



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VMĚSTKY V OCELOVÝCH ODLITCÍCH

INCLUSIONS IN STEEL CASTINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Miloš Kaněra

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Miloš Kaněra**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

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:

Vměstky v ocelových odlitcích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vměstky v oceli, které jsou všeobecně produktem metalurgického zpracování, mají vliv na její užité vlastnosti. Neustále rostoucí požadavky na jakost a plné využití produktů stupňují nároky na použité materiály. Ocel, jakožto jeden z nejrozšířenějších konstrukčních materiálů, ze kterého se vyrábějí ve slévárnách polotovary, obsahuje vždy určitý podíl vměstků. Čistota materiálu je potom rozhodujícím činitelem jejich jakosti a užitných vlastností.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je pomocí rešerše shrnout základní poznatky o vměstcích v litých ocelích.

Seznam doporučené literatury:

- MITURA, K., S. LANDOVÁ. Vměstky v oceli a jejich vliv na užité vlastnosti oceli. Praha: SNTL, 1986.
- STRÁNSKÝ, K. Thermodynamics of formation of sulphides at solidification. Hutnické listy, 38, 1983, s. 768.
- LEVIČEK, P., K. STRÁNSKÝ. Metalurgické vady ocelových odlitků. Praha: SNTL, 1984. 269 s.
- CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2000. 288 p. ISBN 0-7506-1696-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

KANĚRA Miloš: Vměstky v ocelových odlitcích

Práce předkládá základní poznatky a rozdělení o vměstcích, které svou přítomností ovlivňují jakost a užití vlastnosti ocelových odlitků. Se zaměřením na základní skupinu exogenních a endogenních vměstků byl vypracován přehled tvarů, složení, podmínek pro vznik a reakce taveniny ve styku s okolními vlivy. Na základě přítomnosti charakteristických vměstků mají vliv na technologické vlastnosti obsahující tvařitelnost nebo na únavové chování spadající do mechanických vlastností. Neustále rostoucí požadavky tak zvyšují důležitost prevence, popřípadě snížení podílu nečistot za podpory rafinace oceli nebo modifikace vměstků. Následnými metodami identifikace je vyhodnocena úspěšnost navržených opatření pro zlepšení kvality.

Klíčová slova: exogenní a endogenní vměstky, rafinace, modifikace

Abstract

KANĚRA Miloš: Inclusions in steel castings

This thesis presents basic knowledge and dividing about inclusions which, by their presence, influence quality and used property of steel casts. With focusing on basic group of exogenous and endogenous inclusions, the abstract of shapes was made as well as composition, condition for emergence and the reaction of melt which is in touch with surrounding impacts. The presence of characteristic inclusions influence technological dimension containing formability or fatigue behaviour falling into mechanical dimension. Constantly growing demands increase the importance of prevention, eventually reduction of impurity fraction with the help of steel refinement or inclusion modification. Success of suggested arrangements for quality improving is analysed by the following methods of identification.

Keywords: exogenous and endogenous inclusions, refinement, modification

Bibliografická citace

KANĚRA, Miloš. *Vměstky v ocelových odlitcích*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113049>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.

Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 22.5.2019

.....

Podpis

Poděkování

Tímto děkuji panu Ing. Vítězslavu Pernicovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

Obsah

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Úvod.....	10
1 Identifikace vměstků.....	11
2 Obecné rozdělení vměstků.....	12
2.1 Morfologické typy vměstků.....	12
2.2 Dělení podle teploty.....	15
2.3 Rozdělení podle velikosti.....	16
3 Exogenní vměstky.....	17
3.1 Reoxidační procesy.....	17
3.2 Reakce roztavené oceli se žáruvzdornými hmotami.....	19
3.4 Reakce kovu s pískovou formou.....	20
3.3 Proces reakce roztavené oceli a strusky.....	20
3.4 Další vlivy na tvorbu vměstků.....	21
3.4.1 Vliv proudění na průběh reoxidace.....	21
3.4.2 Vliv tloušťky stěny odlitku na tvorbu sulfidických vměstků.....	21
4 Endogenní vměstky.....	23
4.1 Kyslík v roztaveném železe.....	23
4.2 Odezva roztavené oceli na dezoxidovala.....	24
4.3 Termodynamika vzniku endogenních vměstků.....	26
4.4 Vznik nové fáze.....	27
4.5 Rozdělení endogenních vměstků podle údobí jejich vzniku.....	28
5 Vliv vměstků na vlastnosti oceli.....	30
6 Prevence a odstranění vměstků.....	34
6.1 Rafinace oceli.....	34
6.1.1 Rafinace kovu inertními plyny.....	35

6.1.2 Rafinace pomocí syntetických strusek	36
6.2 Vakuová rafinace oceli.....	36
6.2.1 Vakuové odplynění oceli v pánvi	37
6.3 Vyplování vměstků	37
6.4 Modifikace vměstků v oceli	38
6.5 Filtrace taveniny	39
7 Metody identifikace	42
7.1 Metoda chemická	42
7.2 Metoda magnetická	43
7.3 Identifikace světelným mikroskopem	43
7.4 Identifikace mikroanalyzátory	44
8 Závěry	45
9 Seznam použitých zdrojů.....	46
10 Seznam použitých zkratk a symbolů.....	52
11 Seznam obrázků	53
12 Seznam tabulek	54

Úvod

Objevení kovů ve starověku, a především železa, byl bezesporu objev nejvýznamnější. [1] Zpracování kovů se po staletí vyvíjelo a zdokonalovalo, během tohoto procesu se získané poznatky předávaly z generace na generaci. Teprve na přelomu 18. a 19. století v období průmyslové revoluce se začaly využívat vědecké poznatky vedoucí ke zvýšení jakosti ocelí. [2] Od té doby tato snaha stále trvá, neboť neustále navyšující se nároky na vlastnosti ocelí zasahují do pohledu vnějšího jako je konstrukční řešení, tak na pohled vnitřní jako chemické složení.

Ocel je možné zpracovávat dvěma způsoby, a to tvářením nebo technologií odléváním, která je odvětvím slévárenství. Hlavní spotřebitelem odlitků je především automobilový, energetický průmysl, stavebnictví, ale odlitky lze najít ve všech dalších oborech. [3] A ačkoliv jsou odlitky nepostradatelné, vždy budou obsahovat element nedokonalosti jako vše na světě.

Nepříjemným problémem, který může vyústit v nebezpečné situace, jsou vady ocelových odlitků. Každá vada je výslednicí mnoha příčin. Od chemického složení, nevhodně zvolených surovin, nekázně pracovníků a mnoho dalších. Důsledkem těchto různých příčin, pak vznikají vady a jednou ze specifických vad mohou být nečistoty, konkrétněji nazývané vměstky. [4]

Skupina vměstků je velmi rozsáhlá, proto bylo nutné ji rozčlenit. Jedním z mnoha rozdělení je dělení na exogenní a endogenní vměstky. Za exogenní vměstky se považují nečistoty zanesené do oceli vnějším působením okolí. Jedná se především o vliv okolní atmosféry, žáruvzdorných materiálů a strusky. Naproti tomu vměstky endogenní jsou již součástí struktury oceli, neboť vznikly vnitřními procesy z prvků obsažených v oceli. Jejich vliv na vlastnosti oceli je nezanedbatelný, a proto je nutné dodržovat metalurgická opatření pro snížení množství vměstků, resp. snížení koncentrace prvků podílejících se na jejich vzniku. [5]

Bakalářská práce se zabývá vměstky v litých ocelích.

1 Identifikace vměstků

Při výskytu určité vady na odlitku sehrává svou významnou roli správná identifikace vady, od které pak probíhá další činnost k určení původu, stanovení příčin a prostředků k zabránění jejího vzniku. Tuto situaci můžeme přirovnat k léčbě nemocného člověka. Vyléčení pacienta a zmírnění bolesti závisí na rychlém a co nejpřesnějším stanovením diagnózy. Diagnostika určení „choroby“ odlitku podle příznaků je velmi důležitým rozcestníkem pro následné kroky. V návaznosti na špatné určení vady se odvíjí další postup, což je neekonomické i časově ztrátové. [6]

Důvod, proč se slévárenští odborníci a metalurgové museli zabývat vadami, byl projev vad na odlitcích, které obsahovaly bubliny, praskliny, lomy a mnoho dalších. To byl impuls pro vytvoření přehledného seznamu vad a sepsání důvodů, proč vznikají. Výstupem z těchto výzkumů začaly vznikat atlasy, prvním z nich byl vydán britským slévárenským institutem již v roce 1946. V 50. letech vypracovaly příručky vad odlitků všechny průmyslově vyspělé země. Na našem území (v zemi bývalého ČSR) vznikla na základě příruček A. Plešingra a J. Příbyla v roce 1955 norma ČSN 42 1240, která byla v roce 1965 novelizována a je platná dodnes. [6] Obvyklou součástí příruček bývá i návod pro identifikaci vady. Postup byl navržen obecně tak, aby mohl být použit pro kteroukoliv vadu uvedenou v seznamu příručky. Příklad možného postupu při identifikaci [7]:

- Anamnéza – termín používaný v lékařství, kdy je zajištěn soubor o prodělaných nemocech pacienta, to lze přirovnat i k přiřazení vadnému odlitku všechny informace o tom, za jakých podmínek odlitek vznikal
- Identifikace – identifikovat neshodný výrobek a vadu, tedy zkoumání vzhledu, odchylky a dalších znaků
- Diferenciální diagnostika – předběžná pracovní diagnóza nejpravděpodobnější vady
- Provedení speciálních analýz – chemické a metalografické rozborů z místa vady
- Konečná diagnóza – ze získaných informací rozhodnutí o vadě
- Stanovení příčiny a návrh k odstranění
- Vyhodnocení

Návrh na vytvoření nové klasifikace je obsahem knihy T. Elbela a kolektivu vydaná v roce 1992 [6]. Ačkoliv se nový návrh nestal normou, mnoho sléváren tuto klasifikaci používá. K získání základního přehledu jsou uspořádány do sedmi tříd vad, kde každá z nich se dělí do podskupin, ty jsou dále členěny na jednotlivé druhy. Vměstky jsou zařazeny do třídy 600 a skupiny 620, jak ukazuje tabulka 1. [2]

Tab. 1 Zařazení vměstků do systému [2]

Třída vad	Název třídy vad	Skupina vad	Název skupiny vad	Počet druhů
600	Vady mikrostruktury	610	Mikroskopické dutiny	3
		620	Vměstky	x
		630	Nesprávná velikost zrna	x
		640	Nesprávný obsah strukturních složek	x
		650	Zatvrdlina, zákalka	x
		660	Obrácená zákalka	x
		670	Oduhličení povrchu	x
		680	Jiné odchylky od mikrostruktury	x

2 Obecné rozdělení vměstků

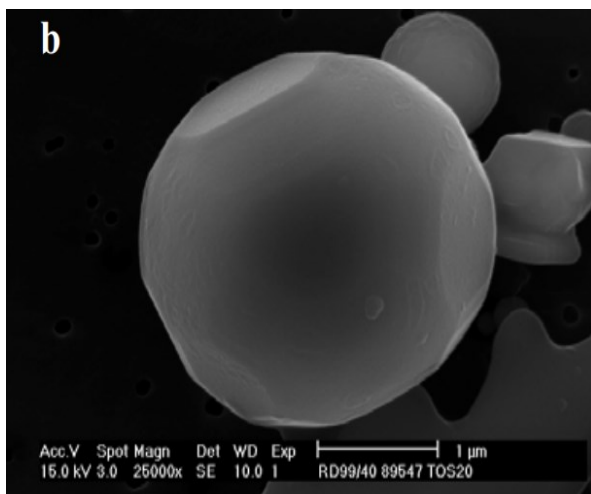
Vměstky lze rozdělit podle několik hledisek, především podle původu, velikosti achemického složení. Tyto skupiny se podrobněji dělí podle charakteristických znaků. Primárním rozčleněním je rozdělení podle původu vzniku vměstku:

- **Endogenní vměstky** – jsou nekovové částice, které vznikají na základě chemické reakce mezi tekutou ocelí a struskou nebo dezoxidačními přísadami. Tvoří se i reakcí především mezi kyslíkem, dusíkem, sírou a dalšími prvky přítomnými v tavenině. [8]
- **Exogenní vměstky** – jsou mechanicky stržené částice žáruvzdorných hmot, licích soustav, žáruvzdorné vyzdívky pecí, strusky a mohou vznikat při reoxidačních procesech. [8]

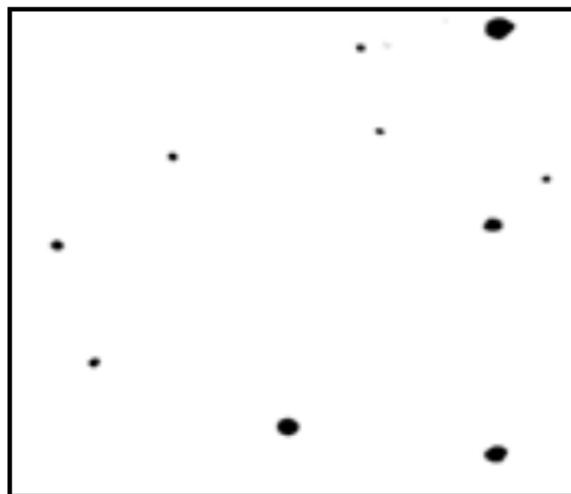
2.1 Morfologické typy vměstků

Morfologie vměstků závisí především na chemickém složení. Touto problematikou se zabývali Sims a Dahl [9], kteří vytvořili základní přehled, tuto klasifikaci později upravil a doplnil Bůžek [10,11]. Rozdělení obsahuje čtyři základní tvary (obrázky vlevo zobrazují konkrétní tvar, obrázky vpravo ukazují pohled na metalografický výbrus):

- Typ vměstků vzniká v taveninách s vysokou aktivitou kyslíku. Vměstky jsou tvořeny oxidy prvků s vysokou afinitou ke kyslíku. Především se jedná o křemík a mangan. Tento typ dosahuje velikosti několika desítek až stovek mikronů rozložených náhodně. Přítomnost vměstků I. typu v odlitcích signalizuje vždy nebezpečí výskytu dalších vad. Vyskytují se u nedostatečně dezoxidovaných taveb a mohou být současně doprovázeny bublinami nebo bodlinami. Další příčinou je místo, kde proběhla intenzivní reoxidace a v tomto místě byl spotřebován zbytkový hliník. Vměstky mají kulovitý tvar na obr. 1 a složení odpovídá oxisulfidům, které byly pojmenovány jako I.b, s proměnlivou koncentrací Mn, Si, Al a S.



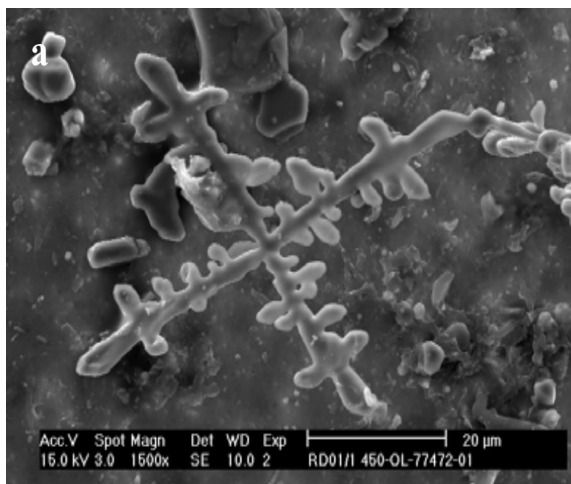
Obr. 1 Kulovitý tvar vměstku [12]



Obr. 2 Shluk kulovitých vměstků [1]

Kulové vměstky jsou typické pro křemičitan manganatý, hlinitan vápenatý a oxid hlinitý, které vytvářejí shluky na obr. 2. Existují tři mechanismy pro vytvoření kulatých částic oxidu hlinitého. První hypotéza se zakládá na vyšší afinitě hliníku s kyslíkem, a proto nahrazuje mangan a křemík. Za druhé za podmínky dostatečně vysokého přesycení. Poslední zdroj kulovitých vměstků oxidu hlinitého je zhuštění dendritů. Tento proces je difúzně řízený a přechod dendritů na sférické částice je pomalý. [2, 12]

- II. Při obsahu hliníku 0,01 až 0,05 % je produktem dezoxidace oxid hlinitý, síra se v oxidu hlinitém nerozpouští a vylučuje se ve formě sulfidu manganu a může obsahovat i železo. Sulfidy se vylučují až na konci tuhnutí v prostorách mezi dendrity. Jejich tvar je určen prostorovými podmínkami. Vznikají především ploché dendrity MnS (obr. 3), které se zobrazují jako řetízek protáhlých vměstků



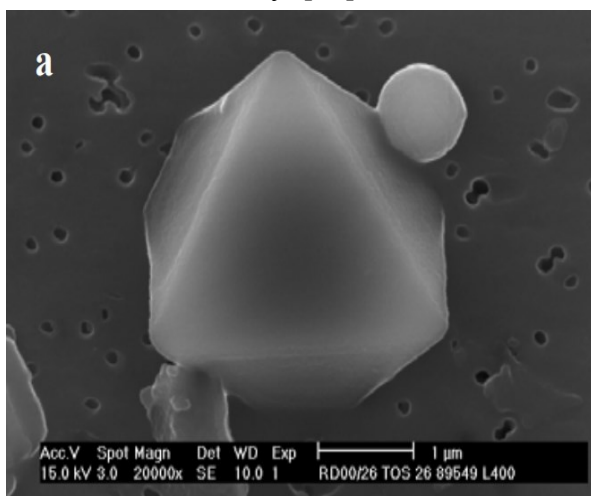
Obr. 3 Dendrity [12]



Obr. 4 Řetízky vměstků [1]

(obr. 4), avšak jako řetízek ho vidíme na výbrusu, jeho rozložení je ve 3D komplikovanější. Dendrity jsou nejčastěji se vyskytujícími vměstky podle tvaru. Mají dobře definovaný růst v závislosti na směru gradientu přesycení, růst se může zastavit nebo znovu aktivovat. V závislosti na přítomnosti turbulence taveniny mohou vznikat kromě dendritů i shluky. Shluky vznikají na rozhraní mezi dezoxidovanou a nedeoxidovanou ocelí a na rozdíl od dendritů mají nepravidelný tvar. [2, 6]

