

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# **POUŽITÍ SEKUNDÁRNÍ METALURGIE PŘI VÝROBĚ OCELI**

**APPLICATION OF SECONDARY METALURGY STEEL MANUFACTURE**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**JIŘÍ TROJAN**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. ANTONÍN ZÁDĚRA, Ph.D.**

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jiří Trojan

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

### **Použití sekundární metalurgie při výrobě oceli**

v anglickém jazyce:

### **Application of secondary metallurgy during steel manufacture**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

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

Cíle bakalářské práce:

Popis jednotlivých užívaných postupů sekundární metalurgie a jejich metalurgické možnosti a výhody jejich zavedení v praxi.

Seznam odborné literatury:

1. ŠENBERGER, J., MARTÍNEK, L. Sekundární metalurgie ve slévárnách oceli – I. část. Slévárství. 1999, roč. XLVII, č. 6-7, s. 372-378. ISSN 0037-6825.
2. KNÜPPEL, H. Desoxidation und Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen, Band 1. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1970.
3. MARTÍNEK, L., ŠENBERGER, J., aj. Sekundární metalurgie ve slévárnách. Slévárství. 2006, roč. 54, č. 6, s. 218–221. ISSN 0037-6825.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

**ABSTRAKT**

Bakalářská práce je odbornou rešerší, popisující základní postupy sekundární metalurgie. Je vysvětlen princip každého pochodu a jeho případné možnosti a použití.

**Klíčová slova**

Ocel, pánev, konvertor, struska, rafinace, sekundární metalurgie, vakuum

**ABSTRACT**

Bachelor's thesis is a technical summary describing the application secondary metalurgy. It's explained principle of every proces and his possibility and application.

**Key words**

Steel, landle, converter, slag, refinement, secondary metalurgy, vacuum

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

TROJAN, J. *Použití sekundární metalurgie při výrobě oceli*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Antonín Záděra, Ph.D..

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma sekundární metalurgie při výrobě oceli vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....  
Jiří Trojan

## **Poděkování**

Děkuji tímto Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce a své rodině za vytrvalou podporu při studiu.

**OBSAH**

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod .....	8
1 Rozdělení procesů sekundární metalurgie .....	9
2 SM provozovaná za atmosférického tlaku .....	13
2.1 Rafinace inertními plyny.....	13
2.1.1 Princip dmýchání argonem .....	15
2.2 Použití syntetických strusek .....	18
2.3 Injektáž prachových přísad tryskou.....	20
2.4 Injektáž pomocí plněného profilu.....	21
2.5 Pochod AOD .....	23
2.6 Pochod CLU.....	24
3 SM při atmosferickém tlaku s možností ohřevu taveniny .....	26
3.1 Pánvová pec .....	26
4 SM při tlaku na úrovni vakua .....	28
4.1 Pochod VD .....	28
4.2 Pochod VOD .....	29
4.3 Pochod VAD .....	33
4.4 Vakuové odplynění zdvižným způsobem.....	34
4.5 Vakuové odplynění oběžným způsobem .....	35
4.6 Vakuové odplynění oceli v proudu .....	36
5 Integrovaný systém sekundární metalurgie.....	37
6 Závěr.....	39
Seznam použitých zdrojů .....	40

## ÚVOD

Pojem metalurgie nazýváme celou řadu procesů od získávání kovů, jejich následné oddělování a v neposlední řadě jejich čištění a odstraňování nežádoucích nečistot. Pokud se zaměříme na výrobu oceli, můžeme metalurgii rozdělit do dvou skupin, a to metalurgii primární a metalurgii sekundární. V této práci se budu věnovat druhé skupině, sekundární metalurgii (SM). [1]

Sekundární metalurgie byla zavedena do provozu hlavně z důvodu požadavků zákazníků na vyšší kvalitu kovových materiálů a snahu sléváren o snížení nákladů při výrobě tekutého kovu. Pojem sekundární metalurgie obsahuje celou řadu technologických procesů, jež probíhají mimo tavící agregát (ve slévárnách, elektrická indukční pec nebo elektrická oblouková pec). V těchto tavících zařízeních dochází jen k tavení, případně oxidaci. Další postupy jsou poté už realizovány v některém zařízení sekundární metalurgie. Tím lze dosáhnout výrazného zvýšení výrobnosti a současně zlepšit některé metalurgické možnosti oproti výrobě oceli v EOP. Před zavedením některých prvků sekundární metalurgie do výroby bychom se měli nejdříve zaměřit na analýzu současného stavu a jeho porovnání se stavem po zavedení nějakého prvku sekundární metalurgie. Je nutné brát v úvahu nejen zvýšení jakosti a vlastností ocelí, zkrácení nebo vypuštění dosud zavedených postupů a zkrácení procesu výroby, ale také se zaměřit na ekonomickou stránku. Ne všechny prvky sekundární metalurgie jsou vhodné pro každou slévárnu. Jejich použití je úzce spojeno se sortimentem odlitků jednotlivých sléváren, jakostí a hlavně výrobností sléváren. Pro některé slévárny bude vhodnější v ohledu na jejich sortiment použití jen základních postupů sekundární metalurgie a naopak některé si budou moci dovolit zavést náročnější a dražší prvky. [2,3]



## 1 ROZDĚLENÍ PROCESŮ SEKUNDÁRNÍ METALURGIE

V dnešní době již máme nespočet různorodých prvků sekundární metalurgie, obsahující mnohem více než 50 způsobů mimopecního zpracování tekutého kovu. Existuje celá řada různých modifikací jednoho způsobu, které se na první pohled neliší a jejich rozdíly jsou patrné jen v malých detailech. Pro názornou ukázkou dobře poslouží výčet například modifikací pánvové pece. Zde je uvedeno pár jejich variant, které se liší např. ve způsobu ohřevu oceli: [2]

LAF	Landle Arc Furnace
LRF	Landle Refining Furnace
LIF	Landle Induction Furnace
LPF	Landle Plasma Furnace
LMF	Landle Metalurgy Facility

Jedním ze základních rozdělení procesů realizovaných mimo vlastní tavící agregát je, s přihlédnutím, za jakých tlakových podmínek jsou realizovány, následující:

### Procesy probíhající za atmosférického tlaku:

LF	Landle Surface
SL	Scandinavian Lancer
AP	Argon Pouring
IP	Injection Process

### Procesy probíhající ve vakuu:

VD	Vacuum Degassing
VOD	Vacuum Oxygen Decarburisation
DH	Dortmund Horder
RH	Rührstahl Heraeus

Stejně tak jako u pánvové pece se s velkým množstvím podobně označených variant se setkáme i v procesech probíhajících za atmosférického tlaku. Dobrým příkladem nám bude zařízení RH: [2]

RH – OB	Rührstahl Heraeus – Oxygen Blowing
RH – KTB	Rührstahl Heraeus – Kawasaki Top Blowing
RH – RD	Rührstahl Heraeus – Recirculation Degassing
RH – VR	Rührstahl Heraeus – Vacuum Recirculation
RH – MFB	Rührstahl Heraeus – Multi Function Burner

Základ všech těchto procesů je zařízení RH, jež je upraveno podle specifických podmínek výroby tak, aby umožňovalo provádět daný proces s ohledem na ekonomickou stránku výroby. Zde se tyto pochody využívají různých metod dmýchání plynů do ocelové lázně.

Nebudeme-li brát v potaz SM s přímou vazbou na konvertory, dalo by se doporučit ve slévárnách oceli vybavených zejména EOP toto:

**SM provozovaná za atmosférického tlaku:**

- Bez přihřevu: SL, AP, IP,
- S přihřevem: LF včetně jeho variant,

**SM s využitím sníženého tlaku:**

- VD,
- VOD,
- DETEM.

Výše uvedený proces s názvem DETEM zastupuje zařízení VD/VOD speciálně upravené pro rafinaci velice malých hmotností taveb. [2]

Základní charakteristika jednotlivých metod sekundární metalurgie a jejich přínos je uveden v tab. 1.

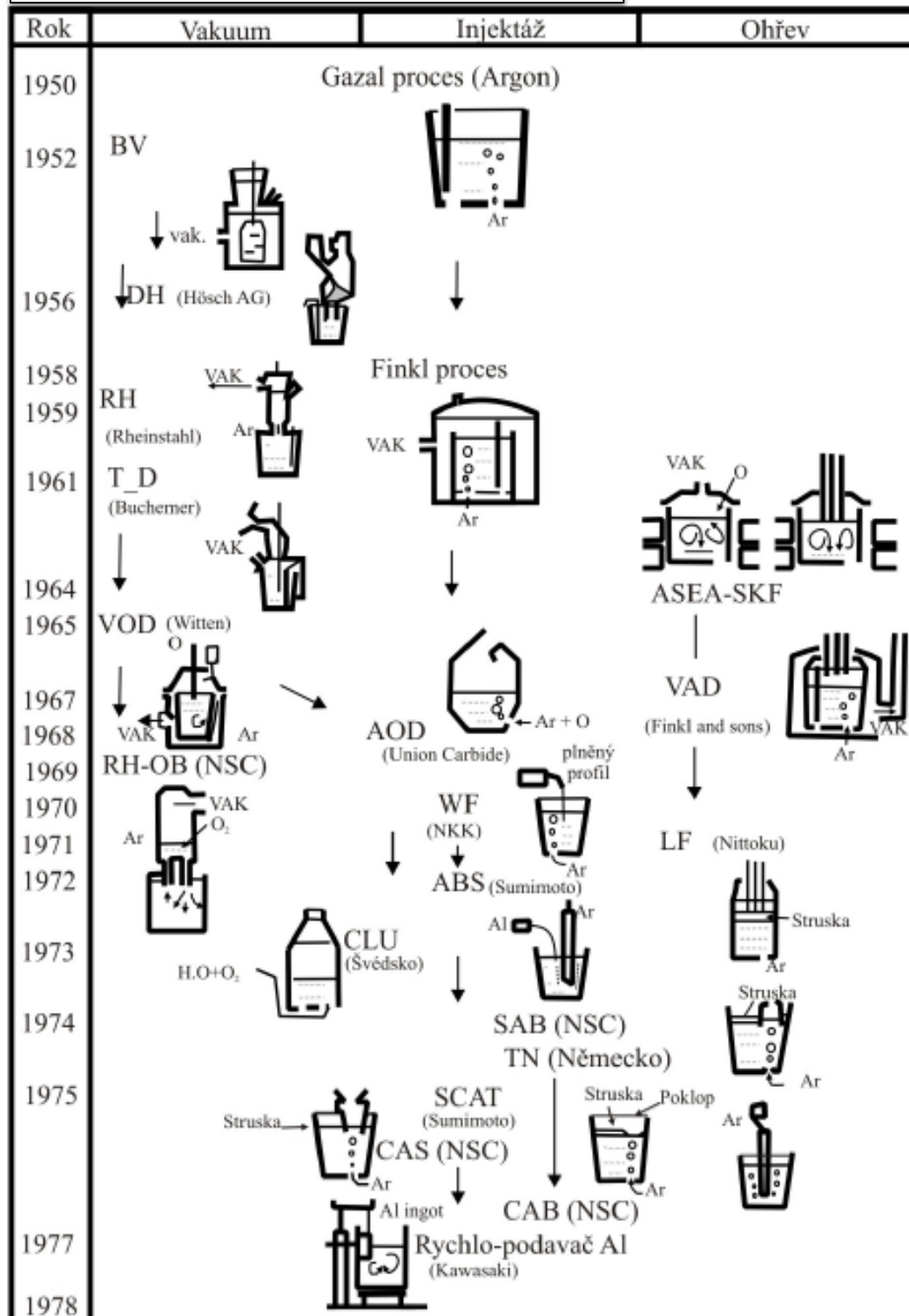
Tab. 1 Charakteristika metod sekundární metalurgie [3]

Postup SM	Popis	Označení	Přínos
Dmýchání inertních plynů	Dmýchání argonu příp. dmýchání pod aktivní struskou	AP	Teplotní a chemická homogenizace, částečná rafinace oceli
Přidávání přísad do tekuté oceli	Zavádění prachových přísad (Ca apod.)	SL, TN, IP	Snížení O a S, modifikace vměstků a zvýšení mikročistoty
	Zavádění speciálních plněných profilů	SCAT	
Ohřev oceli pod aktivní struskou	Kov je ohříván a promícháván s aktivní struskou	LF	Teplotní a chemická homogenizace, snížení obsahu S, modifikace vměstků
Vakuové zpracování oceli	V komoře	RH, DH	Rychlé oduhličení, snížení obsahu vodíku
	S přihřevem pod aktivní struskou	ASEA-SKF, VAD	Hluboké odsíření, snížení obsahu vměstků a jejich modifikace, teplotní a chemická homogenizace
Oxidační vakuování Oxidace směsí Ar-O	V pánvi	VOD	Hluboké oduhličení (použití u Cr ocelí), snížení obsahu H, N hluboké odsíření
	V konvertoru	AOD	
Oxidace směsí H <sub>2</sub> O-O	V konvertoru	CLU	

Na obr. 1 je vyobrazen chronologický vývoj jednotlivých postupů SM od začátku jejich vývoje (datováno od dob konce druhé světové války) až do roku 1973. Jak je z obrázku vidět, jsou zde zobrazeny nejen pochody popsané v předchozí tabulce, ale i několik dalších. V tomto období byly vyvinuty téměř všechny dnes

známé pochody. Dnes se ani nové způsoby SM nehledají, ale zpravidla se jen zdokonalují již existující. [3]

Obr. 1 Historický vývoj metod sekundární metalurgie [3]



Sekundární metalurgie obsahuje dnes velké množství pochodů a jejich různých kombinací, pomocí kterých lze dosáhnout nízkých hodnot jednotlivých nežádoucích prvků. V tab. 2 jsou uvedené možnosti jednotlivých postupů SM.

