

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ**

Ústav strojírenské technologie



**Navařování nástrojů pro lisování za studena
metodou PTA**

Hardfacing of forming tools by PTA

Autor: Bc. Martin Hoffmann

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

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

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hoffmann** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **438584**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Navářování nástrojů pro lisování za studena metodou PTA

Název diplomové práce anglicky:

Hardfacing of forming tools by PTA

Pokyny pro vypracování:

- vypracovat teoretický rozbor problematiky navářování, materiálů pro navářování a životnosti forem
- provést experimentální ověření navrženého postupu navářování činné hrany nástroje
- vyhodnotit provedené návrhy z hlediska vlastností a struktury materiálu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

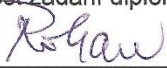
Ing. Pavel Rohan, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


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


Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2019**


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



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


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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 použitých literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

10.5.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

Dne 25.7.2019

Podpis

Poděkování

Rád bych zde poděkoval svému vedoucímu Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D., EWE za odborné vedení, cenné rady a připomínky při psaní mé závěrečné práce. Dále bych rád poděkoval Doc. Ing. Jiřímu Janovcovi, CSc. a Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE za pomoc při vyhodnocování metalografických vzorků.

Abstrakt

Maximalizace životnosti nástrojů pro tváření plechů za studena je jednou z priorit automobilového průmyslu. Vysoká pevnost zpracovávaných plechů způsobuje opotřebení nástrojů, vyžaduje častou výměnu nebo údržbu, aby bylo dosaženo požadované úrovně produktivity a standardu kvality. Kvůli vysoké ceně výroby nástrojů se často dává přednost opravě nástroje před výměnou. Tvar opotřebovaných částí nástroje se obnovuje navařováním a následným obrobením na původní specifikaci.

Tato práce se zabývá navařováním opotřebovaných oblastí nástrojů pomocí metody PTA (Plasma transferred arc). Základními materiály použitými v experimentální části byly litina s lupínkovým grafitem, litina s kuličkovým grafitem a nástrojová ocel. Přídavným materiálem byly HSS (rychlořezná ocel) a Fesit N-P (přídavný materiál na bázi Fe legovaný C-Cr-Ni-Si-Co). Mikrotvrdost a mikrostruktura návarů a tepelně ovlivněné oblasti byly také předmětem výzkumu a diskuze.

Abstract

Maximizing useful lifetime of sheet metal-forming tooling is one of the priorities of the automobile industry. High strength of the processed sheets imposes wear on the tooling, demanding frequent replacement or maintenance in order to keep up with the required productivity level and quality standards. Because of the inherently high cost of tooling, preference is often given to repair, rather than replacement. Typically, the worn areas of the tooling are overlaid by hard-facing weld, and the shape and dimension is then brought up to the original specification by conventional means.

This thesis is about hard-facing of the worn areas of the tooling by PTA (Plasma Transferred Arc Welding) method. Basic materials to be hard-surfaced are gray cast iron, nodular iron, and tool steel. The filler material discussed is HSS (High Speed Steel), and Fesit N-P (ferrous powder alloyed by C-Cr-Ni-Si-Co). Microhardness and microstructure of the weld deposit and the heat-affected zone are also examined and discussed.

Klíčová slova

Nástroje pro tváření za studena, PTA, navařování, opravy nástrojů, rychlořezná ocel, nástrojová ocel, litina s lupínkovým grafitem, litina s kuličkovým grafitem

Keywords

Cold working tools, Plasma transferred arc, overlaying, hardfacing, repairing of tools, high speed steel, tool steel, gray cast iron, nodular iron

Obsah

1.	Přehled použitých značek, zkratek	8
2.	Úvod.....	9
3.	Nástroje pro tváření za studena	10
3.1.	Litina s lupínkovým grafitem EN GJL.....	10
3.2.	Litina s kuličkovým grafitem EN GJS	12
3.3.	Ocel W. Nr. 1.2358 (60CrMoV18-5).....	13
4.	Navařování odolných materiálů	15
4.1.	Metody PAW a PTA – Plasma (Transferred) Arc Welding	15
4.2.	Materiály na návary	16
4.2.1.	Rychlořezná ocel (HSS)	17
4.2.2.	Fesit N-P.....	21
5.	Svařitelnost litin a ocelí	22
6.	Praktická část.....	23
6.1.	Základní a přídatné materiály.....	24
6.2.	Metody navařování.....	25
6.3.	Měření průběhu teplot	26
6.4.	Tepelné zpracování návarů	26
6.5.	Měření mikrotvrdomosti.....	27
6.6.	Vyhodnocení metalografie	28
6.7.	Předeřev základního materiálu.....	29
6.8.	Měření rychlosti podávání přídatného materiálu	30
7.	Výsledky a diskuze praktické části	32
7.1.	Testovací vzorek pro navaření HSS 30	32
7.2.	Navařování rychlořezné oceli HSS 30	34
7.2.1.	Návary rychlořezné oceli na litině s lupínkovým grafitem	34
7.2.2.	Návary rychlořezné oceli na litině s kuličkovým grafitem.....	41
7.3.	Navařování přídatným materiálem Fesit N-P.....	52
7.3.1.	Návary materiálu Fesit N-P na nástrojové oceli 60CrMoV18-5.....	52
8.	Závěr	59
9.	Bibliografie.....	61
10.	Přílohy.....	65
10.1.	Fotografie metalografických vzorků.....	65
10.2.	Tabulka naměřených hodnot mikrotvrdomostí jednotlivých vzorků návarů.....	69

11.	Seznam obrázků.....	70
12.	Seznam tabulek	71
13.	Seznam grafů	71
14.	Seznam rovnic.....	72
15.	Seznam příloh	72

1. Přehled použitých značek, zkratek

Zkratka	Anglický název	Český překlad
GJS, LKG	Nodular Iron	Litina s kuličkovým grafitem
GJL, LLG	Gray cast Iron	Litina s lupínkovým grafitem
111	Shield metal arc welding (SMAW)	Svařování obalnými elektrodami
114	Flux-cored arc welding (FCAW)	Svařování plněnou elektrodou
12x	Submerged arc welding (SAW)	Svařování pod tavidlem
72	Electroslag welding (ESW)	Elektrostruskové svařování
PTA	Plasma transferred arc	
DC	Direct current	Stejnoseměrný proud
TOO	Heat affected zone (HAZ)	Tepelně ovlivněná oblast
HB	Hardness Brinell	Tvrдость podle Brinella
HV	Hardness Vickers	Tvrдость podle Vickerse
HRC	Hardnes Rockwell C	Tvrдость podle Rockwella typu C
IH	-	Horní proud (při pulzním navařování metodou PTA) [A]
IL	-	Spodní proud (při pulzním navařování metodou PTA) [A]
TH	-	Čas horního proudu [s]
TL	-	Čas spodního proudu [s]
Az	Residual austenite	Zbytkový austenit

2. Úvod

Zvyšující se požadavky na rychlost a kvalitu výroby kladou vysoké nároky na životnost zařízení a nástrojů. Lisování za studena je metoda tváření zastoupená vysokým podílem v automobilovém průmyslu. Životnost lisovacích nástrojů je ovlivněna mj. použitím vysokopevnostních materiálů při výrobě. Dalším faktorem ovlivňujícím životnost nástroje jsou designové prvky karoserií automobilů s ostrými hranami, kde jsou nároky na nástroj extrémní.

Lisovací nástroje musejí být velice přesné, jejich výroba je velmi drahá, a proto je požadována jejich vysoká životnost. Jejich činné hrany se pravidelně opravují, a to především navařováním. Práce se zabývá poměrně novou metodou navařování plazmovým pulzním obloukem PTA (Plasma Transferred Arc). Výhody této metody jsou především možnost navařování materiálů zcela odlišných od základního materiálu a minimální promísení návaru se ZM.

Navařování poskytuje možnost vyrobit formu z materiálu méně odolného vůči opotřebení (zpravidla levnějšího). V místech, která jsou při lisování více namáhána, pak navařit materiál odolnější danému způsobu opotřebení. Například výroba lisovacího nástroje z litiny s lupínkovým grafitem a navaření činných ploch, popřípadě hran, rychlořeznou ocelí. Tvrdé návary na LLG se obvykle navařují za použití mezivrstvy zabraňující difuzi uhlíku ze základního materiálu do návaru. K tomu bývá zpravidla využíváno slitin s vysokým podílem niklu, který difuzi zabraňuje a také vyniká dobrou tažností a snižuje vnitřní pnutí mezi ZM a návarem. Nové metody, kterými je možné znatelně snížit vnesené teplo při navařování, dávají prostor ke zkoumání způsobů navařování bez mezivrstvy přímo na základní materiál.

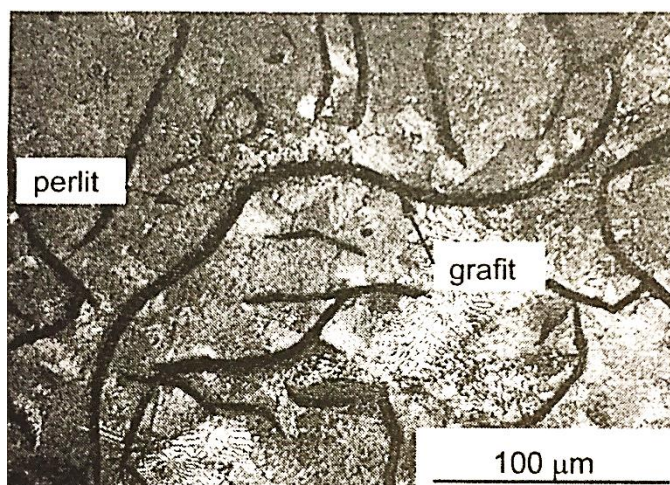
Cílem teoretické části je provedení literárního rozboru problematiky oprav lisovacích nástrojů navařováním a používaných přídavných materiálů při opravách. Cílem experimentální části práce je provedení navaření činné hrany nástroje různými přídavnými materiály a rozdílnými parametry navařování včetně vyhodnocení uvedených návary, jejich mikrotvrdosti a struktury.

3. Nástroje pro tváření za studena

Nástroje pro tváření se zhotovují například litím a následným obráběním na požadovaný tvar, nebo obráběním z polotovarů na požadovaný tvar. Můžeme se setkat také s tepelným nebo chemicko-tepelným zpracováním nástrojů. Pro vyšší životnost je možné nástroje povlakovat pro zlepšení tribologických vlastností a povrchové tvrdosti (odolnost proti abrazi). Mechanické vlastnosti materiálů použitých pro výrobu tvářecích nástrojů se volí například podle vlastností tvářeného materiálu, požadované životnosti nástroje, tvaru nástroje a dalších parametrů souvisejících se způsobem namáhání nástroje apod. Nejlevnějším materiálem na výrobu lisovacího nástroje pro plošné tváření je pravděpodobně litina s lupínkovým grafitem, která vyniká mimo výborné slévateľnosti také nízkou cenou. Dražší, ale vhodnější z hlediska mechanických vlastností je litina s kuličkovým grafitem. LKG se svou pevností více blíží ocelím, a to při zachování přijatelné tažnosti. Má horší slévateľské vlastnosti než LLG, především nižší zabíhavost. Nejvyšší, ale také nejdražší pro výrobu nástrojů jsou oceli ze skupiny nástrojových. Používají se pro nejnáročnější aplikace, jako je například lisování vysokopevných plechů v automobilovém průmyslu. Kapitoly 3.1 – 3.3 stručně pojednávají o těchto třech materiálech [1] [2] [3] [4] [5].

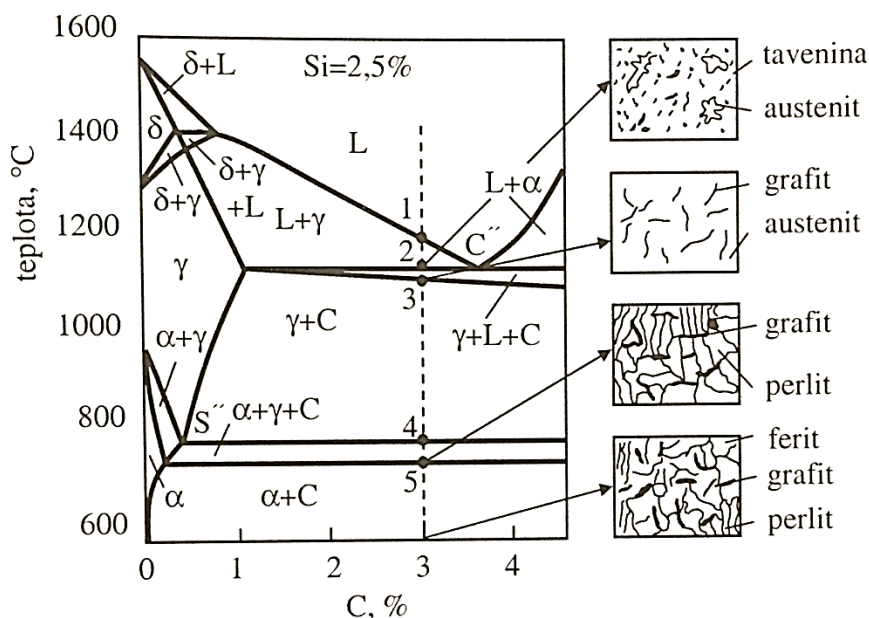
3.1. Litina s lupínkovým grafitem EN GJL

Litina s lupínkovým grafitem, dříve nazývaná šedá litina, je grafitická litina, kde je grafit vyloučen ve formě lupínků. Litina s lupínkovým grafitem je nejběžnější litinou pro svou nízkou cenu a výborné slévateľské vlastnosti. Obsah uhlíku v této litině se pohybuje od 2,8 do 3,6 % a obsah křemíku od 1 do 3 %. Dobré slévateľské vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem spočívají ve velmi dobré zabíhavosti (schopnosti vyplnit formu) a malém smrštění při tuhnutí. Hlavními nevýhodami této litiny jsou nízká pevnost (max. 400 MPa) a velmi malá tažnost, menší, než 1 % [2] [4] [5] [6]. Mikrostruktura litiny s lupínkovým grafitem je na obrázku 3-1 [4].



Obrázek 3-1 Mikrostruktura litiny s lupínkovým grafitem s perlitickou matricí (světelný mikroskop. 250x) [4]

Obrázek 3-1 zobrazuje perlitickou strukturu litiny s lupínkovým grafitem a lupínky grafitu. Matrice litiny s lupínkovým grafitem může být feritická, perlitická nebo feriticko-perlitická. Nejméně příznivá z hlediska mechanických vlastností je feritická matrice. Má nejnižší pevnost a tvrdost. Feritická matrice vzniká při nižších ochlazovacích rychlostech a její tvorbu podporuje i zvýšený obsah křemíku. Vyšší ochlazovací rychlost a také malá množství prvků Sn, Ni, Mo, Cr, Cu podporují tvorbu perlitické matrice, která je pevnější a tvrdší. Společně s matricí a grafitem bývá ve struktuře šedých litin také tzv. steadit, což je eutektikum bohaté na fosfor [2] [4] [6]. Řez ternární soustavou Fe-C-Si pro obsah 2,5 % Si a krystalizace podeutektické litiny s lupínkovým grafitem je znázorněno na obrázku 3-2 [2].



Obrázek 3-2 Řez ternární soustavou Fe-C-Si pro obsah 2,5 % Si a schéma změn struktury při krystalizaci podeutektické litiny s lupínkovým grafitem [2]

Částice grafitu v litinách je možné zjemnit očkovaním. Očkovadlem bývá například slitina Fe-Si (ferosilicium). Očkování se též používá u podeutektických litin, či tenkých odlitků, kde je vyšší riziko tuhnutí litiny podle metastabilní soustavy železo-uhlík (místo grafitu se vylučuje cementit). Typické chemické složení litiny s lupínkovým grafitem je zobrazeno v tabulce 3-1 [2] [4] [6].

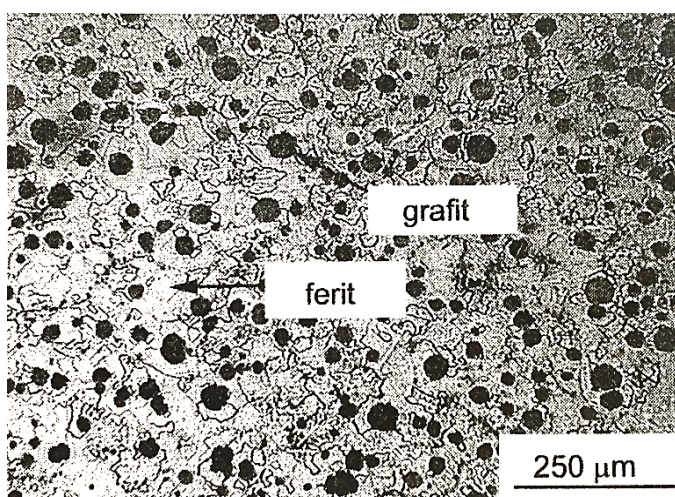
Tabulka 3-1 Typické chemické složení litiny s lupínkovým grafitem GJL

Chem. prvek	C [hm. %]	Si [hm. %]	Mn [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]
obsah	2,8-3,6	1,4-2,8	0,5-1	0,2-0,5	Max. 0,15

3.2. Litina s kuličkovým grafitem EN GJS

Litina s kuličkovým grafitem (LKG) byla vynalezena v padesátých letech 20. století. LKG, dříve nazývaná tvárná litina, je grafitická litina, kde je grafit vyloučen v podobě kuliček. Litina s kuličkovým grafitem má v základu stejné chemické složení jako litina s lupínkovým grafitem. Rozdíl tvoří modifikace taveniny před litím. Nejčastěji je k modifikaci využíván hořčík (0,03-0,08 % Mg). Podobné účinky na litinu mají také prvky vzácných zemin (Ce, Ca, Y). Matrice litiny může mít feritickou, feriticko-perlitickou, perlitickou, austenitickou nebo martenzitickou/bainitickou strukturu v závislosti na tepelném zpracování [1] [4] [5] [6] [7] [8].

Modifikace hořčíkem má příznivý vliv na tvorbu karbidů, která je nežádoucí, a proto se provádí tzv. grafitizační očkování, které zvýší počet zárodků grafitických zrn. Nejpoužívanějším očkovadlem je ferosilicium (FeSi75) [2]. Typické chemické složení litiny s kuličkovým grafitem je zobrazeno v tabulce 3-2 [4]. Mikrostruktura litiny s kuličkovým grafitem s feritickou maticí je zobrazena na obrázku 3-2 [4].



Obrázek 3-3 Mikrostruktura litiny s kuličkovým grafitem s feritickou maticí (světelný mikroskop, 70x) [4]

Tabulka 3-2 Typické chemické složení litiny s kuličkovým grafitem [4]

Chem. prvek	C [hm. %]	Si [hm. %]	Mn [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]	Mg [hm. %]
Obsah	3,2-4	1,8-3	0,1-0,8	max. 0,1	max 0,1	0,03-0,08

U LKG se dosahuje výrazně vyšší meze kluzu, meze pevnosti a současně tažnosti než u litiny s lupínkovým grafitem. LKG se více podobá ocelím na odlitky při zachování přijatelné zabíhavosti. LKG dosahují meze pevnosti (R_m) přes 1100 MPa a meze kluzu (R_e) téměř 1000 MPa. Maximální tažnost se uvádí přibližně 20 %. Těchto hodnot se dosahuje na drobných zkušebních tělíscích. Litiny také vykazují zvýšenou odolnost proti korozi a v případě litiny s kuličkovým grafitem také dobrou obrobiteľnosť. [1] [4] [5] [6] [9].

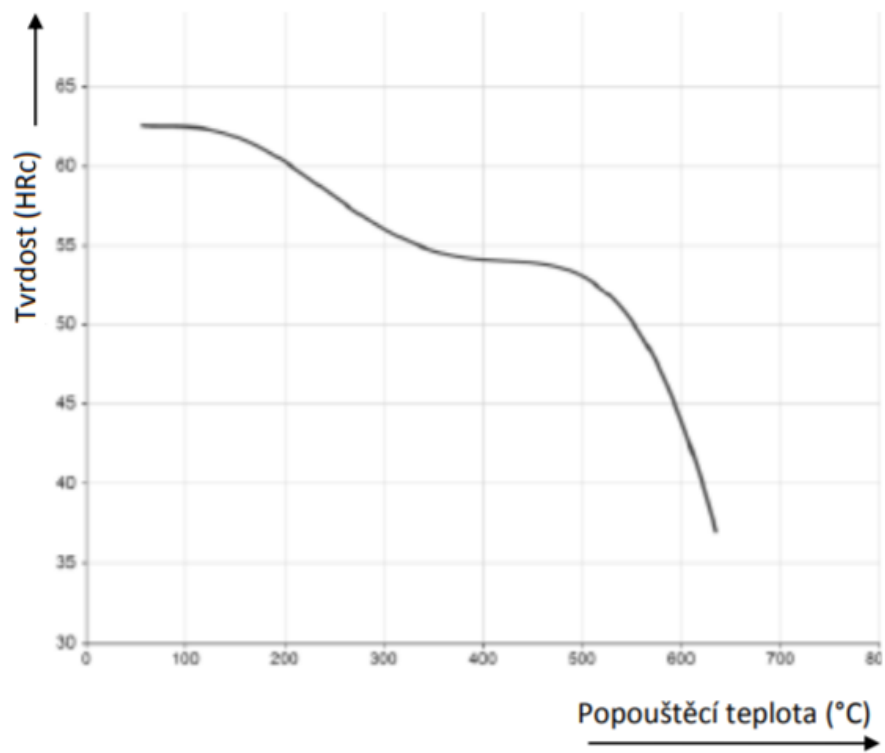
3.3.Ocel W. Nr. 1.2358 (60CrMoV18-5)

Chrom-molybden-vanadová nástrojová ocel pro práci za studena. Tato ocel se používá pro výrobu střížných nástrojů, lisovacích a vstřikovacích nástrojů pro zpracování plastů. Je možné ji aplikovat na nástroje pro tváření materiálů, hluboké tažení, válcování apod. Tento materiál má vysokou houževnatost a také dobrou odolnost proti opotřebení. Chemické složení oceli W.Nr. 1.2358 zobrazuje tabulka 3-3 [10] [11] [12].

