



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

ANALÝZA VAD V OCELOVÉM INGOTU

CASTING DEFECT ANALYSIS IN STEEL INGOT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Roman Krupica

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vít Jan, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Roman Krupica**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vít Jan, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza vad v ocelovém ingotu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte stručnou rešerši vad přítomných v ocelových ingotech.

Analyzujte vady přítomné v osově části ocelového ingotu. Využijte standardní metalografické techniky.

Cíle bakalářské práce:

Stručný rozbor problematiky ingotového odlévání.

Metalografická analýza dodaných vzorků, charakterizace zjištěných vad metalograficky případně i chemickou analýzou.

Seznam doporučené literatury:

ZHANG, Lifeng and Brian THOMAS. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting. Metallurgical and Materials Transactions B [online]. 2006, 37(5), 733-761 [cit. 2019-12-19].

DOI: 10.1007/s11663-006-0057-0. ISSN 1073-5615. Dostupné z:

<http://link.springer.com/10.1007/s11663-006-0057-0>

WU, Menghuai, Laszlo KÖNÖZSY, Andreas LUDWIG, Wolfgang SCHÜTZENHÖFER and Robert TANZER. On the Formation of Macroseggregations in Steel Ingot Castings. Steel research international [online]. 2008, 79 (8), 637-644 [cit. 2019-12-19]. DOI: 10.1002/srin.200806177. ISSN 16113683. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/srin.200806177>

CALLISTER, William et al. Materials science and engineering: an introduction. New York: John Wiley & sons, 2007.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou odlévání ingotů, faktory ovlivňujícími jejich kvalitu a vadami přítomnými v nich. První část práce definuje výrobu oceli, vady oceli, jejich rozdělení a příčiny. Druhá část práce je potom orientována na laboratorní analýzu vzorků a charakterizaci vad metalograficky.

Klíčová slova

odlévání oceli, vady ingotů, metalografická charakterizace vad

ABSTRACT

This thesis deals with the problematics of ingot casting, factors affecting the quality of ingots and defects occurring in them. The first part defines steel casting, defects of steel, their classifications and causes. The other part of the thesis focuses on the laboratory analysis of ingot samples and metallographic characterization of defects.

Key words

steel casting, ingot defects, metallographic characterization of defects

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRUPICA, Roman. *Analýza vad v ocelovém ingotu*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125737>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Vít Jan.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma **Analýza vad v ocelovém ingotu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 26. června 2020

Datum

Roman Krupica

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Vítu Janovi, Ph.D. za pomoc a vedení při mé bakalářské práci.

OBSAH

ÚVOD	11
1 Odlévání oceli	12
1.1 Odlévání oceli do kokil.....	12
1.1.1 Odlévání shora	12
1.1.2 Odlévání spodem	13
1.2 Kontinuální lití	13
1.2.1 Princip kontinuálního lití	14
2 Kvalita ingotu a faktory, které ji ovlivňují.....	16
2.1 Diagram Fe-Fe ₃ C	16
2.1.1 Struktura oceli	17
2.1.2 Vliv legur na vlastnosti oceli	17
2.1.3 Metalurgie oceli	18
2.1.4 Chemická čistota	19
2.2 Vlivy působící na strukturu oceli	20
2.2.1 Tuhnutí a licí kůra.....	20
2.2.2 Krystalizace a nukleace	21
2.2.3 Dendritická struktura	22
2.2.4 Dendritický růst	23
3 Vady ingotů	24
3.1 Vnější vady	25
3.1.1 Trhliny	25
3.1.2 Šupiny	26
3.1.3 Zavaleniny.....	27
3.1.4 Bubliny	27
3.2 Vnitřní vady	29
3.2.1 Chemická nehomogenita a segregace	29
3.2.2 Vycezeniny.....	30
3.2.3 Staženiny	30
3.2.4 Řediny	31
3.2.5 Vložky	31
3.2.6 Vměstky	32
4 Laboratorní část	33
4.1 Použitý materiál a jeho vlastnosti	33
4.2 Metalografická analýza.....	34
4.2.1 Odebrání vzorku.....	35
4.2.2 Preparace vzorku	35
4.2.3 Broušení vzorku	36
4.2.4 Leštění	38
4.2.5 Hodnocení vzorků v neleptaném stavu	39
4.2.6 Leptání	39

4.3	Teoretická úvaha možných očekávání u jednotlivých vzorků	41
4.3.1	Litý stav	41
4.3.2	Kovaný stav	41
4.3.3	Obecná úvaha	41
5	Výsledky experimentálních měření	43
5.1	Měření tvrdosti	43
5.1.1	Litý stav	43
5.1.2	Kovaný stav	44
5.2	Mikrostrukturní analýza	45
5.2.1	Vzorek 1.0 – litý stav	45
5.2.2	Vzorek 5.0 – litý stav	46
5.2.3	Vzorek 9.0 – litý stav	47
5.2.4	Vzorek 9.1 – kovaný stav	48
5.2.5	Vzorek 9.5 – kovaný stav	49
6	Diskuze	50
ZÁVĚR		51
POUŽITÉ ZDROJE		52
SEZNAM OBRÁZKŮ		54

ÚVOD

Ani dnes není za použití nejmodernější technologie možné vyrábět ocelové ingoty absolutně bez vad. Ingotem se nazývá kovový hutní polotovár jednoho průměru, je to konečný produkt vycházející z oceláren, který se dále zpracovává v kovárně nebo válcovně. K jeho dalšímu zpracování je nutná určitá vnitřní kvalita, kterou ovlivňuje zejména proces výroby. Ingoty mohou být odlévány litím shora, zdola nebo kontinuálním litím a vyrábějí se z nich například kolejnice, tyče, traverzy nebo další hutní polotovary.

Existuje mnoho příčin vzniku vad, už jen sebemenší odchylka v metalurgických a technologických postupech může mít za následek vznik vady. Přirozeně existuje snaha se vad zbavit nebo je zredukovat na co nejmenší úroveň, neboť nejsou žádoucí. Na vznik každé z nich působí větší množství faktorů, kdy jeden může podporovat druhý, mohou se kumulovat a navazovat na sebe. Nejběžnější vady u odlitků se mohou nacházet jak uvnitř, tak i na povrchu. Jedná se například o dutiny, vměstky, staženiny, ale třeba i o chemickou heterogenitu. Je nutné brát v potaz, že vady mohou mít v konečném důsledku až katastrofální následky. Nejjednodušším způsobem, který zajistí minimum vad, je vadám předcházet. Tím se rozumí dodržování správných postupů lití a tuhnutí, a především je nutné znát příčiny vzniku vad a také jejich druhy. Jednou z dalších možností je vady eliminovat vysoce jakostní výrobou, ta je ale oproti běžné výrobě výrazně dražší.

1 Odlévání oceli

Odlévání oceli lze rozdělit podle použité technologie na několik typů.

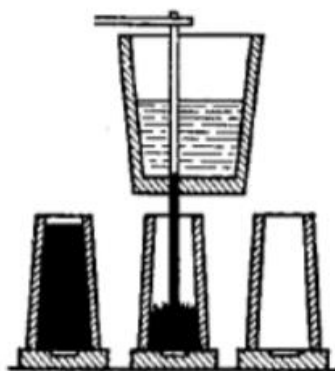
- odlévání oceli do kokil horem nebo spodem
 - Jedná se o tradiční formu.
 - Tato forma tvoří asi 8,5 %.
- odlévání oceli kontinuálním litím
 - Jedná se o moderní formu.
 - Tato forma se využívá asi v 90 %.
- odlévání oceli na odlitky [7]

1.1 Odlévání oceli do kokil

Kokila je forma s určitým průřezem tvořená tvárnou litinou nebo šedou litinou s lupínkovým grafitem, ve které ocel z tekutého stavu ztuhne na požadovaný tvar. Následně je ocel dále zpracována kováním či válcováním. Kokily mohou být umístěné v licích jámách nebo na posuvných vozech. Licí soustavu společně s kokilou tvoří licí deska, kokilové podložky, hlavové nástavce [5], [7].

1.1.1 Odlévání shora

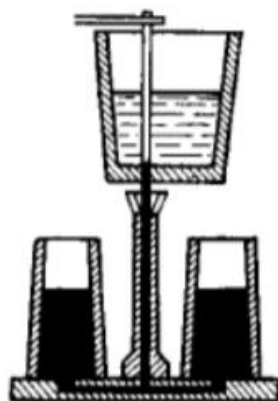
Ocel se do kokil lije přímo shora z licí pánve. U tohoto způsobu lití je potřeba licí podložka, na které kokila stojí. Tento způsob je méně náročný, na rozdíl od odlévání spodem jsou menší ztráty a je nižší šance znečištění oceli stykem s licím zařízením. Nevýhodou je větší šance na vznik vad. Při lití ocel stříká, okysličuje se a padá zpět. Je tak větší šance i na rychlejší opotřebení jak kokil, tak uzavíracích mechanismů. Lití se také hůře sleduje a hůř se reguluje licí rychlost. Výsledná jakost vzniklých ingotů je nižší [5], [7].



Obrázek 1.1: Odlévání oceli horem [7]

1.1.2 Odlévání spodem

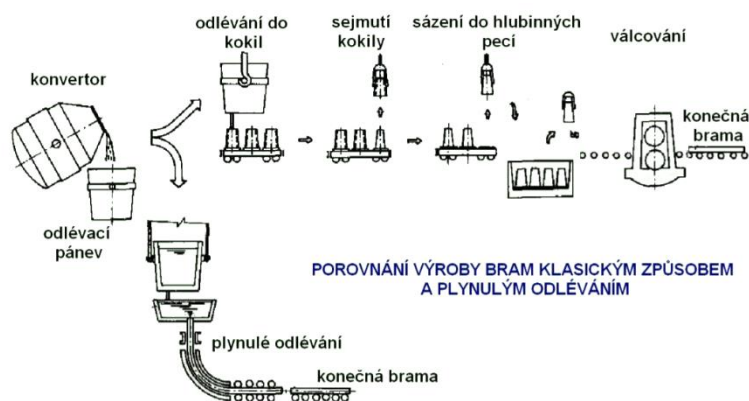
K lití oceli do kokil se využívají vtokové kanály a licí kůl. Ocel potom stoupá ve všech kokilách současně. Metoda je pracnější a komplikovanější než lití shora a jsou potřeba žáruvzdorné materiály, navíc ještě jsou větší ztráty oceli licího systému. Za výhody se dá považovat nižší šance na vznik vad, nižší opotřebení kokil a lepší regulace licí rychlosti. Ocel vyrobená touto metodou je čistší a může se používat k výrobě jakostních ocelí [5], [7].



Obrázek 1.2: Odlévání oceli spodem [7]

1.2 Kontinuální lití

Kontinuálním litím se rozumí plynulé odlévání. Tímto způsobem se získávají polotovary, takzvané předlitky, přímo z tekuté oceli. Ty se využívají pro další zpracování, jako je například válcování. Na rozdíl od starší formy odlévání do kokil má ocel lepší jakost, jemnější strukturu, zlepšuje se výtěžek, snižují se náklady na výrobu [7], [22].

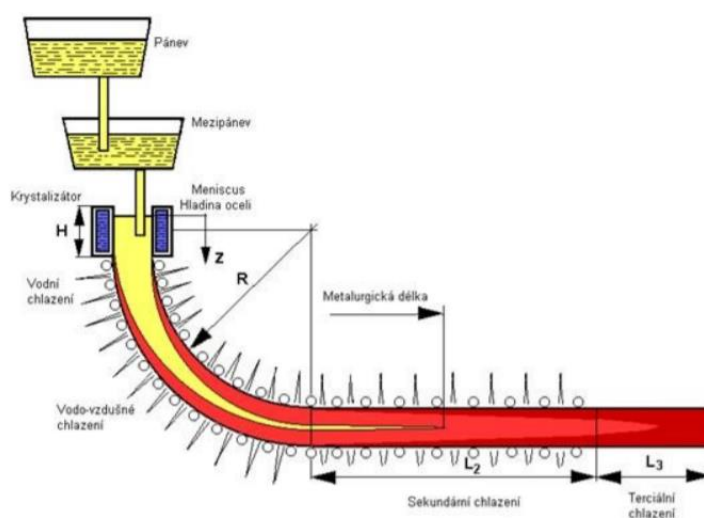


Obrázek 1.3: Porovnání výroby klasicky a kontinuálním litím [22], upraveno

Obrázek 1.3 ukazuje porovnání výroby bram klasicky a kontinuálním litím. Na první pohled je zřejmé, že výroba kontinuálním litím je efektivnější díky menšímu počtu použitých operací. Kontinuální lití v současnosti představuje hlavní způsob výroby oceli. Čím vyspělejší stát, tím více se využívá kontinuální lití [7], [22].

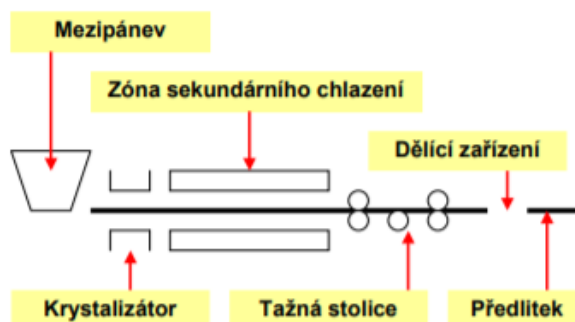
1.2.1 Princip kontinuálního lití

Ocel proudí z pánve do mezipánve a následně pokračuje do krystalizátoru. Krystalizátorem se rozumí forma s měděným pláštěm, která mírně kmitá, aby se snížilo tření mezi ztuhlou skořepinou a povrchem krystalizátoru a zabránilo se tím roztržení skořepiny a výtoku tekuté oceli. Chlazení krystalizátoru je zajištěno vodou. Předlitek je po průchodu krystalizátorem na povrchu tvořen licí kůrou, ale ve středu je stále tekuté jádro. Celkově se v krystalizátoru odvede mezi 10 a 30 % tepla. Je velmi důležité, aby licí kůra byla silná a pevná, aby tekuté jádro kovu neproniklo licí kůrou při následném tažení. V sekundární zóně už je ocel tažena rovnacími válci a je dále ochlazována, až dokud není ztuhlá po celém průřezu. Terciální chlazení potom znamená ochlazení okolní atmosférou. Konečným procesem je rozdělení v dělicím zařízení a dopravení dopravníky ke skladování nebo k válcování [7], [10], [22].