- III. Tato skupina je tvořena především sulfidy manganu obsahující někdy jádro tvořené oxidem hlinitým. Tyto vměstky tvoří hranaté útvary (obr. 5) a jsou náhodně rozloženy v matici (obr. 6). [1] Tento typ se dělí na dva hlavní typy, a to osmistěnné a ostatní mnohostěny, kam patří především trojboké a šestiboké hranoly. [12]

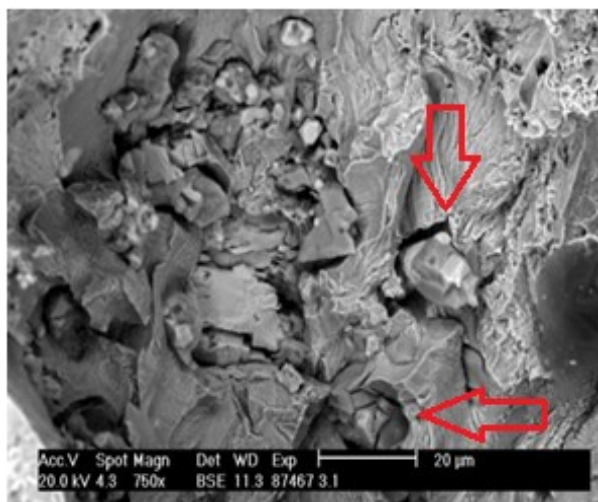


Obr. 5 Hranatý tvar vměstku [12]



Obr. 6 Pohled na shluk hranatých vměstků [1]

- IV. Toto označení získal vysoký přebytek silných dezoxidačních prvků doprovázený vyloučením shluků oxidů a sulfidů (obr. 7, 8). Lze je pozorovat u ocelí s vysokým obsahem prvků vzácných zemin (céru, lanthanu) nebo vápníku. [2, 6]



Obr. 7 Tvary čtvrtého typu vměstku na lomové ploše [12]

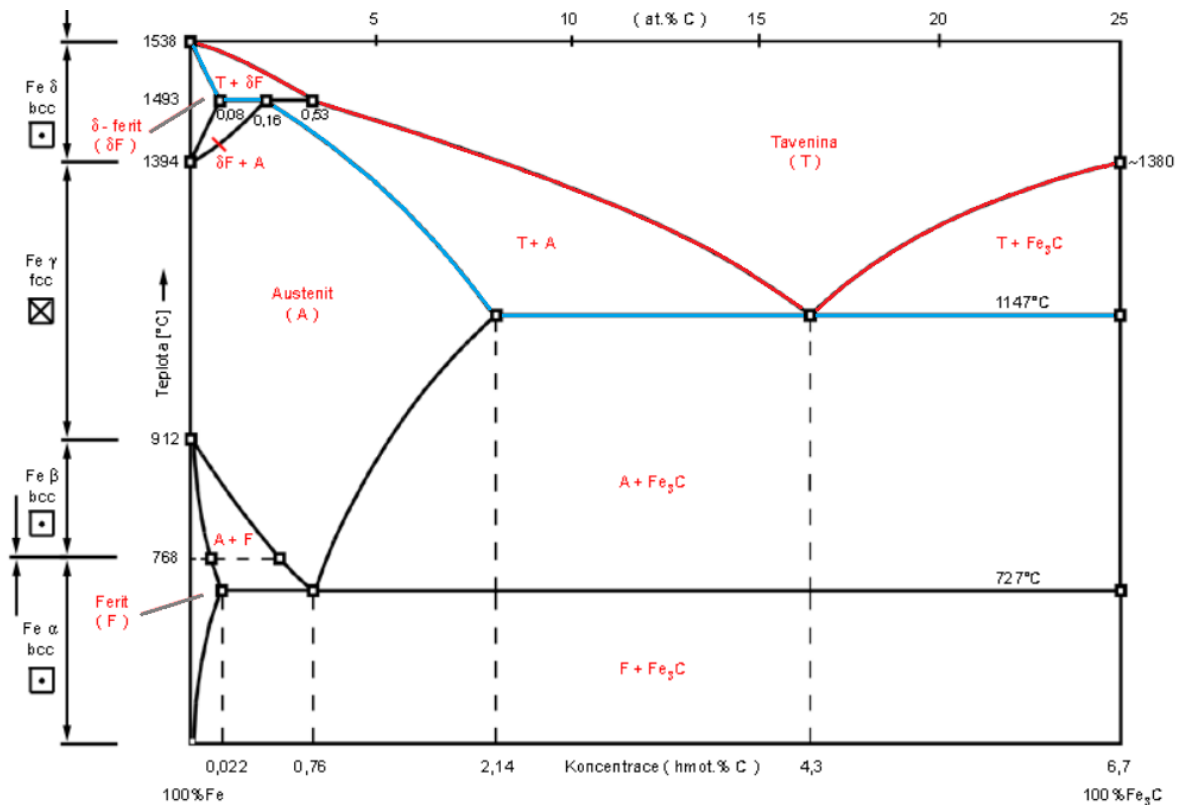


Obr. 8 Směs oxidů a sulfidů [1]

2.2 Dělení podle teploty

Vměstky je možné rozdělit podle teploty vzniku [13]:

- primární vměstky – vznikají v tekuté oceli v oblasti teplot ocelářských pochodů, tedy při cca 1600-1650 °C
- sekundární vměstky – vznikají v okolí teplot likvidu oceli, vlivem klesající teploty, a tudíž snižující se rozpustnosti kyslíku a rozpuštěných prvků
- terciální vměstky – vznikají mezi teplotou likvidu a solidu oceli v důsledku prudkého poklesu rozpustnosti kyslíku, síry, dusíku a další při tuhnutí taveniny, a tedy při místním zvýšení koncentrace těchto prvků v tavenině
- precipitační vměstky – vznikají pod teplotou solidu (obr. 9) v důsledku tepelného, respektive mechanického zpracování oceli za tepla, difúzí prvků z objemu na hranici zrn kovu a následnou reakcí



Obr. 9 Fázový popis soustavy **Fe – Fe₃C** s vyznačenými teplotami likvidu a solidu [14]

Likvidus – červená křivka, nad touto křivkou se vykytuje pouze tavenina

Solidus – modrá křivka, pod touto křivkou se vyskytuje tuhá fáze

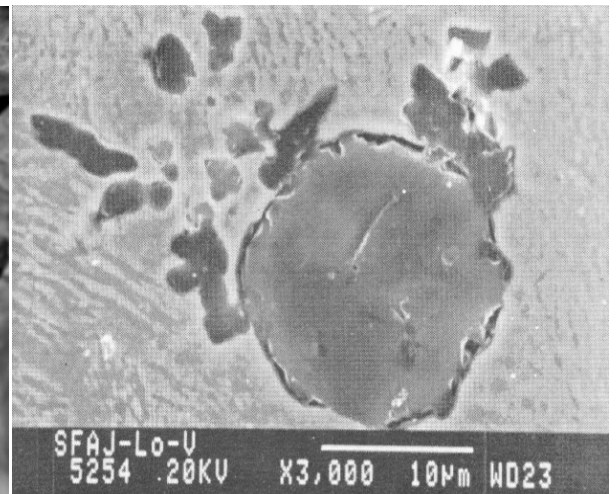
2.3 Rozdělení podle velikosti

Posledním doplňujícím faktorem je velikost vměstku:

- makrovměstky – jsou vměstky viditelné pouhým okem nebo lupou. Jejich velikost se obvykle pohybuje přibližně od 50 do 100 mikronů (obr. 10). Podle původu jsou to většinou vměstky exogenní. Konkrétněji to bývá obvykle struska nebo formovací směs stržená z formy. Přítomnosti v tavenině je možno se vyhnout, ale vyskytují se v průběhu celého výrobního procesu. [8, 15]
- mikrovměstky – jsou určeny velikostí většinou pod 50 mikronů (obr. 11). Přítomnost v odlitcích je nevyhnutelná, neboť jsou to přirozené vměstky, které vznikají v důsledku reakce mezi přítomnými legujícími prvky a kyslíkem. [15] Považují se za škodlivé, protože porušují homogenitu oceli. Ačkoliv některé vměstky jsou při tváření dostatečně plastické, protahují se ve směru tváření, takže jejich škodlivý vliv se uplatňuje převážně v příčném směru tváření. [8]



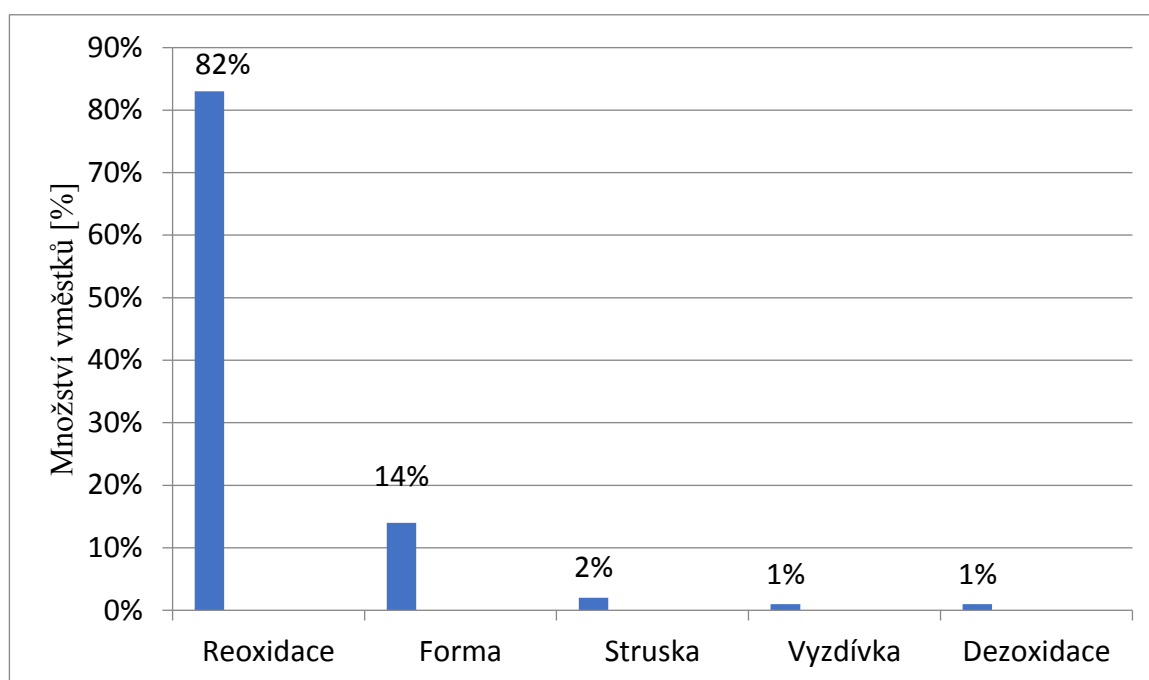
Obr. 10 Makrovměstek [16]



Obr. 11 Mikrovměstek [17]

3 Exogenní vměstky

Jak již bylo zmíněno, mezi tyto vměstky patří především struska, pěna (tuhé oxidy), zbytky tavidel, uvolněné části formovacího materiálů, nátěrů nebo vyzdívek a reakce kovu s atmosférou. Ve většině případů jsou makroskopické (nad 0,2 mm) viditelné na povrchu, lomové ploše nebo řezu odlitku pouhým okem. Mají tendenci se koncentrovat v určitých oblastech odlitku, například u horního povrchu nebo v blízkosti vtoku. [3] Americká studie provedená ve 300 slévárnách prokázala, že 82 % vměstků je produktem reoxidace, 14 % vzniká na základě formovacích materiálů. Další zdroje vměstků a jejich procentové zastoupení je uvedeno na obrázku 12. [18]



Obr. 12 Zdroje vzniku jednotlivých vměstků [19]

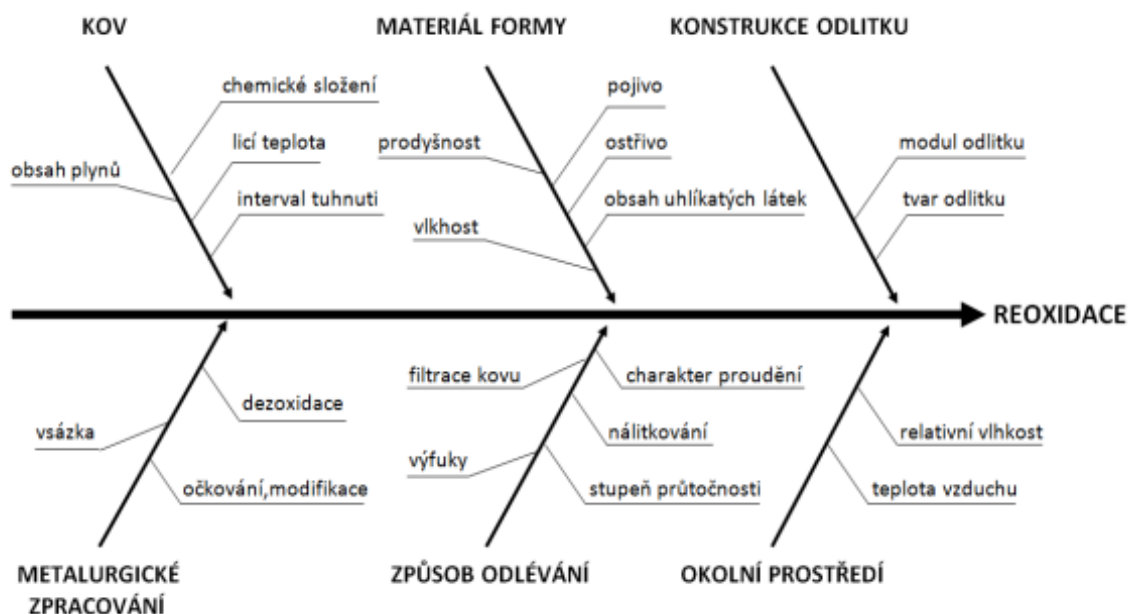
3.1 Reoxidační procesy

Oxidace kovu při tavení a jeho dalším zpracování je jednou ze základních metalurgických reakcí při zpracování slitin železa.[20] V běžných výrobních podmínkách při odlévání nelze reoxidačním pochodům, tedy reakce taveniny s kyslíkem, zcela zabránit. Lze je pouze některými technologickými nebo metalurgickými opatřeními omezit. Rozsah těchto pochodů je ovlivňován třemi hlavními faktory, a to materiálem odlévaného kovu, způsobem odlévání a materiálem formy. V každém faktoru je možné nalézt vždy několik činitelů, které působí na reoxidační pochody. [18]

Uvedení několika faktorů [20]:

- Materiál odlévaného kovu
 - chemické složení
 - teplota kovu
 - zpracování kovu (vsázka, dezoxidace)
- Materiál formy
 - materiál formy (ostřívo, pojivo)
 - prodyšnost formy a transport plynů z formy
- Způsob odlévání
 - rychlost proudění a plnění formy
 - povaha proudění tekutého kovu v průběhu plnění
 - stupeň průtočnosti v jednotlivých průřezech odlitku
- Vliv okolního prostředí
 - relativní vlhkost vzduchu
 - teplota

Na rozsah reoxidačních pochodů mohou mít vliv také další faktory, jako například konstrukce odlitku, filtrace kovu a další. Pro analýzu výskytu vad se používá tzv. Ishikawův diagram zobrazený na obr. 13, který slouží k přehlednému znázornění vlivu jednotlivých činitelů. [18]



Obr. 13 Ishikawův diagram reoxidačních pochodů [20]

Oxidace taveniny začíná již v peci až do ztuhnutí odlitku. Rozeznáváme tři typy oxidace a to primární, sekundární a terciální. Primární oxidace se především týká oxidace uhlíku a fosforu, která je zahájena obvykle v peci. [20] Sekundární oxidace probíhá při styku s okolní atmosférou, a to jednak během setrvání kovu v pánvi, tak při vlastním odlévání a plnění dutiny formy. Při plnění formy dochází ke strhávání určitého objemu vzduchu proudícím kovem.

Z tohoto hlediska je nebezpečný průchod oceli výlevkou nepravidelného tvaru (poškozená výlevka atd.), kdy vytékající ocel netvoří souvislý hladký sloupec, ale kužel rozstříkujícího se kovu. [2] Terciální oxidací, nebo také reoxidací, je pak označována oxidace kovu v odlitku při teplotách oceli mezi likvidem a solidem. [18]

3.2 Reakce roztavené oceli se žáruvzdornými hmotami

Žáruvzdorné hmoty nejsou zcela mechanicky odolné a chemicky inertní. Pracovní vrstva, která je ve styku s ocelí, vlivem vysoké teploty měkne. Prouděním oceli jsou částice žáruvzdorné vyzdívky vytrhovány. Proto není doporučeno tavit a odlévat oceli se zvýšenými nároky na mikročistotu ihned po vyzdění nebo větší opravě pece, pánve, žlabu, pokud není vytvořena odolnější povrchová vrstva vyzdívky. Mezi nejčastější reakce patří redukce SiO_2 ze šamotu hliníkem nebo reakce s MnO a CaO . V tabulce 2 je souhrn oxidů v žáruvzdorném materiálu. [5]

Tab. 2 Teploty tavení oxidů tvořící základ žáruvzdorného materiálu [21]

Chemický vzorec	t °C
SiO_2 - oxid křemičitý	1 726
Al_2O_3 - oxid hlinitý	2 054
Cr_2O_3 - oxid chromitý	2 265
CaO – oxid vápenatý	2 625
ZrO_2 - oxid zirkoničitý	2 700
MgO – oxid hořečnatý	2 852

Tabulka 3 obsahuje chemickou povahu žáruvzdorných materiálů, konkrétní materiály a jejich složení.

