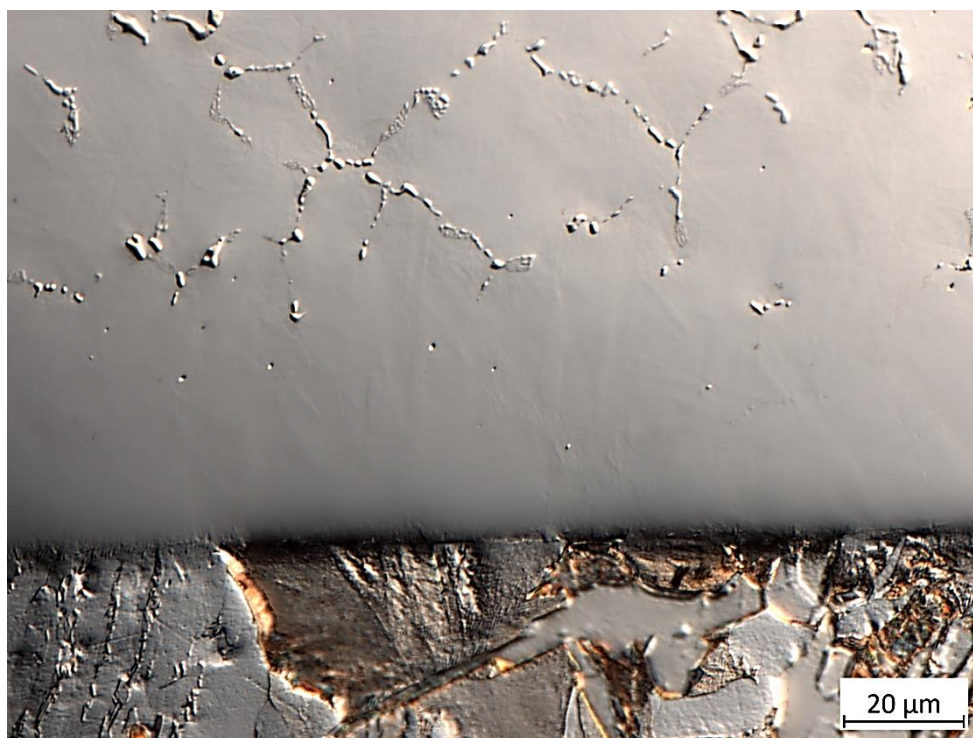


Obrázek 37 Trhlina v materiálu HSS 23, Zvětšení 200x

U návaru vytvořeného finálními parametry (Tabulka 12) pomocí oscilačního navařování se již nenacházely výše zmíněné póry a trhliny nejspíše díky dodržení pomalého ochlazování v peci. Metalurgické spojení bylo kvalitní jak při pozorování v malém zvětšení, tak ve větším (viz Obrázek 38, Obrázek 39).



Obrázek 38 Metalurgické spojení oceli HSS 23, Zvětšení 50x



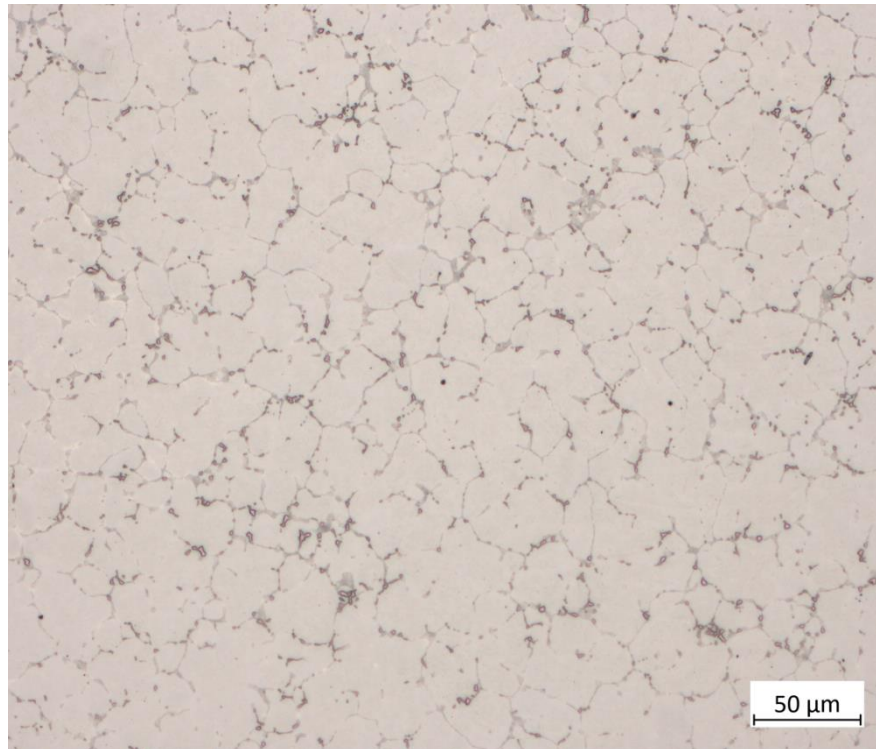
Obrázek 39 Fáze na hranicích zrn u materiálu HSS 23, DIC filtr, Zvětšení 500x

Stejně jako u výchozího materiálu i u rychlořezné oceli došlo k vzniku pásu bez částic těsně nad metalurgickým spojením (viz Obrázek 40). Zde se jedná opět o promíšení, kdy se změnilo chemické složení v oblasti a nedošlo k vzniku částic (karbidů) jako ve zbytku návaru.

