

Izkušnje Železarne Ravne na področju tehnologije, kontrole kakovosti in raziskav v EPŽ proizvodnji

DK: 669.187.3 : 669-154.9
ASM/SLA: D 8p, D 8n

Švajger Milan, Jakob Lamut

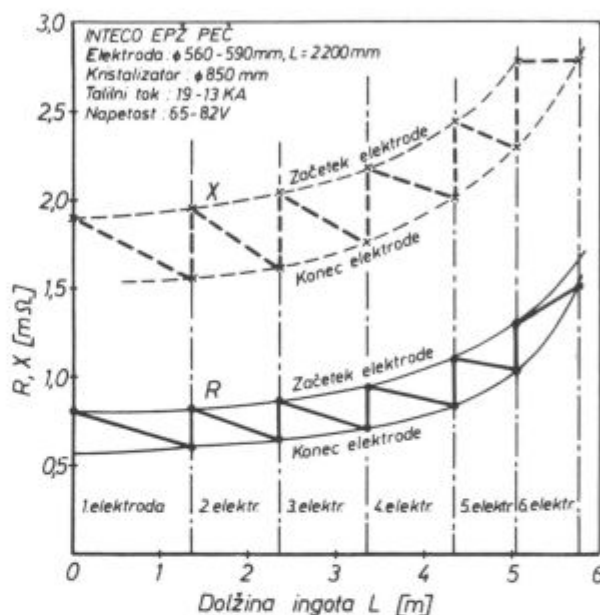
Uvod

V desetih letih proizvodnje EPŽ jekla v Železarni Ravne smo si nabrali bogate izkušnje v tehnologiji priprave elektrod, pretaljevanja in predelave EPŽ ingotov, kot tudi na področju kontrole procesa in izdelkov. Specializacija v proizvodnjo hladnih valjev je narekovala potrebo po večjih EPŽ ingotih, in s tem novo EPŽ napravo. Tehnologija pretaljevanja na novi peči, kjer pretaljujemo ingote do dolžine 6 m, je s stališča kvalitete in kontrole bistveno zahtevnejša in bo del te problematike v nadaljevanju tudi opisan.

1. Vodenje električnih parametrov med pretaljevanjem dolgih ingotov

Pretaljevanje dolgih EPŽ ingotov do dolžine 6 m obvezno zahteva med pretaljevanjem menjavo elektrod, ker je končna teža ingota tudi do 10-krat večja od teže elektrode. Vpliv menjave elektrode med procesom je na peči firme INTECO odlično rešen z avtomatiko, in če je menjava pravilno izvedena, na kvaliteto ingota nima vpliva. Pod terminom »pravilna menjava elektrode« razumemo čim krajši čas menjave in vodenje električnih parametrov pred menjavo po njej, tako da anuliramo vpliv prekinitve dovoda električne moči v žlindrino kopel na pogoje strjevanja. To dosežemo tako, da z regulacijo dovoda moči pred menjavo nekoliko zvišamo temperaturo žlindrine kopeli, po menjavi pa zvišamo dovod moči za toliko, da kompenziramo večje ohmske in induktivne izgube, ki nastopijo z novo, daljšo elektrodo. Nadoknaditi moramo tudi toplotne izgube, ki so nastale v času prekinitve dovoda električne moči in potopitve nove hladne elektrode v žlindrino kopel. Toplotne izgube med menjavo zmanjšamo s čim krajšim časom prekinitve dovoda moči. Termošok, ki ga povzroči v žlindrini kopeli nova elektroda, zmanjšamo s predgretjem elektrode na določeno temperaturo, ki je odvisna od nagnjenosti jekla k škajenju in znaša od 600–800 °C. Ohmska in induktivna upornost se spreminjata z dolžino ingota in elektrode ter sta značilni karakteristiki posamezne peči. Med pretaljevanjem dolgih ingotov z menjavo elektrod se ohmska in induktivna upornost spreminjata nepovezano in dobimo značilen žagasti diagram (slika 1), kjer zob predstavlja spremembo upornosti znotraj pretaljevanja ene elektrode, ukrivljenost žage pa predstavlja povečanje upornosti zaradi naraščanja dolžine ingota. Takšno dinamično spreminjanje upornosti, in s tem izgub zahteva stalno spreminjanje električne moči transformatorja, če želimo imeti konstantno dovodeno moč v žlindrino kopel, in s tem enakomerno kristalizacijo po celi dolžini ingota.

