

Vpliv elektropretaljevanja pod žlindro na kvaliteto jekla za kroglične ležaje (OCR-4 ex. sp.)

V članku so podani eksperimentalni rezultati pretaljevanja jekla OCR-4, ex. sp. (Železarna Ravne) pod žlindro. Navedeni so nekateri tehnični podatki o EPŽ-napravi. Pri oceni doseženih rezultatov je posebna pozornost posvečena reakcijam, ki potekajo med tekočo žlindro in jeklom, zlasti še parametrom, ki določajo vsebnosti kisika in žvepla v jeklu.

Pri oceni kvalitete EPŽ-jekla je izvršena komparativna metalografska analiza nekovinskih vključkov med izhodnim in pretaljenim jeklom, pri istem prečnem preseku z uporabo J. K., GOST in Diergartenove skale. Vsebnost nekovinskih vključkov (oksidov, silikatov in sulfidov) je v EPŽ-jeklu za približno trikrat nižja kot v izhodnem jeklu.

1. SPLOŠNO

Osnovna zahteva, ki se postavlja za jekla, namenjena za izdelavo krogličnih in valjčnih ležajev je minimalna vsebnost nekovinskih vključkov (zlasti grobih), homogena struktura in visoka gostota jekla.¹

Praktične izkušnje so namreč pokazale, da je življenjska doba ležajev, gledano s statističnega aspekta, v strogi korelacijski povezavi z vsebnostjo, obliko in naravo nekovinskih vključkov^{1,2,3}. Ker je delovna površina ležaja podvržena številnim periodičnim in neperiodičnim obremenitvam, se koncentrirajo okrog nekovinskih vključkov predvsem lokalne napetosti, ki se širijo globoko v notranjost ležaja. Posledica teh napetosti je tvorba razpok in vdolbin, kar neizogibno vodi do porušjenja ležaja.

Po drugi strani vodi prisotnost poroznosti in nakopičenj nekovinskih vključkov v centralnem delu valjanih ali kovanih polizdelkov, kot posledica pogojev kristalizacije pri standardni tehnologiji izdelave ingotov, do precejšnjih izgub v materialu pri izdelavi ležajev. Te izgube lahko znašajo tudi do 15 %.⁴

Pri izdelavi specialnih ležajev, ki delajo v posebnih pogojih (npr. v letalski industriji) so zahteve po kvaliteti jekla še večje in jekla, izdelana

s standardno tehnologijo ne ustrezajo več zahtevanim predpisom.

Na osnovi vsega tega, je lahko razumeti, zakaj so jeklarji vsaki novi tehnološki postopek kot je: pretaljevanje v vakuumu, prepihovanje z inertnimi plini, obdelava jekla s tekočimi žlindrami, elektropretaljevanje pod žlindro (EPŽ-postopek) in dr. aplicirali med prvim ravno na jekla za kroglične in valjčne ležaje.

V tem članku so opisani rezultati pretaljevanja jekla za kroglične ležaje kvalitete OCR-4 ex. sp. po postopku elektropretaljevanja pod žlindro na polindustrijski EPŽ-napravi na Metalurškem inštitutu v Ljubljani.

2. OPIS NAPRAVE IN IZBIRA SUROVIN

Splošne fizikalno-kemične in tehnološke karakteristike postopka za elektropretaljevanje jekla pod žlindro so v literaturi že večkrat opisane. Zato se bomo omejili na podajanje osnovnih tehnoloških parametrov EPŽ-naprave, na kateri smo vršili poskuse:

— moč transformatorja	100 KW
— sekundarna napetost	35—55 V
— sekundarni tok	do 1700 A
— hitrost podajanja elektrode	0,5—17 cm/min
— bakreni, vodno hlajeni kristalizator z notranjim premerom	Ø = 118 mm
— max. višina ingota	do 1000 mm
— max. presek elektrode	Ø 70 mm
— max. dolžina elektrode	do 4000 mm

Kot elektrode smo uporabili paličaste profile okroglega ali kvadratnega preseka Ø = 36 do Ø 60 mm, katere smo pred taljenjem mehanično čistili.