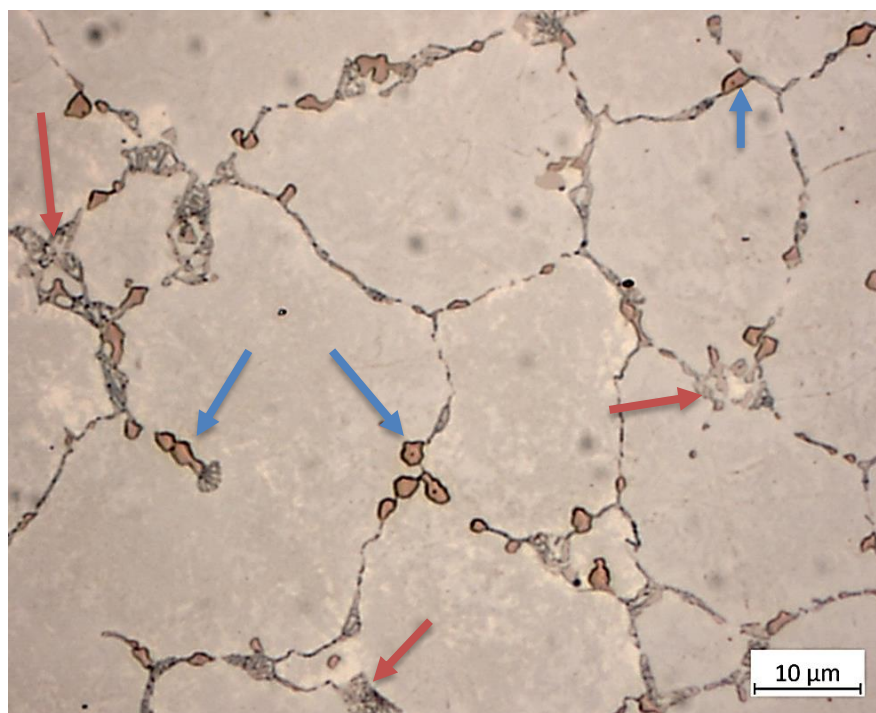


Obrázek 40 Pás bez částic u materiálu HSS 23, Zvětšení 100x

Samotný návar byl tvořen pravidelnými zrn (viz Obrázek 41), kdy na hranicích zrn byly vyloučeny karbidy dvojího typu (modrá a červená šipka) (viz Obrázek 42), což bylo očekáváno, jelikož se jedná o rychlořeznou ocel, která obsahuje karbidotvorné prvky [57].



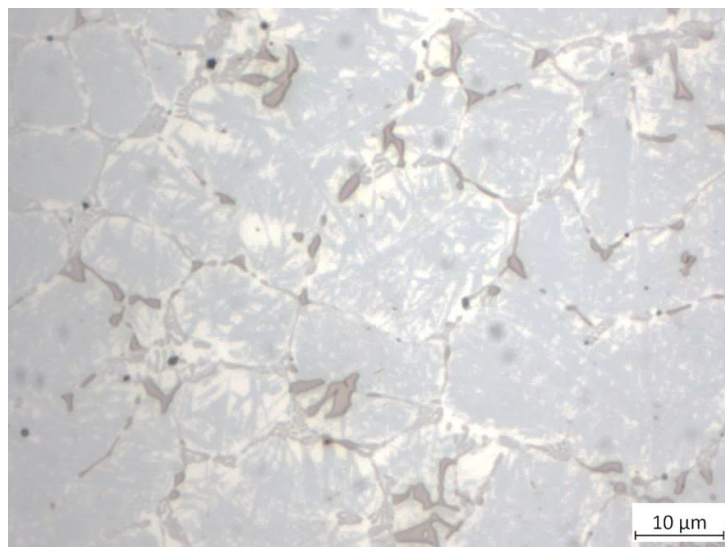
Obrázek 41 Struktura rychlořezné oceli HSS 23, Zvětšení 200x



Obrázek 42 Struktura rychlořezné oceli HSS 23, Zvětšení 1000x

Pro názornější představu profilu vyloučených částic byl použit při pozorování DIC filtr (viz Obrázek 39).

Zrna rychlořezné oceli HSS 23 jsou tvořena jemnými jehlicemi martenzitu, který v návaru mohl vzniknout hned po navaření vzhledem k prudkému ochlazení (rychlý přejezd hořáku) [57]. Martenzitické jehlice jsou viditelné v návaru, který byl vytvořen podélnými housenkami (Obrázek 43). U návaru vytvořeného metodou oscilačního navařování není martenzit tak patrný, ovšem při použití DIC filtru jsou jehlice viditelné i u metody oscilačního navařování (viz Obrázek 39).



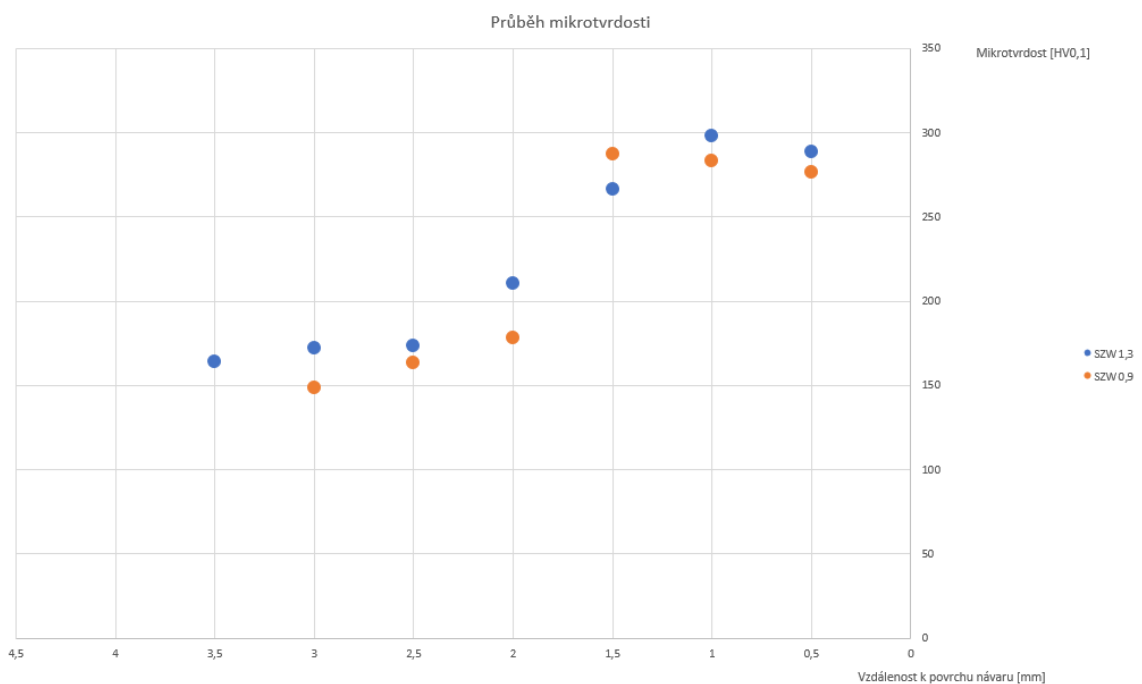
Obrázek 43 Martenzitické jehlice v oceli HSS 23, navařeno podélnými housenkami, Zvětšení 1000x

4.3 Mikrotvrдость

4.3.1 Návary

První dva měřené vzorky z oceli SZW 5049 byly návary vytvořené oscilačním navařováním, které se navzájem lišily jen velikostí kroku, kdy jeden vzorek měl velikost kroku 1,3 mm a druhý velikost kroku 0,9 mm. Ostatní parametry zůstaly totožné.