To nalogo smo prepustili procesnemu računalniku PDP 11/23, ki na osnovi tehnoloških enačb in znanih sprememb upornosti sproti izračunava potrebno moč,



Slika 1

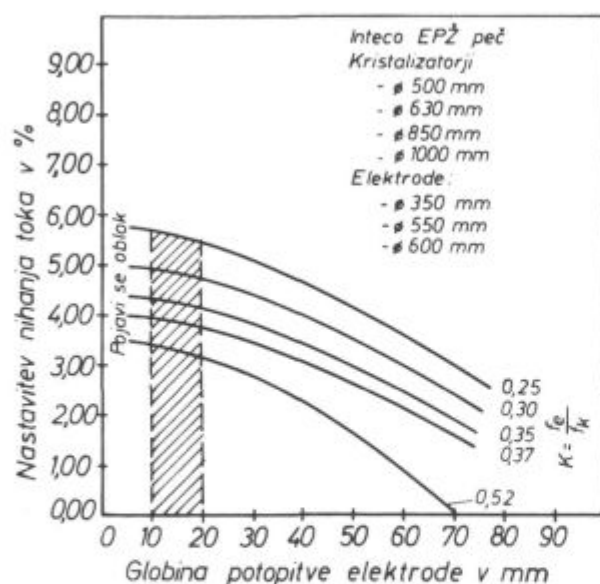
Ohmska in induktivna upornost EPŽ peči firme INTECO v odvisnosti od dolžine ingota

Fig. 1

Ohmic resistance and inductive resistance of the INTECO ESR furnace depending on the ingot length

napetost in tok. Za izračun omenjenih parametrov pa je pogoj, da sta sestava žlindre in temperatura med celotnim procesom pretaljevanja konstantni, sicer moramo upoštevati spremembo specifične ohmske upornosti žlindre. Kot bomo pozneje videli, se sestava žlindre med pretaljevanjem močno spreminja, s tem pa tudi specifična upornost. Naraščanje upornosti žlindrine kopeli povzroči ob enakem talilnem toku vedno globlje potopljeno elektrodo, kar neugodno vpliva na kvaliteto in površino ingota. Idealna potopitev elektrode v žlindrino kopel je 10–20 mm. Globlje ko bo elektroda potopljena, manjša bodo nihanja talilnega toka in obratno. Pri premajhni potopitvi so nihanja velika in periodično se pojavlja električni oblok. Regulacija potopitve elektrode dopušča samo tista nihanja talilnega toka, ki smo jih izbrali za določeno kombinacijo kristalizatorja in elektrode (slika 2).

Sprememba sestave žlindre oziroma upornosti žlindrine kopeli med procesom povzroči »zabijanje« elektrode oziroma manjše nihanje talilnega toka. V tem primeru regulacija potopitve aktivira motor potenciometra in samodejno nastavi ustrezni talilni tok. S tem je zagotovljena konstantna potopitev elektrode v žlindrino ko-



Slika 2

Vpliv nihanja talilnega toka na globino potopitve elektrode

Fig. 2

Influence of the oscillation of melting current on the dipping depth of the electrode

pel. Konstantno talilno hitrost oziroma dovod električne moči reguliramo sedaj samo z napetostjo. Torej računalnik določi potrebno moč, tok in napetost le na začetku, pozneje pa na osnovi spremembe teže elektrode v časovni enoti kontrolira odstopanje talilne hitrosti od predpisane in izračuna ustrezno novo napetost. S pomočjo avtomatike in računalnika lahko torej vodimo električne parametre med pretaljevanjem poljubno dolgih ingotov, vendar je dolžina ingota omejena s spremembo sestave oziroma lastnostmi žilindre med pretaljevanjem.

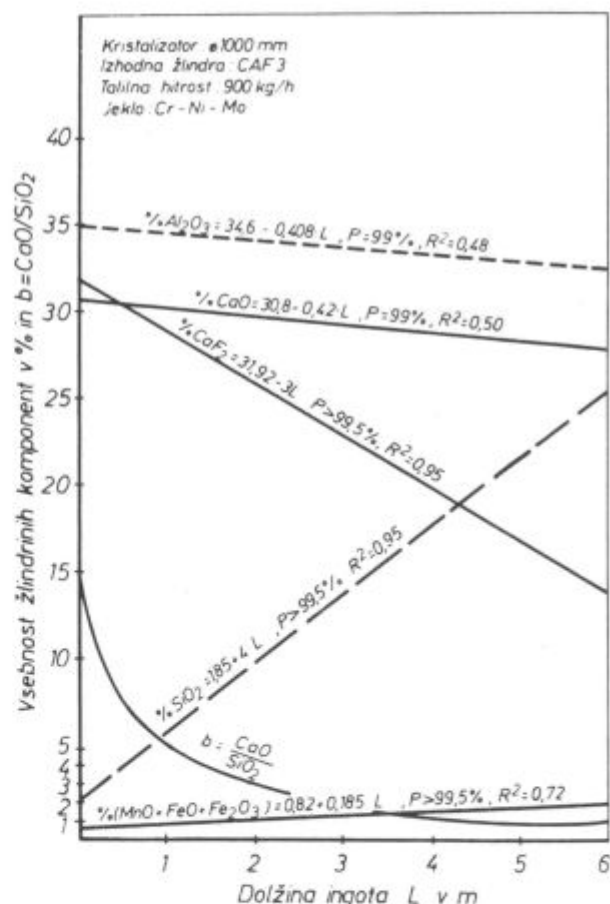
2. Sprememba sestave žilindre in jekla med pretaljevanjem dolgih ingotov