Tab. 2 Metalurgické možnosti některých postupů sekundární metalurgie [3]

Postup mimopecní rafinace		Snížení obsahu				Teplotní a chemická homogenizace	Přesné legování	Řízená desoxidace	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 H <sub>2</sub> O-O	CLU	a	č	č	č	a	a	a	č	č	č

Pozn.: a- ano, n- ne, č- částečně

## 2 SM PROVOZOVANÁ ZA ATMOSFÉRICKÉHO TLAKU

Jednotlivé pochody sekundární metalurgie prováděné za atmosférického tlaku jsou uskutečňovány buď v konvertoru, nebo v pánvi. Do pochodů uskutečňovaných v pánvi řadíme pochody, jako jsou AP a jeho spojení se injektáží prachových přísad, zavádění plněných profilů a použití syntetických strusek. [3]

Využití strusek se považuje za jeden z pilířů vedoucí k úspěšnosti SM. Důležitost využití syntetických strusek je zřejmá nejen z pohledu tepelné bilance a krycího efektu strusky, ale zejména pro zvýšení rafinačního účinku a schopnosti vázání na sebe vměstků, které jsou vynášeny z kovu inertními plyny (Ar). Při aplikaci strusek s vysokou úrovní bazicity je nutné nahradit vyzdívku z šamotu a zátkové tyče magnezitovým nebo korundovým stavivem. Vzhledem k negativnímu vlivu těchto procesů na teplotu v pánvi je vhodné pro snížení tepelných ztrát zvážit ohřev pánve. V závislosti na snížení koncentrace síry a kyslíku v oceli můžeme očekávat vyšší obsah vodíku a dusíku. Jedním z omezení SM v pánvi za odpichu z EOP v budoucnu budou ekologická kritéria, kde bude nutno zajistit dostatečný odvod zplodin z prostoru nad pánví. [2]

Nesmíme zapomenout na jeden z hojně využívaných postupů v pánvi, a to je pánvová pec. Do druhé skupiny, pochody prováděné v konvertoru, patří postupy AOD nebo CLU. Dalším kritériem pro pochody sekundární metalurgie prováděné za atmosférického tlaku je, zda umožňují nebo neumožňují ohřev kovu. Do skupiny umožňující ohřev patří pánvová pec a pochody konvertorové (AOD a CLU). [2]

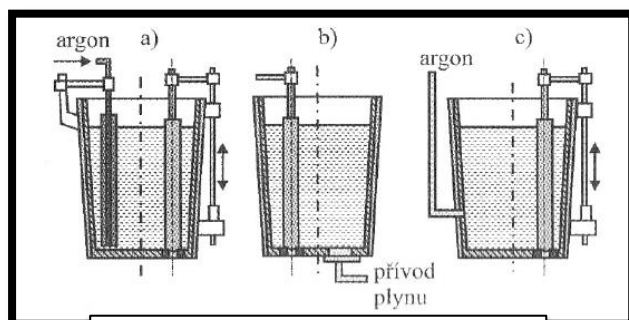
### 2.1 Rafinace inertními plyny

Nejjednodušším pochodem sekundární metalurgie je dmýchání inertního plynu do taveniny. K rafinaci oceli se nejčastěji používá argon. Jsou i případy, kdy se dmýchá oxid uhličitý nebo dusík. Tyto plyny se za daných podmínek považují za inertní. [3,1]

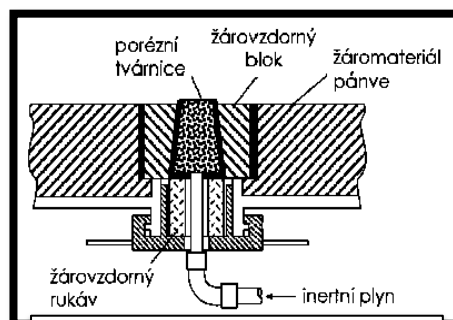
#### Dosahované účinky

- homogenizace oceli - teplotní i koncentrační,
- vyplouvání vměstků - usměrněným prouděním nebo také flotací,
- snižování obsahu vodíku a dusíku ve vakuu,
- podpora průběhu uhlíkové reakce u procesů, ve kterých tato reakce probíhá (např. AOD), snížení obsahu uhlíku a kyslíku,
- zajištění průběhu reakcí mezi struskou a kovem obnovováním reakčního povrchu (především odsíření oceli). [1]

Existují tři způsoby dmýchání inertního plynu do taveniny. Jednotlivé způsoby jsou zobrazeny na obr. 2. Prvním způsobem dmýchání plynu je skrze pomocnou zátkovou (falešnou) tyč (obr. 2. a). Plochá zátková tyč je ocelová trubka chráněná šamotem. Na koci trubky je namísto grafitové hlavy našroubovaná tvárnice, přes kterou se dmýchá plyn do oceli. Druhým a nejhojněji používaným způsobem dmýchání je přes pórovitou opláštěvanou tvárnici umístěnou ve dně pánve (obr. 2. b). Dmýchání argonu lze uskutečnit také přes prodyšnou tvárnici umístěnou ve stěně pánve (obr. 2. c). [2]

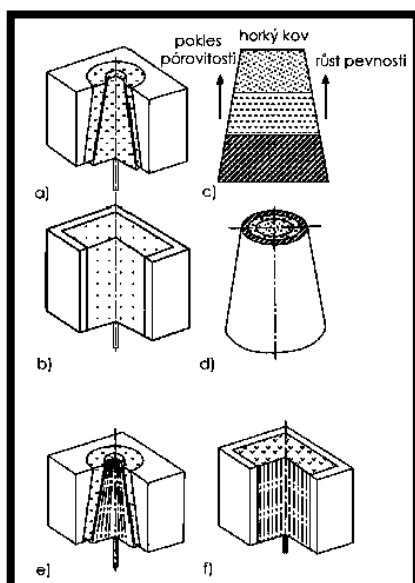


Obr. 2 Způsob dmýchání inertního plynu do pánve [3]



Obr. 3 Umístění porézní tvárnice do dna pánve [1]

Tvárnice mohou mít kónický nebo pravoúhlý tvar (Obr. 4). Mohou se skládat i z více kusů o rozdílné porózitě. Kapilární tvárnice s řízenou porózitou mohou být vyrobeny ze stejně hutné žárovzdorné hmoty, jako je vyzdívka pánve. Jsou však náchylnější k pronikání tekuté oceli při ztrátě tlaku argonu. [1]



Obr. 4 Tvary dmýchacích tvárníc [1]

a), b) jsou složeny z jednoho kusu materiálu, c), d) z více kusů žárovzdorného materiálu, kde směrem nahoru porezitá materiálu klesá, e) tvárnice z kónických kapilár, f) pravoúhlé tvárnice z kolmých kapilár. [1]

**Mezi klady umístění porézní tvárnice do dna pánve patří především: [1]**

- rovnoměrné míchání lázně,
- velmi malá oblast, kde nedochází k cirkulaci,
- možnost kontroly množství dmýchaneho argonu,
- vynikající kontakt strusky s kovem (odsíření oceli) a nižší teplotní gradient mezi struskou a kovem,
- možnost mírného odplynění a oduhličení oceli.

**Nevýhody: [1]**

- zvýšené opotřebení vyzdívky pánve,
- zvýšené nebezpečí průvalu (uvolnění tvárnice ve stěně nebo dně pánve a její vypadnutí).

**2.1.1 Princip dmýchání argonem**

Bubliny argonu vytvářejí při dmýcháním taveninou plynnou atmosféru s nulovým parciálním tlakem vodíku a dusíku. V tavenině se proto vodík dostává do bublin argonu, který je pak vynášen ven, vyrovnává se tím rozdíl parciálního tlaku vodíku (dusíku) v plynné atmosféře a koncentraci vodíku v tavenině. Tento efekt trvá do té doby, dokud nenastane rovnováha za předpokladu, že argon s vodíkem setrvá v lázni dostatečnou dobu. Rychlost průchodu bublin argonu záleží na jeho velikosti, tudíž k dosažení vysoké účinnosti je zapotřebí mít bublinky co nejmenší a rozptýlit je v co největším objemu lázně. Tímto postupem je možné snížit jak obsah vodíku, tak i dusíku v tavenině. Snížení obsahu dusíku by bylo možné až při velkém objemu dmýchaného argonu, a tak se v praxi snížení obsahu dusíku neuvažuje. [1,3]

Následující model výpočtu snižování obsahů uvedených plynů využívá jen termodynamický přístup. Kinetické hledisko se posuzuje podle účinnosti dmýchání argonu, které u experimentálních dat pomůže určit, do jaké míry se reakce přechodu plynu z oceli do bublin přibližuje rovnováze. Pokud jde za daných podmínek získat reprodukovatelné hodnoty účinnosti dmýchání argonu, pak podle následujícího vztahu (1) lze vypočítat potřebné množství argonu pro předepsanou změnu obsahu plynu nebo uhlíku. [4,5]

Výpočet teoretického množství argonu byl proveden v práci [4] za následujících zjednodušujících předpokladů: [4]

- v momentě odchodu bubliny z lázně je tlak v bublině 101 325 Pa a objemová koncentrace vodíku (dusíku) je v termodynamické rovnováze,
- vliv teploty během dmýchání se zanedbává,
- při dmýchání prochází všechen argon skrz tvárnici do lázně,
- neuvažuje se změn v chemickém složení lázně vyjma sledovaných změn vodíku (dusíku) a uhlíku.

Množství nadmýchaného argonu s ohledem na výše uvedené předpoklady se spočítá: [4,5]

$$V_{Ar} = \frac{22,4}{M_X} \int_{X_1}^{X_2} \frac{A_X - X^2}{X^2} d(X) \quad (1)$$

Kde:

- $M_X$  molekulová hmotnost vodíku, (dusíku) nebo uhlíku [kg.mol<sup>-1</sup>],  
 $A_X$  konstanta závislá na chemickém složení oceli a teplotě vypočtená z termodynamických dat pro podmínky rovnováhy [ - ],  
 $X$  koncentrace vodíku, (dusíku) nebo uhlíku v oceli [%]. [4]

Vypočtené objemy argonu jsou porovnávány s objemy argonu použitého pro snížení uvedených plynů. Míra využití dmýchaného argonu tedy je: [5]

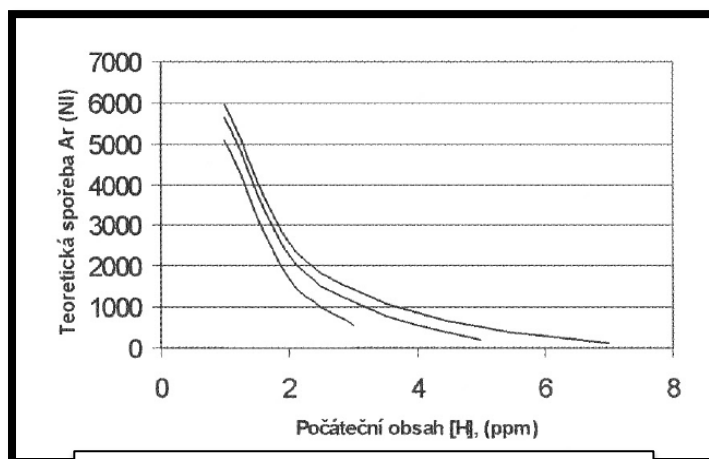
$$\eta = \frac{V_{\text{vypočtený}}}{V_{\text{naměřený}}} \quad (2)$$

Kde:

$V_{\text{vypočtený}}$  objem plynu vypočteného podle vztahu (1) [m<sup>3</sup>],

$V_{\text{naměřený}}$  objem plynu za popsanych podmínek [m<sup>3</sup>].

Hodnoty míry využití se pohybují v desetínách (od 0,1 do 0,3), tzn. Účinnost dmýchání inertního plynu cca 10 až 30 %. Ve slévarenských provozech s běžným sortimentem odlitků [4] bylo pozorováním zjištěno, že při obsahu vodíku v odlitku do 6 ppm se nevytvářely žádné vodíkové bubliny. Proto při snižování hodnoty vodíku se bere jako dostatečnou hodnota nižší než 6 ppm. [3,4] Ze vztahu (1) tedy dostáváme, že potřebný objem argonu ke snížení obsahu vodíku ze 7 ppm na 6 ppm je 171Ni.t<sup>-1</sup>. [4] Pro představu tento objem je možné nadmýchat do pánve o hmotnosti tavby 2 až 7 t za 10 minut, a to při poklesu teploty kovu o 150 °C. Pokud vezmeme na zřetel takovéto snížení teploty, tak v praxi se tento objem argonu jeví jako maximální. Na obr. 5 je vyobrazeno množství dmýchaného argonu potřebné ke snížení zvoleného obsahu vodíku při t = 1 600 °C, p = 101 325 Pa. [3,4] Dmýcháním argonu v pánvi je z teoretického hlediska vhodné jen pro snižování vysokých obsahů vodíku. [3] Ke snížení obsahu vodíku rozpuštěného v oceli o 1ppm se potřebuje tím více argonu, čím



Obr. 5 Vliv množství dmýchaného argonu na obsah vodíku v oceli [5]

menší je jeho obsah při zahájení dmýchání. [4] Snižování obsahu na nízké hodnoty (např. pod 4 ppm) je touto metodou vyloučené. Teplota lázně by kvůli potřebnému vysokému množství argonu rapidně poklesla. Proto pro takovéto nízké obsahy je potřeba přívodu externího zdroje tepla, který se používá třeba u pochodu AOD, který bude detailněji popsán níže. Výše uvedený rozbor nepočítá

s vlivy strusek. Zásadité strusky obsahují 40-50 ppm vodíku. Při dmýchání argonu do pánve s touto struskou se obsah vodíku nesnižoval, ale rostl. Naopak obsah vodíku v kyselých struskách je malý (cca 10 ppm) a dmýcháním argonu z kyselých indukčních pecí vedlo ke snížení obsahu vodíku pod 4 ppm. [3]

Snižování obsahu dusíku dmýcháním argonem není tak efektivní, jako tomu je u vodíku. K jeho snížení by bylo zapotřebí několikanásobně větší množství argonu, než je tomu u vodíku. Je to zapříčiněno horší difuzivitou vodíku a také

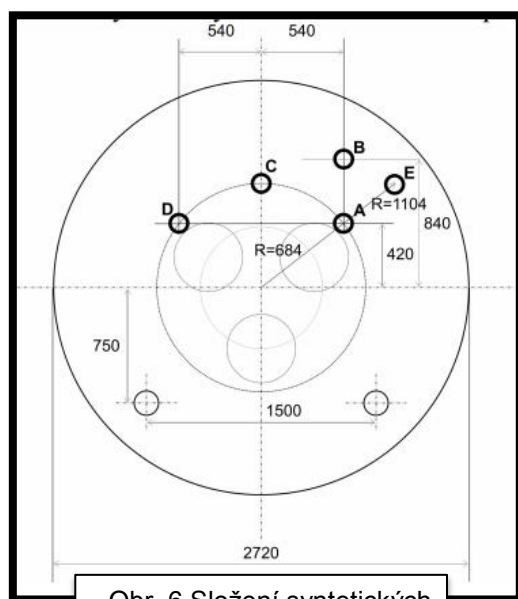


rozdílnou molekulovou hmotností dusíku ( $M_{N_2} = 28g.mol^{-1}$ ) a vodíku ( $M_{H_2} = 2g.mol^{-1}$ ). V některých ocelích je přítomnost dusíku vyžadována. Dusík se rozpouští v oceli atomárně a zvyšuje nám pevnost, tvrdost a mez průtažnosti, naopak klesají plastické vlastnosti oceli. [2] Dmýchání se nepoužívá jen k odplynění, ale také k dosažení teplotní a chemické homogenity a v neposlední řadě i ke snížení množství nekovových vměstků. Pro tyto operace není zapotřebí vysoké množství dmýchaného argonu a také je podstatně kratší doba dmýchání, která se pohybuje mezi jednou až pěti minutami. Pro pánve o hmotnosti 7 tun lze doporučit průtok argonu v závislosti na očekávaném přínosu [3]:

- Dosažení tepelné a chemické homogenity 80-100 NI/min.,
- Urychlení rozpouštění feroslitin 300-400 NI/min.,
- Rozpouštění a promíchávání syntetické strusky (odsíření) 450-900 NI/min.,
- Vyplouvání vměstků 30-50 NI/min.