U vzorku z oceli SZW 5049 s krokem 1,3 mm byla stanovena průměrná podpovrchová mikrotvrдость 281 HV 0,1 a u vzorku z oceli SZW 5049 s krokem 0,9 mm byla stanovena průměrná podpovrchová mikrotvrдость 293 HV 0,1.

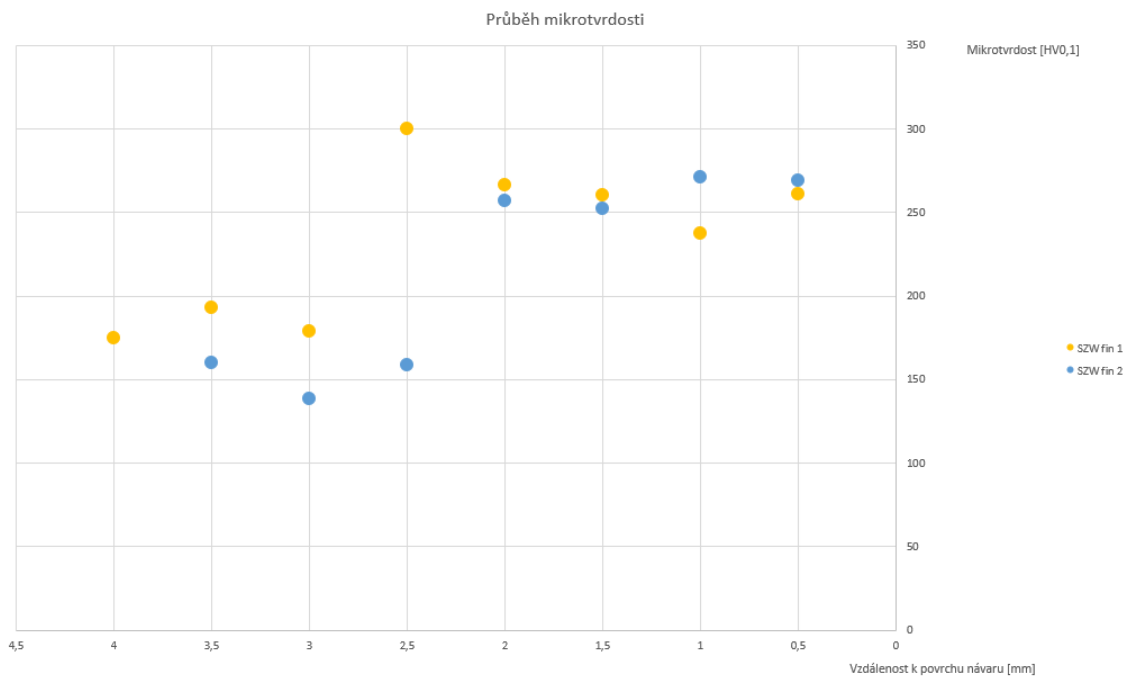


Graf 4 Průběh mikrotvrđosti ze základního materiálu k povrchu návary, ocel SZW 5049, deformačně nezpevněno, oscilační navařování, (krok 0,9 mm oranžová, krok 1,3 mm modrá)

V návary se mikrotvrđost u obou vzorků držela mezi 260 až 300 HV 0,1. Při přechodu do základního materiálu je vidět patrný pokles mikrotvrđosti na hodnoty oscilující mezi 150 až 180 HV 0,1 (viz Graf 4).

U finálních vzorků oceli SZW 5049 byla stanovena podpovrchová mikrotvrdość pro první vzorek 271 HV 0,1 a pro druhý vzorek 287 HV 0,1.

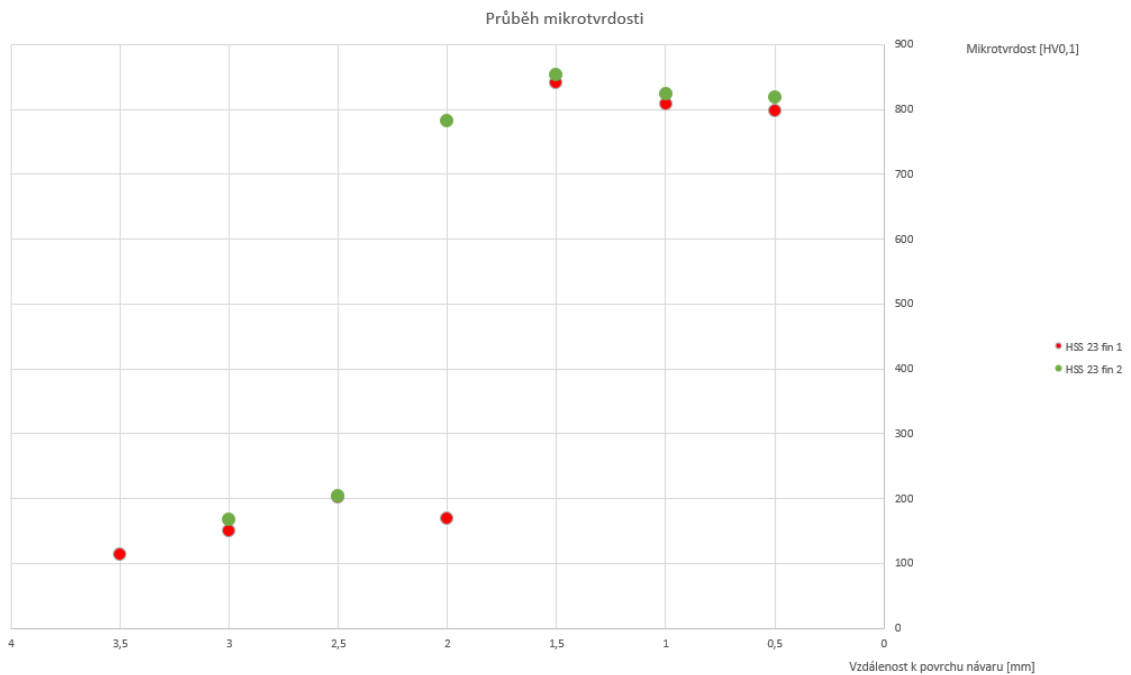
U prvního vzorku se pohybovala mikrotvrdość návaru mezi hodnotami 240 až 300 HV 0,1, u druhého vzorku se pohybovala mikrotvrdość návaru mezi 250 až 270 HV 0,1. V základním materiálu dochází opět k výraznému poklesu. U prvního vzorku se mikrotvrdość základního materiálu pohybovala okolo 180 HV 0,1 a u druhého vzorku okolo 150 HV 0,1 (Graf 5).