Tabulka 3-3 Chemické složení oceli 1.2358 dle materiálového listu [10]

Chem. prvek	C [hm. %]	Mn [hm. %]	Si [hm. %]	Cr [hm. %]	Mo [hm. %]	V [hm. %]
obsah	0,6	0,8	0,35	4,5	0,5	0,2

Tvrdość ve stavu vyžíhaném na měkko je udávána jako přibližně 240 HB (cca 23 HRC) a v zušlechtěném stavu dosahuje minimální tvrdosti 64 HRC. Kalení probíhá z teplot 950-970 °C s předehřevem na 600-750 °C. Popouštění se dvakrát, při minimální teplotě 180 °C s mezi ochlazením na pokojovou teplotu. Výdrž na teplotě popouštění musí být minimálně 2 hodiny. Žíhání ke snížení vnitřního pnutí je dáno ohřevem na 650 °C a výdrž 2 hodiny na této teplotě. Poté ochlazení pomalu na 500 °C a dále volně na vzduchu [10] [11] [12]. Závislost tvrdosti na popouštěcí teplotě je zobrazena na grafu 3-1 [13].



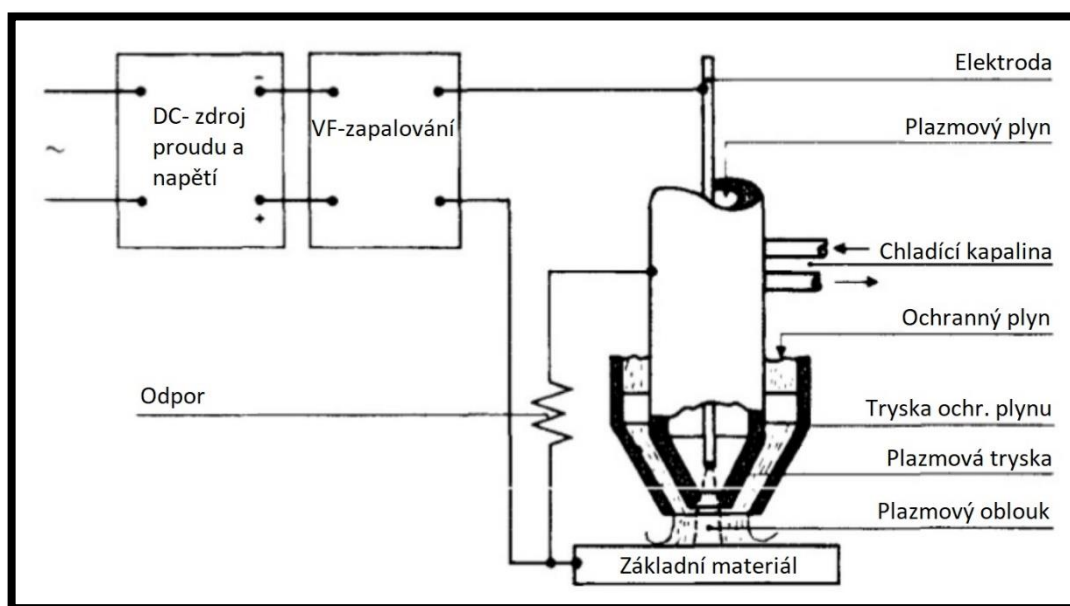
Graf 3-1 Závislost tvrdosti na popouštěcí teplotě nástrojové oceli 1.2358 (Kaleno z 960 °C do oleje) [13]

4. Navařování odolných materiálů

Navařování je obdobou svařování, kde místo spojení dvou částí dochází k nanášení svarového kovu na povrch základního materiálu. Výhodou navařování v porovnání s jinými technologiemi spojování je metalurgické propojení základního a přídavného materiálu, které se vyznačuje vysokou pevností spojení. Technologie navařování nabízí možnosti úspory nákladů výrobou součástí z méně kvalitních (levnějších) materiálů a opatřením funkčních ploch odolnými návary. Navařování tedy není pouze opravárenská technologie, ale jeho použití je možné uvažovat již ve stádiu konstrukce. Návary je možno provádět jak dnes již klasickými metodami (ručně obalovanými elektrodami, pod tavidlem, MIG/MAG, nebo TIG), tak metodami moderními, plně automatizovanými, jako například metodou PTA (Plasma transferred arc) [14] [15] [16].

4.1. Metody PAW a PTA – Plasma (Transferred) Arc Welding

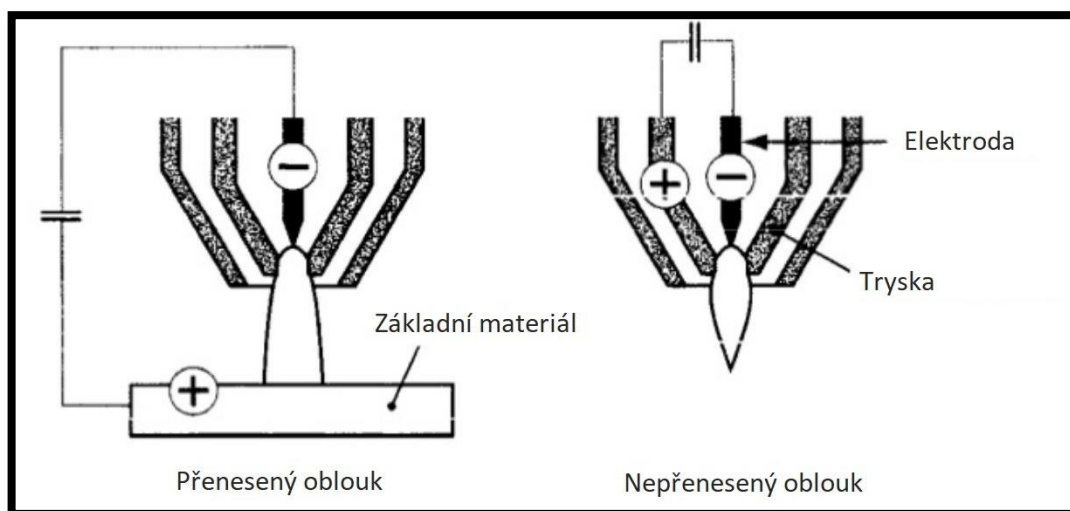
Jedním ze způsobů navařování je metoda PAW (Plasma Arc Welding). Plazmový oblouk hoří mezi dvěma elektrodami a tlakem ionizovaného plynu je vyfukován skrz trysku. Teplota oblouku je 10 000 – 20 000°C. Přídavný materiál je přiváděn v práškové podobě tryskou do plazmového oblouku, kde je strháván a po natavení dopadá na základní materiál. Nejčastěji používané plyny při této metodě jsou Ar, H₂, N₂, nebo He [17] [18]. Schematický popis plazmového svařování, které je téměř totožné s navařováním, je znázorněn obrázkem 4.1 [17].



Obrázek 4-1 Schéma plazmového svařování [17]

Metoda PTA využívá k natavení materiálu plazmový oblouk (přenesený), který je generován mezi neodtavující se wolframovou elektrodou (katoda) a svařovaným materiálem (anoda). Ionizací plazmového plynu (nejčastěji Ar) vzniká plazma, které je vodivé a uzavírá elektrický okruh mezi hořákem (plazmatronem) a součástí. Rozdíl mezi přeneseným a nepřeneseným obloukem je na obrázku 4-2 [16] [17] [18] [19].

Navařování plazmatem se velmi podobá technologii navařování pomocí laseru. K přednostem plazmatu patří (stejně jako u laseru) nízké promísení přídavného materiálu (vysoká koncentrace zdroje tepla) se základním materiálem a možnost automatizace. Oproti laseru nabízí plazma vyšší variabilitu nastavení parametrů oblouku a zároveň nižší pořizovací náklady. Běžně je používán přídavný materiál ve formě prášku nebo drátu [16] [18] [19].



Obrázek 4-2 Zapojení přeneseného a nepřeneseného plazmového oblouku [17]

4.2. Materiály na návary

Pro jednotlivé oblasti použití se dělí materiály pro návary podle charakteristických vlastností a odolnosti proti různým druhům namáhání. Používají se dvě hlavní skupiny návarových materiálů, které se dělí na materiály s matricí na bázi železa a slitinové materiály na bázi neželezných kovů. Návary se železnou matricí se dále dělí na martenzitické, austenitické a na slitiny s vysokým obsahem karbidů. Neželezné slitiny se dají rozdělit na slitiny na bázi kobaltu nebo niklu.

Často používaný materiál z oblasti slitin s kobaltovou maticí je tzv. Stellite 6. Obchodní značku Stellite vlastní společnost Deloro Stellite Company. Tento materiál, vynalezený Elwoodem Haynesem, měl být původně náhradou rychlořezných ocelí při výrobě obráběcích nástrojů. Jedná se o slitinu kobaltu, chromu, wolframu a uhlíku. Z niklových slitin je možno zmínit například tzv. Inconely. Ve materiálech s niklovou maticí jsou hlavními legujícími prvky Chrom, Měď, Molybden a další. Tyto slitiny se dají dělit do tří skupin – na slitiny korozivzdorné, žárovevné a slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi. Korozivzdorné slitiny jsou zastoupeny zejména slitinami Ni-Cu (tzv. Monel) a Ni-Mo-Cr (tzv. Hastelloy). Žárovevné slitiny musejí odolat tzv. creepu (tečení) za zvýšených teplot. Pro žárovevnost se slitiny niklu legují zejména Cr, Mo, Fe, Al, Ti, W a dalšími. Příkladem takové slitiny může být například tzv. Nimonic. Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi jsou především slitiny s nízkou tepelnou roztažností, magnetické slitiny, slitiny pro výrobu termočlánků apod.

Martenzitické návary se obvykle používají jako tvrdonávary, nebo pro obnovu tvaru. Tyto návary jsou přijatelně odolné proti rázům, jejich odolnost proti opotřebení při interakci s kovem je dobrá a nabízejí přijatelnou otěruvzdornost.

Austenitické materiály vynikají svou odolností proti rázům a dobře se s nimi obnovuje tvar. Otěruvzdornost mají podobnou martenzitickým návarům, nejsou ovšem tak tvrdé.

Návary s obsahem karbidů mají výbornou otěruvzdornost, odolnost i při zvýšených teplotách, přijatelnou korozivzdornost, ale špatnou odolnost proti rázům.

Neželezné slitiny na bázi kobaltu a niklu jsou z důvodu vyšší ceny aplikovány méně, a to především v případech, kdy je to ekonomicky opodstatněné (např. v jaderném průmyslu). Jejich odolnost proti většině druhů opotřebení je přijatelná. Používají se pro aplikace při zvýšených teplotách [4] [8] [15] [20] [21].

4.2.1. Rychlořezná ocel (HSS)

Rychlořezné oceli se začaly objevovat na počátku 20. století a postupně nahradily klasické nástrojové oceli v oblasti obráběcích nástrojů. Jejich teplotní odolnost umožnila několikanásobně zvýšit řezné rychlosti oproti běžným nástrojovým ocelím. Za předchůdce rychlořezných ocelí lze považovat ocel navrženou v roce 1900 R.W. Taylorem a W. Whitem. Její chemické složení bylo 1,85% C, 8% W, 7,8% Cr, 0,3% Mn. Později se podstatně zvýšil obsah wolframu a byl přidán další prvek vanad. Byl zjištěn vliv legujících prvků rozpuštěných v austenitu na odolnost proti popouštění. Legující prvky rozpuštěné v austenitu během tepelného zpracování zpomalují rozpad martenzitu. Dále byly zvyšovány obsahy vanadu a dalších legujících prvků a v roce 1912 byl vyzkoušen kobalt (Co) jako legující prvek o obsahu 5-12%, což vedlo k dalšímu zvyšování řezných rychlostí [22] [23] [24].

U rychlořezných ocelí se používá tepelné zpracování. Jedná se o zušlechtní, tedy kalení a vysokoteplotní popouštění. Kalící teploty bývají poměrně vysoké (až 1200°C). Kalení se provádí v plynu nebo do kalícího oleje. Po zakalení v materiálu zůstává vysoký podíl zbytkového austenitu, což je měkká nežádoucí složka. Proto se následně materiál popouští na tzv. sekundární tvrdost za teplot 550 – 600 °C. Legující prvky rozpuštěné ve zbytkovém austenitu vyprecipitují v karbidy Cr, Mo, W, V, a tím ochudí zbytkový austenit o uhlík a legující prvky. Dojde tím ke zvýšení teploty M_s (Martenzit start) a při ochlazování z popouštěcí teploty zbytkový austenit transformuje na martenzit (sekundární kalení). Tuto strukturu je třeba znovu několikrát popustit, proto se popouštění rychlořezných ocelí provádí 3-4 krát [4] [25] [24].

Dnes je vyráběna rychlořezná ocel jako přídatný materiál také v podobě prášku. Například rychlořezná ocel ČSN 41 9837 je dodávána jako prášek pod obchodním názvem HSS 23 (DEW – Německo), nebo Vanadis 23 Superclean. Ocel ČSN 41 9861 se prodává pod názvy HSS 30 (DEW – Německo) a Vanadis 30 Superclean [23] [26] [27].

HSS 23 (DEW – Německo) je vysoce legovaná rychlořezná ocel vyráběná práškovou metalurgií s vysokou pevností v tlaku a dobrou otěruvzdorností. Obrobitelnost a rozměrová stálost je lepší než u běžné rychlořezné oceli. Směrné chemické složení oceli je uvedeno v tabulce 4.1 [26].

Tabulka 4-1 Chemické složení oceli HSS 23 [26]

Chem. prvek	C [hm. %]	Cr [hm. %]	Mo [hm. %]	V [hm. %]	W [hm. %]
obsah	1,28	4,2	5	3,1	6,4

Materiál je dodáván v podobě polotovarů vyrobených práškovou metalurgií a je vyžítán na měkko na průměrnou tvrdost 260 HB. Teplota austenitizace je udávána jako 990-1180 °C a je doporučeno 3x vysokoteplotní popouštění 1 hodinu při teplotě 560 °C. Další fyzikální vlastnosti obsahují tabulky 4.2 a 4.3 [26].

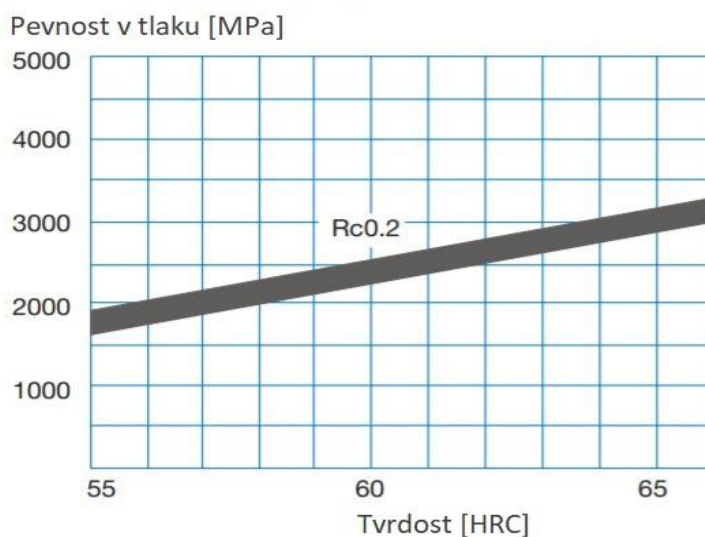
Tabulka 4-2 Fyzikální vlastnosti materiálu HSS 23 [26]

Teplota	20°C	400°C	600°C
Hustota [kg.m ⁻³]	7980	7870	7805
Modul pružnosti v tahu [GPa]	230	205	184
Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .°C]	24	28	27
Tepelná kapacita [J.kg ⁻¹]	420	510	600

Tabulka 4-3 Koefficient teplotní roztažnosti materiálu HSS 23 [26]

Rozsah teplot [°C]	Velikost koeficientu teplotní roztažnosti
20-100	$10,8 \cdot 10^{-6}$
20-200	$11,1 \cdot 10^{-6}$
20-300	$11,4 \cdot 10^{-6}$
20-400	$11,8 \cdot 10^{-6}$
20-500	$12,1 \cdot 10^{-6}$
20-600	$12,3 \cdot 10^{-6}$

Rychlořezná ocel HSS 23 má vysokou pevnost v tlaku, jejíž velikost je závislá na tvrdosti materiálu. Průběh pevnosti v tlaku udává závislost 4.1 [26].



Graf 4-1 - Pevnost v tlaku materiálu HSS 23 v závislosti na tvrdosti [26]

HSS 30 (DEW - Německo) je rychlořezná ocel legovaná kobaltem. Je vyrobena práškovou metalurgií a má vynikající pevnost v tlaku, dobrou odolnost proti otěru a je vhodná pro náročné aplikace pro práci za studena. Vyniká dobrou obrobiteľnosť a rozměrovou stálostí [27].

Tabulka 4-4 Chemické složení materiálu HSS 30 [27]

Chem. prvek	C [hm. %]	Cr [hm. %]	Mo [hm. %]	V [hm. %]	W [hm. %]	Co [hm. %]
obsah	1,28	4,2	5	3,1	6,4	8,5

Stejně jako HSS 23 je rychlořezná ocel HSS 30 dodávána jako polotovary vyrobené práškovou metalurgií a je vyžihána na měkko na průměrnou tvrdost 300 HB. Teplota austenitizace je zde 1050-1180 °C a vysokoteplotní popouštění po kalení je doporučeno 3x 1 hodinu při 560 °C s ochlazováním na vzduchu při pokojové teplotě. Další fyzikální vlastnosti obsahují tabulky 4.5 a 4.6 [27]. Závislost pevnosti v tlaku na tvrdosti výrobce udává stejnou jako u materiálu HSS 23 (graf 4-1).

Tabulka 4-5 Fyzikální vlastnosti materiálu HSS 30 [27]

Teplota	20°C	400°C	600°C
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] (1)	8040	7935	7880
Modul pružnosti v tahu [GPa] (2)	240	214	192
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}$] (2)	22	26	25
Tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$] (2)	420	510	600

(1) – ve stavu vyžihaném na měkko

(2) – v zušlechtěném stavu

Tabulka 4-6 Koefficient teplotní roztažnosti materiálu HSS 30 [27]

Rozsah teplot [$^\circ\text{C}$]	Velikost koeficientu teplotní roztažnosti
20-100	$10,1 \cdot 10^{-6}$
20-200	$10,3 \cdot 10^{-6}$
20-300	$10,6 \cdot 10^{-6}$
20-400	$11,0 \cdot 10^{-6}$
20-500	$11,2 \cdot 10^{-6}$
20-600	$11,3 \cdot 10^{-6}$

4.2.2. Fesit N-P

Fesit N-P (DEW -Německo) je přídatný materiál v podobě prášku s kulovým tvarem částic. Jedná se o legovaný materiál na bázi Fe, dolegovaný C-Cr-Ni-Si-Co používaný na tvrdonávary. Výrobce uvádí jako vhodné použití v aplikacích, jako jsou žárové stříkání a plazmové navařování (metoda PTA). Dále je v materiálovém listu uvedeno, že je v této podobě nevhodný pro plameno-práškové navařování a přetavování nástřiků zhotovených žárovým. Jedná se o hospodárnou náhradu přídatných materiálů s kobaltovou maticí [28].

Fesit N-P má vynikající tribologické vlastnosti, dobrou odolnost proti adhezi, abrazi a vysokou odolnost proti kavitačnímu opotřebení. Vyniká vysokou tvrdostí za tepla, korozní odolností a jeho žáruvzdornost je až do 900 °C. Materiál se po navaření nevytvrzuje a tepelné zpracování ovlivňuje tvrdost jen minimálně. Měrná hmotnost slitiny je 7,3 g.cm⁻³ a tepelná roztažnost je 13-17.10⁻⁶ 1.°C⁻¹ v závislosti na teplotě [28].

Fesit N-P je možné použít při navařování pro renovaci nástrojů a pohyblivých komponent, pracujících za tepla. Je vhodný například pro opravy klikových hřídelů, mlecích zařízení, vrtacích nástrojů, lisovacích a tvářecích nástrojů. Návary je možné opracovat speciálními nástroji při třískovém obrábění, ale vhodnější je technologie broušení. Tvrdost návarů zhotovených metodou PTA by měla být cca 51 HRC. Chemické složení přídatného materiálu Fesit N-P zobrazuje tabulka 4-7 [28].

Tabulka 4-7 Chemické složení materiálu Fesit N-P dle materiálového listu výrobce [28]

Chem. prvek	C [hm. %]	Si [hm. %]	Cr [hm. %]	Ni [hm. %]	Co [hm. %]	Fe [hm. %]
obsah	3	5	35	10	12	zbytek

5. Svařitelnost litin a ocelí

Grafitické litiny jsou v průmyslu využívány pro své příznivé technologické a mechanické vlastnosti zmíněné v kapitolách 3.1 a 3.2. Litiny jsou odlévány na finální tvar, případně je možné je obrábět, ale někdy je potřeba odlitek svařit, případně opravit či navařit. Svařováním se opravují vady v odlitcích, návary se též opatřují plochy a hrany, které jsou namáhané a dochází u nich k nadměrnému opotřebení. Návary se provádějí u nových dílců i jako opravárenská technologie [9] [14].

Svařitelnost litin je náročná především z hlediska vysokého obsahu uhlíku. U ocelí je zaručená svařitelnost udávána do 0,25 hm. % obsahu uhlíku. Na svařitelnost ocelí mají vliv i ostatní chemické prvky obsažené v ocelích. Jejich vliv se dle doporučení ČSN EN 1011-2 vypočítá pomocí rovnice pro ekvivalentní uhlík CET (rovnice 5.1). Oceli s obsahem uhlíku nad 0,5 hm. % se svařovat nedoporučuje [29].

