



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SEKUNDÁRNÍ METALURGIE OCELI

SECONDARY METALLURGY OF STEEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bronislav Neduchal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bronislav Neduchal**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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:

Sekundární metalurgie oceli

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Progresivní výroby oceli v ocelárnách a slévárnách využívají prvků sekundární metalurgie. Jejich použití má za cíl zejména zvýšení výrobnosti a dosažení vyšší jakosti vyráběného materiálu.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je provést rozdělení jednotlivých postupů sekundární metalurgie a jejich metalurgické možnosti a výhody. Pro pochody LF, VD a VOD popsat principy metalurgického zpracování používané na těchto zařízeních.

Seznam doporučené literatury:

ŠENBERGER, J., Z. BŮŽEK, A. ZÁDĚRA, K. STRÁNSKÝ, V. KAFKA. Metalurgie oceli na odlitky. Brno, Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství VUTIUM. 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3-32-9.

ŠENBERGER, J., L. MARTÍNEK. Sekundární metalurgie ve slévárnách oceli – I. část. Slévárství XLVII, 1999, č. 6/7 s. 372-378.

MARTÍNEK, L., J. ŠENBERGER, P. FILA, M. BALCAR. Sekundární metalurgie ve slévárnách. Slévárství, roč. 54, č.6, 2006, s. 218–221. ISSN 0037-6825.

KNÜPPEL, H. Desoxidation und Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen, Band 1. Verlag Stahleisen M.B.H./ Düsseldorf 1970.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na rozdělení a popis jednotlivých postupů sekundární metalurgie, které se využívají ve slévárnách oceli. Popisují se zde vlivy jednotlivých prvků obsažených v oceli, tavící agregát, rozdělení jednotlivých postupů sekundární metalurgie a metalurgické možnosti a výhody jednotlivých pochodů. Praktická část se zaměřuje na vyhodnocení jednotlivých taveb nízkolegované oceli GS20Mn5 za použití dvou metod EOP a EOP-LF-VD, dále vysokolegované oceli X20Cr13 za použití metody EOP-LF-VOD.

Klíčová slova

Sekundární metalurgie, ocel, metalurgické pochody, vakuování, rafinace.

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on dividing of individual processes of secondary metallurgy, which are being used in steel foundries. It describes the influence of individual ingredients contained in the steel, the molten aggregate, the dividing of individual processes of secondary metallurgy and the metallurgical possibilities and advantages of individual processes. The practical part focuses on evaluation of individual layers of low-alloy steel GS20Mn5 using two EOP and EOP-LF-VD methods, as well as high-alloy steels X20Cr13 using the EOP-LF-VOD method.

Keywords

Secondary metallurgy, steel, metallurgical processes, vacuum, refining.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NEDUCHAL, Bronislav. *Sekundární metalurgie oceli*. Brno, 2018. 50s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor strojírenská technologie. Vedoucí práce doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

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 dne 24.05.2018

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za svůj čas, trpělivost, cenné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji společnosti Ždas, a.s. a společnosti Vítkovice Heavy Machinery, a.s. za poskytnuté informace pro bakalářskou práci. Děkuji také svým rodičům a mé přítelkyni za podporu při studiích.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod | 9 |
| 2 | ÚVOD DO SEKUNDÁRNÍ METALURGIE | 10 |
| 2.1 | Rozdělení prvků v oceli | 10 |
| 2.2 | Elektrická oblouková pec | 11 |
| 2.3 | Soudobé vývojové trendy ve výrobě oceli v EOP | 12 |
| 3 | ZÁKLADNÍ METODY SEKUNDÁRNÍ METALURGIE..... | 13 |
| 3.1 | Postupy sekundární metalurgie provozované při atmosférickém tlaku..... | 15 |
| 3.1.1 | Pochod AP | 15 |
| 3.1.2 | Pochody SL, TN, IP, SCAT | 16 |
| 3.1.3 | Pochod LF | 17 |
| 3.1.4 | Pochod AOD | 17 |
| 3.1.5 | Pochod CLU | 18 |
| 3.2 | Postupy sekundární metalurgie provozované při sníženém tlaku | 19 |
| 3.2.1 | Pochod VD | 19 |
| 3.2.2 | Pochod VOD | 20 |
| 3.2.3 | Pochod VAD | 20 |
| 3.2.4 | Pochod ASEA-SKF | 20 |
| 3.2.5 | Pochod RH | 21 |
| 3.2.6 | Pochod DH | 21 |
| 4 | POCHODY LF, VD A VOD | 22 |
| 4.1 | Pochod LF, pánvová pec | 22 |
| 4.2 | Pochod VD | 25 |
| 4.3 | Pochod VOD..... | 26 |
| 5 | PRAKTICKÁ ČÁST | 28 |
| 5.1 | Průběh zpracování nelegované oceli GS20Mn5 na EOP | 28 |
| 5.2 | Průběh zpracování nelegované oceli GS20Mn5 na EOP-LF-VD | 35 |
| 5.2.1 | Odplynění oceli GS20Mn5 na pochodu VD..... | 39 |
| 5.2.2 | Složení redukčních strusek | 41 |
| 5.3 | Průběh zpracování vysokolegované oceli X20Cr13 NA EOP + VOD | 42 |
| 5.3.1 | ODPLYNĚNÍ OCELI X20Cr13 NA EOP-LF-VOD | 45 |
| 6 | ZÁVĚR | 46 |

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

1 Úvod [5]

Výroba a vývoj oceli směřuje k neustálému zvyšování jakosti oceli a snižování nákladů. K dosažení těchto cílů je zapotřebí používat čistých přísad, třídění ocelového odpadu, snížení vměstků v oceli, snížení obsahů plynů (H,N,O), dolegovávat prvky na přesnou hranici chemického složení a umožnit ocel maximálně odsířit a odfosfořit.

V určitých odvětvích strojírenské výroby je vyžadována mimořádně čistá ocel. Klasickou technologií rafinace oceli (primární metalurgii) už nebylo možné dále zlepšovat čistotu a jakost oceli. Proto se do výroby oceli zařazují doplňující pochody a technologie, mezi které patří vakuování oceli, rafinace oceli pomocí inertních plynů a syntetických strusek, dodatečný přehřev oceli během jejího zpracovávání, elektromagnetické promíchávání atd. Všechny tyto doplňující pochody a technologie se dají shrnout pod jeden pojem, a to sekundární metalurgie.

Sekundární metalurgie umožňuje vyrábět vysokolegované, středně legované a samozřejmě i nelegované oceli sloužící například na: výrobu žáropevných a žáruvzdorných ocelí, korozivzdorných ocelí pro chemický průmysl, tlakové nádoby používané za vysokých a nízkých teplot, oceli pro dynamicky namáhané části strojů, rotorů plynových turbín apod.

V rámci bakalářské práce jsou popsány základní metody sekundární metalurgie. V praktické části jsou rozebírány změny chemického složení v nelegované a vysokolegované oceli, dále jsou zde rozebírány změny chemického složení a rozbory používaných strusek na pochodu EOP/VD používané ve společnosti Žďas, a.s.

2 ÚVOD DO SEKUNDÁRNÍ METALURGIE

2.1 Rozdělení prvků v oceli [2][5][14]

Aby bylo dosaženo požadovaných mechanických a technologických vlastností ocelí, je nutné dodržet jejich předepsané chemické složení. Předepsané chemické složení a jiné nežádoucí prvky se zjišťují chemickým rozbořem. Z nežádoucích prvků se jedná především o doprovodné a stopové prvky, nekovové vměstky a plyny rozpuštěné v matici, které mají často značný a nežádoucí vliv na požadované vlastnosti ocelí. Do oceli se dostávají jednak ze surovin používaných při výrobě oceli, nebo se jimi kov znečišťuje během jednotlivých údobí výrobního pochodu v ocelářské peci nebo mimo pec.

Za jeden z hlavních úkolů sekundární metalurgie se považuje snížení nežádoucích prvků, vměstků a plynů, které se v tavenině nacházejí.

Jednotlivé prvky se tedy dělí na:

- prvky přísadové – používají se k legování oceli a považují se za prospěšné
- prvky doprovodné – v určité míře mohou být považovány za škodlivé

Přesná hranice mezi doprovodnými a přísadovými prvky však neexistuje, protože pro různé značky oceli mohou být i různá kritéria pro jejich dělení.

- prvky prospěšné – řadí se zde například C, Mn, Cr, V, Mo, W, Ti, Al atd. Tyto prvky dokážou pozitivně ovlivňovat vlastnosti oceli, jako je pevnost, tvrdost, tažnost, houževnatost, obrobiteľnosť, korozivzdornost, žáruvzdornost a mnohé další.
- prvky škodlivé - řadí se zde S, P, Cu, Sb, Bi, Zn, Pb. Tyto prvky se v nejběžnějších případech můžou řadit jako škodlivé. Jeden z příkladů, kdy jsou tyto prvky v oceli prospěšné je například výroba automatových ocelí. Kde se síra používá jako legující prvek s hmot. obsahem až 0,2 %. [7]

O jednotlivých prvcích a jejich množství, které přecházejí ze vsázky, nebo pecní atmosféry do oceli, rozhodují faktory jako je afinita ke kyslíku, stabilita oxidů při teplotách v ocelářských pecích a stupeň oxidačního působení jednotlivých údobí při výrobě oceli.

Podle afinity ke kyslíku lze jednotlivé prvky sestavit do tzv. afinitní řady.

Ca, Ba, Mg, Be, La, Th, Y, Ce, Hf, Zr, U, Al, Ti, C, B, Ta, Si, V, Nb, Cr, Mn, Fe, W, Mo, Cd, Co, Cu, Ni

Na levé straně se objevují prvky s největší afinitou ke kyslíku, na straně pravé zase s afinitou nejmenší. Výsledkem potom je, že prvky s vyšší afinitou ke kyslíku, než je železo, se

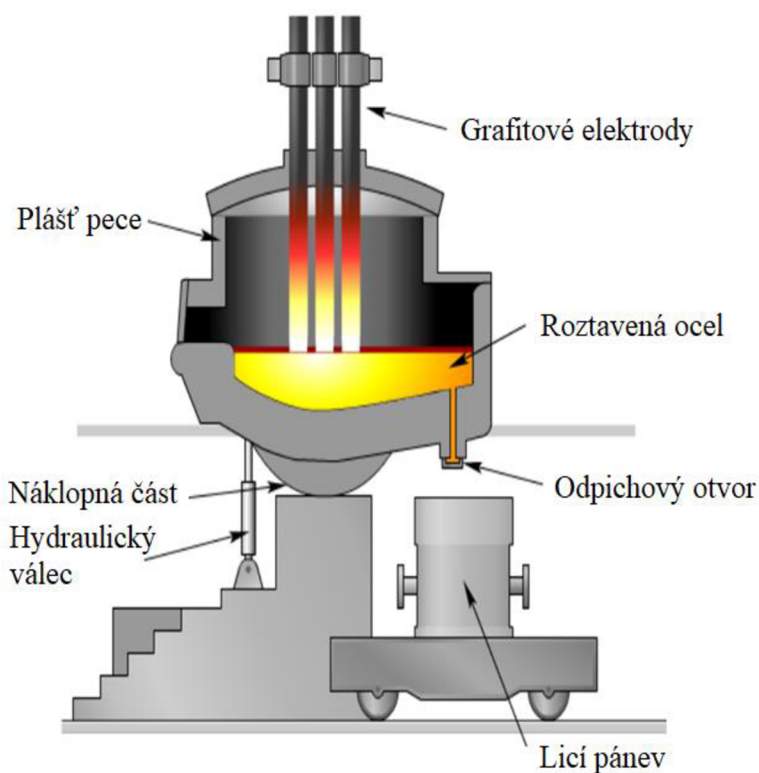
mohou využívat k dezoxidaci oceli. Podobně se dále řadí prvky podle jejich afinity k uhlíku, síře a dusíku. Pravidlem je, že stabilita sloučenin klesá v řadě od nejstabilnějších oxidů, přes sulfidy, nitridy až ke karbidům.

2.2 Elektrická oblouková pec [1] [12] [15] [18]

Elektrické obloukové pece jsou ve slévárnách oceli běžně používaným tavicím agregátem. K roztavení vsázky se využívá elektrická a chemická energie. Elektrická energie se do vsázky dostává pomocí uhlíkových elektrod, kdy na začátku tavby je elektrický oblouk značně nestabilní a k jeho stabilizaci dochází v průběhu tavby se zvyšující se teplotou v roztaveném kovu.

Chemická energie se dodává pomocí kyslíko-palivových hořáků, nebo kyslíkové trysky. Kyslíko-palivové hořáky spalují zemní plyn spolu s kyslíkem. Až se roztaví značná část vsázky, začne se dmýchat pouze samotný kyslík do lázně a vznikají exotermické reakce, které jsou dalším významným zdrojem tepla.

Na obr. č. 1 lze vidět schéma elektrické obloukové pece spolu s lící pánví.



Obr. č. 1: Elektrická oblouková pec [17]

Celý proces probíhající na elektrické obloukové peci se rozděluje na jednotlivá údobí:

Údobí tavení – Je to doba počítaná od zapnutí pece do odběru první zkoušky, přičemž při odběru vsázka ještě není obvykle zcela roztavena. Závisí na instalovaném jmenovitém měřném výkonu pecního transformátoru a jeho využívání. Na roztavení 1 t oceli je zapotřebí zhruba 380 kWh. Teoretická spotřeba elektrické energie na ohřev tekuté oceli o 100 °C činí cca 22kWh. Průměrná doba tavení 7 t vsázky je 1,5h. V elektrickém oblouku vznikají teploty přesahující 3000 °C, které způsobují lokální přehřívání kovu. To způsobuje odpařování některých kovů nebo jejich oxidů.

Údobí oxidační – Je to doba od odběru první zkoušky do konce stažení oxidační strusky. Probíhá za účelem snížení koncentrace nežádoucích prvků. Může být vedena rudou nebo plyným kyslíkem, přičemž se s výhodou oba způsoby kombinují. Využívá se zde vlastností jednotlivých prvků obsažených v roztavené oceli, které mají vyšší afinitu ke kyslíku, než železo. Patří sem oxidace uhlíku (uhlíkový var), odfosfoření oceli, oxidace prvků Si, Mn, Cr, V. Dále zde dochází ke zmenšení obsahu vodíku a dusíku, vyrovná se teplota celé lázně a zmenší se obsah vměstků v oceli.

Údobí redukční – Je to doba od stažení oxidační strusky do ukončení metalurgických procesů jako je dezoxidace oceli, odsíření, přesné dolegování a konečná úprava teploty. Toto údobí se může částečně, nebo celé přesunout na některé ze zařízení sekundární metalurgie.