Na osnovi znanih oksiredukcijskih reakcij, ki potekajo med pretaljevanjem pod kemično reaktivno žilindro, nastopi odgor oziroma prigor nekaterih elementov. Posledica tega je, da sestava ingota po višini ni enaka in da elementi, ki odgorevajo, preidejo v žilindro in vplivajo na njeno sestavo.

Ker je količina žilindre določena na osnovi optimalne porabe električne energije, znaša njena teža proti teži 6 m dolgega ingota od 0,6–1,0 %, odvisno od formata kristalizatorja. Takšna količina žilindre omogoča ugodno pretaljevanje ingota do dolžine okoli 3 m, za pretaljevanje daljših ingotov pa njena sestava in lastnosti ne zagotavljajo pogojev za željeno sestavo, in s tem kvaliteto ingota v zgornjem delu. Torej pretaljevanje 6 m dolgih ingotov zahteva popravo sestave žilindre med pretaljevanjem, kar prav tako želimo voditi s procesnim računalnikom. Za izdelavo potrebnih algoritmov potrebujemo sliko dejanskega stanja sprememb sestave žilindre med pretaljevanjem 6 m dolgega ingota in njen vpliv na kvaliteto jekla. V ta namen smo pretalili serijo 6 m dolgih ingotov Ø 1000 mm iz Cr-Mi-Mo jekla za popoljšanje brez poprave žilindre med pretaljevanjem.

Začetna teža žilindre je znašala 0,85 % teže ingota in je imela sestavo, ki jo v diagramu na sliki 3 odčitamo na ordinati. Žilindro smo dezoksidirali z aluminijevimi granulami, tako da je znašala poprečna vsebnost topnega aluminija pri nogi 0,023 % in pri glavi 0,017 %. Z višjo stopnjo dezoksidacije žilindrine kopeli bi ublažili naraščanje vsebnosti SiO_2 , vendar bi dobili tudi višje vsebnosti aluminija v jeklu.

Ob povprečnem odgoru silicija za 0,10 % odgori okrog 35 kg Si/taline oziroma v žilindrino kopel dobimo 75 kg SiO_2 , kar popolnoma ustreza kemični sestavi ob koncu pretaljevanja. Prirastek SiO_2 in dodatek aluminijevih granul se kompenzira z izparevanjem fluorita in odlaganjem žilindre na površini ingota, tako da se teža žilindre praktično ne spremeni. Odgor Si pri nogi je za več kot 30 % večji kot pri glavi ingota, kar je posledica nižje vsebnosti SiO_2 v žilindrini kopeli. Močno naraščanje vsebnosti SiO_2 z dolžino ingota in istočasno zniževanje vsebnosti CaF_2 povzroči zvišanje tališča, viskoznosti in specifične ohmske upornosti žilindre. Zvišanje tališča in viskoznosti žilindre negativno vpliva v fazi zaključevanja ingota, ko dovod električne moči postopoma zmanjšujemo in temperatura kovinske in žilindrine kopeli pada. Pri jeklih z nizkim tališčem se žilindra prva strdi, tekoče jeklo jo zalije in dobimo v glavi ingota grobe makro vključke. Za uspešno zaključevanje ingota



