

SODOBNE TEHNOLOGIJE PRI PROIZVODNJI KVALITETNIH JEKEL V METAL-RAVNE

ADVANCED TECHNOLOGIES FOR THE PRODUCTION OF HIGH-QUALITY STEELS AT METAL-RAVNE

Blaženko Koroušič¹, Alojz Rozman², Franc Tehovnik¹

¹Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija

²METAL. d. o. o., Koroška c. 14, Ravne na Koroškem, Slovenija
blazenko.korouasic@guest.arnes.si

Prejem rokopisa - received: 2000-10-17; sprejem za objavo - accepted for publication: 2000-11-06

Strategija kontrole jeklarskih procesov sloni na jemanju vzorcev tekoče kovine in žlindre ter vzorcev iz gotovih pol-izdelkov. Hitri razvoj v zadnjih letih ti. 'modelov dinamične kontrole', ki slonijo na hitri detekciji in meritvah, ki se izvajajo med procesiranjem jekla je, omogočil nove možnosti kontrole. Nekaj primerov metod za nadzor procesov bo predstavljeno v naslednjem prispevku.

Ključne besede: taljenje, procesi kontrole v EOP, obdelava taline po VAD postopku, model dezoksidacije, vodik, žveplo

The control strategy in steel making is based on samples taken from the molten metal and slag as well as from solid products. Dynamic control models based on rapid detection and measurement during the processing of the molten steels have developed significantly over the last few years. There are a lot of new diagnostic methods which enable plant engineers to control the quality of molten metal during processing. Several examples of monitoring methods are described in the paper.

Key words: EAF melting, process control, VAD melts treatment, deoxidization model, hydrogen and sulphur

1 UVOD

Vodenje jeklarskih procesov in odločitve pri izvanju različnih operacij se danes veliko več opirajo na informacije, ki jih dajejo različne analitske in kontrolne metode ter hitro pripravljene informacije na osnovi matematičnih modelov kot same empirične izkušnje operaterja. Razlogi za to so predvsem v hitrosti odvijanja proizvodnih procesov. Sodobne analitske in instrumentalne metode so hitre in točne, če je tehnološka disciplina na primernem nivoju. Računalniške zmogljivosti sodobnih računalnikov omogočajo tudi pri izvajanju simulacij pri zelo zapletenih metalurških procesih popolnoma novo strategijo vodenja tehnoloških procesov. Matematični modeli, podprti z dinamičnimi meritvami, niso več alternativa, temveč postajajo standard, ki sili vse proizvajalce jekel, da se vključijo v sodobno tehnološko strategijo^{5,6}.

V tem prispevku želimo predstaviti nekatere sodobne metode pri izvajanju in optimizaciji jeklarskih procesov in njihov tehnološki in ekonomski pomen za jeklarsko prakso.

2 KONTROLA VODIKA V LF-VD* - PEČI

* **LF-VD** je sodobna **LADLE FURNACE** v kombinaciji z vakuumsko napravo za degazacijo jekla (**VACUUM DEGASSING**).

Pri proizvodnji kvalitetnih jekel v METAL - Ravne se posveča velika pozornost kontroli čistoče jekla zlasti

vsebnosti in morfologiji nekovinskih vključkov in pa vsebnosti plinov, med katerimi posebno mesto zavzema kontrola vodika pri jeklih za kovaški program.

2.1 Vakuumiranje jekla in kontrola vodika

Sodobna jeklarska tehnologija temelji na natančni opredelitvi izvajanja posameznih operacij v t. i. sekundarni fazi izdelave jekla. V Metal - Ravne se že več kot 10 let izvaja sekundarna rafinacija jekla po postopku VAD (**VAD - VACUUM ARGON DECARBURIZATION**). V letu 1999 je bila inštalirana nova naprava LF_VD, ki omogoča učinkovitejše izvajanje vakuumiranja tekočega jekla, zlasti visoko legiranih in za pline in nekovinske vključke občutljivih jekel, in tudi vrsto drugih operacij, o katerih bo govor kasneje.

Vodik je element, ki je izredno nevaren v jeklu, ki ne samo povzroča napake v jeklu, temveč občutno poslabšuje njegove mehanske in uporabne lastnosti^{24,25}.

Vodik se raztaplja v tekočem jeklu po znanem Sievertovem zakonu:

$$[H] = k_H \cdot \sqrt{p_{H_2}}$$

kjer pomeni:

$[H]$ = aktivnost vodika v talini

k_H = ravnotežna konstanta za reakcijo $[H]=1/2H_2(g)$

H_2 = parcialni tlak vodika nad talino (Pa)

Pri visoko legiranih jeklih je vpliv legirnih elementov na aktivnost vodika močan zaradi delovanja medseboj-

nega vpliva, kar upoštevamo z uvedbo koeficientov interakcije:

$$\log f_H = e_H^C \cdot [\%C] + e_H^{Si} \cdot [\%Si] + \dots + e_H^j \cdot [\%j]$$

Vrednost ravnotežne konstante k_H :

$$\log K_H = -\frac{1900}{T} - 1.577$$

je odvisna od temperature in zato moramo upoštevati njen vpliv pri meritvah vsebnosti vodika v tekočem jeklu.