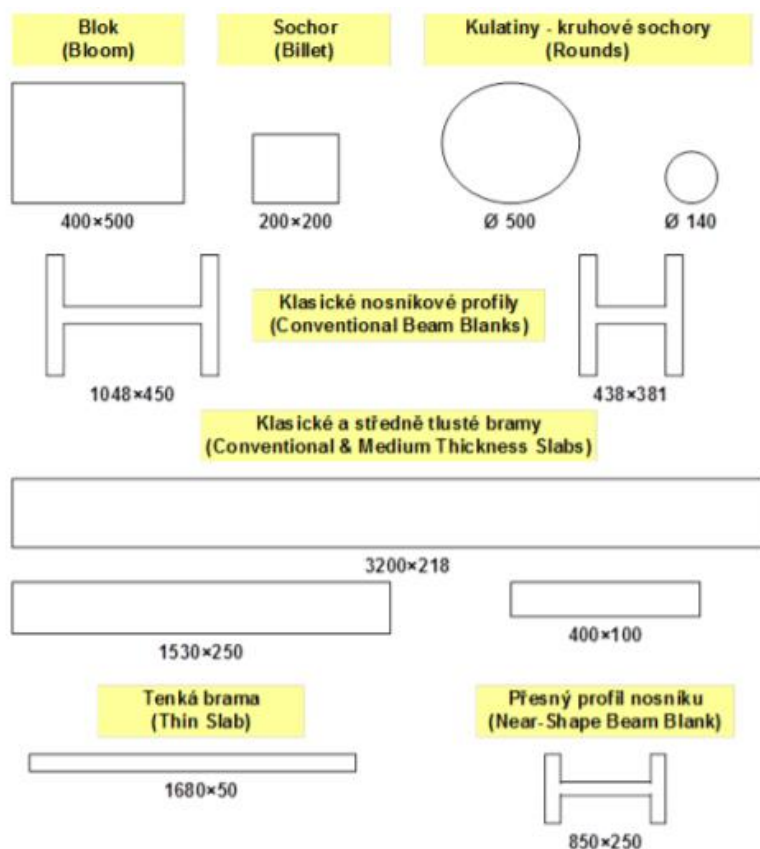
Obrázek 1.4: Schéma kontinuálního lití [10]

Alternativní variantou ke klasickému kontinuálnímu lití je horizontální forma, ta se již však tolik nepoužívá. Tento typ je vhodný pro výrobu vysoce jakostních ocelí. Snadný přístup k zařízení a nižší počáteční investice jsou kompenzovány vysokými provozními náklady, nízkou životností krystalizátorů a nemožností lití větších průměrů [7].



Obrázek 1.5: Schéma kontinuálního lití v horizontální formě [7]

Oproti ostatním druhům odlévání poskytuje plynulé odlévání možnost odlévat velké množství profilů. Poměrem stran rozlišujeme bloky a bramy. Pokud je poměr stran 2,5:1 nebo větší, jedná se o bramu, pokud ne, jedná se o blok [22].



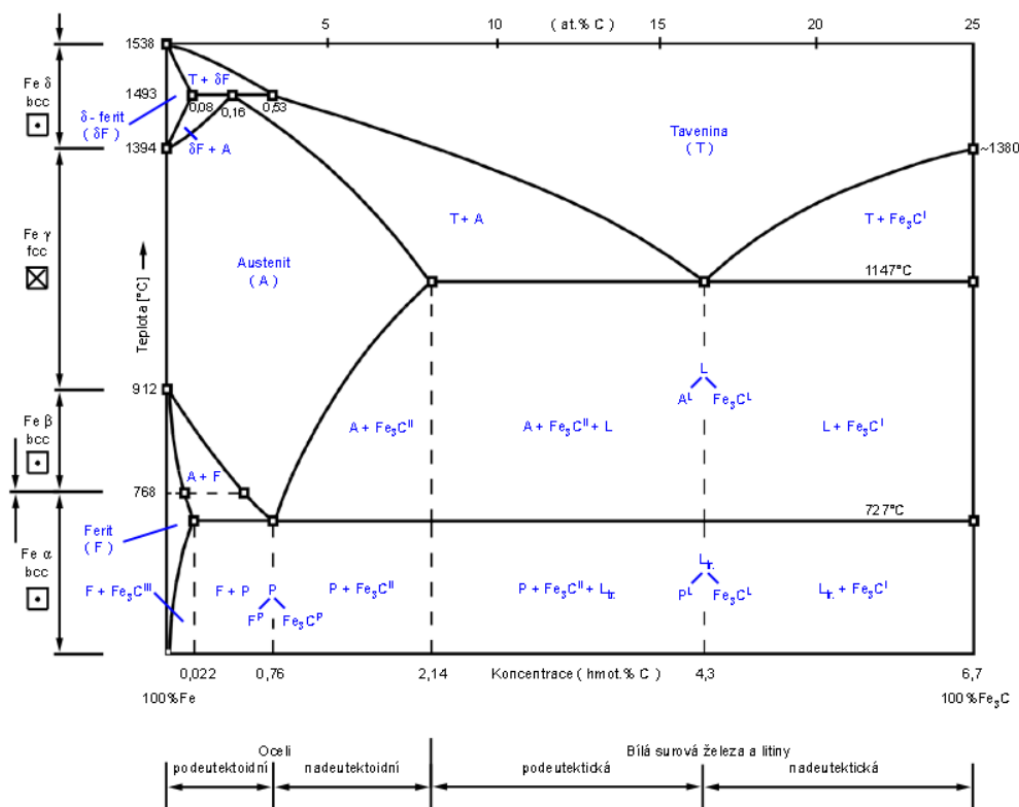
Obrázek 1.6: Různé tvary předlitků [7]

2 Kvalita ingotu a faktory, které ji ovlivňují

Lze říct, že vlivů, které ovlivňují finální kvalitu, je nespočet a působí se ve všech fázích výroby. Je vhodné se zaměřit na co nejvíce faktorů a omezit vznik vad již při výrobě před následným zpracováním. Je vhodné omezit nebo zabránit vzniku vad už při počátečních operacích, neboť vady na sebe mohou navazovat a kumulovat se, tedy podporovat jedna druhou. Konečné vlastnosti ingotu jsou ovlivněny odléváním, chladnutím, tuhnutím a tepelným zpracováním, obecně tedy všemi pochody během výrobního procesu. Za ty nejvýznamnější faktory ovlivňující kvalitu lze považovat níže uvedené [14].

2.1 Diagram Fe-Fe₃C

Tento diagram popisuje reakce ve slitině železa a uhlíku v závislosti na množství uhlíku a teplotě. Jelikož je tato práce zaměřená na oceli, je sledována část diagramu do 2,14 % koncentrace uhlíku. Austenit je přesycený tuhý roztok uhlíku v železe γ . Ve vztahu s ním se provádí následné ohřevy nebo ochlazení pro změny vlastností materiálu. Změnami teploty lze řídit jeho přeměnu a tím také vlastnosti celé oceli [11], [15].



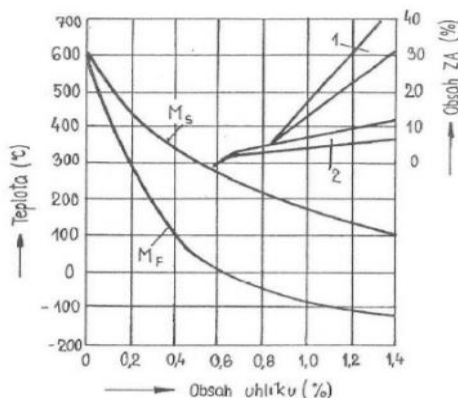
Obrázek 2.1: Diagram metastabilní soustavy Fe-Fe₃C [15]

2.1.1 Struktura oceli

U nástrojových ocelí je struktura ovlivněna množstvím karbidů a zbytkového austenitu. Karbidy v oceli jsou tvrdší než matrice a vylepšují některé vlastnosti, jako je například odolnost proti opotřebení. Pokud jsou rozloženy rovnoměrně, zvyšují životnost. Během tváření se však mohou drtit a tvořit řádkovitost, která zhoršuje mechanické vlastnosti.

Zbytkový austenit zůstává v matrici po zakalení u ocelí s vyšším obsahem uhlíku a jeho množství se odvíjí od množství uhlíku, výdrže na kalící teplotě a množství legovacích prvků. Když se zvětšuje množství uhlíku rozpuštěného v austenitu, zároveň se snižují teploty začátku a konce martenzitické přeměny. Ty mohou být sníženy i pomocí legur jako jsou Mn, Co, Ni. Transformace austenitu tak neproběhne úplně a zbytkový austenit zůstane v matrici.

Zbytkový austenit je měkký, a je tedy brán jako nežádoucí. U ocelí s větším obsahem uhlíku se může transformovat na martenzit i samovolně, což způsobuje prnutí vedoucí k deformaci nebo prasknutí, protože martenzit má větší objem [3], [11].



Obrázek 2.2: Vliv uhlíku na teploty martenzitické přeměny [3]

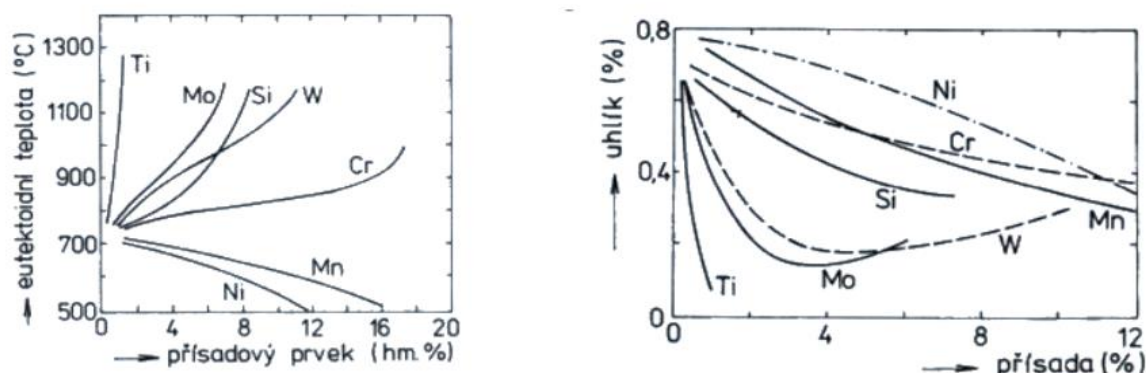
2.1.2 Vliv legur na vlastnosti oceli

- mangan
 - Zlepšuje prokalitelnost a mechanické vlastnosti, zhoršuje tažnost.
- křemík
 - Zlepšuje žáruvzdornost, korozivzdornost, fyzikální vlastnosti, tepelné zpracování a mechanické vlastnosti.
- chrom
 - Zlepšuje mechanické vlastnosti, odolnost proti opotřebení, žárovevnost, žáruvzdornost a korozivzdornost.
- nikl
 - Zlepšuje mechanické vlastnosti, korozivzdornost, prokalitelnost.

- molybden
 - Zlepšuje mechanické vlastnosti, tepelné zpracování, odolnost proti opotřebení, žáruvzdornost a korozivzdornost.
- wolfram
 - Zlepšuje mechanické vlastnosti, odolnost proti opotřebení a žárovevnost.
- vanad
 - Zlepšuje mechanické vlastnosti, tepelné zpracování, žárovevnost, při vyšší teplotě způsobuje růst zrna [3], [23].

Austenitotvorné prvky otevírají nebo rozšiřují oblast gama tak, že může být v ocelích i při pokojové teplotě přítomná. Tyto prvky snižují teplotu eutektoidní přeměny a ovlivňují koncentraci C v eutektoidním bodě. Mezi prvky otevírající oblast austenitu patří Ni, Mn, Co. Mezi prvky rozšiřující oblast austenitu patří C, N, Zn.

Feritotvorné prvky uzavírají nebo zužují oblast austenitu i při vyšších teplotách. Oceli s vyšším obsahem těchto prvků neprocházejí při ohřevu polymorfní přeměnou. Lze tedy konstatovat, že zvyšují teplotu eutektoidní přeměny a ovlivňují koncentraci C v eutektoidním bodě. Mezi prvky uzavírající oblast austenitu patří Cr, Si, Al, W, Mo, V, Ti. Mezi prvky zužující oblast austenitu patří Ta, Zr, B, S, Ca, O [2], [23].



Obrázek 2.3: Vliv legur na eutektoidní teplotu (vlevo) a jejich množství na koncentraci uhlíku (vpravo) [23]

2.1.3 Metalurgie oceli

V případě primární metalurgie je oblastí zájmu tavicí agregát. Hlavním úkolem je snížení množství fosforu, uhlíku, dusíku, nekovových vměstků. V průběhu primární metalurgie se ocel částečně leguje díky vhodně vybrané vsázce.

Sekundární metalurgie doplňuje primární metalurgii. Jedná se o zpracování oceli mimo pec. Snižuje náklady, opotřebení, zvyšuje kvalitu oceli, snižuje množství vměstků. Dále také umožňuje dosažení vyšších jakostí oceli, jejím hlavním cílem je odstranění nežádoucích prvků a nečistot. Následně se také pojí s chemickou čistotou.

Primární a sekundární metalurgie se dále dělí následovně.

- primární metalurgie
 - výroba surového železa ve vysoké peci
 - výroba oceli v kyslíkových konvertorech a obloukových pecích
 - výroba odlitků, předlitků a ingotů
- sekundární metalurgie
 - rafinace tekutého surového železa
 - pánvová metalurgie
 - přetavovací pochody [7], [8]

2.1.4 Chemická čistota

Tato charakteristika posuzuje obsah a působení prvků, které se v oceli vyskytují a hodnotí se chemickou analýzou. Nejjednodušším rozdělením prvků se rozumí dělení na přísadové a doprovodné prvky.

- přísadové prvky
 - Cr, Mn, V, W, Al, Ti, Ni

Tyto prvky jsou v oceli užitečné, neboť zlepšují její vlastnosti. Můžou být využity ve formě legur. Mezi zlepšené vlastnosti patří například lepší pevnost, houževnatost nebo korozivzdornost. Malý náhled toho, co mohou jednotlivé prvky zlepšit, je uveden v dřívější kapitole 2.1.2.

- doprovodné prvky
 - P, S, O, N, H,

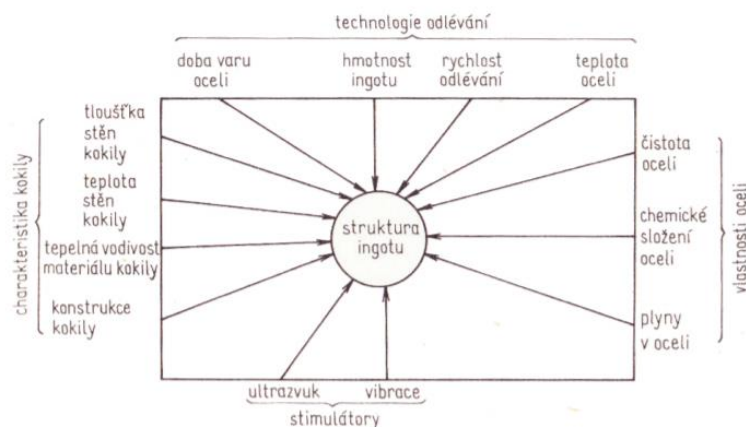
Tyto prvky jsou v oceli škodlivé, neboť vlastnosti ocelí zhoršují. Pro příklad může být uveden fosfor, který snižuje korozivzdornost, zhoršuje svařitelnost, vyvolává křehkost za studena a zvyšuje sklon k tvoření trhlin a křehkých lomů.

Je však nutné brát v potaz, že žádná jednoznačná hranice mezi přísadovými a škodlivými prvky neexistuje. Například prvky S nebo N jsou považovány za škodlivé, i když ve speciálních případech mohou přispět ke zlepšení vlastností.

Odstranění doprovodných prvků lze zajistit díky afinitě ke kyslíku, kdy prvky vytvoří oxidy a vyloučí se ve formě strusky. Některé prvky jsou částečně odstranitelné, ovlivňují vlastnosti strusky, a mohou způsobovat technologické problémy. U prvků s nízkou afinitou ke kyslíku je odstranění obtížné, a navíc se musí počítat i se zhoršením vlastností oceli [7], [8], [14].

2.2 Vlivy působící na strukturu oceli

Na obrázku 2.4 je vidět malá demonstrace vlivů, které ovlivňují strukturu oceli. Obrázek je však třeba brát jako ilustrační, i když jsou na něm vidět hlavní vlivy ovlivňující strukturu, tak se nejedná o výčet úplně všech vlivů. Za hlavní vlivy lze tedy považovat charakteristiky kokily, tuhnutí a procesy s ním spojené, rychlost odlévání a vlastnosti oceli z hlediska čistoty a chemického složení.