Slika 3

Sprememba sestave in bazičnosti žilindre med pretaljevanjem 6 m dolgih ingotov

Fig. 3

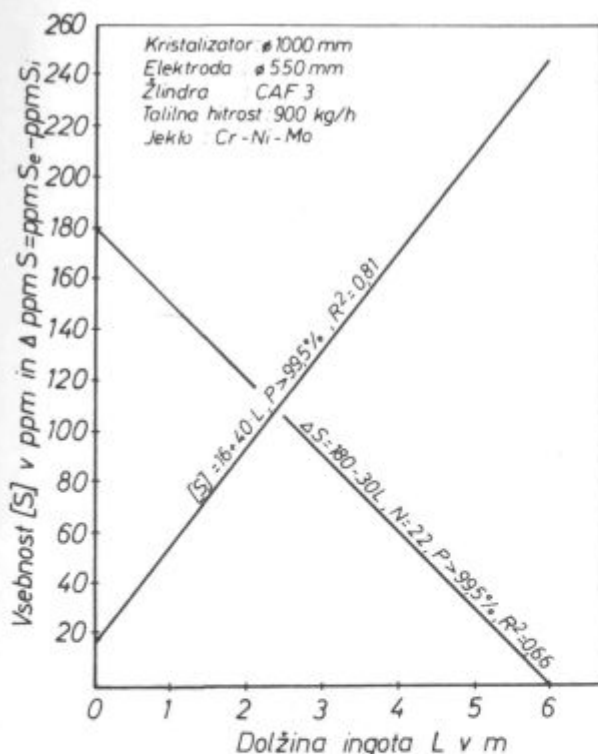
Variation in the composition and the basicity of the slag during remelting 6 m long ESR ingots

brez makro vključkov in lunke v glavi ingota naj bo tališče žlindre vsaj 100°C nižje od tališča jekla. Zvišanje specifične ohmske upornosti pomeni, da ingot Ø 1000 mm in dolžine 6 m začnemo pretaljevati s tokom okrog 18 kA, pred fazo zaključevanja pa za enako talilno hitrost zadošča tok okrog 13 kA. Seveda z naraščanjem vsebnosti SiO₂ pada bazičnost žlindre od začetnega razmerja CaO/SiO₂ ~ 18 pri nogi ingota do ~ 1 pri glavi 6 m dolgega ingota (slika 3).

Zniževanje bazičnosti žlindre ima za posledico zvišanje določenih metalurških reakcij oziroma spremembo vsebnosti nekaterih elementov po višini ingota. Stopnja razžveplanja konstantno pada od okrog 85 % pri nogi do pod 5 % pri glavi ingota. Posledica tega je, da vsebnost S v ingotu z dolžino narašča in doseže pri glavi ingota, kjer praktično ne moremo več govoriti o razžveplanju, tudi do 10× večjo vsebnost kot pri nogi (slika 4).

Bazičnost žlindre ima velik vpliv na vsebnost kisika v pretaljenem ingotu. Pri nogi ingota, ko je bazičnost velika, vsebnost kisika običajno ne presega 10 ppm, pri glavi ingota pa je njegova vsebnost tudi do 4× višja (slika 5).

Ob povprečni vsebnosti vodika v elektrodi 2 ppm smo ga izmerili pri nogi 3–4 ppm, pri glavi 6 m dolgega ingota pa 2–3 ppm. Izkušnje so nas naučile, da so vsebnosti vodika pri tem jeklu do 4 ppm v odkovkih manjših dimenzij le redko povzročile izmeček zaradi kosmičev, da pa enake vsebnosti pri odkovkih, kjer smo uporabili kot vložek ingot Ø 1000 mm, obvezno povzročijo grobe, nepopravljive kosmiče. Vakuumiranje elektrod za EPŽ ingote velikih premerov je neizogibno po-