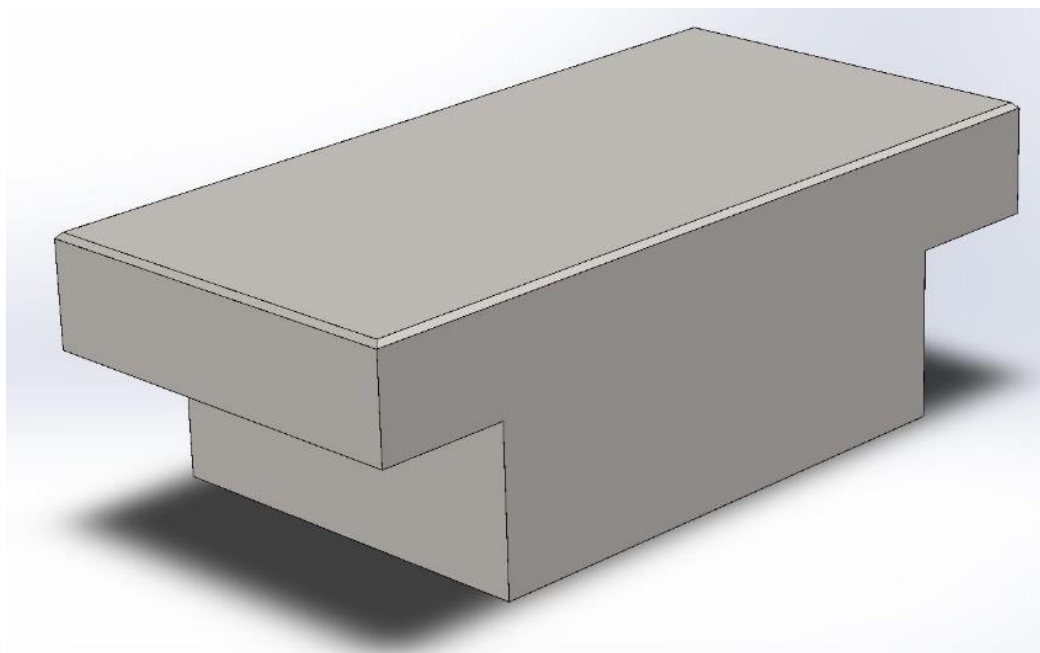
$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} [\%]$$

Rovnice 1 Uhlíkový ekvivalent CET podle ČSN EN 1011-2

Litiny obecně se svařují obtížně. Jejich svařitelnost je ovlivněna zejména chemickým složením, jeho heterogenitou a fyzikálně-mechanickými vlastnostmi. Kromě vysokého obsahu uhlíku má na svařitelnost litin vliv hlavně křemík, síra a fosfor. U svařování litin se vlivem vysokého obsahu uhlíku (obvykle nad 3 hm. %) tvoří v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) středně až vysokouhlíkový martenzit, což je důvodem vzniku trhlin za studena. Na výslednou strukturu litiny při jejím tuhnutí má významný vliv také rychlost ochlazování. Rychlost tuhnutí bývá tak vysoká, že se vedle martenzitické struktury na hranici nataveného kovu v TOO vyloučí cementit, který je velmi tvrdý a křehký. Cementitická a martenzitická struktura jsou nejčastěji zdrojem trhlin. Litiny mají obvykle proti ocelím vyšší obsah křemíku. Křemík podporuje vylučování uhlíku z taveniny ve formě grafitu, což na svařitelnost působí příznivě, ale křemík také zhoršuje mechanické vlastnosti feritu. Síra a fosfor jsou v litině s kuličkovým grafitem zastoupeny ve vyšší koncentraci než u ocelí (až 3krát více hm. %). Tyto prvky mohou způsobovat trhliny za tepla, které mohou iniciovat vznik studených trhlin. Při navařování litin je vhodné volit složení přídavného materiálu tak, aby se minimalizoval vznik cementitických struktur (ledeburitu). Toho se docílí přidávanými materiály vyrobenými z tzv. grafitizačních prvků, kterými jsou například nikl, měď, uhlík. Obsah Ni se používá 50 hm. %, nebo cca 95 hm. %. [29] [30] [6].

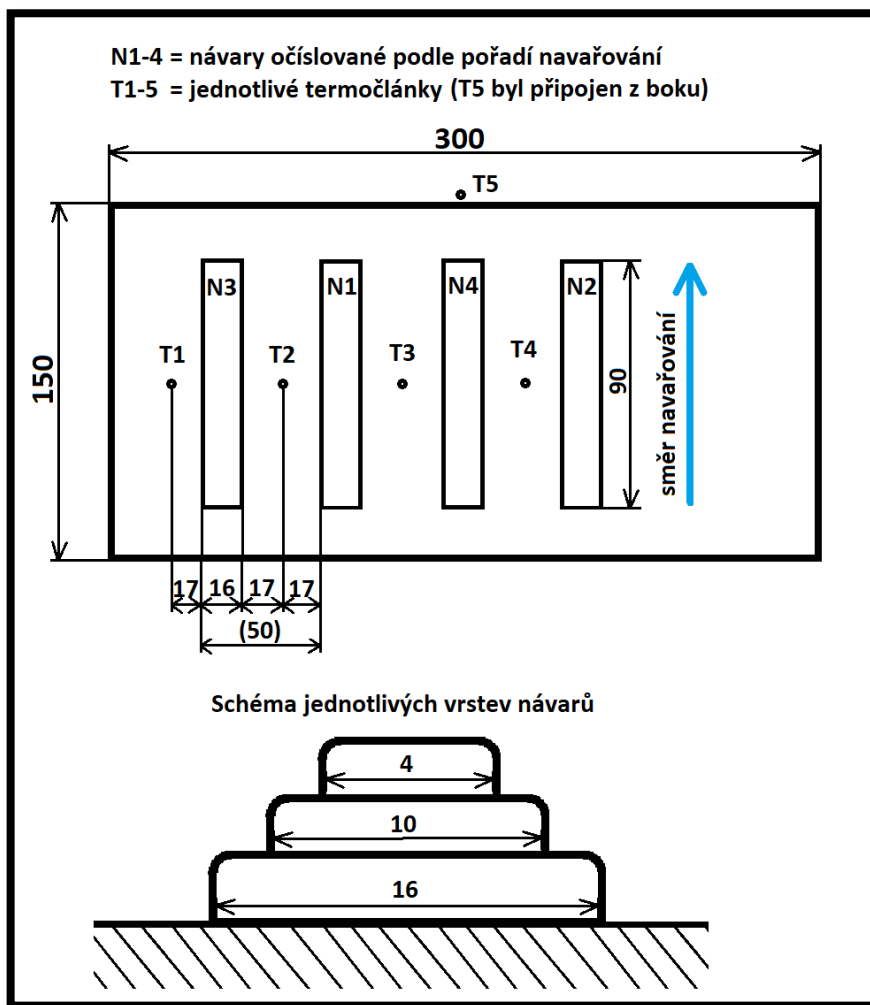
6. Praktická část

V rámci experimentu bylo navařeno 12 návarů různými parametry tak, aby bylo možno zjistit vyhovující hodnoty navařovacího proudu. Jako základní materiály pro navařování byly použity litina s lupínkovým grafitem, litina s kuličkovým grafitem a nástrojová ocel, ze kterých jsou vyráběny formy lisovacích nástrojů v automobilovém průmyslu. Bylo navařováno na tři části základního materiálu tvaru kvádrů o rozměrech 300x150x100 mm. Na každý kvádr byly navařeny 4 návary o třech vrstvách, přičemž šířka návarů se s každou vrstvou zužovala. Navařování, případné tepelné zpracování a chladnutí bylo sledováno několika termočlánky. Kvádr základního materiálu použitý pro navařování a schéma návarů a termočlánků jsou zobrazeny na obrázcích 6.1 a 6.2.



Obrázek 6-1 Základní materiál o hlavních rozměrech 300x150x100 mm (D x Š x V)

Vzorky návarů byly následně děleny s intenzivním chlazením, aby nedošlo k ovlivnění struktury. Vzniklé plátky byly zalisovány do vzorků, které byly broušeny a vyleštěny a následně naleptány leptadlem Villela-Bain (95 ml etylalkoholu, 5 ml kyseliny chlorovodíkové, 1 ml kyseliny pikrové).



Obrázek 6-2 Schéma návarů, termočlánků a jednotlivých vrstev návarů (rozměry v mm)

6.1. Základní a přídatné materiály

Pro navařování byly použity tři druhy základních materiálů, ze kterých se vyrábějí nástroje pro tváření, a dva druhy přídatných materiálů, které by vyhověly požadavkům na tvrdost, potažmo životnost činných částí nástrojů.

První sada vzorků (1-1 - 1-4) byla navařena na základní materiál z litiny s lupínkovým grafitem (EN GJL-200). Přídatným materiálem byla rychlořezná ocel s obchodním názvem HSS 30, popsaná v kapitole 4.3.1. Navaření proběhlo ve třech vrstvách pro imitaci navaření hrany nástroje.

Druhá sada vzorků (2-1 – 2-4) byla navařována také přídatným materiálem HSS 30, ale na základní materiál typu EN GJS, tedy litinu s kuličkovým grafitem. Na druhé sadě návarů bylo provedeno tepelné zpracování rychlořezné oceli. Tepelným zpracováním zde bylo vícenásobné popouštění při teplotě 560 °C. Cílem TZ bylo další zvýšení tvrdosti návarů a tím

dosažení vyšší životnosti nástroje. Tepelné zpracování bylo provedeno pomocí automatického zdroje pro odporový ohřev DHC6510. Cyklus byl nastaven na popouštění při 560 °C, a to třikrát s výdrží 1 hodinu s meziochlazením na pokojovou teplotu. Celý tento proces byl sledován termočlánky.

Třetí sada návarů (3-1 – 3-4) byla zhotovena na vzorku základního materiálu z nástrojové oceli W.Nr. 1.2358 (60CrMoV18-5) a jako přídatný materiál zde byl použit prášek s obchodním názvem Fesit N-P.

Rychlost podávání byla u všech navařovaných materiálů v rozmezí 9-12 (hodnota na zařízení), což odpovídá dle vážení množství podaného svařovacím hořákem za určitý čas 18,1-27,66 g.min⁻¹. Navařování proběhlo dle schématu návarů výše (Obrázek 6-2).

6.2. Metody navařování

Navařováno bylo na automaticky řízeném zařízení metodou PTA (Plasma transferred arc) od výrobce KSK, spol. s.r.o. Tento navařovací automat je primárně určen pro navařování rotačních součástí, a to jak z čela, tak po obvodu. Polohování hořáku je řízeno ve čtyřech osách (X, Y, Z, N) a polohování navařované součásti je řízeno ve dvou osách (C, R). Průměr stolu je zde 300 mm a jeho nosnost je maximálně 70 kg. Zařízení umožňuje jak programovatelný cyklus navařování, tak i ruční režim se záznamem do programu. Fotografie zařízení je na obrázku 6-3 [31].



Obrázek 6-3 Plazmový navařovací automat PPC 250 R6 [31]

Vzdálenost hořáku od navařované součásti byla 10 mm a rozměry návarů byly 90x20 mm. Počet housenek byl nastaven na 50 při kroku 1,7 mm. Jako plazmový, ochranný a podávací plyn byl použit argon o čistotě 4.8 (99,998 % Ar). Rychlost kroku byla 4 mm.s⁻¹ a rychlost rozkyvu 9 mm.s⁻¹.

6.3. Měření průběhu teplot

Při navařování a chladnutí byly teploty vzorků snímány termočlánky, které byly v čase zaznamenávány vícekanálovou univerzální měřicí ústřednou ALMEMO 5690-2M od výrobce Ahlborn (Německo). Měřicí stanice disponuje měřením až 20 kanálů. Snímání teploty je možné nastavit rychlostí 2,5 až 100 měření za sekundu. Teploty jsou zaznamenávány dle nastavených parametrů na SD kartu pro další zpracování. Měřicí ústředna je zobrazena na obrázku 6-4 [32] [33].

Teplota byla snímána pomocí termočlánků typu K (NiCr-Ni) konkrétně typem T190-7 od firmy Ahlborn. Jejich umístění je vyznačeno na obrázku 6-2.



Obrázek 6-4 ALMEMO 5690- 2M [33]

6.4. Tepelné zpracování návarů

U druhé sady návarů bylo provedeno tepelné zpracování navařovaného materiálu. TZ bylo provedeno pomocí zdroje pro odporový ohřev DHC6510 od výrobce Dawell (CZ). DHC6510 je malý třífázový zdroj pro odporový ohřev, jehož teplota může být řízena nastavitelným teplotním programem, který může obsahovat až 180 segmentů. Pro snímání teploty v čase disponuje digitálním záznamníkem s kapacitou až 64 hodin záznamu. Data měření teploty je možné přes USB kabel přesunout od PC, kde je možné je dále zpracovávat [34].

Vstupní napětí zdroje je 3x400 V a příkon je dán hodnotou 23 A. Výstup zdroje dosahuje napětí 0-65 V a proudu 0-180 A (výkon 0-10,8 kW). Jako teplotní čidlo je zde použit termočlánek typu K s rozsahem měření -40 až 1350 °C. Přístroj je vyobrazen na obrázku 6-5 [34].

Tepelné zpracování bylo nastaveno na ohřev na popouštěcí teplotu 560 °C, výdrž 1 hodinu a ochlazení na pokojovou teplotu, to vše bylo opakováno 3x za sebou. TZ bylo provedeno z důvodu dalšího zvýšení tvrdosti vlivem rozpuštění legujících prvků ve zbytkovém austenitu (A_2) a jejich následnou přeměnu na karbidy Cr, Mo, W, V, čímž ochudí A_2 o uhlík a tím se posune hranice M_s k vyšším teplotám. Při následném ochlazení se zbytkový austenit transformuje na martenzit a dojde ke zvýšení tvrdosti.



Obrázek 6-5 Zdroj pro odporový ohřev DHC6510 [34]

6.5. Měření mikrotvrdosti

Měření mikrotvrdosti bylo prováděno na metalografických vzorcích, jejichž řez byl příčný k ose návaru. Měření probíhalo na tvrdoměru Buehler IndentaMet 1104. Jedná se o malý, poloautomatický tvrdoměr, který může být osazen až třemi objektivy a dvěma indentory. Na tomto měřícím zařízení byl osazen indentor z diamantu ve tvaru čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136°, měření tedy probíhalo metodou podle Vickerse. Tvrdoměr je zobrazen na obrázku 6-6 [35].

Síla vtisku indentoru byla nastavena na 9,807 N, což odpovídá značení dle Vickerse HV1. Délka zatížení byla 10 s.

Vtisky byly prováděny ve středu návaru od rozhraní první návarové housenky a základního materiálu. Vtisky směrem do návaru měly kladnou hodnotu vzdálenosti a vtisky směrem do základního materiálu měly hodnoty vzdáleností záporné. Rozestup mezi jednotlivými vpichy byl 1 mm, případně 0,5 mm v místě kraje poslední housenky návaru. V místě posledního vpichu ve třetí housence návaru byly provedeny další dva vpichy 1 mm nalevo a 1 mm napravo pro ověření povrchové mikrotvrdomosti (max. 0,5 mm pod povrchem).



Obrázek 6-6 Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104 [35]

6.6. Vyhodnocení metalografie

Vyhodnocení metalografických vzorků probíhalo na světelném mikroskopu Zeiss Axio Observer D1M. Jedná se o inverzní mikroskop. Inverzní mikroskop se liší od klasického tím, že objektivy jsou umístěny pod pozorovaným objektem. Fotografie mikroskopu je na obrázku 6-7 [36].

Při pořizování snímků bylo použito zvětšení 25x až 500x tak, aby byla zachycena požadovaná oblast zkoumání. U snímků je mimo zvětšení také uvedeno měřítko fotografie.



Obrázek 6-7 Zeiss Axio Observer D1M [36]

6.7. Předehřev základního materiálu

Teplota předehřevu byla zvolena na základě velkého objemu podložky tvořící ZM. Pro vzorky základního materiálu z LLG a LLK byla teplota předehřevu volena vyšší, než je teplota M_s rychlořezné oceli HSS 30, ale zároveň nižší, než jsou teploty přeměn základního materiálu podle pseudobinárního diagramu Fe-C-Si (2% Si). Teplota M_s materiálu HSS 30 je materiálovým listem udávána jako 180 °C a teplota počátku strukturních změn základního materiálu (litiny) je podle diagramu (obrázek 6-8) přibližně 750 °C. Teplota předehřevu, a to také z důvodu manipulace s materiálem během experimentu, byla stanovena na 300 -350 °C.

Teplota předehřevu základního materiálu byla stanovena výpočtem teploty předehřevu podle Seferiana [37]:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_c + C_s - 0,25} = 350 \cdot \sqrt{1,22778 + 0,613889 - 0,25} = 442 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

T_p teplota předehřevu [°C]

Kde:

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360}$$

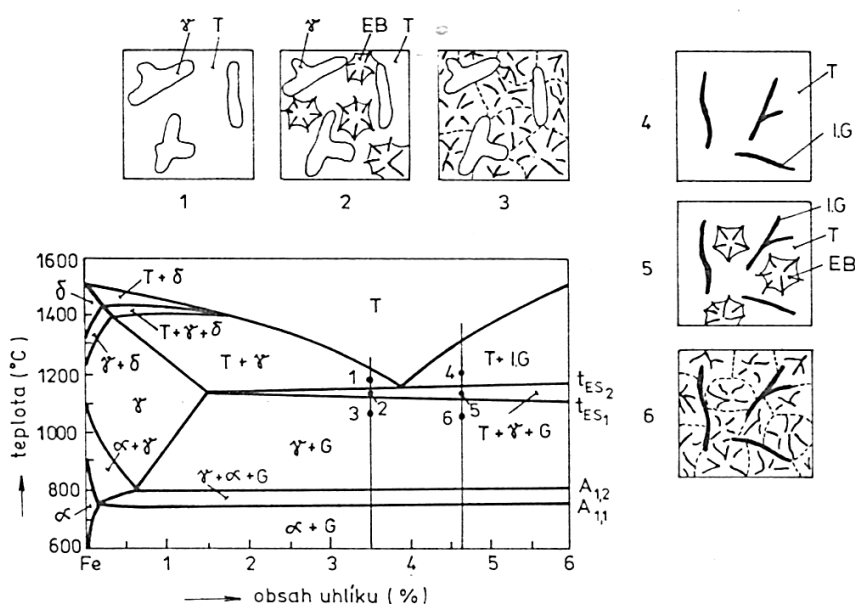
$$C_c = \frac{360 \cdot 0,6 + 40 \cdot (0,8 + 4,5) + 20 \cdot 0 + 28 \cdot 0,5}{360} = 1,22778$$

$$C_s = 0,005 \cdot s \cdot C_c = 0,005 \cdot 100 \cdot 1,22778 = 0,613889$$

s.....tloušťka materiálu [mm]

Rovnice 2 Výpočet teploty předehřevu podle Seferiána [37]

Teplota předehřevu základního materiálu z nástrojové oceli byla stanovena výpočtem na 400 - 450 °C. Obrázek pseudobinárního diagramu Fe-C-Si pro 2 % Si je na obrázku 6-8 [37]

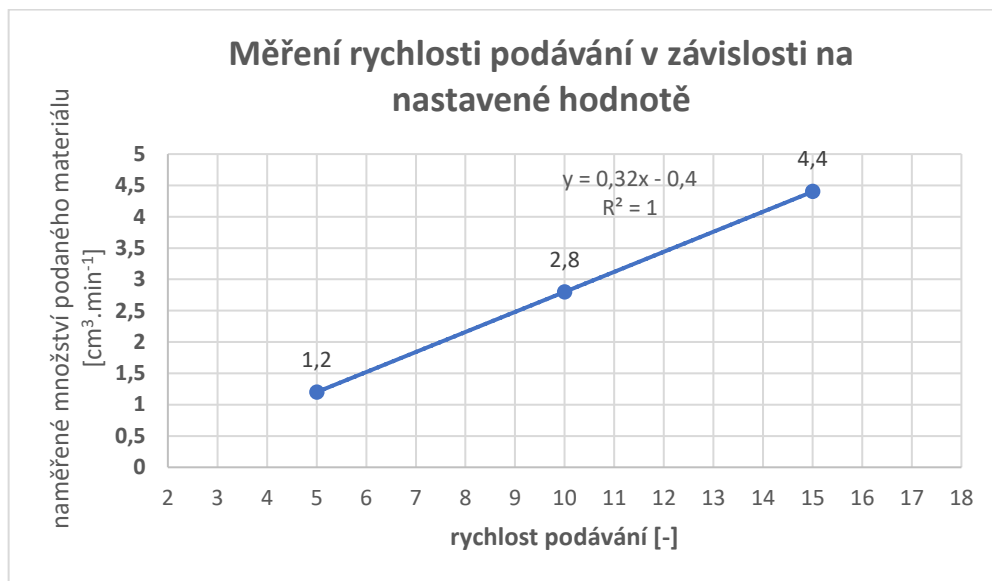


Obrázek 6-8 Pseudobinární diagram Fe-C-Si (2 % hm. % Si) [38]

6.8. Měření rychlosti podávání přídavného materiálu

Zařízení pro plazmové navařování, použité pro experiment, udává rychlost podávání přídavného materiálu pouze jako bezrozměrnou hodnotu, takže bylo potřeba tuto rychlost odměřit a přepočítat.

Postupně byla nastavena rychlost podávání prášku na hodnoty 5, 10 a 15 a byl měřen objem podaného materiálu za jednotku času. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny na grafu 6-1.



Graf 6-1 Měření rychlosti podávání přídavného materiálu

Hustota přídavného materiálu HSS 30 (DEW – Německo) výrobce udává hodnotou $8,04 \text{ g.cm}^{-3}$ a pro přídavný materiál Fesit N-P je měrná hmotnost udávána jako hodnota $7,3 \text{ g.cm}^{-3}$. Přepočet naměřených hodnot na hmotnost v závislosti na čase je uveden v tabulce 6-1.

Tabulka 6-1 Přepočet hodnoty podávání na hmotnost za časovou jednotku

Podávací rychlost zařízení [-]	Rychlost podávání HSS 30 [g.min ⁻¹]	Rychlost podávání Fesit N-P [g.min ⁻¹]
5	9,65	8,76
9	19,94	18,1
10	22,51	20,44
12	27,66	25,11
15	35,38	32,12

7. Výsledky a diskuze praktické části

7.1. Testovací vzorek pro navaření HSS 30

Testovací vzorek pro hrubé nastínění svařovacích parametrů byl předehřátý na teplotu 350°C. Navařováno bylo práškem z rychlořezné oceli s obchodním názvem HSS 30. Byly jím provedeny 3 krátké návary délky 40 mm a šířky 20 mm (Obr 7-1). V průběhu navařování byly měněny hodnoty s ohledem na aktuální vzhled a kresbu návaru. Program navařování byl předem navržen na tři úrovně svařovacího proudu (tabulka 7-1). Po navaření tří za sebou jdoucích návarů byl vyhodnocen vzhled. Testovací vzorek byl přesunut zpět do pece, kde byl opět zahříván na teplotu předehřevu.