Obrázek 2.4: Faktory ovlivňující strukturu oceli [14]

2.2.1 Tuhnutí a licí kůra

Jedním z nejdůležitějších faktorů při výrobě ingotu je tuhnutí. Tuhnutím se rozumí krystalizace do teploty solidu z teploty likvidu, chladnutím se poté nazývá přechod z teploty solidu na teplotu okolního prostředí. Na jeho průběhu závisí finální kvalita výrobku [1], [8].

Licí kůra je ztuhlá vrstva na povrchu, která se tvoří už při prvotním doteku přehřáté taveniny s kokilou a závisí primárně na licí teplotě, rychlosti lití a na materiálu i tvaru jak ingotu, tak kokily. Licí kůra omezuje chladnutí kvůli tomu, že přehřátá tavenina se plně nedotýká stěny kokily. Smršťováním licí kůry se může kůra od kokily úplně oddělit a vzniklá mezera chladnutí ještě více zpomalí. Při lití shora se licí kůra vytváří ihned po odlití téměř po celé ploše na ingotu. Na dně mezera nevzniká díky působení vlastní hmotnosti taveniny. Vznik licí kůry může být příčinou vzniku povrchových vad, kdy jedna vada může podporovat druhou.

Vznikem licí kůry se může změnit tuhnutí tak, že již nebude dendritické. Dále také může nastat situace, že se kůra zdeformuje a vznikne v ní trhlinka. Tyto trhlinky mohou způsobovat vznikání mezidendritických trhlinových vycezenin, jež zase podporují vznik trhlin přímo v ingotu. Děje se tak v důsledku rozdílného vedení tepla, podle toho, ve kterém místě se dotýká kůra kokily v jak velkém množství. Aby se vytvořily trhlinky, je nutné zajistit vysoký odvod tepla.

Licí kůra postupně oxiduje a roste, může však nastat situace, kdy se začne tavít a oxidy se smísí s tekutým kovem. Děje se tak v důsledku oduhlíčení povrchu a zejména tehdy, pokud je licí kůra tenká. Tento jev je velmi nežádoucí, neboť způsobuje vznik makrověstků. Zabránit tomu může dostatečně silná, tlustá, kůra.

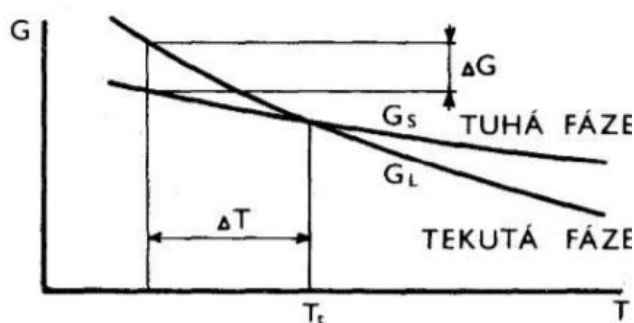
Další možností, jak zabránit vzniku makrověstků a trhlin, je zamezení vzniku licí kůry a mezery mezi ní a kokilou. Vhodné je tedy kokily ohřát a neodvádět hodně tepla na počátku tuhnutí [21], [24].

2.2.2 Krystalizace a nukleace

Proces krystalizace začíná v momentě, kdy se setká tekutý kov s chladnou stěnou krystalizátoru nebo kokily a dojde ke snížení teploty oceli.

Aby mohla krystalizace probíhat, je nutné, aby byl dostatečně velký rozdíl volné entalpie mezi původní a nově vznikající fází. Čím nižší je hodnota volné entalpie, tím je soustava stabilnější. Tento rozdíl volné entalpie představuje hnací sílu reakce. Kromě této termodynamické podmínky rozhodne o začátku fázové přeměny ještě kinetický faktor. Je nezbytné, aby nově vznikající krystaly byly stabilní. Toho se docílí přechlazením. Vznik nové fáze závisí na rychlosti růstu krystalů. Nutná je také přítomnost zárodku tuhé fáze v tavenině, bez něj je možno dosáhnout vysoké hodnoty přechlazení, aniž by začala krystalizace. Aby byly zárodky nové fáze stabilní a mohly dále růst, musí mít nadkritický rozměr. Zárodky, které jsou menší, se rozpouští zpět do taveniny.

Při odlévání oceli rychle vznikají krystaly díky intenzivnímu odvodu tepla, přítomnosti cizích částic a nerovnostem povrchu formy. Velký teplotní gradient spolu s velkým množstvím krystalizačních zárodků tvoří vrstvu drobnějších krystalů, tzv. licí kůru. V licí kůře jsou krystaly různě orientovány [7], [9], [10].



Obrázek 2.5: Změna volné entalpie tekuté a tuhé fáze v závislosti na teplotě [14]

Mechanismem krystalizace je nukleace stabilních zárodků a jejich růst. Nukleací se rozumí tvorba zárodků. Zárodky jsou nepatrné počáteční objemy nové fáze v tavenině, které se postupně zvětšují vlivem fluktuace energie a teploty [25].

Nukleace se dělí na 2 typy podle typů zárodků.

- homogenní nukleace
 - Nová fáze vzniká spontánně, v tavenině se vlivem fluktuace energie a teploty tvoří zárodky krystalů tuhé fáze. Je nutné velké přechlazení.
- heterogenní nukleace
 - Nastává za normálních podmínek, zárodky nové fáze vznikají snadněji díky přítomnosti tuhých částic, které snižují energetickou náročnost. Není nutné vysoké přechlazení [7].

U ocelových ingotů je vždy nukleace heterogenní díky velkému množství cizích částic, vměstků. Při nukleaci se podobně jako cizí částice v tavenině chovají také nerovnosti na povrchu kokily.

Finální struktura je velmi ovlivněna rychlostí růstu krystalů a tvorby zárodků. Pokud je vyšší rychlost tvorby zárodků a nižší rychlost růstu krystalů, bude vznikat struktura jemnozrná. Při opačném průběhu bude struktura z polyedrických zrn.

Obecně krystalizaci lze ovlivnit hlavně dvěma faktory.

- rychlým ochlazením
 - Nastává větší přechlazení a tím i více krystalizačních zárodků.
- odstraněním cizích velkých zárodků

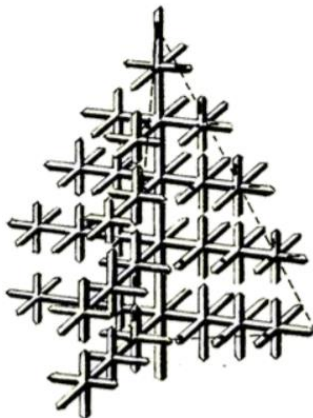
V ideálním případě je výsledkem struktura, jež je jemnozrná, a ta významně zlepšuje vlastnosti ingotu. Například u masivních ingotů je však ochlazování pomalé a vznikají krystaly s hrubou stavbou [1], [6], [14], [25].

2.2.3 Dendritická struktura

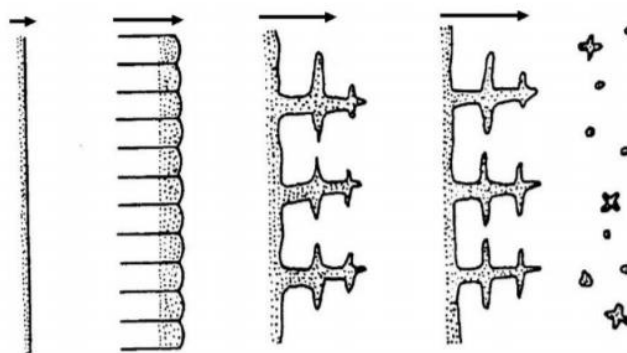
Při jakémkoliv ovlivnění krystalizačních pochodů v tavenině lze pozorovat změnu vnitřní struktury ingotu. Se změnou vnitřní struktury se změní také fyzikální a mechanické vlastnosti.

Přidáním přísady do taveniny vznikne rozdíl teplot, takzvané koncentrační přechlazení. Koncentrační přechlazení má zásadní vliv na mezifázové rozhraní. Čím větší toto přechlazení je, tím se mění mezifázové rozhraní tak, až se stane dendritickým. Větším koncentračním přechlazením se podpoří lepší vznik dendritické struktury, a zároveň pokud tavenina nebyla intenzivně ochlazena před začátkem tuhnutí, bude vznikat dendritická struktura snadněji.

Dendrity jsou útvary, které vznikají na krystalizačních zárodcích a mají tvar stroměčku. Tlustá část se nazývá primární větev, tenké části se potom nazývají sekundárně větve. Na nich mohou dále vznikat další větve vyššího řádu. Osy primárních dendritů rostou ve směru odvodu tepla. Hustotu sekundárních větví a větví vyššího řádu ovlivňuje hlavně doba chladnutí, ale také chemické složení slitiny v daném místě [14], [24], [25].



Obrázek 2.6: Model dendritu [25]



Obrázek 2.7: Tvorba dendritu [24]

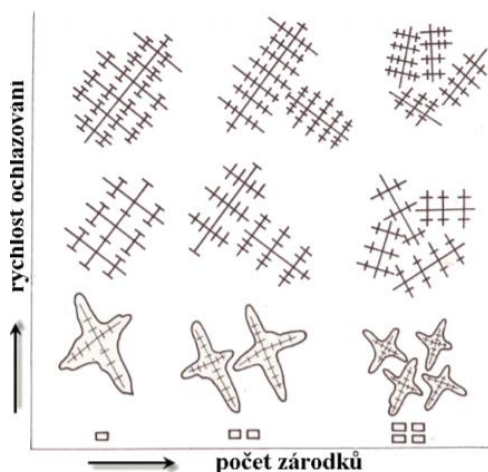
2.2.4 Dendritický růst

Pro dendritický růst je nutné vysoké přesycení roztoku a rychlý odvod tepla. V tomto ohledu hrají roli příměsi a nečistoty snižující nutné přechlazení pro začátek krystalizace. Ocel dendriticky krystalizuje.

Pro začátek dendritického růstu, aby mohl vůbec nastat, je nutná vrstva přechlazené taveniny. Ta vzniká již na začátku krystalizace díky segregaci uhlíku, síry a fosforu, které zredukovávají teplotu tavení. Teplotní gradient v tavenině je záporný a vyrovnávání do normálu způsobuje vznik dendritů.

Následný růst krystalů je podmíněn několika faktory. Ovlivňuje jej směr a rychlost odvodu tepla, největší růst je proti směru tepelného toku. Dále jej ovlivňuje také počet zárodků a uspořádání atomů v krystalografických rovinách.

Čím větší je rychlost odvodu tepla, tím jemnější je rozvětvení primárních dendritů, naopak při nízké rychlosti bude toto rozvětvení hrubší [14], [24], [25].



Obrázek 2.8: Vnitřní stavba dendritů v závislosti na počtu zárodků a rychlosti ochlazování [14]

3 Vady ingotů

Vadami se rozumí odchylky od předepsaných vlastností, které určují technické normy, tedy odchylky rozměrů, struktury, chemického složení, mechanických vlastností, fyzikálních vlastností nebo i vzhledu. Vady v ingotech jsou způsobeny mnoha vlivy. Každá technologická operace při výrobě oceli může být zatížena odchylkou od ideálního stavu, a tak může vzniknout vada. Záleží však také na pozdějším zpracování, neboť některé vady se nemusejí při určitém zpracování projevit. Při výrobě ingotů je cílem výroba co nejméně vadného ingotu, nelze však vyrobit ingot absolutně bez vad. Při výrobě je při každé operaci šance na vznik vad, kterých existuje opravdu mnoho, jak jednotlivě, tak v různých kombinacích.

Nejčastěji vady vznikají důsledkem lidských chyb a nedodržení správné výroby či špatně zvoleným postupem. Jako další příklad se dá uvést také nevhodně zvolený materiál nebo nevhodná konstrukce.

Tuhnutí a krystalizace ingotů jsou jedny z faktorů způsobující jak vnitřní, tak povrchové vady. Chemická heterogenita je následkem změn teplotního a silového pole. Navolením a dodržením vhodných podmínek ji tedy lze zredukovat. Stejně to platí i pro vměstky a dutiny. Jejich přítomnost se dá ovlivnit vhodným tvarem kokily, způsobem lití, teplotou lití a usměrněným tuhnutím. Obecně vyšší jakosti se dosáhne při dodržení vhodných stanovených podmínek. Nejlepší jakosti se docílí za pomoci vakuování. Povrchové vady vznikají hlavně kvůli nesprávným podmínkám lití, nevhodné lící teplotě a tuhnutím na počátku. Trhliny a praskliny jsou způsobeny hlavně pnutím a smršťováním [4], [12].

Vady se obecně rozdělují na několik skupin. Úplně primárním dělením je rozlišovací schopnost toho, jak jsou vady objeveny.

- zjevné vady
 - Jsou odhalitelné okem nebo jednoduchým měřením.
- skryté vady
 - Jsou odhalitelné až speciálním měřením.

Vady lze dělit i podle toho, zda jsou přípustné, nepřípustné nebo opravitelné.

- přípustné vady
 - Nezpůsobují horší zpracování ani horší funkci, normy je připouštějí.
- opravitelné vady
 - Jde o necelistvosti na části, kterou lze odstranit, nebo o vybroušení trhlin na povrchu.
- nepřípustné vady
 - Vady ovlivňují funkci nebo zpracovatelnost a nelze je odstranit. Výrobky s těmito vadami se nazývají neshodné výrobky.

Vady lze také dělit podle jejich výskytu na vnější a vnitřní.

- vnější (povrchové) vady
 - trhliny, praskliny, šupiny, zavaleniny, bubliny
- vnitřní vady
 - vycezeniny, staženiny, řediny, vločky, vměstky

Obecně se vady výrobků dají rozdělit do následujících kategorií.

- vady rozměru a tvaru
- vady povrchu
- necelistvosti
- vady makrostruktury
- vady mikrostruktury
- vady zjištěné laboratorními zkouškami
- nedodržení předepsaných značení [4], [9], [12]

3.1 Vnější vady

Tyto vady lze většinou vidět již na první pohled a bývají často odstranitelné. Nemívají velký vliv na funkci nebo životnost, převážně se jedná o vady vzhledu.

3.1.1 Trhliny

Trhliny jsou běžné vady, které mohou vzniknout při různých teplotách chlazení a mohou celý ingot až znehodnotit. Trhliny vznikají kvůli stříhovému napětí, které za vyšší teploty překoná pevnost při vyčerpání plasticity, a vyskytují se skoro u každého způsobu výroby oceli. Při brzdění volného smršťování, mechanicky nebo různou intenzitou ochlazení, nebo rozdělení pnutí nestejnoměrně, vznikají ideální podmínky pro vznik trhlin. Vznik trhliny může být umocněn slabým místem s dalšími vadami, jako jsou například vměstky nebo vycezeniny.

Příčin pro vznik trhlin existuje hned několik.

- špatná rychlost a postup odlévání
- špatný způsob odlévání
- špatný tvar ingotu
- špatně umístěný vtok do kokily
- vadný povrch kokily
- nesprávné zacházení s ingoty po odlití

Každá příčina ovlivňující rovnoměrnost tuhnutí nebo brzdící smršťování je potenciálně nebezpečná. Menší příčiny samy o sobě sice nebezpečné být nemusí, mohou se však sečíst a díky tomu vytvořit trhlinu [4], [7].

Trhliny se dělí podle toho, za jakých teplot se tvoří.

- trhliny vznikající při teploty blízké teplotě solidu
 - Tyto trhliny vznikají tedy během tuhnutí, případně chvíli po ztuhnutí.