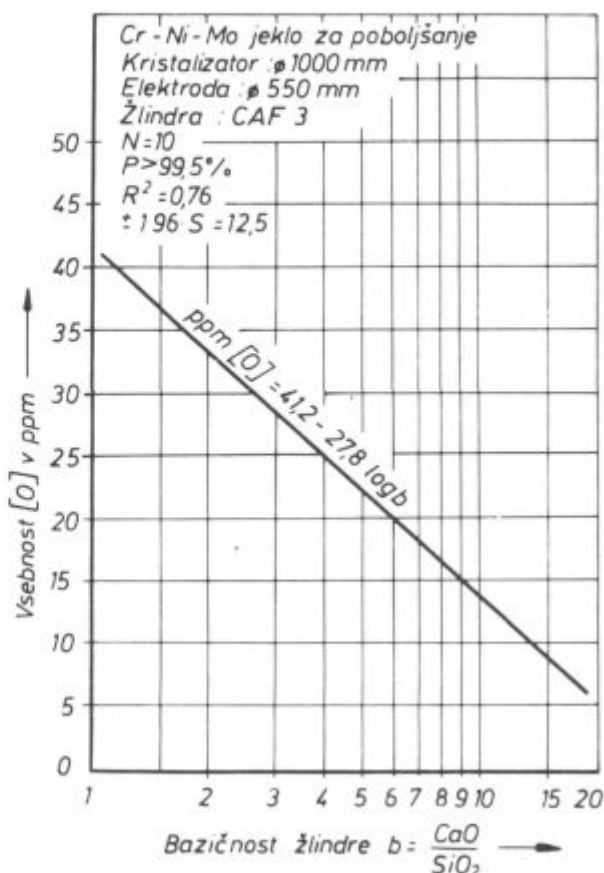


Slika 4

Vsebnost žvepla in razlika vsebnosti žvepla med elektrodo in ingotom, v odvisnosti od dolžine ingota

Fig. 4

Sulphur content, and the difference in the sulphur content between the electrode and the ingot, depending on the ingot length



Slika 5

Vsebnost celotnega kisika v jeklu v odvisnosti od bazičnosti žlindre

Fig. 5

Content of total oxygen in steel depending on the slag basicity

trebno, dodatno pa moramo za jekla, občutljiva na kosmiče, uporabiti tehnologijo pretaljevanja pod zaščitno atmosfero.

Na osnovi dobljenih rezultatov enoletnega obratovanja nove EPŽ peči lahko zaključimo, da je osnovna tehnologija pretaljevanja dolgih ingotov osvojena. Pretaljevanje najdaljših ingotov brez obnavljanja sestave žlindre med pretaljevanjem je nezaželeno, pri večini jekel, ki jih pretaljujemo, pa nemogoče.

3. Ukrepi za zmanjšanje razlik v sestavi med nogo in glavo ingota

Med pretaljevanjem elektrod enake kemične sestave smo videli, da se sestava žlindre med pretaljevanjem močno spreminja, kar je posledica odgora nekaterih elementov, predvsem silicija. Kontinuirno spreminjanje sestave žlindre povzroči stalno menjanje pogojev pretaljevanja, bazičnost žlindre, odgora in prigora nekaterih elementov itd. Če želimo, da bo sestava ingota po višini konstantna, moramo poskrbeti, da se sestava žlindre med celotnim časom pretaljevanja ne bo spremenila. To pa je med pretaljevanjem pod zračno atmosfero brez dodatnih ukrepov nemogoče. Kontinuirno popravljanje sestave žlindre med pretaljevanjem je omejeno, ker vsak večji poseg v proces predstavlja prekinitev, teh pa naj bo čim manj in naj bodo kratkotrajne. Razvili smo tri variante za popravo žlindre med pretaljevanjem, ki

se med seboj razlikujejo po namenu in stopnji poseganja v proces.

Varianta I

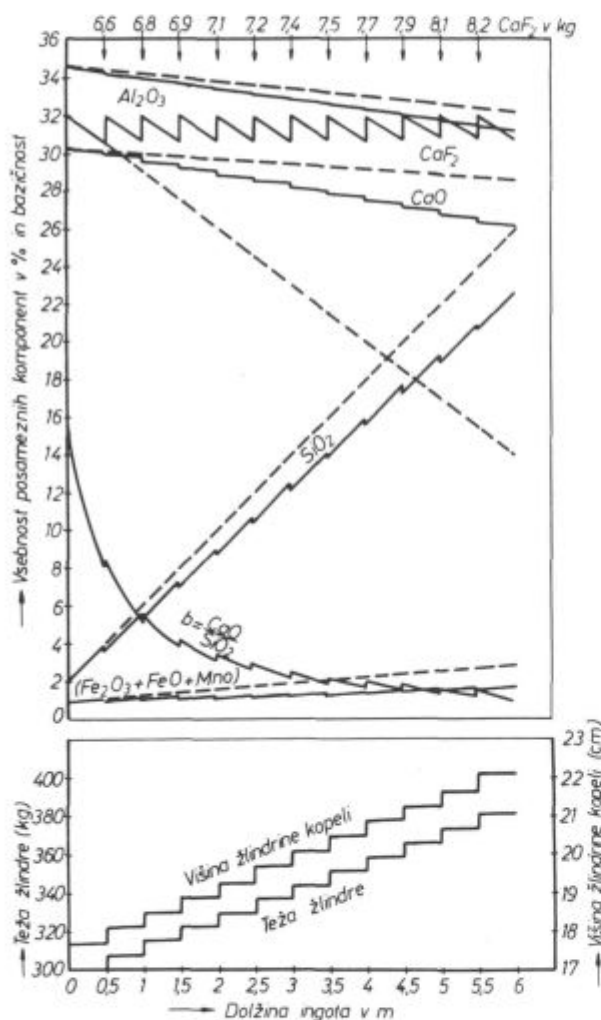
je najenostavnejša in ne zahteva prekinitve procesa pretaljevanja. Uporabljamo jo v primerih, ko pretaljujemo ingote, nekoliko krajše od 6 m. Priporočljiva je za pretaljevanje jekel z vsebnostjo ogljika do 0,25 %, silicija blizu zgornje analize meje, vsebnost žvepla naj bo že v elektrodi dovolj nizka. Med pretaljevanjem dodajamo v žlindrino kopel le CaF_2 , in to na vsake 0,5 m dolžine ingota v količini, ki nam zagotavlja med celotnim časom pretaljevanja njegovo vsebnost okrog 31 %.