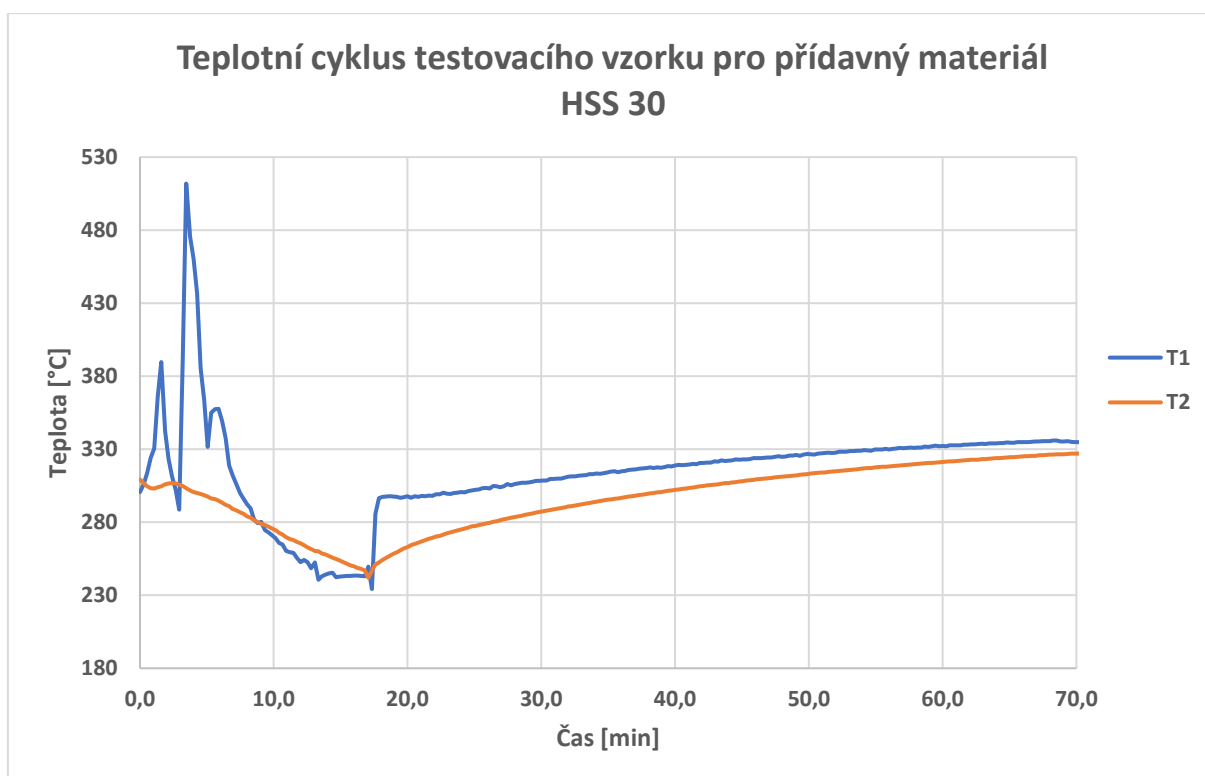
Obrázek 7-1 Testovací vzorek pro navařování rychlořezné oceli, směr navařování (pořadí v tabulce 6-1) zprava doleva

Na testovacím vzorku byla měřena teplota dvěma termočládky. Jeden byl umístěn z boku základního materiálu (na obr. 7-1 není vidět) a druhý byl umístěn v těsné blízkosti návaru. Průběh teplot je zobrazen na grafu 7-1. Parametry navařování testovacího vzorku jsou zobrazeny v tabulce 7-1. Hodnota proudu (IL) byla s každým návarem zvyšována a následně byl hodnocen vzhled návaru. Hodnota horního proudu IH byla konstantní, protože její změna, vzhledem k poměru času k hodnotě spodního proudu, by se projevila jen velmi málo. Měněn byl tedy spodní proud a to o 15 A na každý návar. Hodnota spodního proudu 45 A se ukázala jako nedostatečná (obrázek 7-1 vpravo). Návarový prášek nebyl nataven a návar nebyl proveden v souvislé vrstvě. Druhý testovací návar (obrázek 7-1 uprostřed – IL=60 A) již tvořil souvislou vrstvu na základním materiálu, ale střed návaru byl stále propadlý oproti okrajům. Třetí návar provedený proudem IL 75 A měl pravidelnou kresbu a tvořil rovnou plochu. Z poznatků získaných při navařování testovacího vzorku byl vytvořen

program pro navaření první sady vzorků třívrstevných návarů z rychlořezné oceli na základní materiál z litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem.

Tabulka 7-1 Tabulka navařovacích parametrů testovacích návarů (l =délka, s =šířka, I_H =horní proud, I_L =spodní proud, f =frekvence pulzu – zde 3Hz)

Návar	l [mm]	s [mm]	I_H [A]	I_L [A]	f [Hz]	Podávání [-]	rychlost rozkyvu [mm.s ⁻¹]	rychlost kroku [mm.s ⁻¹]
1	40	20	150	45	3	9	9	4
2	40	20	150	60	3	9	9	4
3	40	20	150	75	3	9	9	4



Graf 7-1 Teplotní cyklus testovacího vzorku pro přídavný materiál HSS 30 (T1 znázorňuje termočlánek umístěný v blízkosti návaru, T2 zobrazuje termočlánek z boku základního materiálu)

Na grafu 7-1 jsou zobrazeny průběhy teplot naměřené termočlánek 1 a 2. Termočlánek č. 1 (T1) byl umístěn v blízkosti návaru a z jeho charakteristiky v levé části grafu je patrné lokální zahřívání během navařování. Křivka kopíruje proces navařování 3 návarů jdoucích za sebou. V 17. minutě byl vzorek vrácen zpět do pece na dohřev.

7.2. Navařování rychlořezné oceli HSS 30

7.2.1. Návary rychlořezné oceli na litině s lupínkovým grafitem

Prvním navařovaným materiálem byla rychlořezná ocel s obchodním názvem HSS 30 popsaná v kapitole 4.3.1. Navařování probíhalo ve třech vrstvách s různými parametry svařovacího proudu pro jednotlivé návary i jednotlivé housenky. Parametry navařování prvních vrstev vycházely z poznatků získaných navařením testovacího vzorku (kapitola 7.1). Cílem bylo zjistit optimální svařovací proud pro navařování tohoto materiálu na danou litinu. Průběh teplot byl sledován termočládky. Jeden termočládek byl umístěn u každého návaru a jeden z boku základního materiálu (viz obr. 6.2.). Základní materiál byl předeřátý na 350°C a návary byly navařovány střídavě dle pořadí dle schématu návarů (Obrázek 6-2 str. 24). Parametry navařování jednotlivých návarů a vrstev jsou zobrazeny v tabulce 7-2.

Tabulka 7-2 Parametry navařování 1. sady vzorků (l=délka, s=šířka, IH=horní proud, IL=spodní proud, f=frekvence pulzu)

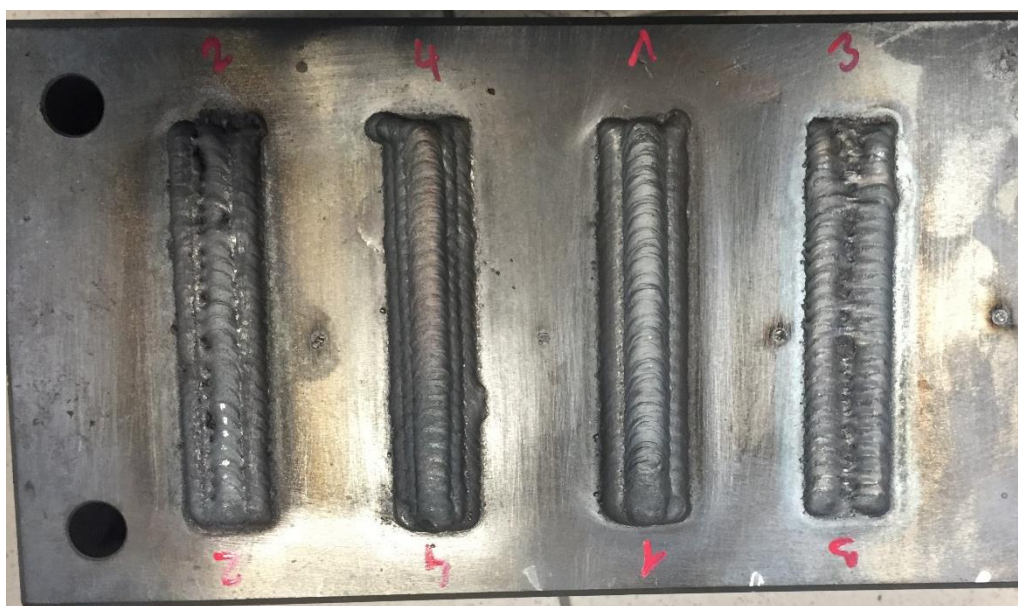
Návar/ vrstva	l [mm]	s [mm]	IH [A]	IL [A]	f [Hz]	Podávání [-]	rychlost rozkyvu [mm.s ⁻¹]	rychlost kroku [mm.s ⁻¹]
1-1/1	90	16	150	70	3	12	9	4
1-1/2	90	10	150	45	3	12	9	4
1-1/3	90	4	150	45	3	12	9	4
1-2/1	90	16	130	65	3	12	9	4
1-2/2	90	10	120	40	3	12	9	4
1-2/3	90	4	120	40	3	12	9	4
1-3/1	90	16	110	65	3	12	9	4
1-3/2	90	10	90	40	3	12	9	4
1-3/3	90	4	90	40	3	12	9	4
1-4/1	90	16	150	85	3	12	9	4
1-4/2	90	10	150	55	3	12	9	4
1-4/3	90	4	150	55	3	12	9	4

První sada vzorků byla navařena frekvencí 3 Hz. Parametry proudu navařování byly různé, z důvodu zjištění intervalu použitelných hodnot pro návary. Byly navařeny 4 návary o třech vrstvách, které se dále tepelně nezpracovávaly. Po navaření byl celý vzorek vrácen zpět do pece, kde byl pomalu ochlazován pro minimalizaci vnitřního pnutí. Podávání bylo nastaveno v rozsahu 9 - 12. Na grafu 7-2 je znázorněn teplotní průběh první sady návarů práškem HSS 30. Detaily z grafu 7-2 zobrazují dále grafy 7-3 a 7-4. První navařená sada je zobrazena na obrázcích 7-2 a 7-3.



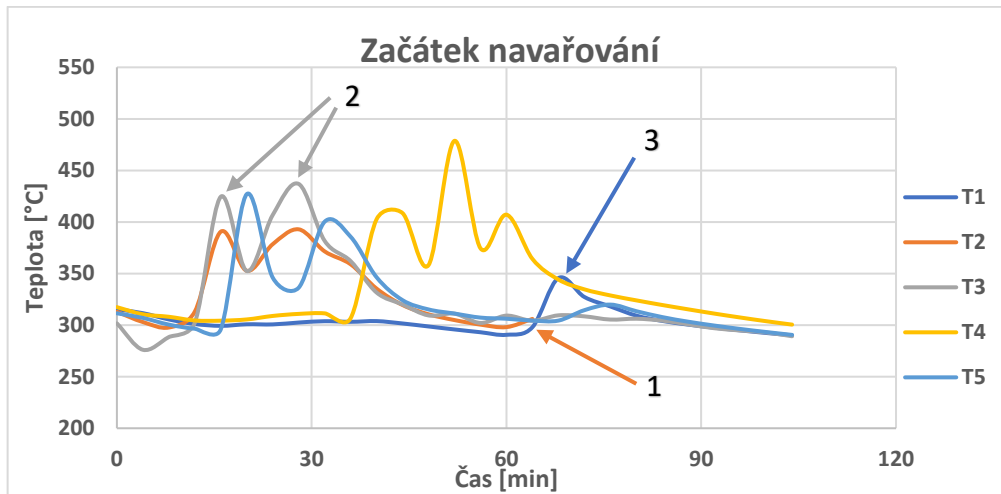
Obrázek 7-2 První sada návarů po navaření

Na obrázku 7-2 je patrné to, co následně také vyplývá z průběhů teplot v grafu 7-2. Termočlánek č. 2 (T2) zřejmě nebyl dostatečně dobře přivařen a v průběhu navařování se uvolnil a termočlánek č. 4 (T4) byl během navařování 4. návaru odtaven navařovacím hořákem.



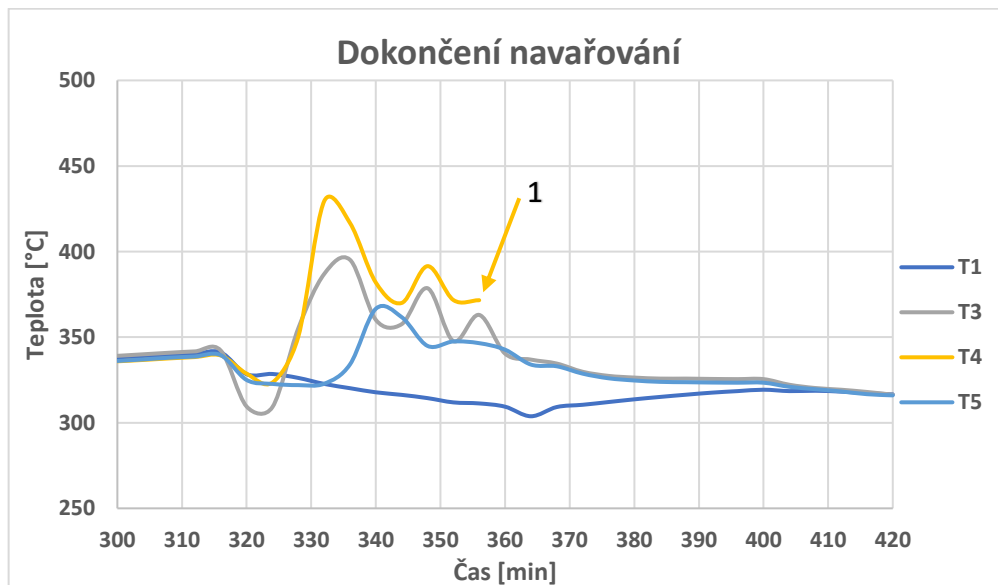
Obrázek 7-3 Očištěné návary z první sady

Na obrázku 7-3 jsou vidět očištěné návary 1-1 až 1-4. Návary po vychladnutí vykazovaly často trhliny vedoucí po obvodu návarů. V těsné blízkosti návaru 1-4 dokonce došlo k delaminaci malého kousku základního materiálu. Litina s lupínkovým grafitem má tažnost přibližně 1 % a pravděpodobně nevydržela napětí vyvolané smršťováním návarů při chladnutí, i když bylo velmi pozvolné.



Graf 7-2 Navaření 1.-3. návaru – (1) poškození termočládku T2, (2) průběh teplot navaření první a druhé housenky prvního návaru, (3) průběh teplot 3. návaru

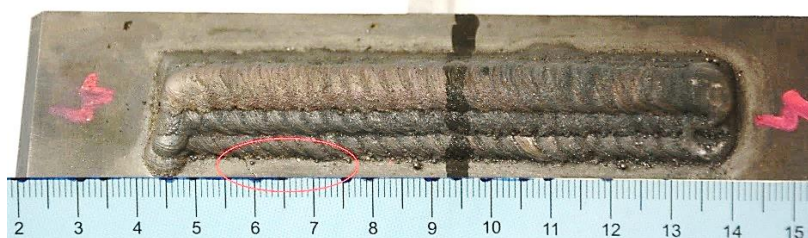
Z grafu 7-2 vyplývá, že v průběhu navařování 3. návaru byl poškozen termočlánek T2 (1), sousedící s 3. návarem. Je zde vidět, podle průběhu T2 a T3 (2), že první návar byl zhotoven pouze ve dvou vrstvách, návar 2 byl navařen třemi vrstvami podle plánu a 3. návar byl navařen pouze jednou vrstvou, která nebyla natavená v celé své šířce (3).



Graf 7-3 Navaření 4. návaru – (1) poškození termočládku T4

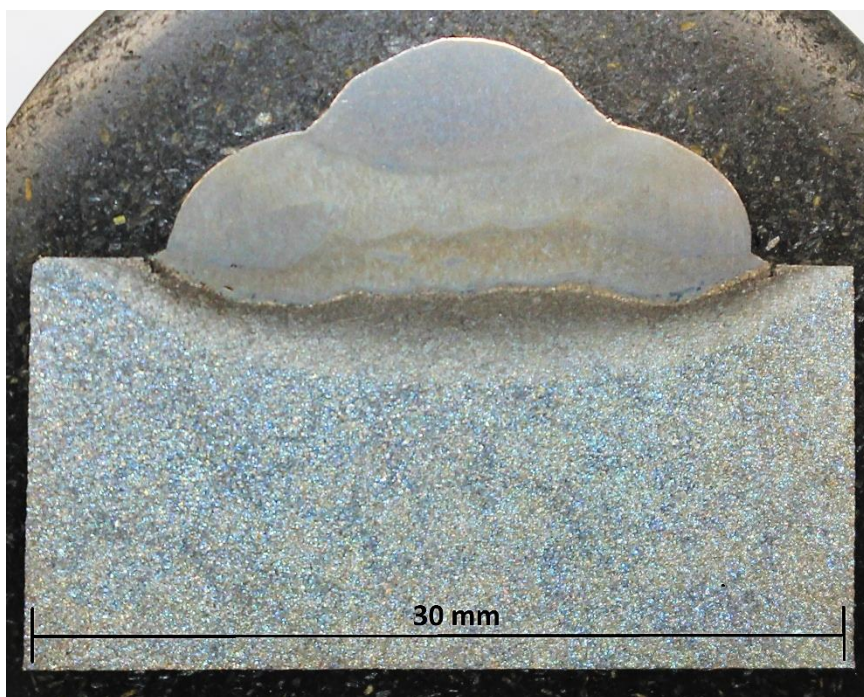
V grafu 7-2 je zobrazeno navaření návarů 1-3. Z provozních důvodů bylo navařování po třetím návaru přerušeno. Vzorek byl před navařením návaru č. 4 opět předehřát na cca 340 °C a následně byl proveden 4. návar (graf 7-3). Na konci druhé vrstvy 4. návaru byl poškozen termočlánek č. 4 (1), přímo sousedící s návarem č. 4.

Navařování první sady probíhalo frekvencí 3 Hz (z důvodu co nejnižšího vneseného tepla), ale během navařování se ukázalo, že frekvence je tak nízká, že při rychlosti rozkvyu $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a rychlosti kroku $4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ nedokáže dostatečně při nižších proudech natavit základní a přídavný materiál a ve středové části nedocházelo k vyplnění přídavným materiálem. To je dobře vidět na obrázku 7-3 na třetím návaru (úplně vpravo). Z těchto důvodů byly změněny průběhy proudů při pulzním navařování. Frekvence byla zvýšena na 6 Hz a při daných rychlostech se ukázala jako vyhovující.



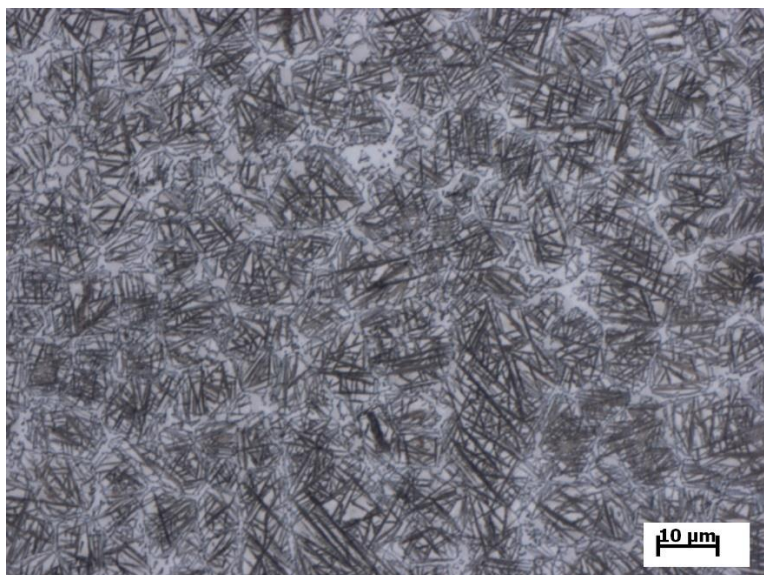
Obrázek 7-4 Návár z první sady vzorků (1-4), přídavný materiál HSS 30. Červená elipsa označuje místo trhliny

Na obrázku 7-4 je vidět návár 1-4 odebraný z původního celku 4 návarů. Červeně je zde označeno místo, kde základní materiál nevydržel napětí vyvolané objemovými změnami tuhnutí náváru a došlo zde k delaminaci.



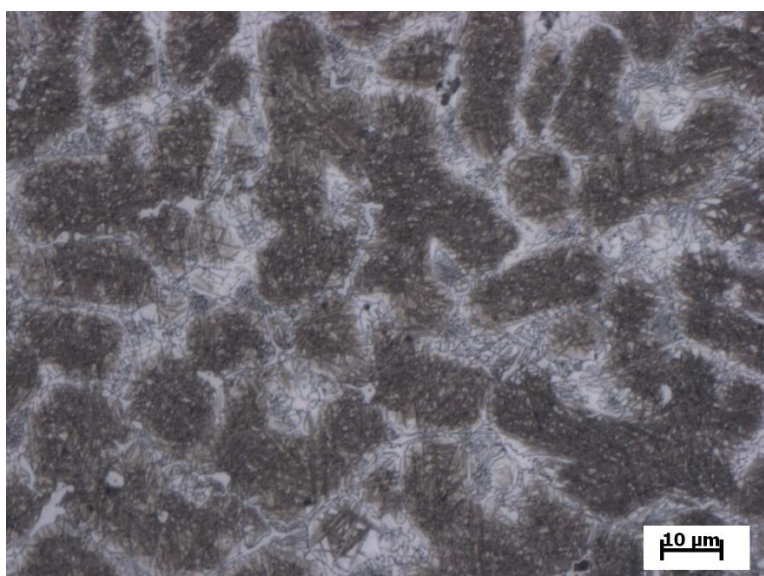
Obrázek 7-5 Řez návarem 1-1 (HSS 30 na LLG)

Návar 1-1 na obrázku 7-5 byl vyhotoven ve dvou housenkách. Na rozhraní mezi návarem a základním materiálem jsou vidět důsledky napětí vyvolaného smrštěním návaru při chladnutí. Jsou zde patrné trhliny, které se šíří v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) a těsně kopírují hranu natavení.