Tento způsob vzniku trhlín se pojí také se vznikem spáry mezi tuhoucím ingotem a kokilou. Když se tekutá ocel dotkne stěny kokily, začíná krystalizace spojená se vznikem licí kůry. Následné smršťování povrchové části je vykompenzováno plastickou deformací. Kůra se roztahuje zároveň s kokilou a při dalším snižování teploty vzniká mezera mezi kokilou a ingotem. Když je pevnost kůry ještě malá, ale už je vytvořená mezera, tak jsou vytvořeny ideální podmínky pro vznik trhlín.

- trhliny tvořící se za nižších teplot než při teplotě oceli v plastickém stavu
 - Tyto trhliny typicky vznikají u fázových přeměn a nazývají se praskliny.

Tento typ trhlín vznikne při uvolnění vnitřního pnutí a rychlých změnách teploty a míří z povrchu hluboko dovnitř. V různých vrstvách ingotu je nerovnoměrný rozpad austenitu. Smrštění chladnoucí vnější vrstvy a roztáhnutí vnitřní vrstvy způsobí tahové pnutí ve vnější vrstvě.

Pokud jsou teploty vrstev velmi rozdílné a ocel je málo plastická vzhledem k pnutí, tak se na povrchu objeví praskliny. Čím obsahuje ocel více uhlíku a legur, tím náchylnější je k prasklinám při nižších teplotách. Obecně lze říct, že cokoliv ovlivňující rovnoměrné tuhnutí nebo brzdící smršťování během tuhnutí může způsobit vzniknutí trhlín.

- mikrotrhliny vznikající u vysoce legovaných ocelí zhruba při 1250 °C
 - Vnitřní mezikrystalické trhliny vznikají při tuhnutí ingotů z legovaných ocelí.

Tyto trhliny vznikají díky pnutí z rychlého tuhnutí vnitřní části ingotu a pomocí nežádoucích prvků umístěných na hranicích zrn. Při tuhnutí dendritu se tavenina s nižší teplotou tavení uzavře mezi jeho osami a vznikne ostrý výběžek. Postupně se smršťují i samotné dendrity, a pokud není jejich snížený objem nahrazen taveninou, vzniknou řediny a následně trhliny [4], [7], [13].

3.1.2 Šupiny

Šupiny jsou běžnou vadou a vyskytují se hlavně u ingotů odlévaných shora, při odlévání zdola šupiny vznikají jen při zalití ingotu. Tato vada nemusí vždy vadit, protože šupiny lze větším zokujením eliminovat. Většinou totiž nejsou hlouběji, než je přídavek materiálu pro obrobení.

Při odlévání shora ocel stříká, kapky na stěně kokily rychle tuhnou a jejich povrch může zoxidovat. Zoxidovaná část se potom s tekutou fází nespojuje. Část z kapek se neokysličuje a rozpouští se zpět v tavenině.

Na tvorbu šupiny má hlavní vliv nátěr stěn kokil. Tento nátěr slouží jako izolační vrstva a snižuje rychlost tuhnutí kapek. Vliv na tvorbu šupin má i rychlost zalití oceli společně s rychlostí okysličování. Drobné šupinky se projeví až během následného zpracování. Okolo šupin je navíc vysoká koncentrace vměstků, bublin a segregací.

Odstraňování šupin se provádí opalováním povrchu nebo klasickou úpravou povrchu.

Za příčiny vzniku šupin jsou považovány tyto faktory.

- nevhodné podmínky při odlévání
- špatný tvar nebo vnitřní povrch kokily
- odlévání ingotů pod struskou
- vady uzavírání
- odlévání ve vakuu [4], [7], [13]

3.1.3 Zavaleniny

Zavaleniny souvisí s kůrou ingotu a jejím vznikem. U odlévání uklidněné oceli spodem se tvoří oxidický povlak na hladině. Hladina oceli vytvoří tzv. meniskus při styku oceli se stěnou.

V ohnuté části menisku se vytvoří kůra z oxidů a tuhnoucí oceli, její plocha zároveň s tloušťkou rostou během odlévání. Tím také při rostoucí hladině na meniskus roste tlak, dokud se kůra neprotrhne a ocel v tekutém stavu se nepřeleje.

Kůra na menisku je tlustá, pevná, má znečištěný povrch oxidy, neohne se zpět ke kokile a ani se nesvaří s tekutou ocelí. Zavalenina většinou znamená i přítomnost bublin, trhlin, sekundárních staženin a struskovitých míst. Je tedy dobré znát příčiny vzniku zavalenin, neboť jejich odstranění pomůže i s odstraněním doprovodných vad.

Proti vzniku zavalenin se využívají opatření, aby byl meniskus co nejnižší. Je tedy třeba, aby byla co nejteplejší ocel v úrovni hladiny.

- Je snaha zamezit oxidaci, čehož se dosáhne větší rychlostí lití společně s vyšší lící teplotou.
- Využívají se uhlíkaté nátěry kokily nebo nátěry s hliníkem.
- Musí se dávat pozor na vznik nových vad [4], [7].

3.1.4 Bubliny

Bublinami se nazývají dutiny v odlitku. Bubliny se objevují v ingotu pod povrchem nebo mohou být spojeny s povrchem. Mohou se vyskytovat jednotlivě i ve shlucích, ve formě síťkových bublin mohou být vysety po celém povrchu. Uzavřené bubliny pod povrchem mívají hladký povrch, oproti tomu otevřené bubliny spojené s povrchem bývají zoxidované kvůli styku s atmosférou při tuhnutí a chladnutí odlitku. Většinou se jedná o dusík, kyslík a vodík.

Obecně výroba oceli probíhá za působení plynů, kvůli tomu mohou v oceli vzniknout bubliny. Bubliny mohou vznikat i na patě ingotu a představují závažný technologický problém.

Bubliny se dělí na endogenní a exogenní podle vzniku, reálně však jsou přítomny bubliny vzniklé kombinací obou.

- endogenní bubliny
 - Endogenní bublina vznikne z plynu rozpuštěného v tavenině, když tlak plynu převýší odpor. Má neoxidovaný povrch stěn a lesklý povrch, pokud je spojena s povrchem, povrch může zoxidovat.
- exogenní bubliny
 - Exogenní bublina vznikne během lití, kdy zvenčí vnikne do oceli plyn. Plyn vnikne do odlitku, když tlak převýší odpor kladený tuhnoucí vrstvou roztaveného kovu. Tyto bubliny mají oksyložený povrch díky volnému kyslíku.

Bubliny se dále dělí podle působícího plynu.

- bubliny způsobené kyslíkem
 - Kyslík nezpůsobuje bubliny přímo, ale jeho reakcí vzniká CO, který již bubliny tvoří. Kyslíkové bubliny jako takové vznikají pouze při extrémně vysokém obsahu kyslíku.
- bubliny způsobené vodíkem
 - Tyto bubliny vznikají při přesycení taveniny rozpuštěným vodíkem při tuhnutí a chladnutí odlitku.
- bubliny způsobené dusíkem
 - Tento typ bublin vzniká při přesycení taveniny rozpuštěným dusíkem při tuhnutí a chladnutí odlitku.

Na vznik bublin působí také další vlivy, které jsou níže uvedené.

- nejakostní vsázka
 - plyny vázané ve vsázce, vlhkost, rez
- špatná atmosféra v peci
 - příliš mnoho kyslíku a vodíku v atmosféře pece
- špatný průběh tavby
 - nízká rychlost oduhličování
- příliš velké množství plynu nebo vlhkosti v přísadách přidávaných do pece
- nedostatečná dezoxidace oceli
- špatný odpich oceli z pece
- vlhké kanálky, vyzdívka nástavců pro hlavy nebo nálevky
- vadný povrch uvnitř kokily
- vadné úpravy povrchu kokily
- lití nesprávným postupem [4], [12], [13]

3.2 Vnitřní vady

3.2.1 Chemická nehomogenita a segregace

Pojmem chemická nehomogenita se rozumí rozdílné chemické složení v různých částech ingotu. Tento typ vady je pro ingoty typický.

Vznik chemické nehomogenity je způsoben odměšováním prvků z oceli a zmenšením jejich rozpustnosti v železe během tuhnutí.

Obecně má roztavená ocel prakticky homogenní chemické složení, stejné to bude i pro velmi rychle ochlazenou tekutou ocel, neboť nevznikne licí kůra. Pro pomalu chladnoucí ocel to již však neplatí. Železo se taví nejhůř, takže bude tuhnout jako první. Nejdříve se v ní oddělí krystaly o vyšší teplotě tavení s méně doprovodnými prvky. Z tohoto důvodu budou nové krystaly odlišné od taveniny jinou koncentrací prvků. Tento jev nazýváme segregace.

Segregace se může dále dělit na 2 základní typy.

- mikrosegregace
 - K mikrosegregaci dochází na dendritické úrovni, k rozdílnému chemickému složení dojde díky omezené rozpustnosti doprovodných prvků během tuhnutí.

Mikrosegregací lze nazvat dendritickou segregaci. V ingotu se nachází nekovové částice různé velikosti a chemického složení. K rozdílnému chemickému složení dojde díky omezené rozpustnosti doprovodných prvků během tuhnutí. Tato segregace vzniká díky nedokonalé difuzi příměsí v tuhé fázi, a ty tak zůstávají segregované mezi osami dendritů a způsobují segregaci. Difuze příměsí do volné taveniny je velmi omezená. Nové krystaly mají tedy jiné chemické složení a obsahují jiné množství příměsí než původní tavenina. Tento jev se týká hlavně malých objemů, kdy ocel tuhne dendriticky.

Tento typ segregace velmi významně ovlivňuje jakost oceli. Do jisté míry se dá ovlivnit vhodnou vsázkou nebo vhodnou technologií. Dokonale stejnorodou ocel však vyrobit nelze.

- makrosegregace
 - Jedná se o rozdíly chemického složení ve větším rozsahu, než jsou rozměry primárního zrna a dendritů.

V podstatě se jedná o doplněk mikrosegregace, kdy vzniká vedle ní. Difuze příměsí do volné taveniny může v částečné míře probíhat. Při tuhnutí se dělí nově vzniklé oblasti na ty s kladnou segregací, kde je vyšší obsah příměsí, a se zápornou segregací, kde je nižší obsah příměsí.

Makrosegregace je zastoupena ve vyšší míře, tvoří tedy větší problém. Toto vyšší zastoupení znamená i větší negativní vliv, který může v extrémním případě vyústit i v řazení oceli do nižšího jakostního stupně. Se segregací se následně také pojí vznik vycezenin [7], [14], [24].

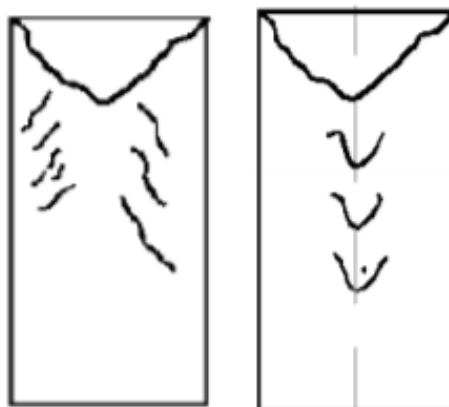
3.2.2 Vycezeniny

Vycezeninami se nazývají shluky ztuhlé příměsi a nečistot obohacené taveniny mezi dendrity, které vznikají vlivem segregace. Během tuhnutí se utvářejí zrna s rozdílným chemickým složením, je zde vyšší obsah segregujících prvků.

Vznikají díky tomu, že se nízkotavitelná složka se segregujícími prvky dostane do dutiny přítomné v tuhnoucím ingotu.

Vycezeniny se dělí na dvě hlavní skupiny podle vzniku.

- stvolové vycezeniny
 - Vznikají mezi větvemi dendritů a tvoří pásy ve tvaru písmena A.
 - Tvoří se v oblasti se zvýšenou koncentrací příměsí, nečistot a odměšujících prvků.
- mezerové vycezeniny
 - Vznikají v osově části a mají tvar písmene V.
 - Jsou tvořeny nečistotami a shluky příměsí, které při tuhnutí vyplnily dutiny a mezery v odlitku [12], [20], [24].



Obrázek 3.1: Schéma stvolové vycezeniny (vlevo) a mezerové vycezeniny (vpravo) [20], upraveno

3.2.3 Staženiny

Staženiny jsou otevřené nebo uzavřené dutiny, jež vznikají během změny objemu při snižování teploty. Předpokládá se mnohem větší chladicí vliv stěn kokily. Staženina vzniká v místech, kde je nejdéle tekutá ocel, v takzvaném teplotním centru. Odtud se tekutá ocel dodává do míst, kde se snižuje objem. Na konci tuhnutí už není dost tekuté oceli pro vyplnění dutin uvnitř. Kolem staženiny vzniká pórovitost a řediny. Nejčastěji se nachází v horní části ingotu.

Příčin vzniku staženin je hned několik.

- nevhodná licí teplota a rychlost lití
- špatný způsob odlévání, vadná licí souprava
- špatný tvar kokily
- nedostatečná doba odstátí [4], [12]



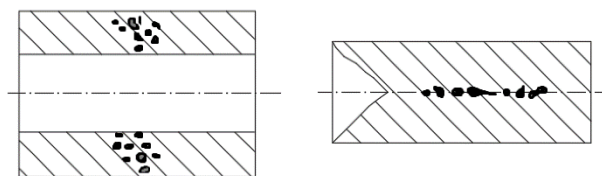
Obrázek 3.2: Schéma vzniku staženin [4], upraveno

3.2.4 Řediny

Ředinami se nazývají malé staženiny, které se vyskytují při konečné fázi tuhnutí v tepelném centru. V odlitku tvoří shluky nebo řetězce ředin v tepelné ose nebo na ostrých hranách formy, protože v těchto místech odlitek tuhne delší dobu a jsou příznivé podmínky pro vznik staženin a ředin. Shluky se tvoří v tlustých stěnách a jejich spojích nebo v lokálním tepelném centru odlitku. Řediny tvoří ve stěně řidká místa, takže je pak stěna porézní.

Příčinou vzniku ředin je podobně jako u staženin objemové smrštění kovu při tuhnutí se špatně usměrněným tuhnutím. Řediny vznikají už u mírného záporného rozložení teplot v průřezu odlitku.

Na rozdíl od klasických staženin vznikají za účasti plynů uvolněných z jader, nátěrů a formovacích směsí. Řediny také mohou vzniknout v souvislosti s propadlinami [13], [20].



Obrázek 3.3: Schéma ředin [20], upraveno

3.2.5 Vločky

Vločkami se nazývají kulaté skvrny lesklého povrchu, které vznikají kvůli vyšší koncentraci vodíku. Reálně to jsou příčné trhliny. Vodík se při vyšší koncentraci nevylučuje ve formě bublin, ale rozpouští se v atomární formě. Během ochlazování se pak nemůže plasticky deformovat, tvoří molekuly a vznikají trhliny.

Omezení tvoření vloček lze zajistit snížením obsahu vodíku nebo je nutné provést protivločkové žíhání [7].

3.2.6 Vměstky

Vměstky vznikají během výroby nebo lití kvůli přítomnosti nežádoucích prvků a nečistot. Dostávají se do oceli zvenčí. Způsobují zhoršení mechanických vlastností, pevnosti, houževnatosti, tvárnosti.

Vměstky se dělí podle jejich původu vzniku na endogenní a na exogenní.

- exogenní vměstky
 - Jsou to nahodilé nečistoty, částice písku, strusky nebo žáruvzdorného materiálu a ocel s nimi přichází do styku během výroby.
- endogenní vměstky
 - Vznikají během chemických reakcí v oceli při výrobě, jedná se především o oxidy, sulfidy, karbidy, nitridy a komplexní vměstky [7], [12].