Graf 5 Průběh mikrotvrdości ze základního materiálu k povrchu návaru, ocel SZW 5049, deformačně nezpevněno, oscilační navařování, finální návar

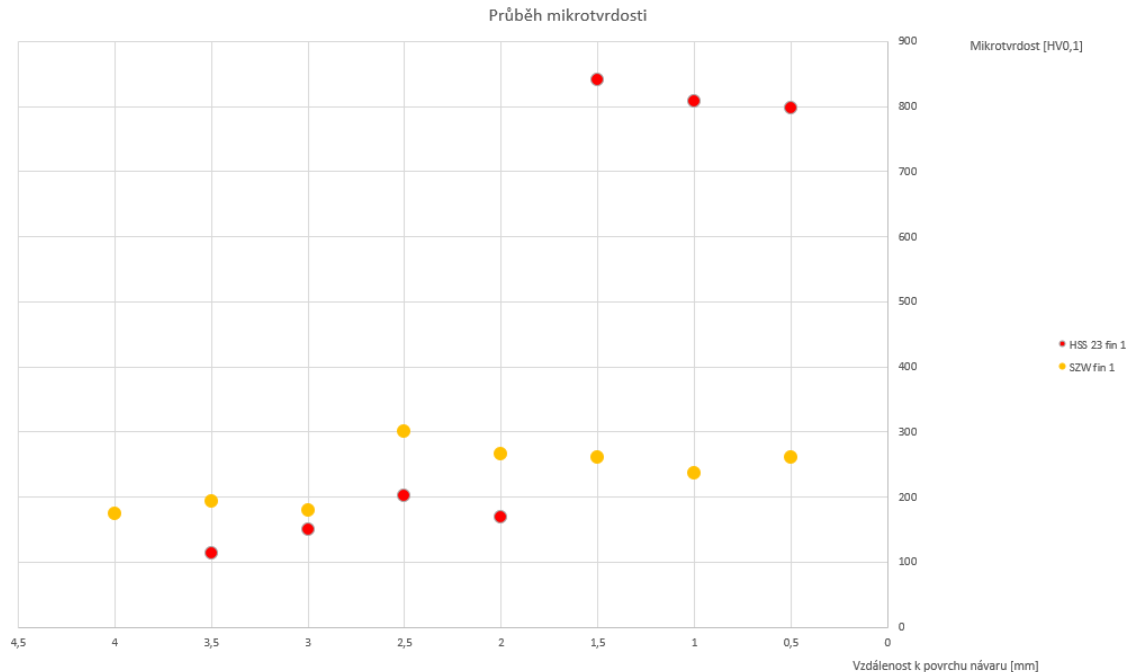
U vzorků z rychlořezné oceli HSS 23 vycházela průměrná podpovrchová mikrotvrдость u prvního vzorku 768 HV 0,1 a u druhého vzorku 828 HV 0,1.

U obou vzorků se mikrotvrдость v návaru u materiálu HSS 23 pohybovala mezi 790 až 850 HV 0,1. V základním materiálu opět dochází k poklesu mikrotvrđosti, kdy se mikrotvrđost pohybuje nejčastěji mezi hodnotami 150 až 200 HV 0,1 (Graf 6).



Graf 6 Průběh mikrotvrđosti ze základního materiálu k povrchu návaru, rychlořezná ocel HSS 23, nepopuštěno, oscilační navařování, finální návar

Bylo provedeno porovnání jednoho vzorku z finálního návaru oceli SZW 5049 a rychlořezné oceli HSS 23 v jednom grafu (viz Graf 7). Pro přehlednost nebyly do grafu zaznamenány všechny hodnoty ze všech vzorků.



Graf 7 Průběh mikrotvrdoti materiálů SZW 5049 (deformačně nezpevněno) a HSS 23 (nepopuštěno), finální parametry, oscilační navařování

Z měření mikrotvrdoti lze usuzovat, že v rychlořezné oceli HSS 23 se nejspíše vyskytuje martenzit, který zapříčinil mikrotvrdoti okolo 800 HV 0,1. Jedná se o martenzit v nepopuštěném stavu. Pro technickou praxi je rozdíl mikrotvrdotí návaru a základního materiálu 600 HV 0,1 možným zdrojem tvorby trhlin.

U návaru z oceli SZW 5049 bylo dosaženo mikrotvrdoti okolo 270 HV 0,1 z důvodu, že návar z materiálu SZW 5049 nebyl deformačně zpevněn. V případě deformačního zpevnění materiálu by bylo možné dosáhnout vyšších hodnot mikrotvrdoti.

4.3.2 Nástrojová ocel 19 520

Hodnoty mikrotvrdoti pro stávající materiál se lišily podle místa vtisků. Hodnoty v těsné blízkosti (do 5 mm) funkční plochy segmentu byly v průměru 671 HV 0,1. Ve větší vzdálenosti mikrotvrdot poklesla a hodnoty byly v průměru 350 HV 0,1.

5 Závěr

Teoretická část práce byla zaměřena na popis možností nanášení povlaků a vrstev na základní materiál s cílem zvýšení životnosti strojních součástí. Byly rozebrány metody pro nanášení tenkých povlaků (PVD a CVD). Byla přiblížena technologie žárového nástřiku. Zvláštní pozornost byla věnována navařování, konkrétně plazmovému navařování metodou PTA.

V další části byla provedena rešerše v oblasti materiálů používajících se k výrobě nástrojů pro tváření za studena se zaměřením na dvě hlavní skupiny (vysokolegované oceli a rychlořezné oceli), ze kterých byly vybrány materiály navařované v experimentální části. V teoretické části byla též zmíněna kontaktní únava jako jeden z jevů, které zásadně ovlivňují životnost nástrojů pro ohraňovací lisu.

V experimentální části práce byly navařeny dva zkušební materiály. První materiál byl typu Hadfieldovy oceli SZW 5049 s obsahem chromu zvýšeným na 14 %. Druhým materiálem byla rychlořezná ocel HSS 23.