2.3 Soudobé vývojové trendy ve výrobě oceli v EOP [1]

Při zavádění moderních postupů sekundární metalurgie se může změnit výrobní technologie i samotná konstrukce EOP. Obloukové pece s přímou návazností na pánvovou pec (LF) slouží pouze jako tavící agregát, ve kterém se provádí oduhličení a odfosfoření.

Vývoj v posledních letech nových konstrukčních prvků EOP měl za cíl:

- zvýšit jakost vyráběné oceli
- snížit výrobní náklady
- optimalizovat použití energie – snížit spotřebu primární elektrické energie a zvýšit flexibilitu ve volbě energie
- snížit emise a hlučnost

Principy u nově vyvíjených postupů jsou následující:

- využití tepla odcházejících spalin (pecních plynů) pro předehřev vsázky (ocelového odpadu)
- použití uhlíku a kyslíku, oxidace uhlíku jako dalšího zdroje energie v EOP
- využití dospalování CO v pecním prostoru nebo v předehřívací komoře ocelového odpadu
- částečná náhrada elektrické energie, energií z kyslíko-palivových hořáku

3 ZÁKLADNÍ METODY SEKUNDÁRNÍ METALURGIE [1][2][16]

Přesunutí redukčního údobí do pánve přináší pro tavicí pece pozitivní přínos zejména ve:

- zkrácení celkové doby tavby
- zvýšení objemu výroby tavicí pece
- snížení množství opotřebené vyzdívky
- snížení tepelných ztrát
- možnost automatizovat zjednodušené technologie výroby

Použitím jednotlivých metod sekundární metalurgie lze oproti zpracování oceli na EOP dosáhnout vyšší jakosti a to tím, že:

- je zajištěna teplotní i chemická homogenita lázně
- je umožněno snížení obsahu rozpuštěných plynů v tavenině
- je umožněno snížení obsahu vměstků s možností modifikace jejich tvaru a velikosti
- dojde k hlubokému odsíření, nebo řízenému obsahu síry
- dojde k dolegování i na spodní hranici rozmezí.

Takto připravená ocel, která má přesnou lící teplotu a řízenou chemickou i metalografickou čistotu, je nachystaná k odlévání buď do ingotů, nebo do forem. Přesná lící teplota se udržuje v rozmezí 3 °C až 5 °C.

Podle literatury [1] je v dnešní době na výběr z více než 50 možných způsobů mimopecního zpracování oceli. Pro volbu jednotlivých postupů jsou rozhodující hlavně ekonomická kritéria, dosažitelné hodnoty odsíření a odplynění, metalografická čistota, celková doba zpracování oceli.

Detailní propočet nákladů pro plánované zavedení postupů sekundární metalurgie, bude záviset především na objemu kovu zpracovaného na těchto zařízeních a pořizovacích nákladech daných technologií.

V tab. č. 1 je přehled nejpoužívanějších metod sekundární metalurgie, jejich přínos, označení a popis.

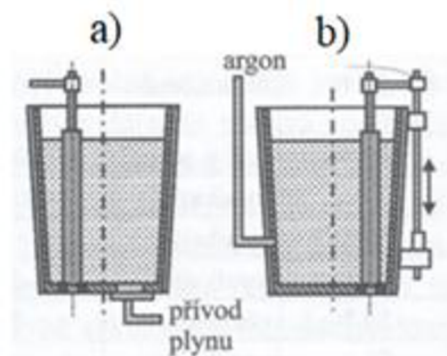
Tab. č. 1: Popis metod sekundární metalurgie, jejich přínos a stručný popis [1]

| Postup sekundární metalurgie | Popis | Označení | Přínos |
|---|---|------------------------|--|
| Dmýchání inertních plynů | Dmýchání argonu příp. dmýchání pod aktivní struskou | AP | Teplotní a chemická homogenizace oceli, částečná rafinace oceli, odsíření |
| Přidávání přísad (injektáž) do tekuté oceli | Dmýchání prachových přísad (CaO, Ca apod.) Zavádění plněných profilů | SL, TN, IP SCAT | snížení O a S, modifikace vměstků a zvýšení mikročistoty, částečné legování |
| Ohřev oceli pod aktivní struskou | Kov je ohříván a promícháván inertním plynem pod aktivní struskou | LF | teplotní a chemická homogenizace, snížení obsahu S, modifikace vměstků, legování |
| Vakuové zpracování oceli | V komoře | RH, DH | rychlé oduhličení, snížení obsahu vodíku |
| | V proudu, během odpichu, během lití | | snížení obsahu vodíku případně dusíku, omezení sekundární oxidace |
| | S přihřevem pod aktivní struskou | ASEA-SKF, VAD | hluboké odsíření, snížení obsahu vměstků a jejich modifikace, teplotní a chemická modifikace, legování |
| Oxidační vakuování | V pánvi | VOD | hluboké oduhličení (použití u Cr ocelí), snížení obsahu H, N, hluboké odsíření, legování |
| Oxidace směsí Ar-O | V konvertoru | AOD | |
| Oxidace směsí H ₂ -O | V konvertoru | CLU | |

3.1 Postupy sekundární metalurgie provozované při atmosférickém tlaku

3.1.1 Pochod AP [1][2][3][4]

Umožňuje rafinaci kovu za pomoci inertního plynu. Je to technicky velice jednoduchý pochod. Inertní plyn se nejčastěji dmýchá přes porézní tvárnici umístěnou ve dně pánve, nebo přes prodyšnou tvárnici umístěnou ve stěně pánve. Na obr. č. 2 a) můžeme vidět dmýchání inertního plynu dnem pánve, b) můžeme vidět dmýchání inertního plynu stěnou pánve.



Obr. č. 2: Přívod plynu do pánve [1]

Nejčastěji jsou používány tři typy inertních plynů a to argon, dusík, oxid uhličitý. Plyny jako vodík a dusík difundují do vytvořených bublin argonu a spolu s nimi jsou vynášeny k povrchu roztavené oceli a následně taveninu zcela opouští. Tento jev se samovolně ukončí, jakmile parciální tlak např. vodíku v plynné atmosféře bude odpovídat dané koncentraci vodíku v tavenině.

Pro co nejvyšší efekt odplynění je snahou vytvářet co nejmenší velikosti bublin rozptýlených v co největším objemu lázně. Takto vytvořené bubliny mají mnohem vyšší schopnost odplynění oceli, promíchávání lázně a vynášení vměstků do strusky, než kdyby se vytvářely velké bubliny a v malém množství.

Dostačující hodnota obsahu vodíku v oceli, kdy už nebyly pozorovány případy vzniku vodíkových bublin, je podle lit. [1] 6 ppm. Při dalším snižování obsahu vodíku se už metoda odplynění inertním plynem nevyplácí, jednak z důvodu vysoké spotřeby argonu a jednak z důvodu velkého poklesu teploty celé lázně. Kvůli vysokým nákladům, které s sebou nese odplynění lázně pomocí inertního plynu, se přínos vidí spíše v teplotní a chemické homogenizaci lázně, případně snížení množství nekovových vměstků. Na poslední uvedené příklady vystačí menší množství argonu při celkově kratším čase dmýchání. Další přínos je v možnosti rychlejšího rozpouštění feroslitin a lepšího promíchávání syntetických strusek, což napomáhá odsíření. Celková doba dmýchání je mezi 3–5 minut, přičemž k zajištění teplotní a chemické homogenity lázně stačí necelé 1–2 minuty.

Snížení obsahu dusíku v tavenině je možné až při použití velkého objemu dmýchaného plynu, v praxi se od této možnosti upouští.

3.1.2 Pochody SL, TN, IP, SCAT [1] [2] [3] [8]

Jedná se o pochody, při kterých se do pánve zavádí požadované materiály. Samotné zavádění probíhá buď jako injektáž prachových přísad tryskou nebo zavádění přísad plněným profilem.

Tryskou se obvykle dmýchají do oceli v pánvi syntetické strusky, mleté feroslitiny, případně také nahličovala. Cílem je odsíření oceli, modifikace vměstků, dezoxidace oceli, legování oceli a nahličování oceli.

Injektáž odsiřovacích činidel kombinovaná s promícháváním lázně argonem je označováno jako velmi účinný způsob odstraňování síry, zejména proto, že je dosaženo následujících faktorů:

- vysoká chemická aktivita odsiřovacích činidel (Ca, Mg)
- velká kontaktní plocha mezi ocelí a struskou
- dobré kinetické podmínky odsíření díky promíchávání lázně argonem
- přítomnost základní neoxidované strusky, schopné absorbovat produkty desulfurační reakce (CaS, MgS).

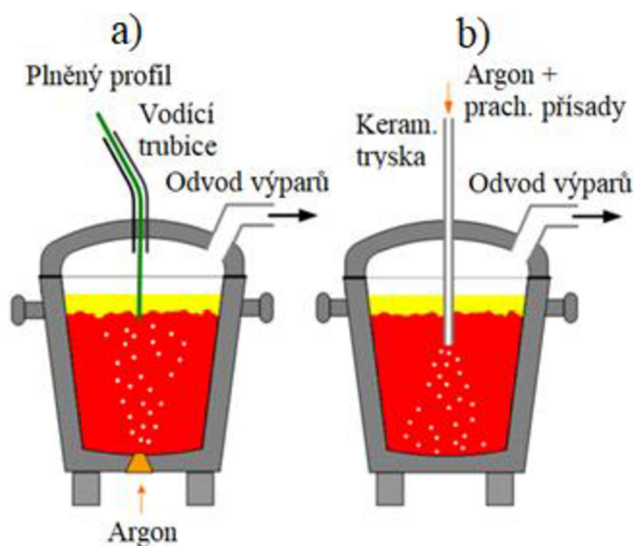
Účinnost odsiřujících přísad je také závislá na typu vyzdívky pánve. V zásaditých (doložitových) pánvích se dosahuje lepšího odsíření i čistoty, než v pánvích šamotových. Podle literatury [1] se obsah síry při dmýchání syntetické strusky dokáže pohybovat i pod 0,003 %.

Se sírou se snižuje také aktivita kyslíku v lázni. Pokud by na hladině kovu byla odkryta struska, následná oxidace železa vzdušným kyslíkem by zvyšovala aktivitu oxidu železnatého ve strusce, což by zhoršovalo podmínky odsíření.

Základní částí zařízení pro injektáž se skládá z keramické trysky ponořené do taveniny, která pomocí nosného plynu umožňuje z napojených zásobníků dmýchat přesně odměřené množství kovových, nebo struskotvorných přísad. Nebo jako forma plněného profilu obsahující prášek odsiřujícího činidla, kdy se používá míchání argonem, který prochází skrz porézní zátku umístěné ve dně pánve.

Plněný profil je tenkostěnná trubička z ocelového plechu o průměru 6 až 18 mm a obvykle obsahuje přísady pro modifikaci nekovových vměstků (Ca, CaSi, CaFe, CaAl atd.), nebo legující přísady typu feroslitin (FeTi, TeV atd.). Plněný profil se postupně odvíjí z cívky takovou rychlostí, aby k jeho tavení došlo při dosažení dna pánve. Ve srovnání s dmýcháním prachových přísad tryskou je použití plněných profilů levnější, umožňuje lepší využití vápníku a méně klesá teplota lázně.

Na obr. č. 3 můžeme pozorovat oba způsoby zavádění materiálu do lázně. V případě a) se jedná o zavádění materiálu do lázně pomocí plněného profilu. V případě b) se jedná o dmýchání prachových částic do lázně.



Obr. č. 3: Zavádění materiálů do lázně [8]

3.1.3 Pochod LF [1] [12]

Jedna z hlavních výhod tohoto pochodu je využití grafitových elektrod. Grafitové elektrody už však neslouží k roztavování vsázky, jako tomu bylo u EOP, ale pouze k udržování popř. mírnému zvyšování teploty taveniny. Možností přihřevu taveniny se prodlužuje doba, kdy se kov může metalurgicky upravovat. V pánvové peci je možné provádět odsíření, dezoxidaci, obloukový ohřev, zvyšování čistoty vymícháváním vměstků a jejich modifikaci plněnými profily, legování, teplotní a chemickou homogenizaci celé taveniny. Tento pochod je detailněji popsán v kapitole číslo 4.

3.1.4 Pochod AOD [1][20][22][25]

Tento pochod se používá zejména k oduhličení vysokolegovaných chromových a chrom-niklových ocelí. Nejnižší obsahy uhlíku podle literatury [20] dosahují hranice i pod 0,01 % C. Pro představu obsah uhlíku studené vsázky, která je natavena v EOP, činí cca 1 % C. Dále je zde dosahováno velmi vysoké využití chromu ze vsázky, které je podle literatury [1] až 95 %.

Využívá se zde ohřevu taveniny pomocí exotermických reakcí, které vznikají při dmýchání kyslíku do roztavené oceli. Vzniklé exotermické reakce slouží ke krytí tepelných ztrát, které vznikají v průběhu zpracování v AOD konvertoru a samotná tavenina se tedy nemusí v tavicím agregátu přehřívat. Podle literatury [1] se jako tavící agregát, v kombinaci

s pochodem AOD, nejčastěji používá elektrická oblouková pec nebo kyslíkový konvertor. Roztavená ocel se z tavicího agregátu následně přelévá do transportní pece, která ji má za úkol dopravit do konvertoru.

Spolu s kyslíkem se do kovu dmýchá také argon, čímž vznikají podmínky pro uhlíkový var. Díky využití argonu může docházet k oxidaci uhlíku při nižší aktivitě kyslíku a s tím je spojován i nižší propal chromu.

Průběh tavby v AOD konvertoru lze rozdělit na oxidační a redukční údobí.

Oxidační údobí – Probíhá zde oduhličení taveniny. Na začátku oxidace se poměr dmýchaného kyslíku a argonu udržuje 3:1, nebo se dmýchá pouze čistý kyslík. Celé údobí trvá 30–40 minut, přičemž je po celou dobu lázeň ohřívána vlivem exotermických reakcí a to hlavně oxidací křemíku. Pokud teplota překročí 1650 °C, tak se v důsledku zvýšení životnosti vyzdívky lázeň ochlazuje a to buď ocelovým odpadem, nebo použitím feroslitin. Snižováním obsahu uhlíku se snižuje také množství dmýchaného kyslíku, až se dmýchá pouze čistý argon. Během oxidace uhlíku dochází také ke snižování dusíku a vodíku v oceli.

Literatura [1] uvádí, že v případě uhlíkového varu jsou lepší podmínky pro odplynění oceli, než při použití inertního plynu. Po odplynění se obsah vodíku pohybuje kolem 2-3 ppm a obsah dusíku kolem 65 ppm.

Redukční údobí – Provádí se zde snížení obsahu síry a snížení obsahu kyslíku v tavenině pomocí rařinačních strusek. Během celého údobí je do lázně dmýchán argon. Na strusku se na začátku údobí přidává ferosilicium, případně silikochrom. Díky probublávání taveniny argonem nevzniká pouze teplotní a chemická homogenita celé lázně, ale přidává se také možnost konečného dolegování na zúžený interval výsledného chemického složení a přesného řízení požadované odpichové teploty.