Kemična sestava jekla, kvalitete OCR-4, ex. sp. (iz proizvodnega programa Železarne Ravne) je ležala v predpisanem območju:

% C	% Si	% Mn	% Cr	% S	% P	% Cu
0,95 — 1,05	0,17 — 0,37	0,25 — 0,40	1,35 — 1,65	max 0,020	max 0,025	max 0,25

Žlindro smo izdelali iz osnovnih komponent: pretaljenega korunda in kalcijevega fluorida in je

P	% Al ₂ O ₃	% SiO ₂	% CaO
0,003	25—30	2,0	1—3

3. VODENJE PROCESA

Celoten postopek vodenja EPŽ-procesa lahko razdelimo na tri periode:

1. začetna (»vžigna«) perioda,
2. delovna perioda,
3. končna perioda.

V začetni periodi smo raztalili žlindro v kristalizatorju, s čimer je omogočeno talenje elektrode in stabilizacija procesa. Ta del procesa smo vodili z ročno regulacijo.

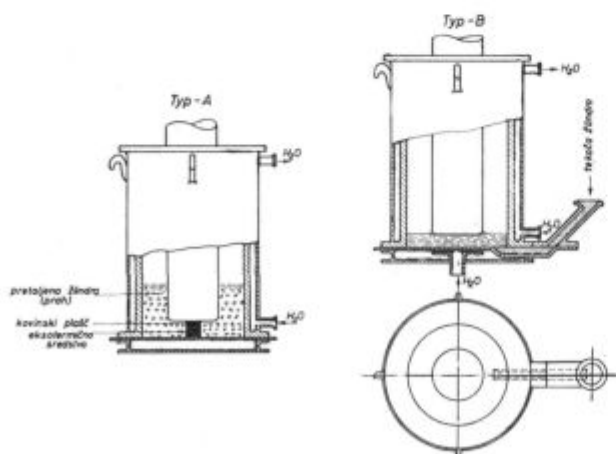
Na sliki 1 sta prikazana dva načina vžiga:

Typ A: vžig preko eksotermičnega sredstva in
typ B: vžig preko tekoče žlindre.

Pri naših poskusih smo uporabili vžig tipa-A.

Delovna perioda se začne 10—15 min po vžigu oziroma takrat, ko je proces popolnoma stabiliziran, kar se pokaže v obnašanju napetosti in toka na transformatorju. Hitrost podajanja elektrode v delovni periodi je bila prepuščena avtomatski kontroli.

Med delovno periodo smo v določenih časovnih presledkih merili temperaturo hladilne vode (povprečna vrednost okrog 35° C), povprečno hitrost podajanja elektrode (ta znaša v odnositosti od preseka elektrode od 1,5—4,0 cm/min) ter temperaturo žlindre (okrog 1780° C). Jakost toka se je spreminjala glede na presek in globino potapljanja elektrode v žlindro in je ležala med 900 do 1550 A pri sekundarni napetosti 30—45 V.



Slika 1

Principelne možnosti »vžiga« pri postopku elektropretaljevanja pod žlindro. Tip A: vžig preko eksotermičnega sredstva, tip B: vžig preko tekoče žlindre

po svoji kemični sestavi odgovarjala žlindri tipa AFN-6:

% Fe tot.	C	S	% CaF ₂
0,2	do 0,4	0,2	65—70

Hitrost talenja (Q) je ležala v odvisnosti od preseka elektrode in ostalih tehnoloških parametrov (vrsta in količina žlindre, jakost toka, itd.) med 20—30 kg/h.

4. ANALIZA REZULTATOV

Pri analizi rezultatov smo pozornost usmerili v dveh smereh:

1. Ocena poteka metalurških reakcij med jeklom in žlindro,
2. Ocena kvalitete EPŽ-jekla predvsem glede nekovinskih vključkov.

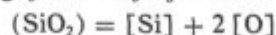
4.1. Termodinamične zakonitosti EPŽ-procesa

Kakor pri ostalih jeklarskih procesih je tudi pri EPŽ-postopku potek kemičnih reakcij med jeklom in žlindro določen s termodinamičnimi in kinetičnimi zakonitostmi.

V primeru jekla OCR-4, ex. sp. je osnovna tendenca doseči minimalno vsebnost grobih nekovinskih vključkov (zlasti grobih korundnih vključkov) in njihovo čim bolj enakomerno porazdelitev po celotnem volumnu ingota. Zato moramo izbrati takšno žlindro, ki bo imela visoko sposobnost asimilacije oksidnih nekovinskih vključkov in zadostno afiniteto do žvepla, da bi se dosegla čim višja stopnja razžveplanja jekla. Pri tem je treba voditi računa tudi o hitrosti procesa tj. času, ki stoji na razpolago za reakcijo med tekočim jeklom in žlindro. Čas pretaljevanja je od izrednega pomena pri visokoogljičnih jeklih zaradi pogojev kristalizacije karbidov.