Při snižování koncentrace vměstků je důležité mít vrstvu strusky dostatečně silnou. [3] Pokud by došlo k odkrytí hladiny, mohlo by to mít opačný efekt. Při dmýchání procházejí bubliny argonu taveninou, na jejich povrchu se usazují vměstky, které jsou poté vynášeny až k hladině, kde jsou absorbovány struskou. Zlepší se tím zabíhavost oceli a snižuje anizotropie mechanických vlastností. Dmýchání argonem se také používá k řízenému ochlazení, o kterém se ještě zmíním v dalších kapitolách. Dmýchání argonu do lázně je velice jednoduchý postup, který je možno zavést již v zaběhnutých slévárnách jednoduchou úpravou pánve, a to bez velkých pořizovacích nákladů. Tato metoda sama o sobě není dokonalá a má určitá omezení, a proto se tato metoda kombinuje s dalšími prvky, např. dmýchání argonu spolu s použitím syntetických strusek nebo použití plněných profilů. [3,4]

Při experimentu, který proběhl v roce 2013, byl sledován vliv rychlostí dmýchání



Obr. 6 Složení syntetických strusek hm. % [7]

na čistotu oceli, ze kterého vyplynulo, že při nízké intenzitě dmýchání došlo k trvalému poklesu vměstků na rozdíl od intenzity vyšší. [6] Další studie [7] se zabývala vlivem dmýchání argonu do pánve pomocí dvou tvárnic s různým umístěním ve dně pánve (obr. 6) na průběh homogenizace v pánvi. Nejlepší výsledky zajistilo umístění tvárnic v pozicích A a B resp. A a C. Naopak nejdelší homogenizační časy byly prokázány v umístění na pozicích A a D, kde došlo ke vzniku dvou recirkulačních oblastí v lici pánvi, kde docházelo poté k vzájemnému ovlivňování a eliminaci rychlostních složek proudění. [7]

## 2.2 Použití syntetických strusek

Důvodem, proč jsou využívány, je schopnost zvyšovat čistotu oceli, čímž je myšleno pohlcování nekovových vměstků absorpcí a chemické vázání síry na sebe, nebo jen řídit obsah síry v požadovaném rozsahu. A především chrání ocel před atmosférou. [1]

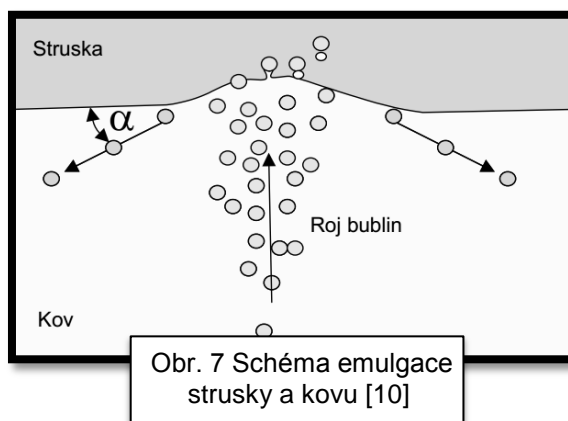
Hlavní složkou syntetických strusek je oxid vápenatý, jeho teplota tavení je značně vysoká (2 580 °C) [8], proto se při jejich použití přidává tavidlo ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). [3] Naopak obsahují minimální množství oxidů železa, MnO a síry. V SM se používají strusky redukční. Chemické složení některých syntetických strusek je vyobrazeno v tab. 3, kde je vidět, že většina strusek je zásaditých (složení tvoří zejména  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ), s minimem ostatních složek. Jediná struska wollastonit má vysoký obsah  $\text{SiO}_2$  (37,9 %) a strusku slagmag 90 tvoří z 88 %  $\text{MgO}$ . Hlavním úkolem syntetických strusek sázené při odpichu do pánve, je urychlení tvorby tekuté pánvové strusky. Zásadité pánvové strusky poté krátí a prohlubují proces odsíření. [1] Na základě nových výzkumů se do výroby dostává tzv. Briketové ztekucovadlo strusky. Je to briketová směs bílého elektrotaveného korundového prášku, dolomitového vápence a dalších přísad. Používá se pro snížení viskozity strusky umožňující velmi rychlé a účinné odsíření oceli. [9]

Tab. 3 Složení syntetických strusek hm. % [1]

Označení	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	C	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	Poznámka
CALUMET 60	31.0	4.0	57.0	8.0	0.2	0.8	0.4	-	-			přetavená
CALUMET 70	23.0	0.5	72.0	2.5	0.2	1.5	0.03	0.1	-			přetavená
Lafarge LSDF	50.7	3.5	40.6	1.0	1.4	0.1	0.04	0.05	1.45			přetavená
CAS 55	42.5	1.0	52.3	0.3	1.6	0.02	0.05	0.07	-			
JAP	37.9	7.5	44.3	2.2	0.2	0.02	0.10	0.49	-			
Antrakal	8.0	3.6	75.3	5.9	1.6	1.80	0.01	0.40	0.1			
Milluflux	4.0	1.0	75.0	12.0	0.6	5.2	0.01	0.20	0.2			
	5.0	2.0		18.0	1.1	3.40		0.08	0.4			
Wollastonit	38.1	37.9	6.9	3.6	3.4	-	-	2.6	0.5			
Refráflux	48.0	4.0	44.0	1.0	1.0	-	-	0.1	0.2			sinťovaná
Slagmag 90	3.0	0.7	-	88.0	7.8	-	-	-	-			
Hliníkové stěry	-	6.7	67.5	4.1	1.0	0.02	0.07	0.7	0.2	5.6		Al <sub>kov</sub> - 5 %
Almagen	12.0	5.0	55.0	10.0	-	-	-	-	-			Al <sub>kov</sub> - 10 %
Alkaten	12.0	5.0	65.0	-	-	-	-	-	-			Al <sub>kov</sub> - 10 %
CORUNDUM Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	cca 2	max. 5.5	73 - 80	max. 14	cca 1	0.5 - 2.5				cca 1	max. 2	
CORUNDUM AK	cca 2.5	max. 1.5	min. 75	max. 16	cca 1					cca 1	max. 2	
CORUNDUM AK	30 - 38	max. 5	50 - 62	3 - 6	cca 1	max. 1.5					max. 2	
CORUNDUM R	16 - 26	max. 5	50 - 62	8 - 13	cca 1	max. 1.2					max. 2	
CORUNDUM SP	10	10	62 - 65	10	max. 2	max. 1					max. 2	

Strusky se přepravují a skladují stejně jako vápno ve vzduchotěsně uzavřených pytlích. Nejvíce je používána struska syntetická k odsířování oceli. Struska je vhozena do pánve před odpichem. Poté se začne s odpichem a zároveň i s dmýcháním argonu. Při dokončení odpichu je většinou už roztavena. Oxid hlinitý vzniklý při primární dezoxidaci se ve strusce rozpouští, snižuje se jeho aktivita a tím se současně snižuje aktivita kyslíku u kovu v pánvi. U taveb

v kyselých pecích je za použití syntetické strusky aktivita kyslíku znatelně nižší než u taveb bez jejich použití. Dmýcháním argonu zvyšujeme mezifázové rozhraní struska - kov, které vede k účinnějšímu odsíření. [3] Při dmýchání argonu spodem dochází k interakci bublin argonu na rozhraní struska – kov a k emulgaci strusky. Emulgace strusky způsobí zdánlivé zmenšení objemu strusky a uvolnění hladiny k reakci kovu s plynem. Schéma emulgace si můžeme prohlédnout na obr. 7. Aby docházelo k emulgaci strusky je zapotřebí dosažení správné rychlosti a směru proudění kovu. Minimální úhel  $\alpha$  je dán mezi fázovým a povrchovým napětím. Proto je chemické složení strusek tak důležité. Proces odplynění probíhá zejména na hladině kovu a v její blízkosti. [10]



Základní předpoklady pro dosažení nízkých obsahů síry v tekuté oceli vyplývají z termodynamických a kinetických podmínek průběhu reakce odsíření. Pokud vycházíme z iontové teorie, můžeme reakci odsíření vyjádřit pomocí iontové rovnice: [11]



Z rovnice je zřejmé, že při přechodu síry z kovu do strusky dochází zároveň přechodu kyslíku ze strusky do kovu. Z vyjádření rovnovážné konstanty  $K_s$  lze úpravou vyjádřit vztah pro výpočet hmotnostního obsahu síry v kovu. [11]

$$[\%S] = \frac{f_0 \cdot [\%O] \cdot a_{(S^{2-})}}{K_s \cdot a_{(O^{2-})} \cdot f_S} \quad (4)$$

Ze vztahu vyplývá, že pro dosažení nízkého obsahu síry v kovu bude ideální: [11]

- vysoké hodnoty aktivity volných kyslíkových aniontů ve strusce, tzn. vysoké zásaditosti strusky a vysokým podílem zásaditých a nízkým podílem kyselých oxidů,
- nízké aktivity kyslíku  $a_0$  v oceli, tzn. nízkého obsahu rozpuštěného kyslíku a nízké hodnoty aktivního koeficientu  $f_0$ ,

Další faktory ovlivňující negativně stupeň odsíření je přítomnost lehce redukováných oxidů v rafinační strusce. Jejich doporučená hodnota je pod 3 hm. %. Naopak vyšší teplota napomáhá k snížení viskozity a zvýšení

součinitele difuze síry a snížení povrchového napětí, což má za následek rychlejší přiblížení reakce k rovnovážnému stavu. [11]

V dnešní době je zaváděna struska do pánve pomocí injektáže, ke které se používají také slitiny s vápníkem. Cílem injektáže je docílit obsahu síry pod 0,003%, zvýšit tekutost, čistotu oceli a modifikovat vměstky. Způsoby injektáží budou popsány v dalších kapitolách. [3]

### 2.3 Injektáž prachových přísad tryskou

Jednou z dalších prvků sekundární metalurgie je injektáž prachových přísad tryskou. Tato zařízení jsou určena především k odsíření oceli. Touto metodou se především do oceli vhání syntetické strusky, mleté feroslitiny obsahující vápník, nahličovála nebo jen feroslitiny. [3,5] Pochod využívající tuto metodu je např. SL (Scandinavian Lancers). [3] Smysl tohoto pochodu tkví v odsířování oceli a modifikaci vměstků prachovými přísadami vháněné do pánve tryskou. Plyn s prachovými materiály je vháněn tryskou s 3 až 6 vývody pod úhlem 120° ke dnu pánve a asi 30 cm od jejího dna. K odsíření oceli je použito prachové vápno ve směsi CaSi popřípadě CaC<sub>2</sub>. Spotřeba argonu je 0,6 až 1,2 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>, přičemž spotřeba vápna je 8 až 15 kg.t<sup>-1</sup>. Pokles teploty činí 3 až 5 °C. min<sup>-1</sup>. Zrnitost vápna by měla být do 0,6 mm a zrnitost CaSi do 2 mm. Účinnost tohoto pochodu je někde mezi 80 až 90%. [1] V následující tabulce je zobrazen příklad procesu SL.

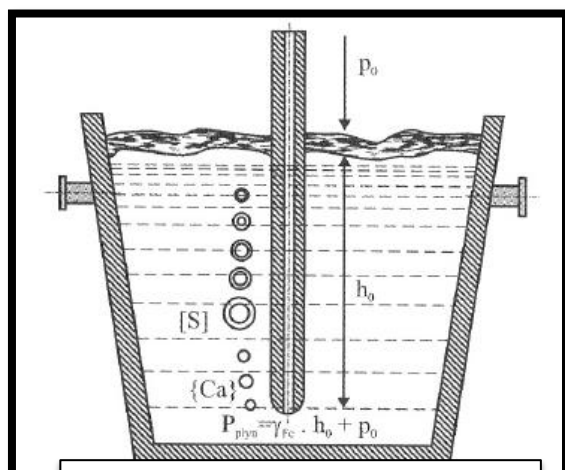
Tab. 4 Příklad procesu SL [12]

Příklad SL - Scandinavian Lancers process							
Sample	Složení, hm. %						Teplota (°C)
	C	Mn	Si	P	S	Al	
Surové železo	4,55	0,51	0,77	0,06	0,017		1338
LD konvertor	0,05	0,19	0	0,005	0,013		1686
Pánev po odpichu	0,03	0,12	0	0,005	0,013		1657
Pánev po 2 min. dmýchání	0,04	0,23	0,03	0,005	0,007	0,167	1608
Pánev po přidání 300 kg vápna	0,03	0,23	0,03	0,007	0,003	0,091	1608
Pánev po přidání 600 kg vápna	0,03	0,23	0,04	0,007	0,002	0,062	1581
Finální složení	0,09	0,23	0,04	0,007	0,003	0,036	1578

V tab. 4 vidíme, že bylo dosaženo přidáním vápna velmi nízkého obsahu síry. Podařilo se snížit její obsah z 0,013 až na hodnotu 0,003 hm. %. Naopak obsah uhlíku mírně vzrostl. Vápno, jak je patrné z údajů v tab. 3, nemělo téměř žádný vliv na obsahy Si, P a Mn. Z hodnot uvedených v tab. 3 je tedy zřejmé, že pochod LS se používá zejména k odsíření. [12] Další metody založené na dmýchání tryskou je metoda TN (Thüssen Niederrhein) dmýchající do taveniny strusku složenou z CaO a tavidla, a v neposlední řadě pochod IP (Injection Process). Hlavní částí v těchto zařízeních pro injektáž jsou keramické trysky umožňující nám dmýchat potřebné množství prášku pomocí nosného plynu. [3]

#### Princip injektáže tryskou

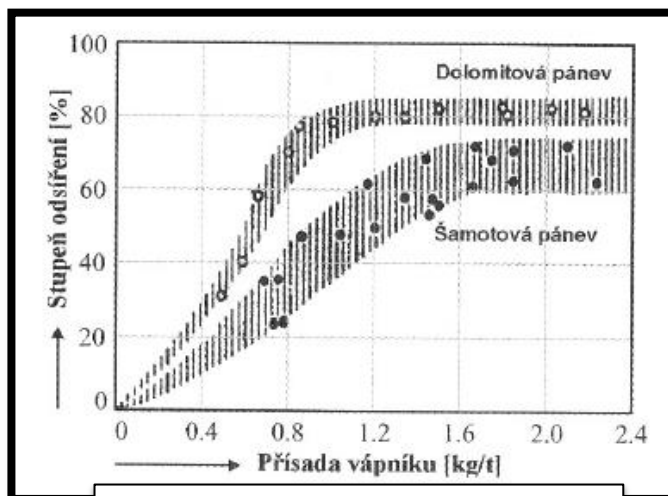
Při dmýchání vápníku případně feroslitin obsahující vápník ke dnu pánve dochází pomocí zvýšeného metalostatického tlaku ke zvýšení teploty varu vápníku. Vápno se začne odpařovat a vznikají bubliny Ca. S průchodem bublin k povrchu



Obr. 8 Schématické znázornění odsíření prostřednictvím bublin Ca [3]

se vlivem snižujícího tlaku bubliny roztahují a zároveň jejich povrchy reagují se sírou a mění se na sulfid vápenatý a zmenšují se. Změna objemu bublin je znázorněna na obr. 8. Dosažení vysokého stupně odsíření pomáhá také skutečnost, že v okolí bublin Ca je radikálně snížena aktivita kyslíku. Důležité je, aby na hladině kovu (lázně) byla vrstva strusky. Její absence by způsobila oxidaci hladiny kovu a tím pádem zvýšení oxidu železnatého ve strusce, které by vedly k nižšímu stupni odsíření. Stejného odsíření jako při dmýchání prášku tryskou

můžeme dosáhnout umístěním prášku na dno pánve ještě před odpichem, urychlí se tak rozpouštění strusky a při dmýchání argonu i promíchání oceli. [3] Vliv na účinnost odsíření má také vyzdívka pánve. Vyšší účinnosti se dosahuje v pánvích zásaditých než v pánvích vyzděné šamotem. Stupeň odsíření si můžete prohlédnout na obr. 9, kde je vyobrazen stupeň odsíření v závislosti na druhu vyzdívky pánve a množství vápníku.