2.2 Direktno določanje vodika v talini z metodo HIDRIS

Z razvojem učinkovite metode vakuuiranja velikih količin tekočega jekla je postalo zelo aktualno vprašanje hitrega in učinkovitejšega merjenja vsebnosti vodika že v tekočem jeklu. Merilna metoda HIDRIS omogoča in situ določanje vsebnosti vodika v talini, kar je zelo pomembno, ker igra čas izdelave jekla izredno pomembno vlogo.

Merilna naprava HIDRIS je sestavljena iz posebne sonde, ki je postavljena na potopno kopje, ter pnevmatskega kabla, ki omogoča povezavo z merilno napravo s procesorsko enoto. Po potopitvi kopja z sondo v talino posebni sistem naprej omogoči, da v merilno celico, napolnjeno z dušikom, difundira vodik iz taline in nastali parcialni tlak vodika se v manj kot 90 sekundah določi po metodi merjenja spremembe toplotne prevodnosti plinske mešanice.

2.3 Kinetika izločanja vodika iz tekočega jekla v fazi degazacije

Tekoče jeklo pri temperaturi okoli 1600 °C se v peči LF_VD podvrže vplivu vakuumu, ki je pri novi napravi v stacionarnem stanju pod 1 mbar. Zaradi rahlega mešanja taline z argonom po posebnem argonskem kamnu je celotna talina nenehno v stiku z vakuumom, kar povzroči prenos vodika iz taline v plinsko fazo, po kinetični enačbi:

$$\frac{dH}{dt} = K_H \frac{A}{V} (C_H - C_{H(e)})$$

kjer je k_H konstanta prenosa vodika, A reakcijska površina v ponovci, V volumen tekočega jekla in $(C_H - C_{H(e)})$ razlika med trenutno vsebnostjo vodika v talini in ravnotežno, ki jo diktirajo pogoji v vakuumski napravi.

Ker je vrednost $C_{H(e)}$ pri vodiku zanemarljiva, lahko dejansko zapišemo končno obliko kinetične enačbe:

$$\log \left(\frac{H_{aft}}{H_{bef}} \right) = -(k_H \cdot t)$$

Količina odstranjenega vodika iz taline med degazacijo je odvisna od startne vsebnosti vodika H_{bef} , od dinamike mešanja taline, temperature, tlaka v vakuumski komori in predvsem od časa vakuuiranja (t).

Na **sliki 1** so prikazani rezultati vakuuiranja večjega števila šarž, ki pove, da dosega stopnja odprave vodika v METAL - Ravne vrednosti okoli ravnotežne krivulje.

Kinetična konstanta prenosa vodika k_H igra izredno pomembno vlogo, ker njeno vrednost določajo razmere pri vakuuiranju in jo lahko zapišemo v bolj kompleksni obliki:

$$k_H = k_H(T) + k_H(M)$$

kjer je $k_H(T)$ konstanta prenosa, odvisna od termičnega gibanja taline v ponovci, in $k_H(M)$ konstanta prenosa mešanja taline kot posledica vpliva mešanja taline z argonom. Njena vrednost je direktno proporcionalna t. i. energiji mešanja, ki je opisana z naslednjo enačbo in v grafični obliki prikazana na **sliki 2**:

$$E(W/t) = 6.18 \frac{Q_g T_m}{M_m} \left\{ \ln \left(1 + \frac{H}{1.49 \cdot 10^{-5} \cdot p_2} \right) + \eta \left(1 - \frac{T_n}{T_m} \right) \right\}$$

kjer pomeni

Q_g = količina vpihanega argona (Nm³/min)

T_m = startna temperatura taline (K)

M_m = masa taline (t)

H = višina taline v ponovci (m)

p_2 = tlak v vakuumski komori (Pa)

T_n = temperatura injektiranega argona (K)

η = koeficient = 0.06

Eksperimentalno ugotovljene vrednosti celotnega koeficienta prenosa vodika k_H v naših razmerah je med **0.02-0.035 (slika 2)**.

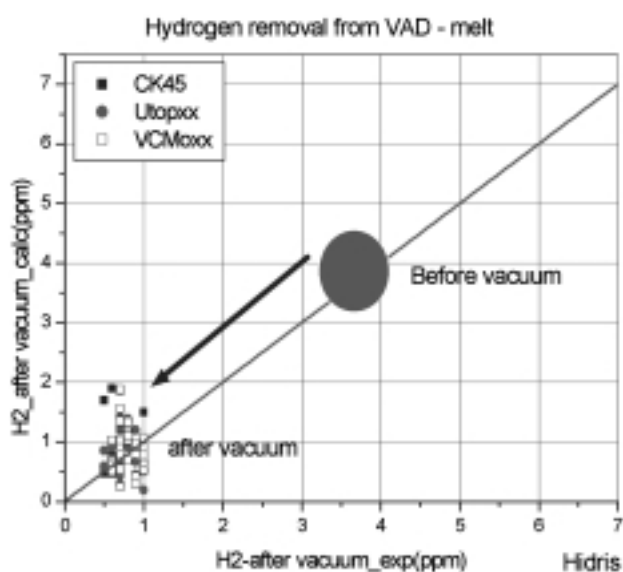
Na vrednosti koeficienta prenosa vodika k_H vpliva poleg omenjenih faktorjev še kemična sestava jekla, masa taline, količina žlindre v ponovci LF-VD.