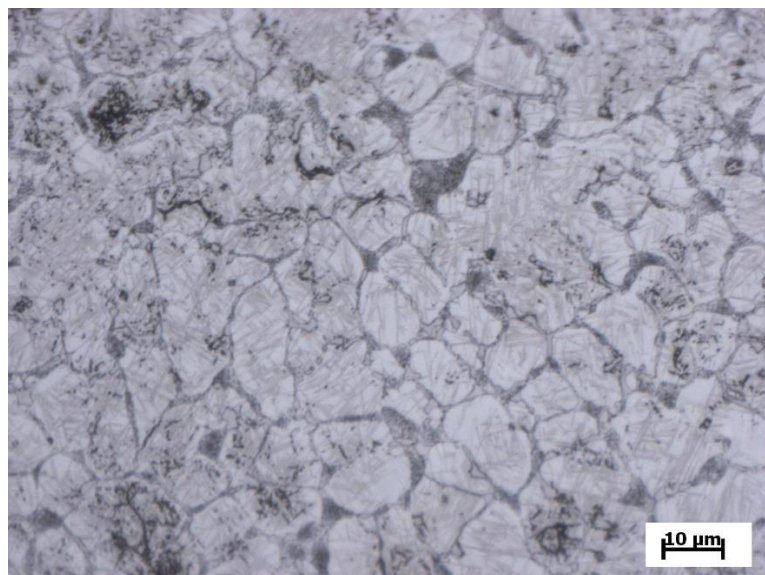
Obrázek 7-6 Návar 1-1/1. housenka, zvětšení 500x

Obrázek 7-6 zachycuje 1. housenku návaru, sousedící se základním materiálem. Struktura obsahuje hrubé martenzitické jehlice. Po hranicích zrn je s velkou pravděpodobností ledeburit s podílem karbidů s malým podílem zbytkového austenitu (světlá místa), což koresponduje s mikrotvrdostí 667 HV1 (cca 59 HRC), která byla naměřena v návaru, těsně vedle hrany natavení. Graf průběhu mikrotvrdosti návarů z první série (HSS 30 na LLG) je vyobrazen níže na grafu 7-5.



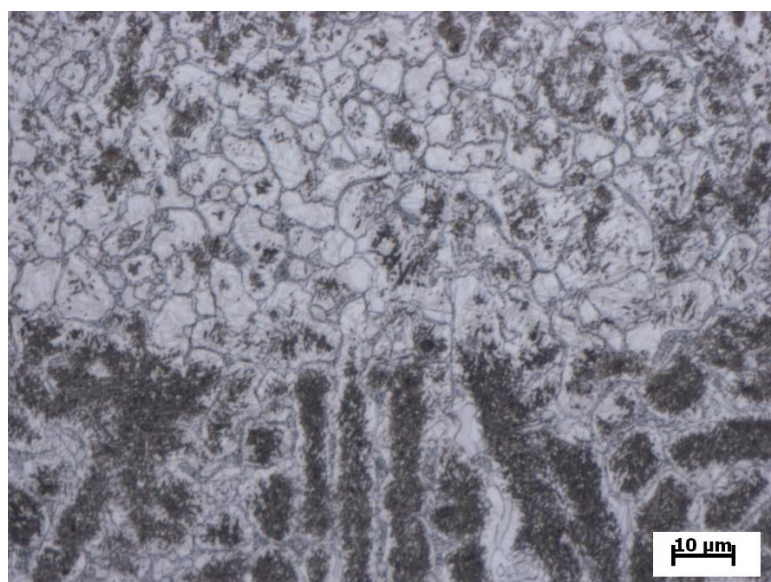
Obrázek 7-7 Návar 1-1/2. housenka, zvětšení 500x

Obrázek 7-7 zobrazuje 2. housenku návaru 1-1. Zde je vidět podíl martenzitické struktury (tmavá místa) s podílem ledeburitu (šedá místa), malým podílem Az (bílá zrna okolo tmavých zrn) a malé množství karbidů (světlé okrouhlé tvary). Mikrotvrdoost zde dosahovala téměř 700 HV1 [39].

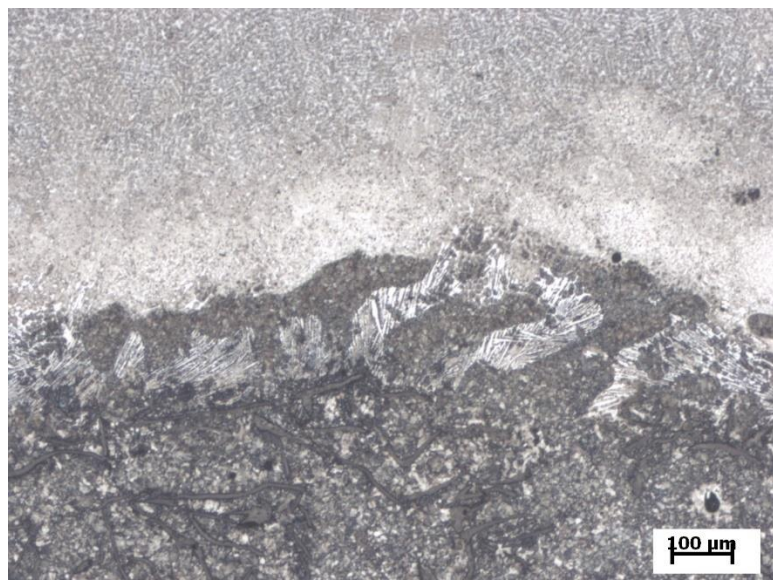


Obrázek 7-8 Návar 1-1/3. housenka, zvětšení 500x

Na obrázku 7-8 je vidět 3. housenku návaru 1-1, kde vidíme zrna obsahující martenzit a oblasti karbidů po hranicích zrn. Černé tečky jsou pravděpodobně jemné karbidy. Zde byla naměřena mikrotvrdoost od 643 do 637 HV1 (graf 7-5) s klesajícím trendem směrem k povrchu návaru. Na obrázku 7-9 je vidět výrazný přechod mezi 1. a 2. housenkou [39].

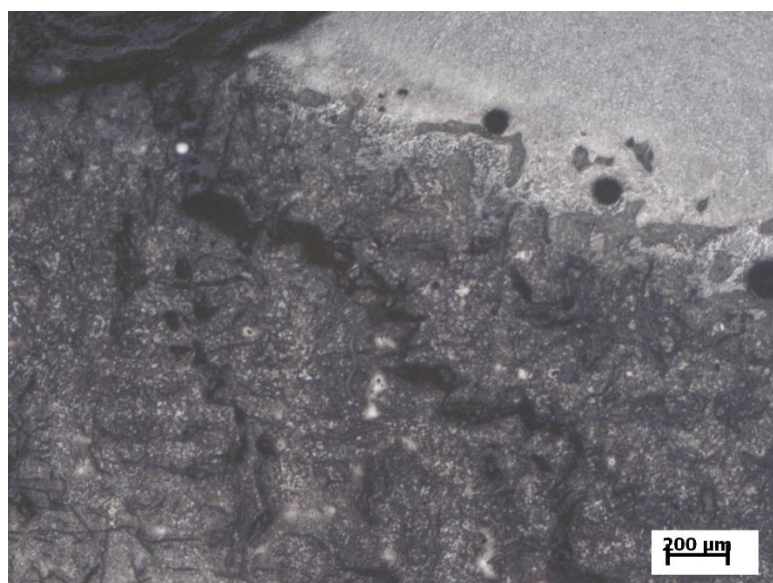


Obrázek 7-9 Návar 1-1/ přechod 1. a 2. housenky, zvětšení 500x



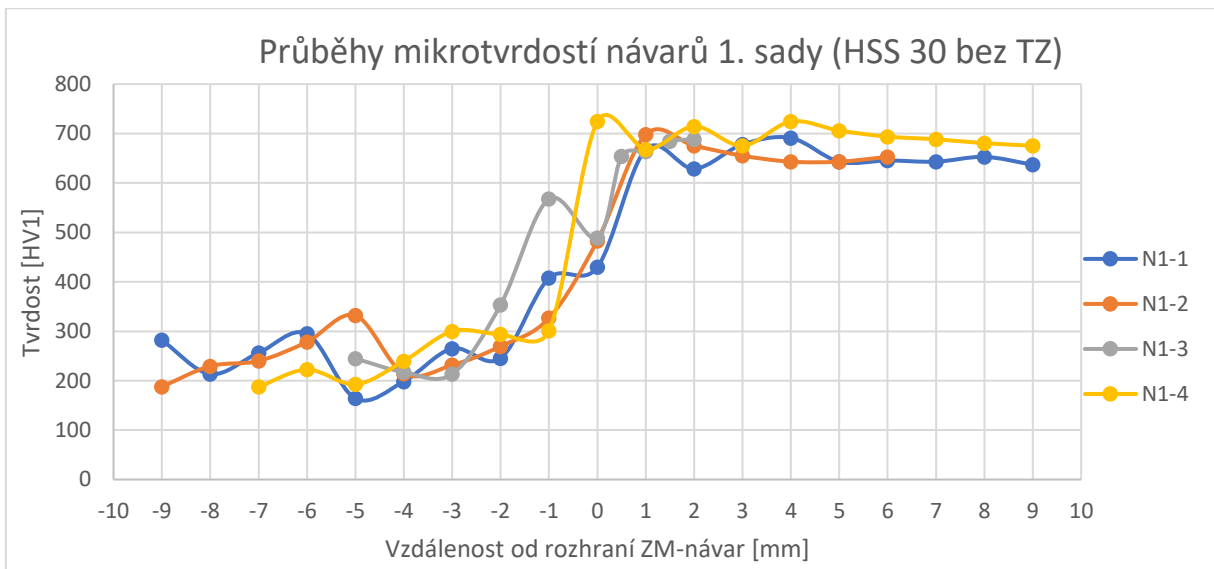
Obrázek 7-10 Návar 1-1/ přechod mezi návarem a základním materiálem, zvětšení 50x

Na obrázku 7-10 je vidět spojení první housenky se základním materiálem. Došlo zde k metalurgickému propojení obou materiálů.



Obrázek 7-11 Návar 1-1/ trhlina na boku návaru, zvětšení 25x

Na obrázku 7-11 je zachycena trhlina měřící cca 2 mm, která postupuje od hrany návaru do základního materiálu. Podobná trhlina se objevila i na opačné straně návaru. Tento jev je zřejmě způsobený smrštěním návaru při chladnutí. Vzniklé napětí společně s téměř nulovou tažností LLG pravděpodobně způsobily vznik těchto trhlin.



Graf 7-4 Průběh mikrotvrdosti návarů první série vzorků

Graf 7-4 zobrazuje průběh mikrotvrdostí vzorků 1-1 až 1-4. Pozice 0 mm (uprostřed) značí rozhraní mezi základním materiálem a první návarovou housenkou. Hodnoty do plusu znázorňují vzdálenost směrem do návarů, a naopak záporné hodnoty udávají směr do základního materiálu.

Mikrotvrdost základního materiálu se pohybovala v intervalu 192 – 332 HV1. Tato mikrotvrdost v oblasti mezi -1 a 1 mm (vodorovná osa) vysoce vzrostla k hodnotám cca 700 HV1. Směrem k povrchu návaru mikrotvrdost spíše klesala.

Návar 1-4 vykazoval proti návaru 1-1 vyšší mikrotvrdost. Rozdíly hodnot mikrotvrdosti byly vyšší především v blízkosti ZM. Směrem do návaru se mikrotvrdosti obou návarů blížily stejným hodnotám. Vyšší mikrotvrdost návaru 1-4 je pravděpodobně způsobena vyššími svařovacími proudy. Vyšší hodnoty svařovacího proudu způsobily vyšší promísení ZM s PM a tím došlo k znatelnému nauhličení PM. Jak je vidět na obrázku 7-6, došlo zde k zakalení struktury a ta je téměř výhradně martenzitická. Tvrdost martenzitu ovlivňuje především obsah uhlíku ve struktuře (tetragonalita martenzitu) [4].

7.2.2. Návary rychlořezné oceli na litině s kuličkovým grafitem

Druhá sada návarů byla navařena obdobně jako první sada, s malým rozdílem svařovacích proudů, ale s dvojnásobnou frekvencí navařování. Rychlost podávání byla ponechána na stupni 12, stejně tak rychlosti rozkyvu a kroku nebyly měněny. Navařování proběhlo stejně jako

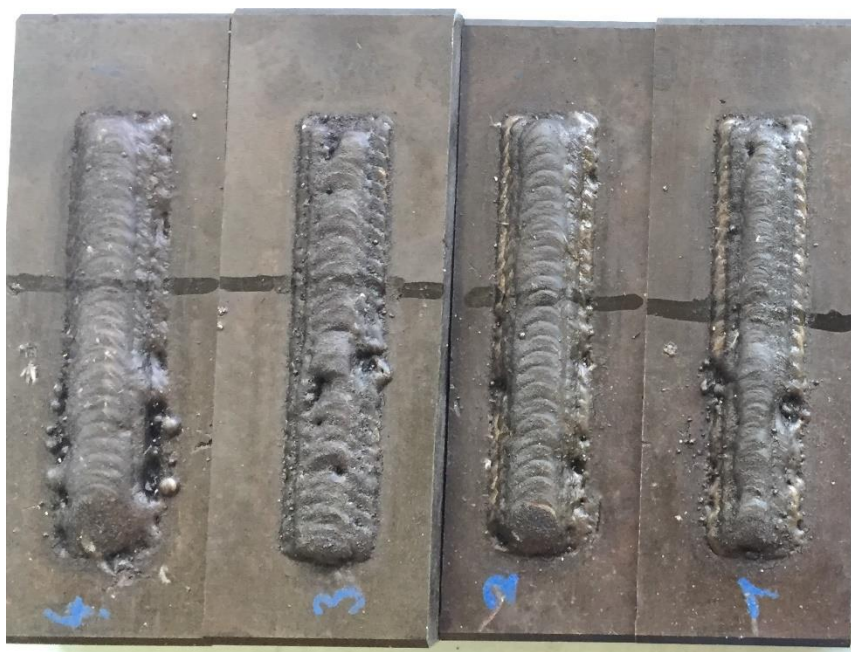
u první sady, ale vlivem nečistot v základním materiálu docházelo k pění při navařování a tvořily se prohlubně. Tento jev je dán s velkou pravděpodobností typem výroby základního

materiálu, tedy odléváním, kdy se do výrobku dostane uvolněná formovací směs při lití. Tyto vady odlitků jsou běžné a obvykle se opravují drážkováním a následným vyvařením.

Tabulka 7-3 Parametry navařování 2. sady vzorků (*l*=délka, *s*=šířka, *I_H*=horní proud, *I_L*=spodní proud, *f*=frekvence pulzu)

Návar/ vrstva	<i>l</i> [mm]	<i>s</i> [mm]	<i>I_H</i> [A]	<i>I_L</i> [A]	<i>f</i> [Hz]	Podávání [-]	rychlost rozkyvu [mm.s ⁻¹]	rychlost kroku [mm.s ⁻¹]
2-1/1	90	16	130	65	6	12	9	4
2-1/2	90	10	120	40	6	12	9	4
2-1/3	90	4	120	40	6	12	9	4
2-2/1	90	16	150	75	6	12	9	4
2-2/2	90	10	150	50	6	12	9	4
2-2/3	90	4	150	50	6	12	9	4
2-3/1	90	16	130	55	6	12	9	4
2-3/2	90	10	100	40	6	12	9	4
2-3/3	90	4	100	40	6	12	9	4
2-4/1	90	16	150	85	6	12	9	4
2-4/2	90	10	150	55	6	12	9	4
2-4/3	90	4	150	55	6	12	9	4

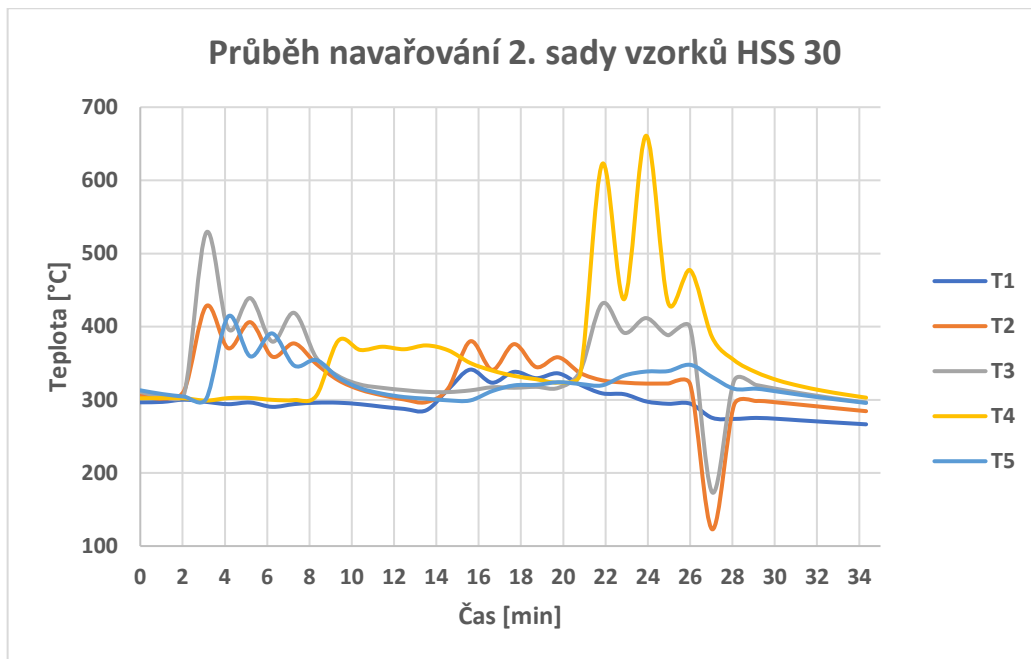
Při navařování druhé série vzorků přídavným materiálem HSS 30 na litinu s kuličkovým grafitem docházelo během navařování k reakci s nečistotami základního materiálu, které byly pod povrchem. Vzhledem k tomu, že se jedná o litý materiál, zřejmě zde byl vysoký obsah formovací směsi, což by mohl být křemičitý písek. Tyto vady vznikají při lití tím, že protékající kov strhává části formovací směsi, které následně zatuhnou v odlitku. Tyto vady jsou také dobře viditelné v řezu, který je na obrázku 7-13. Návary druhé série jsou na obrázku 7-12.



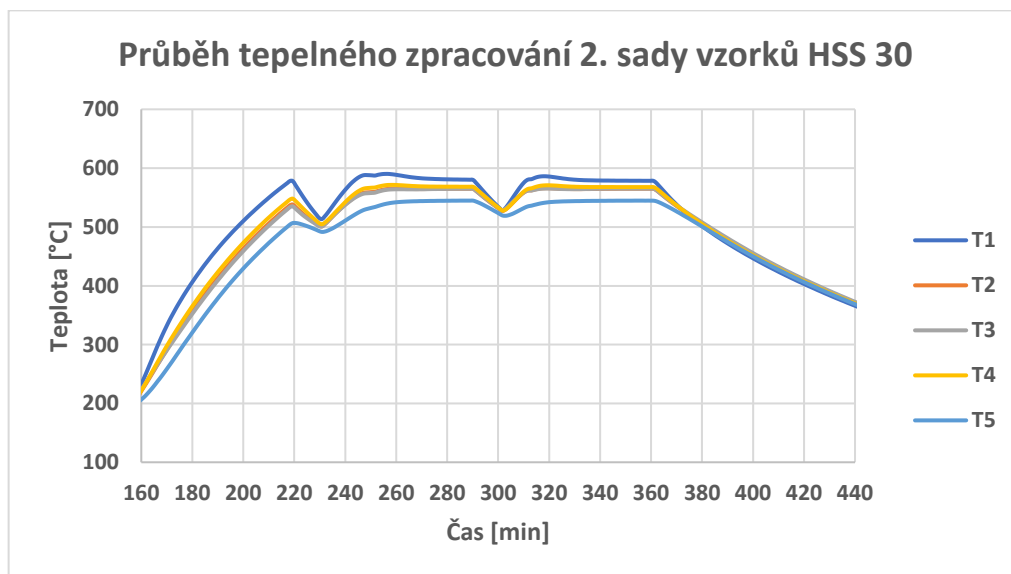
Obrázek 7-12 Návary HSS 30 na LKG

Na obrázku 7-12 jsou zachyceny návary druhé sady. Již na první pohled je patrná reakce s vadami, které byly v základním materiálu. Metalografie byla provedena ve vyznačených oblastech. Trhliny objevující se u návarů z první sady, které byly po obvodu návarů, se zde vyskytovaly více než u litiny s lupínkovým grafitem, procházely dál do základního materiálu směrem kolmo na návar. V místě, kde končí návar č. 2-4 (obrázek 7-12 nalevo dole) se vytvořila během chladnutí příčná trhlinka přes celý návar. V tomto místě byl základní materiál velmi nekvalitní a pravděpodobně zde nedošlo ke kvalitnímu propojení návaru se základním materiálem.

Druhá sada vzorků HSS 30 byla tepelně zpracována jako rychlořezná ocel, jak uváděl výrobce přídavného materiálu, 3x popuštěná s hodinovou výdrží na teplotě 560°C. K tomu bylo využito speciální nahřívací zařízení s vlastní kontrolou průběhu teplot. Byl nastaven program tepelného zpracování, ale teplotní cyklus ve výsledku neodpovídal požadovanému tepelnému zpracování. Graf 7-5 zobrazuje teplotní průběh navařování 2. sady vzorků. Graf 7-6 zobrazuje teplotní průběh tepelného zpracování 2. sady vzorků.



Graf 7-5 Detail navařování 2. sady návarů HSS 30



Graf 7-6 Detail tepelného zpracování 2. sady návarů HSS 30

Graf 7-6 znázorňuje teplotní průběh popouštění návarů 2. sady. Vlivem velkého objemu vzorku a řízení přehřívacího zařízení splynuly tři za sebou jdoucí popouštěcí náběhy na teplotu v jeden. Tento teplotní průběh spíše odpovídá žíhání pro snížení vnitřního pnutí, které je dáno předpisem na teplotu 600 °C s výdrží 2 hodiny a následným pomalým ochlazením na 500 °C, pak na vzduchu. Na obrázku 7-13 je zobrazeno tepelné zpracování 2. sady návarů.