Tab. 3 Žáruvzdorné materiály [21]

Kyselé	$\text{SiO}_2 (\geq 93\%), (85 \leq \text{SiO}_2 \leq 93 \%)$	Dinas, kyselý šamot
Zásadité	$\text{MgCO}_3, \text{MgO}, \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Magnezit, periklas, dolomit
Neutrální	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{C}$	Šamot, korund, uhlík

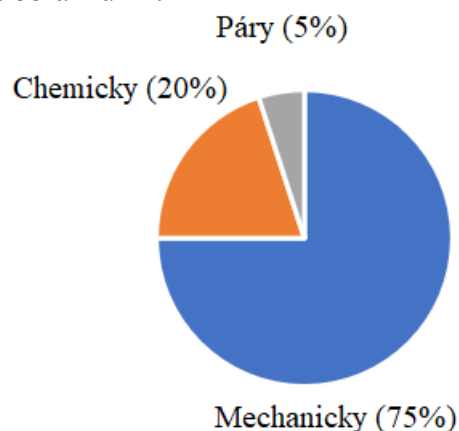
Rozsah působení mezi žáruvzdornými hmotami a taveninou závisí na chemickém složení, teplotě oceli, pórovitosti, stejnorodosti a odolnosti keramického materiálu. Vznikající exogenní vměstky mají chemické složení a strukturu podobnou použitému keramickému materiálu.

Značnou úlohu má smáčivost taveniny a strusky. Smáčivost je závislá na viskozitě a povrchovém napětí. Pokud je úhel smáčení taveniny na keramickém materiálu větší než 90° , tak ocel smáčí žáruvzdorný materiál málo, což je žádoucí. Tento jev má i pozitivní vliv na snadnější vyplouvání nekovových vměstků z oceli. Vysoké krajní úhly smáčení jsou obvyklé u dezoxidovaných ocelí s nízkým obsahem kyslíku nebo kyselých vyzdívkách. Naopak se zvýšeným obsahem kyslíku roste smáčivost a úhel smáčení klesá pod 90° , s tím souvisí pronikání do pórů a trhlin v žáruvzdorném materiálu. [22]

3.4 Reakce kovu s pískovou formou

Problémy spojené se vznikem vměstků při odlévání do syrových pískových forem mají tři hlavní mechanismy. Jedná se o poškození mechanické, chemické a reakce par kovů. Procentuální četnost výskytu mechanismů je zobrazena na obrázku 14.

První kritickou záležitostí je erozivní účinek proudu taveniny, kdy dochází k vymílání formovacího materiálu. Dochází k tomu ve vtokové soustavě nebo v blízkosti zaústění do dutiny formy. Největšího erozivního účinku je dosaženo, zvláště pak naráží-li proud na stěnu formy kolmo. Proti tomuto jevu působí snížení rychlosti taveniny, především změnami úhlu a směru vtokové soustavy, vhodné usměrnění proudu taveniny a dostatečné zhutnění formovacích směsí. Chemická penetrace se uskutečňuje dvěma způsoby, reakce mezi taveninou a formovacím materiálem je první a druhá reakce mezi taveninou a atmosférou uvnitř formy. Reakce se navzájem prolínají a probíhají při vniknutí taveniny do formy. Na počátku to může být reakce uhlíku rozpuštěného v oceli s vodní párou, která vzniká odpařením vody z formovacího materiálu a ostřiva, za vzniku oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a dalších produktů. Jedním z produktů je oxid železnatý, ten může reagovat s křemenným ostřivem za vzniku nízkotajících křemičitanů. Jedná se především o fayalit. Poslední skupinou je penetrace přes páry kovu, je to proces, který je založen na tvorbě těkavých kovových látek a jejich difúzi do formy, kde následně zkondenzují. [23, 24, 25, 26]



Obr. 14 Procentuální zastoupení mechanismů penetrace [23]

3.3 Proces reakce roztavené oceli a strusky

Při výrobě oceli je hlavním úkolem strusek absorbovat nežádoucí prvky nebo jejich sloučeniny a oddělit kov od atmosféry. [2] Obsah CaO , SiO_2 , MgO a Al_2O_3 v exogenních vměstcích se během výroby oceli mění v souladu se změnou chemického složení strusky.

Na reakce strusky s taveninou lze pohlížet dvěma způsoby. První z nich je teorie iontová. Rztavené strusky jsou elektrolyticky disociovány na kationty a anionty. Z toho vyplývá, že na reakce mezi struskou a roztaveným kovem musíme pohlížet jako na reakce, na nichž se podílejí ionty s kladnými nebo zápornými elektrickými náboji. Přejed aniontů kyslíku ze strusky do kovu může doprovázet i jakýkoliv jiný kationt nacházející se ve strusce. Může to být například Mn^{2+} . Přednostní přechod má ale kationt Fe^{2+} , vyplývá to z postavení železa v elektrochemické řadě napětí, podle které méně ušlechtilé kovy vylučují z roztoku kationty ušlechtilejších kovů. Usměrněný pohyb iontů má za následek elektrickou dvojvrstvu, kde přecházejí z jedné fáze do druhé. [22] Starším pohledem je teorie molekulová, která předpokládá, že roztavená struska je roztok obsahující zásadité, amfoterní (sloučeniny, které mohou reagovat s kyselinami i hydroxidy) a kyselé oxidy, které navzájem reagují a vytvářejí složitější sloučeniny. Takto vzniklé sloučeniny mohou za určitých podmínek opět disociovat a vznikat volné oxidy, které jsou schopny vytěsnit z vazeb jiné oxidy. Nejznámějším případem je nahrazení FeO z vazby s SiO_2 právě CaO , který je zásaditější.

Strusky tedy plní úlohu regulace tepla mezi plynnou atmosférou a taveninou, tvoří ochrannou vrstvu, která zabraňuje reakcím pecních plynů a taveniny. Důležitou schopností je odfosfoření a odsíření roztaveného kovu, avšak při těchto všech procesech vznikají nežádoucí sloučeniny, které mohou přejít do roztaveného kovu. Proto složení jednotlivých strusek nesmí negativně ovlivnit průběh tavení. [27, 28]

3.4 Další vlivy na tvorbu vměstků

3.4.1 Vliv proudění na průběh reoxidace

Plnění forem je sice krátkým, ale nejkritičtějším úsekem výroby odlitku, kterým se může snadno znehodnotit výsledek náročné práce. Tok musí být plynulý s minimální turbulencí, zachycování vzduchu a erozí. Formy se mohou plnit laminárním nebo turbulentním prouděním. Turbulentní proudění ve vtokové soustavě i dutině formy zvyšuje mechanické i tepelné zatížení formy a zvětšuje povrch taveniny vystavený oxidaci. [3] S rostoucí délkou vtokové soustavy je stupeň oxidace vyšší. Omezení reoxidace vhodnou konstrukcí vtokové soustavy je spíše než metalurgickým opatřením otázkou technologickou. [29]

3.4.2 Vliv tloušťky stěny odlitku na tvorbu sulfidických vměstků

V oceli se vytvářejí při tuhnutí zcela odlišné typy vměstků v závislosti na tloušťce stěny odlitku. U nízkolegovaných manganových ocelí se střední tloušťkou kolem 50 mm se vyskytují výhradně sulfidy manganu. Při rostoucí tloušťce stěn se zvyšuje pravděpodobnost výskytu sulfidu titanu nebo karbosulfidu titanu. A to při stejném chemickém složení, podmínkách tavení, odlévání a zaformování odlitků. Získat představu o složení karbosulfidických Ti_3CS_2 vměstků lze v tabulce 4. [30]

Tab. 4 Chemické složení oceli obsahující vměstky Ti_3CS_2 [30]

Odlitky o hmotnosti od 10 až 15 tun	Obsah prvků [%]								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti
	0,36	1,42	0,39	0,023	0,022	0,21	0,10	0,01	0,057
Prvek	Průměrný obsah ve vměstcích [%]		Rozmezí koncentrace ve vměstcích [%]			Koncentrace pro stechiometrický poměr [%]			
C	5,13		4,68 až 5,77			5,50			
S	24,40		24,10 až 24,60			29,20			
Ti	67,90		67,40 až 68,30			65,30			
Fe	0,78		0,50 až 1,00						
Nb	0,30		0,17 až 0,69						

Značná změna rozpustnosti se projevuje především při fázových přeměnách. Rozpustnost síry v železe δ je 0,18 % při teplotě 1365 °C, v železe γ je při stejné teplotě 0,050 % a 0,005 % při teplotě 913 °C. V železe α při teplotě 913 °C se rozpouští 0,02 % síry. Mírou rozpustnosti je rozdělovací koeficient, který vyjadřuje poměr koncentrace síry ve vzniklé tuhé a tekuté matečné fázi. [31] Z tabulky tedy vyplývá, že na tvorbě sulfidů se podílí především síra, titan a uhlík.

Z výpočtů bylo zjištěno, že při rychlé krystalizaci se bude síra vázat výhradně na mangan, což je obvyklý případ u odlitků se střední tloušťkou stěn. Naopak při krystalizaci blížící se rovnovážné, zvyšuje se pravděpodobnost tvorby sulfidu titanu a karbosulfidu titanu. [30]

S rozdělovacím koeficientem, jak bylo zmíněno, souvisí rychlost tuhnutí. Vliv rychlosti tuhnutí na rozdělení síry mezi kov a sulfidy bylo zjištěno, že při běžných rychlostech tuhnutí ingotů a odlitků z uhlíkových ocelí je podstatná část síry vázaná v sulfidech. Pouze 2 až 5 % z celkového obsahu síry je přítomno v elementárním stavu. Při stále větších rychlostech ochlazování se postupně snižuje podíl síry v sulfidech, až při rychlosti tuhnutí kolem $0,833 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zůstává veškerá síra v elementárním stavu. [31]

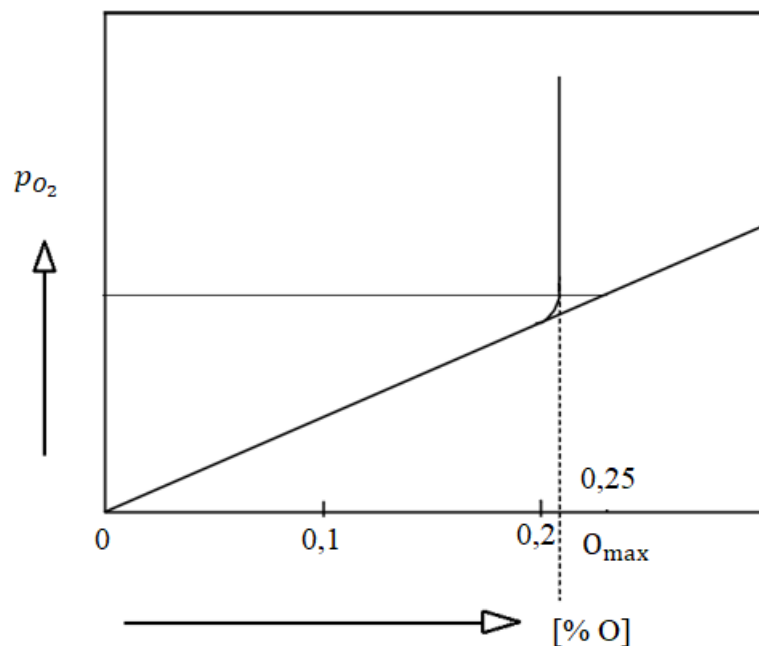
4 Endogenní vměstky

Jsou to částice tvořené fázemi, které se tvoří a vylučují při poklesu rozpustnosti síry, kyslíku a dusíku v železe a při chemických reakcích síry, kyslíku a dusíku s prvky přítomnými v tavenině. Sulfidy a nitry jsou tedy typickými představiteli endogenních vměstků. [5]

4.1 Kyslík v roztaveném železe

Kyslík vzhledem ke své afinitě k železu, chemicky reaguje na oxid železnatý FeO (a na vyšší oxidy Fe₂O₃, Fe₃O₄) [13] V oceli na odlitky je nutné snížit obsah kyslíku na takovou úroveň, aby při tuhnutí odlitků nedošlo k reakci s uhlíkem za vzniku oxidu uhelnatého. V pánvi po odpichu pod dezoxidovanou zásaditou struskou je obsah kyslíku obvykle nižší než 0,001 % (10 ppm). [18] Zbytek oxidů zůstává v oceli jako oxidické vměstky. Přítomnost většího množství oxidických vměstků může být příčinou horších slévárenských vlastností jako je zabíhavost.

Kyslík se v železe rozpouští již při nízkém parciálním tlaku, dochází k nasycení taveniny. Po nasycení železa kyslíkem se vylučuje na povrchu taveniny oxid železnatý a obsah kyslíku v železe se dále nezvyšuje, a to ani při dalším zvýšení parciálního tlaku kyslíku nad taveninou znázorněné graficky na obrázku 15. [2]



Obr. 15 Rozdělení kyslíku mezi roztaveným kovem a atmosférou [2]

Disociační napětí oxidu železnatého při uvažované teplotě odpovídá parciálnímu tlaku kyslíku v atmosféře obklopující taveninu, při které je železo nasycené kyslíkem. Rozpouštění kyslíku lze popsat rovnicí (4.1):



Vzhledem k tomu, že disociační napětí oxidu železnatého je při teplotě 1600°C pouze přibližně $8 \cdot 10^{-4}$ Pa, nelze rozpouštění kyslíku v železe během tavení zabránit. Rozpustnost

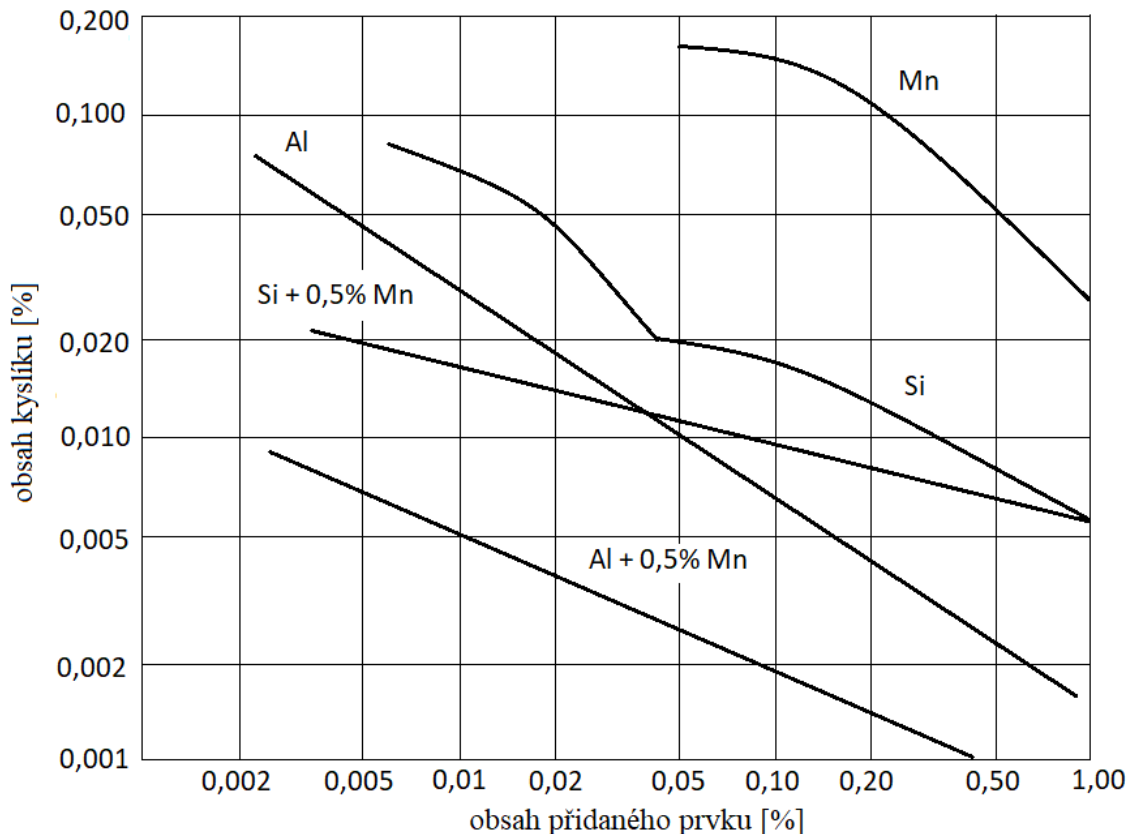
kyslíku v železe v závislosti na teplotě pro interval teplot 1508-1850 °C lze vyjádřit vztahem (4.2):

$$\log[\%O] = -\frac{6629}{T} + 2,939 \quad (4.2)$$

Z této rovnice lze určit, že maximální rozpustnost kyslíku v čistém železe je 0,25 hmot. % při teplotě 1600°C 2500 ppm. Složení kovů a strusek se uvádí v hmotnostních procentech, pro nízké koncentrace v hmotnostních (part per million), přičemž 1ppm = 0,0001 %. [2]

4.2 Odezva roztavené oceli na dezoxidovala

Během ocelářského pochodu se okysličuje uhlík a doprovodné prvky v surovém železe kyslíkem z rud nebo plynným kyslíkem. Základní úlohou dezoxidovadel je v oceli převést přebytečný kyslík na neaktivní. Avšak nevhodným dezoxidačním prvkem nebo množstvím, se může obsah vměstků zvýšit, a proto je důležité dbát na zvolený prvek. Na obrázku 16 je porovnání dezoxidačních schopností nejpoužívanějších dezoxidovadel užívaná při výrobě oceli při teplotě 1550 °C. Vlastnosti jednotlivých dezoxidovadel:



Obr. 16 Dezoxidační schopnosti [22]

➤ Mangan

Základní reakce probíhající mezi manganem v roztaveném železe a struskou, se skládá z oxidu manganatého a železnatého. Při vysokém obsahu manganu v tavenině vzniká při odkysličování jen tuhý oxid manganatý. Ačkoliv efektivita manganu při odkysličování s klesající teplotou roste, nelze za teplot ocelářských pochodů předpokládat odsiřující schopnost manganu. Mangan má výrazný vliv na tvar a složení sulfidických vměstků, které vznikají v oceli při

tuhnutí. Rozpustnost síry v tavenině se sice s rostoucím obsahem manganu snižuje, ale samostatná siřníková fáze se v železe nevyklučuje, neboť i pak zůstává rozpustnost síry v železe větší, než jsou běžné obsahy síry. Sulfid manganatý nemůže proto existovat za ocelářských pochodů ale až v průběhu tuhnutí. Do oceli se mangan jako dezoxidovadlo vnáší ve formě feromanganu. [22]