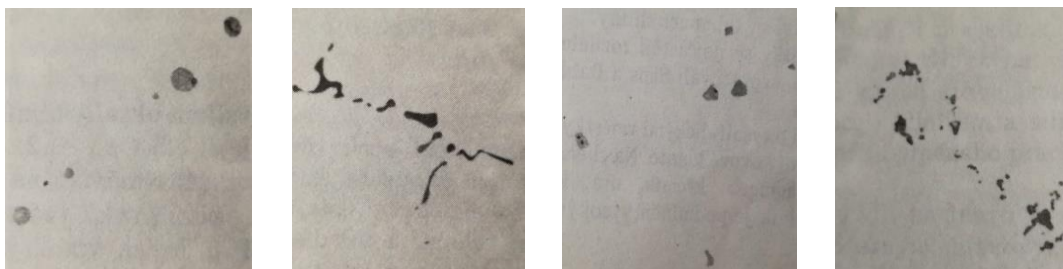
Podle velikosti se mohou vměstky dále dělit.

- mikrovměstky
- oxidické blány
- makrovměstky

Na vzniku vměstků se podílí zejména prvky Mn, S, Si, O, Al, přičemž se tvoří oxidy, sulfidy, křemičitany a hlinitany. Pokud jsou oceli vysokolegované, mohou vznikat vměstky s obsahem Cr, Ni.

Vměstky se dále dělí na čtyři typy podle složení.

- I. typ: komplexní oxidosulfidické vměstky globulárního tvaru
- II. typ: sulfidy manganu vyloučené ze zbytků matečné taveniny
- III. typ: sulfidy manganu s oxidickým jádrem oxidu hlinitého v tvaru polygonu
- IV. typ: shluky jemných vměstků na bázi oxidu hlinitého při dezoxidaci kyslíkem [4], [20], [24]



Obrázek 3.4: Zleva doprava seřazené vměstky I. typu, II. typu, III. typu, IV. typu [20]

4 Laboratorní část

4.1 Použitý materiál a jeho vlastnosti

Na základě provedené chemické analýzy bylo zjištěno následující složení.

- 0,84 % C
- 0,24 % Mn
- 0,23 % Si
- 0,008 % P
- 0,003 % S
- 3,22 % Cr
- 0,19 % Ni
- 0,21 % Mo
- 0,10 % V

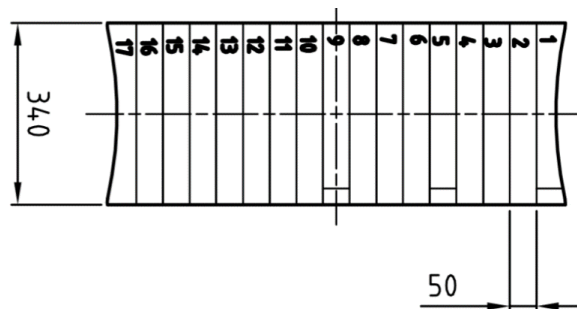
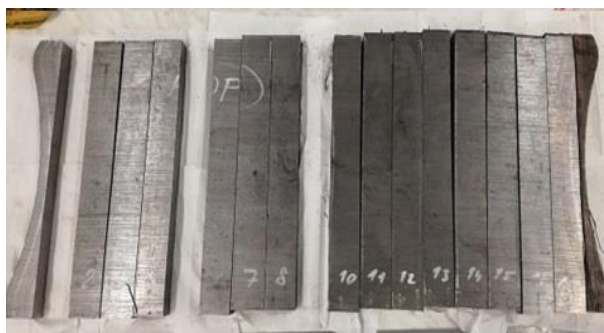
Chemické složení		
Prvek	hm. %	
	DHQ3	8Cr3MoV
C	0,78 – 0,83	0,77 – 0,83
Si	0,70 – 0,80	0,20 – 0,30
Mn	0,25 – 0,40	0,20 – 0,30
P	≤ 0,025	≤ 0,015
S	≤ 0,015	≤ 0,005
Cr	2,90 – 3,10	3,00 – 3,20
Mo	0,53 – 0,57	0,20 – 0,25

Obrázek 4.1: Rozdíly v chemickém složení oceli [14], upraveno

Pro analýzu vzorků v laboratoři byla použita nástrojová ocel 8Cr3MoV, která se svým složením nejvíce blíží oceli DHQ3. Jedná se o běžnou nástrojovou ocel používanou v ocelářském průmyslu s lepší odolností proti opotřebení. Běžně se využívá jako materiál ve válcovacích stolicích.

Podle množství uhlíku v oceli lze usoudit, že jde o nadeutektoidní perlitickou ocel. V naleptané struktuře se tedy pro začátek očekává lamelární perlit a sekundární cementit.

Laboratorní část práce se odehrávala v metalografické laboratoři. Obecně se metalografie zabývá vnitřní strukturou kovů a slitin a jejím studiem. Pomocí ní lze také kontrolovat, zda materiál trpí nějakými vadami, nebo zjišťovat, jaké má vlastnosti. Na materiálu byla také provedena zkouška tvrdosti metodou Rockwell a Vickers.



Obrázek 4.2: Použité části ingotu a jeho velikost

4.2 Metalografická analýza

Pro analýzy litého stavu byly demonstrativně vybrány části 1.0, 5.0, 9.0, aby byly vidět rozdíly ve struktuře a velikosti a počtu vad s postupným přibližováním se do středu ingotu.

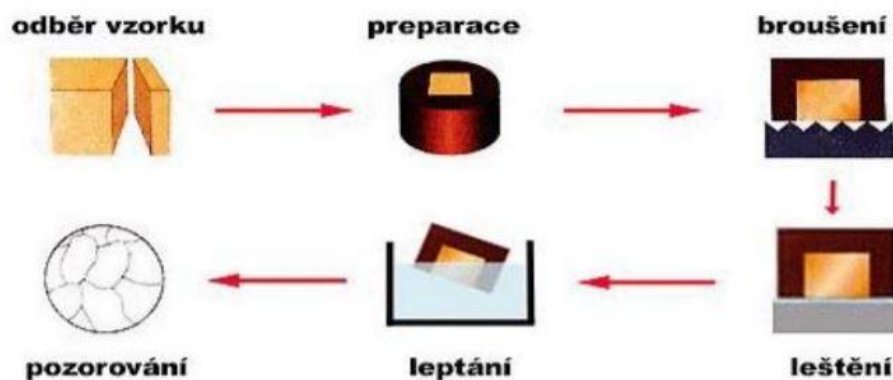
Následně proběhlo překování na hřídel. Jelikož materiál odpovídal vzorku 9.0 z litého stavu, dostaly vzorky v kovaném stavu označení 9.1 a 9.5. Vzorek 9.1 byl překován na průměr 200 mm ($K=9,2$) a vzorek 9.5 na průměr 300 mm ($K=4,1$).

Pro metalografickou analýzu je nutné mít vytvořený vzorek sledovaného materiálu. Při jeho vytváření je nezbytné držet se daného postupu, aby nebyla ovlivněna struktura. Tento metalografický vzorek lze analyzovat pouze z jedné strany, která se nazývá metalografický výbrus.

Nezbytné je také vybrání vhodného místa řezu, to musí reprezentovat celou strukturu. Při odběru vzorku je nutné se vyvarovat poškození mechanicky i tepelně. Při odřezávání je vhodné využít emulzní kapalinu. Teplota nesmí způsobit fázové transformace a nesmí nastat plastická deformace materiálu [16], [17].

Postup celé metalografické analýzy se dá shrnout do sedmi po sobě jdoucích kroků.

1. odebrání vzorku
2. preparace vzorku
3. broušení
4. leštění
5. stanovení snímků neleptané struktury
6. leptání
7. stanovení snímků leptané struktury



Obrázek 4.3: Metalografický postup [19]

4.2.1 Odebrání vzorku

Odebrání vzorku probíhá pomocí metalografické kotoučové pily principem abrazivního řezání za mokra. Je to asi nejpoužívanější způsob pro rozdělení materiálu.

Pro pilu je důležité mít vhodný kotouč, ten se vybírá na základě houževnatosti, tvrdosti materiálu, chlazení. Chladicí kapalina odstraňuje nečistoty z řezané plochy a zabraňuje tepelnému ovlivňování vzorků. Důležité je i dbát na typ pojiva a brusiva kotouče. Běžně se používají kotouče na bázi Al_2O_3 nebo SiC s pojivem na bázi pryskyřic. U kotoučů s tvrdším pojivem dochází při řezání měkkých a houževnatých materiálů k menšímu opotřebení, pro řezání tvrdých a křehkých materiálů se využívají ty s měkkým pojivem, neboť nová zrna se v řezu nachází průběžně při lámání pojiva. Obecně se řezné kotouče volí dle příslušného řezaného materiálu.

V tomto případě šlo vzorek z oceli o velikosti 3x3x1 cm, který byl odebrán z prostřední části. Použitý kotouč byl na bázi Al_2O_3 a procesní kapalina byla ve formě řezného oleje. Tímto způsobem byly vytvořeny 3 vzorky, každý pro patřičnou část ingotu, aby bylo možné zkoumat rozdíly. Všechny části a vzorky je rovněž nutné správně označit, aby nedošlo k chybě nebo záměně vzorků. V tomto případě se vzorek označil nejdříve pouhým zvýrazňovačem a po preparaci vibračním rytím [16], [17], [18].

4.2.2 Preparace vzorku

Preparace je vhodná, protože zlepší manipulaci se vzorky za zachování povrchové vrstvy a případně ostrosti hran. Před preparací musí být vzorek umytý od procesní kapaliny a osušený, aby mohl přilnout k pryskyřici [19].

Při použití poloautomatické a automatické přípravy je potřebné mít všechny preparované vzorky stejné velikosti. Vzorky malé velikosti se zalijí nebo se zalisují do umělé pryskyřice. Výsledná velikost vzorku závisí na formě, do které byl zalisován pryskyřicí nebo zalit. Velikost kruhového preparovaného vzorku se pohybuje většinou kolem 25 mm v průměru. K preparaci vzorku se používají zejména metody zalévání za tepla, za studena a lisování [1].

Cílem preparace je zachovat všechny součásti struktury a zároveň dostat dobrou kvalitu povrchu, což znamená, že povrch musí být náležitě upraven.

- povrch bez deformace, rýh a škrábanců
- rovný povrch bez cizích těles

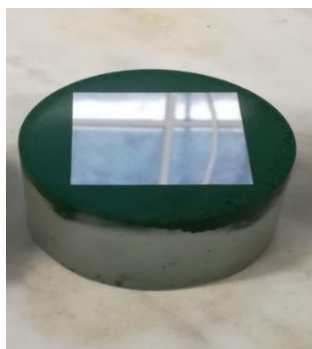
Vzorek se vloží do lisovacího zařízení společně s pryskyřicí a zalisuje se. Pro specifickou lisovací hmotu se však využívají různá plniva, například barevná. V tomto specifickém případě byla použita směs dentakrylu a MultiFastGreen montážního prášku.

Tento způsob preparace, tedy lisování za tepla, není časově náročný, nevýhodou však může být působení většího tlaku až 250 barů a působení zvýšené teploty 150-180 °C.

Využívají se takové pryskyřice, které se taví při zvýšené teplotě, a pak se vytvrdí během ochlazování, nebo které se rovnou vytvrzují za zvýšené teploty. I během lisování může dojít k různým vadám, jako jsou trhliny, praskliny nebo smršťení. Lisování za tepla většinou trvá okolo patnácti minut [16], [18].

Pracovní postup přípravy vzorku při lisování za tepla je následující.

1. vložení vzorku do lisovacího zařízení
2. přidání pryskyřice
3. ohřev, navýšování tlaku
4. výdrž na teplotě
5. ochlazení vzorku vodou vnitřního okruhu
6. vyjmutí hotového vypreparovaného vzorku



Obrázek 4.4: Metalografický preparát

Pokud by vzorek nebyl vhodný k zalisování, tedy byl citlivý na změny pomocí tlaku a teploty nebo byl příliš velký, lze použít zalévání za studena. K němu není nutné mít speciální laboratorní zařízení. Prášek se smíchá s vytvrzujícím médiem a nalije se do formy se vzorkem. Doba vytvrzení je však většinou výrazně delší, než je tomu u zalisování, a může trvat až 8 hodin [17], [18], [26].

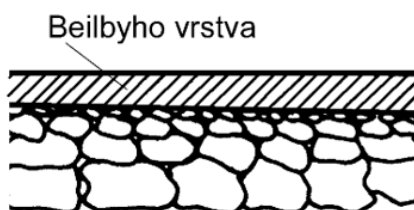
4.2.3 Broušení vzorku

Broušení má za cíl eliminovat povrchové nerovnosti na vzorku za cenu pouze minimálního poškození, které se odstraní následným leptáním. Procesem broušení se intenzivně odebrá hmota z povrchu, tento proces lze provádět ručně nebo mechanizovaně. Na průběh broušení a jakost má vliv několik faktorů.

- brusný papír
 - Jednotlivé brusné papíry mají určité zrnitosti, kde jsou brusné částice ukotvené na svém místě. Běžné se používají stále jemnější a jemnější brusné papíry pro dosažení dokonalého výbrusu.
 - Označení zrnitosti 60-4000 značí, jak velká je zrnitost brusného papíru. Největší zrnitost je 4000, tedy vybroušení je nejjemnější. Pokud se volně pohybují částice po podložce, jedná se o takzvané lapování.
 - Brusné papíry mají obecně nízkou životnost.

- brusný kotouč
 - Kotouče mohou být s částicemi SiC, Al₂O₃, ZrO₂, C ve formě diamantu.
 - Diamantové brusné kotouče slouží pro broušení keramik, slinutých karbidů a velmi tvrdých slitin železa. Kotouče s částicemi SiC, Al₂O₃, ZrO₂ slouží pro rovinné broušení slitin železa a neželezných kovů a slitin.
 - Brusné kotouče mají delší životnost než brusné papíry.
- typ brusiva a jeho tvrdost
 - Používáme Al₂O₃, SiC, ZrO₂, C ve formě diamantu, B₄C, Si₃N₄.
 - Čím tvrdší je materiál, tím tvrdší musíme použít brusivo. Pro většinu materiálů je postačující SiC nebo Al₂O₃.
- tvar částic brusiva
 - Ideálním tvarem brusiva jsou nepravidelné mnohostěny.
- velikost přitlačné síly
 - Obecně se velikost pohybuje v rozmezí 1-100 N, v tomto případě šlo o 60 N.
- rychlost otáčení kotouče
 - Rychlost otáčení se pohybuje rozmezí 30-300 otáček za minutu.
 - V tomto případě bylo použito 110 otáček za minutu.
- chlazení
 - Chladicí médium omezuje ohřívání vzorku a vznik nechtěné B-vrstvy, v tomto případě byla pro chlazení použita voda.

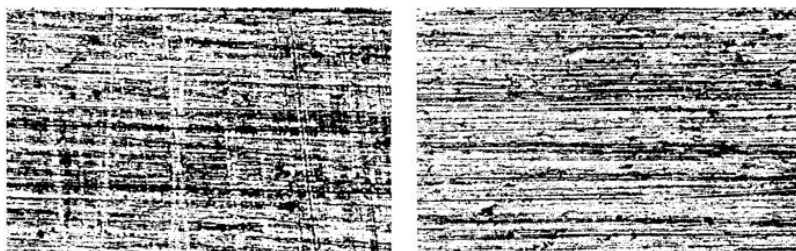
Při broušení vzniká deformačně zpevněná souvislá vrstva tvářeného kovu na povrchu, nazývá se Beilbyho vrstva (B-vrstva). Tato vrstva ovlivňuje strukturu. Při větším tlaku a rychlosti je povrch teplejší a vzniká tlustší deformovaná vrstva. Tuto vrstvu je možné eliminovat pomocí intenzivního chlazení. Běžně se její tloušťka pohybuje v desetinách milimetru.