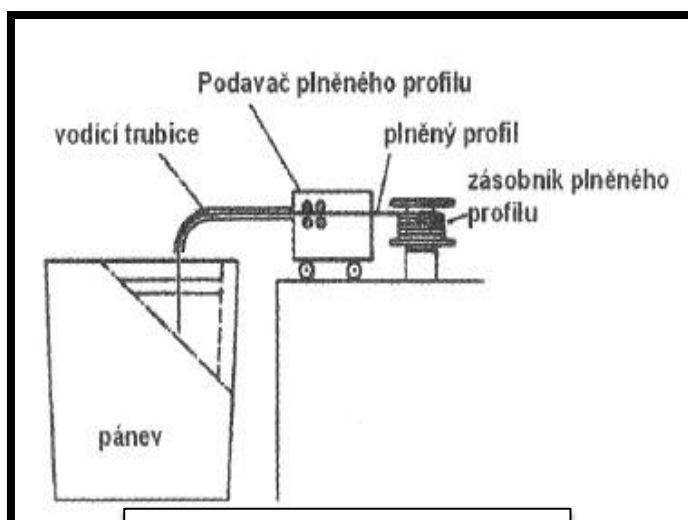
Obr. 9 Odsíření oceli v pánvích pro různé vyzdívky v závislosti na spotřebě Ca [3]

Injektáží vápníkem dosahujeme také k modifikaci vměstků na typ Ib. Během injektáže, stejně jako tomu bylo u použití syntetických strusek, dochází k zvyšování obsahu některých plynů, jako je vodík a dusík způsobené vysokou odpichovou teplotou, jelikož při dmýchání podobně jak u pochodu AP dochází k značnému snížení teploty závislé na velikosti tavby. [5]

## 2.4 Injektáž pomocí plněného profilu

Dmýchání některých přísad do lázně není lehkým úkolem, zvláště mají-li přísady některé z následujících vlastností: [13]

- nízkou teplotu tavení a varu,
- nízkou měrnou hmotnost,
- nízkou rozpustnost,
- vysokou afinitu ke kyslíku,
- vysoký tlak par v tavenině,
- toxické vlastnosti nebo tvorbu prachu a par.



Obr. 10 Schéma zařízení injektáže plněného profilu [3]

Výsledkem výše uvedených vlastností přísad zpravidla způsobuje tvorbu oxidů (snížení čistoty taveniny), kolísavý obsah v tavenině, nehomogenní rozdělení a v neposlední řadě znečištění ovzduší, a tím pádem ohrožení zdraví. Při zavádění těchto prachových přísad do taveniny pomocí plněného drátu se většina uvedených nevýhod odstraní. [13] Na obr. 10 je vyobrazeno zařízení injektáže plněného profilu.

Plněným profilem rozumíme trubičku o průměru od 6 do 18 mm z tenkého ocelového plechu. Její průměr volíme podle hmotnosti tavby. Profil je odvíjen z cívky dále přes podavač a vodící trubici přímo do tavby. [3] Vysoký význam pro dosažení vysoké účinnosti má i volba místa pro zavádění profilu. Snížení výtěžku po špatném zavedení profilu může být až 50%. [13] Rychlost odvíjení by měla být taková, aby docházelo k rozpuštění trubičky u dna pánve, aby se náplň rozpouštěla co nejnižší. Při příliš rychlém odvíjení se trubička láme o dno pánve, což jednak zkracuje životnost vyzdívky, a dále pak vyplouvá trubička zpět k povrchu do strusky. Pomalé odvíjení má za následek rozpuštění trubičky blíže u hladiny tavby a snižuje se tak účinnost některých přísad. Použití plněných profilů (plněné CaSi) je zejména používáno k modifikaci vměstků na typ Ib. [3] Využití vápníku činí až 50%. Při injektáži CaSi se zvyšuje obsah dusíku v oceli o 0 až 2 ppm, přičemž při dmýchání bylo zaznamenáno zvýšení až o 20 ppm. [13] Totožná technologie se využívá k modifikaci litin hořčíkem. [3] Také teplotní ztráty za použití plněného profilu s CaSi jsou velmi malé (asi 7 °C) na rozdíl od vhánění prachových přísad tryskou, kde se jedná až o 50 °C. [13] Reprodukovatelnost a přesnost legování oceli je zřejmá z následující tab. 5:

Tab. 5 Reprodukovatelnost a přesnost legování [13]

Prvek	Analýza [%]	Dosažené výsledky [%]	
		bez injektáže	s injektáží
C	0,12 až 0,14	0,01	0,007
Mn	1,33 až 1,50	0,057	0,038
Si	0,35 až 0,45	0,027	0,018
Nb	0,030 až 0,040	0,004	0,003

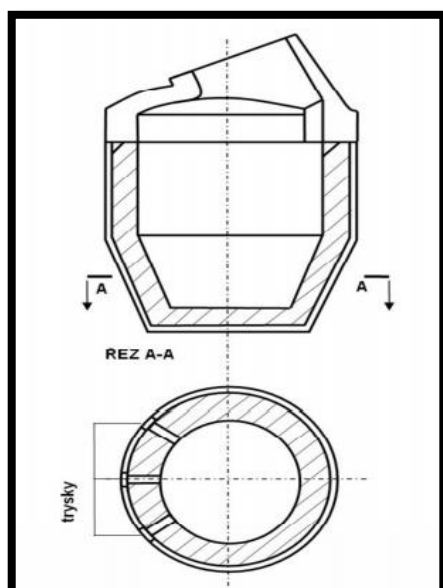
Analýza nám udává obsahy prvků v oceli před zpracováním. Rozdíly mezi obsahy při použití procesu injektáže a bez jeho použití jsou zřejmé z tab. 5. Obsahy C, Mn a Si jsou téměř poloviční při použití injektáže, než bez ní. [13]

Použití profilů dále můžeme použít k nauhličování, legování S, B i jinými prvky. Taktéž pro injektáž hliníku používáme hliníkový drát, kterým snadno dosahujeme velmi úzkého rozmezí výsledného obsahu hliníku. Pánve používané pro injektáže plněnými profily jsou upraveny na homogenizační dmýchání inertního plynu. Injektáži profilu s vápníkem předchází desoxidace oceli hliníkem. V průběhu celé injektáže je dmýchán inertní plyn. Po zpracování je aktivita kyslíku na hodnotě až 2 ppm. Nejhojněji používaný profil je s náplní silikokalcia k modifikaci sulfidů na typ Ib. Zvlášť i tady u těchto profilů je důležité, aby rychlost odvíjení byla správná a trubička se rozpouštěla u dna pánve. Silikokalcium vyplouvá ode dna nádoby a odpařuje se. U dna nádoby je vlivem metalostatického tlaku snížena intenzita odpařování vápníku. Páry vápníku vyplouvající způsobují bouřlivý var a při styku se vzduchem hoří. Proto se tavby používající k modifikaci vápník plní jen do 70% pánve a nechává se volný prostor od horního okraje pánve. [3]

Plněný drát se hojně používá pro legování oceli olovem a dalšími toxickými prvky. Použití jiných feroslitin je využíváno k úpravě chemického složení oceli, k legování prvků s vysokou afinitou ke kyslíku či korekci obsahu uhlíku. [13] Při korekci chemického složení se do tavby vedle injektáže dmýchá argon. Dosahuje se tak veliké přesnosti obsahu legovaných prvků. Jak už bylo výše uvedeno v kapitole dmýchání inertními plyny, i zde dochází ke snižování teploty tavby během dmýchání. Při vysoké odpichové teplotě se zase snižuje životnost vyzdívky a zvyšuje se i naplynění taveniny, zejména zvýšení obsahu vodíku. A proto při vysokých odpichových teplotách zpracování obvykle netrvá déle než 5 minut. [3]

## 2.5 Pochod AOD

AOD proces se používá především při výrobě nerezové oceli a další vysoce jakostní slitiny s oxidovatelnými prvky: např. chromu a hliníku. Po počáteční tavení je kov převeden do AOD zařízení, kde probíhá rafinace ve třech krocích:



Obr. 11 Schéma AOD konvertoru [3]

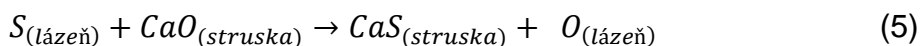
oduhličení, redukce a odsíření. AOD byl vynalezen v roce 1954 Linde (který stal se známý jako Praxair v roce 1992). [14]

Pochod AOD v zahraničí nazývaný jako Argon oxygen Dearburisation pracuje v seskupení s EOP nebo s kyslíkovým konvertorem. Konstrukce konvertoru je znázorněna na obr. 11. Pochod se používá pro oduhličení vysokolegovaných korozivzdorných ocelí k dosažení nízkých obsahů uhlíku i nižších než 0,03% při využití chromu ze vsázky (až 95%) a vysokému stupni odsíření (až 95%). Při dmýchání kyslíku dochází k exotermickým reakcím, které slouží ke krytí tepelných ztrát, a proto není nutný dohřev. Princip pochodu spočívá ve společném dmýchání kyslíku a argonu do kovu, přičemž dochází ke snižování parciálního tlaku oxidu uhelnatého. Snižování

parciálního tlaku oxidu uhelnatého v plynné fázi, která je v rovnováze s taveninou, vyvolá snížení koncentrace uhlíku v oceli. [3]

Studenou vsázku nejprve roztavíme v elektrické obloukové peci. Tato lázeň obsahuje po roztavení cca 1% uhlíku, na základě jeho množství se určí odpichová teplota. Tato tavba se poté přenesse pomocí transportní pánve do konvertoru s vyzdívkou z dolomitových stativ. [3]

Průběh tavby v AOD by se dal rozdělit na dvě části: oxidační a redukční údobí. Z počátku je dmýchán kyslík s argonem v poměru 3:1 nebo někdy samotný kyslík. To trvá zhruba 30 až 40 minut. Při této fázi se lázeň ohřívá vlivem exotermických reakcí. [3] Pokud by teplota přesáhla hranici 1 650 °C, přidává se na její snížení do tavby ocelový odpad nebo feroslitiny. Snižováním obsahu uhlíku v tavenině snižujeme i obsah kyslíku v dmýchané směsi a zároveň zvyšujeme obsah dmýchaného argonu. Až se dostaneme do fáze, kdy se dmýchá čistý argon a uhlík dezoxiduje v tavenině přítomné oxidy chromu. Výsledný obsah uhlíku v oceli odvodíme z obsahu oxidu uhelnatého odcházejícího z konvertoru s ostatními plyny. Během redukčního údobí, kdy už je do lázně dmýchán jen argon, se přidává na strusku ferosilicium nebo silikochrom. To umožní snížení výsledného obsahu kyslíku a síry. Odsíření je dosaženo vysokou koncentrací vápna ve strusce a nízkou aktivitou kyslíku v lázni viz. následující vztah (5).



Tak jak přidání vápna dochází k redukci síry v lázni, tak přidání hliníku či křemíku dochází k redukci kyslíku. [14] Při dmýchání argonem se také snadno provede dolegování a dosáhne úzkého intervalu výsledného chemického složení. Oceli legovaných dusíkem je možno provádět dmýchání dusíkem a tím je i zároveň dolegovávat. Ve srovnání s ocelí, která je vyrobena v EOP, mají oceli při pochodu AOD nízký obsah vodíku, kyslíku, síry a vysokou čistotu, což se projeví i na výsledné jakosti odlitků. Výhodou tohoto pochodu je hlavně to, že oduhličení odplynění i ohřev probíhá v jednom relativně jednoduchém zařízení bez zapotřebí vakuové stanice. [3] Už po několik desetiletí se pro vyzdívky konvertorů AOD používá dolomitové obložení a poskytuje nám vynikající výsledky při výrobě nerezové oceli. Dolomitové a dolomit-magnesitové cihly jsou vysoce ceněné kvůli jejich vlivu při výrobě čisté oceli a odolnosti vůči SiO<sub>2</sub>, které je obsaženo ve strusce během redukční fáze. [15] Další modifikací pochodu AOD je zavedení vakuovaného konvertoru označovaného VAOD. Tímto pochodem bylo dosaženo navíc vyšší houževnatosti, snížila se přechodová teplota a zvýšily se lomovo-mechanické vlastnosti. [3]

## 2.6 Pochod CLU

Pochod CLU (podle závodu Creusot Loire ve Francii a Udelholmu ve Švédsku) je téměř identickým zařízením jako AOD. Používá se stejně, jako tomu bylo u AOD k oduhličení vysokolegovaných chromových a chromniklových ocelí. [3] Tento proces je jednou z nejvíce účinnějších rafinací při výrobě jednak nerezových ocelí, ale i feroslitin. [16] Vsázka je roztavena v EOP a pak hned přesunuta do konvertoru, kde probíhá vlastní rafinace. Oduhličení probíhá dmýcháním směsi kyslíku a vodní páry. [3] Pára jako další procesní plyn umožňuje vyrábět



všechny stupně nerezových ocelí s nízkou spotřebou argonu a vysokou produktivitou při nízkém opotřebením žáruvzdorné vyzdívky. [16] Z počátku stejně jako v AOD se dmýchá téměř čistý kyslík do té doby, než z počáteční hodnoty 1% uhlíku klesne jeho hodnota na 0,8%. Poté se začne přidávat vodní pára, která se při styku s kovovou lázní rozkládá na vodík a kyslík. Vodíkem dosahujeme snížení parciálního tlaku oxidu uhelnatého vedoucí k propalu chromu (vyžití chromu ze vsázky je až 98%), a také pomáhá k lepšímu oduhličení. Vodní pára nám lázeň chladí, a proto není už nutné použití ocelového odpadu. [3] Použitím jednoho kilogramu páry je nahrazeno 10 kg ocelového odpadu jako chladícího materiálu. [16] Teplota pak většinou nedosahuje teploty vyšší než 1 680 °C, po které se snižuje trvanlivost vyzdívky. Vodní párou se lázeň nasytí vodíkem, který v závěru snížíme dmýcháním čistého argonu. V redukčním období lze provést, jako tomu bylo o AOD, stejné dokončovací operace jako jsou odsíření lázně a dolegování. Dmýcháním argonu lze dosáhnout teplotní homogenity a velice přesné odpichové teploty. Výhody tohoto procesu jsou zejména vyšší životnost vyzdívky v konvertoru a nižší náklady na plynné médium. [3]