➤ Křemík

Při obsazích křemíku nižší než 0,10 % mohou vznikat jako produkty sekundární oxidace vměstky o složení FeO-MnO (při poměru Mn/Si cca 7/1). S rostoucí koncentrací křemíku při stejném obsahu manganu vznikají nízko tavitelné silikáty. S dalším zvyšováním koncentrace křemíku vzniká čistý oxid křemičitý. K dezoxidaci křemíkem se používá ferosilicium s obsahem 75 % křemíku. [2]

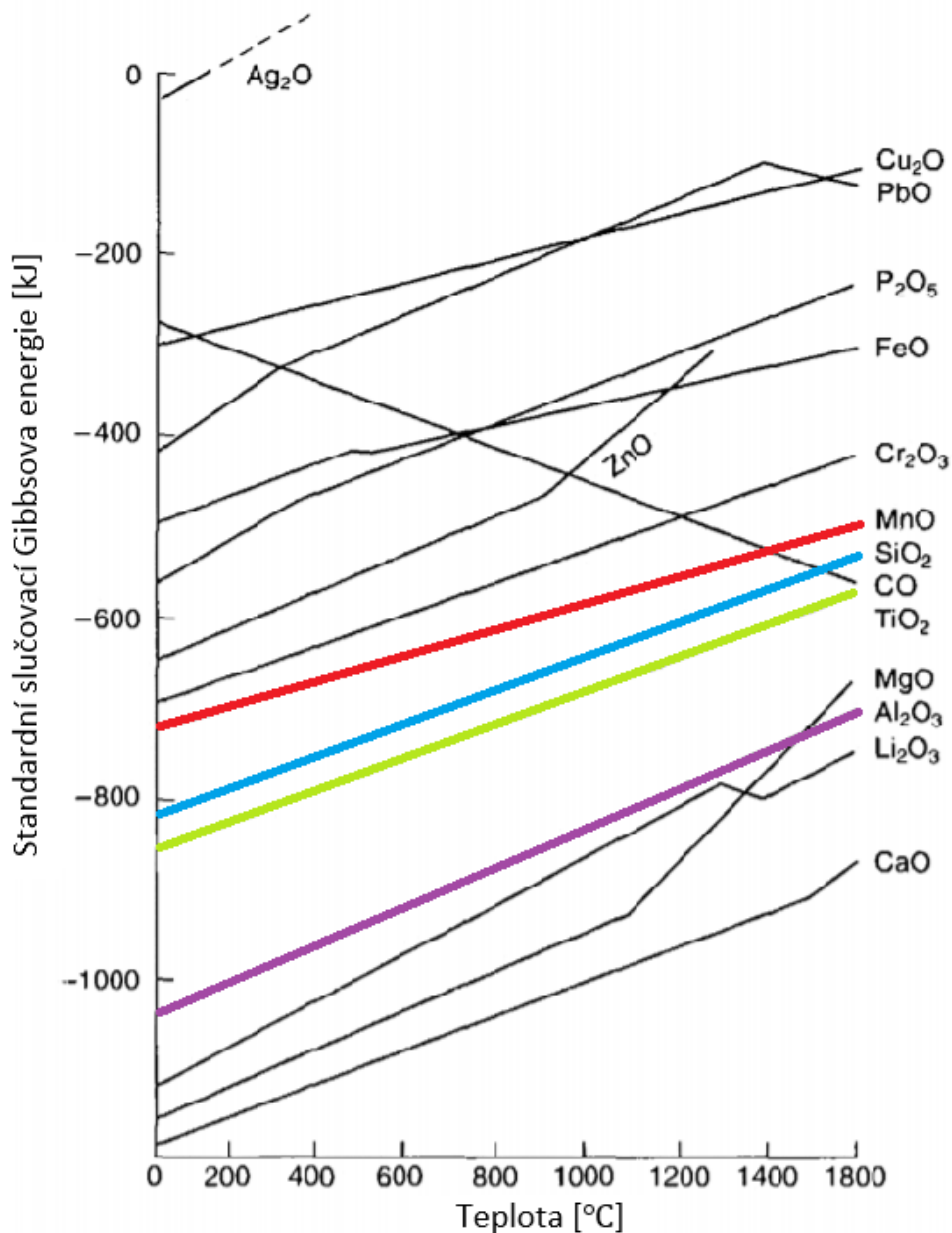
➤ Hliník

Patří k nejčastěji používaným dezoxidačním přísadám. Podle množství hliníku se výrazně mění tvar a uspořádání oxisulfidických vměstků. Při nízkém obsahu zbytkového hliníku se objevují vedle vměstků oxidu hlinitého i po hranicích zrn řetízkově uspořádané oxisulfidy II. typu, které při vyšším obsahu zbytkového hliníku přecházejí na typ III. [22] Spodní hranice obsahu zbytkového hliníku je dána požadavkem na zabránění uhlíkové reakce. Horní obsah hliníku je limitován nebezpečím vzniku lasturových lomů. Na iniciaci se podílí nitrid hliníku. [32] Dále pak je větší množství spojeno se vznikem sulfidu hlinitého, který se poté rozpouští v tuhém roztoku. [22] Při dávkování se pouhé vhození hliníkové housenky neosvědčilo, protože je hliník lehký a snadno zůstává ve strusce, kde oxiduje. Účinnější metodou je vstřelování hliníkového drátu do lázně, omezí se tak propal. Další možností je připevnění hliníku na tyč a následné ponoření do pece nebo pánve. [13]

➤ Titan

S přísadou titanu se mění tvar a uspořádání siřníkových vměstků. S rostoucím množstvím (nad 0,024 %) obdobně jako po přísadě hliníku, přecházejí sulfidické vměstky typu I. na vměstky typu II. [21] Při vyšší koncentraci v oceli se ocel hůře odlévá a grafitová zátka se může přilepovat k výlevce. Titan se do oceli přidává v podobě ferotitanu s obsahem titanu 25 až 37 %. [2]

S množstvím dezoxidačního prvku souvisí i druh. Z prvků, které byly vybrány, je v praxi nejčastěji používán hliník, neboť pro vznik oxidu hlinitého je potřeba méně energie, proto aby tento oxid mohl vzniknout a vyplavat na povrch taveniny. Ještě mnohem silnějším dezoxidačním prvkem je vápník ve formě silikokalcia (s obsahem vápníku 27-35 %). Vápník se uplatňuje nejen pro dezoxidaci, ale i modifikaci vměstků, která je součástí šesté kapitoly. Z Ellinghamova diagramu (obr. 17) je možné sledovat křivky vzniku oxidů v závislosti na teplotě a slučovací energii. [19]

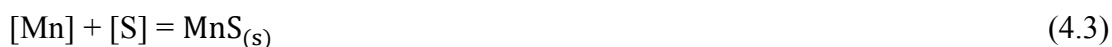


Obr. 17 Ellinghamův diagram [19]

4.3 Termodynamika vzniku endogenních vměstků

Vznik endogenních vměstků vyžaduje splnění jak termodynamických podmínek chemické reakce, tak i termodynamických podmínek vzniku nové fáze ve fázi matečné. Reakce vzniku oxidů, sulfidů, nitridů či karbidů vyžaduje splnění následujících podmínek.

Například pro vznik sulfidických vměstků typu MnS platí:



Teplota tání MnS je 1610 °C, proto je pravděpodobný vznik tuhého vměstku. Ze vztahu pro rovnovážnou konstantu reakce (4.3) lze odvodit výraz pro rovnovážný součin koncentrací manganu a síry v oceli.

$$([\text{Mn}][\text{S}])_{\text{rovn.}} = \frac{a_{\text{MnS}}}{K_{\text{MnS}} \cdot f_{\text{Mn}} \cdot f_{\text{S}}} \quad (4.4)$$

$$\log K_{\text{MnS}} = \frac{8474}{T} - 3,096 \quad (4.5)$$

Je zřejmé, že tento rovnovážný součin je závislý na teplotě ($K_{\text{MnS}} = f(T)$) a složení oceli ($f_{\text{Mn}} \cdot f_{\text{S}}$). Aktivita vznikajícího tuhého vměstku MnS $a_{\text{MnS}} \rightarrow 1$. Pak tedy termodynamickou podmínkou vzniku MnS je nerovnost, kdy skutečný součin koncentrací manganu a síry v oceli je větší než vypočtený součin rovnovážný.

$$([\text{Mn}] \cdot [\text{S}])_{\text{skut.}} \geq ([\text{Mn}] \cdot [\text{S}])_{\text{rovn.}} \quad (4.6)$$

O tom, zda vměstek vznikne, rozhoduje součin skutečných obsahů reaktantů, teplota a chemické složení i složení vznikajícího produktu reakce. Ze vztahů (4.4) a (4.5) lze vypočítat teplotu vzniku vměstků MnS pro konkrétní obsah manganu a síry. [13]

$$T = \frac{8474}{3,096 - \log([\text{Mn}][\text{S}])_{\text{skut.}} - \log(f_{\text{Mn}} \cdot f_{\text{S}})_{\text{skut.}} + (\log a_{\text{MnS}})} \quad (4.7)$$

4.4 Vznik nové fáze

Jsou-li splněny termodynamické podmínky průběh reakce, pak další podmínkou pro vznik vměstků je vyloučení nové fáze, které začalo vznikem stabilního zárodku. Aby shluky molekul produktů reakce byly schopny existence jako fáze, musí být síla působení mezi molekulami nové fáze větší než síla působící na tyto molekuly v rozpouštědle (železe). Vyloučení nové stabilní fáze je možné pouze tehdy, je-li celková změna entalpie soustavy záporná a existuje-li určitá hybná síla pochodu. Určitá část energie je potřebná pro překonání energetické bariéry, jako aktivační energie vzniku stabilního zárodku, další část energie pro povrchovou energii tvořícího se zárodku. Zárodek menší než kritické velikosti není schopen růstu a zaniká.

Kritická velikost zárodku je přímo úměrná mezifázovému napětí a molekulové hmotnosti zárodku a nepřímo úměrná hustotě vznikající fáze a stupni přesycení roztoku [5]:

$$r_{\text{krit}} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot M}{(G_1 - G_2) \cdot \rho} \quad (4.8)$$

r_{krit} - poloměr zárodku kritické velikosti

σ - mezifázové napětí na mezifázové hranici zárodku nové fáze a roztoku

$G_1 - G_2$ - stupeň přesycení roztoku, vyjádřený rozdílem volných entalpií v přesyceném a nasyceném roztoku

M - poměrná molekulová hmotnost vznikající fáze

ρ - hustota krystalizující fáze

Ovlivňováním procesu nukleace lze dosáhnout různého počtu a tudíž velikostí zrn (fází) ve ztuhlém materiálu. Pokud bude počet zárodků krystalů velký, bude ztuhlý materiál tvořen

velkým počtem malých zrn. Jemnozrnné materiály mají vyšší pevnostní vlastnosti v porovnání s hrubozrnnými. Proces nukleace lze ovlivnit zejména dvěma způsoby [33]:

- rychlostí ochlazování
- očkovaním

Homogenní nukleace nové fáze, která probíhá v objemu roztoku bez přítomnosti dalších, již existujících fází, je možná jen při použití silných dezoxidovadel a při vysokém stupni přesycení roztoku novou fází. Toto přesycení roztoku (α) je charakterizováno součinem koncentrací obou reagujících látek. Dezoxidačního prvku $w_{[Me]}$, kyslíku $w_{[O]}$ a teplotě reakce, kterou vyjadřuje konstanta K . V tabulce 5 jsou uvedené hodnoty přesycení pro některá dezoxidovadla. [5]

$$\alpha = \frac{w_{[Me]} \cdot w_{[O]}}{K} \quad (4.9)$$

Tab. 5 Hodnoty kritického přesycení pro vybraná dezoxidovadla [5]

$\alpha_{SiO_2} \approx 2,4 \cdot 10^3$
$\alpha_{CeO_2} \approx 10^5$
$\alpha_{Al_2O_3} \approx 10^6$ až 10^7
$\alpha_{TiO_2} \approx 10^2$ až 10^3

Heterogenní nukleace probíhá na částicích již existujících fází. Je častější než homogenní nukleace z několika důvodů [5]:

- přítomnost částic jiných fází v oceli je pravděpodobnější (strusky, exogenní vměstky, žáruvzdorné materiály)
- menší energetická náročnost, kritická velikost zárodku je menší

4.5 Rozdělení endogenních vměstků podle údobí jejich vzniku

Vznikají po rozpuštění reagujících látek a dostatečném přesycení roztoku. Tyto podmínky existují nejen v roztavené oceli v peci nebo v pánvi, ale po celou dobu poklesu rozpustnosti reagujících látek, tedy nejen při chladnutí, ale i tuhnutí, a dokonce i po krystalizaci oceli v tuhém stavu.

Po přísazení a rozpuštění dezoxidovadel v tekuté oceli při primární dezoxidaci vznikají primární vměstky. Existují v roztaveném kovu, mají dobré podmínky pro koalescenci (spojování kapalných vměstků), koagulaci (vznik tuhých vměstků srážecí dezoxidací) [34], vyplouvání a odlučování z oceli nebo pánvi.

Při kontaktu oceli s okolní atmosférou nebo žáruvzdornými hmotami reagují především prvky s vysokou afinitou ke kyslíku - hliník a vápník. Titan reaguje s plynným kyslíkem, ale i kyslíkem žáruvzdorných hmot. Takto vytvořené vměstky nazýváme sekundární vměstky. Tyto vměstky dosahují zpravidla značných rozměrů, takže jsou často považovány za exogenní vměstky.

V oblasti mezi likvidem a solidem oceli se tvoří terciální vměstky. Jejich vznik je podporován prudkým poklesem rozpustnosti kyslíku, síry a dusíku. Pohyb vměstků je ztížen přítomností dendritů železa. Jemnější vměstky jsou pak uloženy v mezidendritických

prostorech. Při následujícím ohřevu oceli na teploty tváření mohou být uloženy po hranicích zrn.

Pod teplotou solidu oceli následkem poklesu rozpustnosti kyslíku, síry a dalších prvků vznikají precipitační vměstky. Vylučují se zpravidla na hraničních plochách buď existujících vměstků, nebo na hranicích zrn, zeslabují jejich soudržnost a jsou příčinou poklesu mechanických vlastností.

Označení vměstků jako endogenní a exogenní má sloužit jako pracovní hypotéza, neboť ve skutečnosti jsou reakce mnohem složitější. [5]

5 Vliv vměstků na vlastnosti oceli

Výsledné vlastnosti jsou ovlivňovány množstvím, velikostí a rozložením vměstků. Ty pak ovlivňují uvedené technologické (tvařitelnost a obrobitelnost), mechanické (únavové chování, statické zatížení, vrubová houževnatost) a slévárenské vlastnosti:

- tvařitelnost

Důvodem nepříznivého vlivu na tvařitelnost je malá soudržnost s matricí. Vměstky mají tendenci se vylupovat. Obtékání částic základní kovovou hmotou je při stejném stupni deformace vyšší u větších částic a tím i rychlejší vyčerpání plasticity matrice než u částic menších. [5] Vměstek, který se vyznačuje dobrou soudržností s ocelovou matricí, představuje faktor, který v podstatě nezvyšuje napětí. Částice nitridu titanu, které se vyznačují dobrou tvrdostí, mají méně negativní vliv než vměstky oxidu hliníku, které jsou také tvrdé, ale mají velmi malou soudržnost s ocelovou matricí. [35]

Každý druh vměstku se při tváření mění jinak (obr. 18) [36]:

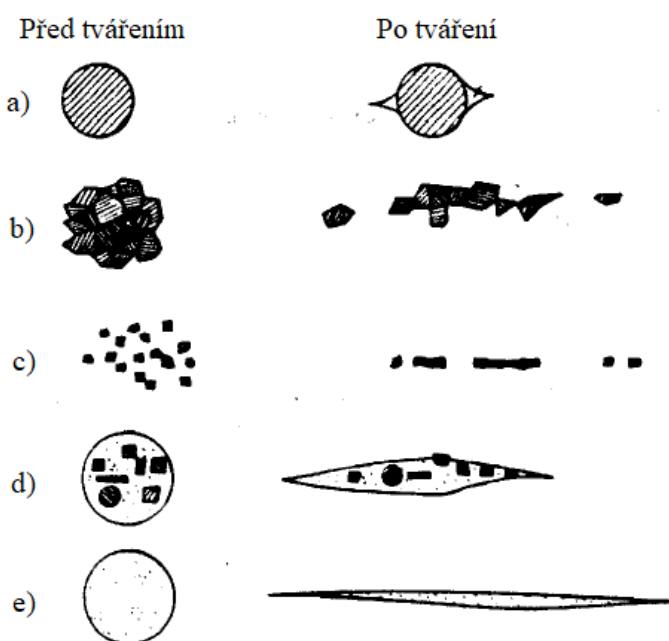
a) tvrdý vměstek hliníku, kolem kterého se při tváření vytváří dutina, ta má za následek vznik trhlin a jejich šíření

b) tvrdý ale křehký vměstek, který se vlivem tváření rozpadl na menší části

c) spěchování vměstků v tvářeném materiálu

d) tvrdé vměstky v měkké matrici se přizpůsobily tváření

e) tvárná matrice a velmi jemné vměstky se zcela přizpůsobily silám tváření.



Obr. 18 Tvar vměstků před a po tváření [36]

- obrobitelnost

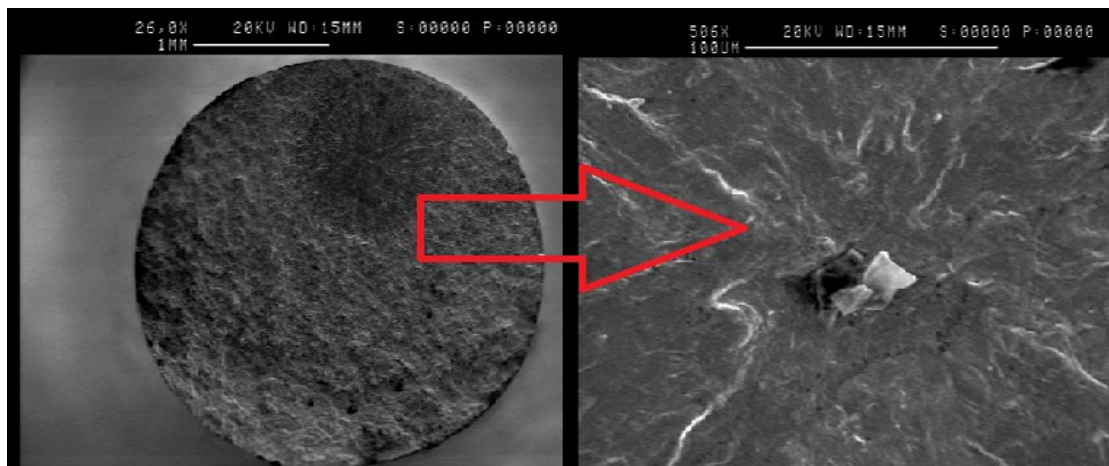
Jedním z pozitivních vlivů na zvýšení obrobitelnosti je použití plastických sulfidů. Tvárné sulfidy působí nejen na snadnější lámavost třísky, ale i na snížení tření mezi povrchem obráběcího nástroje a obrobku. Sulfidy a především MnS, za teplot u ostří nože do 900 °C jsou tvárné a měkké. Při rostoucí velikosti a poklesu jejich počtu se účinek zvyšuje. Zároveň je nutné, aby vměstky měly soudečkovitý tvar.