Na sliki 6 imamo prikazan primer za ingot, Ø 1000 mm in dolžine 6 m. Prekinjene linije kažejo potek sestave brez dodajanja CaF_2 , polne linije pa za dodajanje CaF_2 . Zaradi dodajanja CaF_2 se vsebnosti ostalih komponent nekoliko znižajo. Ob koncu pretaljevanja bo vsebnost SiO_2 v povprečju 3 % nižja, naraste pa teža žlindre na okrog 380 kg oziroma višina žlindre kopeli od 17,7 na 22 cm. Posledica tega je večja poraba

električne energije v povprečju za 6 %. Konstantna vsebnost CaF_2 daje žlindri med celotnim časom pretaljevanja zadostno nizko viskoznost in tališče, tako da je zmanjšana nevarnost predora in grobih makrovključkov v glavi ingota. Poraba žlindre je 8,6 kg/t in CaF_2 2,3 kg/t.

Varianta II

se razlikuje od variante I po tem, da poleg dodajanja CaF_2 v zgornjem delu ingota še del stare žlindre postopoma zamenjujemo z novo. Količina žlindre je enaka kot pri varianti I, vsebnost SiO_2 v žlindri pa praktično ne preseže vrednosti 16 %. Poleg ugodne viskoznosti in tališča žlindre dosežemo s to varianto potrebno razžveplanje pri glavi ingota. Bazičnost žlindre znaša na začetku pretaljevanja okrog 18, proti koncu pa okrog 2. Poraba žlindre se poveča za 4,3 kg/t. Potek sestave in bazičnosti žlindre je prikazan na sliki 7.

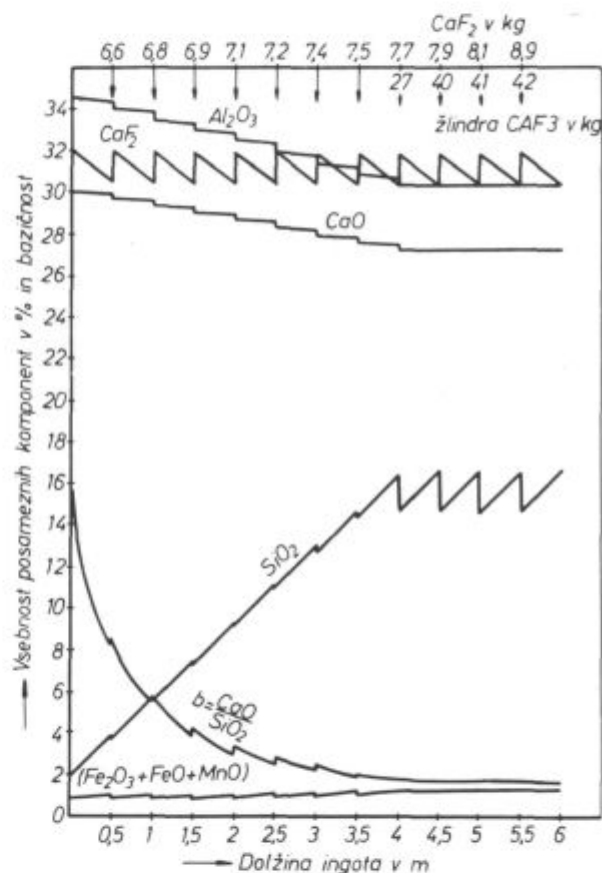


Slika 6

Potek sprememb sestave in količine žlindre z dodajanjem CaF_2 med pretaljevanjem ingota Ø 1000 mm

Fig. 6

Variations of the composition and the amount of slag by adding CaF_2 during remelting a Ø 1000 mm ingot