### 3 SM PŘI ATMOSFERICKÉM TLAKU S MOŽNOSTÍ OHŘEVU TAVENINY

#### 3.1 Pánvová pec

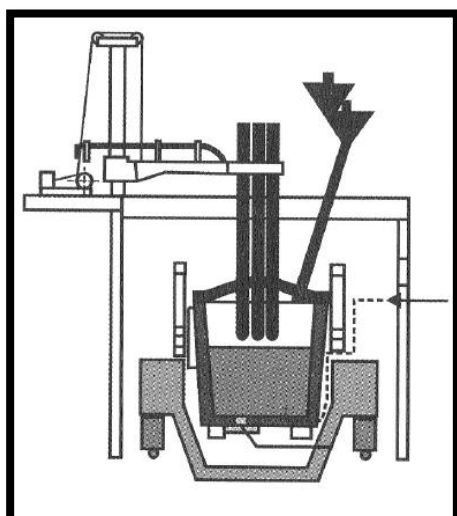
Pánvová pec LF (Ladle Furnace) je jedním z dalších hojně používaných prvků sekundární metalurgie. [3] Její vznik sahá až do šedesátých let minulého století. Od té doby je nepostradatelnou součástí mnoha oceláren, v roce 2004 byla pořízena i do ocelárny Poldi Hütte s.r.o. v Kladně. [17] Schéma elektrické obloukové třífázové pece je vyobrazeno na obr. 12. Kde licí pánev je umístěna na pojízdném voze a zajíždí pod víko, skrze víko jsou do pánve zavedené grafitové elektrody, které slouží k ohřevu kovu v pánvi a hned vedle nich je zařízení na přidávání legur. Ve spodu pánve je pak porézní tvárnice, kterou je do pánve dmýchán inertní plyn. [3]

#### Předpoklady pro zavedení pánvové pece:

- zásaditá vyzdívka pánve,
- šoupátkový uzávěr pánve,
- plně vytížená tavírna se stálým odběrem kovu,
- minimální váha odlévaného odlitku z pánve s šoupátkovým uzávěrem 0,5 t až 1 t,
- změna technologie na obloukové pece a organizace práce v tavárně: elektrická oblouková pec se mění na agregát, jehož cílem je rychlé roztavení vsázky, oxidace uhlíku a fosforu kyslíkem a po dosažení odpichové teploty odpich.

Bez výše uvedených opatření dojde ke zvýšení nákladů na výrobu tekutého kovu. [5]

Žárovzdornou vyzdívku pánvové pece tvoří dolomitické nebo žárovzdorné stativy. Dnešní době je stále více používaná pro pracovní část vyzdívky (část ve styku



Obr. 12 Schéma pánvové pece [3]

s kovem) monolitická vyzdívka tvořená litím žárobetonem. Při současné zvyšující se jakosti žárovzdorných stativ můžeme počítat s životností vyzdívky něco málo přes 100 taveb. [3] Licí pánev je uložena pánvovém voze, pomocí kterého s tekutou ocelí zajede pod víko pánvové pece. [18] Pánvové pece se většinou pořízují zrekonstruováním elektrické obloukové pece. Méně používané jsou pak stejnosměrné pánvové pece používající princip stejnosměrné elektrické obloukové pece. Některé zdroje popisují i způsoby indukčního ohřevu kovu v pánvi, které pracují na principu elektrické indukční pece kelímkové. [3]

**Ohřev kovu v pánvi**

Šoupátkový uzávěr se před odpichem zasypává zpravidla chromitým pískem. Po dopravení pánve pod víko a po spuštění víka se ocel v pánvi pokryje vrstvou syntetické strusky v potřebném množství. Pomocí elektrod ponořených ve strusce dochází k ohřevu strusky. Pro optimální výkon LF je nejlepší, když je seřízen transformátor tak, aby se rychlost ohřevu taveniny pohybovala na  $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  [2] ( $2\text{-}5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  [18]). V pánvi probíhá desoxidace kovu a tvorba nové, silně zásadité strusky. Nejčastějším způsobem zpracování kovu v pánvi je legování na požadované chemické složení a to až na spodní hranice dané normou. K odsíření kovu je použita zásaditá struska. S její použitím je možno dosáhnout obsahu síry pod 0,02%. [19] Legující přísady (FeMn, Al, Ni, CaO, CaF<sub>2</sub>, FeV, FeSi, FeCr, C) a to hlavně drahé feroslitiny jsou přidávány do tavby během procesu. Slouží k němu dávkovač umístěný nad pánví. [20] Během celého ohřevu se dmýchá do kovu inertní plyn (Ar, N) skrze porézní tvárnici umístěnou na dně pánve. Dmýcháním zajistíme teplotní a chemickou homogenitu. Při běhu celého procesu se odebírají vzorky a upravujeme se chemické složení, měří se teplota a může se provádět kontrola aktivity kyslíku v tavenině. Po celou dobu úpravy kovu trvající cca 30 min dochází k odsíření kovu (i pod 0,003% S), homogenizaci teploty a změně chemického složení. [3] Při začátku lití se musí odstranit zásyp společně s litým kovem, a to prolitím nad nádobou na zbytky tekutého kovu. Dochází tak ke značným ztrátám, a to 300 až 500 kg tekutého kovu (první ztráta). Poté při přejíždění pánve nad vtokovou soustavu dochází k druhé ztrátě 100 až 200 kg. Důvodem druhé ztráty je nutnost mít uzávěr při přejíždění částečně otevřen, aby nedošlo k tzv. zamrznutí výlevky. Poslední třetí ztráta 300 kg vzniká, když zůstává ocel v pánvi při čištění výlevky kyslíkem po odlití. [1] Při takovýchto ztrátách je vhodné použít pánvové pece pro odlitky těžší než 0,5 až 1 t. [2,3,18] Aby se zredukovaly ztráty, je možné použít třídeskový šoupátkový uzávěr, při kterém zcela odstraníme druhou ztrátu a minimalizujeme první ztrátu. Celkové ztráty se poté pohybují od 300 do 600 kg na tavbu oproti původním 700 až 1 000 kg. [2]

## 4 SM PŘI TLAKU NA ÚROVNI VAKUA

Další a bezpochyby velmi důležitou oblastí jsou procesy spojené s vakuem. Zařízení patřící do této skupiny pro technologii vakuového zpracování jsou vázány jednak na sortiment sléváren, ale především na vlastnosti vyráběných odlitků. Snížením tlaku na hodnotu vakua (0,1 – 0,4 kPa) nad taveninou lze dosáhnout snížení obsahu uhlíku, který se pak pohybuje řádově v jednotkách ppm, což je umožněno vysokou afinitou uhlíku ke kyslíku za sníženého tlaku. Těmito způsoby se vyrábějí oceli LC (low carbon steel) a ULC (Ultra low carbon steel). Ve vakuu je možné uhlíkem výrazně snížit množství oxidických vměstků i obsah kyslíku rozpuštěného v tavenině. V neposlední řadě použití vakua umožňuje dosáhnout nízkého obsahu vodíku a dusíku v tavenině. Snížení tlaku na hodnotu vakua se provádí v hermeticky uzavřených pánvích nebo konvertorech. [2] Během vakuového tavení se odplyňuje celá tavba najednou, konstrukce jsou upravené tak, aby celý tavící prostor byl vystaven podtlaku (vakuu). Dalším znakem těchto pochodů je, že vakuum působí během celého zpracování nebo z jeho velké části. Nedostatkem je pak hlavně vysoká teplotní ztráta, která se musí vyrovnat vysokým přehřátím nebo průběžným dohříváním. [21] I zde je u některých pochodů možné provádět průběžný ohřev taveniny. Mezi tyto pochody patří VOD, VAD, ASEA-KF a RH. Pro snižování obsahů síry se provádí odsiřování, sníží se tak i obsah dusíku i vodíku. Pro malé objemy tekutého kovu ve slévárnách lze doporučit pochod DETEM (objemy do 10 tun), pro vyšší hmotnosti pak pochody VD, popřípadě VOD. [2]

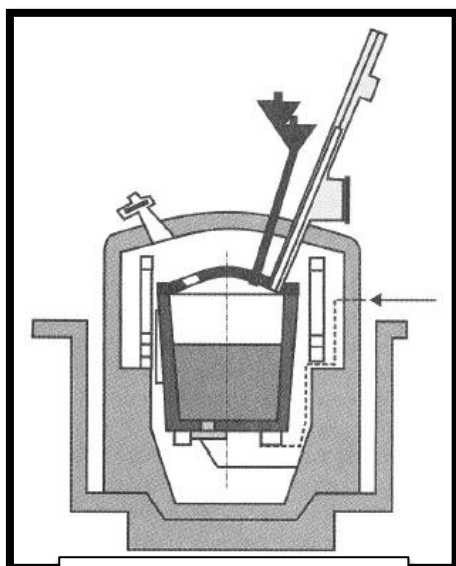
### 4.1 Pochod VD

Tento pochod sekundární metalurgie patří mezi nejstarší pochody využívající sníženého tlaku. Pochod VD (Vacuum Degassing) zaváží kov v pánvi do vakuového prostoru tzv. kesonu. Tento pochod je schematicky zobrazen na obr. 13. Jeho předností je hlavně provozní jednoduchost. [3]

Vakuování je používáno v ocelářském průmyslu k několika různým účelům, kterými jsou: [22]

- snížení obsahu vodíku,
- odkysličení,
- k výrobě oceli s nízkým obsahem uhlíku (pod 0,03%),
- k výrobě oceli o úzkém rozmezí chemického složení.

Zařízení je složeno ze dvou základních systémů, podtlakové komory a odsávacího systému. Podtlaková komora neboli keson je tvořen z pláště a hermeticky utěsněného víka. Pro umožnění sledování hladiny jsou ve víku umístěny pozorovací otvory a napojení na dávkovače feroslitin. Snížení tlaku se provádí pomocí odsávacího systému složeného z těchto částí: vývěva, chladicí a čistící zařízení, spojovací potrubí, pomocná zařízení a měřicí přístroje. Nejdůležitější částí jsou vývěvy, nejčastěji používané jsou paroproudé vývěvy. Vakuování je doprovázeno intenzivním varem, a tak se tlak musí snižovat pomalu. Během vakuování se ocel udržuje o tlaku 2-4 kPa (hluboké vakuum) nebo i nižším. [3]



Obr. 13 Schéma zařízení pro vakuování kovu [3]

Vakuování provádíme po dobu 10 až 15 minut. Ocel pro vakuování musí být přehřátá. Velikost přehřátí je určena především hmotností tavby, chemickým složením, dobou vakuování a množstvím legovacích přísad. Snížení tlaku vede ke zvýšení aktivity uhlíku ke kyslíku. Následkem poté v kovu probíhá uhlíková reakce mezi uhlíkem a kyslíkem rozpuštěných v tavenině a kyslíkem vázaných v oxidických vměstkách. Při tomto stavu dochází k hluboké desoxidaci kovu uhlíkem a zároveň snížení obsahu vodíku a dusíku. Dříve uvedené metody (injektáž prachových přísad, pánvová pec) jsou doprovázené zvýšením obsahu dusíku a hlavně vodíku. Proto se tyto metody LF, IP, AP často kombinují právě s pochodem VD. [3]

V důsledku vyšší dezoxidační schopnosti uhlíku za vysokých teplot redukuje i stabilnější oxidy v tavenině, které jsou v ní ve formě vměstků, což vede ke zvýšení celkové oxidické čistoty oceli [23]. Účinnost každé operace vakuování závisí na povrchu tekuté oceli, která je vystavena nízkému tlaku, což platí pro všechny procesy spojené s vakuováním, nejen pro VD. [22] Proto se intenzita pohybu roztavené oceli zvyšuje dmýcháním argonu, většinou prodyšnou tvárnici umístěnou ve dně pánve během celého procesu. Mechanismy odstranění vodíku a kyslíku z tekuté oceli jsou účinnější tím víc, čím je větší styková plocha mezi plynem dmýchaným do lázně a lázní. Během dmýchání argonu dosahujeme jak tepelné a chemické homogenity, tak také zlepšení podmínek pro přechod nekovových vměstků do strusky. Intenzita pohybu oceli se dá zvýšit i použitím indukčního míchání. Po desoxidaci je možno ocel také dolegovat. Dolegování provádíme pomocí přidáním přísad uležených v zásobnících nad kesonem přes speciální tlakotěsný zvon. Tímto pochodem dosahujeme nízkých hodnot obsahů plynů, síry a vysoký stupeň mikročistoty. [3] Vakuování oceli je důležité hlavně v automobilovém, leteckém a železničním průmyslu. Čím více je kov tvárný, je jednodušší ho formovat do složitějších tvarů. [24]

## 4.2 Pochod VOD

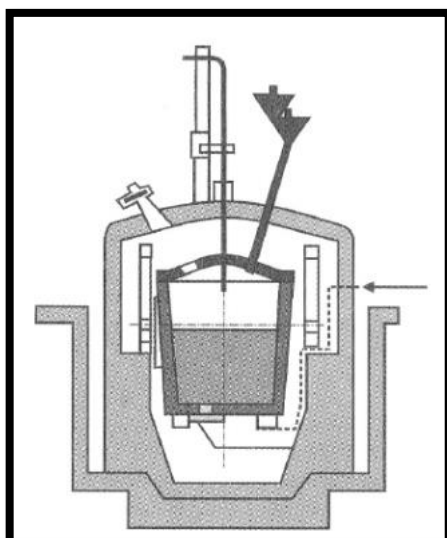
Pochod VOD se používá zejména k oduhličení oceli. Tento proces byl vyvinut v Německu v Thyssenu mezi lety 1962 a 1967. [25] Jeho hlavní předností je minimální spotřeba argonu ( $1 \text{ m}^3 / \text{t}$  oceli).

Obecně lze říci, že hlavní přínosy VOD jsou: [25]

- ekonomická výroba ocelí s nízkými obsahy C a N ( $C + N < 150 \text{ ppm}$ ),
- možnost oduhličení oceli o jakémkoli obsahu uhlíku,
- nízké ztráty chromu při jeho oxidaci (nízký parciální tlak CO),

- vysoká míra využití chromu ze vsázky,
- nízké konečné obsahy rozpuštěných plynů v tavenině,
- zvýšená čistota oceli,
- nastavení přesných hodnot chemického složení oceli.