Výsledná ocel vyrobená v AOD konvertoru má nízký obsah vodíku, dusíku, kyslíku, síry a vysokou čistotu.

3.1.5 Pochod CLU [1][24][26]

Je velmi podobný pochodu AOD, v průběhu zpracování oceli však ještě využívá vodní páry. Využívá se k oduhličení vysokolegovaných chromových a chromniklových ocelí. Funguje v kombinaci s EOP, kdy po natavení vsázky probíhá v konvertoru hlavně oduhličení taveniny. Do konvertoru je pomocí trysek umístěných ve dně nádoby dmýchána směs kyslíku a vodní páry. Na začátku procesu se dmýchá čistý kyslík. Při snížení z 1 % C na 0,8 % C se do proudu plynného kyslíku začíná přidávat vodní pára, která se při styku s kovovou lázní rozkládá na vodík a kyslík. Vodík napomáhá většímu oduhličení a dále dokáže snižovat parciální tlak oxidu uhelnatého, což má za následek snížení propalu chromu.

Využití chromu ze vsázky, podle lit. [1], může dosahovat 98 %. Teplota lázně nepřesahuje 1680 °C, je to z důvodu, že přítomnost vodní páry napomáhá k ochlazení taveniny.

Nemusí se tedy k ochlazování používat přidávání ocelového odpadu, popř. feroslitin. V průběhu celého procesu je ocel nasycena vodíkem, k jeho snížení se v závěru redukčního údobí dmýchá čistý argon. Dále se ocel může odsířit a dolegovat. Samozřejmostí je, že použití argonu zajišťuje teplotní a chemickou homogenitu lázně a umožňuje přesné dosažení odpichové teploty. Výhody oproti pochodu AOD jsou nižší náklady na plynné médium a vyšší životnost vyzdívky konvertoru.

3.2 Postupy sekundární metalurgie provozované při sníženém tlaku

[1][2][3]

Vakuová rafinace oceli konkrétně umožňuje:

- Snížit obsah plynů vodíku a dusíku
- Dezoxidovat ocel
- Dolegovat ocel na požadovaný obsah prvků
- Snížení obsahu síry (při použití strusky)

Z oceli, která je vystavena sníženému tlaku, dochází k vylučování plynů vodíku a dusíku z povrchu lázně. K dalšímu snížení plynů dochází jejich difúzí do plynných bublin dmýchaného argonu nebo bublin oxidu uhelnatého. Když je snížen tlak nad povrchem oceli a zároveň se do taveniny dmýchá argon, tak je uhlík schopen redukovat všechny vzniklé oxidy a tím dostávat kyslík z taveniny ve formě oxidu uhelnatého. Vzniká tedy ocel o vysoké oxidické čistotě s nízkým obsahem plynů.

3.2.1 Pochod VD [1][12]

Procesem VD je možné získat silně dezoxidovaný kov s nízkým obsahem plynů, síry a vysokým stupněm mikročistoty. Jedná se o metodu, při které se kov v pánvi zaváže do vakuovaného prostoru – kesonu. Po zavezení pánve se keson uzavírá hermeticky utěsněným víkem a při omezeném průtoku argonu se sníží tlak pod víkem v kesonu. V praxi se s technologií VD kombinují pochody LF, IP, AP. Celý postup je blíže popsán v kapitole číslo 4.

3.2.2 Pochod VOD [1][16]

Tento pochod se využívá při výrobě vysokolegovaných Cr, CrNi ocelí. Jeho podstata spočívá v oduhlčování tekuté oceli kyslíkem v pánvi, která je umístěná ve vakuovém kesonu. Jedná se v podstatě o proces VD doplněný tryskou, která umožňuje dmýchání kyslíku na hladinu kovu. Díky exotermickým reakcím, které při dmýchání kyslíku vznikají, se tento pochod řadí do vakuových pochodů, umožňující přehřev kovu. Celý postup je blíže popsán v kapitole číslo 4.

3.2.3 Pochod VAD [1][12][16]

Jedná se o kombinovaný pochod, který umožňuje provést všechny metalurgické procesy, kromě tavení. Jedná se tedy o vakuové odplynění, obloukový ohřev, míchání oceli argonem, legování, dezoxidaci, oduhlčení a odsíření. Pochod může být doplněn o trysku na injektáž prachových přísad, podavač plněných profilů a kyslíkovou trysku. S tím jsou však spojeny vyšší finanční náklady a použití se vyplácí až při zpracování velkého množství zpracovaného kovu. Použitím pochodu VAD je tedy možné vyrobit ocel o vysoké sulfidické a oxidické čistotě, kdy je možné nastavit přesné chemické složení i výslednou aktivitu kyslíku. Díky vakuování lze opět dosáhnout vysokého odplynění oceli.

Výhodou zde je že teplo vytvářené během procesu vzniká použitím elektrického ohřevu a také v průběhu exotermických reakcí, což například umožňuje řídit velice přesně odpichovou teplotu.

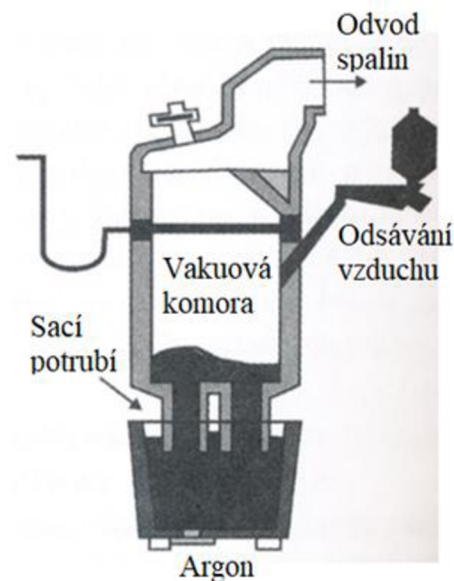
3.2.4 Pochod ASEA-SKF [1]

Další kombinovaný prvek podobné konstrukce, jako je pochod VAD. Kromě vakuového systému a ohřevu lázně elektrickým obloukem může být navíc tento systém vybaven i indukčním mícháním lázně. Pochodem ASEA-SKF je možné podobně jako na pochodu VAD provést oduhlčení, odplynění, odsíření, modifikaci vměstků, legování a přesné řízení odpichové teploty.

3.2.5 Pochod RH [1] [3] [5][16]

Tento pochod společně s následujícím pochodem DH patří do skupiny speciálních pochodů sekundární metalurgie pro velké objemy zpracovávaného kovu s využitím vakua. Jejich použití se uplatňuje ve velkých ocelárnách při zpracování velkých objemů oceli v řádu statisíců a milionů tun ročně.

Obě zařízení se využívají pro odplynění a oduhličení většiny nelegovaných, případně nízkolegovaných ocelí. Tavenina je průběžně odplyňována ve vakuové komoře, do které se ocel dostává pomocí sacího potrubí. Sací potrubí dokáže nasávat taveninu přímo z pánve nebo z pece, která má snímatelné horní víko. Princip průběžného odplyňování a oduhličení taveniny je v turbulentním pohybu. Turbulentní pohyb taveniny je zajištěn dmýcháním argonu do sacího potrubí. Přiváděním inertního plynu do sacího hrdla totiž vzniká směs kovu a plynu, která má nižší hustotu a která vstupuje do vakuové komory. Odplyněná ocel potom plynule vytéká výstupní trubicí zpět do pánve/pece. V průběhu odplynění je celý objem kovu několikrát nasát do vakuové komory, která je odsávána za pomoci několikastupňových paroproudých vývěv. Na obr. č. 4 je znázorněno schéma pochodu RH.

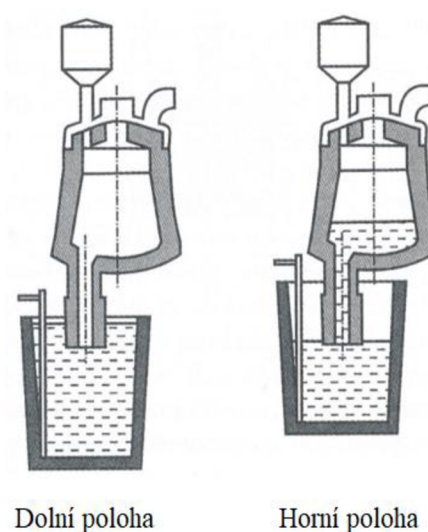


Obr. č. 4: Schéma pochodu RH [1]

3.2.6 Pochod DH [1] [5]

Tekutá ocel se zde nasává z lící pánve do vakuové komory a vlivem rozdílných tlaků mezi okolní atmosférou a vakuovanou komorou se v sacím hrdle vytvoří sloupec tekuté oceli, kde probíhá odplynění a desoxidace kovu uhlíkem. Po odplynění nasátého množství se vakuová komora buď zdvihne, nebo se pánev sníží a ocel se vrací zpět do pánve. Pro dostačující odplynění by se měl tento cyklus opakovat alespoň třikrát, přičemž celková doba vakuování se pohybuje okolo 15-20 minut. Díky zpětnému výtoku oceli dochází k vysokému promíchání celé lázně. To umožňuje dobře dolegovat celou lázeň a je také zajištěna teplotní a chemická homogenita.

Na obr. č. 5 a) je znázorněna ocel před nasátím do vakuové komory, b) je znázorněn sloupec nasaté oceli, který je vystaven vakuování.



Obr. č. 5: Schéma pochodu DH [1]

4 POCHODY LF, VD A VOD

4.1 Pochod LF, pánvová pec [1] [2] [3] [5] [16]

Rozvíjení a cíle sekundární metalurgie souvisí s rozvojem pánvových pecí. V současné době pánvové pece patří do základního vybavení většiny moderních oceláren. Dělí se podle:

- způsobu přehřevu oceli
 - obloukovým přehřevem – elektrický oblouk
 - s chemickým přehřevem pomocí Al, Si
- pracovního tlaku
 - atmosférický tlak (pánvová pec LF)
 - vakuum (pánvová pec ASEA)
- způsobu míchání oceli
 - dmýchání Ar porézní tvárnici ve dně pánve
 - indukční míchání oceli

Základní agregát pánvové metalurgie je pochod prováděný na pánvové peci, kdy se k ohřevu taveniny využívá elektrický oblouk. Celkový princip ohřevu taveniny je velmi podobný, jako ohřev v elektrické obloukové peci, přičemž výkon pecního transformátoru může být až 6krát nižší.

Pro nejlepší chod pánvové pece, je nezbytné zajistit rychlost ohřevu taveniny zhruba o 3 °C/min. Následně je teplota oceli udržována na stabilní úrovni, nebo je zvyšována dle požadavku technologie výroby a jakosti vyráběné oceli. Při použití pánvové pece je nutné zajistit, aby byla samotná pánve vybavena šoupátkovým uzávěrem. Ten je před tím, než dojde k odpichu roztavené oceli, zasypán chromitovým pískem. V momentě, kdy dojde k samotnému odpichu, se musí odstranit zásyp spolu s tekutým kovem, prolitím nad vyčleněnou nádobou na zbytky tekutého kovu. Dochází zde ke ztrátě, která bývá až 500 kg tekutého kovu. Od této chvíle už není možné šoupátkový uzávěr zcela uzavřít. Z toho vyplývá, že použití této metody začíná být výhodné u odlitků a ingotů těžších než 0,5 – 1 tuna.

Dmýcháním inertního plynu (argon, případně i dusík) skrz tvárnici umístěnou ve dně pánve se zajišťuje teplotní a chemická homogenita zpracovávané oceli a zlepšují se i podmínky pro následné odsíření. Zlepšuje se také flotační účinek vměstků, což zlepšuje zejména teplotnost oceli.

Kromě přehřevu a homogenizace oceli, umožňuje dále pánvová pec provést přesné dolegování a mikrolegování oceli. A to pomocí zásobníků s násypkami nebo podavačů plněných profilů představujících pomocné zařízení.

Metoda plněných profilů:

- vlastní zavádění plněných profilů probíhá v situaci, kdy je snížena aktivita kyslíku na požadovanou úroveň. Plněný profil se do oceli zavádí rychlostí 0,3 až 2 m·s⁻² přes strusku do oceli v pánvi.
- při zpracování oceli je zároveň dmýchán inertní plyn a zavádění plněného profilu se nesmí provádět proti proudu dmýchaného plynu. Provádí se do klesajícího proudu dmýchaného inertního plynu.
- kombinací faktorů jako je volba, množství nebo typ plněného profilu lze vytvářet vměstky požadovaného složení (např. tekuté)

U drahých feroslitin a dalších legujících přísad (FeV, FeMo, Ni) umožňuje pánvová pec použití užšího rozpětí obsahu jednotlivých prvků. Je tedy možné legovat na dolní hranici obsahu prvku dané normou a tím lze podstatně snížit náklady na tavbu

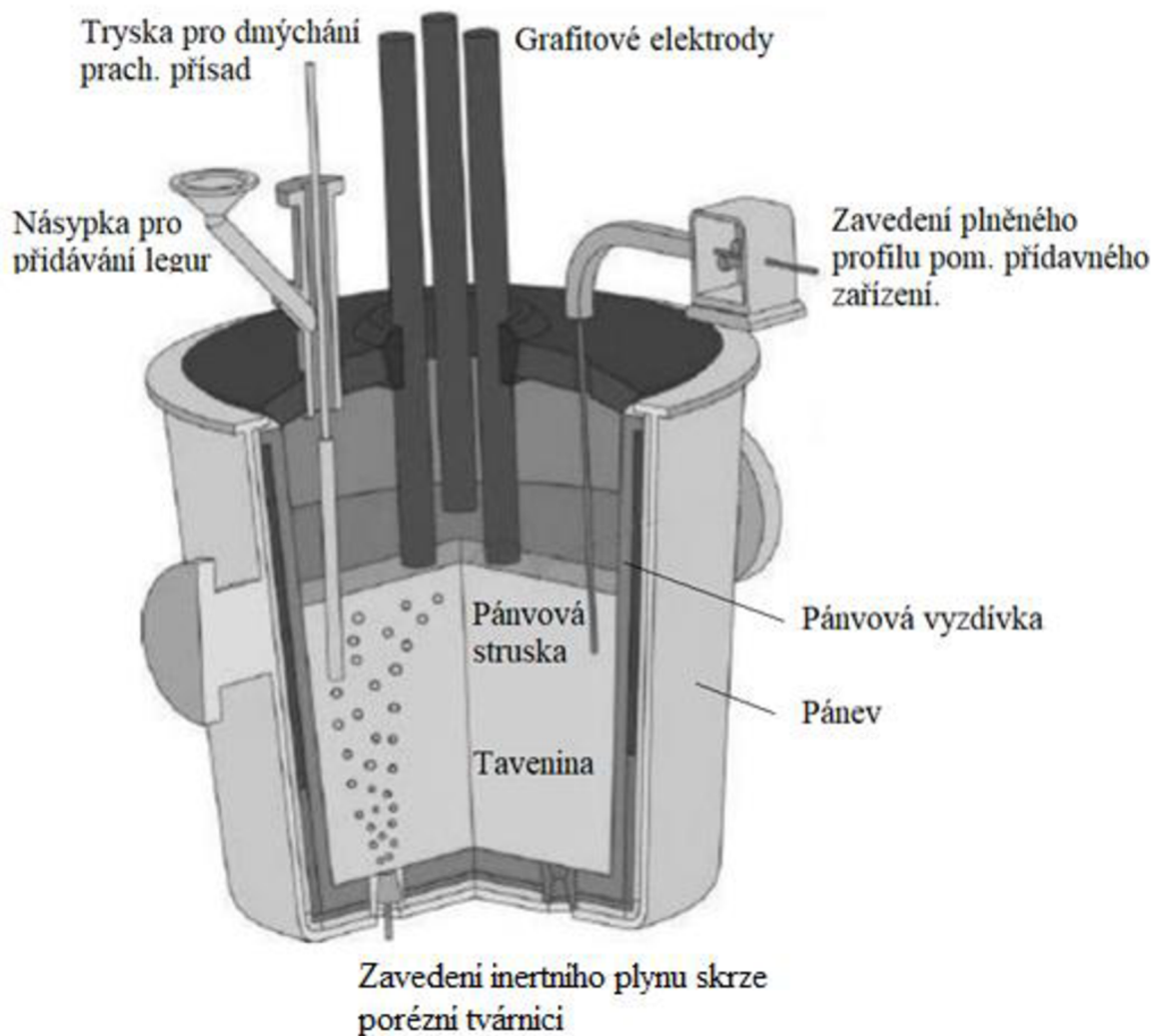
Jeden z primárních úkolů pánvové pece je za pomoci rafinační strusky docílit hlubokého odsíření oceli. Pánvová struska je tvořena ze struskotvorných přísad, které se přidávají během odpichu a struskotvorných přísad, které se přidávají během zpracování oceli.