Obrázek 7-13 Zdroj pro odporový ohřev DHC6510 při tepelném zpracování 2. sady návarů HSS 30

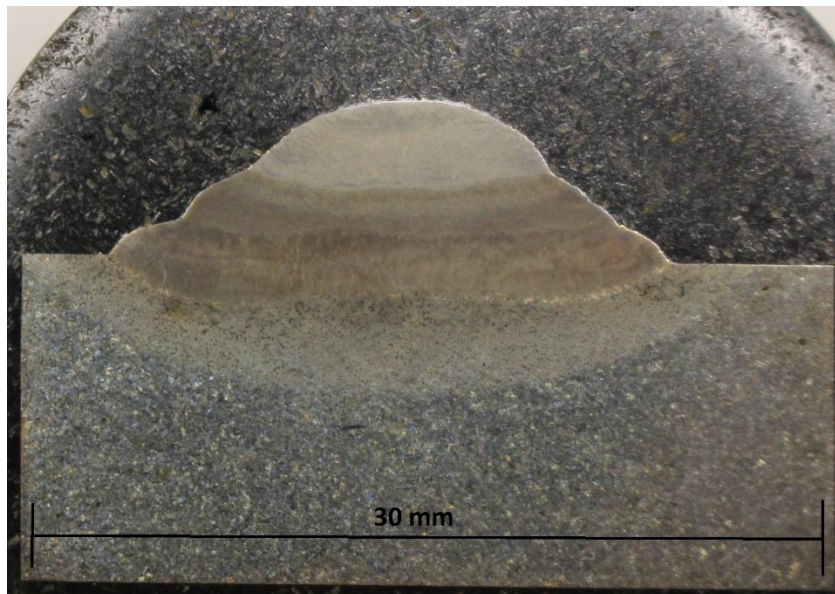


Obrázek 7-14 Vady v základním materiálu objevené při řezání vzorků pro metalografii



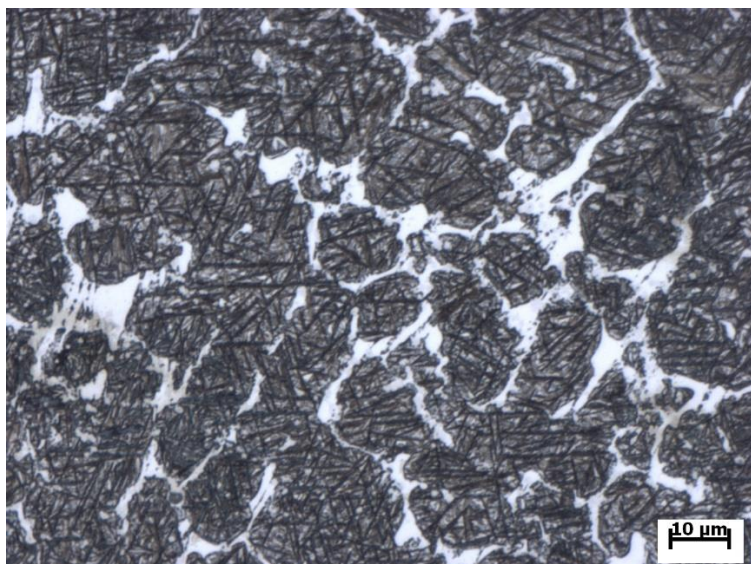
Obrázek 7-15 Návar č. 2-2

Na obrázku 7-15 je zachycen návar 2-2. Jsou zde patrné trhliny v okolí návaru, které procházejí dál do základního materiálu. Část těchto trhlin je pravděpodobně způsobena vysokým obsahem vad v odlitku základního materiálu. V místech, kde se základní materiál jevil jako bezvadný, se trhliny tvořily v menším množství a velikostech. Řez návarem 2-2 je zobrazen na obrázku 7-16.



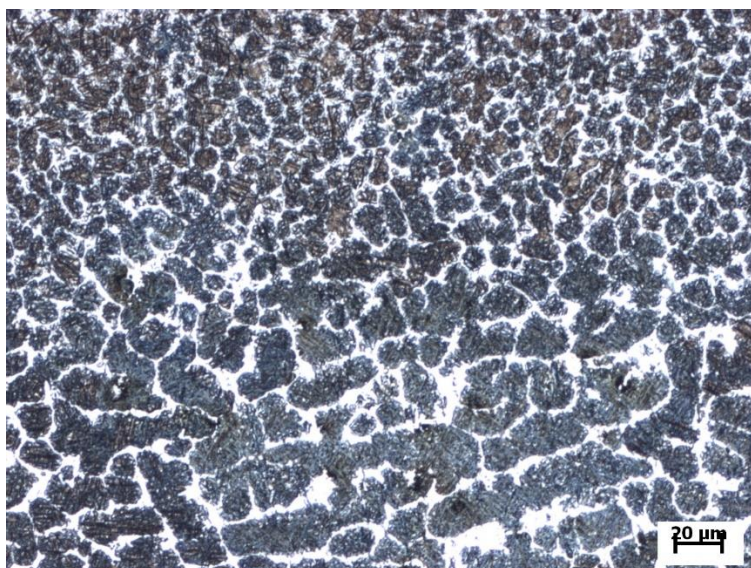
Obrázek 7-16 Řez návarem 2-2

Návar 2-2, jehož řez je zachycen na obrázku 7-16, byl vyhotoven ve třech vrstvách. Na levém okraji návaru je patrná malá trhlina vedoucí po rozhraní základního materiálu a první housenky. Zde, stejně jako u vzorků z LLG, došlo v litině s kuličkovým grafitem k porušení vlivem napětí vyvolaného smrštěním návaru při chladnutí. Snímky ze světelného mikroskopu zachycující strukturu návaru 2-2 jsou zachyceny na obrázcích 7-17 až 7-23.



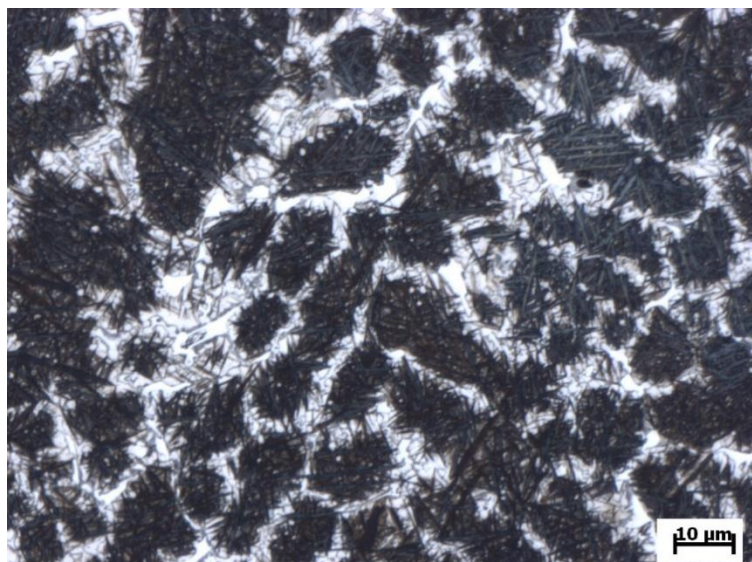
Obrázek 7-17 Návar 2-2/1. housenka, zvětšení 500x

Obrázek 7-17 zobrazuje 1. housenku návaru 2-2. Dle snímku je zde hrubozrnný martenzit (tmavá místa, jehlice martenzitu), po hranicích zrn se vyskytuje pravděpodobně ferit. Mikrovrstovost materiálu v místě 1. housenky dosahovala 750 HV1 (cca 62 HRC).



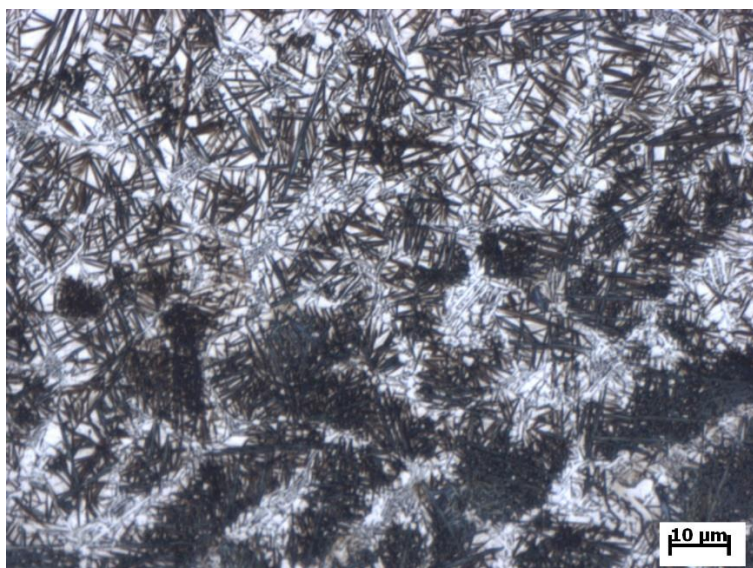
Obrázek 7-18 Přechod 1. a 2. housenky návaru 2-2, zvětšení 200x

Přechod mezi 1. a 2. housenkou (obrázek 7-18) zachycuje zjemnění zrna návarového kovu. V druhé housence, při porovnání s první, to pravděpodobně napomohlo k ještě vyšší mikrovrstovosti struktury, která je zachycena na obrázku 7-19.



Obrázek 7-19 Návar 2-2/2. housenka, zvětšení 500x

Na obrázku 7-19 jsou vidět hrubé martenzické jehlice v železo-chromové matrici. Ve struktuře lze rozeznat také oblasti zbytkového austenitu (čistě bílá zrna). Struktura je jemnější než u první housenky a mikrotvrdost se v této vrstvě pohybovala v intervalu od 730 do 860 HV1 (61-66 HRC).

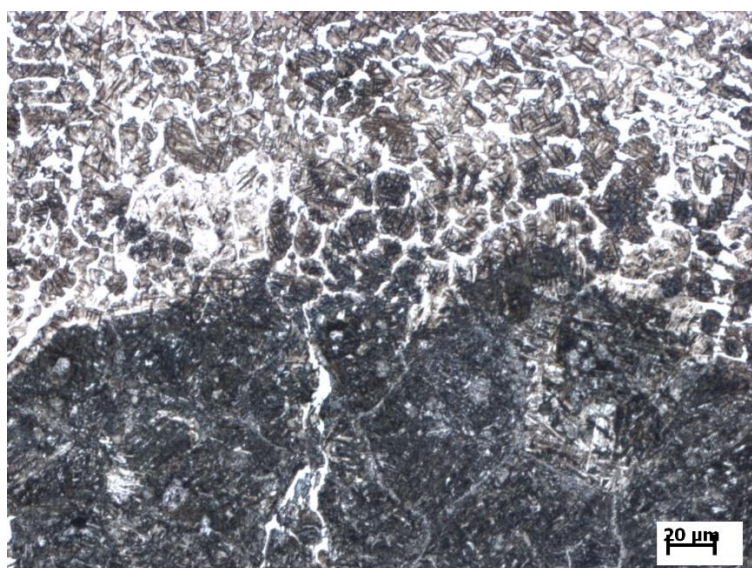


Obrázek 7-20 Návar 2-2/ přechod 2. a 3. housenky, zvětšení 500x



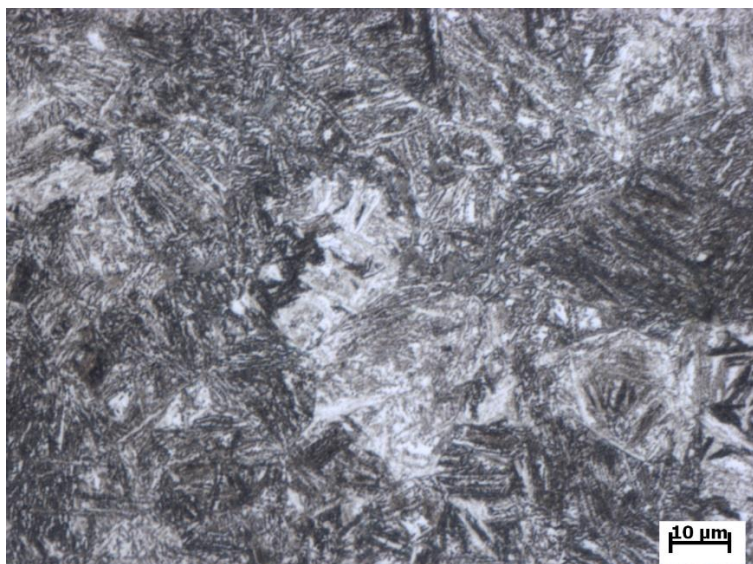
Obrázek 7-21 Návar 2-2/3. houseňka, zvětšení 500x

Na obrázku 7-20 je viditelný přechod 2. a 3. houseňky. Obrázek 7-21 ukazuje strukturu 3. houseňky návaru 2-2. Je zde vidět vysoký podíl hrubého martenzitu a jen malé množství zbytkového austenitu. Mikrotvrдость vzrůstá směrem k povrchu návaru a na 3. housence vzorku byla naměřena mikrotvrдость v intervalu od 860 do 1025 HV1 (66-69 HRC). Rozdíl mikrotvrđostí mezi vzorky bez TZ (N1-4) a tepelně zpracovanými (N2-4) je zobrazen na grafu 7-10.



Obrázek 7-22 Návar 2-2/přechod návaru do základního materiálu, zvětšení 200x

Hranice návaru a základního materiálu je dobře rozpoznatelná, viz obrázek 7-22. Jak je patrné z obrázku 7-23 a dalších fotek mikrostruktury (přílohy), v TOO je také podíl martenzitické struktury.

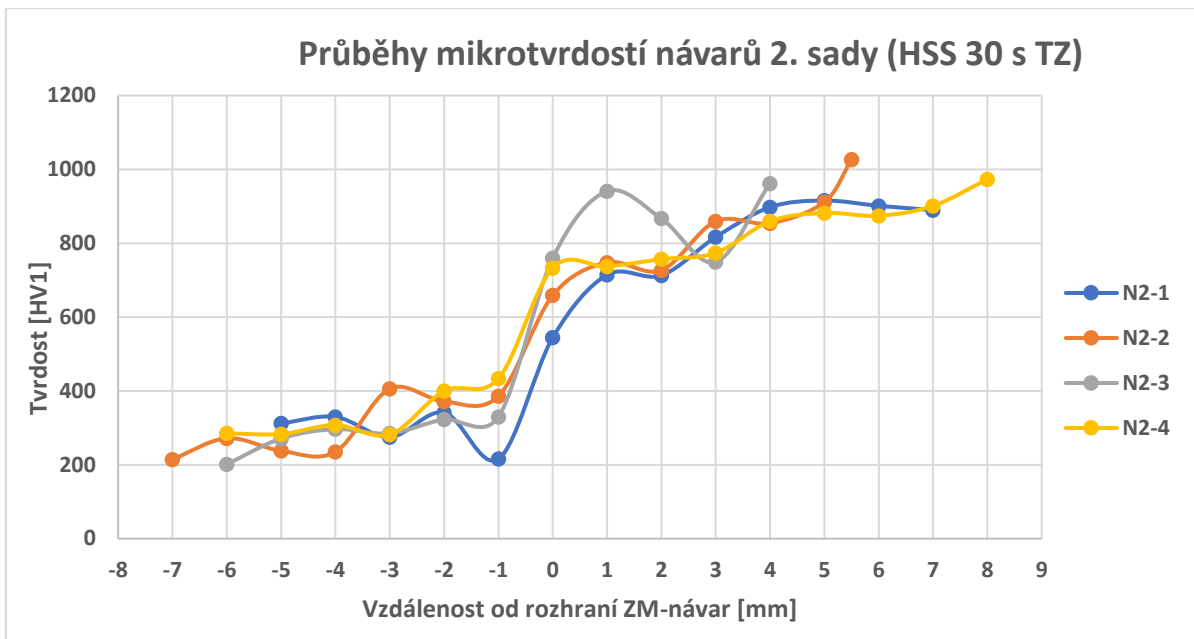


Obrázek 7-23 Tepelně ovlivněná oblast návaru 2-2, zvětšení 500x

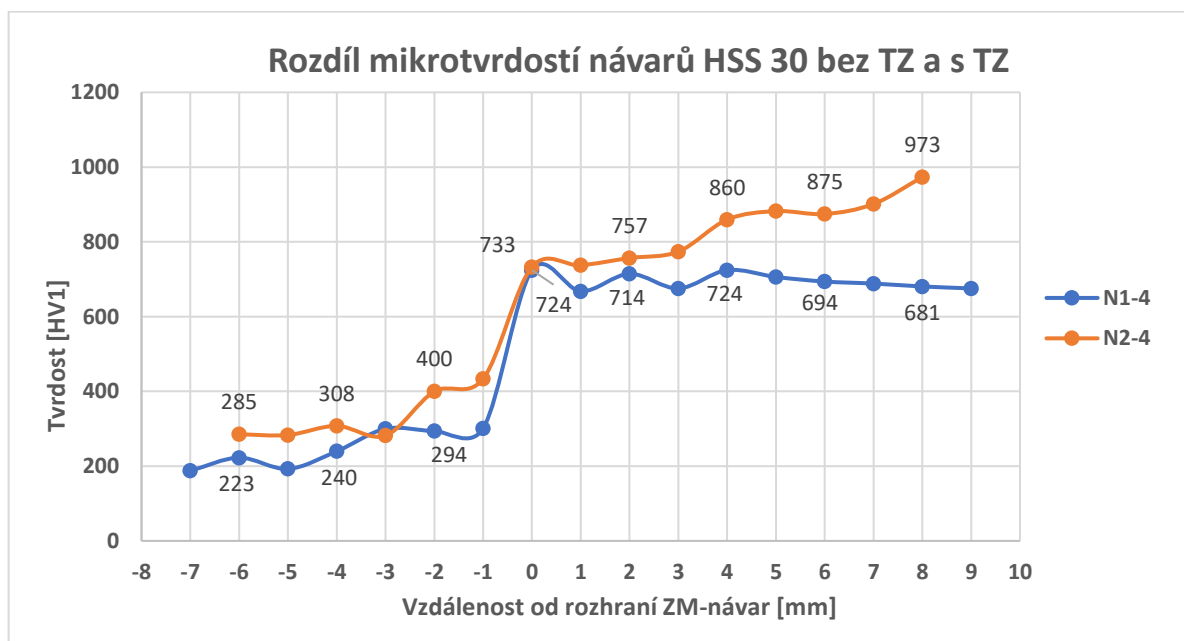


Obrázek 7-24 Návar 2-2/ základní materiál, zvětšení 500x

Na obrázku 7-24 je základní materiál, který je tepelně neovlivněný. Struktura je zde perlitická a mikrotvrdosti zde byly naměřeny v intervalu od 200 do 330 HV1. Jak je patrné z měření mikrotvrdostí (graf 7-7), hodnoty odporu proti vniknutí indentoru prudce stoupají přibližně od vzdálenosti 1 mm od přechodu základního materiálu a první návarové housenky (směrem do ZM). Hodnoty mikrotvrdosti třetích housenek návarů 2. sady byly vyšší než 870 HV1 (66 HRC).



Graf 7-7 Průběhy mikrotvrdostí návarů 2. sady



Graf 7-8 Rozdíl mikrotvrdosti tepelně zpracovaného vzorku (N2-4) a vzorku bez TZ (N1-4)

Graf 7-8 zachycuje rozdíl mikrotvrdostí vybraných vzorků z první a druhé sady návarů (bez TZ a tepelně zpracované zušlechťením). Tato dvojice vzorků byla navařována stejnými hodnotami proudu. Z průběhu měření mikrotvrdosti je patrný vliv tepelného zpracování na vzorek N2-4. Díky TZ návar vykázal návar 2-4 výrazně vyšší hodnoty mikrotvrdosti. Rozdíl mikrotvrdostí na povrchu návaru u této dvojice vzorků byl 298 HV1. Byla tedy naměřena vyšší mikrotvrdost přibližně o 35 % u popuštěného vzorku. Vyšší mikrotvrdost návarů se projevila u všech tepelně zpracovaných vzorků.

Jak je patrné z průběhů naměřených mikrotvrdotí 1. a 2. sady návarů (grafy 7-4 a 7-7), vzorky bez TZ vykazovaly klesající charakter hodnot mikrotvrdoti směrem k povrchu návaru, a naopak vzorky tepelně zpracované měly povrchovou mikrotvrdot vyšší než u rozhraní základní materiál/návar. U tepelně zpracovaných vzorků probíhalo kalení volně na vzduchu. Zvyšující se mikrotvrdot směrem k povrchu návaru lze přisoudit rychlosti ochlazování, která byla vyšší u povrchu návaru a směrem k základnímu materiálu se snižovala.

7.3. Navařování přídavným materiálem Fesit N-P

Přídavný materiál Fesit N-P (popsaný v kapitole 4.3.3) byl zvolen jako ekonomičtější alternativa za kobaltový návar Stellite 6, který má vyšší cenu a nižší deklarovanou mikrotvrdot. Navařování probíhalo stejným způsobem jako navařování rychlořezné oceli na litinu s lupínkovým grafitem, zde ale byla použita jako základní materiál nástrojová ocel 60CrMoV18-5, která se též používá při výrobě lisovacích nástrojů.

7.3.1. Návary materiálu Fesit N-P na nástrojové oceli 60CrMoV18-5

Třetí sada vzorků byla navařena materiálem Fesit N-P popsaným v kapitole 4.2.2. Navařovací parametry bylo původně v plánu zachovat stejné jako u rychlořezné oceli, ale v průběhu navařování byl zvýšen horní proud IH. Na první housence prvního návaru (3-1/1 v tabulce 7-4) byla zvýšena hodnota IH o 25 % ze 120 A na 160 A, protože nedocházelo k celkovému natavení přídavného materiálu. Na druhé housence (3-1/2) už bylo nutné zvýšení IH pouze o 15 % na 135 A. Druhý návar proběhl bez změn v programu zařízení. První housenka třetího návaru byla navařena 120 % původního proudu IH a druhá housenka třetího návaru 130 % IH. Zbytek programu byl beze změny. Podávání bylo nastaveno na hodnotu 9 ($18,1 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$).