Pri naših poskusih smo se odločili za žlindro tipa 70 % CaF₂ — 30 % Al₂O₃, ki po podatkih iz literature najbolj odgovarja tej vrsti jekla.

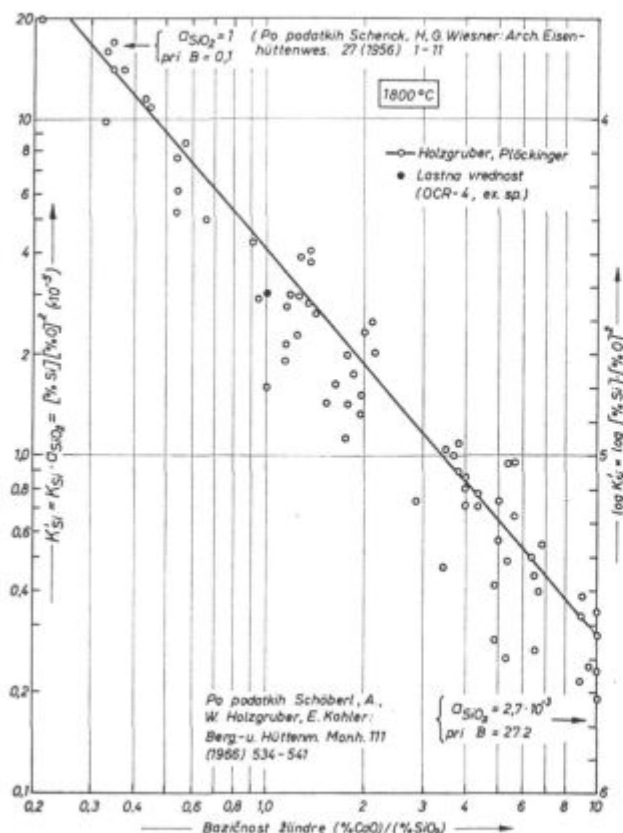
Vsebnost kisika v EPŽ-ingotu pri optimalnih pogojih talenja je določena z reakcijo



Konstanta ravnotežja za to reakcijo:

$$K'_{\text{Si, O}} = [\% \text{ Si}] [\% \text{ O}]^2 = K_{\text{Si, O}} \frac{a_{\text{SiO}_2}}{f_{\text{Si}} \cdot f_{\text{O}}^2}$$

kaže, da je vsebnost kisika pri konstantni temperaturi in vsebnosti silicija v jeklu določena predvsem z afiniteto SiO₂ v žlindri, oziroma z bazičnostjo žlindre, kot je to razvidno iz slike 2.⁵



Slika 2

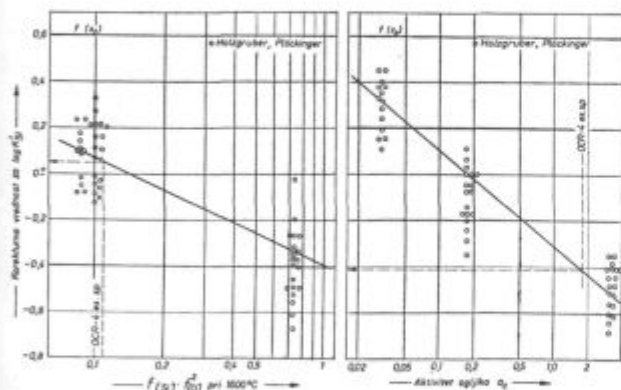
Vpliv bazičnosti žindre na dezoksidacijsko sposobnost silicija pri EPŽ postopku

Pri tem je treba upoštevati še korekcije konstante K'_{Si} , ogleda vpliva kemične sestave jekla na koeficiente aktivnosti silicija in kisika po enačbah (glej sl. 3):

$$f_{Si} = f_{Si}^C \cdot f_{Si}^O \cdot f_{Si}^{Cr} \cdot f_{Si}^{Mn}$$

$$f_O = f_O^C \cdot f_O^O \cdot f_O^{Cr} \cdot f_O^{Mn}$$

pri čemer smo zanemarili vpliv kisika na f_{Si} in f_O .