Slika 7

Potek sprememb sestave in bazičnosti žlindre z dodajanjem CaF_2 in delno zamenjavo stare žlindre z novo med pretaljevanjem ingota Ø 1000 mm

Fig. 7

Variations of the composition and the amount of slag by adding CaF_2 and partial substitution of old slag by the new one during remelting a Ø 1000 mm ingot

Varianta III

je nastala na osnovi dejstva, da praktično vsak EPŽ ingot pretaljujemo pod visoko bazično žlindro le na začetku, pozneje pa bazičnost hitro pade in se asimptotično približuje vrednosti 1. Zato smo varianto II izpo-

polnili in že na začetku novi žlindri dodali del povratne. Prednosti so naslednje:

- zmanjša se poraba žlindre v kg/t jekla, in s tem poceni proizvodnja,
- povratna žlindra iz procesa vsebuje manj plinov, in s tem je navzven vodika pri nogi ingota manjši,
- zaradi višje vsebnosti SiO_2 je specifična ohmska upornost žlindre večja, kar zahteva za enako moč nižje tokove, ki so na štartu pretaljevanja zaželeni,
- odgor Si pri nogi je manjši in razlike v vsebnosti po višini ingota manjše.

Za sestavo mešanice nove in povratne žlindre uporabimo sestave iz naslednje tabele:

Komponente	Sestava žlindre v ut. %	
	nova	stara
CaO	30	28
Al_2O_3	34	32
CaF_2	32	30
SiO_2	2	16–23
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO}$	1	3
$b = \text{CaO}/\text{SiO}_2$	15	1,2–1,7

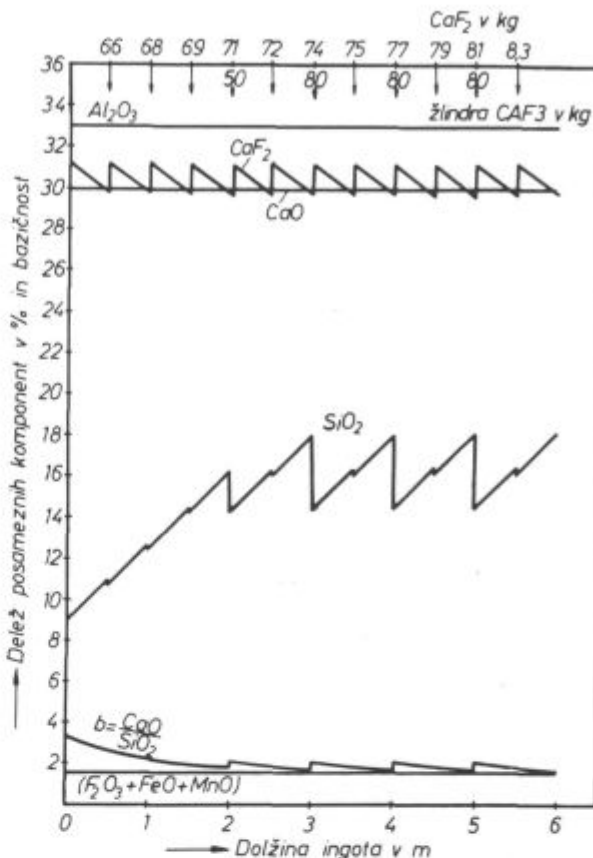
Različna razmerja nove in povratne žlindre nam daje žlindre naslednjih sestav:

Komponente	Razmerja nova/povratna					
	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60
CaO	29,8	29,6	29,4	29,2	29,0	28,8
Al_2O_3	33,8	33,6	33,4	33,2	33,0	32,8
CaF_2	31,8	31,6	31,4	31,2	31,0	30,8
SiO_2	3,4–4,1	4,8–6,2	6,2–8,3	7,6–10,4	9,0–12,5	10,4–14,6
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO}$	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
$b = \text{CaO}/\text{SiO}_2$	7,3–8,8	4,8–6,2	3,5–4,7	2,8–3,8	2,3–3,2	2,0–2,8

Seveda delo s takšno žlindro zahteva popravilo sestave zaradi naraščanja vsebnosti SiO_2 že v spodnjem delu ingota. Primer uporabe žlindre, sestavljene iz 60 % nove in 40 % povratne, kaže slika 8, kjer je prikazan potek vsebnosti posameznih komponent, bazičnosti in dodatkov CaF_2 ter nove žlindre. CaF_2 dodajamo med celotnim časom pretaljevanja na vsakih 0,5 m, del stare žlindre pa začnemo zamenjevati z novo na višini ingota 2 m in ponovimo pri 3, 4 in 5 m. Torej del stare žlindre zamenjamo z novo štirikrat v skupni teži 290 kg. Če upoštevamo, da smo na celotno šaržo dodali še 82 kg CaF_2 , je skupna poraba nove žlindre 13 kg/t jekla in CaF_2 2,3 kg/t jekla. Enako porabo imamo pri varianti II, vendar je ta ugodnejša s stališča kvalitete jekla in praktične izvedbe, ker odvoz stare in dodatek nove žlindre časovno spovpadata z menjavo elektrode. Bazičnost žlindre se med pretaljevanjem le malo spreminja.