Oba materiály byly navařeny metodou podélných housenek a oscilačním navařováním. Při navařování podélnými housenkami bylo u materiálu SZW 5049 dosaženo kvalitního metalurgického spojení a vhodné geometrie návaru. Při navařování podélnými housenkami se na povrchu návaru z materiálu HSS 23 objevily trhliny a póry. Během navařování byl mapován průběh teplot při navařování a následném ochlazování.

K metodě oscilačního navařování bylo přistoupeno ve snaze snížit tloušťku navařeného povlaku a zároveň dosáhnout příznivější geometrie. Oba materiály byly metodou oscilačního navařování navařeny za vzniku kvalitního metalurgického spojení, vhodné geometrie a dosažení tenčího návaru. Na základě výše zmíněných výsledků je metoda oscilačního navařování vhodnější pro použití v technické praxi.

Návar vytvořený oscilačním navařováním z materiálu SZW 5049 byl tvořen austenitickými zrny s dendritickou strukturou. Fáze (pravděpodobně karbidické), které vznikly uvnitř austenitických zrn, jsou velmi ojedinělé a neměly by mít vliv na finální mechanické vlastnosti návaru.

Návar vytvořený oscilačním navařováním z materiálu HSS 23 byl tvořen pravidelnými zrny a na hranicích zrn se nacházely dva druhy částic. Jedná se nejspíše o karbidické částice, které jsou tvořeny prvky W, Mo, V. Zrna jsou tvořena jehlicemi martenzitu, který je nepopuštěný a vznikl rychlým ochlazením při navařování.

Mikrotvrдость materiálu SZW 5049 pod povrchem a v průřezu návarem od povrchu do základního materiálu není zásadně rozdílná. Hodnoty mikrotvrđosti pro materiál SZW 5049 se pohybují okolo 270 HV 0,1. U materiálu HSS 23 také nebyly patrné výrazné změny mezi hodnotami podpovrchové mikrotvrđosti a mikrotvrđosti v průřezu, ovšem mikrotvrđost se pohybovala okolo 830 HV 0,1 (nepopuštěný martenzit).

Materiál SZW 5049 (270 HV 0,1) v porovnání se stávajícím materiálem pro segment ohraňovacích lisů (ocel 19 520, 671 HV 0,1) vykazoval nižší hodnoty mikrotvrđosti, ovšem jednalo se o deformačně nezpevněný stav. Materiál HSS 23 dosahoval vyšších hodnot mikrotvrđosti (850 HV 0,1) než ocel 19 520.

Bylo ukázáno, že technologií PTA je možné navařit segmenty ohraňovacích lisů s kvalitním metalurgickým spojením materiálů s odlišnými vlastnostmi. Vzniklé návary lze doporučit k dalším zkouškám mechanických vlastností. Pomocí parametrů navařování je možné dále optimalizovat tloušťku a geometrii návary. Kromě zkoušek mechanických vlastností lze doporučit i zkoušky kontaktní únavy. U materiálu SZW 5049 lze provést deformační zpevnění návary a následně měření mikrotvrđosti, kde by bylo zjištěno, zda hodnoty mikrotvrđosti budou vyšší než u oceli 19 520 (stávající materiál).

Seznam použité literatury

- [1] MATTOX, Donald M. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing* [online]. 2. vydání. USA: Elsevier Inc., 2010 [cit. 2023-07-27]. ISBN 978-0-8155-2037-5. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=aGUxoVTYjA8C&oi=fnd&pg=P1&dq=PVD&ots=bXw_b6bN1t&sig=_x5Wb7h2bMRig65EsslSLXpVHCw&r edir_esc=y#v=onepage&q=PVD&f=false.
- [2] BAPTISTA, Andresa, Francisco SILVA, Jacobo PORTEIRO, José MÍGUEZ a Gustavo PINTO. Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands. *Coatings* [online]. 2018, **8**(11), 402 [cit. 2023-07-27]. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/coatings8110402>.
- [3] SELVAKUMAR, N. a Harish BARSHILIA. Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high-temperature solar thermal applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 2012, **98**, 1-23 [cit. 2023-07-27]. ISSN 0927-0248. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.10.028>.
- [4] CHOY, K.L. Chemical vapour deposition of coatings. *Progress in Materials Science* [online]. 2003, **48**(2), 57-170 [cit. 2023-07-27]. ISSN 0079-6425. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(01\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(01)00009-3).
- [5] ČELKO, Ladislav, David JECH, Pavel KOMAROV, Michaela REMEŠOVÁ a Ivana ROČŇÁKOVÁ. Technologie žárových nástřiků: Aplikace, kvalita povlaků a rizika při jejich výrobě. *Povrcháři* [online]. 2017, **17**(3), 3-6 [cit. 2023-07-27]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201703_povrchari.pdf.
- [6] A Review on Thermal Spray Coating Processes. *International Journal of Current Trends in Engineering & Research (IJCTER)* [online]. 2016, **2**(4), 556-563 [cit. 2023-07-27]. ISSN 2455-1392. Dostupné z: <http://poudrafshan.ir/wp-content/uploads/2019/05/A-Review-on-Thermal-Spray-Coating-Processes-1.pdf>.
- [7] FAUCHAIS, P., A. VARDELLE a B. DUSSOUBS. Quo vadis thermal spraying?. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 1999, **10**(2001), 44-66 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1361/105996301770349510>

- [8] BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. Ostrava: ZEROSS, 2000. Svařování. ISBN 80-857-7172-1.
- [9] GATTO, A., E. BASSOLI a M. FORNARI. Plasma Transferred Arc deposition of powdered high performances alloys: process parameters optimisation as a function of alloy and geometrical configuration: process parameters optimisation as a function of alloy and geometrical configuration. *Surface and Coatings Technology*. 2004, **187**(2–3), 265-271. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.02.013>.
- [10] WILDEN, J., J. BERGMANN a H. FRANK. Plasma transferred arc welding—modeling and experimental optimization. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2006, **15**(4), 779-784. ISSN 1544-1016. Dostupné z: doi:[10.1361/105996306X146767](https://doi.org/10.1361/105996306X146767).
- [11] 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*. 2006, **171**(2), 167-174. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.269>.
- [12] ŁATKA, L. a P. BISKUP. Development in PTA Surface Modifications – A Review. *Advances in Materials Science* [online]. 2020, **20**(2), 39-53 [cit. 2023-07-27]. ISSN 2083-4799. Dostupné z: doi:[10.2478/adms-2020-0009](https://doi.org/10.2478/adms-2020-0009).
- [13] NEDUCHAL, Přemysl. Plazmové svařování (navarování) - 15. In: *Docplayer.cz* [online]. Přemysl Neduchal, 2015 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/1807039-Plazmove-svarovani-navarovani-15.html>.
- [14] PLAZMOVÉ NAVAROVÁNÍ (PTA - Plasma Transferred Arc). In: *Servisarmatur.cz* [online]. Paskov: Servisarmatur, 2020 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <http://www.servisarmatur.cz/index.php?page=plasma-powder-surfacing>.
- [15] ROHAN, Pavel, Ladislav KOLAŘÍK, Tomáš KRAMÁR a Zdeněk KRŠKA. Navařování plazmatem - ochranné povlaky ve výrobě i výzkumu. In: *Mmspektrum.com* [online]. Praha: FS ČVUT, 2015 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-plazmatem-ochrannepovlaky-ve-vyrobe-i-vyzkumu>.