Obrázek 4.5: Beilbyho vrstva [17]

Vzorek je během broušení, respektive mezi výměnou brusných papírů, nutné důkladné oplachovat, aby se při broušení jemnějším papírem nepoškodil povrch zbytky zrněk z hrubšího brusného papíru.

Při mechanizovaném broušení je vzorek přitlačován na brusný papír, který je připevněn na vodorovném rotujícím brusném kotouči. Motorizovaná hlava umožňuje broušení více vzorků najednou. Je však třeba si dát pozor na vyvážení, aby se všechny vzorky brousily rovnoměrně. Pokud není hlava správně vyvážená, každý vzorek se může vybrousit jinak nebo nemusí být vybroušená celá jeho plocha [16], [17], [18], [26].



Obrázek 4.6: Špatně (vlevo) a dobře (vpravo) vybroušený vzorek [17]

4.2.4 Leštění

Leštění je operace probíhající po broušení. Na rozdíl od broušení neubývá materiál z povrchu, ale deformuje se povrchová drsnost. Cílem leštění je tedy vytvoření co nejméně drsného povrchu, který je vysoce reflexní a vhodný pro pozorování. Leštěním se také eliminují nedokonalosti, tedy většinou rýhy po broušení. Proces probíhá díky leštícímu prostředku nanesenému na leštící plátno.

Nejjednodušší je leštění mechanické, které je zároveň univerzální a podobá se mechanismu broušení. Vzorek je opět přitlačen na kotouč s leštícím materiálem. Oproti broušení se používají menší síly i menší otáčky kotouče. Dojde k plastické deformaci povrchu, která odstraní nedokonalosti způsobené broušením.

Existuje několik faktorů ovlivňujících kvalitu leštění.

- leštící plátna
 - Plátna jsou na magnetických discích nebo jsou samolepící, jako materiál se používá klasicky textil (samet, satén, flanel).
- typ částic v leštících prostředcích
 - Používají se Al_2O_3 , Cr_2O_3 , MgO , C ve formě diamantu, univerzální je námi použitý diamantový prášek.
 - Velikost diamantových částic je od 15 do 0,1 mikrometru.
- velikost a tvar částic
 - Oblé částice se využívají pro zahlazení povrchu.

- chlazení
 - Stačí menší množství tekutiny, není nutné tak intenzivní chlazení jako u broušení. Pro chlazení se používá ethanol, množství se však nesmí přehnat, aby se nesmyl diamantový prášek.

Povrch se leští tak dlouho, než je kovově lesklý bez rýh a škrábanců. Stejně jako u broušení je nutné jej opláchnout, tentokrát v ethanolu, aby se smyly zbylé částice [16], [17], [18], [26].

4.2.5 Hodnocení vzorků v neleptaném stavu

Při hodnocení vzorků v nenaleptaném stavu se využívá světelný mikroskop. V materiálu je několik charakteristik pro hodnocení.

- nečistoty ve struktuře
 - nekovové vměstky (sulfidy, oxidy, nitridy)
- nečistoty z technologického procesu
 - strusky, oxidické pleny
- necelistvost
 - trhliny, praskliny, póry

Při leštění byl povrch vyhlazen. Hladká a rovná plocha se zobrazuje bíle a trhliny a slévárenské vady se zobrazují tmavě, až černě. Měkčí fáze se brousí a leští rychleji než tvrdší, proto vzniká na povrchu reliéf, který se následně pozoruje [16], [18].

4.2.6 Leptání

Leptání je závěrečná část přípravy metalografického vzorku a slouží k vyvolání mikrostruktury součástí. Tuto mikrostrukturu zakrývá B-vrstva, které je nutné se zbavit. Leptání se provádí za pomoci leptadla určité koncentrace a teploty po určitou dobu.

Vyvolání struktury je při přípravě metalografického vzorku tou nejcitlivější operací. Každý druh materiálu potřebuje speciální techniku leptání včetně vhodně zvoleného leptadla. Leptadlo se volí podle zkušenosti nebo podle návodů v literatuře.

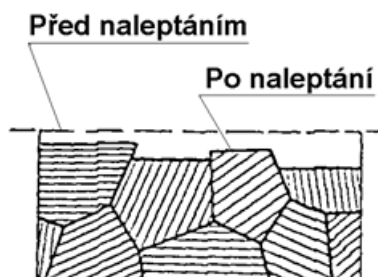
Nejběžnějším způsobem zviditelnění struktury je chemické leptání a méně užívané jsou elektrochemické a tepelné leptání [1], [16].

Nejdříve se leptační činidlo zaměřuje na místa s vyšší energií, jako jsou hranice zrn, fázová rozhraní nebo právě B-vrstva. V našem případě bylo použito leptání chemické pomocí 2% Nitalu.

Postup leptání je následovný.

1. ponoření vzorku do leptačního činidla na vhodnou dobu
2. neutralizace ethanolem nebo formaldehydem
3. rychlé osušení (v našem případě pomocí fénu pod úhlem)

Je nutné leptat jen tak dlouho, aby byly vidět požadované částice. Při delším leptání se viditelnost struktury nezlepší, naopak se „přeleptá“ a je nutné vzorek znovu připravit, tedy znovu vybrousit a naleštit [17], [18], [26].



Obrázek 4.7: Vzorek před a po naleptání [17]

4.3 Teoretická úvaha možných očekávaní u jednotlivých vzorků

4.3.1 Litý stav

Očekávané jsou běžné vady, které vznikly v průběhu výroby ve slévárně.

- dutiny
 - bubliny, staženiny, řediny
- vady mikrostruktury
 - vměstky
- nehomogenita
 - shluky vměstků, oxidů, sulfidů, ředin, vycezenin apod.
- vady chemického složení
- vady povrchu
- hrubozrnnost
 - pokud je odlitek velký

4.3.2 Kovaný stav

Hrubozrnná struktura z odlévaného ingotu se upraví pomocí kování, aby se zlepšily mechanické vlastnosti materiálu. Ingot se rovnoměrně ohřeje na teplotu, při níž je deformace snadná. Důležitý je vhodně stanovený interval teplot, aby se dosáhlo rekrytalizace bez nadměrného růstu zrna. Výsledkem potom bude jemnozrnná struktura.

V tomto stavu lze očekávat významné snížení výskytu vad. Ačkoliv budou stále určité vady přítomny, rozhodně budou v menším zastoupení než v litém stavu.

Počítá se hlavně s výskytem následujících vad.

- vměstky
- heterogenita

4.3.3 Obecná úvaha

Pro hodnocení výsledků práce se porovnává to, jak vypadají jednotlivé lité vzorky 1.0, 5.0, 9.0 a kované vzorky 9.1 a 9.5 vzhledem k dříve uvedeným předpokladům a vzhledem jeden ke druhému.

Vzhledem k velikosti ingotu není předpokládána nijak zvlášť velká hrubozrnnost. Předpokládá se však, že čím více se blíží střed ingotu, tím budou vzorky obsahovat více vad. Obecně při přechodu od vzorku 1.0 ke vzorku 9.0 je na místě očekávat kromě více vad také hrubnutí zrna a větší vyžihání. Následkem toho by vzorek 9.0 měl být nejměkčí. To se pojí se sferoidizací, kdy se globularizují lamely cementitu. Při procesu sferoidizace se snižuje tvrdost. Očekává se tedy to, že vzorek 9.0 bude podléhat tomuto procesu více než vzorek 1.0. Sferoidizování zajistí, že se bude vzorek dobře obrábět a obecně bude vytvořená vhodná struktura pro zušlechťování.

U vzorků v kovaném stavu se očekává výrazné zlepšení, co se týče vad. Zejména se očekává snížení počtu trhlin a snížení počtu a zmenšení velikosti vměstků.

Obecně si je však nutné si uvědomit, že při analýze jednotlivých vzorků dané vzorky demonstrativně reprezentují celou materiálovou strukturu dané části ingotu.

V této práci nebylo provedeno hodnocení vad povrchu ani chemická analýza, proto nelze přesně technicky zhodnotit, zda předpoklady byly u těchto vad zcela správné. Práce byla zaměřena primárně na zkoumání mikrostruktury vzorků v metalografické laboratoři.

5 Výsledky experimentálních měření

5.1 Měření tvrdosti

Tvrdost se definuje jako odpor materiálu proti vniku cizího tělesa a stanoví se tak, že se indentor z tvrdého materiálu zatlačí do zkoumaného materiálu. Následně se posuzuje vzniklá deformace povrchu podle zvolené metody [1].

Tvrdost byla změřena na třech různých místech metodou Rockwell a Vickers, hodnota tvrdosti z metody Vickers byla ještě přepočítána.

Jako hodnota výstupní tvrdosti se bere průměrná hodnota ze všech tří naměřených míst na vzorku. Před měřením tvrdosti bylo nutné zajistit, aby byl povrch vzorku hladký a rovný a aby na něm nebyla cizí tělíska.

5.1.1 Litý stav

- vzorek 1.0
 - místo 1: 13,6 HRC, 229,6 HV, 98,2 HRB
 - místo 2: 16,2 HRC, 220,1 HV, 96,7 HRB
 - místo 3: 15,2 HRC, 219,3 HV, 96,5 HRB

Průměrná tvrdost pro vzorek 1.0: 15 HRC, 223 HV, 97,1 HRB

- vzorek 5.0
 - místo 1: 14,9 HRC, 211,4 HV, 95,2 HRB
 - místo 2: 10,9 HRC, 214 HV, 95,6 HRB
 - místo 3: 15,1 HRC, 214,6 HV, 95,7 HRB

Průměrná tvrdost pro vzorek 5.0: 13,6 HRC, 213,3 HV, 95,5 HRB

- vzorek 9.0
 - místo 1: 9,6 HRC, 211,6 HV, 95,2 HRB
 - místo 2: 5,7 HRC, 200,5 HV, 93,1 HRB
 - místo 3: 12 HRC, 206,3 HV, 94,2 HRB

Průměrná tvrdost pro vzorek 9.0: 9,1 HRC, 206,1 HV, 94,2 HRB

Ze změřené tvrdosti lze konstatovat, že ocel vzorku 9.0 je opravdu měkčí, než je tomu v místě 1.0. Dřívější předpoklad potvrdilo zkoušení tvrdosti metodou Rockwell. Pro ověření správnosti byla provedena také zkouška metodou Vickers, která předpoklady svými výsledky také potvrdila.

Při měření tvrdosti pomocí metody Vickers je potřeba brát do úvahy mikrotvrdost při zatížení měkkého materiálu malou silou. Do výsledné tvrdosti se tak promítá elastická složka, materiál se jeví jako tvrdší a výsledek se stává nepřesným. Tato metoda není vhodná pro heterogenní materiály s hrubým zrnem, neboť existuje možnost vtisku do zrna některé fáze a měření potom neukazuje celkovou tvrdost součásti.

5.1.2 Kovaný stav

- vzorek 9.1
 - místo 1: 14,9 HRC, 225,8 HV, 97,6 HRB
 - místo 2: 15,2 HRC, 209,7 HV, 94,9 HRB
 - místo 3: 15 HRC, 214,8 HV, 95,5 HRB

Průměrná tvrdost pro vzorek 9.1: 15 HRC, 216,8 HV, 96 HRB

- vzorek 9.5
 - místo 1: 12,6 HRC, 214,8 HV, 95,5 HRB
 - místo 2: 12,1 HRC, 215,6 HV, 95,8 HRB
 - místo 3: 13,6 HRC, 215,9 HV, 95,9 HRB

Průměrná tvrdost pro vzorek 9.5: 12,8 HRC, 215,4 HV, 95,7 HRB

Na základě provedeného měření lze konstatovat, že hodnota tvrdosti v kovaném stavu u vzorku 9.1, kovaného na průměr 200 mm, dosahuje podobných hodnot jako vzorek 1.0 z kraje ingotu. U vzorku 9.5 se hodnota tvrdosti podobá hodnotě tvrdosti ze vzorku 5.0.

Obecně se dá tvrdit, že změřená materiálová tvrdost vyšla poměrně nízká. Tato nízká tvrdost se přisuzuje tomu, že se jedná o perlitickou ocel a materiál byl důkladně vyžehán, aby mohl být následně obroben.

5.2 Mikrostrukturní analýza

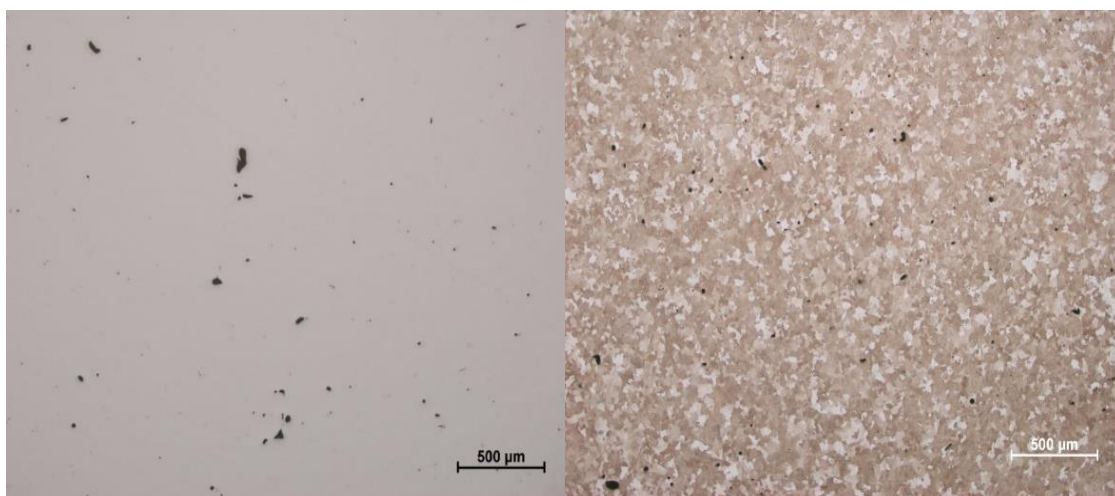
Odebrané vzorky byly připraveny výše popsáním způsobem a následně byly v naleptaném a neleptaném stavu dokumentovány světelnou mikroskopií. Pro prezentaci jsou vybrány reprezentativní fotografie dokumentující zjištěný stav.

5.2.1 Vzorek 1.0 – litý stav

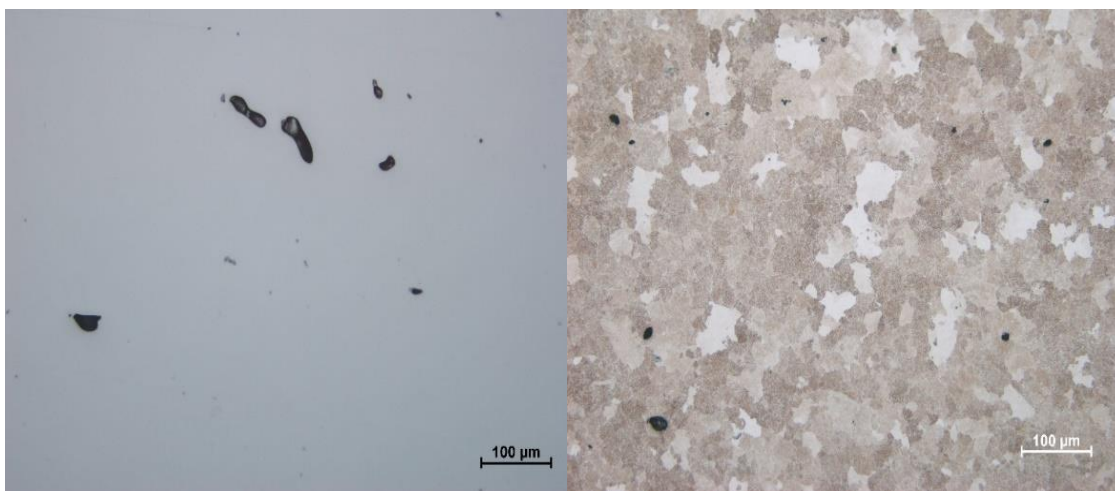
Jedná se o vzorek z kraje ingotu. Jde tedy o oblast, která chladla poměrně rychle, ze zkoumaných vzorků chladla dokonce nejrychleji.