Vytvořená pánvová struska slouží dále k překrytí elektrických oblouků a zvyšuje životnost před působením sálavého tepla.

Aby byl obsah síry v oceli co nejmenší, jsou pánvové pece vyžděny dolomitickými nebo magnezitovými stativy, popřípadě litým žárobetonem.

Celá úprava kovu na pánvové peci trvá okolo 30 minut a hodnota odsíření se dokáže dostat až na hodnotu 0,003 % S

Na obr. č. 6 je znázorněno schéma pánvové pece, kde je přihřev kovu zajištěn pomocí grafitových elektrod. Probublávání argonem je zde prováděno keramickou porézní tvárnici umístěnou ve dně pánve. Dále je zde znázorněna tryska prachových částic pro zavádění syntetických strusek nebo feroslitin a vyústění násypky pro přidávání legujících přísad



Obr. č. 6: Schéma pánvové pece [12]

Na obr. č. 7 lze vidět pánvovou pec v provozu. Grafitové elektrody provádí přehřev taveniny a otevřenými dvířky se sleduje průběh metalurgických procesů.

Na obr. č. 8. a) je zachycen počítačový software, který kontroluje celý proces zpracování kovu a řídí např. přesné dolegování pomocí zavedených násypků do pánve.

Obrázek č. 8. b) znázorňuje použití pánvových vozů, pomocí kterých zajíždí pánev s tekutým kovem pod zařízení pánvové pece. Pánvových vozů se využívá při velkém objemu zpracovávaného kovu, kdy je použití jeřábu nepraktické nebo nebezpečné.

Na obr. č. 7 a 8 je uvedena ukázka základních částí pánvové pece LF.



Obr. č. 7: Grafitové elektrody a otevřená dvířka pánvové pece [10]



a) Software pánvové pece



b) Pánvový vůz zajíždí pod pánvovou pec
Obr. č. 8: Části pánvové pece [11]

4.2 Pochod VD [1] [2] [12] [16] [21] [27]

Pochod VD patří mezi nejstarší pochody sekundární metalurgie využívající sníženého tlaku. Při této metodě se kov v pánvi zaváží do vakuového prostoru nazývaný keson. Keson se následně uzavírá vzduchotěsným víkem a následně se při mírném probublávání argonu snižuje v prostoru kolem pánve tlak. Ke snížení tlaku v podtlakové komoře slouží odsávací systém, který se skládá z vývěvy, chladicího a čistícího zařízení, spojovacího potrubí, pomocného zařízení a měřících přístrojů. Nejčastěji jsou ke snižování tlaku používány paroproudé ejektorové vývěvy.

Během vakuování se ocel udržuje při tlaku 2-4 kPa po dobu 10 až 15 minut. Snižováním tlaku nad hladinou kovu začne docházet ke zvyšování aktivity uhlíku ke kyslíku. V kovu od této chvíle probíhá uhlíková reakce mezi uhlíkem a kyslíkem rozpuštěným v tavenině i kyslíkem vázaným v oxidických vměstcích. Přichází intenzivní var oceli, při kterém dochází k hluboké dezoxidaci kovu uhlíkem. Jelikož je var oceli velmi bouřlivý, tak je nutné, aby byl tlak v komoře snižován postupně.

Ke snižování obsahu vodíku a dusíku přispívá nově vzniklý oxid uhelnatý, protože dokáže tyto plyny ve formě molekul vynášet ven z taveniny. Vytvářející se bubliny CO dále napomáhají promíchávání celé lázně.

Pochody sekundární metalurgie, které pracují se silně dezoxidovaným kovem, například injektáž prachových přísad, nebo pánvová pec, jsou doprovázeny růstem dusíku a hlavně vodíku. Proto se v praxi technologie VD často kombinuje s pochody LF, IP, AP.

Dezoxidační schopnosti uhlíku jsou díky sníženému tlaku nad povrchem taveniny natolik vysoké, že dokážou při vyšších teplotách vyredukovat i stabilnější oxidy rozptýlené v tavenině ve formě vměstků, a tím zvyšovat celkovou oxidickou čistotu oceli.

Samozřejmostí je při celém procesu dmýchání argonu dnem pánve, který zajišťuje tepelnou a chemickou homogenizaci oceli, dále zvýšení účinnosti odplynění a oduhličení oceli a lepší podmínky pro přechod nekovových vměstků do strusky. Pro účinnější pohyb oceli v pánvi lze zavést indukční míchání.

Po dezoxidaci je možné ocel dolegovat. Na víku pánve je podavač s vakuovým uzávěrem, umožňující přidávání legur i redukční strusky (obvykle směs CaO, MgO, MnO a FeO). Díky vysokému stupni dezoxidace oceli je během vakuování možné provést hluboké odsíření (i pod 0,001 % S).

Při použití technologie VD je tedy možné získat silně dezoxidovaný kov s nízkým obsahem síry, nízkým obsahem plynů a vysokým stupněm mikročistoty. Vzhledem k tomu, že během celého procesu zde není možné kov přehřát, je nutné před vakuováním kov přehřát.

Míra přehřátí taveniny závisí na:

- hmotnosti tavby
- chemickém složení vakuované oceli
- době vakuování při dezoxidaci
- legování oceli v pánvi
- množství přidávaných přísad

U menších pánvi je to i o více než 150 °C.

4.3 Pochod VOD [1] [13] [16] [28]

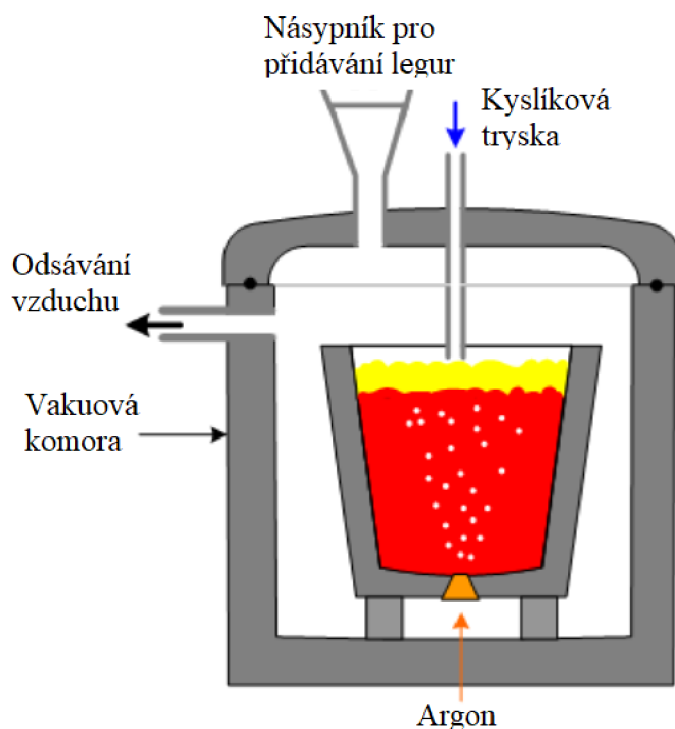
Pochod patří mezi pochody, které umožňují při vakuování ohřev oceli v pánvi. Princip VOD spočívá v tom, že za pomoci kyslíkové trysky, umístěné ve vakuovém kesonu, dochází k oduhličování tekuté oceli v pánvi. Tento duplexní pochod se nejčastěji kombinuje s elektrickou obloukovou pecí. Exotermické reakce, které v průběhu vhánění kyslíku do objemu roztaveného kovu vyvíjejí teplo, umožňují snížit odpichovou teplotu z EOP. U vysoko-
legovaných korozivzdorných ocelí se může odpichová teplota pohybovat okolo 1570 °C.

Při oxidaci vháněný kyslík oxiduje nejprve křemík, teplota lázně se začne zvyšovat a tlak v kesonu se udržuje na 2 – 4 kPa. Jakmile se obsah křemíku sníží na hranici okolo 2 %, začne se oxidovat uhlík.

Oxidace probíhá až do dosažení kritického obsahu uhlíku (0,04 – 0,1 %), při této hranici se přestává dále vhnět kyslík, protože se začne výrazně snižovat oduhlňovací rychlost. Jaká bude výsledná hodnota kritického obsahu uhlíku, závisí na faktorech, jako je intenzita dmýchání kyslíku, intenzita promíchávání taveniny, teplota a tlak v kesonu. Následně přichází závěrečná operace, kdy se sníží tlak pod 100 Pa a díky vysoké aktivitě kyslíku v lázni, ve strusce a dmýcháním argonu, dochází k další reakci kyslíku s uhlíkem. Tato závěrečná operace trvá okolo 5 – 15 minut, dochází zde k dezoxidaci oceli a výsledné oduhlňování může dosahovat hranice až pod 0,01 hmot. %. Na konci oxidace kyslíkem se teplota lázně pohybuje okolo 1750 °C. Během oxidace dokáže uhlík také redukovat oxidy chromu, tím se zvyšuje využití chromu ze vsázky i čistota oceli. Využití chromu bývá vyšší než 95 %. Dále se snižuje obsah dusíku a vodíku až o 70 %.

Následuje redukční údobí, kde se provádí desoxidace oceli, odsíření a případně dolegování. Obsah síry se v redukčním údobí u pochodu VOD dokáže dostat až pod 0,002 hmot. %. Aby aktivita kyslíku a síry byla co nejmenší, volí se vyzdívka magnezitovým, nebo vysocehlinitanovým stavivem, případně litým žárobetonem. Při srovnání oxidace v obloukové peci, probíhá oxidace na pochodu VOD za nižší teploty, přičemž jsou v oceli nižší obsahy uhlíku, menší propal chromu, lepší korozní odolnost a vyšší oxidická čistota.

Obr. č. 9 znázorňuje schéma zařízení VOD, přičemž kdyby se z obr. odebrala kyslíková tryska, bylo by to schéma pro zařízení VD.



Obr. č. 9: Schéma pochodu VOD [19]

5 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část vychází z dat poskytnutých společností Žďas, a.s. Data byla získána při výrobě oceli na elektrické obloukové peci a při výrobě oceli na elektrické obloukové peci s využitím sekundární metalurgie. Byly také poskytnuty informace ohledně složení strusek, druhování vsázky a grafické záznamy naměřených hodnot při vakuování.

Cílem bylo provést posouzení výroby z hlediska změny chemického složení v průběhu zpracování a posoudit struskový režim na EOP a VD.

5.1 Průběh zpracování nelegované oceli GS20Mn5 na EOP

V rámci bakalářské práce se sleduje výroba oceli GS20Mn5 vyráběné pouze na elektrické obloukové peci v podniku Žďas, a.s. Chemické složení oceli dle normy je uvedeno v tab. č. 2. Jak vyplývá, je to ocel, která obsahuje přibližně střední obsah uhlíku 0,24 hmot. %, střední obsah manganu 1,40 hmot. % a řadí se mezi nízkolegované manganové oceli.

Tab. č. 2 Chemické složení oceli GS20Mn5 dle normy ČSN 42 2709 [29]

| Prvek | C | Mn | Si | P max | S max |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|-------|
| [hmot. %] | 0,20 až 0,28 | 1,20 až 1,60 | 0,20 až 0,50 | 0,05 | 0,05 |

Příklad druhování vsázky u jedné ze sledovaných taveb je uveden v tab. č. 3. Tabulka se dělí na fáze.

Po opravě pece se do vsázky přidává koks a vápno. Oba tyto materiály umožňují oxidaci prvku jako je křemík a také částečné odfosfoření již během tavení.

V oxidaci se přidávají struskotvorné přísady vápno, korund a okuje. Struska umožní snížení fosforu. Poté dochází ke stažení oxidační strusky.

V redukci se provádí pomocí hliníku, příp. v kombinaci křemíkem, dezoxidace strusky a kovu. Vytvoří se nová redukční struska složená z vápna a korundu. Je provedeno nahličení koksem, dolegování křemíku (FeSiKr68) a manganu (FeMn).

Po odpichu se může v pánvi dělat jemná korekce chemického složení. Následně se může provést modifikace vměstků pomocí FeSiCa a částečná dezoxidace.