- [16] HEJWOWSKI, Tadeusz. Sliding wear resistance of Fe-, Ni- and Co-based alloys for plasma deposition. *Vacuum* [online]. 2006, **80**(11-12), 1326-1330 [cit. 2023-07-27]. ISSN 0042-207X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2006.01.037>.
- [17] ATAMERT, Serdar. *STABILITY, WEAR RESISTANCE, AND MICROSTRUCTURE OF IRON, COBALT AND NICKEL-BASED HARDFACING ALLOYS* [online]. Cambridge, 1988 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.repository.cam.ac.uk/items/8947b94e-b32c-4fe9-9a86-eac11ac662d4>. Disertační práce. The University od Cambridge.
- [18] GARBADE, R.R. a N.B. DHOKEY. Overview on Hardfacing Processes, Materials and Applications. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* [online]. **1017** [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1017/1/012033.
- [19] HORNÍK, Tomáš. *PŘEHLED MATERIÁLŮ NÁSTROJŮ V TVÁŘECÍCH PROCESECH* [online]. Brno, 2010 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27938. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Miroslav Šlais.
- [20] Převodová tabulka značení ocelí. In: *E-konstrukter.cz* [online]. Jakub Kratina, 2013 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/prevodni-tabulka-znaceni-oceli>.
- [21] KUDĚLKA, Vladimír, Zdeněk BALEJ, Jan OPLETAL, Martin MYŠÁK, Naděžda VLHOVÁ a s.r.o., TESIYDO. KOROZIVZDORNÉ OCELI, VLASTNOSTI A ROZDĚLENÍ. In: *Cws-anb.cz* [online]. Praha: Česká svářečská společnost ANB, 2021 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=733>.
- [22] BERNARD, P. Austenitic steel grades for boilers in ultra-supercritical power plants. In: *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants*. 1. Elsevier, 2017, s. 99-119. ISBN 978-0-08-100552-1.
- [23] DAVIS, J.R. a A.S.M.I.H. COMMITTEE. *Stainless Steels: ASM speciality handbook*. ASM International, 1994. ISBN 9780871705037. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=OrIG98AHdoAC>.
- [24] LO, K.H., C.H. SHEK a J.K.L. LAI. Recent developments in stainless steels. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2009, **65**(4), 39-104. ISSN 0927-796X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.mser.2009.03.001>.

- [25] HAVLÍČEK, Petr. *VLIV ZPEVŇOVÁNÍ VÝBUCHEM NA STRUKTURU A VLASTNOSTI HADFIELDOVY OCELI Z HLEDISKA UŽITÍ V ŽELEZNIČNÍ DOPRAVĚ* [online]. Brno, 2015 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30312761.pdf>. Zkrácená verze disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [26] MOGHADDAM, E.G., N. VARAHRAM a P. DAVAMI. On the comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of high-vanadium austenitic manganese steels with the Hadfield steel. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2012, **532**, 260-266 [cit. 2023-07-27]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.10.089>.
- [27] OKECHUKWU, CH., O. DAHUNSI, P. OKE, I. OLADELE a M. DAUDA. Prominence of Hadfield Steel in Mining and Minerals Industries: A Review. *INTERNATIONAL JOURNAL of ENGINEERING TECHNOLOGIES-IJET* [online]. 2017, **3(2)**, 83-90 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: doi:[10.19072/ijet.299068](https://doi.org/10.19072/ijet.299068).
- [28] QIAN, Lihe a Fucheng ZHANG. Deformed Microstructure and Hardness of Hadfield High Manganese Steel. *Materials Transactions* [online]. 2011, **52(8)**, 1623-1628 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.2320/matertrans.M2011121>.
- [29] ZHANG, Fucheng, Chen CHEN, Bo LV, Hua MA, Ehsan FARABI a Hossein BELADI. Effect of pre-deformation mode on the microstructures and mechanical properties of Hadfield steel. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2019, **743**, 251-258 [cit. 2023-07-28]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.088>.
- [30] YAN, Weilin, Liang FANG, Kun SUN a Yunhua XU. Effect of surface work hardening on wear behavior of Hadfield steel. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2007, **460-461**, 542-549 [cit. 2023-07-28]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.02.094>.
- [31] BOCCALINI, Mário a Helio GOLDENSTEIN. Solidification of high speed steels. *International Materials Reviews* [online]. 2001, **46(2)**, 92-115 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: doi:[10.1179/095066001101528411](https://doi.org/10.1179/095066001101528411).
- [32] SUN, G.F., K. WANG, R. ZHOU, A.X. FENG a W. ZHANG. Effect of different heat-treatment temperatures on the laser clad M3:2 high-speed steel. *Materials & Design (1980-2015)* [online]. 2015, **65**, 606-616 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.058>.