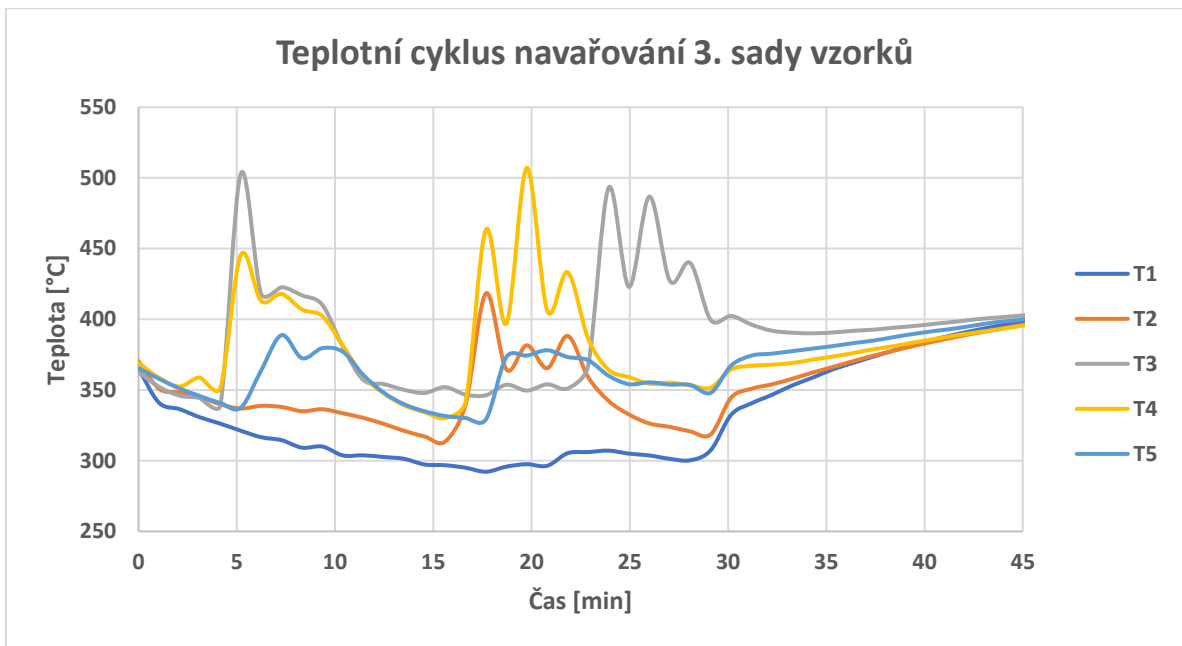
Tabulka 7-4 Parametry navařování 3. sady vzorků (l =délka, s =šířka, I_H =horní proud, I_L =spodní proud, f =frekvence pulzu)

Návar/ vrstva	l [mm]	s [mm]	I_H [A]	I_L [A]	f [Hz]	Podávání [min ⁻¹]	rychlost rozkyvu [mm.s ⁻¹]	rychlost kroku [mm.s ⁻¹]
3-1/1	90	16	160	65	6	9	9	4
3-1/2	90	10	135	40	6	9	9	4
3-1/3	90	4	120	40	6	9	9	4
3-2/1	90	16	150	75	6	9	9	4
3-2/2	90	10	150	50	6	9	9	4
3-2/3	90	4	150	50	6	9	9	4
3-3/1	90	16	150	55	6	9	9	4
3-3/2	90	10	130	40	6	9	9	4
3-3/3	90	4	100	40	6	9	9	4
3-4/1	90	16	150	85	6	9	9	4
3-4/2	90	10	150	55	6	9	9	4
3-4/3	90	4	150	55	6	9	9	4

Základní materiál byl v peci předehřátý na 400 °C. Po vyjmutí z pece a navaření termočlánků byla na povrchu teplota 365°C. Navaření proběhlo stejným způsobem jako předchozí sady. Z důvodu rozdílného umístění základního materiálu do navařovacího automatu došlo k posunutí celé sady návarů o 50 mm a tím byl jeden návar (3-2) mimo těsnou blízkost některého termočlánku, a naopak termočlánek T1 byl od návarů vzdálen o 50 mm více. Po navaření byl celý vzorek přemístěn do pece, kde byl ohříván na teplotu 400 °C a následně ochlazen pomalu v peci. Celý teplotní průběh je zobrazen v grafu 7-11. Na obrázku 7-25 jsou zachyceny návary třetí sady navařené přídavným materiálem Fesit N-P.



Obrázek 7-25 3. sada vzorků navařená přídavným materiálem Fesit N-P



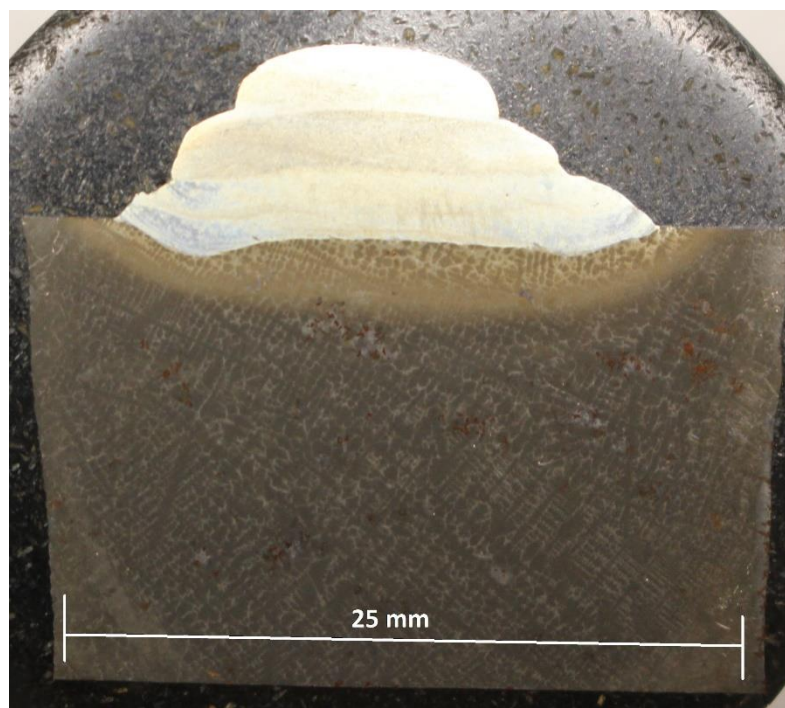
Graf 7-9 Teplotní cyklus navařování 3. sady vzorků

Na grafu 7-9 je patrné posunutí návarů. Mezi 10.-15. minutou byl navařován návar č. 2 a nejbližší termočlánek byl T4. Přesto lze předpokládat, že teplotní průběh by byl podobný jako u ostatních návarů, protože hodnoty proudu navařování nebyly proti ostatním návarům příliš rozdílné. Na obrázku 7-25 jsou zachyceny návary třetí sady navařené přidávným materiálem Fesit N-P.



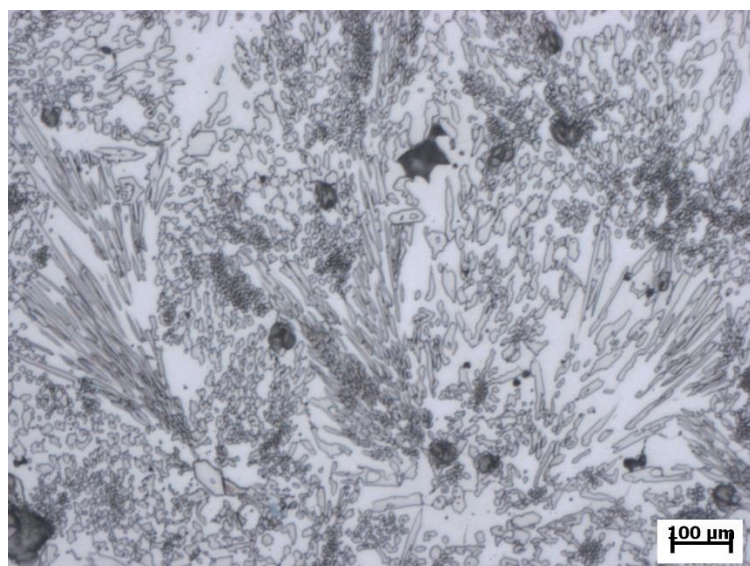
Obrázek 7-26 Návar č. 3-1 (Fesit N-P navařený na nástrojovou ocel)

Na obrázku 7-26 je vyobrazen návar 3-1. Návary 3. sady nevykazovaly trhliny ani ve svarovém kovu, ani v základním materiálu, což je dáno pravděpodobně typem základního materiálu, kterým je nástrojová ocel. Na obrázku 7-27 je makroskopický snímek metalografického výbrusu návaru 3-1.



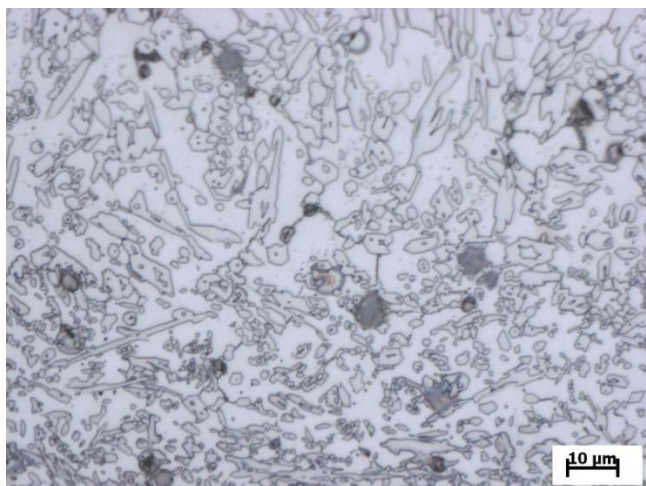
Obrázek 7-27 Metalografický vzorek návaru 3-1

Na obrázku 7-27 je, díky dendritickým útvarům, patrná litá struktura základního materiálu.

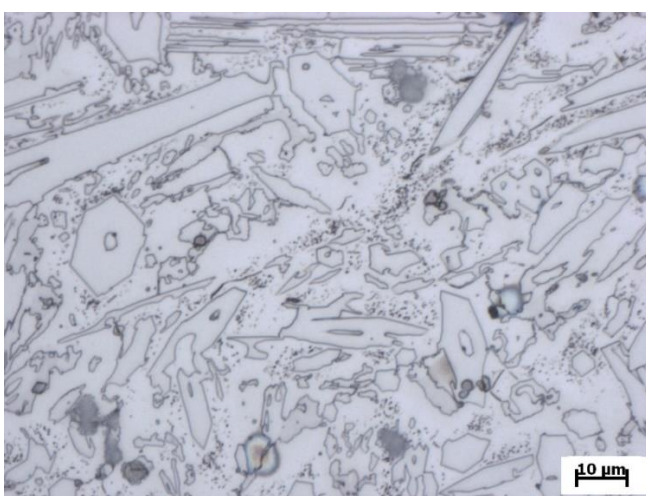


Obrázek 7-28 Mikrostruktura návaru 3-4/1. housenka, zvětšení 500x

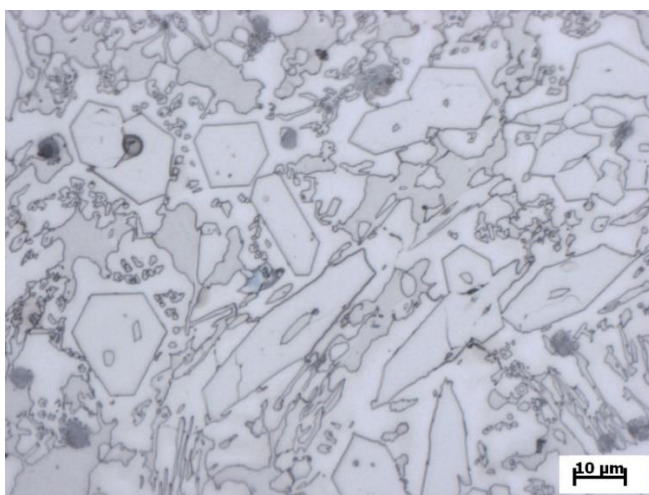
Na obrázku 7-28 je směsné fázové složení. Můžeme odhadnout, že vyskytující se směsné fáze ve feritické matrici (bílá fáze), jsou austenitické (podélné útvary a šedé oblasti) s podílem karbidů.



Obrázek 7-29 Mikrostruktura návaru 3-4/ přechod mezi 1. a 2. housenkou, zvětšení 500x

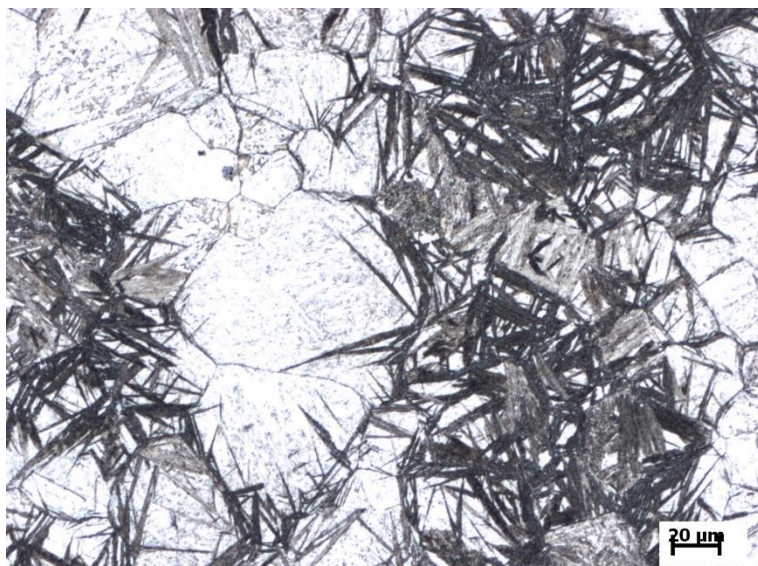


Obrázek 7-30 Mikrostruktura návaru 3-4/2. housenka, zvětšení 500x



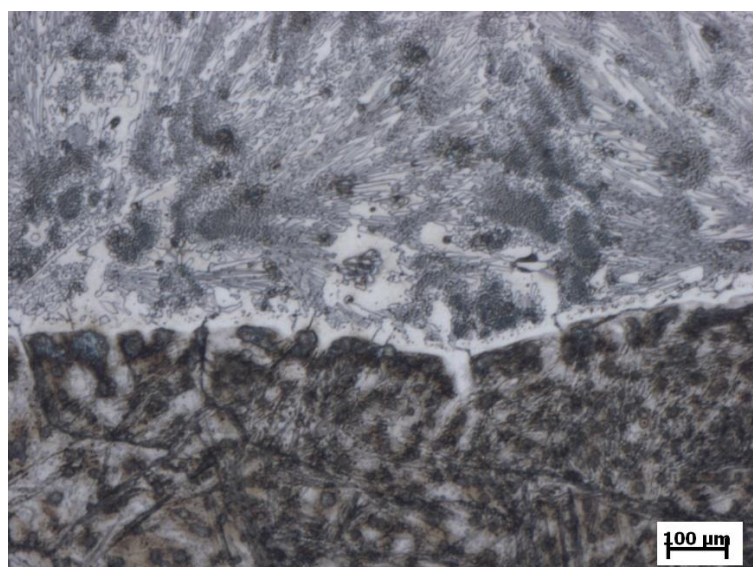
Obrázek 7-31 Návar 3-4/3. housenka, zvětšení 500x

V oblasti návarů (obrázky 7-29 – 7-31) je patrná feriticko-austenitická struktura s vyloučenými karbidy (pravděpodobně dominantní podíl karbidů chromu $M_{23}C_6$ díky vysokému podílu uhlíku v návarovém materiálu). Na rozhraní návaru a základního materiálu je patrný martenzit v austenitické matici (obrázek 7-32).



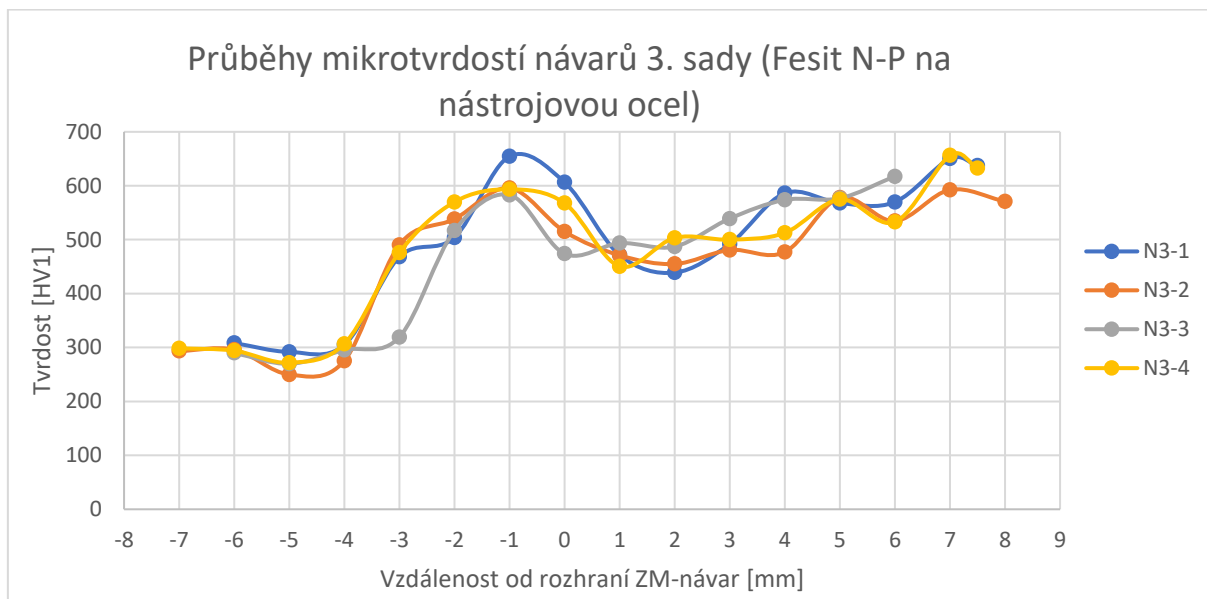
Obrázek 7-32 Návar 3-4/ přechod návaru a základního materiálu, zvětšení 200x

Na přechodu návaru do základního materiálu je možné odhadnout feritickou strukturu s vysokým podílem hrubého martenzitu. V této oblasti byla naměřena zvýšená mikrotvrдость (ca 450 HV1).



Obrázek 7-33 Návar 3-4/ hranice ZM a návaru, zvětšení 50x

V tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu (obrázek 7-33) je vysoký podíl martenzitu. Tomu odpovídá i mikrotvrдость vyšší než 450 HV1, viz graf 7-10.



Graf 7-10 Průběhy mikrotvrdoostí návarů 3. sady (Fesit N-P na nástrojovou ocel)

Graf 7-10 zobrazuje naměřené hodnoty mikrotvrdoostí v návarech přídavného materiálu Fesit N-P. Mikrotvrdoost se v návarech pohybovala v rozmezí 439 až 656 HV1 se stoupajícím trendem směrem k povrchu návaru. Hodnoty naměřené mikrotvrdoostí odpovídají udávané tvrdosti 51 HRC v materiálovém listu dodavatele přídavného materiálu. Ve třetí vrstvě návarů již nebyla naměřena mikrotvrdoost nižší, než udává materiálový list.

Od rozhraní směrem do základního materiálu se mikrotvrdoost prudce zvýšila až na hodnoty 593 až 654 HV1 a poté klesala až na ustálené hodnoty okolo 300 HV1 (-4 mm graf 7-10). Zvýšená mikrotvrdoost v TOO v porovnání s předešlými ZM (LLG a LKG) se vyskytovala až do -4 mm od rozhraní ZM/návar, a to pravděpodobně proto, že jde o základní materiál vysoce legovaný, jehož prokalitelnost je mnohem vyšší než u nelegovaných nebo nízkolegovaných materiálů (oblast austenitu se rozšiřuje směrem k delším časům).

Stoupající trend hodnot mikrotvrdoostí v návarech směrem k povrchu je zřejmě dán vneseným teplem každé následující vrstvy a vyžháním předchozího návaru.

8. Závěr

V teoretické části byly popsány hlavní materiály používané při výrobě nástrojů pro lisování za studena. Byly popsány jejich vlastnosti a struktura, výhody i nevýhody použití. Zmíněny byly také metody navařování, problematika navařování obecně a druhy přídavných materiálů, včetně jejich vlastností a oblastí vhodného použití. Pozornost byla věnována především materiálům, které byly použity v experimentální části práce.

V praktické části byly popsány postupy a metody použité při navařování a následném vyhodnocení vzorků návarů. Byly zde určeny parametry předehřevu základního materiálu a parametry tepelného zpracování návarů z rychlořezné oceli na litině s kuličkovým grafitem.

Bylo navařeno dvanáct návarů dvěma druhy přídavného materiálu na tři druhy základního materiálu (4 návary v každé sadě). Jednotlivé návary se lišily hodnotou svařovacího proudu. Průběh teplotního cyklu navařování a ochlazení, příp. tepelného zpracování, byl sledován několika termočlánky. Z hotových návarů byly odebrány vzorky pro metalografické výbrusy a následně byla hodnocena mikrostruktura a mikrotvrdość v závislosti na vzdálenosti od hranice ztavení. Návary byly provedeny na tři druhy základních materiálů (LLG, LKG, nástrojová ocel) dvěma druhy přídavných materiálů (HSS 30, Fesit N-P).

První sada návarů zhotovená práškem rychlořezné oceli na základní materiál z litiny s lupínkovým grafitem vykazovala vysokou mikrotvrdość na povrchu návaru, která se pohybovala v rozmezí 637 až 688 HV1 (cca. 57-60 HRC). Vlivem minimální tažnosti litiny s lupínkovým grafitem a smrštění návaru z rychlořezné oceli během chladnutí docházelo k tvorbě trhlin po obvodu návaru, které vedly po hranici mezi návarem a základním materiálem. Tyto trhliny byly dlouhé maximálně 2 mm a objevovaly se v celém spektru hodnot navařovacího proudu. Struktura v povrchových vrstvách byla převážně martenzitická s podílem jemných karbidů a zbytkového austenitu.

Druhá sada návarů navařovaná práškem z rychlořezné oceli, ale na základní materiál z litiny s kuličkovým grafitem, byla dále tepelně zpracována zušlechtěním. Navařené vzorky byly po navaření ponechány na pokojové teplotě. Teplota byla sledována po celý průběh chladnutí, aby bylo zajištěno protnutí křivky Ms. Následně byly vzorky tepelně zpracovány vysokoteplotním popouštění. Vlivem zušlechtění došlo k výraznému zvýšení hodnot mikrotvrdości, která měla stoupající charakter směrem k povrchu návaru. Mikrotvrdość třetí vrstvy se u vzorků druhé sady pohybovala v rozmezí 874-1026 HV1 (66-69 HRC). Struktura obsahovala vysoký podíl hrubého martenzitu s malým množstvím zbytkového austenitu.

Třetí sada návarů byla navařována práškem přídavného materiálu Fesit N-P, což je ekonomicky přijatelnější náhrada materiálu typu Stellite 6. Základním materiálem byla nástrojová ocel. Návary nevykazovaly povrchové vady a jejich mikrotvrdość se ve třetí vrstvě pohybovala ve stejných hodnotách, jaké udává dodavatel v materiálovém listu. Mikrotvrdość naměřená ve třetí housence návarů se pohybovala mezi 532 a 656 HV1 (51-58 HRC). Naměřená

mikrotvrdost měla stoupající charakter směrem k povrchu návaru. Mikrotvrdost prudce vzrostla i v tepelně ovlivněné oblasti ZM, kde se pohybovala v rozmezí 474 – 654 HV1 (47 – 58 HRC). Struktura návarů byla směsí feritu a austenitu s podílem karbidů chromu.

Pro navařování rychlořezné oceli na základní materiál z LLG a LKG bez niklové mezivrstvy lze doporučit pro další zkoumání změnu směru kladení návarových housenek. Například použít tzv. šňůrkování – tedy nanášení podélných tenkých housenek pro minimalizaci vneseného tepla. Další snižování hodnot navařovacího proudu nelze doporučit, protože při navařování pak nedochází k úplnému natavení prášku přídavného materiálu.