Tab. č. 3: Příklad druhování vsázky oceli GS20Mn5

| Fáze | Komponenta | Hmotnost vsázky [kg] |
|------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| OPRAVA | KOKS | 30 |
| | VÁPNO | 100 |
| OXIDACE | KORUND Al ₂ O ₃ | 40 |
| | OKUJE | 250 |
| | VÁPNO | 250 |
| REDUKCE | VÁPNO | 200 |
| | KORUND Al ₂ O ₃ | 30 |
| | KOKS | 9 |
| | FeSiKr68 | 60 |
| | FeMn | 180 |
| | ALKRUPICE | 3 |
| | AL_desox | 14 |
| DOLEGOVÁNÍ do pánve | FeSiCa | 40 |
| | FeMn | 10 |
| | AL | 2 |
| | KOKS | 2 |
| HMOTNOST VSÁZKY | | 11800 |
| HMOTNOST TEKUTÉHO KOVU | | 11300 |

Tab. č. 4,5,6 znázorňují změny chemického složení u vybraných prvků v souboru pěti taveb, provedené v ocelárně Ždas, a.s. Taveby probíhaly na elektrické obloukové peci bez aplikace sekundární metalurgie. Měření probíhalo u nízkolegované manganové oceli GS20Mn5 (tab. č. 2). Vzorky s chemickým složením byly odebírány ve fázích: po roztavení, po oxidačním údobí, po redukčním údobí a těsně před litím. Chemické složení jednotlivých prvků bylo měřeno spektrálním analyzátozem.

Tab. č. 4: Změny obsahu C a Mn v oceli GS20Mn5 na EOP

| Statické veličiny n=5 | Chemické složení prvek – C [hmot. %] | | | | Chemické složení prvek –Mn [hmot. %] | | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|
| | Po natavení | Po oxidaci | Po redukci | Konečné složení | Po natavení | Po oxidaci | Po redukci | Konečné složení |
| \bar{x} | 0,53 | 0,05 | 0,16 | 0,20 | 0,57 | 0,09 | 1,26 | 1,34 |
| σ | 0,102 | 0,017 | 0,009 | 0,011 | 0,202 | 0,054 | 0,034 | 0,028 |
| max | 0,65 | 0,08 | 0,17 | 0,21 | 0,76 | 0,16 | 1,30 | 1,37 |
| min | 0,42 | 0,04 | 0,15 | 0,18 | 0,27 | 0,05 | 1,21 | 1,34 |

- Změna obsahu uhlíku:

Jak vyplývá z tab. č. 4, po natavení se pohybuje průměrný obsah uhlíku okolo 0,53 hmot. %. Po oxidaci se pohybuje průměrně okolo 0,05 hmot. %. Průměrné snížení obsahu uhlíku je 0,48 hmot. %, což je pokles o cca 90,5 %.

Během redukce dochází ke zvýšení obsahu uhlíku. Z tabulky číslo 3 je patrné, že mezi přidávané nauhličovadla patří koks (cca 80 % C) a FeMn (cca 8 % C). Průměrný rozdíl obsahu uhlíku po dolegování činil zhruba 0,11 hmot. %.

Na konci zpracování se obsah uhlíku v pánvi ještě navýšil o 0,04 hmot. % na konečný obsah 0,20 hmot. %. Což odpovídá podle tab. č. 2 spodní mezi dovoleného obsahu uhlíku v oceli GS20Mn5.

- Změna obsahu manganu:

Jak vyplývá z tab. č. 4, po natavení se obsah manganu pohybuje průměrně okolo 0,57 hmot. %. Během oxidace dochází ke snížení obsahu manganu. K tomuto snížení došlo v důsledku oxidace manganu a jeho přerozdělení mezi struskou a kovem. Průměrný rozdíl obsahu manganu v tavenině před oxidací a po oxidaci činil 0,48 hmot. %. Obsah manganu po oxidačním údobí poklesl o cca 84%.

Během redukce a fáze dokončování došlo k legování a tedy i ke zvýšení obsahu manganu. Jak ukazuje tab. č. 3 do taveniny se přidal FeMn. Průměrný konečný obsah manganu byl 1,34 hmot. %, což je podle tab. č. 2 zhruba střední hodnota dovoleného výsledného obsahu manganu v oceli GS20Mn5.

Tab. č. 5: Změny obsahu Si a P v oceli GS20Mn5 na EOP

| Statické veličiny n=5 | Chemické složení prvek – Si [hmot. %] | | | | Chemické složení prvek – P [hmot. %] | | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|
| | Po natavení | Po oxidaci | Po redukci | Konečné složení | Po natavení | Po oxidaci | Po redukci | Konečné složení |
| \bar{x} | 0,07 | <0,01 | 0,28 | 0,49 | 0,030 | 0,010 | 0,010 | 0,010 |
| σ | 0,060 | - | 0,036 | 0,017 | 0,008 | 0,001 | 0,002 | 0,002 |
| max | 0,16 | - | 0,33 | 0,51 | 0,037 | 0,007 | 0,009 | 0,012 |
| min | <0,01 | - | 0,25 | 0,47 | 0,020 | 0,004 | 0,006 | 0,006 |

- Změna obsahu křemíku:

Jak vyplývá z tab. č. 5, po natavení se pohybuje průměrný obsah křemíku okolo 0,07 hmot. %. Nízká hodnota křemíku po natavení ukazuje na použití tzv. aktivního tavení, kdy se ještě ve fázi vsázení přidává do pece vápno. Po oxidaci došlo v důsledku reakce prvku s kyslíkem ke snížení obsahu křemíku. Vzniklý oxid křemičitý přechází do strusky. Průměrné snížení obsahu křemíku je min. 0,06 hmot. %, což je pokles o cca 86 %.

Během redukce a dokončování došlo ke zvýšení obsahu křemíku. Jak ukazuje tab. č. 3, do taveniny se přidal FeSiKr68. Průměrný konečný obsah křemíku byl 0,49 hmot. %, což je podle tab. č. 2 k horní mezi dovoleného obsahu křemíku v oceli GS20Mn5. Legování Si k horní hranici je v oceli na odlitky obvyklé, neboť se využívá dezoxidační schopnosti Si při odlévání.

- Změna obsahu fosforu:

Jak vyplývá z tab. č. 5, po natavení činila nejnižší hodnota obsahu fosforu v tavenině 0,020 hmot. %. Opět to bylo zapříčiněno díky aktivnímu tavení, kdy fosfor přecházel z části do strusky.

Během oxidace vznikají podmínky pro další odfosfoření. Průměrný rozdíl obsahu fosforu v tavenině před oxidací a po oxidaci činil zhruba 0,020 hmot. %. Obsah fosforu po oxidačním údobí klesl tedy o cca 67 hmot. %.

Během redukce a konečné fáze se obsah fosforu neměnil. Průměrný konečný obsah fosforu byl 0,010 hmot. %. Podle tab. č. 2 je maximální dovolený obsah fosforu v oceli GS20Mn5 0,050 hmot. %, což ukazuje na dobrý průběh odfosfoření.

Tab. č. 6: Změny obsahu S a Cr v oceli GS20Mn5 na EOP

| Statické veličiny n=5 | Chemické složení prvek – S [hmot. %] | | | | Chemické složení prvek –Cr [hmot. %] | | | |
|--------------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------------|
| | Po natavení | Po oxidaci | Po redukci | Konečné složení | Po natavení | Po oxidaci | Po redukci | Konečné složení |
| \bar{x} | 0,030 | 0,020 | 0,020 | 0,010 | 0,33 | 0,11 | 0,16 | 0,18 |
| σ | 0,011 | 0,006 | 0,002 | 0,001 | 0,134 | 0,027 | 0,028 | 0,030 |
| max | 0,043 | 0,033 | 0,019 | 0,011 | 0,55 | 0,16 | 0,20 | 0,23 |
| min | 0,017 | 0,019 | 0,014 | 0,008 | 0,19 | 0,09 | 0,13 | 0,15 |

- Změna obsahu síry:

Jak vyplývá z tab. č. 6, po natavení se pohybuje průměrný obsah síry okolo 0,030 hmot. %.

Během oxidace došlo ke snížení obsahu síry. Průměrný rozdíl obsahu síry v tavenině před oxidací a po oxidaci činil zhruba 0,010 hmot. %. Obsah síry po oxidačním údobí klesl tedy o cca 33 hmot. %.

Během redukce a konečné fáze se obsah síry dále snižoval. Je to zapříčiněno díky dezoxidované tavenině a nově vzniklé redukční strusce. Průměrný konečný obsah síry byl 0,010 hmot. %. Podle tab. č. 2 je maximální dovolený obsah síry v oceli GS20Mn5 0,050 hmot. %. Celkový stupeň odsíření oceli na EOP byl cca 67 hmot. %.

- Změna obsahu chromu:

Jak vyplývá z tab. č. 6, po natavení se pohybuje průměrný obsah chromu okolo 0,33 hmot. %.

Během oxidace došlo vlivem reakce chromu s kyslíkem ke snížení jeho obsahu. Průměrný rozdíl obsahu chromu v tavenině před oxidací a po oxidací činil zhruba 0,22 hmot. %. Obsah chromu po oxidačním údobí klesl tedy o cca 67 %.

Během redukce a konečné fáze se obsah chromu zvyšoval. Je to zapříčiněno přípalem prvku z vyzdívky. Průměrný konečný obsah chromu byl 0,18 hmot. %. Jelikož se jedná o ocel nelegovanou, která má předepsaný obsah chromu do 0,3 hmot. %. Konečný obsah 0,18 hmot. % odpovídá požadovanému složení oceli GS20Mn5.

Tab. č. 7 zobrazuje konkrétní změny koncentrací jednotlivých prvků v daných údobích.

Tab.č. 7: *Nárůst a pokles obsahů prvků během jednotlivých údobí [hmot. %]*

| Δ Prvek [hmot.%] | Oxidace | Redukce | Konečné složení |
|-------------------------|---------|---------|-----------------|
| Δ C | -0,48 | +0,11 | +0,04 |
| Δ Mn | -0,48 | +1,17 | +0,08 |
| Δ Si | -0,06 | +0,27 | +0,21 |
| Δ P | -0,02 | - | - |
| Δ S | -0,01 | - | -0,01 |
| Δ Cr | -0,22 | +0,05 | +0,02 |

Tab. č. 8 ukazuje složení běžně používaných strusek v EOP. Informace byly poskytnuty společností Žďas, a.s. Jedná se o výsledky nelegované oceli vyrobené na EOP v podmínkách Žďas, a.s., které nebyly použity při konkrétní tavbě uvedené v bakalářské práci.

Tab. č. 8: *Běžné složení strusek při tavbě na EOP [hmot. %]*

| Prvek | FeO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | P ₂ O ₅ | CaO | MgO | TiO ₂ | V ₂ O ₅ | MnO | Cr ₂ O ₃ |
|----------------------|------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|-------|------|------------------|-------------------------------|------|--------------------------------|
| Oxidační struska EOP | 15,5 | 8,1 | 23,8 | 0,38 | 28,9 | 15,5 | 0,48 | 0,39 | 13,5 | 5,2 |
| Redukční struska EOP | 0,35 | 25,51 | 10,40 | 0,03 | 52,56 | 6,05 | 0,39 | 0,01 | 0,02 | 0,01 |

Z tab. č. 8 je patrné, že během výroby oceli na EOP se používají 2 typy strusek:

Oxidační struska: Chemické složení strusky znázorňuje vysoký obsah oxidů, které během oxidačního údobí přecházely z taveniny do strusky. Jedná se především o oxid fosforečný (P₂O₅), oxid křemičitý (SiO₂), oxid manganatý (MnO) a oxid chromitý (Cr₂O₃). Oxid hlinitý (Al₂O₃), který zajišťuje dobrou tekutost strusky, spolu s přidávaným vápnem a okujemi tvoří základní předpoklad pro strusku schopnou vázat fosfor.

Zásaditost (bazicita) oxidační strusky se vyjadřuje dle vztahu 1.1

$$B = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%P_2O_5} \quad (1.1)$$

Po dosazení do vztahu (1.1) lze určit hodnotu bazicity 1,83. Dle literatury [14], se jedná o středně zásaditou strusku, což může mít horší vliv na průběh odfosfoření. Lze doporučit zvýšit zásaditost strusky. Možností může být snížit obsah SiO_2 ve strusce.

Tekutost oxidační strusky určuje vápenato-hlinitanový poměr a určuje se dle vztahu 1.2

$$B = \frac{\%CaO}{\%Al_2O_3} \quad (1.2)$$

Po dosazení do vztahu (1.2) lze určit hodnotu vápenato-hlinitanového podílu cca 3,6. Jak uvádí literatura [9] je to hodnota mimo optimální rozsah 1,7 až 2,3 C/A, což lze vysvětlit nízkým obsahem Al_2O_3 v oxidační strusce. Lze však brát v potaz obsah FeO , který dokáže ředit strusku. Struska tedy při daných teplotách může být tekutá a dobře plnit svoji funkci.

Redukční struska: Ze složení lze pozorovat, že pro účinné odsíření je udržován obsah FeO pod 1 hmot. % a CaO nad 50 hmot. %. Je také patrný zvýšený obsah Al_2O_3 , což je zapříčiněno jeho přidáváním do vsázky pro zvětšení tekutosti.

Zásaditost (bazicita) oxidační strusky se vyjadřuje dle vztahu 1.3, který oproti vztahu 1.1 už neuvažuje $\%MgO$ a $\%P_2O_5$.

$$B = \frac{\%CaO}{\%SiO_2} \quad (1.3)$$

Po dosazení do vztahu (1.3) lze určit hodnotu bazicity cca 5. Dle literatury [14], se jedná o strusku silně zásaditou, což má dobrý vliv na průběh odsíření.

Z výsledků vápenato-hlinitanového podílu po aplikování vztahu 1.2 vychází hodnota 2,1. Výsledná hodnota je podle literatury [9] v optimálním rozsahu 1,7 až 2,3 C/A.

5.2 Průběh zpracování nelegované oceli GS20Mn5 na EOP-LF-VD

V rámci bakalářské práce se sleduje ocel GS20Mn5 vyráběná v podniku Žďas, a.s., při použití sekundární metalurgie. Natavení a oxidace probíhá na EOP, redukce se přesouvá na LF a odplynění se závěrečným dolegováním na pochod VD.

Chemické složení oceli je uvedeno v tab. č. 2.

Příklad druhování vsázky u jedné ze sledovaných taveb je uveden v tab. č. 9. Tabulka se opět dělí na fáze.

Při opravě pece lze vidět, že se do vsázky přidává koks a vápno, jež umožňují oxidaci prvku jako je křemík a také částečné odfosfoření.

V oxidační fázi se přidávají struskotvorné přísady vápno, korund a okuje. Poté dochází ke stažení oxidační strusky a odlévání do pánve. Při odpichu se do pánve kvůli dezoxidaci ještě přidá hliník.

V redukční fázi na pánvové peci se přidává syntetická struska a vápno. Je provedeno nahličení koksem, dolegování křemíku (FeSi75) a manganu (FeMn), dezoxidace hliníkem. Ve fázi dolegování po VD se do pánve přidá podle potřeby ještě hliník a k modifikaci vměstků CaPROFIL.