Slika 3

Vpliv koeficientov aktivnosti silicija in kisika ter aktivnosti ogljika na vrednost konstante K (v diagramu so vrisane vrednosti korektur za jeklo OCR 4 ex. sp.)

Numerična izračunavanja z uporabo termodinamičnih podatkov iz literature⁶ in znane kemične analize jekla so dala vrednosti:

$$f_C = 1,778, \log a_C = 0,25, \log f_{Si} \cdot f_O^2 = -0,963$$

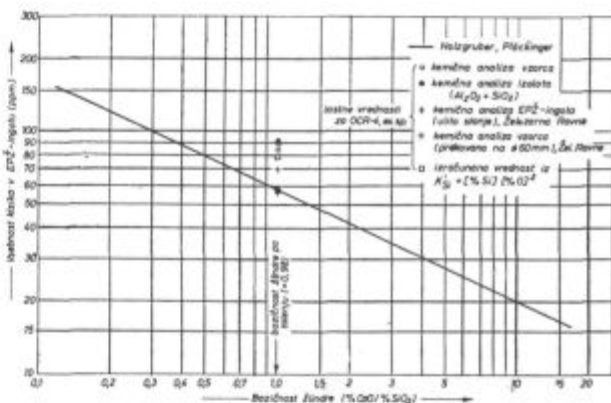
Na osnovi poznane kemične sestave žindre (bazičnosti) in vrednosti za a_C in $f_{Si} \cdot f_O^2$ smo ocenili vrednost konstante $K'_{Si,O}$:

$$\log K'_{Si,O} = -4,780$$

Ker je vsebnost silicija v EPŽ-ingotu poznana, lahko izračunamo termodinamično vsebnost kisika v EPŽ-jeklu:

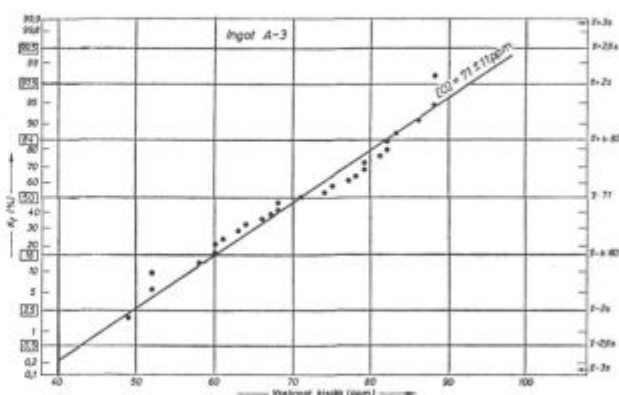
$$[\% O] = \sqrt{\frac{K'_{Si,O}}{[\% Si]}} = 0,0081$$

Ta vrednost se dokaj dobro ujema z analitično ugotovljenimi vrednostmi kisika v EPŽ-bloku, ki je v poprečju ležala med 0,005 in 0,009 % O (glej sliko 4). Porazdelitev kisika po višini ingota je ponazorjena na sliki 5 (ingot, A-3).



Slika 4

Vpliv bazičnosti žindre na poprečno vsebnost kisika v jeklu za kroglčne ležaje (100 Cr 6) po pretaljevanju pod žindro



Slika 5

Razdelitev kisika po prečnem preseku in pri treh različnih višinah ingota

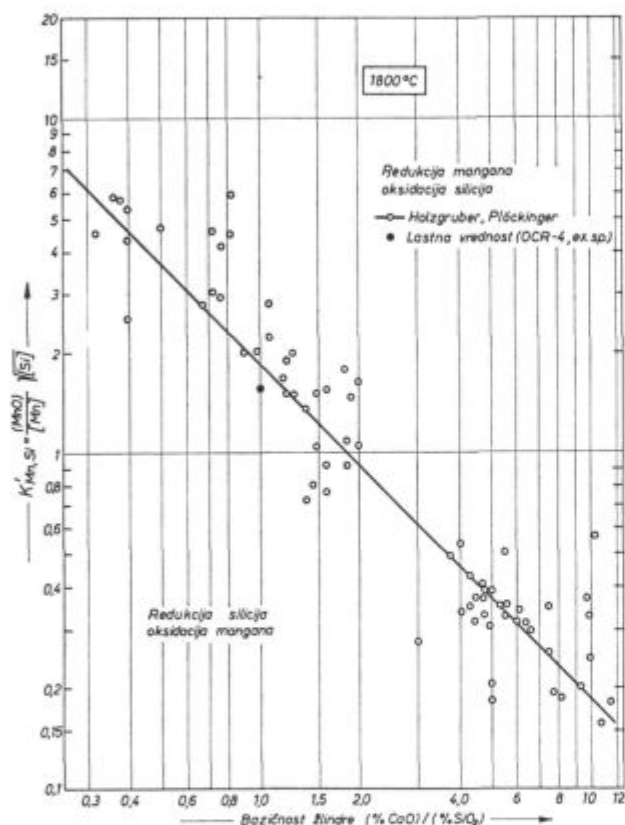
Poleg oksidacije silicija v jeklu, poteka tudi oksidacija mangana po enačbi:



Na osnovi kemične analize jekla in žlindre je mogoče izračunati konstanto $K'_{\text{Mn, Si}}$ in jo primerjati z eksperimentalno vrednostjo za to reakcijo. Naša izračunavanja so dala vrednosti:

$$K'_{\text{Mn, Si}} = \frac{(\text{MnO})}{[\text{Mn}]} \sqrt{[\text{Si}]} = 1,55,$$

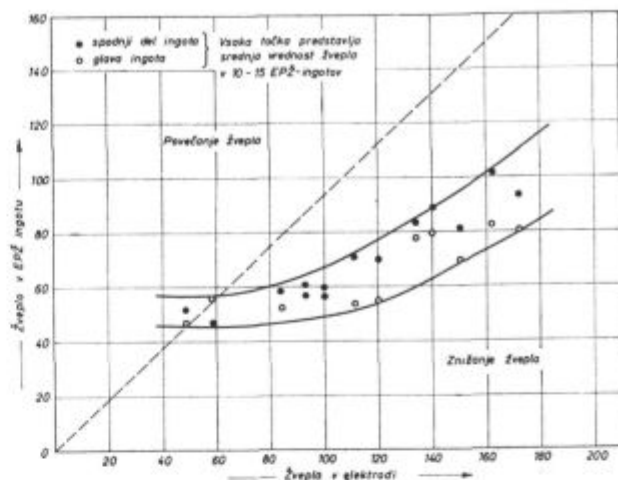
kar se precej približuje eksperimentalnim vrednostim Holzgruberja in Plöckinger-ja⁵, kot je razvidno iz slike 6.



Slika 6

Odvisnost konstante $K'_{\text{Mn, Si}}$ od bazičnosti žlindre pri pretaljevanju jekla po EP2 postopku

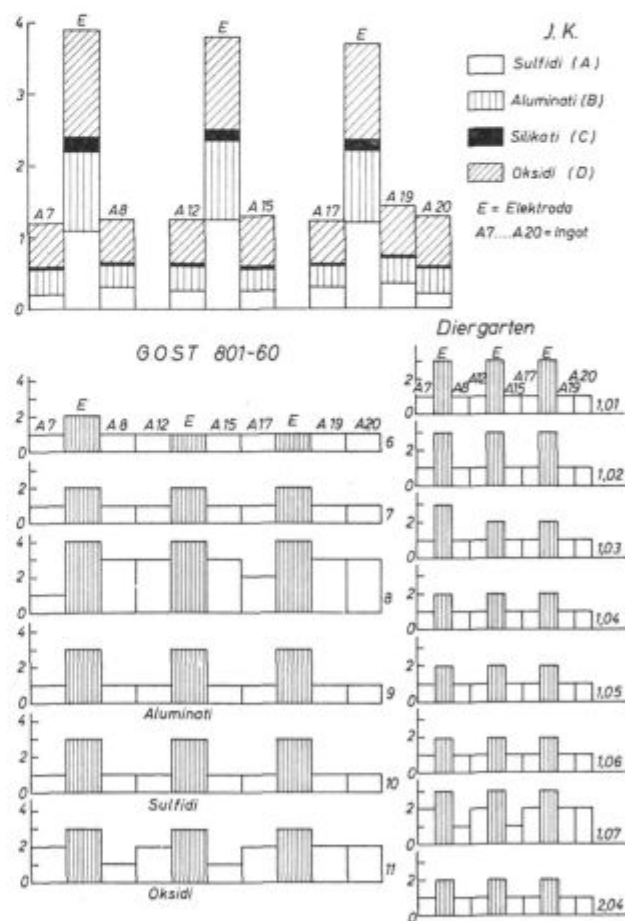
Vsebnost žvepla v jeklu po pretaljevanju pod žlindro je znašala okrog 40 ppm in se bistveno ni spremenila, ker je bila bazičnost žlindre dokaj nizka ($\% \text{CaO} / \% \text{SiO}_2 = 1$). To se popolnoma ujema s podatki drugih avtorjev, ki so pri tej bazičnosti žlindre in vsebnosti Al_2O_3 ugotovili stopnjo razžveplanja okrog 0–20 %^{4, 5, 7}. Pri tem je treba poudariti, da stopnja razžveplanja jekla ni odvisna samo od bazičnosti žlindre, temveč tudi od vsebnosti žvepla v izhodnem materialu (glej sl.7). Pri nizkih vsebnostih žvepla v elektrodi okrog 50–60 ppm, kolikor ga je vseboval naš elektrodni material, nadaljne znižanje vseb-