Za praktične namene točnost določanja vsebnosti vodika po metodi HIDRIS v celoti zadošča, kar potrjujejo domače in tuje raziskave²⁵. Na začetku uvajanja metode HIDRIS smo izvedli nekaj primerjalnih poskusov, pri čemer smo kot referenčno metodo uporabili analitsko metodo določanja vodika v vzorcih, vzetih iz taline in na poseben način pripravljenih za analizo. Na **sliki 3** je prikazano nekaj značilnih primerjalnih rezultatov med HIDRIS in laboratorijsko analizo vodika.

2.4 Ekonomske prednosti odprave vodika iz taline

Uvedba učinkovite metode degazacije tekočega jekla pri nizkem vakuumu pred litjem je omogočila praktično ukinitvev dosedanjega načina dodatnega žarjenja jekla v peči za odpravo vodika. Zaradi znižanja vsebnosti vodika v ingotih pod kritično mejo (za kovaški asortiment jekel ponavadi pod 1.5 ppm H₂) so bili potrebni dolgi časi ogrevanja v kovaški peči (preko 100 ur), kar je bilo povezano z zelo visokimi proizvodnimi stroški.

Na **sliki 4** je prikazan značilni diagram ogrevanja za različne izhodne vsebnosti vodika v ogrevancu specifičnega prečnega preseka²⁵.

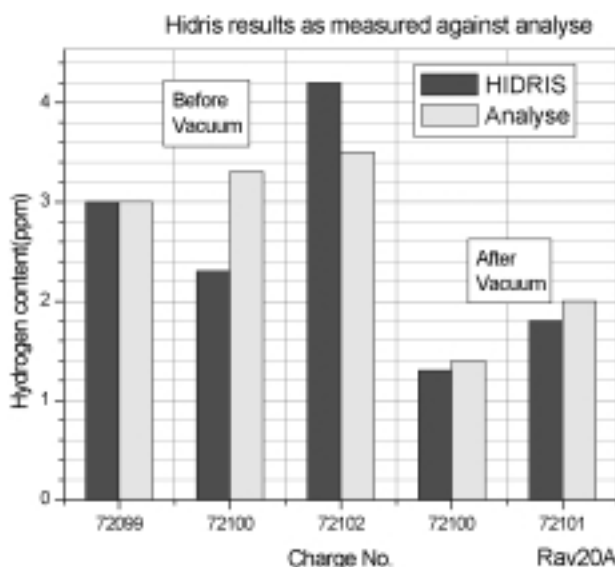


Slika 1: Stopnja odprave vodika med degazacijo v jeklarni METAL-Ravne

Figure 1: Level of the H₂ elimination during the melt degassing at METAL-Ravne

3 OPTIMIZACIJA DEZOKSIDACIJE Z METODO VPIHOVANJA OGLJIKA

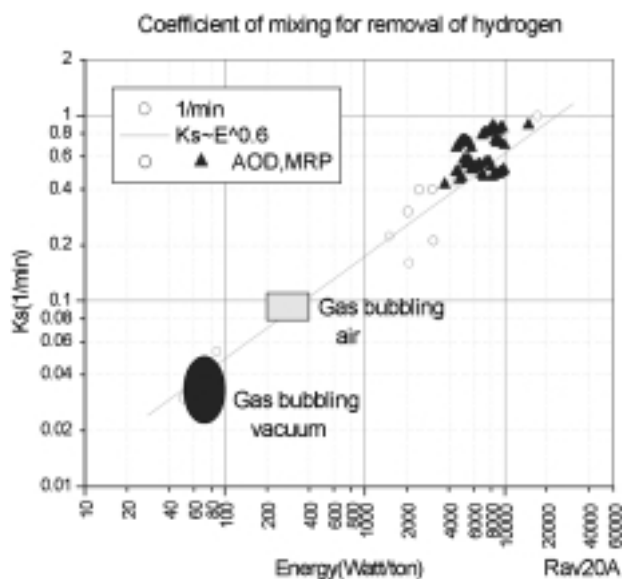
Metoda vpihovanja ogljika v tekoče jeklo in žlindro v EOP (EOP - elektro obločna peč) se zelo široko uporablja za doseganje različnih ciljev: naogljčenje taline, izdelava peneče žlindre, redukcija oksidov iz žlindre in drugega. Metodo vpihovanja ogljika v talino pred prebodom iz EOP smo razvili z namenom, da dosežemo več ciljev hkrati:



Slika 3: Primerjava izmerjenih vsebnosti vodika z HIDRIS in kemijsko analizo vzorcev