Tab. č. 9: Materiály, které se přidávají do pece během jednotlivých fází

| Fáze | Průchod | Komponenta | Hmt. vsázky [kg] |
|------------------------|---------|--------------|------------------|
| OPRAVA | 1 | KOKS | 20 |
| | | VÁPNO | 150 |
| OXIDACE V EOP | 1 | KORUND | 40 |
| | | OKUJE | 250 |
| | | VÁPNO | 300 |
| ODPICH | 1 | Al | 46 |
| PÁNVOVÁ PEC | 1 | SYNT.STRUSKA | 50 |
| | | FESI75 | 85 |
| | | FEMN | 265 |
| | | KOKS | 6 |
| | | AL | 10 |
| | | VÁPNO | 200 |
| DOLEGOVÁNÍ PO VD | 1 | Al | 1 |
| | | CaPROFIL | 12 |
| HMOTNOST VSÁZKY | | | 16000 |
| HMOTNOST TEKUTÉHO KOVU | | | 15000 |

Tab. č. 10,11,12 znázorňují chemické složení souboru pěti taveb nízkolegované oceli GS20Mn5, provedené v ocelárně Ždas, a.s, které probíhaly následovně:

Na EOP bylo provedeno natavení a oxidace kovu. Redukční údobí bylo dále přesunuto na pánvovou pec, odkud kov pokračoval na zařízení VD.

Hodnoty se měřily vždy na konci jednotlivých údobí, nebo po použití jednotlivých zařízení. Chemické složení jednotlivých prvků bylo měřeno spektrálním analyzátozem.

Tab. č. 10: Změny obsahu C a Mn u nízkolegované oceli GS20Mn5 na EOP-LF-VD

| Statické veličiny n=5 | Chemické složení prvek – C [hmot.%] | | | | | Chemické složení prvek –Mn [hmot.%] | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|------------|-------|-------|--------------------|-------------------------------------|------------|-------|-------|--------------------|
| | EOP | EOP ox. | LF | VD | Konečné složení | EOP | EOP ox. | LF | VD | Konečné složení |
| \bar{x} | 0,45 | 0,04 | 0,17 | 0,19 | 0,20 | 0,43 | 0,11 | 1,21 | 1,30 | 1,31 |
| s | 0,108 | 0,008 | 0,026 | 0,015 | 0,008 | 0,135 | 0,064 | 0,088 | 0,055 | 0,012 |
| max | 0,53 | 0,05 | 0,19 | 0,21 | 0,21 | 0,61 | 0,22 | 1,30 | 1,35 | 1,33 |
| min | 0,31 | 0,03 | 0,13 | 0,18 | 0,19 | 0,27 | 0,07 | 1,10 | 1,22 | 1,30 |

- Změna obsahu uhlíku:

Jak vyplývá z tab. č. 10, po natavení se pohybuje obsah uhlíku okolo 0,45 hmot. %. Po oxidaci se průměr pohybuje okolo 0,04 hmot. %. Průměrné snížení obsahu uhlíku je 0,41 hmot. %, což je pokles o cca 91 %.

Během redukce v LF dochází ke zvýšení obsahu uhlíku. Z tab. č. 9 je patrné, že mezi přidávané nauhličovadla patří koks (cca 80 % C) a FeMn (cca 8 % C). Průměrný rozdíl obsahu uhlíku po nauhličení činil zhruba 0,13 hmot. %.

Během pochodu VD a konečného složení se obsah uhlíku ještě navýšil o 0,03 hmot. % na konečný obsah 0,20 hmot. %. Což je podle tab. č. 2 k spodní mezi dovoleného výsledného obsahu uhlíku v oceli GS20Mn5

- Změna obsahu manganu:

Jak vyplývá z tab. č. 10, po natavení se obsah manganu pohybuje okolo 0,43 hmot. %. Během oxidace je vidět, že dochází ke snížení obsahu manganu. K tomuto snížení došlo v důsledku oxidace manganu a jeho přerozdělení mezi struskou a kovem. Průměrný rozdíl obsahu manganu v tavenině před oxidací a po oxidaci činil 0,32 %. Obsah manganu po oxidačním údobí klesá o cca 74%.

Během redukce v LF došlo ke zvýšení obsahu manganu. Jak ukazuje tabulka číslo 9, do taveniny se přidal FeMn. Průměrný konečný obsah manganu byl 1,21 hmot. %.

Během pochodu VD a konečného složení se průměrný obsah Mn dále zvyšoval až na konečných 1,31 hmot. %, což je podle tab. č. 2 skoro ke střední mezi dovoleného obsahu manganu v oceli GS20Mn5.

Tab. č. 11: Změny obsahu Si a P u nízkolegované oceli GS20Mn5 na EOP-LF-VD

| Statické veličiny n=5 | Chemické složení prvek – Si [hmot. %] | | | | | Chemické složení prvek – P [hmot. %] | | | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|-------|-------|--------------------|--------------------------------------|------------|-------|-------|--------------------|
| | EOP | EOP ox. | LF | VD | Konečné složení | EOP | EOP ox. | LF | VD | Konečné složení |
| \bar{x} | 0,06 | <0,01 | 0,33 | 0,37 | 0,38 | 0,020 | 0,005 | 0,006 | 0,007 | 0,006 |
| s | 0,051 | - | 0,033 | 0,035 | 0,017 | 0,004 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| max | 0,13 | - | 0,37 | 0,4 | 0,39 | 0,250 | 0,025 | 0,008 | 0,008 | 0,008 |
| min | <0,01 | - | 0,28 | 0,31 | 0,35 | 0,015 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,005 |

- Změna obsahu křemíku:

Jak vyplývá z tab. č. 11, po natavení se pohybuje obsah křemíku okolo 0,06 hmot. %. Nízká hodnota křemíku po natavení ukazuje na použití tzv. aktivního tavení, kdy se ještě ve fázi vsázení přidává do pece vápno.

Po oxidaci došlo v důsledku reakce prvku s kyslíkem ke snížení obsahu křemíku. Vzniklý oxid křemičitý přechází do strusky. Průměrné snížení obsahu křemíku je min 0,05 hmot. %, což je pokles o cca 84 %.

Během redukce v LF došlo ke zvýšení obsahu křemíku. Jak ukazuje tab. č. 9, do taveniny se přidal FeSi75. Průměrný konečný obsah křemíku byl 0,33 hmot. %.

Během pochodu VD a konečného složení se průměrný obsah Si dále lehce zvyšoval až na konečných 0,38 hmot. %, což je podle tab. č. 2 zhruba ke střední mezi dovoleného obsahu křemíku v oceli GS20Mn5.

- Změna obsahu fosforu:

Jak vyplývá z tab. č. 11, po natavení činila nejnižší hodnota obsahu fosforu v tavenině 0,020 hmot. %. Opět to bylo zapříčiněno díky aktivnímu tavení, kdy fosfor přecházel z části do strusky.

Během oxidace vznikají podmínky pro další odfosfoření. Průměrný rozdíl obsahu fosforu v tavenině před oxidací a po oxidaci činil zhruba 0,015 hmot. %. Obsah fosforu po oxidačním údobí klesl tedy o cca 75 hmot. %.

Během redukce v LF, pochodu VD a konečného složení se obsah fosforu téměř neměnil. Je patrné, že největší podíl odfosfoření probíhá mezi kovem a oxidační struskou. Průměrný konečný obsah fosforu byl 0,006 hmot. %. Podle tabulky číslo 2 je maximální dovolený obsah fosforu v oceli GS20Mn5 0,050 hmot. %, což ukazuje na dobrý průběh odfosfoření.

Tab. č. 12: Změny obsahu S a Cr u nízkolegované oceli GS20Mn5 na EOP-LF-VD

| Statické veličiny n=5 | Chemické složení prvek – S [hmot. %] | | | | | Chemické složení prvek –Cr [hmot. %] | | | | |
|--------------------------|--------------------------------------|---------|-------|-------|----------------------------|--------------------------------------|---------|-------|-------|----------------------------|
| | EOP | EOP ox. | LF | VD | Konečné složení před litím | EOP | EOP ox. | LF | VD | Konečné složení před litím |
| \bar{x} | 0,030 | 0,020 | 0,010 | 0,002 | 0,002 | 0,24 | 0,11 | 0,17 | 0,19 | 0,19 |
| s | 0,010 | 0,007 | 0,004 | 0,001 | 0,001 | 0,068 | 0,025 | 0,038 | 0,036 | 0,034 |
| max | 0,036 | 0,036 | 0,020 | 0,003 | 0,003 | 0,17 | 0,33 | 0,21 | 0,23 | 0,23 |
| min | 0,014 | 0,012 | 0,010 | 0,001 | 0,001 | 0,033 | 0,09 | 0,11 | 0,14 | 0,14 |

- Změna obsahu síry:

Jak vyplývá z tab. č. 12, po natavení se pohybuje průměrný obsah síry okolo 0,030 hmot. %.

Během oxidace došlo ke snížení obsahu síry. Průměrný rozdíl obsahu síry v tavenině před oxidací a po oxidaci činil zhruba 0,010 hmot. %. Obsah síry po oxidačním údobí klesl tedy o cca 33 hmot. %.

Během redukce v LF se obsah síry dále snižoval. Je to zapříčiněno díky dezoxidované tavenině a nově vzniklé redukční strusce. Průměrný konečný obsah síry byl 0,010 hmot. %.

Během pochodu VD a konečného složení se průměrný obsah síry dále snižoval až na hodnotu 0,002 hmot. %. Podle tab. č. 2 je maximální dovolený obsah síry v oceli GS20Mn5 0,050 hmot. %, což ukazuje na dobrý průběh odsíření.

Celkový stupeň odsíření oceli na EOP-LF-VD byl cca 93 hmot. %.

- Změna obsahu chromu:

Jak vyplývá z tab. č. 12, po natavení se pohybuje průměrný obsah chromu okolo 0,24 hmot. %.

Během oxidace došlo vlivem reakce chromu s kyslíkem ke snížení jeho obsahu. Průměrný rozdíl obsahu chromu v tavenině před oxidací a po oxidaci činil zhruba 0,13 hmot. %. Obsah chromu po oxidačním údobí klesl tedy o cca 54 hmot. %.

Během redukce v LF se obsah chromu zvyšoval. Je to zapříčiněno přípalem prvku z vyzdívky. Průměrný konečný obsah chromu byl 0,17 hmot. %.

Během pochodu VD a konečného složení se obsah chromu ještě mírně zvýšil na konečných 0,19 hmot. %. Jelikož se jedná o ocel nelegovanou, která má obsah chromu do 0,03 hmot. % tak se zde chrom nepovažuje jako legura. Konečný obsah 0,19 hmot. % odpovídá požadovanému složení oceli GS20Mn5.

Tab. č. 13 zobrazuje konkrétní pokles nebo nárůst obsahu jednotlivých prvků v daném údobí.

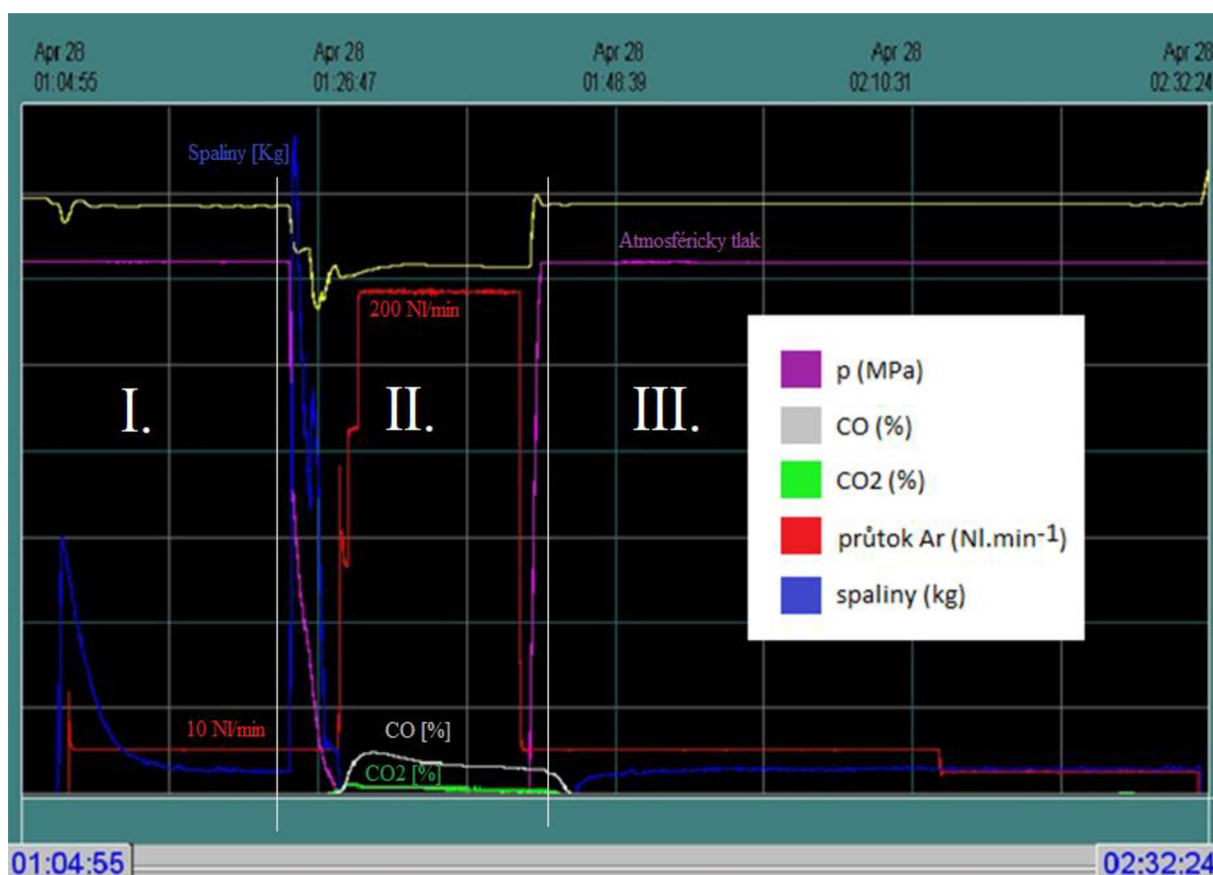
Tab.č. 13: Nárůst a pokles obsahu prvků během jednotlivých údobí

| ΔPrvek | Oxidace | LF | VD | Konečné složení |
|--------|---------|-------|--------|-----------------|
| ΔC | -0,41 | +0,13 | +0,02 | +0,01 |
| ΔMn | -0,32 | +1,1 | +0,09 | +0,01 |
| ΔSi | +0,05 | +0,32 | +0,04 | +0,01 |
| ΔP | -0,015 | +0,05 | - | - |
| ΔS | -0,01 | -0,01 | -0,008 | - |
| ΔCr | -0,13 | +0,06 | +0,02 | - |

5.2.1 Odplynění oceli GS20Mn5 na pochodu VD

Na obr. č. 10 je znázorněn průběh zpracování kovu při použití vakuové metody VD. Naměřené údaje zde slouží jako obecná ukázka metalurgických procesů, které se odehrávají uvnitř kesonu a neodkazují na konkrétní tavbu zahrnutou ve výpočtech v tabulkách číslo 10,11,12. Údaje včetně obr. poskytla společnost Ždas, a.s.