Naopak u ocelí s vyšší pevností se vyskytuje množství tvrdých částic, především karbidů. Způsobují rychlé otupení obráběcího nástroje. Proto se pro zvýšení obrobitelnosti pomocí dezoxidace tvoří oxidy Al – Si – Ca. [5]

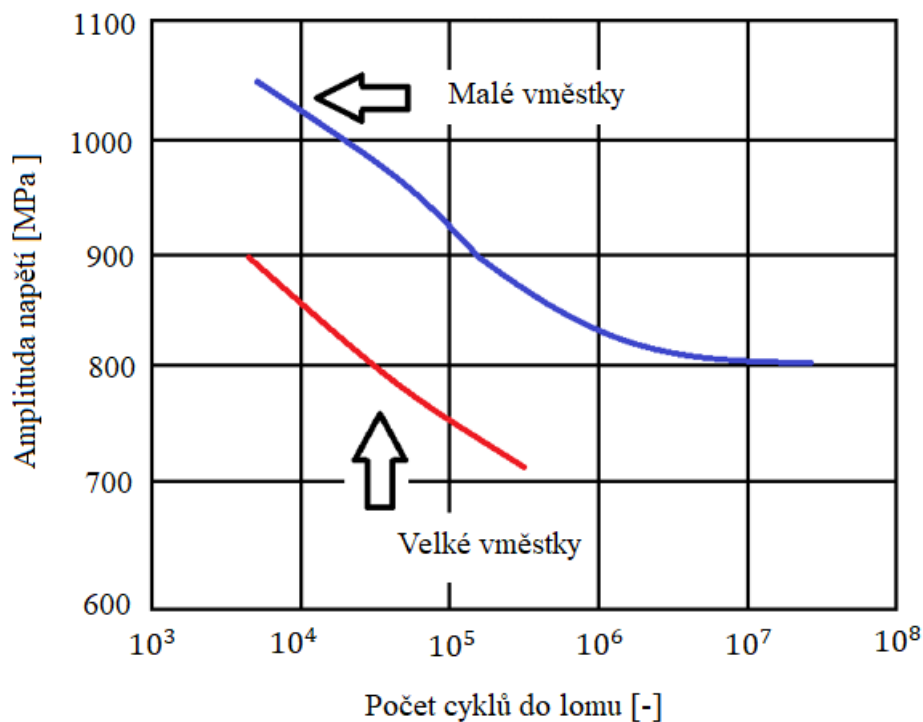
- únavové chování

Vliv velkých vměstků byl prokázán na iniciaci únavového lomu (obr. 19), jsou-li vměstky na povrchu nebo v blízkosti. Vměstky svým rozměrem (obr. 20), tvarem a uspořádáním ovlivní svou přítomností hodnotu meze únavy. Největší účinek vměstků je tehdy, kdy je pevnost R_m větší než 1500 MPa, naopak při hodnotě blízké 500 MPa je účinek malý.

Dalším kritériem na vliv je druh vměstku. Díky značným rozměrům a koncentrace napětí u ostrých hran působí především oxidické vměstky, a to především křehký oxid hlinitý. Oproti tomu jemnější a kulatější sulfidické vměstky jsou méně škodlivé. [5]



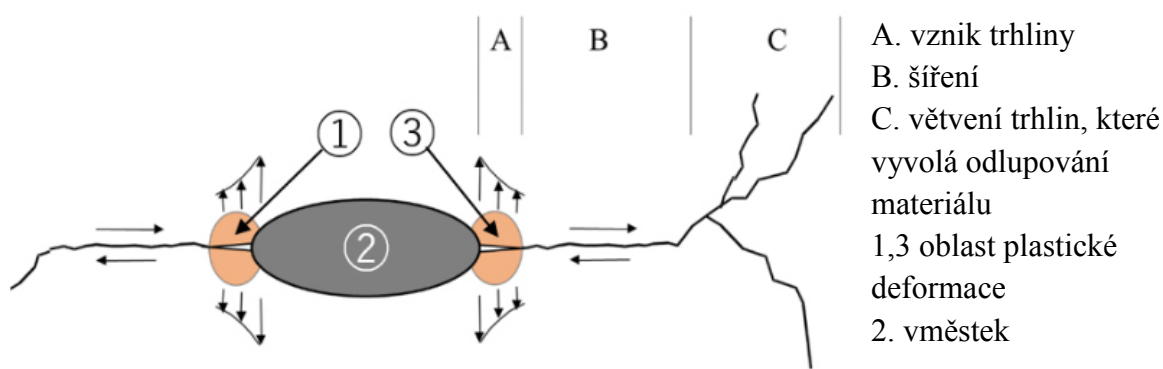
Obr. 19 Iniciace lomu zapříčiněná vměstkem [37]



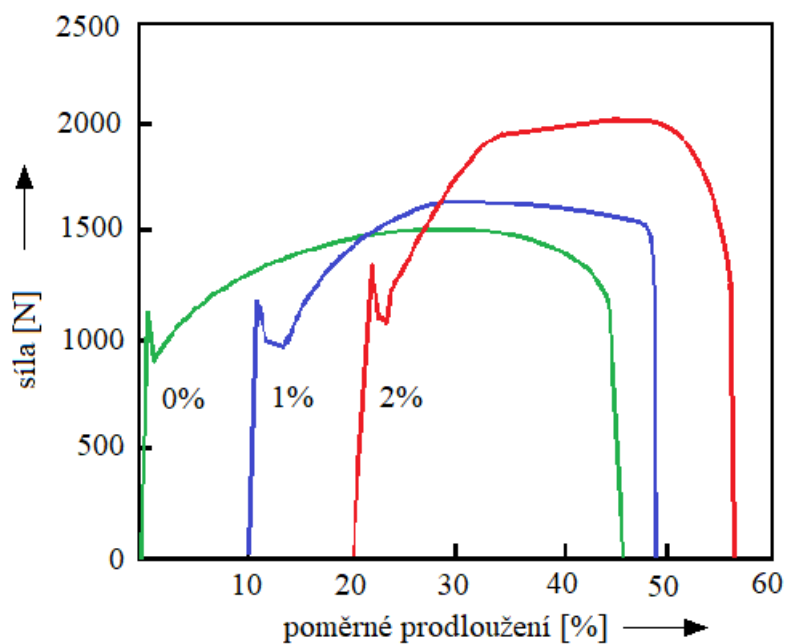
Obr. 20 Únavová trvanlivost v závislosti na velikosti vměstku [38]

- statické zatížení

Při ztěžování zkušebního tělesa při zkoušce tahem do meze kluzu se vliv vměstků téměř neprojevuje. Po překročení meze kluzu v oblasti plastické deformace se tvrdší a křehké vměstky začínají projevovat oddělením od kovové matrice. Koncentrace napětí v blízkosti vměstku vede k místní plastické deformaci a vyvolá tahové zbytkové napětí. S dalšími složkami napětí vzniká trhlina, její šíření je zobrazeno na obrázku 21. Příkladem tohoto chování jsou sulfidy. Sulfidy I. a III. typu jsou rozloženy ve struktuře náhodně, avšak II. typ se shlukuje v těsné blízkosti, takže se jimi snáze propojuje trhlina, a proto jsou škodlivější. Naopak pozitivním účinkem přítomnosti částic Al_2O_3 byla na vzorku experimentálně zjištěna závislost zvýšení tvrdosti a meze kluzu (obr. 22). Zvyšující se procento částic brání pohybu dislokací. [5] Účinky nejen typu ale také tvaru vměstku na vlastnosti potvrdil svým výzkumem P.A Thornton [39], kde byly zkoušeny oxidy kulatého tvaru a protáhlé válcovité vměstky.



Obr. 21 Vývoj a šíření trhlin [35]



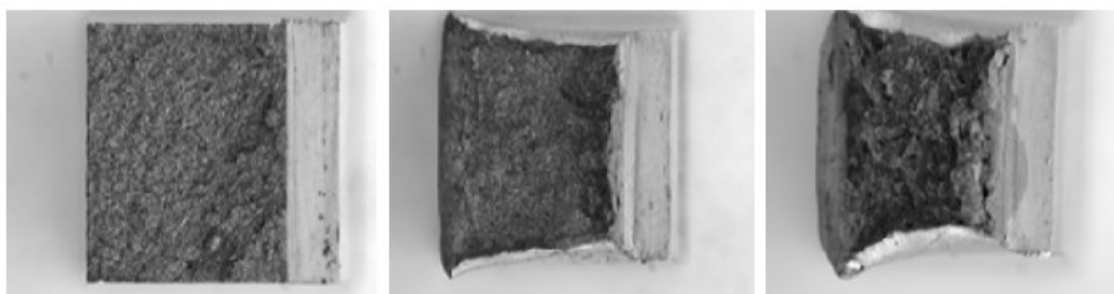
Obr. 22 Vliv obsahu jemných částic Al_2O_3 na mez kluzu a mez pevnosti [5]

- vrubová houževnatost

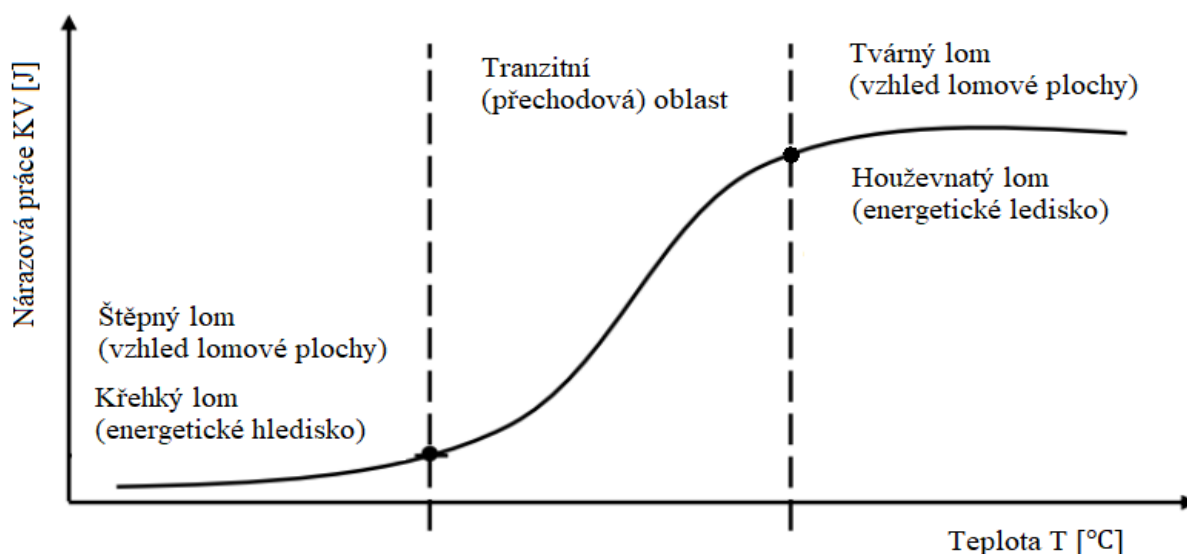
Jednorázové dynamické zatížení je zkouška rázem v ohybu. Zkoumanou veličinou je nárazová práce, která je potřebná k přeražení zkušební tyče. Výpočtem podílu nárazové práce a počátečního průřezu je výsledkem vrubová houževnatost s jednotkou $J \cdot cm^{-2}$. Přesné podmínky zkoušky upravuje norma ČSN EN ISO 148-1 (420381). Pro zjištění vrubové houževnatosti nestačí pouze nárazová práce a výsledek výpočtu, ale zkoumá se také vzhled lomové plochy, kde se hodnotí obsah štěpného a tvárného lomu [5] (obr. 23).

Při hodnocení vlivu vměstků a struktury se hodnotí tři oblasti (obr. 24):

- tranzitní (přechodová) teplota
- šířka pásma tranzitních (přechodových) teplot
- maximální nárazová práce pro přelomení zkušební tyče



Obr. 23 Vzhled lomové plochy [40]



Obr. 24 Graf závislosti nárazové práce a teploty [41]

Rozdíl mezi křehkým a houževnatým lomem ovlivňuje především teplota, poté matrice a vměstky. Vliv vměstků se obdobně projevuje jako u zkoušky tahem. Tedy tvorba dutinek procesem odlupování vměstků a matrice, nebo praskáním velkých ostrohranných vměstků, následné vyčerpání plasticity okolní matrice. To se týká především částic založených na obsahu síry. Naopak při vyšším obsahu tvrdých částic Al_2O_3 nebo TiN mohou tyto částice relaxovat špičky elastických napětí, tak vznikají houževnatější lomy. Tyto tvrdé částice bývají také překážkou proti šíření křehkého lomu. [5, 42, 43]

6 Prevence a odstranění vměstků

Úkolem prevence je zabránit vzniku vměstků. Odstranění není zcela možné, ale vhodnými postupy lze dostat vměstky na přijatelnou úroveň. Pro dosažení požadovaného chemického složení oceli je vyžadován minimální obsah doprovodných a stopových prvků. Jak již bylo zmíněno, jedná se především o fosfor, síru, dusík, ale i antimon, arsen či cín. [44] To je závislé na metalurgickém zpracování. Úplně na počátku je důležitá čistota vsázky a tavicí zařízení:

➤ Výběr a optimalizace vsázky

Podle požadované oceli se volí příprava vsázky. Jako kovonosná vsázka se používá: ocelový odpad, hlubokotažný plech a ocelářské surové železo. Při volbě ocelového odpadu je důležitá jeho čistota. Primárně oddělením odpadu, nadměrné rzi a sutě. Především se, ale jedná o správné třídění konkrétních materiálů. Z hlediska křemíku je nutné nemíchat transformátorové a pružinové oceli. Z hlediska obsahu síry je nutné separovat litinu s kuličkovým, lupínkovým, vločkovým tvarem grafitu a automatovou ocel. Poté prvky, které se v oxidačním údobí neokysličují. Mezi ně patří: měď, nikl a molybden. [45] U surového železa je nutnost kontrolovat čistotu železné rudy. Zvýšené pozornosti by neměl ujít obsah pyritu (disulfid železnatý), který obsahuje síru. [46]

➤ Vhodné tavicí zařízení a stav pece

Ze zkušeností vyplývá, že pro běžné zpracování oceli splňující příslušné normy postačuje kyselá indukční pec, a to i z hlediska ekonomického. Pro vysoké požadavky na mikročistotu oceli a následně odlitku je vhodná zásaditá elektrická oblouková pec. Pokud je například požadována vrubová houževnatost při teplotě -40 až -60 °C nebo vyšší odolnost proti dynamickému namáhání, díky možnosti rafinace během tavení. Kritériem tedy je požadovaná kvalita a výrobní náklady. [4]

Ocel vysoké čistoty je možno vyrobit jen při dobrém stavu vyzdívky stěn a pracovního prostoru pece. Podle průzkumu jsou nejlepší podmínky pro výrobu uprostřed pecní kampaně. Je to stav pecní vyzdívky, kdy je zajištěn odpovídající průběh tepelného a struskového režimu tavení. Při mezitavbové opravě pece je nutno věnovat pozornost stavu pece. Po odstranění zbytků strusky a kovu po předešlé tavbě je nutno opravit vyzdívku. Po opravě je důležité naplánování následné tavby tak, aby u ocelí s minimálním obsahem například chromu a niklu nedošlo ke kontaminaci jinými prvky. Je vhodné zvolit tavbu ocelí s přípustným obsahem doprovodných prvků. Další možností je zařadit přechodovou nebo výplachovou tavbu, kdy je obsah příměsí tolerován. [47]

6.1 Rafinace oceli

Existuje řada metalurgických variant sekundární metalurgie (tab. 6) a jednou z nich je rafinace oceli, kterou lze na některých konvenčních tavicích zařízeních dosáhnout. Pro výrobu super čistých ocelí, kde by mohla být výroba na konvenčních zařízeních nedostatečná, je možné použít speciálních metod, jako je například vakuové zpracování oceli. Úkolem rafinace je nejčastěji odsíření a odfosfoření. Před realizací sekundární metalurgie je důležitá analýza, co očekáváme a co nám to může přinést. Proto se pro výrobní zadání vytváří soubor rafinačních postupů, které se mohou kombinovat s ohledem na specifické podmínky slévárny. [2]

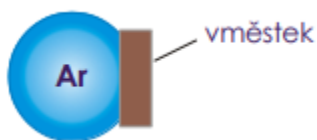
Tab. 6 Možnosti mimopecní rafinace [48]