Pochod VOD (Vacuum Oxygen Decarburisation) patří mezi pochody sekundární metalurgie využívající při vakuování ohřev kovu v pánvi. Tento pochod



Obr. 14 Schéma zařízení VOD [3]

označován také jako „Vakuvit“ se instaloval v roce 1975 ve Vítkovických železárnách. Princip tohoto pochodu tkví v oduhličení tekuté oceli kyslíkem v pánvi zavezeného do kesonu. Jedná se o téměř identický proces jako VD s přidanou tryskou pro dmýchání kyslíku na hladinu kovu. Schéma je znázorněno na obr. 14. Vhodnou ocelí pro tento proces je vysokolegovaná chromová a chromoniklová ocel s nízkým obsahem uhlíku. Tento pochod se využívá ve spojení s EOP. [3] Odpichové teploty u těchto ocelí se pohybují mezi 1 500 °C až 1 650 °C [26], což je umožněno díky exotermickým reakcím během úpravy kovu. Obsahy uhlíku se pohybují v rozpětí 0,2 až 0,6% (výjimkou může být i obsah až 0,8%

[3]), dále obsahy Si od 0,02 do 0,4, Mn od 0,2 do 1,0 a Cr od 10,0 do 26,0. První fáze oxidace trvá cca 30 až 60 minut. [25]. Při oxidaci udržujeme tlak v kesonu 0,1 až 0,2 kPa [26], literatura [3] uvádí 0,2 až 0,4 kPa (hluboké vakuum). Přísady, jako jsou vápna a některé slitiny (Fe-Si a Fe-Cr), jsou přidávány v této prvotní fázi. Průtok kyslíku se pohybuje mezi hodnotami 30 a 60 Nm<sup>3</sup>/min. Dmýcháním kyslíku ze začátku oxiduje pouze křemík, poté co jeho hodnota klesne na hodnotu cca 0,2% začíná se oxidovat také uhlík. Tuto fázi nazýváme odplynění a trvá přibližně 10 minut, kdy je tlak v kesonu zredukován na hodnotu mezi 100 až 500 Pa. [26]

Dosažením tzv. kritického obsahu uhlíku (0,04 - 0,1%) klesá rapidně oduhličovací rychlost a přestává se s dmýcháním kyslíku. Tato kritická hodnota je závislá na několika faktorech, jako jsou teplota, rychlost dmýchání kyslíku a intenzita promíchávání taveniny a tlaku v kesonu. Dodatečným snížením tlaku pod 100 Pa za stálého dmýchání argonu dochází ve strusce k dalším reakcím kyslíku a uhlíku způsobené vysokou aktivitou kyslíku v lázni. Tato fáze trvá většinou 5 - 15 minut. Dosáhneme tím oduhličení po 0,01% a k desoxidaci oceli. Oxidací kyslíkem je dosaženo teplot až kolem 1 750 °C Uhlík během oxidace redukuje oxidy chromu, což zvyšuje čistotu oceli a využití chromu ze vsázky (vyšší než 95%). Oxidací se dá snížit obsahy vodíku a dusíku až o 70%. V redukčním období se provádí desoxidace, je také možno odsíření a dolegování. [3] Tato poslední fáze trvá zhruba 40 minut. Tlak ve vakuu se pohybuje od 100 do 500 Pa. Konečná teplota je pak v rozmezí mezi 1 640 °C a 1 750 °C. Spodní hranice průtoku argonu je 0,35 Nm<sup>3</sup>/min. [ 26]

V elektroocelárně ŽĐAS, a.s. bylo provedeno porovnání výroby lodního šroubu jen pomocí EOP a poté pomocí složeného pochodu EOP-LF-VOD. Materiál COR13-4 (GX5CrNi132) o chemickém složení viz. tab. 6, toto složení bylo stejné pro oba postupy.

Tab. 6 Chemické složení materiálu [27]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]
max. 0,07	max. 1,50	max. 1,00	max. 0,035	max. 0,025	12,00 až 13,50	3,50 až 5,00	max. 0,70

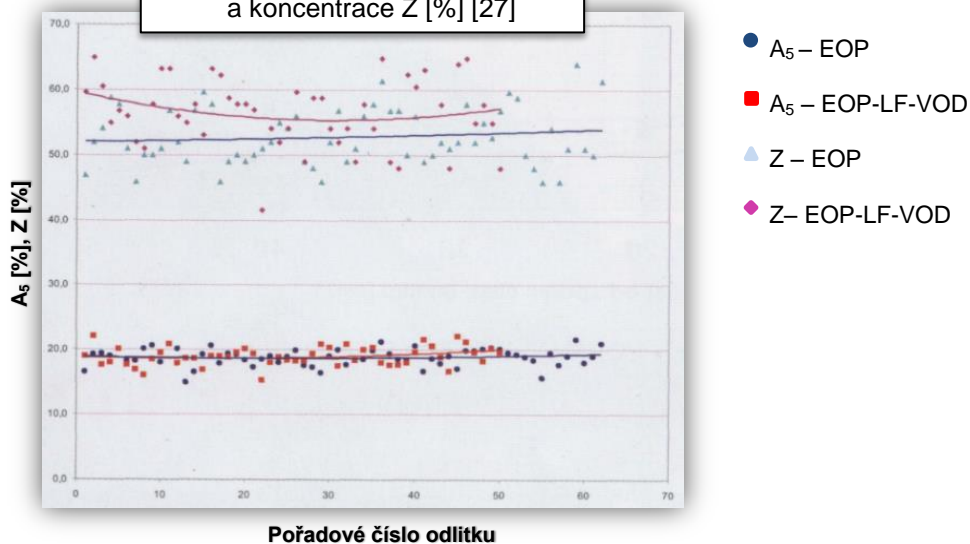
Tyto odlitky byly zušlechtěny na požadované hodnoty uvedené v tab. 7: [27]

Tab. 7 Požadované hodnoty zušlechtění [27]

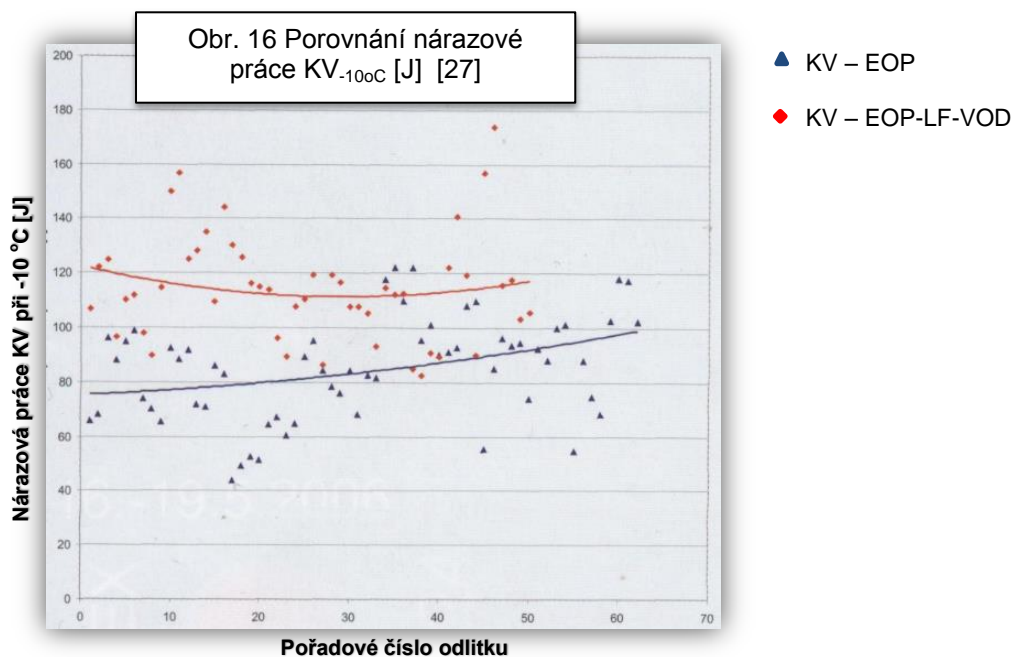
Požadované hodnoty zušlechtění	
Rp0,2 = min. 590 MPa	Z = min. 45%
Rm = min. 735 MPa	KV-10°C = min. 20 J
A = min. 15%	

U odlitků byly srovnány mechanické vlastnosti (obr. 15 a 16) dosažené u vakuovaných (způsob výroby EOP-LF-VOD) a nevakuovaných taveb (EOP). Dále byly porovnávány u obou způsobů objemy vad a množství dusíku a vodíku v tavných (obr. 17 až 19).

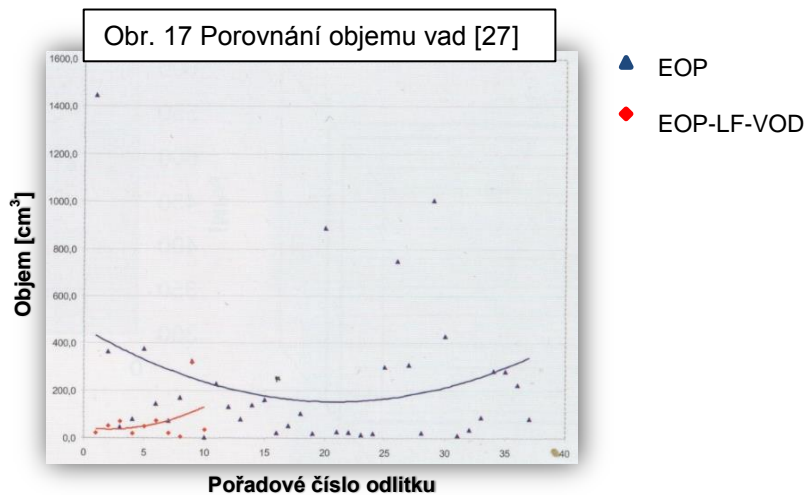
Obr. 15 Porovnání tažnosti A<sub>5</sub> [%] a koncentrace Z [%] [27]



Tažnost v obou případech zpracování se držela v úzkém rozmezí kolem 20 %. Naopak průměrná hodnota zúžení vzrostla při použití vakuování o 5 %. [27]



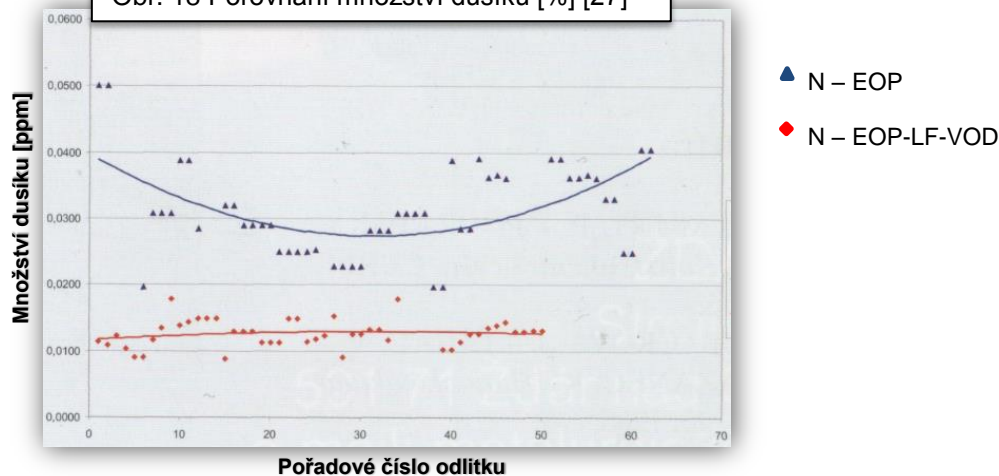
Hodnoty nárazové práce při zpracování jen v EOP se rozpínaly v širokém rozsahu od 40 J do 120. Použití postupu s vakuováním neklesla hodnota nárazové práce pod hodnotu 80 J a v některých případech dosahovala hodnot i 180 J. [27]



Sledované objemy vad při zpracování v EOP u některých odlitků byly téměř nulové, ale nastaly i případy kdy objem vad dosáhl hodnot větších než 1000 cm<sup>3</sup>. Při použití vakuování se všechny hodnoty pohybovaly mírně nad nulou, jen v jednom případě dosáhly hodnoty 300 cm<sup>3</sup>. [27]

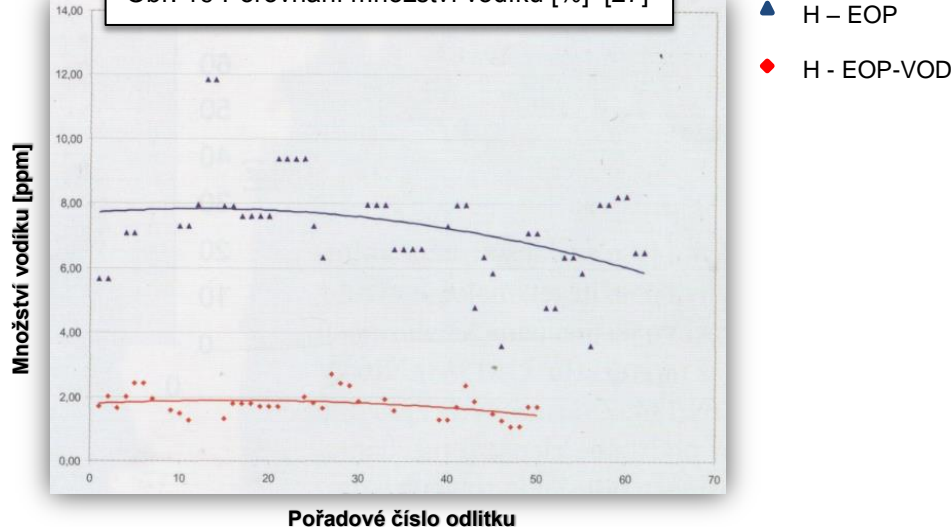


Obr. 18 Porovnání množství dusíku [%] [27]



Dosažené obsahy dusíku byly nejen menší při procesu vakuování, ale dosažené obsahy jsou v úzkém rozmezí (mezi hodnotami 0,01 a 0,02 ppm), přičemž při zpracování v EOP se obsahy dusíku rozkládají mezi hodnotami 0,02 až 0,05 ppm. [27]

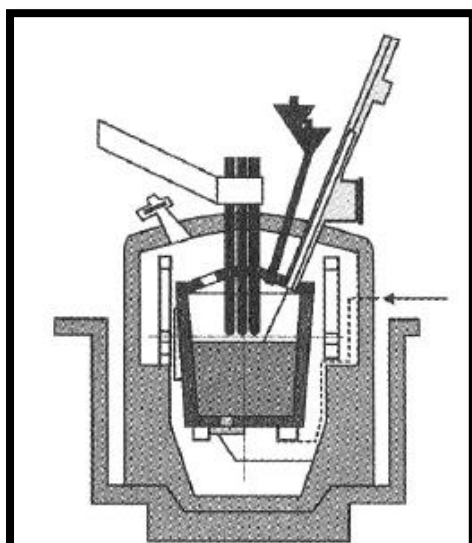
Obr. 19 Porovnání množství vodíku [%] [27]