Obrázek je rozdělen římskými číslicemi na 3 části, kde:



Obr. č. 10: Metalurgické procesy při vakuování taveniny na VD [Žd'as, a.s.]

- část I – Znázorňuje období po zavezení pánve do vakuového kesonu. Tlak zde zůstává atmosférický, pouze se do taveniny začne dmýchat argon. Což znázorňuje červená křivka. Při začátku dmýchání je nastaven výkon 10 NI/min. Krátký pik na začátku je způsoben prvotním profouknutím porézni tvárnice. Při konstantním dmýchání argonu se dále množství uvolněných spalin snižuje.
- Část II – Zachycuje samotný princip pochodu VD, a to, že se zde snižuje tlak nad taveninou. Fialová křivka, která znázorňuje aktuální tlak v kesonu, se začne prudce snižovat až na hladinu 200 Pa a současně se razantně zvýší míra dmýchaného argonu. Kombinace těchto dvou jevů vytváří vhodné podmínky pro vytváření bublin CO. Dochází tedy k uhlíkovému varu, který přispívá ke snižování obsahů uhlíku, kyslíku a také k odplynění vodíku a dusíku. Lze si také všimnout, že za stálého dmýchání argonu a prudce se snižujícího tlaku, vysoce narůstá míra uvolněných spalin CO, CO₂. Následně se ocel přestane zcela vakuovat a míra dmýchaného argonu se vrátí na konstantních 10 NI/min.
- Část III - Ocel se udržuje při atmosférickém tlaku a zároveň se dmýchá argon výkonem okolo 10 NI/min. Cílem této části je zvyšování mikročistoty. Zbylé vměstky, obsažené v tavenině, se díky probublávání argonem dostávají do strusky. Mírně narůstá obsah uvolněných spalin až do doby, kdy se sníží míra dmýchaného argonu a zhruba po 20 minutách proces končí. Ocel odjíždí v pánvi připravená k lití.

Tab. č. 14 znázorňuje hodnoty obsahu plynů vodíku, dusíku a kyslíku obsažených v oceli během jednotlivých údobí a pochodů. Jedná se o hodnoty poskytnuté firmou Ždas, a.s. Uvedené hodnoty nevychází z konkrétní tavby zahrnuté ve výpočtech v tab. č. 10,11,12, avšak znázorňují obecné předpoklady obsahů jednotlivých plynů, které lze v tavenině očekávat.

Tab. č. 14: Obecně dosažený obsah plynů v oceli na konci jednotlivých údobí a postupů [ppm]

| Statické veličiny | Prvek | EOP | EOP ox. | LF | VD | Konečné složení |
|-------------------|-------|-----------|-------------|-----------|---------|-----------------|
| \bar{x} | H | 4 až 8 | 3 až 5 | 4 až 8 | 0,9 | 0,9 |
| | N | 80 až 150 | 50 až 70 | 80 až 120 | 34 | 34 |
| | O | 50 až 150 | 200 až 1500 | 40 až 100 | <0,0040 | <0,0025 |

Obsahy plynů H,N,O v tavenině rostou při kontaktu s atmosférou. Je to přirozená chemická reakce, která má za úkol uvést do rovnováhy obsah plynů v oceli s obsahem plynů v okolní atmosféře. Je tedy důležité, aby povrch taveniny byl po celé ploše pokryt krycí struskou.

Rostoucí nebo klesající hodnota obsahů plynů v tabulce číslo 14 lze popsat následovně:

- EOP ox. - Vlivem dmýchání kyslíku do taveniny v oxidačním údobí dochází k růstu obsahu kyslíku v tavenině. Následkem dmýchání kyslíku do taveniny vzniká uhlíkový var. Vzniklé bubliny oxidu uhelnatého umožňují vynášet plyny H,N z taveniny. Obsahy plynů H,N se tedy v oxidačním údobí zmenšují.
- LF – Před procesem LF se celá tavenina dezoxiduje hliníkem, výsledkem je potom snížený obsah kyslíku v tavenině. Při průběhu zpracování taveniny na pochodu LF dochází k narušování strusky v místě elektrod. Obsah H a N v tavenině tedy roste.
- VD – Hlavní důvod použití pochodu VD je odplynění taveniny. Při vakuování dochází k dezoxidaci taveniny uhlíkem doprovázené snížením obsahu kyslíku v kovu i ve strusce. Do bublin Ar a CO potom difundují zbylé plyny H,N.V celému procesu je zásadní probublávání taveniny argonem.

5.2.2 Složení redukčních strusek

Tab. č. 15 znázorňuje průměrné chemické složení redukčních strusek u souboru pěti taveb nelegovaných ocelí. Informace poskytla společnost Vítkovice Heavy Machinery, a.s. Jednotlivé obsahy prvků byly naměřeny na konci pochodu VD.

Tab. č. 15: Výsledné chemické složení redukčních strusek z pěti taveb nelegovaných ocelí na pochodu VD [hmot. %]

| Prvek | | CaO | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | SiO ₂ | Cr ₂ O ₃ | P ₂ O ₅ | S | TiO ₂ |
|-----------------------------|-----------|-------|--------------------------------|-------|-------|-------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------|------------------|
| Statické veličiny n=5 | \bar{x} | 59,51 | 25,25 | 0,95 | 0,21 | 5,63 | 6,90 | 0,02 | 0,13 | 0,28 | 0,13 |
| | s | 1,246 | 1,384 | 0,526 | 0,098 | 0,490 | 1,114 | 0,000 | 0,152 | 0,069 | 0,016 |
| | max | 61,11 | 26,64 | 1,8 | 0,35 | 6,07 | 7,89 | 0,02 | 0,37 | 0,3745 | 0,15 |
| | min | 57,83 | 23,51 | 0,57 | 0,11 | 4,86 | 5,43 | 0,02 | 0,01 | 0,1867 | 0,11 |

Jak vyplývá z tab. č. 15 je struska tvořena převážně CaO a Al₂O₃, které dohromady tvoří cca 85 % strusky. Obsahy kyselých oxidů jsou cca 7 %. Dále se vyskytují tzv. snadno redukovatelné oxidy jako FeO, MnO atd.

Dosazením koncentrací oxidů do vztahu (1.3) lze stanovit bazicitu strusky cca 8,6. Podle literatury [14] je struska značně zásaditá, což má příznivý vliv na výsledné odsíření.

Vysoká bazicita strusky koreluje s dosahovanými obsahy síry, které činily u sledovaných taveb průměrně 0,002 hmot. %.

Tekutost redukční strusky určuje vápenato-hlinitanový poměr a určuje se dle vztahu 1.2. Průměrný vápenato-hlinitanový poměr pro strusky z tab. č. 15 má hodnotu 2,35. Z literatury [9] vyplývá, že výsledná hodnota odpovídá optimálnímu rozsahu 1,7 až 2,3 C/A. Z výsledků chem. složení a analýzy strusek vyplývá, že ve VHM, a.s. je plně zvládnutý režim tavení a zpracování na EOP+LF+VD.

Tab. č. 16: Obecně dosažená míra plynů v oceli, na konci jednotlivých údobí a postupů

| Prvek | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | P ₂ O ₅ | SO ₃ | CaO | TiO ₂ | Cr ₂ O ₃ | MnO | Fe ₂ O ₃ |
|---------|------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|
| hmot. % | 12,6 | 30,8 | 9,0 | <0.02 | 0,5 | 45,9 | 0,22 | 0,05 | 0,19 | 0,27 |

Tab. č. 16 zobrazuje složení jedné vybrané redukční strusky u zpracovatele Žďas, a.s. Jedná se o složení na konci VD.

Struska je tvořena převážně CaO a Al₂O₃, které dohromady tvoří cca 77 % strusky. Obsahy kyselých oxidů jsou cca 9 %.

Dosažením koncentrací oxidů do vztahu (1.3) lze stanovit bazicitu strusky cca 8,6. Podle literatury [14] je struska silně zásaditá, což má dobrý vliv na výsledné odsíření. Vysoká bazicita strusky koreluje s dosahovanými obsahy síry, které činily u sledovaných taveb průměrně 0,002 hmot. %. Dosahované obsahy síry jsou u obou výrobců i přes rozdílné kapacity jednotlivých agregátů zcela srovnatelné.

Tekutost redukční strusky určuje vápenato-hlinitanový poměr a určuje se dle vztahu 1.2. Průměrný vápenato-hlinitanový poměr pro strusku z tab. č. 16 má hodnotu 1,49. Z literatury [9] vyplývá, že výsledná hodnota je mírně pod optimálním rozsahem 1,7 až 2,3 C/A. Struska tedy při daných teplotách může být tekutá a tím plnit dobře svoji funkci.

5.3 Průběh zpracování vysokolegované oceli X20Cr13 NA EOP + VOD

V rámci bakalářské práce se sleduje chromová martenzitická korozivzdorná ocel X20Cr13. Jedná se o ocel s cca 0,2 % C a 13 % Cr. Ocel je vyráběna v podniku Žďas, a.s., s využitím sekundární metalurgie.

Natavení probíhá na EOP, dále se kov přesouvá na LF (dojde k úpravě teploty) a následně se zpracovává na VOD s navazujícím VCD,VD.

Chemické složení oceli dle normy je uvedeno v tabulce číslo 17.

Tab. č. 17: Chemické složení oceli X20Cr13(ekvivalentní ČSN 17 022) [30]

| Prvek | C | Si | Mn | P | S | Cr |
|-----------|-----------|----------|----------|-----------|--------|-------------|
| [hmot. %] | 0,16-0,25 | max 1,00 | max 1,50 | max 0,040 | ≤0,030 | 12,0 - 14,0 |

Příklad druhování vsázky u sledované tavby je uveden v tabulce číslo 18. Tabulka se dělí na fáze.

V peci (EOP) se do vsázky přidává značné množství koksu a FeCr6, výsledkem je potom nauhličení a legování taveniny chromem.

Na pánvové peci se přidávají legury FeMn a FeCr6. Cílem je dosažení vhodného složení před procesem VOD.

Během pochodu VOD/VCD/VD se přidává se syntetická struska a vápno, dále se celá tavenina dolegovává pomocí FeMn, FeSi75 a FeCr, podle potřeby na požadované chemické složení oceli. Provedlo se nauhličení taveniny pomocí černého uhlí Antracitu.

Tab. č. 18: Materiály, které se přidávají do pece během jednotlivých fází

| Fáze | Průchod | Komponenta | Hmt. vsáz. [kg] |
|------------------------|---------|--------------|-----------------|
| OPRAVA | 1 | KOKS | 150 |
| | | FeCr6 | 1100 |
| PÁNVOVÁ PEC | 1 | FeMn | 262 |
| | | FeCr6 | 65 |
| | | ARGON | 131 |
| DOLEGOVÁNÍ PO VOD | 1 | VÁPNO | 280 |
| | | FeMn | 5 |
| | | SYNT.STRUSKA | 100 |
| | | FeSi75 | 105 |
| | | FeCr | 35 |
| | | AL | 23 |
| | | ANTRACIT | 33 |
| HMOTNOST VSÁZKY | | | 19800 |
| HMOTNOST TEKUTÉHO KOVU | | | 17700 |

Tab. č. 19 znázorňuje chemické složení jedné tavby oceli X20Cr13, provedené v ocelárně Ždas, a.s.

Hodnoty se měřily vždy na konci jednotlivých údobí, nebo po použití jednotlivých zařízení. Chemické složení jednotlivých prvků bylo měřeno spektrálním analyzátořem.

Tab. č. 19: Chemické složení oceli X20Cr13 [hmot. %]

| Prvek | Natavení EOP | LF | VOD | VD | Konečné složení |
|-------|--------------|-------|-------|-------|-----------------|
| C | 0,99 | 0,88 | 0,04 | 0,2 | 0,2 |
| Mn | 0,43 | 0,53 | 0,43 | 0,51 | 0,5 |
| Si | 0,13 | 0,12 | 0,04 | 0,35 | 0,33 |
| P | 0,021 | 0,023 | 0,019 | 0,02 | 0,02 |
| S | 0,008 | 0,01 | 0,01 | 0,002 | 0,002 |
| Cr | 11,6 | 12,4 | 12,25 | 12,4 | 12,45 |

Změna obsahu uhlíku:

Před samotným natavením se do vsázky přidal koks. Výsledkem je obsah C cca 1 %. Na LF došlo k poklesu obsahu uhlíku, který je dán přesnější analýzou oproti EOP (chem. homogenita). Při pochodu VOD došlo vlivem dmýchání kyslíku do taveniny k razantnímu snížení obsahu uhlíku o cca 95,5 %. Během pochodu VD se tavenina opět nauhličila na konečných 0,2 hmot. %.

Změna obsahu manganu:

Na pánvové peci lze pozorovat zvýšení obsahu manganu v tavenině díky legování FeMn. Na pochodu VOD se obsah manganu snižoval. Za sníženého tlaku dochází k jeho vypařování a také část Mn přechází do strusky. Celkové snížení bylo cca 19 hmot. %. Během pochodu VD a konečného složení došlo opět k dolegování manganu na výslednou hodnotu 0,5 hmot. %.