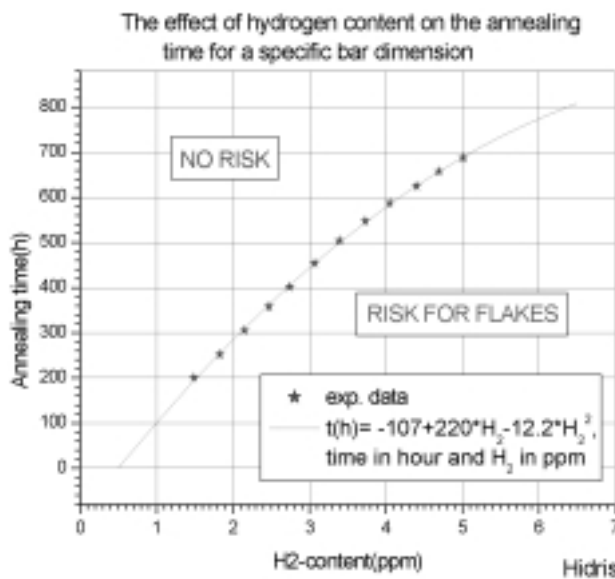
Figure 3: Comparison the experimentally determined H₂ values measured by HIDRIS and the standard analysis of the samples

- povečati vsebnost ogljika v talini
- zaradi reakcije med ogljikom in raztopljenim kisikom doseči znižanje aktivnosti kisika pred dodatkom aluminija za dezoksidacijo
- povečati izkoristek železa in mangana z redukcijo teh oksidov iz žlindre
- znižati temperaturo taline pred prebodom, ker so reakcije redukcije med FeO, MnO in ogljikom endotermnega tipa.



Slika 2: Vrednosti koeficienta prenosa vodika in energija mešanja taline

Figure 2: Values of the H₂ transfer coefficient and the mix-energy of the melt



Slika 4: Vpliv vsebnosti vodika v specifičnem preseku ogrevalca od vsebnosti vodika v jeklu

Figure 4: Influence of the H₂ content for a specific bar dimension on the annealing time

Tabela 1 daje vpogled v osnovne reakcije, ki potekajo med taljenjem kovinskega vložka in zadrževanjem taline v EOP^{5,13}.

Tabela 1: Osnovne kemične reakcije v EOP

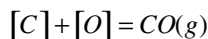
Opis reakcije	Reakcija	$\Delta H_{1600^\circ\text{C}}$ kJ/mol	I
razogljichenje	$\underline{\text{C}} + (\text{FeO}) = \text{CO}(\text{g}) + \underline{\text{Fe}}$	110.50	1
odprava silicija v žlindro	$\underline{\text{Si}} + 2(\text{FeO}) + 2(\text{CaO}) = (\text{Ca}_2\text{SiO}_4) + 2\underline{\text{Fe}}$	-420.0	2
razfosforenje	$2\underline{\text{P}} + 5(\text{FeO}) + 3(\text{CaO}) = (\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2) + 5\underline{\text{Fe}}$	-765.1	3
razžveplanje	$\underline{\text{S}} + (\text{CaO}) = \text{CaS} + \underline{\text{O}}$	114.9	4
odprava mangana v žlindro	$\underline{\text{Mn}} + (\text{FeO}) = (\text{MnO}) + \underline{\text{Fe}}$	-157.7	5
oksidacija kroma	$2\underline{\text{Cr}} + 3(\text{FeO}) = (\text{Cr}_2\text{O}_3) + 3\underline{\text{Fe}}$	-414.6	6

$\underline{\text{X}}$ = raztopljeno v talini, (X_nO_m) = raztopljeno v tekoči žlindri, (g) = plinsko stanje

3.1 Reakcije med ogljikom in kisikom v tekočem jeklu

Pri izdelavi velikega števila jekel v METAL - Ravne uporabljamo tehnološko linijo EOP+LF-VD-Specialne obdelave-litje. Med taljenjem kovinskega vložka v EOP in potrebnem zadrževanju taline v EOP dosejajo taline dokaj nizke vsebnosti ogljika, kar je odvisno od izbire kovinskega vložka in ciljano operacijo odfosforenja jekla.

Kot nazorno prikazuje **slika 5**, so vsebnosti kisika v talini pod kontrolo reakcije:



Korelacijska enačba, izpeljana na osnovi eksperimentalnih meritev aktivnega kisika ob iztočasno vzetih vzorcih za kemično analizo, kaže izredno visok koeficient zanesljivosti:

$$\log a_{\text{O}} (\text{ppm}) = 1.468 - 1.001 \log [\% \text{C}], \\ R = -0.983, N = 146$$

Taline z vsebnostjo ogljika pod 0.03% C imajo torej več kot 1kg kisika/t, kar pomeni, da bo tudi poraba aluminija za dezoksidacijo, torej vezavo tega kisika, zelo visoka. Če v tako preoksidirano talino vpihemo ogljik v količinah okoli 4-5 kg C/t, bo del ogljika reagiral z raztopljenim kisikom v talini in jo v obliki CO zapustil, preostali del ogljika se bo delno raztopil v talini in delno reagiral z oksidi FeO in MnO v žlindri. Ker so vsi ti procesi endotermni, se temperatura jekla zniža v povprečju za okoli 34 °C, kot je to razvidno s **slike 6**.