V naleptaném stavu lze vidět malé dutiny a vměšky. Tvar vměstků není jednoznačně kulatý, pravděpodobně se tedy nejedná o oxidické vměšky. Přesnější určení toho, o jaké vměšky jde, by vyžadovalo chemickou analýzu.

V neleptaném stavu je vidět jemná perlitická strukturu.



Obrázek 5.1: Vzorek 1.0 před a po naleptání při zvětšení 50x



Obrázek 5.2: Vzorek 1.0 před a po naleptání při zvětšení 200x

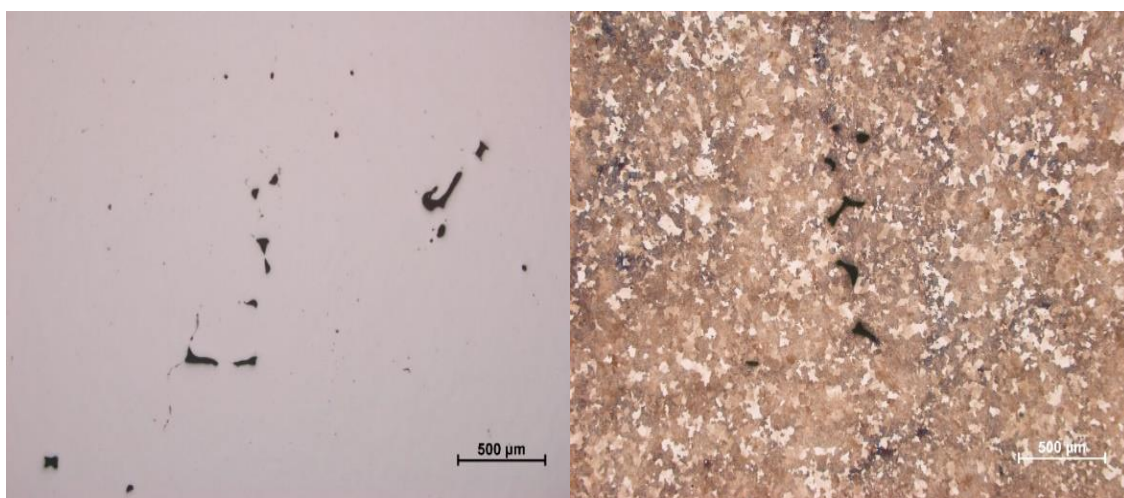
5.2.2 Vzorek 5.0 – lité stavy

Jedná se o vzorek odebraný zhruba ze třetiny průměru ingotu. Jedná se tedy o oblast s výrazně pomalejším ochlazováním, než jaké probíhalo u vzorku 1.0.

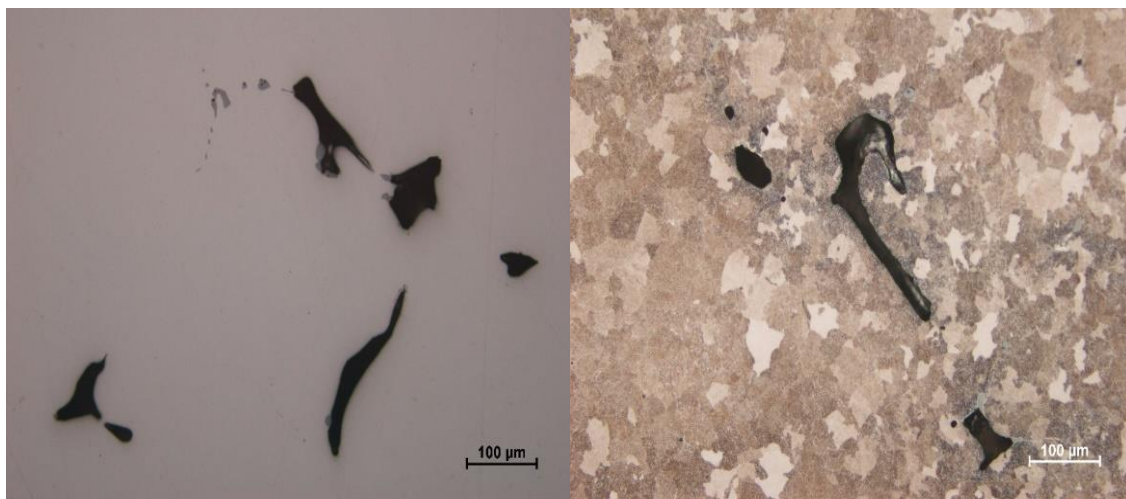
Ve srovnání se vzorkem 1.0 se u neleptaného stavu objevuje větší množství vměstků a dutin. Lze také konstatovat, že vady typu dutin se zvětšují a vměstky jsou větší a četnější.

Dále jsou vidět dendrity s několika staženinami v mezidendritickém prostoru. Je možno rozpoznat dutiny související s tvarem původních austenitických dendritů, jedná se tedy o mezidendritické staženiny.

V naleptaném stavu je vidět hrubší perlitická struktura oproti předchozímu vzorku. Také jde pozorovat dendrity s několika staženinami v mezidendritickém prostoru.



Obrázek 5.3: Vzorek 5.0 před a po naleptání při zvětšení 50x



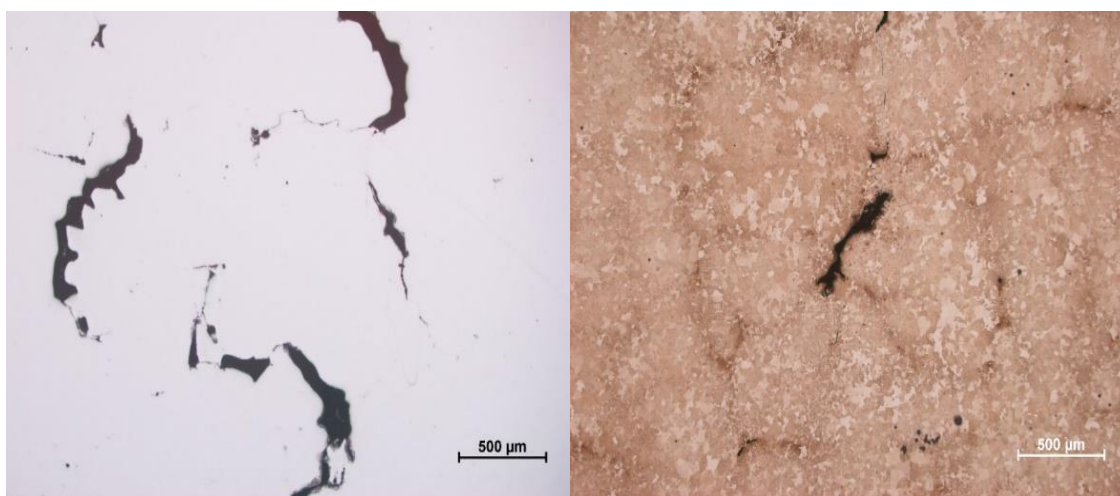
Obrázek 5.4: Vzorek 5.0 před a po naleptání při zvětšení 200x

5.2.3 Vzorek 9.0 – lity stav

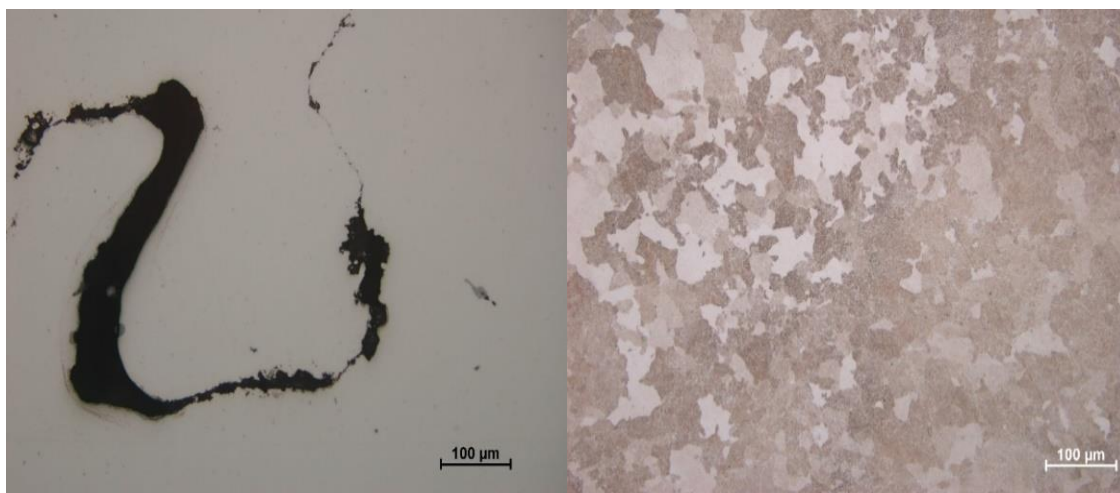
Jedná se o vzorek odebraný ze středové oblasti ingotu. Již pouhým okem je vidět, že oproti vzorkům 1.0 a 5.0 obsahuje větší množství vad.

Z hlediska ochlazování jde o materiál s nejpomalejším tuhnutím i následným ochlazováním. Výsledkem je přítomnost nejen staženin, ale i trhlín, které v některých případech kopírují tvar okrajů dendritů. To se dá pozorovat na obrázcích v nenaleptaném stavu.

V naleptaném stavu je oproti předchozím vzorkům více zhrublý perlit a také jde vidět staženina v mezidendritickém prostoru. Navíc je možno pozorovat rozdílnou reakci mikrostruktury materiálu na leptání v koncových a okrajových částech dendritů. To může ukazovat na významnější chemické rozdíly způsobené dendritickou segregací.



Obrázek 5.5: Vzorek 9.0 před a po naleptání při zvětšení 50x



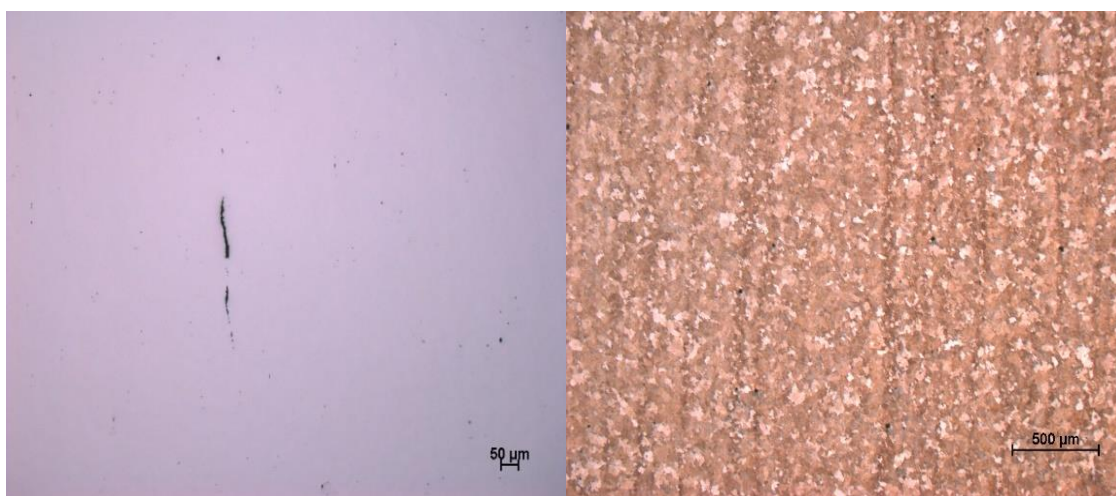
Obrázek 5.6: Vzorek 9.0 před a po naleptání při zvětšení 200x

5.2.4 Vzorek 9.1 – kovaný stav

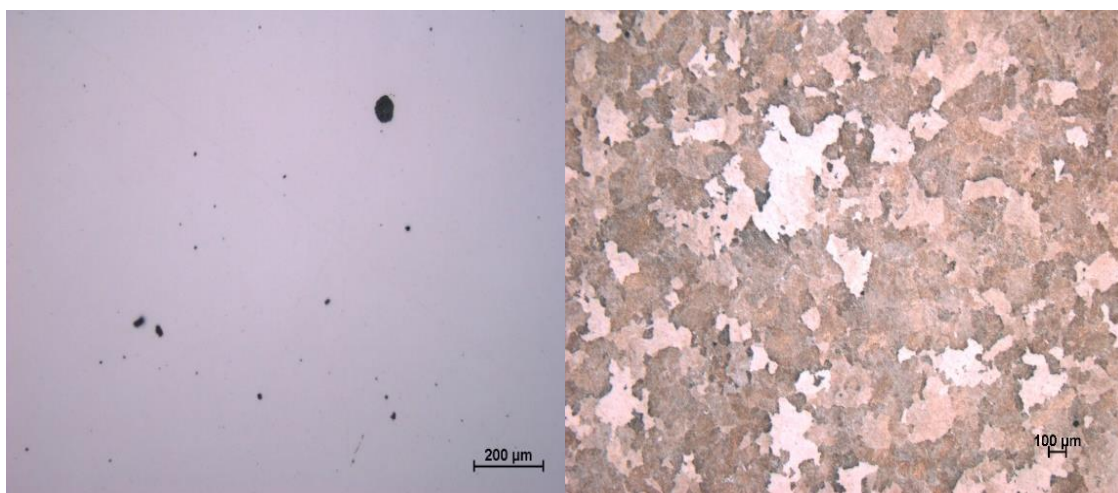
Vzorek 9.1 byl podroben deformaci na průměr 200 mm, byl tedy vykován více než následující vzorek 9.5.

U neleptaného stavu lze pozorovat protvářený vměstek, zřejmě se jedná o sulfidický typ MnS. Kromě něj se zde také vyskytují drobné a kulaté vměstky, které jsou nejspíše oxidické.

V naleptaném stavu je vidět jemná perlitická struktura vykazující zřejmou pruhovitou morfologii reakce na leptání, která souvisí s chemickou segregací při dendritickém tunutí původního ingotu.