- [33] 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. 2023-07-28]. Dostupné z: doi:DOI: 10.12913/22998624/61933.
- [34] BAYER, Alan, B BECHERER a Teledyne VASCO. High-speed tool steels. *ASM Handbook*. 1989, **16**, 51-59.
- [35] Převodní tabulky ocelí. In: [Http://www.stahlben.cz/](http://www.stahlben.cz/) [online]. Písek: Stahlben s.r.o., 2015 [cit. 2023-08-08]. Dostupné z: http://www.stahlben.cz/page.php?id=steel_conversion.
- [36] ČSN EN 10027-1 (420011) Systémy označování ocelí - Část 1: Stavba značek oceli. In: *TECHNOR Technické normy ČSN* [online]. Hradec Králové: TECHNOR print, s.r.o., 2022 [cit. 2023-08-08]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-10027-1-420011-202014.html#>.
- [37] KESL, Miloslav. Vliv technologie tepelného zpracování na řezivost RO náradí. In: *Docplayer.cz* [online]. Plzeň: Strojírenská technologie, 2015 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/11447947-Vliv-technologie-tepelneho-zpracovani-na-rezivost-ro-naradi.html>.
- [38] Sonderwerkstoff PMD 23. In: *Doerrenberg.de* [online]. Dörrenberg Edelstahl [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: https://www.doerrenberg.de/wp-content/uploads/2020/02/PMD23_de_02.pdf.
- [39] SOBOTOVÁ, Jana. *Perspektivní nástrojové oceli* [online]. Praha, 2016 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2016-24-Sobotova.pdf>. Habilitační přednáška. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [40] Uddeholm Vanadis®23 SuperClean. In: *Uddeholm.com* [online]. Uddeholm, 2019 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/41/2017/09/Tech-Uddeholm-Vanadis-23-EN.pdf.pdf>.
- [41] Uddeholm Vanadis®30 SuperClean. In: *Uddeholm.com* [online]. Uddeholm, 2019 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/49/2018/11/vanadis-30-eng_p_1904-e11.pdf.

- [42] HALAMA, R. a J. LENERT. COMPUTING TECHNIQUE IN CONTACT FATIGUE. *ENGINEERING MECHANICS 2004 NATIONAL CONFERENCE with international participation* [online]. 2004 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.engmech.cz/improc/2004/T-Halama-Radim.pdf>.
- [43] MACURA, P., A. FIALA a R. HALAMA. EXPERIMENTAL ANALYSIS OF CONTACT STRESSES AND CONTACT FATIGUE. *ENGINEERING MECHANICS 2003 NATIONAL CONFERENCE with international participation* [online]. 2003 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.engmech.cz/improc/2003/108-Pavel-Macura-PT.pdf>.
- [44] JALALAHMADI, Behrooz, Trevor SLACK, Nihar RAJE a Nagaraj ARAKERE. A Review of Rolling Contact Fatigue. *Journal of Tribology* [online]. 2009, **131**(4) [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: doi:10.1115/1.3209132.
- [45] CARROLL, R.I. a J.H. BEYNON. Decarburisation and rolling contact fatigue of a rail steel. *Wear* [online]. 2006, **260**(4-5), 523-537 [cit. 2023-07-28]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164805002371>.
- [46] MAGEL, Eric E. Rolling Contact Fatigue: A Comprehensive Review. *Technical Reports* [online]. 2011 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://railroads.dot.gov/elibrary/rolling-contact-fatigue-comprehensive-review>.
- [47] MUTOH, Yoshiharu. Mechanisms of Fretting Fatigue. *JSME International Journal* [online]. 1995, **38**(4), 405-415 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1299/jsmea1993.38.4_405.
- [48] Plazmové navařovací automaty: PPC 250 R6. In: *Kskct.cz* [online]. Česká Třebová: KSK, s.r.o. [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.kskct.cz/cs/navarovani/plazmove-navarovaci-automaty/ppc-250-r6>.
- [49] UNIVERZÁLNÍ MĚŘICÍ ÚSTŘEDNA - DATALOGGER - AHLBORN ALMEMO 5690-2M - VÍCEKANÁLOVÁ. In: *Ahlborn.cz* [online]. Praha: Ahlborn [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/pristroje/merici-ustredny/univerzalni-merici-ustredna-datalogger-ahlborn-almemo-5690-2m-vicekanalova.html>.
- [50] Axio Observer. In: *Alliedhightech.com* [online]. Kalifornie: Allied high tech products. Inc, 2019 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.alliedhightech.com/themes/allied/content/Allied%202019%20Catalog.pdf>.

- [51] Axio Observer D1m. In: *Alliedhightech.com* [online]. Kalifornie: Allied high tech products. Inc, 2007 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.alliedhightech.com/Media/Default/EquipmentBrochures/AxioObserver%20MATBroch.pdf>.
- [52] IndentaMet™ 1100 Series. In: *Thermofisher.co.nz* [online]. Düsseldorf: Buehler, 2004 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://photos.labwrench.com/equipmentManuals/10784-4289.pdf>.
- [53] JEOL - JSM-7600F. In: *Labwrench.com* [online]. Midland, ON,Canada: JEOL [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.labwrench.com/equipment/7219/jeol-jsm-7600f>.
- [54] JSM-7600F Schottky Field Emission Scanning Electron Microscope. In: *JEOL.com* [online]. Tokio: JEOL [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.jeol.com/products/scientific/sem/JSM-7600F.php>.
- [55] KSK S.R.O. *Abnahmeprüfzeugnis Nr. 14116 nach EN 10204-3.1 (Materiálový list): Materiál DEW SZW 5049*. Česká Třebová, 2022.
- [56] ČSN 11 523 / 1.0570 / ST52.3. In: *Jkz.cz* [online]. Bučovice: Jkz [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.jkz.cz/cs/produkty/konstrukcni-oceli/csn-11-523-10570-st523/>.
- [57] BREZINOVÁ, Janette, Ján VIŇÁŠ, Anna GUZANOVÁ et al. Selected Properties of Hardfacing Layers Created by PTA Technology. *Metals*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021, **11**(1), 134.
- [58] RŮŽIČKA, M., M. HANKE a M. ROST. *Dynamická pevnost a životnost*. Praha, 1192. Skripta. ČVUT.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Rozdělení technologie žárového nástřiku [5]	13
Obrázek 2 Schéma technologie PTA [14]	15
Obrázek 3 Schaefflerův diagram – červený kruh značí oblast Hadfieldovy oceli [22]	18
Obrázek 4 Schéma tepelného zpracování rychlořezných ocelí [37]	24
Obrázek 5 Wöhlerova křivka [58]	27
Obrázek 6 Plazmový navařování automat PPC 250 R6 [48]	31
Obrázek 7 Univerzální měřicí ústředna ALMEMO 5690-2M [49]	32
Obrázek 8 Optický mikroskop Zeiss Axio Observer D1m [50]	33
Obrázek 9 Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104 [52]	34
Obrázek 10 Elektronový mikroskop JSM-7600F [53]	35
Obrázek 11 Uspořádání pracoviště navařování	36
Obrázek 12 Schéma zapojení termočlánků	37
Obrázek 13 Termočlánky s keramickými kroužky	38
Obrázek 14 Termočlánky překryty destičkami	38
Obrázek 15 Metoda navařování podélných housenek	40
Obrázek 16 Metoda oscilačního navařování	40
Obrázek 17 Geometrie návaru A (délka návaru 50 mm šířka návaru 20 mm)	42
Obrázek 18 Metalurgické spojení	43
Obrázek 19 Kvalitní metalurgické spojení	43
Obrázek 20 Polotovary s návary, navařovaná strana 100 x 20 mm	49
Obrázek 21 Návary A (krok 1,3 mm) a B (krok 2,7 mm)	50
Obrázek 22 Struktura oceli SZW 5049, Zvětšení 50x	52
Obrázek 23 Pásmo čistého austenitu u oceli SZW 5049, Zvětšení 50x	53
Obrázek 24 Struktura oceli SZW 5049, oxidické vměstky, Zvětšení 500x	54
Obrázek 25 Fáze v oceli SZW 5049, Zvětšení 500x	54
Obrázek 26 Hranice austenitických zrn oceli SZW 5049, Zvětšení 100x	55
Obrázek 27 Rozdílná velikost austenitických zrn oceli SZW 5049, Zvětšení 50x	56
Obrázek 28 Dendritická struktura v oceli SZW 5049, Zvětšení 200x	56
Obrázek 29 Metalurgické spojení oceli SZW 5049, Zvětšení 50x	57
Obrázek 30 Metalurgické spojení oceli SZW, Zvětšení 500x	57
Obrázek 31 Metalurgické spojení oceli SZW 5049 na skenovacím elektronovém mikroskopu	58
Obrázek 32 Průběh obsahů prvků v oceli SZW 5049	59
Obrázek 33 Chemická analýza černých artefaktů, matrice, hranic zrn oceli SZW 5049	60
Obrázek 34 Díra po vyleptané fázi 1	61
Obrázek 35 Díra po vyleptané fázi 2	62
Obrázek 36 Díra po vyleptané fázi 3	62
Obrázek 37 Trhlina v materiálu HSS 23, Zvětšení 200x	63
Obrázek 38 Metalurgické spojení oceli HSS 23, Zvětšení 50x	63
Obrázek 39 Fáze na hranicích zrn u materiálu HSS 23, DIC filtr, Zvětšení 500x	64