Změna obsahu křemíku:

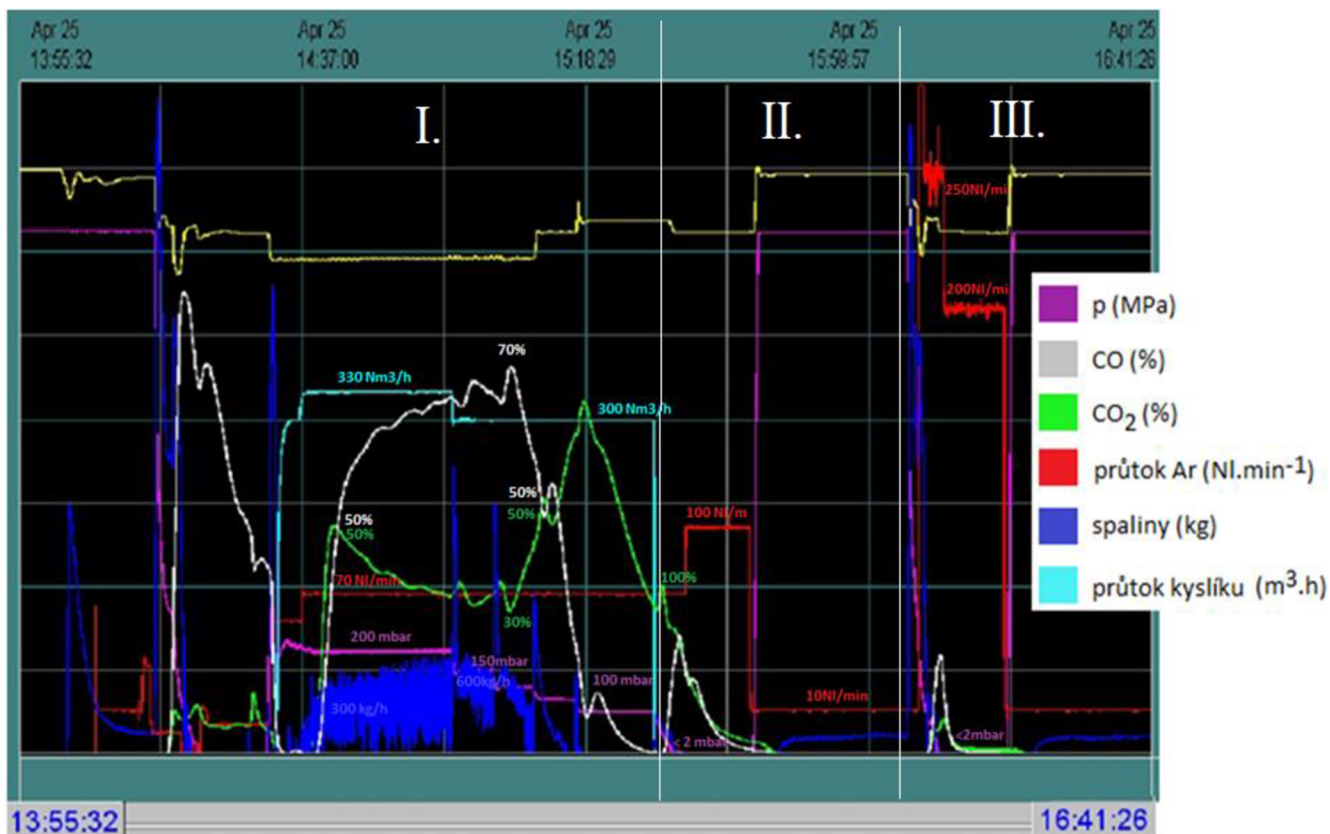
Křemík se během dmýchání kyslíku na pochodu VOD snižuje a pokles jeho koncentrace je vyšší než 67%. Během pochodu VD a konečného složení došlo k dolegování křemíku na výslednou hodnotu 0,33 hmot. %.

Změna obsahu fosforu a síry:

Oceli vysoce legované chromem nelze obecně odfosfořit ani odsířit. Pro dosažení nízkého obsahu síry a fosforu je nutné vsázku vhodně nadruhovat, aby po roztavení byl obsah P a S co nejnižší.

5.3.1 ODPLYNĚNÍ OCELI X20Cr13 NA EOP-LF-VOD

Na obr. č. 11 je znázorněn průběh zpracování kovu při použití vakuové metody VOD. Naměřené údaje zde slouží jako obecná ukázka metalurgických procesů, které se odehrávají uvnitř kesonu během zpracování. Záznam procesu nemá vazbu na sledovanou tavbu. Údaje včetně obr. poskytla společnost Ždas, a.s



Obr. č. 11 Metalurgické procesy při vakuování taveniny na VOD [Ždas, a.s.]

Obrázek je rozdělen římskými číslicemi na 3 části, kde

- část I – Znáznorňuje období po zavezení pánve do vakuového kesonu. Lze vidět prvotní pik argonu k proražení sloupce hladiny kovu. Nad taveninou se začne snižovat tlak, ihned vzniká uhlíkový var a uvolňuje se velké množství spalin. Množství uvolňovaného CO začne postupně klesat a tlak se zvýší na 200 mbar. Zde začíná samotný princip pochodu VOD. Zvýší se intenzita dmýchaného argonu a zároveň se začne do taveniny dmýchat také kyslík. Dochází k silnému uvolňování spalin, CO, CO₂.
- Část II – Tato část se nazývá VCD, jedná se o princip, kdy se do taveniny přestává dmýchat kyslík, sníží se tlak (<math>< 2 \text{ mbar}</math>) a zvýší se intenzita dmýchaného argonu (100 NI/min). Následně se tlak vrací na atmosférický a intenzita dmýchání argonu se snižuje na 10 NI/min.
- Část III - Ve třetí části probíhá pochod VD, který je detailně popsán v obr. č. 8. Dochází zde pouze vlivem dmýchání argonu k čeření, které napomáhá vyplouvání vměstků

6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo provést rozdělení jednotlivých postupů sekundární metalurgie a jejich možnosti a výhody. Dále pak pro pochody LF, VD a VOD popsat principy metalurgického zpracování používané na těchto zpracováních.

V úvodu práce se provedlo teoretické rozdělení jednotlivých pochodů, následně popis hlavních pochodů LF, VD, VOD z pohledu technologie.

V praktické části pak byla provedena analýza pěti taveb vyrobených na EOP a současně EOP s využitím sekundární metalurgie. Byly analyzovány strusky a bylo provedeno posouzení struskových režimů ve společnosti Žďas, a.s. Výsledky byly porovnány s výsledky z Vítkovice Heavy Machinery, a.s.

V praktické části byly posouzeny změny chemického složení jednotlivých prvků v oxidační a redukční části na EOP a dále změny chemického složení na jednotlivých pochodech LF, VD, VOD.

Byly stanoveny zásaditosti strusek a jejich posouzení z hlediska tekutosti. Z jednotlivých výsledků vyplynulo, že struskové režimy byly zvládnuty, jak ukazují hodnoty výsledných odsíření taveb.

Byl zhodnocen proces VD z hlediska odplynění.

Použité výsledky mohou být použity jako zdroj informací pro společnosti, které zvažují použití sekundární metalurgie.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ŠENBERGER, Jaroslav, Zdeněk BŮŽEK, Antonín ZÁDĚRA, Karel STRÁNSKÝ a Václav KAFKA. *Metalurgie oceli na odlitky*. Brno: VUTIUM, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
2. MICHALEK, Karel, Ladislav SOCHA, Zdeněk ADOLF a Jiří BAŽAN. *Rafinace a odlévání oceli* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/rafinace-a-odlevani-oceli/Michalek_Socha_Rafinace-a-odlevani-oceli.pdf. Studijní opora. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
3. MARTÍNEK, L., J. ŠENBERGER, P. FILA, M. BALCAR. *Sekundární metalurgie ve slévárnách*. Slévárnictví, roč. 54, č. 6, 2006, s. 218–221. ISSN 0037-6825
4. ŠENBERGER, J., L. MARTÍNEK. Sekundární metalurgie ve slévárnách oceli – I. část. Slévárnictví XLVII, 1999, č. 6/7 s. 372-378
5. BOHUŠ, Oldřich, Miloš ČERVINKA, Miloš KARNOVSKÝ, František KRUMNIKL a Miroslav MANDL. *Mimopecní rafinace oceli*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1968.
6. BAŽAN, Jiří a Ladislav SOCHA. *ZÁKLADY TEORIE A TECHNOLOGIE VÝROBY ŽELEZA A OCELI* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/rafinace-a-odlevani-oceli/Michalek_Socha_Rafinace-a-odlevani-oceli.pdf. Studijní opora. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
7. *Rozdělení a označení oceli* [online]. In: Mělník: ISŠT, s. 31 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.isstech.cz/objekty/Ciseln-znacen-oceli-dle-Csn.pdf>
8. Desulfurization of steel. *SubsTech* [online]. Kopeliovich, 2012 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=desulfurization_of_steel
9. SOCHA, Ladislav, et al. *Hodnocení struskového režimu při použití briketovaných ztekucovadel ve slévárně unex a.s.* [online]. Karlova Studánka, 2013 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://ocelari2014.tanger.cz/files/proceedings/13/reports/1734.pdf>
10. ArcelorMittal Temirtau orders new ladle furnace from SMS group. In: *Pressebox* [online]. Düsseldorf, 2017 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.pressebox.com/pressrelease/sms-siemag-ag/ArcelorMittal-Temirtau-orders-new-ladle-furnace-from-SMS-group/boxid/873126>
11. Ladle Furnace. In: *Sama* [online]. Montichiari, 2017 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.sama.bs.it/ladle-furnace.html>
12. HAMPL, Jiří. *METALURGIE SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/09_Metalurgie_slevarenskych_slitin/Hampl_Metalurgie_slevarenskych_slitin.pdf. Studijní opora. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství.
13. Production of Stainless Steels. KEY to METALS [online]. 2008 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=237>
14. ADOLF, Zdeněk. *TEORIE PROCESŮ PŘI VÝROBĚ ŽELEZA A OCELI: Část II - Teorie ocelářských pochodů* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/teorie-procesu-pri-vyrobe-zelza-a-oceli-cast-ii-teorie-ocelarskych-pochodu/Adolf_Teorie-procesu_pri_vyrobe_zeleza-a-oceli_castII.pdf. Studijní opora. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

15. ČAMEK, Libor. *SLÉVÁRENSTVÍ OCELOVÝCH ODLITKŮ* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/10_Slevarenstvi_ocelovyc_h_odlitku/Camek_Slevarenstvi_ocelovych_odlitku.pdf. Studijní opora. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství.
16. ŠENBERGER, J. Sekundární metalurgie ve slévárnách oceli. VUT v Brně [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: www.zam.fme.vutbr.cz/~senberger/doc/prednaska_10.doc
17. TKADLEČKOVÁ, Markéta. *ZÁKLADY 3D MODELOVÁNÍ METALURGICKÝCH PROCESŮ* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/02_Zaklady_3D_modelovani_metalurgick%C3%BDch_procesu/Tkadleckova_Zaklady_3D_modelovni_metalurgickych_procesu.pdf. Studijní opora. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství.
18. ZÁDĚRA, A. a J. ŠENBERGER. Výroba oceli v elektrických obloukových pecích [online]. Brno [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory/2_5_2.html
19. Desulfurization of steel. *SubsTech* [online]. Kopeliovich, 2012 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=ladle_refining
20. Argon Oxygen Decarburization (AOD). MetalTEK International [online]. 2010 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: https://www.metatek.com/sites/default/files/tekbuletin_apr_2010.pdf
21. Vacuum Degassing of Steel. *Vacaero* [online]. Canada: Vacaero International, 2017 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://vacaero.com/information-resources/vac-aero-training/101401-vacuum-degassing-steel.html>
22. Primetals Technologies to supply AOD converter. Primetal Technologies [online]. London, 2015 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.primetals.co.jp/press/pdf/20150810.pdf>
23. Vacuum Degassing of Steel used for Forged Ingots: The steel degassing. Analele Universității "Eftimie Murgu" [online]. 2015 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://anale-ing.uem.ro/2015/213.pdf>
24. CLU PROCESS FOR STAINLESS STEEL PRODUCTION. Ispat Guru [online]. 2014 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://ispatguru.com/cru-process-for-stainlesssteel-production/>
25. Argon Oxygen Decarburization Process. Ispat Guru [online]. 2014 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://ispatguru.com/argon-oxygen-decarburization-process/>
26. CLU® – Superheated steam. UHT – Uvån Hagfors Teknologi [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://www.uht.se/Content-Web-Page/0b171864-9747-4116-a309-baa6462baa99/clusupsup--superheated-steam.aspx>
27. Vacuum degassing. Sun flag steel [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: http://www.sunflagsteel.com/Sunflag%20Iron%20and%20Steel_files/VACUUM%20DEGASSING.htm
28. Degassing. Quality Steel Treating [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://www.qualitysteeltreating.com/heat/degassing.asp>
29. *Ocel na odlitky 42 2709 manganová* [online]. Normy.biz [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/detail/3757>
30. *Přehled chemického složení korozivzdorných oceli pro všeobecné použití obsažených v normě EN 10088* [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/charakteristika_korozivzdornych_oceli1.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

| 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 |
| RH | rührstahl heraeus |
| SL | scandinavian lancers |
| TN | thüssen niederrhein |
| VAD | vacuum oxygen decarburisation |
| VD | vacuum degassing |
| VOD | vakuum oxygen decarburisation |

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. č. 1: Elektrická oblouková pec [17]

Obr. č. 2: Přívod plynu do pánve [1]

Obr. č. 3: Zavádění materiálů do lázně [8]

Obr. č. 4: Schéma pochodu RH [1]

Obr. č. 5: Schéma pochodu DH [1]

Obr. č. 6: Schéma pánvové pece [12]

Obr. č. 7: Grafitové elektrody a otevřená dvířka pánvové pece [10]

Obr. č. 8: Části pánvové pece [11]

Obr. č. 9: Schéma pochodu VOD [19]

Obr. č. 10: Metalurgické procesy při vakuování taveniny na VD [Žďas, a.s.]

Obr. č. 11: Metalurgické procesy při vakuování taveniny na VOD [Žďas, a.s.]

Tab. č. 1: Popis metod sekundární metalurgie, jejich přínos a stručný popis [1]

Tab. č. 2 Chemické složení oceli GS20Mn5 dle normy ČSN 42 2709 [29]

Tab. č. 3: Příklad druhování vsázky oceli GS20Mn5

Tab. č. 4: Změny obsahu C a Mn v oceli GS20Mn5 na EOP

Tab. č. 5: Změny obsahu Si a P v oceli GS20Mn5 na EOP

Tab. č. 6: Změny obsahu S a Cr v oceli GS20Mn5 na EOP

Tab. č. 7: Nárůst a pokles obsahů prvků během jednotlivých údobí [hmot. %]

Tab. č. 8: Běžné složení strusek při tavně na EOP [hmot. %]

Tab. č. 9: Materiály, které se přidávají do pece během jednotlivých fází

Tab. č. 10: Změny obsahu C a Mn u nízkolegované oceli GS20Mn5 na EOP-LF-VD

Tab. č. 11: Změny obsahu Si a P u nízkolegované oceli GS20Mn5 na EOP-LF-VD

Tab. č. 12: Změny obsahu S a Cr u nízkolegované oceli GS20Mn5 na EOP-LF-VD

Tab. č. 13: Nárůst a pokles obsahů prvků během jednotlivých údobí

Tab. č. 14: Obecně dosažený obsah plynů v oceli na konci jednotlivých údobí a postupů [ppm]

Tab. č. 15: Výsledné chemické složení redukčních strusek z pěti taveb nelegovaných ocelí na pochodu VD [hmot.%]

Tab. č. 16: Obecně dosažená míra plynů v oceli, na konci jednotlivých údobí a postupů

Tab. č. 17: Chemické složení oceli X20Cr13 (ekvivalentní ČSN 17 022) [30]

Tab. č. 18: Materiály, které se přidávají do pece během jednotlivých fází

Tab. č. 19: Chemické složení oceli X20Cr13 [hmot.%]