Obrázek 5.7: Vzorek 9.1 před a po naleptání při zvětšení 50x



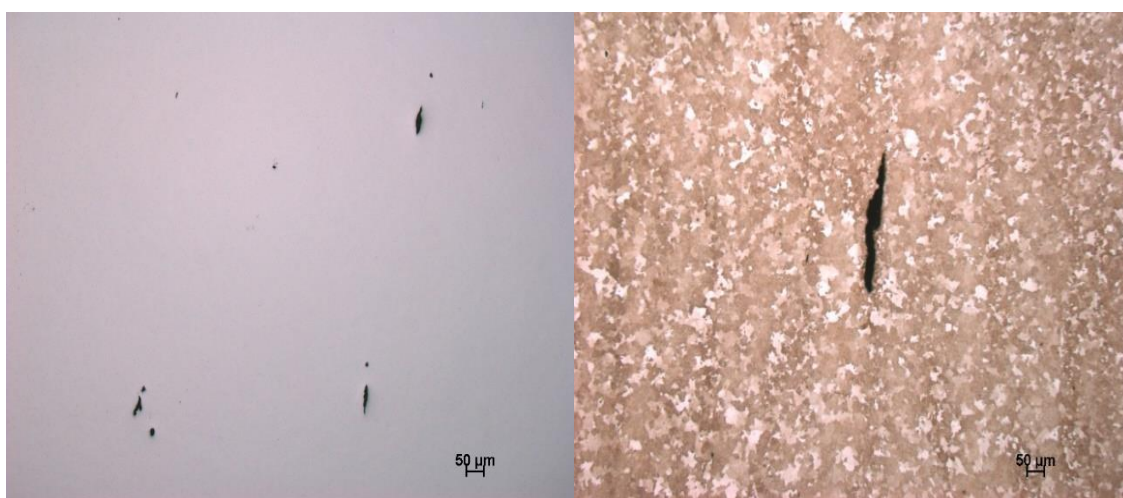
Obrázek 5.8: Vzorek 9.1 před a po naleptání při zvětšení 200x

5.2.5 Vzorek 9.5 – kovaný stav

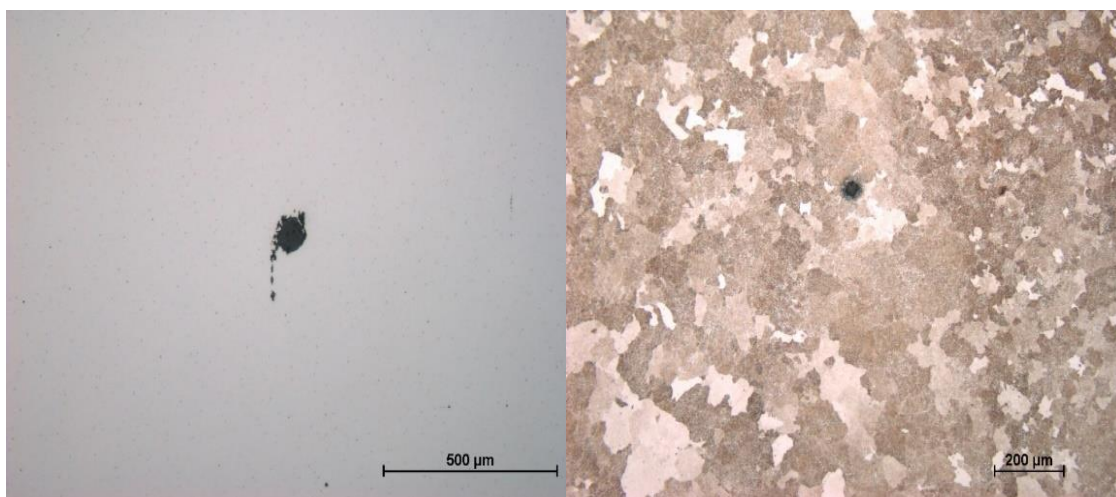
Vzorek 9.5 byl podroben deformaci na průměr 300 mm, byl tedy vykován méně než předchozí vzorek 9.1.

U neleptaného stavu jsou místy vidět vměstky, u nekulatých se zřejmě opět jedná o typ MnS. Malé a kulaté vměstky lze považovat za oxidické, na obrázku 5.11 je vidět oxidosulfidický vměstek.

V naleptaném stavu se vyskytuje oproti vzorku 9.1 hrubnoucí, ačkoliv stále jemná, perlitická struktura také vykazující pruhovitou morfologii reakce na leptání. Jak už bylo řečeno dříve, tato reakce souvisí s chemickou segregací při dendritickém tuhnutí původního ingotu. Kromě toho lze vidět také staženinu.



Obrázek 5.9: Vzorek 9.5 před a po naleptání při zvětšení 50x



Obrázek 5.10: Vzorek 9.5 před a po naleptání při zvětšení 200x

6 Diskuze

Z hlediska mikrostrukturní analýzy lze napříč vzorky pozorovat několik měnících se charakteristik.

Především je to přítomnost vměstků, kdy je patrné, že s klesající rychlostí tuhnutí a s pozicí vzorku blíže ke středu je materiál více kontaminovaný nečistotami, vadami. Tento fakt je zachován i u prokovaných vzorků, kde ovšem dochází k deformaci tvářitelných vměstků, zatímco netvářitelné oxidické vměstky si svůj charakteristický kulatý tvar ponechávají.

Z hlediska velikosti zrna je možné pozorovat hrubnutí struktury směrem do středu ingotu, zde je to způsobeno pouze rychlostí ochlazování přes dvoufázovou oblast solid-likvid. S velikostí primárních dendritů také souvisí míra chemické heterogenity materiálu způsobená dendritickou segregací, kde na vzorku ze středu ingotu je patrná výrazně odlišná reakce na leptání. Tato heterogenita je patrná i na vykovaných vzorcích.

U vykovaných vzorků došlo také k vymizení defektů typu trhlin, které byly způsobeny zejména v centrální části ingotu napětími od smršťování nově tvořených dendritů. Obecně jsou necelistvosti u kovaných vzorků svařené.

Společně s těmito charakteristikami se mění také tvrdost vzorků. Čím blíže středu se vzorek nachází, tím je tvrdost nižší. To je způsobeno přeměnou lamelárního perlitu na globulární, tento jev nazýváme sferoidizace.

Při porovnání litého a kovaného stavu lze konstatovat, že i navzdory tomu, že jsou kované vzorky vykované z lité části nejvíce zatížené vadami, tak ve výsledku trpí vadami méně než jakýkoliv litý vzorek nebo přinejmenším srovnatelně se vzorkem z okraje ingotu.

ZÁVĚR

V této práci byla teoreticky popsána výroba ocelových ingotů společně s vlivy, které ovlivňují jejich kvalitu. Práce také obsahuje metalografickou analýzu vzorků z ingotu jak v litém stavu, tak v kovaném stavu.

Teoretická část práce popisuje kromě výroby ingotů také vnitřní a vnější vady, které se u ocelí nachází. Experimentální část práce rozebírá postup metalografické analýzy vzorků společně s měřením tvrdosti, zkoumáním výskytu vad, zkoumáním mikrostruktury. Před samotným hodnocením mikrostruktury je prezentována krátká úvaha spolu s očekáváním, co lze od různých vzorků čekat z hlediska tvrdosti, vad a velikosti zrna. Finální část práce tvoří samotné výsledky experimentální části. V této části práce je prezentována změřená tvrdost, na což navazuje série fotografií mikrostruktury s jejich základním vyhodnocením.

Zkoušení tvrdosti potvrdilo, že ocel blíže středu ingotu je měkčí. To potvrdily obě použité měřicí metody.

Potvrdilo se také to, že se v části materiálu blíže ke středu skutečně vyskytuje více vad a také hrubší zrno. Z přiložených fotografií mikrostruktury lze počet i velikost vad, stejně jako hrubost zrna, vidět na první pohled.

Co se týče kovaného stavu, tak oproti litému stavu je výrazně méně zatížen vadami. I v tomto případě se tedy potvrdily dřívější předpoklady.

Lze konstatovat, že všechny teoretické předpoklady, uvedené v kapitole 4.3, ohledně vad, hrubnutí zrna a tvrdosti byly správné, zjištěné výsledky jim odpovídají.

POUŽITÉ ZDROJE

- [1] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I.* 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II.* 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [3] FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. ISBN 80-85867-95-8.
- [4] CHVOJKA, Jan. *Vady ingotů.* Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, n. p., 1968.
- [5] GORŠKOV, I.E. *Lití ingotů z neželezných kovů a slitin.* Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, n. p., 1955.
- [6] CALLISTER, William D. *Materials science and engineering: an introduction.* 6th ed. New York: Wiley, 2003. ISBN 04-711-3576-3.
- [7] MICHALEK, Karel, Ladislav SOCHA, Zdeněk ADOLF a Jiří BAŽAN. *RAFINACE A ODLÉVÁNÍ OCELI: studijní opora* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2020-02-28]. ISBN 978-80-248-3351-4. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/03_Rafinace_a_odlevani_oceli/Michalek_Socha_Rafinace_a_odlevani_oceli.pdf.
- [8] HAMPL, Jiří. *METALURGIE SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN: studijní opora* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2020-03-17]. ISBN 978-80-248-3351-4. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/09_Metalurgie_slevarenskych_slitin/Hampl_Metalurgie_slevarenskych_slitin.pdf.
- [9] ELBEL, Tomáš. *DIAGNOSTIKA A ŘÍZENÍ KVALITY ODLITKŮ: studijní opora* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2020-04-16]. ISBN 978-80-248-3356-9. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/08_Diagnostika_a_rizeni_kvality_odlitku/Elbel_Diagnostika_a_rizeni_kvality.pdf.
- [10] TKADLEČKOVÁ, Markéta, Karel MICHALEK, Karel GRÝC a Ladislav SOCHA. *ZÁKLADY 3D MODELOVÁNÍ METALURGICKÝCH PROCESŮ: studijní opora* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2020-02-28]. ISBN 978-80-248-3350-7. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/02_Zaklady_3D_modelovani_metalurgick%C3%BDch_procesu/Tkadlecko_va_Zaklady_3D_modelovni_metalurgickych_procesu.pdf.
- [11] MAZANCOVÁ, Eva. *TECHNICKÉ MATERIÁLY I. KOVOVÉ MATERIÁLY: učební text* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012 [cit. 2020-03-16]. ISBN 978-80-248-2577-9. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TM1/Technicke%20materialy%20I.pdf>.
- [12] JAKUBEC, Petr. *Vady ocelových odlitků.* Brno, 2015. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Vítězslav Pernica.

- [13] OTÁHAL, Vladislav. *Vady Odlitků, Atlas vad, Železené a neželezné slitiny: výtah* [online]. Brno: MetalCasting and Foundry Consult, Otáhal Vlastislav [cit. 2020-03-26]. ISBN 978-80-248-2577-9. Dostupné z: http://otahalconsult.cz/wp-content/pdf/Vady_odlitku_vytah.pdf
- [14] KOŽÁK, Petr. *Faktory ovlivňující kvalitu kovářských ingotů určených pro pracovní válce z pohledu odlévání*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Miroslav Hála, Csc.
- [15] PACAL, Bohumil a Pavel DOLEŽAL. *Struktura a vlastnosti slitin metastabilní soustavy železo – karbid železa (Fe – Fe₃C): studijní opora* [online]. Vysoké učení technické v Brně [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/svms/index.htm>
- [16] DOLEŽAL, Pavel, Petra PAVLÍKOVÁ a Simona HUTAŘOVÁ. *Příprava a hodnocení materiálografických vzorků: studijní opora* [online]. Vysoké učení technické v Brně [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <http://imse.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/phmv/index.php>
- [17] MOLLIKOVÁ, Eva. *Zkoušení materiálů a výrobků: studijní opora* [online]. Vysoké učení technické v Brně [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/Index.html>
- [18] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii: studijní text* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
- [19] NEJEDLÝ, Tomáš. *Využití metalografie ve strojírenství*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Votava, Ph.D.
- [20] ELBEL, Tomáš a kolektiv. *Vady odlitků ze slitin železa*. Brno: MATECS, 1992.
- [21] ŠURAL, Richard. *Vliv podmínek odlévání a tuhnutí na vnitřní jakost ingotu se zaměřením se na oceli pro válce*. Ostrava, 2011. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Vlastimil Vlk, Ph.D.
- [22] STRÁNSKÝ, Lubomír. *Základy hutnické výroby oceli: studijní text* [online]. Brno: VUT Brno [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/01a%20-%20Vyroba%20Oceli.pdf
- [23] STRÁNSKÝ, Lubomír a Bohumil PACAL. *Chemické složení slitin železa: studijní text* [online]. Brno: VUT Brno [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/01b%20-%20Chemicke%20slozeni.pdf
- [24] JAKUBČÍKOVÁ, Lucie. *Návrh technologie a ověření výroby malých ocelových ingotů*. Brno, 2019. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.
- [25] *Tuhnutí, krystalizace a reakce v tuhém stavu: studijní text* [online]. Brno: VUT Brno [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/um/prednasky/06-BUM%20-%20tuhnuti,%20krystalizace%20a%20reakce%20v%20tuhem%20stavu.pdf>
- [26] *Metalografie I: Návod k laboratorním* [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2018 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Metalografie%20I.pdf?redirected>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Odlévání oceli horem [7].....	12
Obrázek 1.2: Odlévání oceli spodem [7]	13
Obrázek 1.3: Porovnání výroby klasicky a kontinuálním litím [22], upraveno ...	13
Obrázek 1.4: Schéma kontinuálního lití [10]	14
Obrázek 1.5: Schéma kontinuálního lití v horizontální formě [7]	14
Obrázek 1.6: Různé tvary předlitků [7].....	15
Obrázek 2.1: Diagram metastabilní soustavy Fe-Fe ₃ C [15]	16
Obrázek 2.2: Vliv uhlíku na teploty martenzitické přeměny [3].....	17
Obrázek 2.3: Vliv legur na eutektoidní teplotu (vlevo) a jejich množství na koncentraci uhlíku (vpravo) [23]	18
Obrázek 2.4: Faktory ovlivňující strukturu oceli [14].....	20
Obrázek 2.5: Změna volné entalpie tekuté a tuhé fáze v závislosti na teplotě [14].....	21
Obrázek 2.6: Model dendritu [25].....	22
Obrázek 2.7: Tvorba dendritu [24]	23
Obrázek 2.8: Vnitřní stavba dendritů v závislosti na počtu zárodků a rychlosti ochlazování [14].....	23
Obrázek 3.1: Schéma stvolové vycezeniny (vlevo) a mezerové vycezeniny (vpravo) [20], upraveno	30
Obrázek 3.2: Schéma vzniku staženin [4], upraveno	31
Obrázek 3.3: Schéma ředin [20], upraveno	31
Obrázek 3.4: Zleva doprava seřazené vměstky I. typu, II. typu, III. typu, IV. typu [20].....	32
Obrázek 4.1: Rozdíly v chemickém složení oceli [14], upraveno	33
Obrázek 4.2: Použité části ingotu a jeho velikost.....	33
Obrázek 4.3: Metalografický postup [19].....	34
Obrázek 4.4: Metalografický preparát	36
Obrázek 4.5: Beilbyho vrstva [17]	37
Obrázek 4.6: Špatně (vlevo) a dobře (vpravo) vybroušený vzorek [17]	38
Obrázek 4.7: Vzorek před a po naleptání [17]	40
Obrázek 5.1: Vzorek 1.0 před a po naleptání při zvětšení 50x	45
Obrázek 5.2: Vzorek 1.0 před a po naleptání při zvětšení 200x	45
Obrázek 5.3: Vzorek 5.0 před a po naleptání při zvětšení 50x	46
Obrázek 5.4: Vzorek 5.0 před a po naleptání při zvětšení 200x	46
Obrázek 5.5: Vzorek 9.0 před a po naleptání při zvětšení 50x	47
Obrázek 5.6: Vzorek 9.0 před a po naleptání při zvětšení 200x	47
Obrázek 5.8: Vzorek 9.1 před a po naleptání při zvětšení 50x	48
Obrázek 5.9: Vzorek 9.1 před a po naleptání při zvětšení 200x	48
Obrázek 5.10: Vzorek 9.5 před a po naleptání při zvětšení 50x	49
Obrázek 5.11: Vzorek 9.5 před a po naleptání při zvětšení 200x	49