Navařování přídavného materiálu Fesit N-P na LLG a LKG nelze přímo doporučit vzhledem k vysokému obsahu chromu (35 hm. %) v přídavném materiálu a hrozí zde praskání bezprostředně po navaření. Pro navařování forem z nástrojových ocelí se ale tento přídavný materiál jeví jako vhodný a lze ho tedy doporučit k obnovám tvaru i pro prvovýrobu. Obrobení je zde možné speciálními nástroji, nicméně doporučeno je broušení.

9. Bibliografie

- [1] BOYER, Howard E. a Timothy L. GALL. Metals handbook. Desk ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1985. ISBN 0-87170-188-x.
- [2] SKOČOVSKÝ, Petr a Tomáš PODRÁBSKÝ. Grafické liatiny. 1. Žilina: Žilinská univerzita, 2005. ISBN 8080703906.
- [3] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. [Nauka o materiálu. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04212-0.
- [4] VOJTĚCH, Dalibor. Kovové materiály. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [5] SCHWEITZER, Philip A. Metallic materials: physical, mechanical, and corrosion properties. New York: M. Dekker, 2003. Corrosion technology (New York, N.Y.), 19. ISBN 0-8247-0878-4.
- [6] CÁRCEL-CARRASCO, Francisco-Javier, Manuel PASCUAL-GUILLAMÓN, Fidel SALAS-VICENTE a Vicente DONDERIS-QUILES. Influence of Heat Treatment in the Microstructure of a Joint of Nodular Graphite Cast Iron when Using the Tungsten Inert Gas Welding Process with Perlitic Grey Cast Iron Rods as Filler Material. Metals [online]. 2019, 9(1) [cit. 2019-07-04]. DOI: 10.3390/met9010048. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/1/48>
- [7] SINGH, Ramesh. Applied welding engineering: processes, codes, and standards. First Edition. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 978-0-12-391916-8.
- [8] COBB, Harold M. Dictionary of metals. Materials Park, Ohio: ASM International, 2012. ISBN 978-1-61503-978-4.
- [9] ASKARI-PAYKANI, Mohsen, Mehrdad SHAYAN a Morteza SHAMANIAN. Weldability of Ferritic Ductile Cast Iron Using Full Factorial Design of Experiment. Journal of Iron and Steel Research International [online]. 2014, 21(2), 252-263 [cit. 2019-03-26]. DOI: 10.1016/S1006-706X(14)60039-X. ISSN 1006-706X. Dostupné z: [http://link.springer.com/10.1016/S1006-706X\(14\)60039-X](http://link.springer.com/10.1016/S1006-706X(14)60039-X)
- [10] W. NR. 1.2358 [online]. 1. Bučovice: JKZ Bučovice a.s., b.r. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <http://www.jkz.cz/cs/produkty/nastrojove-oceli/na-vyrobu-forem/w-nr-12358/>
- [11] 1.2358 [online]. 1. Kladno: Bolzano, b.r. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/materialove_listy/1.2358.pdf
- [12] 60CrMoV18-5: 1.2358 [online]. 1. Singapur: Doerrenberg Special Steels Pte. Ltd., b.r. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: http://www.doerrenberg.com.sg/fileadmin/template/doerrenberg/stahl/DatenblaetterEng/1.2358_en.pdf

- [13] Nástrojová ocel 1.2358: informativní list [online]. 1. Kladno: Bolzano, b.r. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/NO/1.2358_cesky.pdf
- [14] LÖBL, Karel. Navařování. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. Knižnice strojírenské výroby.
- [15] Opravy a údržba: Svařovací materiály pro opravy a údržbu. 6. akt. vyd. Vamberk: ESAB Vamberk, 2011.
- [16] Navařování plazmatem - ochranné povlaky ve výrobě i výzkumu. MM Průmyslové spektrum. 2015, 18(1), 86.
- [17] WEMAN, Klas. Welding processes handbook. 2nd ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2012. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-0-85709-510-7.
- [18] VEINTHAL, Renno, Fjodor SERGEJEV, Arkadi ZIKIN, Riho TARBE a Johann HORNUNG. Abrasive impact wear and surface fatigue wear behaviour of Fe–Cr–C PTA overlays. Wear. 2013, 301(1–2), 102-108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.077>. ISSN 00431648. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164813000999>
- [19] CAO, H.T., X.P. DONG, Z. PAN, X.W. WU, Q.W. HUANG a Y.T. PEI. Surface alloying of high-vanadium high-speed steel on ductile iron using plasma transferred arc technique: Microstructure and wear properties. Materials & Design [online]. 2016, 100, 223-234 [cit. 2019-06-29]. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.114. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127516303987>
- [20] MACEK, Karel. Kovové materiály. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03513-1.
- [21] Stellite 6 alloy: Technical data. Exocor [online]. Canada: Exocor, 2019 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://exocor.com/downloads/product-datasheets/Stellite-6-Datasheet.pdf>
- [22] FREMUNT, Přemysl, Jiří KREJČÍK a Tomáš PODRÁBSKÝ. Nástrojové oceli. 1. Brno: Dům techniky [Brno], 1994.
- [23] ROHAN, Pavel, Tomáš KRAMÁR a Jaroslav PETR. Vícevrstvé navařování rychlořezných ocelí. 1. Praha: Česká tribologická společnost, 2015.
- [24] MACHEK, Václav. Kovové materiály 3: speciální kovové materiály. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05685-1.
- [25] KŘÍŽ, Antonín. Vady tepelného zpracování rychlořezných ocelí. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, b.r.
- [26] Uddeholm Vanadis 23 SuperClean. Uddeholm: a vestalpine company [online]. 2019 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.uddeholm.com/czech/cs/products/uddeholm-vanadis-23-superclean/>

- [27] Uddeholm Vanadis 30 SuperClean. Uddeholm: a vestalpine company [online]. 2019 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.uddeholm.com/czech/cs/products/uddeholm-vanadis-30-superclean/>
- [28] Materiálový list: Fesit N-P. 1. Česká třebová: KSK, b.r.
- [29] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. Materiály a jejich svařitelnost. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [30] CÁRCEL-CORRASCO, J, M PASCUAL, M PÉREZ-PUIG a F SEGOVIA. Comparative study of TIG and SMAW root welding passes on ductile iron cast weldability. Metalurgija. Chorvatsko: Croatian Metallurgical Society, 2017, 56(1-2), 3. ISSN 0543-5846.
- [31] PLAZMOVÉ NAVAŘOVACÍ AUTOMATY: PPC 250 R6. KSK: Navařovací a svařovací stroje, kooperace, plazmové automaty [online]. Česká Třebová, b.r. [cit. 2019-06-30]. Dostupné z: http://www.kskct.cz/?page_id=2506&lang=cs
- [32] MĚŘICÍ ÚSTŘEDNA ALMEMO 5690-2M [online]. 1. Praha: Ahlborn, 2009 [cit. 2019-06-30]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz//out/pictures/wysiwigpro/ALMEMO%205690-2M-bc.pdf>
- [33] Univerzální měřicí ústředna - datalogger - AHLBORN ALMEMO 5690-2M. Ahlborn: Přesná německá měřicí technika [online]. Praha: Ahlborn, b.r. [cit. 2019-06-30]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/pristroje/merici-ustredny/univerzalni-merici-ustredna-datalogger-ahlborn-almemo-5690-2m-vicekanalova.html>
- [34] DHC 6510R INVERTOROVÝ OHŘEV. Dawell: Industrial heating tools [online]. Třebíč: Dawell, b.r. [cit. 2019-06-30]. Dostupné z: www.dawell.cz/produkt/dhc-6510r-invertorovy-ohrev/
- [35] IndentaMet 1100 Series: micro, semi-macro and macro vickers indentation hardness testers [online]. 1. Düsseldorf: Duehler analyst section, 2004 [cit. 2019-06-30]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.co.nz/Uploads/file/Scientific/Laboratory-Equipment-Furniture/Material-Characterisation-Testing/Materials-Preparation-Analysis/Buehler/pdf/IndentaMet-1100-Series-Indentation-Hardness-Testers.pdf>
- [36] Axio Observer A1M/D1M/Z1M: Inverted Microscopes. Allied: High tech products. Inc. [online]. Kalifornie: Allied, b.r. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <http://www.alliedhightech.com/Equipment/axioobserver-a1m-d1m-z1m>
- [37] KOLEKTIV, . Materiály a jejich chování při svařování: Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT). 1. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, 2016.
- [38] OTÁHAL, Vlastislav. Tvárná litina: Litina s kuličkovým grafitem [online]. 2 rozšířené vydání. Brno: Technicko-ekonomické poradenství, b.r. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: http://otahalconsult.cz/soucasne-produkty/litiny/tvarna_litina_kulickovy_grafit/

- [39] JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. 3. uprav. a dopl. vyd. Praha: SNTL, 1977.

10. Přílohy

10.1. Fotografie metalografických vzorků



Příloha 1 Vzorek 1-1



Příloha 2 Vzorek 1-2



Příloha 3 Vzorek 1-3

Přílohy



Příloha 4 Vzorek 1-4



Příloha 5 Vzorek 2-1



Příloha 6 Vzorek 2-2

Přílohy



Příloha 7 Vzorek 2-3



Příloha 8 Vzorek 2-4

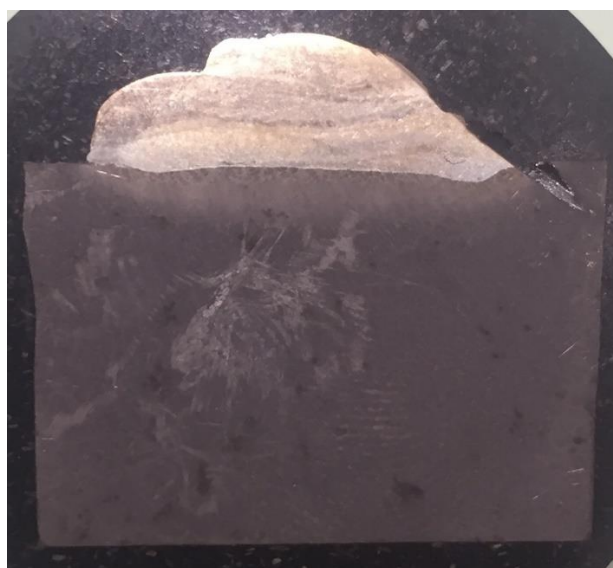


Příloha 9 Vzorek 3-1

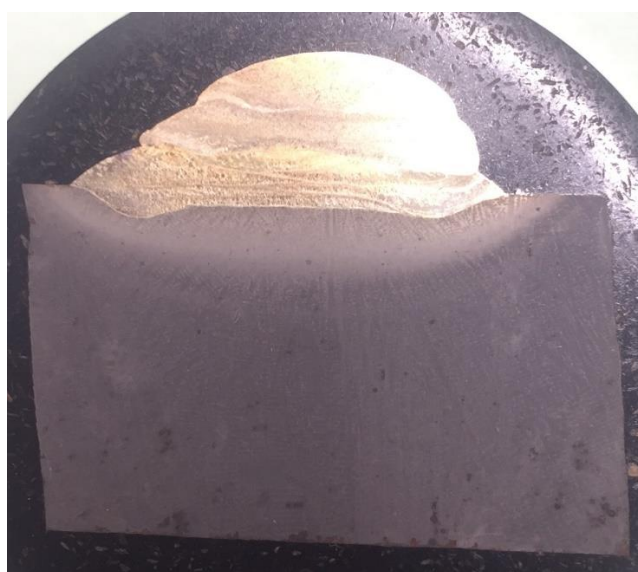
Přílohy



Příloha 10 Vzorek 3-2



Příloha 11 Vzorek 3-3



Příloha 12 Vzorek 3-4

Přílohy

10.2. Tabulka naměřených hodnot mikrotvrdostí jednotlivých vzorků návarů

Vzdálenost/ vzorek	Tvrdost HV1 všech navářených vzorků											
	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4	3-1	3-2	3-3	3-4
9	637,1			675,4								
8	652,8			680,6				973,3		570,8		
7,5									637,1			632,4
7	643,1			688,4		889,9		901,3	650,3	592,4		656,4
6	645,5	652,8		693,8		901,4		874,5	569,8	534,5	617,5	532,7
5,5					1026,7							
5	643,1	643,1		706	911,7	915,8		882,1	567,8	577,8	576,8	574,8
4	691,1	643,1		724,3	853,9	897,7	962,2	859,5	586,1	477	573,8	512,5
3	678	655,2		675,4	859,5	816,7	749,2	773,9	491,9	480,9	539,1	500
2	628,9	675,4	688,4	714,4	727,1	713	866,9	756,8	438,9	454,9	487,1	503,3
1,5												
1	667,7	697,8		667,7	747,7	714,4	940,7	737,3	471,7	471	493,5	450,6
0,5												
0	429,6	483,2	488,7	724,3	658,9	544,7	759,9	732,9	606,4	515,1	474	567,8
-1	407,6	326,6	567,8	300,9	386,1	215,8	329,7	433,6	654,4	595,6	583	593,4
-2	245,6	269,5	353,3	294,1	371,5	341,4	322,7	399,9	504,1	538,2	516,8	569,8
-3	265	231,5	213,5	299,8	405,8	275,1	285,1	281,9	468	490,3	319,4	476,2
-4	198,3	214,2	217,4	239,7	235,2	329,7	296,4	307,6	304,8	275,5	295,3	306,8
-5	164	331,9	244,7	192,7	237,8	312	271,1	283,3	291,9	249,9	269,8	271,8
-6	294,9	278,5		222,5	271,8		201,6	285,1	308,3	296	289,8	294,1
-7	256,4	240		187,7	214,6					293,4		298,6
-8	213,5	229,4										
-9	281,9	187,9										

Příloha 13 Tabulka mikrotvrdostí naměřených na vzorcích návarů

11. Seznam obrázků

Obrázek 3-1 Mikrostruktura litiny s lupínkovým grafitem s perlitickou maticí (světelný mikroskop. 250x) [4].....	11
Obrázek 3-2 Řez ternární soustavou Fe-C-Si pro obsah 2,5 % Si a schéma změn struktury při krystalizaci podeutektické litiny s lupínkovým grafitem [2].....	11
Obrázek 3-3 Mikrostruktura litiny s kuličkovým grafitem s feritickou maticí (světelný mikroskop, 70x) [4].....	12
Obrázek 4-1 Schéma plazmového svařování [17]	15
Obrázek 4-2 Zapojení přeneseného a nepřeneseného plazmového oblouku [17].....	16
Obrázek 6-1 Základní materiál o hlavních rozměrech 300x150x100 mm (D x Š x V).....	23
Obrázek 6-2 Schéma návarů, termočlánků a jednotlivých vrstev návarů (rozměry v mm).....	24
Obrázek 6-3 Plazmový navařovací automat PPC 250 R6 [31]	25
Obrázek 6-4 ALMEMO 5690- 2M [33]	26
Obrázek 6-5 Zdroj pro odporový ohřev DHC6510 [34]	27
Obrázek 6-6 Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104 [35]	28
Obrázek 6-7 Zeiss Axio Observer D1M [36].....	29
Obrázek 6-8 Pseudobinární diagram Fe-C-Si (2 % hm. % Si) [38].....	30
Obrázek 7-1 Testovací vzorek pro navařování rychlořezné oceli, směr navařování (pořadí v tabulce 6-1) zprava doleva.....	32
Obrázek 7-2 První sada návarů po navaření.....	35
Obrázek 7-3 Očištěné návary z první sady.....	35
Obrázek 7-4 Návar z první sady vzorků (1-4), přídatný materiál HSS 30. Červená elipsa označuje místo trhliny.....	37
Obrázek 7-5 Řez návarem 1-1 (HSS 30 na LLG)	37
Obrázek 7-6 Návar 1-1/1. housenka, zvětšení 500x.....	38
Obrázek 7-7 Návar 1-1/2. housenka, zvětšení 500x.....	38
Obrázek 7-8 Návar 1-1/3. housenka, zvětšení 500x.....	39
Obrázek 7-9 Návar 1-1/ přechod 1. a 2. housenky, zvětšení 500x.....	39
Obrázek 7-10 Návar 1-1/ přechod mezi návarem a základním materiálem, zvětšení 50x	40
Obrázek 7-11 Návar 1-1/ trhlina na boku návazu, zvětšení 25x.....	40
Obrázek 7-12 Návary HSS 30 na LKG	43
Obrázek 7-13 Zdroj pro odporový ohřev DHC6510 při tepelném zpracování 2. sady návarů HSS 30	45
Obrázek 7-14 Vady v základním materiálu objevené při řezání vzorků pro metalografii	45
Obrázek 7-15 Návar č. 2-2	46
Obrázek 7-16 Řez návarem 2-2	46
Obrázek 7-17 Návar 2-2/1. housenka, zvětšení 500x.....	47
Obrázek 7-18 Přechod 1. a 2. housenky návazu 2-2, zvětšení 200x.....	47
Obrázek 7-19 Návar 2-2/2. housenka, zvětšení 500x.....	48
Obrázek 7-20 Návar 2-2/ přechod 2. a 3. housenky, zvětšení 500x.....	48
Obrázek 7-21 Návar 2-2/3. housenka, zvětšení 500x.....	49
Obrázek 7-22 Návar 2-2/přechod návazu do základního materiálu, zvětšení 200x.....	49

Obrázek 7-23 Tepelně ovlivněná oblast návaru 2-2, zvětšení 500x.....	50
Obrázek 7-24 Návar 2-2/ základní materiál, zvětšení 500x.....	50
Obrázek 7-25 3. sada vzorků navařená přídavným materiálem Fesit N-P	53
Obrázek 7-26 Návar č. 3-1 (Fesit N-P navařený na nástrojovou ocel).....	54
Obrázek 7-27 Metalografický vzorek návaru 3-1	55
Obrázek 7-28 Mikrostruktura návaru 3-4/1. housenka, zvětšení 500x.....	55
Obrázek 7-29 Mikrostruktura návaru 3-4/ přechod mezi 1. a 2. housenkou, zvětšení 500x...	56
Obrázek 7-30 Mikrostruktura návaru 3-4/2. housenka, zvětšení 500x.....	56
Obrázek 7-31 Návar 3-4/3. housenka, zvětšení 500x.....	56
Obrázek 7-32 Návar 3-4/ přechod návaru a základního materiálu, zvětšení 200x	57
Obrázek 7-33 Návar 3-4/ hranice ZM a návaru, zvětšení 50x	57

12. Seznam tabulek

Tabulka 3-1 Typické chemické složení litiny s lupínkovým grafitem GJL	12
Tabulka 3-2 Typické chemické složení litiny s kuličkovým grafitem [4]	13
Tabulka 3-3 Chemické složení oceli 1.2358 dle materiálového listu [10]	13
Tabulka 4-1 Chemické složení oceli HSS 23 [26]	18
Tabulka 4-2 Fyzikální vlastnosti materiálu HSS 23 [26]	18
Tabulka 4-3 Koeficient teplotní roztažnosti materiálu HSS 23 [26]	19
Tabulka 4-4 Chemické složení materiálu HSS 30 [27]	19
Tabulka 4-5 Fyzikální vlastnosti materiálu HSS 30 [27]	20
Tabulka 4-6 Koeficient teplotní roztažnosti materiálu HSS 30 [27]	20
Tabulka 4-7 Chemické složení materiálu Fesit N-P dle materiálového listu výrobce [28]	21
Tabulka 6-1 Přepočtení hodnoty podávání na hmotnost za časovou jednotku	31
Tabulka 7-1 Tabulka navařovacích parametrů testovacích návarů (l=délka, s=šířka, IH=horní proud, TH=délka IH, IL=spodní proud, TL=délka IL, 1/TH+TL= frekvence pulzu – zde 3Hz)	33
Tabulka 7-2 Parametry navařování 1. sady vzorků (l=délka, s=šířka, IH=horní proud, IL=spodní proud, f=frekvence pulzu)	34
Tabulka 7-3 Parametry navařování 2. sady vzorků (l=délka, s=šířka, IH=horní proud, IL=spodní proud, f=frekvence pulzu)	42
Tabulka 7-4 Parametry navařování 3. sady vzorků (l=délka, s=šířka, IH=horní proud, IL=spodní proud, f=frekvence pulzu)	53

13. Seznam grafů

Graf 3-1 Závislost tvrdosti na popouštěcí teplotě nástrojové oceli 1.2358 (Kaleno z 960 °C do oleje) [13].....	14
Graf 4-1 - Pevnost v tlaku materiálu HSS 23 v závislosti na tvrdosti [26]	19
Graf 6-1 Měření rychlosti podávání přídavného materiálu.....	31

Graf 7-1 Teplotní cyklus testovacího vzorku pro přídatný materiál HSS 30 (T1 znázorňuje termočlánek umístěný v blízkosti návaru, T2 zobrazuje termočlánek z boku základního materiálu)	33
Graf 7-2 Navaření 1.-3. návaru – (1) poškození termočlátku T2, (2) průběh teplot navaření první a druhé housenky prvního návaru, (3) průběh teplot 3. návaru	36
Graf 7-3 Navaření 4. návaru – (1) poškození termočlátku T4.....	36
Graf 7-4 Průběh mikrotvrdomosti návarů první série vzorků	41
Graf 7-5 Detail navařování 2. sady návarů HSS 30	44
Graf 7-6 Detail tepelného zpracování 2. sady návarů HSS 30	44
Graf 7-7 Průběhy mikrotvrdomostí návarů 2. sady	51
Graf 7-8 Rozdíl mikrotvrdomosti tepelně zpracovaného vzorku (N2-4) a vzorku bez TZ (N1-4) .	51
Graf 7-9 Teplotní cyklus navařování 3. sady vzorků	54
Graf 7-10 Průběhy mikrotvrdomostí návarů 3. sady (Fesit N-P na nástrojovou ocel)	58

14. Seznam rovnic

Rovnice 1 Uhlíkový ekvivalent CET podle ČSN EN 1011-2	22
Rovnice 2 Výpočet teploty přehřevu podle Seferiána [37]	30

15. Seznam příloh

Příloha 1 Vzorek 1-1.....	65
Příloha 2 Vzorek 1-2.....	65
Příloha 3 Vzorek 1-3.....	65
Příloha 4 Vzorek 1-4.....	66
Příloha 5 Vzorek 2-1.....	66
Příloha 6 Vzorek 2-2.....	66
Příloha 7 Vzorek 2-3.....	67
Příloha 8 Vzorek 2-4.....	67
Příloha 9 Vzorek 3-1.....	67
Příloha 10 Vzorek 3-2.....	68
Příloha 11 Vzorek 3-3.....	68
Příloha 12 Vzorek 3-4.....	68
Příloha 13 Tabulka mikrotvrdomostí naměřených na vzorcích návarů	69