Obrázek 40 Pás bez částic u materiálu HSS 23, Zvětšení 100x	64
Obrázek 41 Struktura rychlořezné oceli HSS 23, Zvětšení 200x	65
Obrázek 42 Struktura rychlořezné oceli HSS 23, Zvětšení 1000x	65
Obrázek 43 Martenzitické jehlice v oceli HSS 23, navařeno podélnými housenkami, Zvětšení 1000x	66

Seznam tabulek

Tabulka 1 Chemické složení Hadfieldovy oceli [21]	22
Tabulka 2 Chemické složení rychlořezné oceli HSS 23 [40].....	25
Tabulka 3 Chemické složení rychlořezné oceli HSS 30 [41].....	26
Tabulka 4 Parametry navařování oceli SZW 5049, kde byla měřena mikrotvrdost	29
Tabulka 5 Chemické složení oceli 19 520.....	30
Tabulka 6 Chemické složení oceli SZW 5049 [55].....	39
Tabulka 7 Chemické složení oceli 11 523 [56]	39
Tabulka 8 Parametry navařování podélnými housenkami	44
Tabulka 9 První parametry navařování pro oscilační navařování	47
Tabulka 10 Optimalizované parametry pro oscilační navařování	47
Tabulka 11 Optimalizované parametry navařování (Tabulka 10).....	50
Tabulka 12 Finální parametry pro oscilační navařování	51
Tabulka 13 Chemické složení přídavného a základního materiálu, návar SZW 5049, SEM.....	58
Tabulka 14 Chemické složení oblastí z Obrázek 33	61

Seznam grafů

Graf 1 Průběh teploty při navařování podélných housenek, ochlazení po každé housence	45
Graf 2 Průběh teploty při navařování podélných housenek, přetavení	46
Graf 3 Průběh teploty při oscilačním navařování, parametry (Tabulka 10).....	48
Graf 4 Průběh mikrotvrdosti ze základního materiálu k povrchu návaru, ocel SZW 5049, deformačně nezpevněno, oscilační navařování, (krok 0,9 mm oranžová, krok 1,3 mm modrá)	67
Graf 5 Průběh mikrotvrdosti ze základního materiálu k povrchu návaru, ocel SZW 5049, deformačně nezpevněno, oscilační navařování, finální návar	68
Graf 6 Průběh mikrotvrdosti ze základního materiálu k povrchu návaru, rychlořezná ocel HSS 23, nepopuštěno, oscilační navařování, finální návar.....	69
Graf 7 Průběh mikrotvrdosti materiálů SZW 5049 (deformačně nezpevněno) a HSS 23 (nepopuštěno), finální parametry, oscilační navařování.....	70

Seznam příloh

Příloha 1 Certifikát HSS 23	855
-----------------------------------	-----

Přílohy

1. Certifikát materiálu HSS 23 od společnosti KSK s.r.o.

DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE
Providing special steel solutions



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 GmbH - 47805 Krefeld - Germany

KSK s.r.o.
Podbranska
CZ 560 02 Ceska Trebova

Zeugnis/Warenbegleitschein-Nr. - Inspection certificate/Delivery note no. 45007/1		Datum -- Date 03.09.15
Abteilung VSO	Sachbearbeiter - Telephone Maria Rapp 02151/3633-2052	Kunden-Nr. - Customer's index 866478
Ihre Bestellung - Your order Mail v.Hr. Conrads/2015-08-20		Auftrags-Nr. - Order No 4924383/1

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

Gegenstand Product	Prüfgegenstand/Test object	Kennzeichnung/Verpackung Marking/package	Charge/Gewicht kg Heat no./weight kg
HSS 23 4799.00 63-180 µm 5 kg Plastikflasche	Pulver	DEW-Fe-Basis-P Körnung/grain size -1000 µm	255844 5 kg

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

Charge Heat No.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	V %	W %	B %	N %	O %	Fe %
255844	1,30	0,36	0,20	0,016	0,011	4,05	5,19	3,18	6,07	0,0006	0,047	0,018	Balance

Dieses Zeugnis wurde maschinell erstellt und trägt daher keine Unterschrift.
This document has been computer generated and need not be signed for validity.

Der Abnahmebeauftragte/Authorized representative
Sinan Turan

Es wird bestätigt, dass die Lieferung geprüft wurde und den Vereinbarungen bei der Bestellannahme entspricht.
We hereby certify that the material described above has been tested and complies with the terms of the order contract.

Ende des Dokuments / End of document

Příloha 1 Certifikát HSS 23