Najbolj zanimivo vprašanje je, kolika je učinkovitost znižanja vsebnosti aktivnega kisika v talini. Rezultati in analiza velikega števila poizkusnih meritev so prikazani na **sliki 7**.

Iz dobljenih rezultatov jasno sledi, da se več kot 2/3 prostega kisika v talini veže na ogljik in v obliki plinskega CO zapusti EOP. To dejstvo ima več metalurških prednosti:

- nastali CO pri prehodu iz taline potuje skozi tekočo žlindro in opravlja nadaljnjo redukcijo oksidov (povečuje kovinski izkoristek v EOP)
- kisik, ki je vezan na CO in odstranjen iz taline, bi se v nasprotnem primeru vezal na aluminij in kot Al_2O_3 -vključek zadrževal v talini in bistveno prispeval k vsebnosti nekovinskih vključkov v jeklu.

4 KONTROLA NEKOVINSKIH VKLJUČKOV

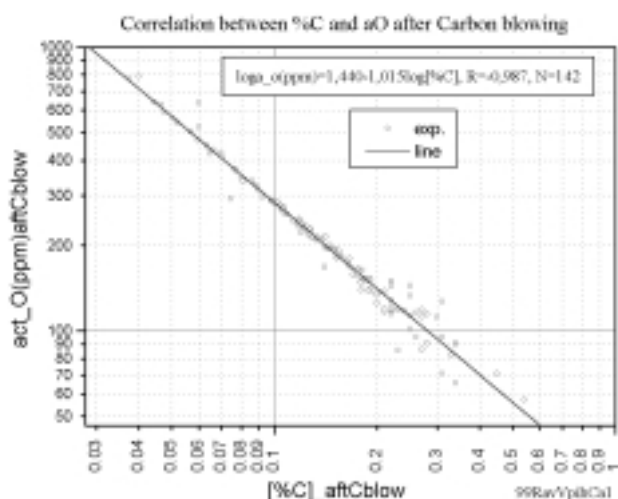
Današnja stopnja razvoja jeklarskih procesov narekuje temeljito poznanje metalurških procesov, kajti že spremljanje razvoja, narekuje visoko stopnjo tehnološkega znanja. Zaradi izrednega naraščanja obsega informacij na vseh področjih in smereh razvoja, ki se čedalje bolj povezujejo s uporabo računalniške tehnike, so potrebni dodatni napor, da poleg vlaganj v razvoj temeljnih raziskav na področju metalurških raziskav, sledimo tudi razvoju uporabe informacijske tehnologije. Kot zgled nam je lahko sodobna kontrola nekovinskih vključkov, ko pri nekaterih kvalitetah jekla želimo, da je njihova vsebnost v najmanjših količinah (clean steel technology), in v drugih primerih, kot so npr. avtomatna jekla za izdelavo avtomobilskih delov, želimo kontrolirano količino oksid-sulfidnih vključkov, ker njihova prisotnost izboljšuje obdelovalnost^{4-7,12,13}.

Avtomobilska industrija je velik porabnik odkovkov iz srednje legiranih jekel, od katerih konstruktorji zahtevajo zanesljive mehanske in uporabne lastnosti. Danes se je zagotovo uveljavilo empirično pravilo, da morajo biti tovrstna jekla zelo čista in homogena po kemični in strukturalni sestavi. V nadaljevanju tega prispevka se bomo osredotočili na uporabo modela za optimizacijo procesa nažveplanja jekla ob istočasnem dodatku aluminija, in sicer pred pričetkom litja t. i. 'avtomatnih' jekel, legiranih z žveplom⁸⁻¹⁰.

Praktične izkušnje so namreč pokazale, da tovrstna jekla pri litju, zlasti ko se odlivajo po konti-postopku, delajo velike težave. Pojav je v praksi znan kot '**mašenje izlivnikov**'. Optimalne razmere pri litju in doseganje ugodne makro čistoče jekla se doseže v zelo ozkem pasu, ki ga določa optimalno razmerje med vsebnostjo aluminija, kalcija, kisika in žvepla. V več komponentnem sistemu tipa $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaS}$ je treba poiskati in v praksi realizirati optimalno področje sestave žlindre, ki ga ponazarja termodinamika reakcije med kisikom in žveplom¹⁸⁻²³:

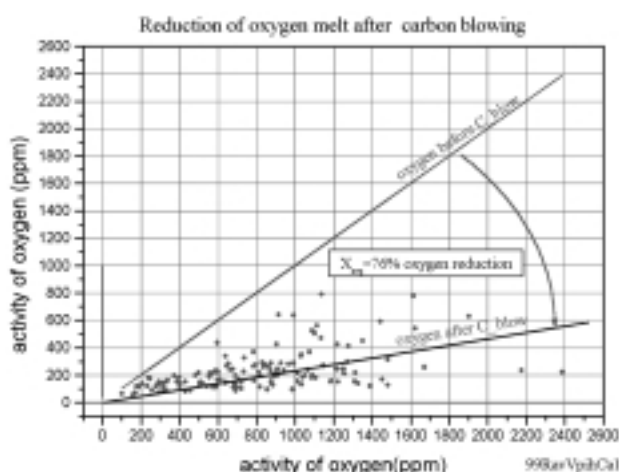
$$C_s^{2-} = (\% S^{2-}) \cdot \left(\frac{p_{\text{O}_2}}{p_{\text{S}_2}} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{K_1 \cdot a_{\text{O}^{2-}}}{f_{\text{S}^{2-}}} = \\ = \frac{(\% S^{2-})}{[\% S]} \cdot (p_{\text{O}_2})^{\frac{1}{2}} = \frac{K_1 \cdot a_{\text{O}^{2-}} \cdot f_{\text{S}}}{f_{\text{S}^{2-}} \cdot K_2}$$

Parameter kapacitete žvepla C_s^{2-} ali izpeljanka C_s' sta funkciji kemične sestave žlindre ali termodinamične



Slika 5: Korelacija med ogljikom in aktivnostjo kisika v EOP tik pred prebodom taline

Figure 5: Correlation between the carbon content and the measured oxygen activity in EAF melt, close to the melt tapping



Slika 7: Gibanje aktivnega kisika pred in po vpihovanju ogljika v talino

Figure 7: Measurement of the content of active oxygen in EAF melt before and after carbon blowing

Tabela 2: Ocena 'kapacitete žvepla' iz algoritma in primerjava z eksperimentalnimi rezultati (Görnerup&Wijk-1996)

CaO mas. %	Al ₂ O ₃ mas. %	SiO ₂ mas. %	CaO mol. %	Al ₂ O ₃ mol. %	SiO ₂ mol. %	a_CaO GPRO 1600 °C	C' _s * 10 ⁴ eksperim. 1600 °C	C' _s * 10 ⁴ algor. 1600 °C
56.00	0.00	44.00	58.00	0.00	42.00	0.0327	4.7	4.9
50.00	20.00	30.00	56.00	12.50	31.50	0.0686	8.4	10.2
54.00	30.00	16.00	63.00	19.50	17.5	0.5330	31.4	74.0
58.00	35.00	7.00	69.00	23.00	8.00	0.7050	83.5	105

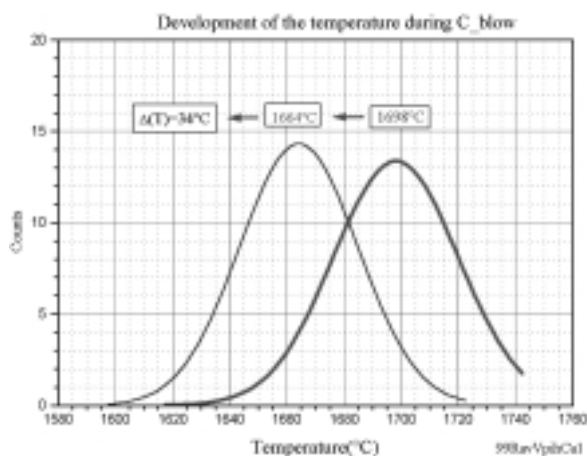
eksperim. Görnerup & Sjeberg (1999) ⁶

Algoritem (GPRO - ver. 2000): $\log C'_s \cdot 10^4 = 2.134 + 0.967 \cdot \log (a_{CaO})$ pri 1600 °C

aktivnosti oksidov npr. aktivnosti CaO, kot je to razvidno s **slike 8**.

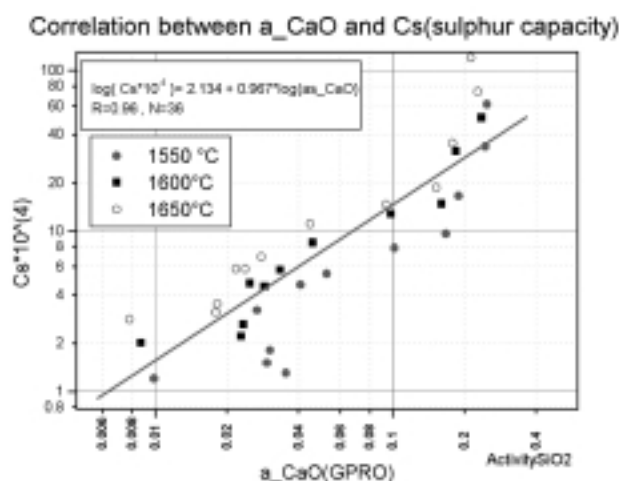
Na vrednosti parametra C'_s močno vpliva kemična sestava žlindre (tudi temperatura taline), kar je razvidno iz podatkov zbranih v **tabeli 2**.

Poleg optimalne sestave žlindre je treba zagotoviti optimalno količino kalcija v obliki CaSi-žice, ki jo 'injektiramo' v talino in na ta način modificiramo oksidne vključke (v večini primerov so to Al₂O₃-vključki) v tekoče Ca-aluminat.