Vakuování na obsahy vodíku má stejný vliv jako na dusík (obr. 18). Obsahy se pohybují ve velmi úzkém rozmezí a zároveň došlo ke snížení obsahů oproti zpracování v EOP v průměru o 70 %. [27]

### 4.3 Pochod VAD

Pochod VAD ( Vacuum Arc *Degassing*) nám umožní jednak vakuování oceli a zároveň ohřev lázně elektrickým obloukem. [3] V peci jsou použity tři grafitové elektrody o průměru 35cm napájené 15 megawattovým transformátorem pro kov o hmotnosti 60 tun. [28] Schéma zařízení je zobrazeno na obr. 20. Možnosti a technologie je velice podobná jako u pochodu VOD. Výroba oceli dosahuje touto metodou vysoké oxidické (pod 30 ppm) a sulfidické (pod 0,003%) čistoty

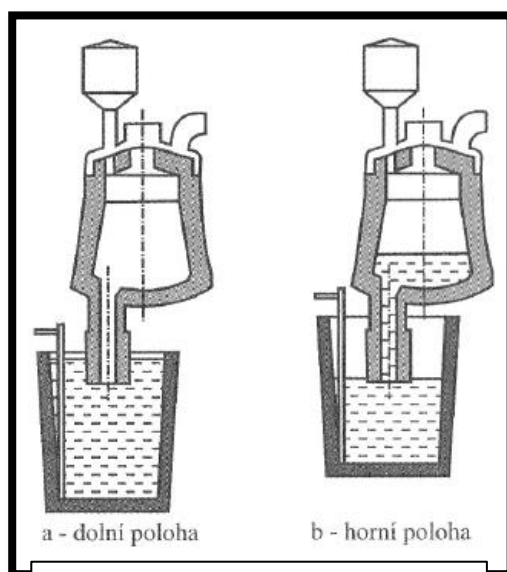


Obr. 20 Schéma zařízení VAD [3]

s možností velice přesného nastavení chemického složení a výsledné aktivity kyslíku. Vykazuje také dosažení nízkých hodnot při snížení obsahu vodíku (pod 2 ppm) i dusíku (pod 80 ppm) [28]. Díky ohřevu pomocí elektrického oblouku nás tento pochod postavuje do výhody oproti pochodu VOD. Krytí teplotních ztrát je podchyceno nejen exotermickými reakcemi, ale i ohřevem elektrickým obloukem, což nám dává možnost řídit velmi přesně odpichovou teplotu. [3]

#### 4.4 Vakuové odplynění zdvižným způsobem

Vakuové odplynění zdvižným způsobem, je označované podle místa vzniku DH (Dortmund – Hüttenunion). [3] Při vakuovém odplynění se používá následující postup. Odpichová pánev se umístí pod nasávací trubici ponorné vakuové komory. Poté dochází k odsátí vzduchu plynů z vakuové komory, což způsobí nasátí taveniny do komory, a to do takové výšky odpovídající rozdílu tlaků ve vnější atmosféře a komoře, což je asi 1 400 – 1 500 mm. [18] Část tekuté oceli vlivem vnějšího tlaku se dostane až do vakuové komory, kde probíhá už samotný proces odplynění. [3] Při jednom nasátí se do komory dostane 1/10 až 1/20 oceli z pánve. [18]



Obr. 21 Schéma zařízení DH [3]

Aby bylo dosaženo dokonalého odplynění, tento proces se opakuje čtyřikrát až pětkrát (oběhové číslo), přičemž celý proces pak trvá 15 až 20 minut. Na obr. 21 jsou vyobrazeny obě

polohy vakuové komory. Dalšími součástmi tohoto zařízení jsou vedle vakuové komory i paropropustné vývěvy, spojovací potrubí chladicí a čistící systém, pomocné mechanismy jako je zdvižný mechanismus, měřicí a regulační přístroje. Před vlastním vakuováním se komora vyhřívá pomocí elektrického odporového topení obvykle o příkonu 300 až 600 kW [1]. Teplota v komoře se poté udržuje na 1 550 °C. Aby nedocházelo k tuhnutí oceli hlavně v místech hrdla, udržujeme teplotu vyzdívky na co nejvyšší teplotě. Procesem DH je možné snížit obsahy plynů ale i uhlíku, taveninu teplotně homogenizovat, desoxidovat a dolegovat.

Stupeň odplynění závisí zejména na počtu zdvihů a setrvání taveniny v komoře. Obsah vodíku po  $n$  - zdvizích pak můžeme určit z rovnice (6): [1]

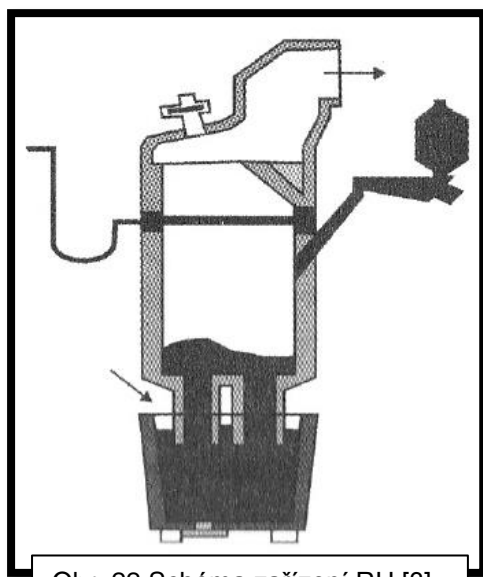
$$[H]_n = ([H]_o - [H]_r) \left(1 - K \frac{m}{M}\right)^n + [H]_r \quad (6)$$

Kde:

$[H]_n$	obsah vodíku po $n$ – zdvizích [%],
$[H]_o - [H]_r$	výchozí rovnovážný obsah vodíku o oceli a obsah vodíku vypočítaný ze Sievertova zákona [%],
$m$	množství oceli nasáté do komory při jednom zdvihu [kg],
$M$	hmotnost tavby [kg],
$N$	počet zdvihů [ - ],
$K = \frac{[H]_z - [H]_{z+1}}{[H]_z - [H]_r}$	podíl odstraněného vodíku při jednom zdvihu z teoreticky možného snížení obsahu vodíku [ - ].

Při dodávání legujících přísad se využívají zásobníky opatřené vibračními podavači, vážícím systémem a příslušnými uzavíracími mechanismy a skluzy. Od tohoto pochodu se v poslední době ustupuje. [1]

#### 4.5 Vakuové odplynění oběžným způsobem



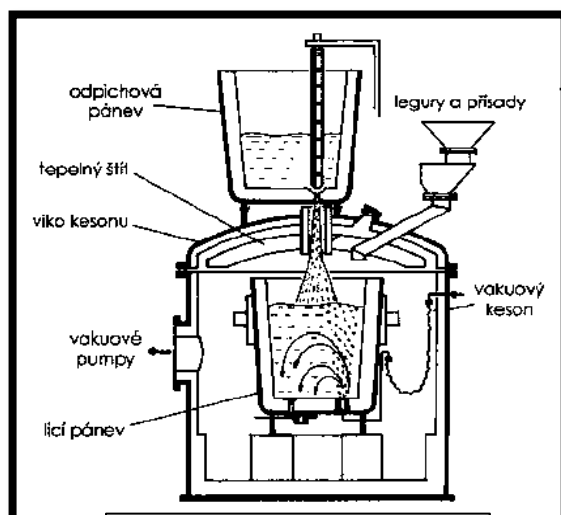
Obr. 22 Schéma zařízení RH [3]

Vakuování oběžným (cirkulačním) způsobem označováno RH (Rührstahl Heraeus) taveninu průběžně odplyňujeme ve vakuové komoře. Schéma je na obr. 22. Do sacího hrdla se dmýchá inertní plyn, který se zde smíchá s taveninou a do komory pak vstupuje jako směs. V komoře dojde k odplynění a k oduhličení. Přiváděný plyn udržuje taveninu v turbulentním stavu, který umožňuje uvolňování plynů a oduhličení z jednotlivých kapek a ze vzdmutého povrchu taveniny. Po odplynění je odváděna odplyněná ocel výstupní trubicí zpět do pánve. Tento proces probíhá nepřetržitě. Před ponořením sacího a výtokového hrdla je nutné, aby obě hrdla

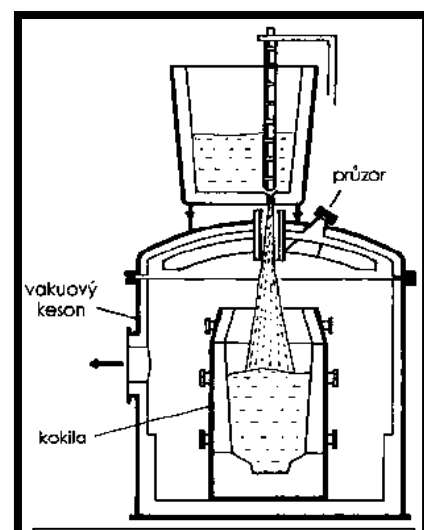
byla chráněná plechem, který zabrání vniknutí strusky do vakuové komory. Vakuová komora je vybavena několikastupňovými paroproudými vývěvami, které zajišťují odsávání. Pochod RH se používá k vakuování vysokých objemů kovů, a to jak v pánvi nebo pecích opatřené odnímatelným horním víkem. Oduhličují a odplyňují se zde především oceli nelegované případně nízkolegované. V menších ocelárnách s malou kapacitou se toto zařízení téměř nepoužívá. Modifikace metody RH dnes už na moderních zařízeních spočívá v přidání ohřevu pomocí elektrického odporového příhřevu ve vakuové komoře. Další modifikace pak umožňují také oxidační vakuování RH-O. [3]

#### 4.6 Vakuové odplynění oceli v proudu

Způsob vakuového odplyňování v proudu (obr. 23 a 24) je vhodný zejména při odlévání kovárenských ingotů, kde je v kesonu umístěna kokila nebo lící pánev. V momentě, kdy proud kovu dostane do vakuovaného prostoru, dostává kuželovitý tvar, který se skládá z obrovského množství kapek. Zvětšení plochy vakuovaného kovu umožňuje účinnější odplyňování za stálého průběhu povrchových reakcí. Ihned po vniknutí do vakua dochází k nukleaci bublin CO. Pravděpodobnost nukleace se zvyšuje s faktem, že ve vakuu se ferostatický tlak pohybuje kolem nulové hodnoty. Odlévá-li se vakouvaná ocel do pánve, je její stupeň odplynění zvýšen odplyněním přes hladinu a do bublin argonu. Při odlévání přímo do kokily je sekundární odplynění výrazně nižší, způsobené malou plochou kokily a chladnými stěnami kokily. Výhody tohoto pochodu je zabránění sekundární oxidace a naplynění při odlévání za normálního tlaku. Nevýhodou lití přímo do kokily je nutnost ponechání kokily v průběhu tuhnutí v kesonu. Lepší varianta je tedy lití z pánve do pánve a odlévání provádět mimo vlastní keson. I přesto je výrobnost tohoto postupu menší než u pochodů DH a RH. [1]



Obr. 23 Odplynění v proudu  
(pánev - pánev) [1]



Obr. 24 Odplynění v proudu  
(pánev - kokila) [1]

## 5 INTEGROVANÝ SYSTÉM SEKUNDÁRNÍ METALURGIE

Zařízení ISSM nám umožňuje komplexní mimopecní zpracování oceli na jednom místě. Vyloučí se tím značná část manipulací a ulehčí to současnému materiálovému toku v ocelárně. Toto zařízení u nás bylo pořízeno ve Vítkovických ocelárnách v roce 2007. Jedná se o zařízení, které využívá výhod některých pochodů popsané v této práci a využívá jejich spojení k dosažení lepších výsledků při rafinaci oceli. [29]

Hlavní technologické postupy ISSM (schéma zařízení ISSM je na obr. 26) jsou tyto: [29]

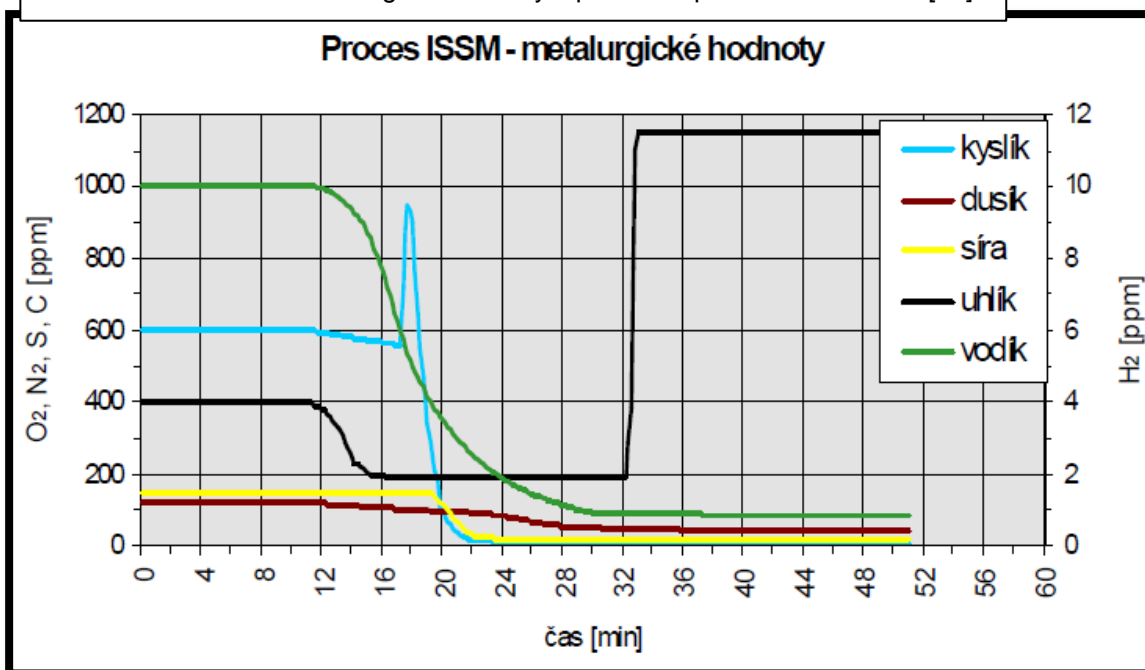
- VD+ tvorba strusky (tavby s nízkým obsahem legovaných prvků),
- VD+ chemický přihřev (přes Al případně C),
- Stažení strusky+ VD (požadavek na minimální křemík),
- VOD\*,
- LF\*\* + VD (oceli s vysokým obsahem přísad),
- LF\*\*+ VOD\*,
- VCD+ chemický přihřev.