Slika 7

Vpliv vsebnosti žvepla v izhodnem jeklu za kroglične ležaje (Sh 15) na vsebnost žvepla v EP2 ingotu, po pretaljevanju pod žlindro ANF-6

nosti žvepla z žlindro ANF-6 ni mogoče. Odstranijo pa se grobi sulfidni vključki, toda del sekundarnega žvepla iz žlindre preide v jeklo in se pojavi v obliki drobnih sulfidnih vključkov.



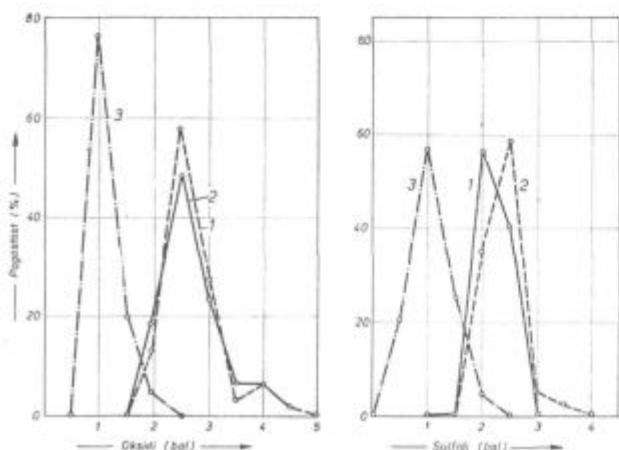
Slika 8

Vsebnost nekovinskih vključkov v jeklu OCR 4 ex. sp. določena po JK, Diergarten in GOST skali (elektrode so bile iste šarže)

4.2. Ocena vsebnosti nekovinskih vključkov

Zelo značilna karakteristika za jekla pretaljena pod žlindro pri njihovi metalografski analizi je odsotnost grobih nekovinskih vključkov.

Dabi vsebnost nekovinskih vključkov v EPŽ-jeklu čim bolj realno ocenili smo vse ingote prekovali na izhodni presek elektrode in nato izdelali komparativno analizo po GOST, J. K. in Diergartenovi skali. Na diagramu sl. 8 so pokazani rezultati metalografske analize. Iz slike je razvidno, da je med pretaljevanjem pod žlindro prišlo do skoraj trikratnega znižanja vseh tipov nekovinskih vključkov. Ti rezultati kažejo, da se je spremenila tudi velikost nekovinskih vključkov in da je večina nekovinskih vključkov premaknjena v področje finejših frakcij. Do popolnoma analognih rezultatov so prišli tudi številni drugi avtorji.^{4, 8}



Slika 9

Vpliv pretaljevanja po EPŽ postopku na čistočo jekla šh 15 glede oksidnih in sulfidnih vključkov (1, 2-izhodni material, 3 EPŽ ingot)

Zelo ilustrativni primer predstavljajo rezultati Lataša in Medovara⁴, ki so grafično prikazani na sliki 9. Pri tem je važno poudariti, da so nekovinski vključki enakomerno porazdeljeni po celotnem volumnu — kar predstavlja veliko prednost EPŽ-jekla. Kot kažejo podatki iz literature popolnoma izginejo blokovne segregacije v EPŽ-ingotu, medtem ko kristalne segregacije (merjene z razmerjem Cr max/Cr min) dosežejo minimalno vrednost, kar se pokaže v občutnem poboljšanju plastičnosti pri višjih temperaturah, kot so to potrdili torzijski poskusi na jeklu 100 Cr 6.⁹