Slika 6: Porazdelitev temperature taline pred in po vpihovanju ogljika v tekoče jeklo

Figure 6: Distribution of the melt temperatures before and after carbon blowing in the melt



Slika 8: Algoritem za izračunavanje parametra C'_s

Figure 8: Algorithms for the calculation of the parameter C'_s

Izhodišče za modifikacijo oksidnih vključkov je enačba:

$$y[Ca] + \left(1 - \frac{2y}{3}\right) Al_2O_3 = yCaO, (1-y)Al_2O_3 + \frac{2}{3}y[Al]$$

Termodinamično analizo opisane reakcije modifikacije vključkov predstavimo z enačbo:

$$\log[a_{Ca}] = -\frac{4761}{T} + 0.803 + \log\left(\frac{a_{CaO}}{a_{Al_2O_3}^{1/3}}\right) + \log[\%Al]^{2/3}$$

Ker je vsebnost topnega aluminija in žvepla v tekočem jeklu predpisana (npr. Al = 0.03 mas.% in vsebnost žvepla naj se giblje med 0.025-0.035 mas.%), mora operater 'natančno' določiti za uporabljeni sistem žlindre, temperaturo taline in dano vsebnost celotnega kisika **optimalno količino kalcija**. Dejansko gre za zelo natančno tehnološko operacijo, od katere je odvisna livna sposobnost taline, čistoča jekla glede makro nekovinskih vključkov in celo produktivnost celotne tehnološke linije.

Primer 1:

Pri sestavi žlindre **55 mol.% CaO+12 mol.% SiO₂** in določeni vsebnosti Al₂O₃+MgO, temperaturi taline **1600 °C** ter sestavi taline jekla **0.028% Al** in **0.031% S** je potrebno zagotoviti v tekočem jeklu vsebnost kalcija okoli **0.0035 mas.%**.

Gre torej za tehnološki poseg, ki v **gramih Ca/tono jekla** odloča o kvaliteti jekla in nadaljnji usodi postopka, zlasti litja in kvaliteti odlitih gredic.

5 SKLEPI

- Vodenje jeklarskih procesov in odločitve pri izvažanju različnih operacij se danes veliko več opira na informacije, ki jih dajejo različne analitske in kontrolne metode ter natančno pripravljene informacije na osnovi matematičnih modelov, kot tudi same empirične izkušnje operaterja.
- Z razvojem učinkovite metode vakuumiranja velikih količin tekočega jekla je postalo zelo aktualno vprašanje hitrega in učinkovitega merjenja vsebnosti vodika že v tekočem jeklu. Merilna metoda HIDRIS omogoča in situ določevanje vsebnosti vodika v talini, kar je zelo pomembno, ker čas izdelave jekla *igra* izredno pomembno vlogo.
- Merilna naprava HIDRIS je sestavljena iz posebne sonde, ki je postavljena na potopno kopje, ter pnevmatskega kabla, ki omogoča povezavo s merilno napravo z procesorsko enoto. Po potopitvi kopja z sondo v talino posebni sistem naprej omogoči, da v merilno celico, napolnjeno z dušikom, difundira vodik iz taline in nastali parcialni tlak vodika se v manj kot 90 sekundah določi po metodi merjenja spremembe toplotne prevodnosti plinske mešanice.

- Metoda vpihovanja ogljika v tekoče jeklo in žlindro v EOP se zelo široko uporablja za doseganje različnih ciljev: naogljčenje taline, izdelavo peneče žlindre, redukcijo oksidov iz žlindre in drugo. Metodo vpihovanja ogljika v talino pred prebodom iz EOP smo razvili z namenom, da dosežemo več ciljev hkrati:

- poveča se vsebnost ogljika v talini
- reakcija med ogljikom in raztopljenim kisikom omogoča znižanje aktivnosti kisika pred dodatkom aluminija za dezoksidacijo
- poveča se izkoristek železa in mangana z redukcijo teh oksidov iz žlindre
- zniža se temperatura taline pred prebodom, ker so reakcije redukcije med FeO, MnO in ogljikom endotermnega tipa.
- Sodobna kontrola nekovinskih vključkov pri nekaterih kvalitetah jekla narekuje, da je njihova vsebnost v najmanjših količinah (clean steel technology). V drugih primerih, kot so napr. avtomatna jekla za izdelavo avtomobilskih delov, želimo kontrolirano količino oksid-sulfidnih vključkov, ker njihova prisotnost izboljšuje obdelovalnost.
- Z uporabo modela za optimizacijo procesa načevljanja jekla ob istovrstnem dodatku aluminija in pred pričetkom litja je mogoča natančna kontrola proizvodnje t. i. 'avtomatnih' jekel, legiranih z žveplom.
- Praktične izkušnje so pokazale, da avtomatna jekla, legirana z žveplom, pri litju, zlasti ko se tovrstna jekla odlivajo po konti-postopku, delajo velike težave. Pojav je v praksi znan kot 'mašenje izlivnikov'. Optimalne razmere pri litju in doseganje ugodne makro čistoče jekla se doseže v zelo ozkem pasu, ki ga določa optimalno razmerje med vsebnostjo aluminija, kalcija, kisika in žvepla ter kemična sestava žlindre.