VOD\* - (oduhlčování) plynule přechází z procesu ohřevu tak, že po oxidaci Al plynule přechází k oxidaci uhlíku

LF\*\* - k vyrovnání teplotních ztrát či legování

Možnosti, které nám zařízení ISSM umožňuje dosáhnou při rafinaci tekuté oceli, jsou zobrazeny na následujícím obr. 25)

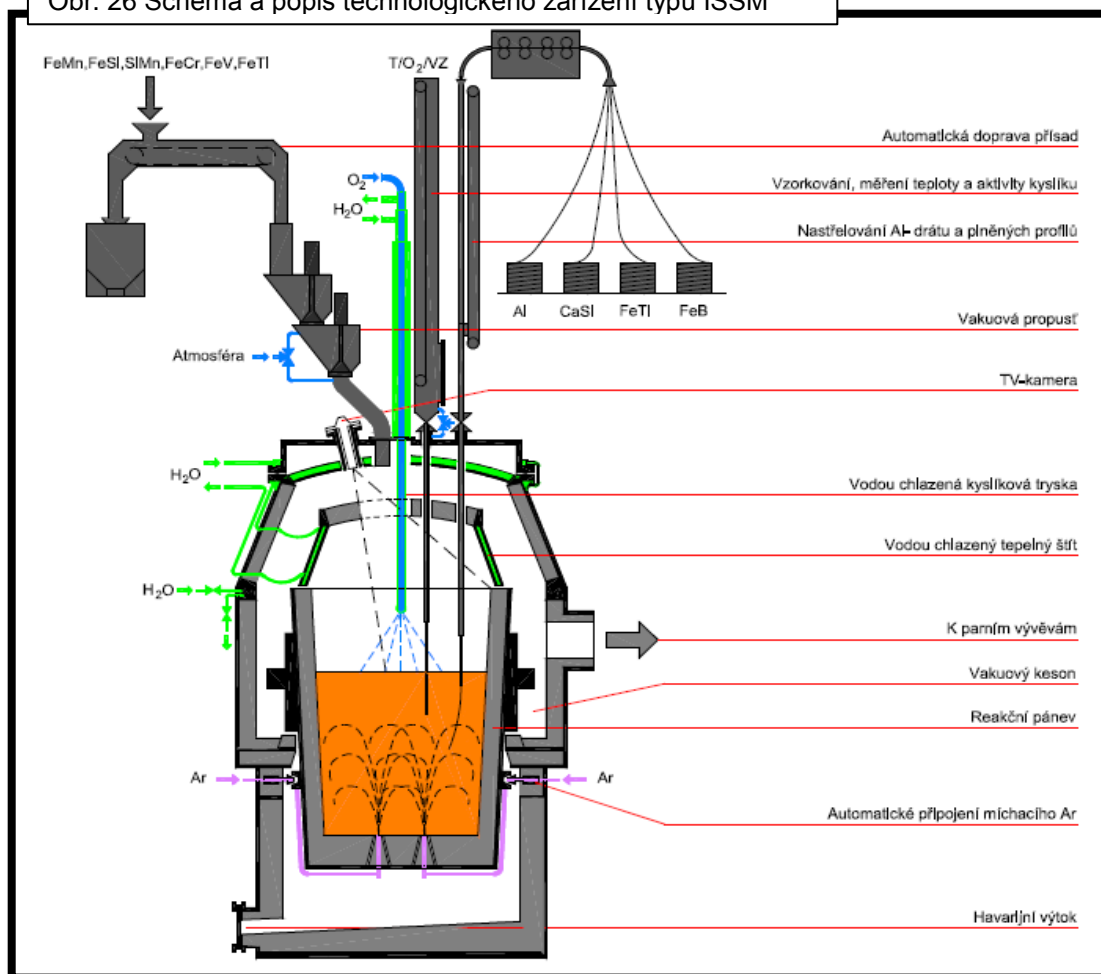
Obr. 25 Dosahované metalurgické hodnoty v průběhu zpracování na ISSM [29]



Stručný popis metalurgických efektů a hodnot z obr. 25: [29]

- oduhličení na požadovanou hodnotu, u výroby elektrotechnických ocelí není problém oduhličit pod 100 ppm,
- desoxidace uhlíkem procesem VCD, po této úpravě nezůstávají v oceli nekovová rezidua,
- odsíření pod 30 ppm za podmínky výchozího obsahu síry do 150 ppm,
- odsíření pod 50 ppm za podmínky výchozího obsahu síry od 150 ppm do 250 ppm,
- odsíření pod 80 ppm za podmínky výchozího obsahu síry od 250 ppm do 300 ppm,
- odplynění – snížení vodíku pod 1,5 ppm při počátečním obsahu až 12 ppm, snížení dusíku pod 50 ppm při počáteční hodnotě do 120 ppm, desoxidace pod 30 ppm z počáteční hodnoty kyslíku 1 000 ppm,
- současně s ocelí je zpracovávána struska, která se významně podílí na rafinačním účinku (odstranění síry a vměstků), ochraňuje ocel po zpracování před atmosférou,
- možnost
  - chemického přihřevu,
  - vysoké teplotní a chemické homogenizace,
  - Přesného dolegování.

Obr. 26 Schéma a popis technologického zařízení typu ISSM



## 6 ZÁVĚR

Velký důraz na použití některých prvků sekundární metalurgie se klade zejména v ocelárnách kde je zpracováváno velké množství jak nelegované, tak i vysoce legované oceli. Sekundární metalurgie je nejvíce využívána v provozech s velkým množstvím zpracovávané oceli a to zejména při výrobě ingotů. Zavedení SM je možné docílit značného snížení zpracovacích nákladů a proto i v odůvodněných případech k zavedení některých finančně náročných prvků. Jedná se zejména o procesy s možností vakuování. V menších a středních provozech je použití sekundární metalurgie závislé na sortimentu výrobků, jejich jakosti a na celkovou výrobnost slévárny. V těchto menších provozech jsou zpravidla realizovány jen technicky a ekonomicky méně náročné prvky SM, pochody jako jsou VAD, VOD, DH nebo RH jsou z finančního hlediska nereálné. Pro menší slévárny lze doporučit následující postupy, které jsou z ekonomického hlediska méně náročné: [3]

- dmýchání inertního plynu do pánve,
- použití syntetických strusek v pánvi,
- modifikace vměstků a mírná korekce chemického složení v pánvi.

Dmýchání inertního plynu (převážně argonu) do pánve dosahujeme teplotní a chemické Homogenity. Dmýcháním argonu se zlepšují podmínky pro přechod vměstků do strusky, což vede k lepší zabíhavosti. Teplotní homogenita a lepší zabíhavost vedou k nízkému výskytu povrchových vad, což vede ke snížení nákladů na následné obracování odlitků. Úprava stávajícího zařízení pro dmýchání inertního plynu není vůbec finančně náročná, jedná se jen o zasazení porézní tvárnice do dna pánve nebo použití upravené zátkové tyče. Použití strusek nebo i dmýchání prachových přísad spolu s dmýcháním argonu, vedou ke značnému snížení obsahu kyslíku a síry v oceli. Nízký obsah kyslíku snižuje výskyt vad, jako jsou bubliny a bodliny. Nízký obsah síry zvyšuje odolnost proti vzniku trhlin během tuhnutí. Použitím podavače plněných můžeme provést modifikaci vměstků na typ lb, což výrazně zvýší houževnatost oceli. Tyto výše uvedené operace zvyšují jakost oceli s minimálními pořizovacími náklady. [3] Ve velkých ocelárnách se při výrobě vysokolegovaných korozivzdorných ocelí hojně používají zařízení VOD, VAD nebo AOD. Dnes už se při výrobě oceli jednotlivé postupy kombinují, dobrým příkladem bylo zařízení ISSM, kde jediné zařízení obsahovalo hned několik postupů SM. Zvýšila se tak výrobnost, jakost vyráběné oceli a také se snížily náklady na její výrobu. [29]

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. ADOLF, Z. Sekundární metalurgie [online]. [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: [http://www.fmfi.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/fmfi/cs/okruhy/urceno-pro/studenty/podklady-ke-studiu/studijni-opory/618-Adolf-sekundarni\\_metalurgie.pdf](http://www.fmfi.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/fmfi/cs/okruhy/urceno-pro/studenty/podklady-ke-studiu/studijni-opory/618-Adolf-sekundarni_metalurgie.pdf)
2. MARTÍNEK, L., ŠENBERGER, J., aj. Sekundární metalurgie ve slévárnách. Slévárství. 2006, roč. 54, č. 6, s. 218–221. ISSN 0037-6825.
3. ŠENBERG, J., BŮŽEK, Z., ZÁDĚRA, A., STRÁNSKÝ K. a KAFKA, V. Cover & typography, Jan Janák. *Metalurgie oceli na odlitky*. 2008. vyd. Brno: VUTIUM, 2008. ISBN 978-80-214-3632-9, s. 210-234.
4. ŠENBERGER, J., MARTÍNEK, L. Sekundární metalurgie ve slévárnách oceli – I. část. Slévárství. 1999, roč. XLVII, č. 6-7, s. 372-378. ISSN 0037-6825.
5. ŠENBERGER, J. Sekundární metalurgie ve slévárnách oceli. *VUT v Brně* [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [www.zam.fme.vutbr.cz/~senberger/doc/prednaska\\_10.doc](http://www.zam.fme.vutbr.cz/~senberger/doc/prednaska_10.doc)
6. MORAVEC, R., STANČÍK, M. a ADOLF, Z. Využití flotačního účinku inertního plynu ke zvyšování čistoty oceli v metalurgických nádobách. Ostrava-Poruba. Dostupné z: [http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal\\_00/papers/141.pdf](http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_00/papers/141.pdf)
7. KAREL, M., GRÝC, K. a MORÁVKA, J. Studium Přenosových Dějů V Lici Pánvi Při Dmýchání Argonu Pomocí Fyzikálního Modelování. Hradec nad Moravicí, 2005. Dostupné z: [http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal\\_07/Lists/Papers/084.pdf](http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_07/Lists/Papers/084.pdf)
8. Oxid vápenatý. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid\\_v%C3%A1penat%C3%BD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_v%C3%A1penat%C3%BD)
9. Briketované ztekucovadlo strusky. *JAP Trading* [online]. 2010 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <http://www.jap.cz/aktuality/ztekucovadlo-strusky-synteticka-struska/>
10. RACLAVSKÝ, M., KRAYZEL, M. a KORBÁŠ, M. Vizuální řízení procesu sekundární metalurgie podporované počítačovým zpracováním obrazu. Hradec nad Moravicí, 2005. Dostupné z: [http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal\\_05/papers/129.pdf](http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_05/papers/129.pdf)
11. MICHALEK, K., ČAMEK, L. Provozní zkušenosti s využíváním průmyslově vyráběných syntetických strusek. Horní Bečva, Česká republika, 2011.
12. HRIC J., RUSINA A., MIHOK L., ADAMČÁK M. Desulphurization of deep-rawing steel by synthetic refining slag. *Steel sheets*, 1993, 1-2, pp.17-22
13. MAIR, H. Používaná technika vhněnění plněného drátu v ocelářském a slévárenském průmyslu. Slévárství. 1990, roč. XXXVIII, č.7, s. 298-301
14. Argon oxygen decarburization. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Argon\\_oxygen\\_decarburization](http://en.wikipedia.org/wiki/Argon_oxygen_decarburization)
15. Solutions for the steel industry. RHI AG. *RHI* [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: [http://www.rhi-ag.com/internet\\_en/products\\_solutions\\_en/steel\\_en/](http://www.rhi-ag.com/internet_en/products_solutions_en/steel_en/)
16. CLU® – Superheated steam. UHT – Uvån Hagfors Teknologi [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.uht.se/Content-Web-Page/0b171864-9747-4116-a309-baa6462baa99/clusupsup--superheated-steam.aspx>
17. KLEMP, W., STŘIBRNÝ Z., GAJDA, J. a PROCHÁZKA, L. Výstavba pánvové pece v Poldi-Hütte s.r.o. a první provozní výsledky. Hradec nad Moravicí, 2005. Dostupné z: [http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal\\_05/papers/58.pdf](http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_05/papers/58.pdf)
18. MOTLOCH, Z. Způsob vakuového odplyňování tavenin, zejména oceli a tavící pec k provádění tohoto způsobu [patent]. 153756. Uděleno 15.6.1974. Dostupné z: <http://spisy.upv.cz/Patents/FirstPages/FPPV0153/0153756.pdf>



19. JURČA, J. Vliv dezoxidace vápníkem na odsíření oceli v průběhu zpracování na sekundární metalurgii . Hradec nad Moravicí, 2005. Dostupné z:  
[http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal\\_09/Lists/Papers/145.pdf](http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_09/Lists/Papers/145.pdf)
20. Vizualizace a řízení pánvové pece sloužící k výrobě oceli ve společnosti POLDI Hütte s.r.o. Reliance [online]. [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.reliance.cz/cs/success-stories/heavy-industry/visualization-and-control-system-of-the-ladle-furnace-used-for-steel-production-in-poldi-hutte>
21. VROŽINA, M., DAVID, J. a GARZINOVÁ, R. Automatizace technologických procesů: Řízení technologických procesů v metalurgii [online]. s. 56-62 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.fmfi.vsb.cz/cs/okruhy/urceno-pro/studenty/podklady-ke-studiu/studijni-opory/>
22. Vacuum degassing. Sun flag steel [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: [http://www.sunflagsteel.com/Sunflag%20Iron%20and%20Steel\\_files/VACUUM%20DEGASSING.htm](http://www.sunflagsteel.com/Sunflag%20Iron%20and%20Steel_files/VACUUM%20DEGASSING.htm)
23. SOCHOR, J., ČECH, J., aj. Vyhodnocení vlivu mimopecní rafinace ve vakuu na mechanické vlastnosti odlitků v podmínkách ŽĐAS, a.s.. Slévárenství. 2006, roč. 54, č. 4-5, s, 164-166. ISSN 0037-6825.
24. Degassing. Quality Steel Treatning [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.qualitysteeltreating.com/heat/degassing.asp>
25. Production of Stainless Steels. KEY to METALS [online]. 2008 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=237>
26. Modeling of the vacuum oxygen decarburization refining process. Springer Link [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11663-000-0145-5.pdf>
27. SOCHOR, J., ČECH, J., aj. Vyhodnocení vlivu mimopecní rafinace ve vakuu na mechanické vlastnosti odlitků v podmínkách ŽĐAS, a.s.. Slévárenství. 2006, roč. 54, č. 4-5, s, 164-166. ISSN 0037-6825.
28. Method and apparatus for double vacuum production of steel [patent]. US005252120A, 5252120. Uděleno 12 říjen 1993. Dostupné z: <http://www.google.cz/patents?hl=cs&lr=&vid=USPAT5252120&id=SQsbAAAAEBAJ&oi=fnd&dq=Vacuum+Arc+Degassing&printsec=abstract#v=onepage&q=Vacuum%20Arc%20Degassing&f=false>
29. BAIL, T., UHER, T., KAVKA, V. a PETER, M. Commissioning of the integrated systém of secondary metallurgy in steel works vitkovice steel, INC. OSTRAVA. Springer Link [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11663-000-0145-5.pdf>