5. ZAKLJUČEK

Rezultate pretaljevanja jekla za kroglične ležaje, kvalitete OCR-4, ex. sp. iz proizvodnega programa Železarne Ravne pod žlindro tipa ANF-6 ($\text{CaF}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$) lahko rezimiramo takole:

1. Vsebnost kisika v EPŽ-jeklu je določena z bazičnostjo žlindre in aktivnostjo silicija in ogljika.

Pri izbrani bazičnosti žlindre $\% \text{CaO}/\% \text{SiO}_2 = 1$ se vsebnost kisika giblje okrog 0,007 %, kar odgovarja termodinamičnemu ravnotežju med silicijem in kisikom.

2. Poleg oksidacije silicija (ki znaša okrog 19 %, ne glede na absolutno vrednost silicija v elektrodi) deloma oksidira tudi mangan (okrog 19 %) in ogljik (okrog 9 %), kar pokaže primerjava kemične analize med izhodnim in EPŽ-jeklom. »Odgor« silicija narašča z naraščajočo bazičnostjo žlindre, medtem ko ta v primeru mangana in ogljika z naraščajočo bazičnostjo pada.

3. Stopnja razžveplanja jekla OCR-4, ex. sp. je definirana z bazičnostjo žlindre in vsebnostjo žvepla v izhodni elektrodi. Pri vsebnosti žvepla v elektrodi okrog 0,005 % in bazičnosti žlindre (ANF-6) okrog ena, stopnja razžveplanja ne presega 15–20 %.

4. Kljub delnemu naraščanju absolutne vsebnosti kisika med pretaljevanjem, kaže metalografska ocena vsebnosti nekovinskih vključkov skoraj trikratno znižanje vsebnosti oksidnih vključkov, kot posledica odstranjevanja grobih vključkov. Ista stopnja znižanja vsebnosti nekovinskih vključkov je opažena tudi pri sulfidnih vključkih.

Ob tej priložnosti bi se zahvalil Razvojnemu oddelku Železarne Ravne, posebej ing. J. Rodiču, ing. A. Rodič in ing. J. Pšeničniku za sodelovanje.

Literatura

- Voinov, S. G., A. G. Salimov: Šarikopodšipnikovaja stal, Moskva, Metallurgizdat 1962
- Murray, J. D., R. F. Johnson: The United Steel Companies LTD (citirano v: Knüppel, H.: Desoxydation und Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen, Band I. Düsseldorf, Verlag Stahleisen M. B. H. 1970)
- Lyty, W.: »Der Sauerstoff als Beurteilungsmasstab für den Reinheitsgrad und den Widerstand gegen Grübchenbildung von Wälzlagerstahl«. Archiv für das Eisenhüttenwesen 42, 1 (1971) 49–53
- Lataš, Ju. V., B. I. Medovar: Elektrošlakovi pereplav, Moskva, Metallurgija, 1970
- Holzgruber, W., E. Plöckinger: »Metallurgische und verfahrenstechnische Grundlagen des Elektroschlacke-Umschmelzens von Stahl, Stahl und Eisen 88, Nr. 12 (1968) 638–648
- Schenck, H., E. Steinmetz: Wirkungsparameter von Begleitelementen flüssiger Eisenlösungen und ihre gegenseitigen Beziehungen, Düsseldorf, Verlag Stahl und Eisen, 1968
- Klingelhöfer, H. J., P. Mathis, A. Choudhury: »Ein Beitrag zur Metallurgie des Elektro-Schlacke-Umschmelzverfahren«, Archiv für das Eisenhüttenwesen, 42, 5 (1971) 299–306.
- Lüdemann, K., — F., H. J. Eckstein, D. Peisker, R. Serchen: »Veränderung des Reinheitsgrades von Wälzlagerstahl durch Umschmelzen nach Sonderverfahren«, Freiburger Forschungshefte, B 122 (1966) 181–193
- Holzgruber, W., G. Kühnelt, E. Plöckinger: »Der Seigerungsarme und gesteuert kristallisierte Stahlblock — Das ESU-Verfahren, ein Weg hiezu«, Radex-Rundschau, 3 (1970) 163–170.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Ergebnisse der Elektroschlackeumschmelzens des Kugellagerstahles der Qualität OCR 4 ex. sp. aus dem Erzeugungsprogramm des Hüttenwerkes Ravne unter der Schlake ANF-6 ($\text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) können wie folgend erörtert werden.