Postup mimopecní rafinace oceli		Snížení obsahu				Teplotní a chemická homogenizace	Přesné legování	Řízená dezoxidace	Zvýšení mikročistoty	Modifikace vměstků	Ohřev oceli
		C	S	H	N						
Dmýchání inertních plynů	AP	n	n	č	č	a	č	n	č	n	n
Přidávání přísad do tekuté oceli	IP, SL, TN	n	a	n	n	a	a	a	a	a	n
Ohřev oceli pod aktivní struskou	LF	n	a	n	n	a	a	a	a	n	a
Vakuové zpracování oceli	RH, DH	a	č	a	č	a	a	a	č	n	n
	VAD, ASEA-SKF	a	a	a	č	a	a	a	a	n	a
Oxidační vakuování	VOD	a	n	a	č	a	a	a	a	č	č
Oxidace směsí Ar – O	AOD	a	č	č	č	a	a	a	a	č	č
Oxidace směsí H₂O	CLU	a	č	č	č	a	a	a	č	č	č

n - ne, č - částečně, a- ano

6.1.1 Rafinace kovu inertními plyny

Dmýchání inertního plynu do taveniny označovaného jako AP (Argon Pouring) je nejjednodušším pochodem rafinace. Zavedení dmýchání inertního plynu vyžaduje řešení dvou problémů. A tím je volba vhodného rafinačního plynu a způsob jeho zavedení do taveniny. Rafinační plyn je spíše problém ekonomickým. Jako inertní plyn se používá argon a v některých případech to může být oxid uhelnatý, hélium nebo dusík. Pouze použití oxidu uhelnatého je nevhodné pro svou jedovatost a výbušnost ve směsi se vzduchem. V současné době je nejpříjemnější argon, který se používá ve většině případů. Argon musí mít vysokou čistotu, což znamená nejmenší obsah vodíku, dusíku a kyslíku. Mnohem důležitější je vhodný způsob přivádění plynu do taveniny. Nejjednodušší je přívod ocelové trubky chráněné keramickým pláštěm ponořené pod hladinu roztaveného kovu. Argon představuje ve formě bublin atmosféru, ve které se snaží dostat plyn (vodík) do rovnovážného stavu a to tím, že difunduje z oceli do bublin argonu a poté je vynesena z taveniny. [47, 48] Pomocí dmýchání plynů lze vynášet nejen plyny jako je dusík a vodík, ale i nekovové vměstky znázorněné na obrázku 25. Vynášeny jsou z oceli tokem směrem k fázovému rozhraní se struskou, kde jsou zachyceny a následně absorbovány tekutou struskou. Tento proces vyžaduje laminární tok taveniny, který nestrhává částice strusky do oceli. [49]



Pevnost spojení vměstku s bublinou, a tedy vyplouvání vměstků, je závislá na smáčení vměstku ocelí, povrchovém napětí oceli a ploše spojení vměstek-bublina. [49]

Obr. 25 Spojení vměstku s bublinou argonu [49]

6.1.2 Rafinace pomocí syntetických strusek

Jedná se zpravidla o rafinaci tekutého kovu v prostoru mimo vlastní pec. Výsledkem použití tohoto způsobu je zvětšení stykové plochy struskové a kovové fáze a tím mnohonásobné zrychlení působení struskové fáze. Rafinace mimo vlastní pec umožňuje využít kinetické energie tekutého kovu při vytékání z pece nebo pánve k mohutnému promíchání. [47]

Syntetické strusky obsahují jako hlavní složku oxid vápenatý. S ohledem na vysokou teplotu tavení se do syntetických strusek přidává tavidlo ($\text{CaF}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$). Vzhledem k jejich hydrokopičnosti jsou uchovávány ve vzduchotěsných pytlích, které mohou být před odpichem vhozeny do pánve. [2] I strusky můžeme dělit do skupin [49]:

- Přetavené nebo sintrované
Řadí se mezi nejúčinnější strusky, a to především díky teplotě tavení 1362°C a rychlým přizpůsobením. Obsahují CaO a Al_2O_3 v poměru téměř 1:1. Základem jsou přírodní suroviny jako je bauxit, vápenec a dolomit. Avšak tyto vlastnosti jsou vykoupeny vysokou cenou.
- Peletizované a briketované
Jejich vznik zapříčinila vysoká cena předchozí skupiny. Základní surovinou jsou prachové zbytky z hliníkových stěrů, strusky z výroby vanadu, katalyzátory s vyšším obsahem Al_2O_3 a další druhotné suroviny.
- Práškové směsi
Směsi balené v sáčcích jsou nejširší skupinou. Z důvodu prášku neobsahují nežádoucí látky pojiva. S tím ale souvisí nevýhoda prašnosti a nemožnost strojního dávkování.

Toto jsou zástupci tuhých strusek. Existují také tekuté rafinační strusky obsahující ztekucovadlo. To je vyrobeno ze směsi Al_2O_3 ve formě práškového korundu, dolomitu a dalších přísad. Tato struska zůstává díky svému chemickému složení tekutá dlouhodobě. Oproti ztekucovadlu z CaF_2 , kdy při styku v tavenině s SiO_2 vzniká škodlivý plyn SiF_4 a po vyprchání fluoridu ze strusky opět tuhne. [50]

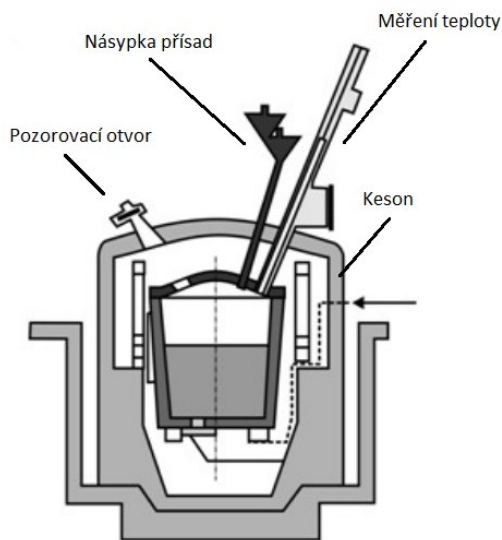
6.2 Vakuová rafinace oceli

Důležitou oblastí sekundární metalurgie je proces probíhající za sníženého tlaku. Snížením celkového tlaku nad taveninou je možné dosáhnout v oceli velmi nízkých obsahů uhlíku. Uhlík je schopen ve vakuu redukovat všechny oxidy, vodík, dusík a kyslík odstranit z oceli ve formě oxidu uhelnatého. Tato rafinace probíhá v pánvi umístěné ve vakuovaném prostoru, hermeticky

uzavřené pánvi nebo konvertoru. [2] Provozně používané způsoby mimopecního vakuového zpracování oceli je možné rozdělit do těchto skupin [47]:

- i. Vakuové odlévání ingotů:
 - a) vakuové odlévání ingotů v kesonu
 - b) vakuové odlévání ingotů do utěsněné kokily
 - c) vakuové odlévání ingotů spodem nebo horem v kesonu
 - d) vakuové odlévání ingotů na licích vozecích
 - e) vakuové odplynění odlité oceli v kokile
- ii. Vakuové zpracování oceli s následným odléváním ingotů za normálního tlaku:
 - a) vakuové odplynění oceli v kesonu
 - b) vakuové odplynění oceli v proudu
 - c) oběžné vakuové odplynění

6.2.1 Vakuové odplynění oceli v pánvi



Obr. 26 Schéma zařízení pro vakuování v kesonu [1]

Nejznámějším způsobem vakuového zpracování oceli s následujícím odléváním ingotů za normálního tlaku je vakuové odplynění v pánvi (obr. 26). Předností tohoto způsobu je jeho provozní jednoduchost. Zařízení se skládá z podtlakové komory (keson), kterou tvoří válcový plášť se dnem a víkem. Ve víku je zhotoven pozorovací otvor, který je utěsněný křemenným sklem. Legovací a dezoxidační přísady lze přidávat dávkovačem umístěným také ve víku. Ke snížení tlaku v komoře slouží odsávací systém, který se skládá z vývěvy, chladicího a čistícího zařízení. Nejčastěji používaná je paroproudá ejektorová vývěva. S tím také souvisí těsnění, které může být za nižších tlaků pryžové ve tvaru prstence. U těsnění musí být drážky konstrukčně řešeny tak, aby nebylo vystaveno plnému tlaku. Mimo to se

těsnicí drážky chladí vodou. Ocel se během vakuování udržuje při tlaku 2 až 4 kPa, případně nižším, a to po dobu 10 až 15 minut. U taveb za tuto dobu o hmotnosti přibližně 100 tun, klesne teplota o 60°C až 100°C. U menších pánví to může být o více než 150°C. Vzhledem k absenci zdroje tepla je důležité provést před vakuováním přehřátí kovu v závislosti na velikosti pánve. Touto technologií lze dosáhnout nízkého obsahu uhlíku cca 0,03 % u vysokolegovaných korozivzdorných ocelí. Obsah síry může být snížen pod 0,001 %. [2, 47, 49]

6.3 Vyplování vměstků

Jednou z možností je prosté odstátí kovu před odléváním. V důsledku rozdílu taveniny a vměstků, mají snahu vyplouvat a absorbovat se ve struse. [2] Podle Stokesova zákona pro kulovité částice vychází rychlost vyplouvání z rovnice (6.1).

$$v = \frac{2}{9} * \frac{g * r^2}{\eta} (\rho_{\text{tav}} - \rho_{\text{vm}}) \quad (6.1)$$

Kde značí:

r – poloměr částice

η - dynamická viskozita taveniny

ρ_{tav} - hustota taveniny

ρ_{vm} - hustota vměstku

I když je rychlost vyplouvání lehkých částic ve srovnání s teoretickým odhadem ovlivněna konvekcí taveniny a tvarem částic, zůstává rozhodujícím činitelem jejich velikost. Velké částice vyplouvají poměrně rychle a lze je proto oddělit dostatečně dlouhým odstáním v peci nebo pánvi. Pro odstranění drobných částic to ale nestačí. [3]

6.4 Modifikace vměstků v oceli

Modifikací je myšleno ovlivnění skupenství, chemického složení a morfologie vměstků. Skupenství závisí na teplotě a chemickém složení. [1] Nejčastěji používaným prvkem je k modifikaci používán vápník. Další prvky vzácných zemin jsou méně často používány. [2]

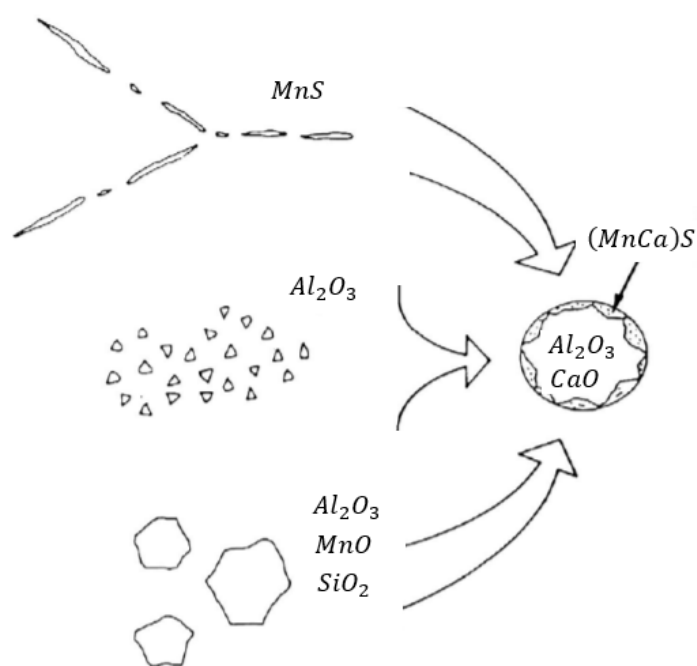
Do oceli se vnáší nejčastěji pomocí plněných ocelových profilů. Přidává se ve formě feroslitin FeCaSi , FeCaAl nebo směs železných pilin FeCa . V tekuté oceli se nachází v plynné fázi (rov. 6.2), avšak aby byl využitelný, musí se nejprve rozpustit, přičemž rozpustnost vápníku je velmi nízká - přibližně 0,02 % hm. [13]



Vápník reaguje s oxidem hlinitým, který vznikl při předchozí dezoxidaci hliníkem. Prokázalo se, že během odstátí roztavené oceli se mění složení oxidických vměstků. Již při malém množství oxidu vápenatého snižují bod tání oxidu hlinitého a vznikají globulární vměstky typu I. ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). Dále reakcí vápníku se sírou ve formě vměstku III. typu sulfidu manganu, vznikají oxisulfidické MnS s oxidickým jádrem ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). Pro úplnou přeměnu na sulfidy typu I. b (CaS) je potřebné dosáhnout poměru vápníku k síře v rozmezí 0,3 až 1,3. [13]

Vápník mění nejen složení ale především tvar vměstků (obr. 27), touto změnou se zlepší vlastnosti oceli. Například je to prevence lamelárního trhání, zlepšení mechanických vlastností nosného průřezu nebo zvýšení obrobitelnosti. [51]

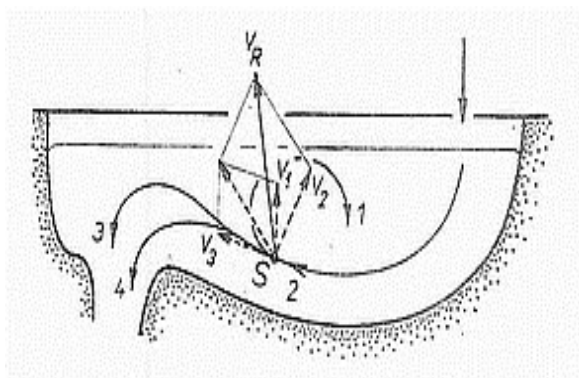
Vápník se aplikuje ve formě slitiny SiCa , CaFe nebo přímo vápník v čisté formě. Injektáž se provádí vstřelováním plněného profilu nebo tryskou. [51]



Obr. 27 Modifikace vápníkem [52]

6.5 Filtrace taveniny

Počátkem 30. let minulého století se projevují zkušenosti a hlubší bádání o proudění kovu, z těchto poznatků se začala pozornost více ubírat na provedení a konstrukci vtokových soustav. Zachycováním vměstků se stala jedním z důležitých hledisek konstrukce vtokových soustav. Oddělováním vměstků se dosahovalo především konstrukcí masivních licích jamek (obr. 28) (se zátkou a později s přepážkou). Také zachycování ve speciálních sekcích jako je rozváděcí kanál (nazývaný struskovák) (obr. 29). Principem těchto řešení byla rozdílná hustota vměstků a kovu. [53]



Obr. 28 Masivní licí jamka [53]



Obr. 29 Vtoková soustava [54]

S příchodem 60. let se začala používat tzv. keramická cedítka. Jejich umístění bylo nejčastěji do vtokové jamky v místě přechodu do kůlu a jejich účelem bylo zachytávání hrubých částic strusky. Společná nevýhoda zmíněných metod je masivní vtoková soustava, která snižuje využití taveniny a tím se prodražuje výroba. Proto se na konci 70. let začíná používat pokročilejší metoda pro zachytávání vměstků ve vtokové soustavě – sítky a filtry. Jednou z možných komplikací je podstatně vyšší teplota oceli a tím i vyšší nároky na teplotní odolnost než například u slitin z hliníku. S výrazným rozšířením výroby litiny s kuličkovým grafitem v 80. a 90. letech se rozšiřuje použití filtrů. Jak již bylo zmíněno, komplikace použití pro ocelovou taveninu je především vysoká teplota a to až 1700 °C, s tím je spojen vysoký požadavek na teplotní odolnost keramiky. Od tohoto se odvíjí především cena, a proto se obvykle používá pro odlitky s požadavkem na vysokou čistotu. [53]

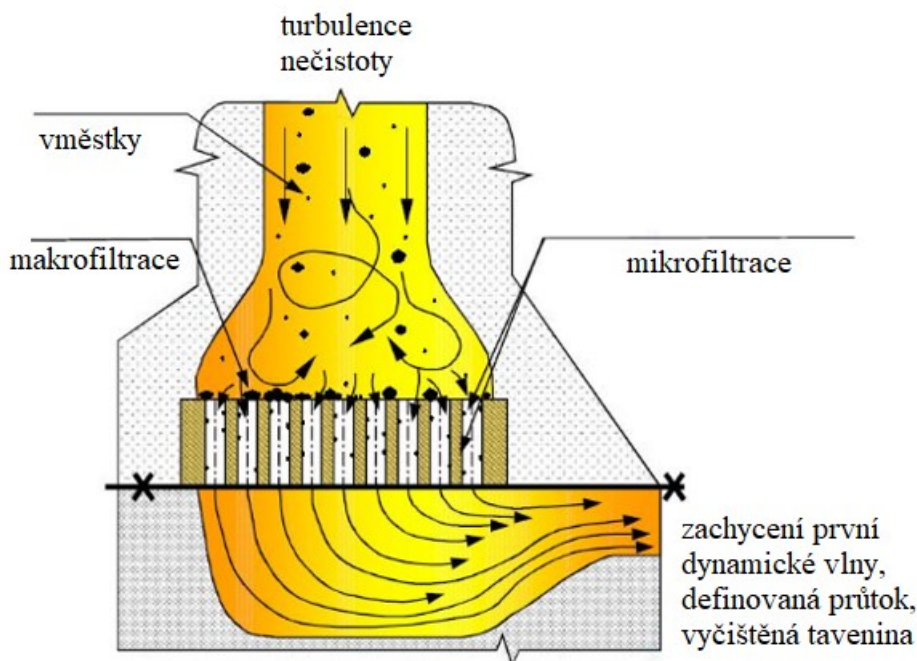
Mělo by platit, že filtrace taveniny není náhradou za nevhodnou výrobní technologii, ale má být doplňkem technologie, k čemuž je potřeba vytvořit optimální podmínky. Vzhledem k účinnosti byly vytvořeny tyto požadavky na keramické filtry [29]:

- schopnost odolávat (erozi a korozi) kovu v mezipánvi, licím kanálku a nálitku
- schopnost odolávat tepelným šokům ve složitých provozních podmínkách
- zadržet velké množství vměstků, včetně lidských plen, zvláště při aplikacích při plynulém odlévání oceli musí být filtr efektivní po dobu 4 až 15 hodin
- mechanická odolnost a odolnost proti tlakovému rázu kovu
- omezení turbulentního proudění ve vtokové soustavě

Od předních českých výrobců slévárenské keramiky Keramtech® s.r.o. Žacléř je možné použít keramický filtr z hmoty RK5 na bázi Al_2O_3 , který zaručuje termickou a mechanickou

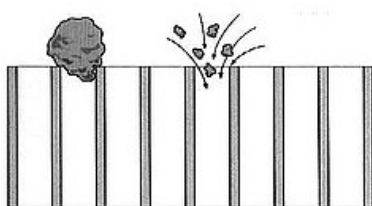
stabilitu do teploty 1740 °C. Druhou variantou je pak filtr pod označením VUKOPOR® HT od firmy LANIK s.r.o. založený na bázi ZrO_2 . [53, 55]