Poleg stalnega spreminjanja sestave žlindre in s tem pogojev pretaljevanja vpliva na sestavo ingota še različna sestava elektrod.

Pretaljevanje elektrod različnih matičnih šarž in izbranih starih valjev v en EPŽ ingot je mogoče le tedaj, kadar se v sestavi ne razlikujejo več, kot je to s predpisom dovoljeno. Ker predpisi dovoljujejo minimalna odstopanja, v večini primerov tega pogoja ne izpolnjujemo. V tem primeru uporabimo tehnologijo dolgega pri EPŽ procesu, kar je bilo podrobneje opisano v 1. številki Že Zb 18 (1984).



Slika 8

Potek sestave in bazičnosti žlindre z dodajanjem CaF_2 , dodatkom 40 % stare žlindre na začetku in zamenjavo stare žlindre z novo med pretaljevanjem ingota Ø 1000 mm

Fig. 8

Variations of the composition and the amount of slag by adding CaF_2 , and the addition of 40 % old slag in the beginning, and the substitution of old slag by the new one during remelting a Ø 1000 mm ingot

ZAKLJUČEK

Vsebnosti posameznih elementov so po dolžini ingota različne, kar je pogojeno z malo količino žlindre in dolžino ingota. Nakazali smo možnosti za odpravo teh razlik in metod, ki jih uporabljamo v EPŽ obratu železarne Ravne. Pretaljevanje dolgih EPŽ ingotov s popravilo sestave žlindre med pretaljevanjem nam da zadovoljive rezultate glede homogene sestave vzdolž ingota. Smemo trditi, da je računalniško vodenje električnih parametrov in poprave sestave žlindre med pretaljevanjem nenadomestljivo za pretaljevanje kakovostno neoporečnih dolgih EPŽ ingotov.

Literatura:

1. M. Švajger: Magistrska naloga, VTO Montanistika, Univerza E. Kardelja v Ljubljani, 1984.
2. Projekt P-24: Razvoj EPŽ v Železarni Ravne, interna dokumentacija.

ZUSAMENFASSUNG

Die Zweijährigen Erfahrungen der Umschmelzung langer ESU Blöcke von 1000 mm Durchmesser und 36 Tonnen Gewicht werden beschrieben. Wegen der chemischen Reaktionen die während der Umschmelzung unter der Luftatmosphäre verlaufen entstehen grosse Unterschiede im Gehalt einiger Elemente zwischen Fuss und Kopf des ESU Ingots. Diese Unterschiede sind verhältnissgleich der Länge des Ingots. Im

Hüttenwerk Ravne hat man durch die Korrektur der Schlacke während der Umschmelzung erreicht, dass sich diese und damit auch die Stahlzusammensetzung während der Umschmelzung so wenig wie möglich ändern. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, dass auch lange Blöcke homogen umgeschmolzen werden.

SUMMARY

Two-year experiences in remelting long ESR ingots with the diameter 1000 mm and the weight 36 tons are described. Due to metallurgical reactions occurring in remelting in air great differences in the content of some elements appear between the bottom and the top of ESR ingots. These differences

are proportional to the ingot length. By correction of the slag composition during the remelting, the slag composition and thus the steel composition during remelting did not vary substantially anymore. Thus the remelting of homogeneous long ingots was achieved in the Ravne Ironworks.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены двухлетние опыты переплавки длинных слитков ЭСП-а диаметра 1000 мм и веса 36 тонн. Вследствии металлургических реакций, которые происходят во время переплавки под воздушной атмосферы получаются значительные разницы, что касается некоторых элементов в донной и головной части слитка ЭСП-а. Эти разницы прямопропорциональны длине слитка. В металлургиче-

ском заводе Железарна Равне авторам этой статьи удалось с поправкой состава шлака во время переплавки, что её состав, а с этим также и состав стали, чем меньше изменялся. Таким образом оказалась возможность выполнения переплава также длинных слитков сравнительно однородного состава.