6 LITERATURA

- ¹ Koroušić, B: Fundamental thermodynamic aspects of the CaO-Al₂O₃-SiO₂ system, Steel research 62 (1991) 7, 285-8
- ² Koroušić, B: Use of a Mathematical Model GPRO to Describe Complex Gas - Metal Reactions, Kovine, zlitine, tehnologije 28 (1994) 4, 609-11
- ³ Bannenberg, N., H. Lachmund: High-purity steel production using tank degassing. Steel Technol. Int. (1994), 103-7.
- ⁴ Bergmann, B., N. Bannenberg: Schlackenführung und Schlackenoptimierung in der Sekundärmetallurgie, Stahl und eisen (1991), 1, 125-31.
- ⁵ Meyer, W., J. Hochörtler, A. Kucharz: Entwicklung auf dem Gebiet der Schmelz- und Sekundärmetallurgie zur Eigenschaftsverbesserung spezieller Stahlqualitäten. BHM 140 (1995) 1, 4-14
- ⁶ Lilja, J., A. Lindstedt: The improvement of steel cleanliness by slag composition control. Proc., Scaninject VII, Part I, Lulea (1995), 309-27
- ⁷ Koroušić, B.: Modelling reactions of slag-metal by the steelmaking processes by use of Gibbs minimizing energy, Report of Institute for Metals and Technologies, (3411-97-22 8671), 1998

- ⁸ Hino, M., S. Kitagawa., S. Ban-Ya: Sulfide capacities of CaO-Al₂O₃ MgO and CaO-Al₂O₃-SiO₂ slags. ISIJ International 33 (1993) 1, 46-42
- ⁹ Turkdogan, E. T.: Slags and fluxes for ferrous ladle metallurgy. Iron Steelmaking (1985) 2, 64-77
- ¹⁰ Susaki, K., M. Maeda., N. Sano: Sulphide capacity of CaO-CaF₂-SiO₂ Slags. Metal. Trans. B, 21B (1990), 121-9
- ¹¹ Kalyanram, M. R., T. G. Macfarlane., H. B. Bell: J. Iron Steel Inst. 58 (1960), 195
- ¹² Scheel, R., W. Pluschkell: Reaktionen zwischen Stahlschmelze, Pfannenschlacke und feuerfester Zustellung. In: Feuerfeste Stoffe in der Sekundarmetallurgie. Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1984
- ¹³ Kawakami, K., Y. Kikuchi, Y. Kawai, M. Tate: Entwicklung eines Pfannenschwefelungsverfahrens bei Nippon Kokan. Stahl u. Eisen (1982) 5, 55-9
- ¹⁴ Gaye, H., J. Weltringen: 2nd International Conference on Molten Slags and Fluxes, Lake Tahoe, 1984
- ¹⁵ Pellicani, F., B. Durand, A. Gueussier: Guidelines for calcium treatment of steel and state of calcium retained, International calcium treatment symposium, University of Strathclyde, Glasgow, 30 June 1988, Paper 3
- ¹⁶ Andersson, M. A. T., P. G. Jönsson, M. M. Nzotta: Application of the sulphide capacity concept on high-basicity ladle slags used in bearing-steel production, ISIJ, (1999), 1140-9
- ¹⁷ Deb Roy T., D. G. C. Robertson: Ironmaking and Steelmaking, (1978), 5, 198-206
- ¹⁸ Hillert, M., B. Sundman, X. Wang: An assessment of the CaO-SiO₂ system, Metal. Trans. B, 21, (1990), 303-12
- ¹⁹ Sommerville, J. D., D. A. R. Kay: Metal. Trans. B, 2 (1971), 1727-32
- ²⁰ Ohta, H., H. Suito: Activities in CaO - Al₂O₃ - SiO₂ Slags and Deoxidation Equilibria Si and Al, Metall. Trans B, 27 (1996), 943-53
- ²¹ Ohta, H., H. Suito: Activities of SiO₂ and Al₂O₃ and Activity Coefficients of Fe₂O and MnO in CaO - Al₂O₃ - SiO₂ - MgO Slags, Metall. Trans B, 29 (1998), 119-29
- ²² Sosinsky, D. J., I. D. Sommerville: The Composition and Temperature Dependence of the Sulphide Capacity of Metallurgical Slags, Metall. Trans B, 17 (1986), 331-7
- ²³ Koroušić, B., B. Arh, F. Tehovnik, T. Godicelj: Control of the non-metallic inclusions and steel castability by treatment of Al-killed steels with calcium, RMZ, 46 (1999), 4, 677-85
- ²⁴ Janke, D., Z. Ma., P. Valentin, A. Heinen: Improvement of Castability and Quality of Continuously Cast Steel, ISIJ International, 40 (2000) 1, 31-9
- ²⁵ Meyer, W., J. Hochörtler, M. Engholm, D. Jörgensen, A. Sandberg: Experiences with on-line determination of hydrogen content in ladle refining of tool steels, SCANINJECT VI, Part II, 6th International conference on refining processes, Lulea, Sweden, June 2-4 (1992), 277-302