Filtrací se rozumí separace vměstků přítomných v kovu. Filtr lze použít např. při přelévání kovu z tavicí pece do pece udržovací, mezi zásobníkem tekutého kovu a odběrnou částí pece, ale nejčastěji se zařazuje do vtokové soustavy (obr. 30). Základní mechanismy filtrování lze rozdělit do 3 skupin: cezení, tvorba filtračního koláče a hloubková filtrace. [56]



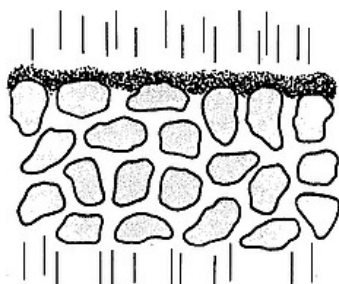
Obr. 30 Znárodnění činnosti filtru [56]

7.8.1 Mechanismy filtrování



Obr. 31 Filtrace cezením [53]

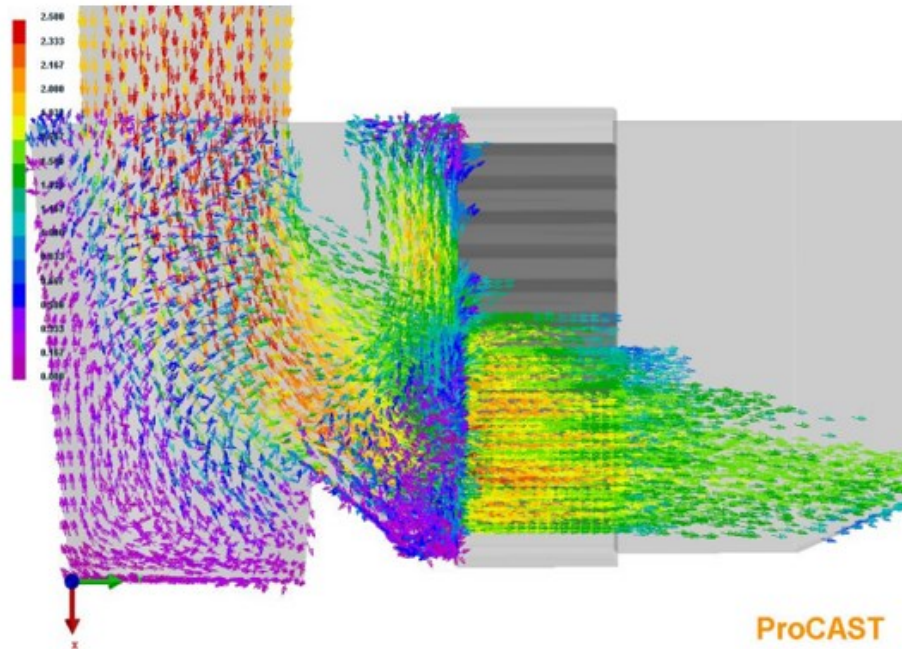
Filtrace cezením (obr. 31) spočívá v zachycování větších vměstků, než je velikost otvorů filtru na přítokové straně. Lze zachytit velké částice a zejména vměšky, které tvoří blány nebo shluky. Tvorba filtračního koláče navazuje na zachycení prvních vměstků na čele filtru. Na těchto větších částicích se postupně zachycují další, menší částice. Tato vrstva postupně narůstá, zpomaluje průtok kovu, až filtr zcela ucpe. Tímto mechanismem se zachycují velmi dobře vměšky s rozměry 1-5 μm .



Obr. 32 Tvorba filtračního koláče [53]

Hloubková filtrace probíhá v celém objemu filtru. Princip spočívá v nalepování vměstků na stěnách (obr. 32) keramiky filtru a ve spojování jednotlivých vměstků navzájem, které tvoří mosty zakotvené na kanálech filtru. Na účinnost hloubkové filtrace má vliv teplota kovu, chemické složení materiálu filtru, smáčivost filtrů a rovněž tvar kanálů filtru. [53]

Funkce filtru nespočívá pouze ve filtraci taveniny. Lisované filtry ovlivňují průtok taveniny vtokovou soustavou. Při prvotním vstupu taveniny do soustavy filtr absorbuje prvotní ráz. A jak již bylo zmíněno v kapitole vliv proudění na reoxidaci, na obrázku 33 lze vidět, jak filtr mění turbulentní proudění na proudění laminární. [55]



Obr. 33 Plnění formy přes lisovaný filtr [55]

7 Metody identifikace

Důležitou součástí ukazující, jak efektivní je veškerá prevence a nalezení nejproblematictějšího úseku výroby oceli, je volba optimální kontrolní a zkušební metody. Rozbor zhodnocení závisí do značné míry na znalostech a zkušenostech. [5, 6] Vliv vměstků na vlastnosti oceli je znám, a proto pro identifikaci vměstků existuje několik zásadně odlišných metod na sobě nezávislých.

7.1 Metoda chemická

Účelem chemických metod je přesné určení chemické povahy vměstků. Vlastní metoda se skládá ze dvou etap. V první se provádí izolace. Ocel se rozpustí a vměstky zůstanou nerozpuštěny. Přitom se vměstky nesmějí znečistit ani měnit své chemické složení.

Podle použitých rozpouštědel se metody chemické izolace dělí do skupin:

- do první skupiny se řadí metoda používající rozpouštění kovového vzorku postupně 10 % nich kyselin HNO_3 , H_2SO_4 a HCl
- druhá skupina využívá rozpouštění v halogenových sloučeninách. Metoda přímé chlorace, metoda rozpouštění v brómu a rozpouštění ve vodném nebo lihovém roztoku jódu
- ve třetí skupině je nejznámější metoda kalomelová. Využívá rozpouštění kovového vzorku v roztoku HgCl_2

Jednou z používaných metod může být elektrolýza. Rozpouštění pomocí vhodného elektrolytu a katod pomocí stejnosměrného proudu. Přičemž použití elektrolýzy je nejčastější. [8]

Nejzásadnějším problémem této metody je volba takového činidla, které rozpouští matici a minimálně napadá i méně stabilní vměstky. Obecně platí, že nejjemnější částice a vměstky nebudou pravděpodobně izolovány. Častá krystalografická příbuznost a vzájemná rozpustnost některých fází a vměstků (karbosulfidy, karbonitridy) komplikuje provedení rozboru. Po této izolaci se provádí identifikace metodami: petrografickými, rentgenovou difrakcí, spektrografií a spektrometrií. Jsou významným pomocníkem při následcích dezoxidace, neboť ilustrují chemické složení (hlinitanů, křemičitanů, sulfidů). [5] Ačkoliv nelze určit velikost ani rozložení v oceli, metoda je pracná a zdlouhavá, tak i přesto je nepostradatelná při základním výzkumu. [8]

Do chemických metod lze zařadit i Baumannův otisk. Tato metoda se používá pro vizuální rozložení (kvalitativní analýza – otisky nejsou použity pro stanovení obsahu, ale pro zjištění, jaké chemické látky obsahují) síry a sulfidických vměstků typu MnS s obsahem síry v rozmezí přibližně od 0,005 do 0,4 hm.%. V případě nižšího obsahu síry pod 0,005 hm.% jsou zobrazení velmi slabá.

Povrch zkušební vzorku musí být čerstvě vybroušen a nesmí obsahovat nečistoty. Princip je založen na kontaktu fotografického papíru namočeného do kyseliny sírové s plochou výbrusu opatřenou emulzí. Při kontaktu dochází k chemické reakci za vzniku H_2S , který reaguje s halogenidy stříbra v emulzi za vzniku Ag_2S . Vizualizace sulfidických vměstků se na otisku projeví ve formě tmavě hnědých oblastí. [57]

7.2 Metoda magnetická

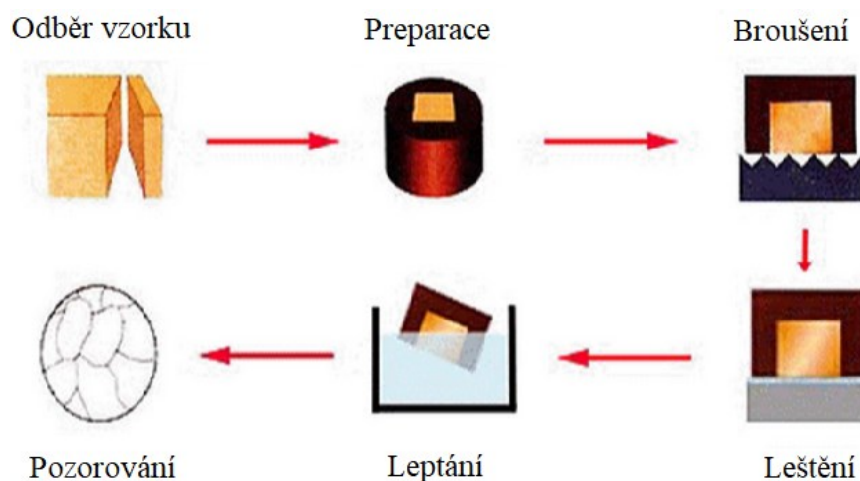
Princip je založen na tom, že se vzorky podélně nebo příčně zmagnetizují průchodem silného elektrického proudu a polévají směsí petroleje nebo oleje s jemnými ocelovými pilinami. V okolí nemagnetických vměstků se magnetické silové čáry zhušťují, v tomto místě se ocelové piliny hromadí a indikují tak přítomné vměstky.

Nevýhodou je především neschopnost rozlišení jednotlivých typů vměstků, protože současně mohou identifikovat jemné trhliny. Metoda je také schopna odhalit pouze velké a hrubší vměstky. Předností je především jednoduchost a rychlé výsledky. [8]

7.3 Identifikace světelným mikroskopem

Mikroskopem a jeho přídatnými zařízeními lze studovat a identifikovat na metalografickém výbrusu především: barvu, tvar, odrazivost a typické uspořádání vměstků. Nelze zjistit, jak velká část vměstku je pod rovinou řezu. Důležité je se vyvarovat situacím, kdy pozorovaná barva vměstku může být ovlivněna barvou použitého světla, stářím výbrusu nebo reliéfem při broušení, proto je důležité zkoumat řadu stejných nebo podobných vměstků, aby byla vyloučena možnost odchylky. [58]

Před samotným pozorováním je nutné připravit metalografický vzorek (obr. 34). Vzorky jsou odebírány za použití řezání a odfrézování, aniž by při odběru došlo k mechanickému nebo tepelnému ovlivnění struktury. Poté je vzorek zalisován za tepla nebo zalit za studena do formy. Jako zalévací hmoty jsou používány epoxidové nebo práškové akrylátové pryskyřice s příslušným tvrdidlem. Následné broušení vzorků má za cíl minimalizovat povrchové nerovnosti. A to ručně nebo mechanizovaně. K přípravě kvalitního výbrusu je dalším krokem leštění. Na rozdíl od broušení z povrchu vzorku materiál neubývá, ale pouze se sníží povrchová drsnost. Mechanicky kotoučem potaženým sametem, saténem, jinou textilií nebo elektrolyticky. [58, 59]



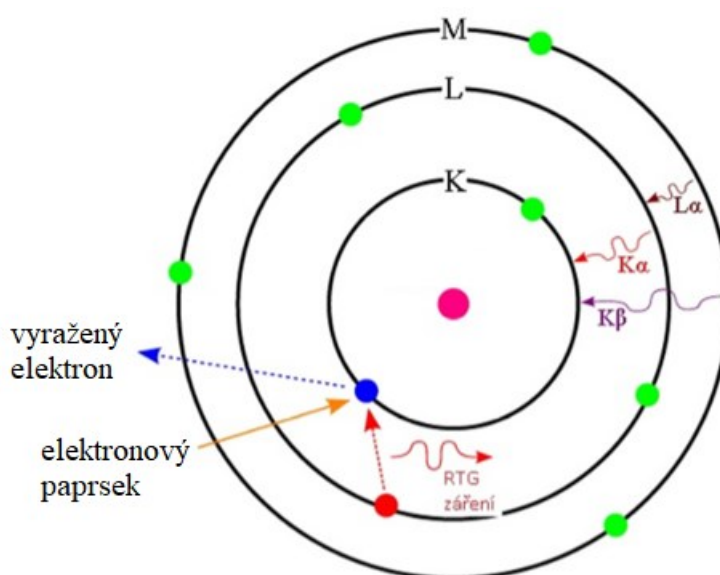
Obr. 34 Příprava metalografického výbrusu [59]

Vyhodnocení vzorku je možné pomocí dvou metod. První metoda je založená na přímém počítání a měření vzorků. Prohlíží se celá nebo rozměrově omezená část vzorku. Ze získaných výsledků lze hodnotu mikročistoty počítat pouze z velikostí a počtu vměstků. V závislosti na okolnostech je možné hodnoty násobit součiniteli, které mohou zahrnovat závažnost vměstku.

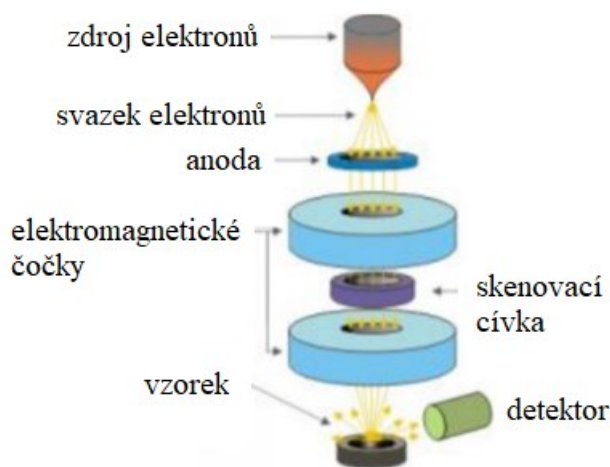
Metoda obsahuje příliš mnoho nevýhod - nepřihlíží k různým druhům vměstků, nezapočítává menší vměstky do určité délky. Její pracnost a časová náročnost je do běžné praxe nepoužitelná. Druhou metodou je porovnávání s již vytvořenými vzory jako je Foxova tabulka nebo Jernkontoret. Tabulky obsahují obrázky vměstků a k nim se přiřazují zhotovené vzorky podle tvaru, rozložení, velikosti a dalších kritérií, které upravuje norma ČSN EN 10247 (420472). [8, 58]

7.4 Identifikace mikroanalyzátořy

Elektron primárního svazku dopadajícího na povrch vzorku vyrazí z nižší energetické hladiny atomu elektron a do uvolněného místa přeskočí elektron z vyšší energetické hladiny (obr. 35). Tento přeskok je doprovázen uvolněním energie, která se změní v RTG záření. Podle příslušného spektra lze identifikovat prvky přítomné ve vzorku. Tímto způsobem se provádí tzv. bodová analýza nebo plošná analýza (plošné zobrazení rozložení zkoumaného prvku). [60] Detekovat lze metodou VDA (podle vlnových délek) prvky od atomového čísla 4 (Be) a výše, metodou EDA (podle energie) od atomového čísla 11 (Na) a výše. Podmínkou analýzy je zhotovení rovinného preparátu. [5,6] Schématické zobrazení elektronového mikroskopu na obrázku 36.



Obr. 35 Dopadající svazek elektronů [59]



Obr. 36 Schéma elektronového mikroskopu [61]

8 Závěry

Záměrem bakalářské práce bylo podat ucelený pohled na vměstky v ocelových odlitcích. Pokud se v odlitku objeví vady, je započat proces, kdy se nejprve shromáždí informace, za jakých podmínek vady vznikly. S těmito informacemi je možné podle charakteristických znaků pomocí sestavených atlasů vad určit konkrétní typ. Jednou z těchto vad jsou vměstky. Vzniku vměstků zatím není možné zcela zabránit, ale je možné je minimalizovat na únosnou míru. Skupinu vměstků, kterou je možné ovlivnit, jsou exogenní nečistoty, které jsou způsobeny vnějšími vlivy. Řadí se k nim kontakt taveniny se žáruvzdornými hmotami, reakce s roztavenými struskami a nebo nejčastěji reoxidační procesy. Všechny tyto procesy je možné více či méně potlačit vhodnější volbou prostředí, ve kterém se zpracovává tavenina nachází. Druhá skupina endogenních vměstků je založena na vnitřních procesech již od počátku výroby. Dochází k chemickým reakcím prvků obsažených v tavenině, a to především kyslíku, síry, manganu a dusíku. Aby tyto reakce mohly probíhat, musí být splněny také určité podmínky, ale ty je takřka nemožné ovlivnit. Výsledkem přítomnosti vměstků je dopad na technologické, mechanické a slévárenské vlastnosti, což byl důvod, proč je důležité se jimi zabývat. Avšak často se i mylně uvádí přítomnost vměstků jako příčina selhání na úkor například méně vhodné konstrukce výrobku. Dnes již existuje řada možností, jak snížit množství nežádoucích prvků, a to například rafinací. Další možností je modifikace vměstků, tedy transformace na méně škodlivý typ. Nebo čím dál více se rozvíjející filtrace taveniny, která by neměla být využívána pouze jako záchranná metoda. Avšak tou nejdůležitější metodou proti vzniku vměstků je především prevence. Pomocí metod identifikace je pak možné posoudit, zda jsou zavedené metody účinné.