1. Der Sauerstoffgehalt des ESU Stahles wird durch die Basizität der Schlacke und durch die Aktivität von Si und C bestimmt. Bei der gewählten Schlackenbasizität $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1$ wird der Sauerstoffgehalt rund 0,007 %, was dem thermodynamischen Gleichgewicht zwischen Si und Sauerstoff entspricht.

2. Neben dem Si Abbrand (es beträgt 19 % unabhängig von dem Si Gehalt in der Elektrode), wird zum Teil auch Mangan (rund 19 %) und Kohlenstoff (rund 9 %) oxydiert, was durch den Vergleich der chemischen Zusammensetzung zwischen dem Ausgangs- und ESU-Stahl errechnet

wird. Der Abbrand von Silizium wächst mit der wachsenden Basizität der Schlacke, indem er bei Mangan und Kohlenstoff mit der wachsenden Basizität fällt.

3. Der Entschwefelungsgrad des Stahles OCR 4 ex. sp. wird von der Basizität der Schlacke und dem Schwefelgehalt in der Ausgangselektrode bestimmt. Wenn der Schwefelgehalt in der Elektrode rund 0,005 %, und die Basizität der Schlacke (ANF-6) 1 beträgt, übertrifft der Entschwefelungsgrad nicht 15 bis 20 %.

4. Trotzdem dass während des Umschmelzens der absolute Sauerstoffgehalt zunimmt, zeigt die metallographische Untersuchung fast eine dreifache Verminderung der oxydischen Einschlüsse als Folge der günstigen Abscheidungsverhältnisse für die groben Oxyde. Eine gleich grosse Verminderung wird auch bei den sulfidischen Einschlüssen beobachtet.

SUMMARY

The results of ERS of the steel OCR 4 ex. sp. for ball bearings from the production program of Ironworks Ravne can be summarized as follows:

1. Oxygen content of refined steel was determined with the slag basicity and the activity of Si and C. When working with the slag basicity $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1$ the oxygen content of steel was approx. 0,007 % which corresponds to the thermodynamical equilibrium between silicon and oxygen.

2. The comparison of the chemical analyses of the initial and refined steel revealed that the silicon content of refined steel was decreased due to the oxidation by approx. 19 % independent on the silicon content of the electrode. The corresponding decrease of manganese and carbon was 19 % and 9 %, respectively. The decrease in

the silicon content increases with the slag basicity whereas the decrease in manganese and carbon content decreases with slag basicity.

3. The desulfuration rate of the steel OCR 4 ex. sp. is determined with the slag basicity and the sulfur content of the electrode. When working with ANF-6 slag of the basicity $B = 1$ and at the sulfur content of the electrode 0,005 % the desulfuration rate does not exceed 15–20 %.

4. Despite a partial increase in the oxygen content of refined steel, metallographic investigation showed that the amount of oxide inclusions was decreased by three times approx. which resulted from the removal of coarse oxide inclusions. The amount of the sulfide inclusions was decreased in approx. the same degree.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных результатов исследования переплава стали для шарикоподшипников марки OCR 4 ex, спес. программа производства металлургического завода Равне (Ravne) под шлаком вида ANF-6 ($\text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) можно вывести следующие заключения:

1. Содержание O_2 в стали марки EP2 определено основностью шлака и активностью Si и C. При выборе основности шлака $\text{CaO} : \% \text{SiO}_2 = 1$ содержание кислорода прибл. 0,007 % что соответствует термодинамическому равновесию между Si и кислорода.

2. Параллельно с окислением Si которое составляет прибл. около 19 % несмотря на абсолютное содержание Si в электроде, окисляется частично Mn (также прибл. 19 %) и C (прибл. 9 %), что доказано химическим анализом исходной и EP2-стали. Угар

Si увеличивается с повышением основности шлака а Mn и C уменьшается.

3. Степень десульфурации стали OCR-4 определена основностью шлака и содержанием серы в в электроде. Если электрода содержит около 0,005 % S и основность шлака прибл. 1 то степень десульфурации не превосходит 15–20 %.

4. Несмотря на частичное повышение абсолютного содержания O_2 во время переплавки установлено металлографическим путем что содержание оксидных включений три раза меньше в сравнении с сталью до переплавки. Тоже самое установлено при сульфидных включений, а также и при неметаллических.