9 Seznam použitých zdrojů [62]

1. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
2. ŠENBERGER, Jaroslav, Zdeněk BŮŽEK, Antonín ZÁDĚRA, Karel STRÁNSKÝ a Václav KAFKA. *Metalurgie oceli na odlitky*. V Brně: VUTIUM, c2008. ISBN 978-80-214-3632-9.
3. NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 218 s. ISBN 978-80-01-04395-0. Metalurgické
4. LEVÍČEK, Petr a Karel STRÁNSKÝ. *Metalurgické vady ocelových odlitků: (příčiny a odstraňování)*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984, 269 s. DT 621.746.019.
5. MITURA, Karel a Svatava LANDOVÁ. *Vměstky v oceli a jejich vliv na užité vlastnosti oceli*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
6. ELBEL, Tomáš. *Vady odlitků ze slitin železa: (klasifikace, příčiny a prevence)*. Brno: MATECS, 1992. Slévárenský bulletin.
7. ELBEL, Tomáš. Jak správně postupovat při diagnostice vad odlitků. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2015, **63**(11-12), 390-394. ISSN 0037-6825.
8. *Vměstky v oceli: sborník referátů a výtah z diskuse na Dnech nové techniky v Kladně 4. a 5. listopadu 1959*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960, 116 s. Hutnické aktuality (SNTL). Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:9f883bc0-e1a0-11e4-82a1-005056827e52>
9. SIMS, C. a F. DAHLE. Effect of aluminium on the properties of medium carbon cast steel. *American Foundry Society*. 1938, **46**, 65-132 s.
10. BŮŽEK, Z. Vliv způsobu dezoxidace na mechanické vlastnosti, typ i složení siřníkových vměstků v elektrooceli na odlitky. *Slévárenství*. 1969, (10).
11. BŮŽEK, Z. O teorii a praxi desoxidace elektrooceli. *Hutnické aktuality*. 1973, (5).
12. DEKKERS, Rob. *Non-metallic inclusions in liquid steel* [online]. Leuven, 2002, 195 s. [cit. 2019-01-10]. Dostupné z: <https://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/thermo/publications/doctoral-theses/dekkers>. Disertační práce. Katholieke universiteit Leuven.

13. ADOLF, Zdeněk. *Teorie procesů při výrobě železa a oceli* [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2018-01-17]. ISBN 978-80-248-3579-2. Dostupné z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/teorie-procesu-pri-vyrobe-zeleza-a-oceli-cast-ii-teorie-ocelarskych-pochodu/Adolf_Teorie-procesu_-_pri_vyrobe_zeleza-a-oceli_castII.pdf
14. PACAL, Bohumil a Pavel DOLEŽAL. *Struktura a vlastnosti slitin metastabilní soustavy železo - karbid železa* [online]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/svms/index.htm>
15. OTÁHAL, Vlastislav. *Vměstky v odlitcích ze železných slitin: Atlas vměstků* [online]. Brno, 2009, 393 s. [cit. 2018-11-16]. Dostupné z: <http://otahalconsult.cz/soucasne-produkty/vadz-odlitku/vmestky/>
16. ŠENBERGER, Jaroslav, Antonín ZÁDĚRA a Zdeněk CARBOL. *Vliv hliníku, dusíku a modulu odlitku na vzniku lasturových lomů v ocelových odlitcích* [online]. In: . Karlova Studánka, 2013. Dostupné z: <http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/13/reports/1399.pdf>
17. PEŠLOVÁ, Františka, Břetislav TILL, Libor BENEŠ, Eva SCHMIDOVÁ a Marie PTÁČKOVÁ. *Analýza příčin porušení kolejnicové oceli po svařování na tupo* [online]. In: . Pardubice: Scientific papers of the university of Pardubice, 1997. Dostupné z: <https://dk.upce.cz/handle/10195/67948>
18. ZÁDĚRA, Antonín, Jaroslav ŠENBERGER a Tomáš ELBEL. *Reoxidační pochody při odlévání slitin železa: Reoxidation processes at casting ferrous alloys*. Brno: Česká slévárenská společnost, 2009, 135 s. ISBN 978-80-02-02192-6.
19. CAMPBELL, John. *Castings* [online]. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003, 354 s. [cit. 2019-01-12]. ISBN 07-506-4790-6. Dostupné z: https://mechzoneblog.files.wordpress.com/2017/08/castings_2e.pdf
20. VLADÍK, Radovan. *Simulace proudění kovu ve slévárenské formě z hlediska jeho reoxidace* [online]. Ostrava, 2011, 139 s. [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/90333>. Disertační práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
21. NĚMEČEK, Emil. *Žárovzdorný materiál: Hutní keramika* [online]. [cit. 2018-08-12]. Dostupné z: <https://anzdoc.com/arovzdorny-material-hutni-keramika.html>
22. MYSLIVEC, Theodor. *Fyzikálně chemické základy ocelářství*. 2., přeprac. a rozš. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1971, 445 s.

23. STEFANESCU, Doru, K.D. HAYES, J.O. BARLOW, M OWENS, A.M. LANE a T S PIWONKA. Penetration of Liquid Steel in Sand Molds Part I: Physics and Chemistry of Penetration and Mathematical Modeling – Metal Side: Physics and Chemistry of Penetration and Mathematical Modeling – Metal Side. *Transactions American Foundry Soc.* 2001/04/01, **109**, s. 1347-1363. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/260229613_Penetration_of_Liquid_Steel_in_Sand_Molds_Part_I_Physics_and_Chemistry_of_Penetration_and_Mathematical_Modeling_-_Metal_Side
24. TOMEK, Ladislav, Ivo STACHOVEC a Jana TOMKOVÁ. *Vliv interakcí kov-písková forma na povrchovou vrstvu odlitků* [online]. 38 str. Dostupné také z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/formovaci-materialy-a-ekologie/studijni-sylabus.pdf>
25. ELBEL, Tomáš. Reakce produktů reoxidace kovu se slévárenskou pískovou formou. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2005, **53**(4), 163-168. ISSN 0037-6825.
26. LANE, A.M., M.D. OWENS, Doru STEFANESCU, T S PIWONKA, J O BARLOW a K D HAYES. Penetration Of Liquid Steel In Sand Molds, Part II: Chemical Reactions At The Mold/Metal Interface During Casting Of Steel: Chemical Reactions At The Mold/Metal Interface During Casting Of Steel. *Transactions American Foundry Soc.* 2001/01/02, **109**, s. 1327-1345. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/260229833_Penetration_Of_Liquid_Steel_In_Sand_Molds_Part_II_Chemical_Reactions_At_The_MoldMetal_Interface_During_Casting_Of_Steel/download
27. KLÁROVÁ, Miroslava, Pavel HAŠEK a Filip OVČAČÍK. *Ocelářská struska, její vlastnosti a využití jako opravárenský materiál* [online]. Hradec nad Moravicí, 2008, 6 str. Dostupné také z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2008/sbornik/Lists/Papers/177.pdf>
28. KRET, Ján. *Teorie železářských pochodů: Studijní opora* [online]. Ostrava, 2008, 119 str. Dostupné také z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory_FMMI/618/618-Kret-Teorie-zelezarskych-pochodu.pdf
29. STRÁNSKÝ, Karel, Jiří BAŽAN a Dana HORÁKOVÁ. *Filtrace tavenin železa v průmyslové praxi*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra metalurgie, 2008, 113.s. ISBN 978-80-248-18844-3. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:d8817cb0-cba3-11e4-8565-005056827e52>
30. STRÁNSKÝ, Karel. Thermodynamics of formation of sulphides at solidification. *Hutnické listy*. Brno, 1983, **38**, 768-775. ISSN 0018-8069.
31. FRANCOVÁ, Hana. *Termodynamické modelování tvorby sulfidů v oceli*. Ostrava, 2007, 82 s. Disertační práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

32. ŠENBERGER, Jaroslav a Antonín ZÁDĚRA. *Metalurgie oceli na odlitky* [online]. [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory/2_7_1.html
33. VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 186 s. ISBN 80-708-0600-1. Dostupné také z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pages-img/001.html
34. ADOLF, Zdeněk a Ladislav SOCHA. *Sekundární metalurgie* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016, 60 s. [cit. 2018-09-10]. Dostupné z: http://katedry.fmfi.vsb.cz/Opory_FMFI/618/618-Adolf-sekundarni_metalurgie.pdf
35. MAHÉO, Yves a Rémi SARLIN. *Pro lepší pochopení vlivu materiálových vad* [online]. 2018 [cit. 2019-01-09]. Dostupné z: <http://evolution.skf.com/cs/pro-lepsi-pochopeni-vlivu-materialovych-vad/>
36. LUO, Chunhui. *Modelling the Behaviour of Inclusions in Plastic Deformation of Steels* [online]. Stockholm, 2001, 64 str. ISSN 1650-1888. Dostupné také z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:8924/FULLTEXT01.pdf>. Disertační práce. KTH Royal Institute of Technology.
37. MARINES-GARCIA, Israel a Damaris GALVÁN-MONTIEL. *Fatigue life assessment of high-strength, low-alloy steel at high frequency*. The Arabian Journal for Science and Engineering, 2008/04/01, **33**, 12 str. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/267548664_Fatigue_life_assessment_of_high-strength_low-alloy_steel_at_high_frequency
38. GULSHAN, Fahmida. *Fatigue phenomenon of materials* [online]. In: . Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/5260707/>
39. THORNTON, P. A. The Influence of Nonmetallic Inclusions on the Mechanical Properties of Steel: A Review. *Journal of materials science*[online]. New York, 1971, (6). Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02403103>
40. SEDLÁKOVÁ, Irena. *Houževnatost* [online]. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/6977642-Houzevnatost-i-zakladni-pojmy-tranzitni-lomove-chovani-oceli-teplotni-zavislost-pevnostnich-vlastnosti-fraktografie.html>
41. PACKER, Jeffrey A. *Charpy V-Notch Toughness Of HSS* [online]. Dostupné z: <https://steeltubeinstitute.org/hss/2014/10/07/hss-enevns-october-2014-dr-packer-paper-charpy-v-notch-toughness-hss/>
42. NĚMEČKOVÁ, Ludmila. *Zkoušky mechanických vlastností materiálů: Mechanické zkoušky statické a dynamické* [online]. In: . Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3118719/>
43. GHOSH, Abhijit. *Effect of Microstructure and Crystallographic Texture on Impact Toughness in Low Carbon Ferritic Steel*. Kharagpur, 2016/02/05. DOI: 10.13140/RG.2.1.5175.6562. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/293042014_Effect_of_Microstructure_and_Crystallographic_Texture_on_Impact_Toughness_in_Low_Carbon_Ferritic_Steel. Disertační práce. Indian Institute of Technology.

44. MARTÍNEK, Ludvík, Martin BALCAR, Pavel FILA, Jiří BAŽAN a Zdeněk ADOLF. *Výroba super čistých ocelí v podmínkách ŽDAS* [online]. In: . Hradec nad Moravicí, 2004 [cit. 2018-011-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267838251_VYROBA_SUPER_CISTYCH_OCELI_V_PODMINKACH_ZDAS_as
45. HAMPL, Jiří. *Metalurgie slévárenských slitin: studijní opora* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013, 85 str. ISBN 978-80-248-3585-3. Dostupné také z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/metalurgie-slevarenskych-slitin/Hampl_Metalurgie-slevarenskych-slitin.pdf
46. *Sulfidy* [online]. 2012 [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: <https://nazvoslovi.cz/studium/sulfidy>
47. BOHUŠ, Oldřich, Miloš ČERVINKA, Miloš KARNOVSKÝ, František KRUMNIKL a Miroslav MANDL. *Mimopecní rafinace oceli*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1968, 295 s.
48. ČAMEK, Libor. *Slévárenství ocelových odlitků* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2013, 141 s. [cit. 2018-12-01]. Dostupné z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/slevarenstvi-ocelovych-odlitku/Camek_Slevarenstvi-ocelovych-odlitku.pdf
49. MICHALEK, Karel, Ladislav SOCHA, Zdeněk ADOLF a Jiří BAŽAN. *Rafinace a odlévání oceli: studijní opora* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014, 89 s. [cit. 2018-12-05]. ISBN 978-80-248-3581-5. Dostupné z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/rafinace-a-odlevani-oceli/Michalek_Socha_Rafinace-a-odlevani-oceli.pdf
50. Briketované ztekucovadlo rafinačních strusek. *JAP industries* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <http://www.jap.cz/ostatni-produkty/synteticke-strusky/>
51. GUMULEC, Tomáš. *Řízení vlastností tekuté oceli před jejím plynulým odléváním* [online]. Ostrava, 2011, 126 str. Dostupné také z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/89745?show=full>. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
52. BIRAT, Jean-Pierre. Steel cleanliness and environmental metallurgy. *Metallurgical Research and Technology* [online]. 2016, 2016, **113**(2). DOI: 10.1051/metal/2015050. ISSN 2271-3646. Dostupné z: <http://www.metallurgical-research.org/10.1051/metal/2015050>
53. *LANIK foam ceramics* [online]. Dostupné také z: <http://www.lanik.eu/>
54. JEŘICHOVÁ, Miroslava. *Ruční formování netrvalých forem* [online]. In: . 24.11.2013. Dostupné z: dumy.cz/stahnout/131597

55. *Slévárenská a topná keramika Keramtech* [online]. Dostupné také z: <http://www.keramtech.cz>
56. MAKALOUŠ, Jakub. *Vliv filtrů na plnění formy při odlévání slitin hliníku* [online]. Brno, 2008, 74 s. [cit. 2018-09-17]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/13263/MAKALOUS%20J.%20Vliv%20filtru%20na%20plneni%20formy%20pri%20odlevani%20slitin%20hliniku.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
57. VODÁREK, Vlastimil. *Metody studia struktury: učební text* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 172 str. ISBN 978-80-248-2559-5. Dostupné také z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/MSS/Metody%20studia%20struktury.pdf>
58. MICHALEK, Karel a Karel GRÝC. *Čistota a užité vlastnosti oceli* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010, 316 s. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory_FMMI/618/618-Opora_6180813-Cistota-a-uzitne-vlastnosti-oceli.pdf
59. CAIS, Jaromír. *Elektronová mikroskopie: Metalografie* [online]. Praha: Centrum pro studium vysokého školství, 2015, 28 str. ISBN 978-80-86302-67-6. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/1571274-Elektronova-mikroskopie-metalografie.html>
60. ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. 20 s. [cit. 2019-01-18]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
61. KOSTELANSKÁ, Klára a Jan GAJDZIOK. *Elektronová mikroskopie: Instrumentální analytické metody ve farmaceutické technologii* [online]. Brno, 2017, 21 str. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/110961010-Veterinarni-a-farmaceuticka-univerzita-brno-elektronova-mikroskopie-pro-predmet-instrumentalni-analyticke-metody-ve-farmaceuticke-technologie.html>
62. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. Dostupné také z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

10 Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka	Název	
AOD	Argon Oxygen Decarburisation	
AP	Argon Pouring	
CLU	Creusot Loire Udelholm	
DH	Dortmund Hütteunion	
EOP	Elektrická oblouková pec	
IP	Injection process	
LF	Ladle Furnace	
ppm	Parts per million	
RH	Rührstahl Heraeus	
RTG	Rentgenové záření	
SL	Scandinavian Lancers	
TN	Thüßen Niederrhein	
VAD	Vakuum Arc Degassing	
VD	Vakuum Degassing	
VOD	Vakuum Oxygen Decarburisation	
Symbol	Název	Jednotka
a_i	aktivita	[%, ppm]
f_i	aktivitní koeficient	[-]
G	Gibbsova energie	[J]
K	rovnovážná konstanta chemické reakce	[-]
KC	vrubová houževnatost	[J. cm ⁻²]
KV	nárazová práce	[J]
M	poměrná molekulová hmotnost	[-]
p	tlak	[Pa]
r	poloměr částic	[m]
r_{krit}	poloměr zárodku kritické velikosti	[m]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
t	teplota	[°C]
T	teplota	[K]
v	rychlost vyplouvání	[m. s ⁻¹]
w_i	hmotnostní koncentrace prvku i	[%]
α	přesycení roztoku	[-]
η	dynamická viskozita	[N. s. m ⁻²]
ρ_{tav}	hustota taveniny	[kg.m ⁻³]
ρ_{vm}	hustota vměstku	[kg.m ⁻³]
σ	mezifázové napětí	[N. m ⁻¹]

11 Seznam obrázků

- Obr. 1 Kulovitý tvar vměstku [12]
- Obr. 2 Shluk kulovitých vměstků [1]
- Obr. 3 Dendrity [12]
- Obr. 4 Řetízky vměstků [1]
- Obr. 5 Hranatý tvar vměstku [12]
- Obr. 6 Pohled na shluk hranatých vměstků [1]
- Obr. 7 Tvary čtvrtého typu vměstku na lomové ploše [12]
- Obr. 8 Směs oxidů a sulfidů [1]
- Obr. 9 Fázový popis soustavy Fe – Fe₃C s vyznačenými teplotami likvidu a solidu [14]
- Obr. 10 Makrovměstek [16]
- Obr. 11 Mikrovměstek [17]
- Obr. 12 Zdroje vzniku jednotlivých vměstků [19]
- Obr. 13 Ishikawův diagram [20]
- Obr. 14 Procentuální zastoupení mechanismů penetrace [23]
- Obr. 15 Rozdělení kyslíku mezi roztaveným kovem a atmosférou [2]
- Obr. 16 Dezoxidační schopnosti [22]
- Obr. 17 Ellinghamův diagram [19]
- Obr. 18 Tvar vměstků před a po tváření [36]
- Obr. 19 Iniciace lomu zapříčiněná vměstkem [37]
- Obr. 20 Únavová trvanlivost v závislosti na velikosti vměstku [38]
- Obr. 21 Vývoj a šíření trhlin [35]
- Obr. 22 Vliv obsahu jemných částic Al₂O₃ na mez kluzu a mez pevnosti [5]
- Obr. 23 Vzhled lomové plochy [40]
- Obr. 24 Graf závislosti nárazové práce a teploty [41]
- Obr. 25 Spojení vměstku s bublinou argonu [49]
- Obr. 26 Schéma zařízení pro vakuování v kesonu [1]
- Obr. 27 Modifikace vápníkem [52]
- Obr. 28 Masivní lící jamka [53]
- Obr. 29 Vtoková soustava [54]
- Obr. 30 Znázornění činnosti filtru [56]
- Obr. 31 Filtrace cezením [53]
- Obr. 32 Tvorba filtračního koláče [53]
- Obr. 33 Plnění formy přes lisovaný filtr [55]
- Obr. 34 Příprava metalografického výbrusu [59]
- Obr. 35 Dopadající svazek elektronů [59]
- Obr. 36 Schéma elektronového mikroskopu [61]

12 Seznam tabulek

Tab. 1 Zařazení vměstků do systému [2]

Tab. 2 Teploty tavení oxidů tvořící základ žáruvzdorného materiálu [21]

Tab. 3 Žáruvzdorné materiály [21]

Tab. 4 Chemické složení oceli obsahující vměstky Ti_3CS_2 [30]

Tab. 5 Hodnoty kritického přesycení pro vybraná dezoxidivadla [5]

Tab. 6 Možnosti mimopecní rafinace [48]