

# Današnja stopnja razvoja električnega pretaljevanja pod žlindro

## Novo proizvodne možnosti in tehnološki razvoj

UDK: 669.187.3:669-154.9  
ASM/SLA: D8n, D8p

J. Rodič, W. Holzgruber, M. Švajger, J. Šegel

Podan je pregled razvoja od uvedbe prvih EPŽ naprav do današnje stopnje z glavnimi značilnostmi razvojnih stopenj, pa tudi ključni kazalci porabe žlindre, energije, izkoristkov ter osnovni tehnološki parametri pretaljevanja. S posebnim poudarkom je opisan razvoj naprav z značilno električno izvedbo, današnja tehnika EPŽ naprav in stanje regulacijske tehnike. Poseben pomen imajo vodno hlajeni visokotokovni drsni kontakti. Poleg tega je novost tudi elektronska regulacija globine potapljanja elektrode ter računalniško krmiljenje hitrosti pretaljevanja, kar je odločilni parameter za kakovost EPŽ ingotov.

Razvoj EPŽ naprav je omogočil pretaljevanje ingotov večjih premerov in dolžin. Pretaljevanje ingotov večjih premerov je bilo omejeno z jakostjo talilnega toka, večjih dolžin pa s spremembo kemične sestave žlindre in jekla med pretaljevanjem. Razvoj tehnologije pretaljevanja dolgih ingotov omogoča uspešno izdelavo 6 m dolgih ingotov, tehnologija dolegiranja v pogojih EPŽ procesa pa uporabo elektrod različnega izvora, kar ugodno vpliva na ekonomičnost pretaljevanja.

### UVOD

Železarna Ravne je leta 1973 prva v Jugoslaviji uvedla proizvodnjo z električnim pretaljevanjem pod žlindro. Prva EPŽ naprava z eno samo porabno elektrodo in dolgim stabilnim kristalizadorjem je bila sovjetskega izvora za izdelavo ingotov kvadratnega preseka 400 mm in teže 2 t iz elektrod, dolžine do 5 m.

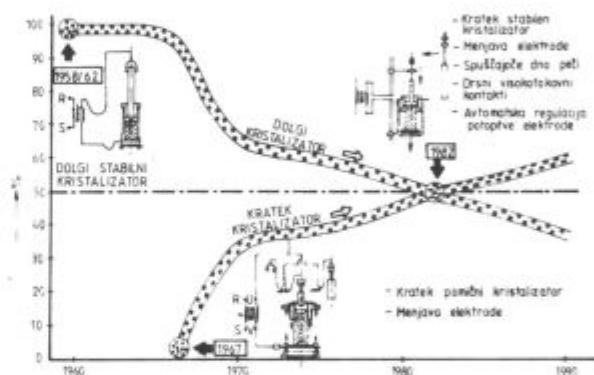
Za odpravo nekaterih tehnoloških omejitev in zagotavljanje boljše prilagodljivosti ter izkoristka smo napravo predelali za uporabo različnih kratkih pomičnih kristalizadorjev v območju od 220 mm do 500 mm z okroglim in kvadratnim presekom.

Z uvedbo sekundarne metalurgije (VAD/VOD) v jeklarnah so se bistveno spremenili cilji novih razvojnih usmeritev električnega pretaljevanja pod žlindro, ki je s tem dobilo vlogo terciarnega jeklarskega procesa, pretežno namenjenega za doseganje kontroliranega strjevanja in izotropnosti posebnih lastnosti jekla.

Konec leta 1982 je začela v železarni Ravne obratovati nova EPŽ naprava, ki je bila delno izdelana doma po inženiringu firme INTECO. Glavne značilnosti te naprave so: stabilni kratki kristalizador, spuščajoče dno

in menjava elektrod; največja dolžina ingotov 6 m s preseki od  $\varnothing 500$  mm— $\varnothing 1000$  mm in brame s presekom  $1000$  mm  $\times$   $550$  mm; največja teža ingota 36 ton; 25 kA; 3250 kVA; 50 Hz; območje sekundarne napetosti 30—130 V v 100 stopnjah.

Ta EPŽ naprava ima pomembno mesto v splošnem razvoju konstrukcijskih izvedb EPŽ naprav, kar prikazuje sl. 1.



Slika 1  
Razvoj EPŽ naprav

Fig. 1  
Development of ESR equipment

Ta EPŽ naprava je bila izdelana po novem sistemu INTECO, ki je bil prvič uporabljen v železarni Ravne in z osnovnim konceptom izkorišča prednosti ter odpravlja slabosti doslej poznanih osnovnih sistemov:

— koaksialnega sistema pretaljevalne naprave s stabilnim kristalizadorjem in eno samo elektrodo;

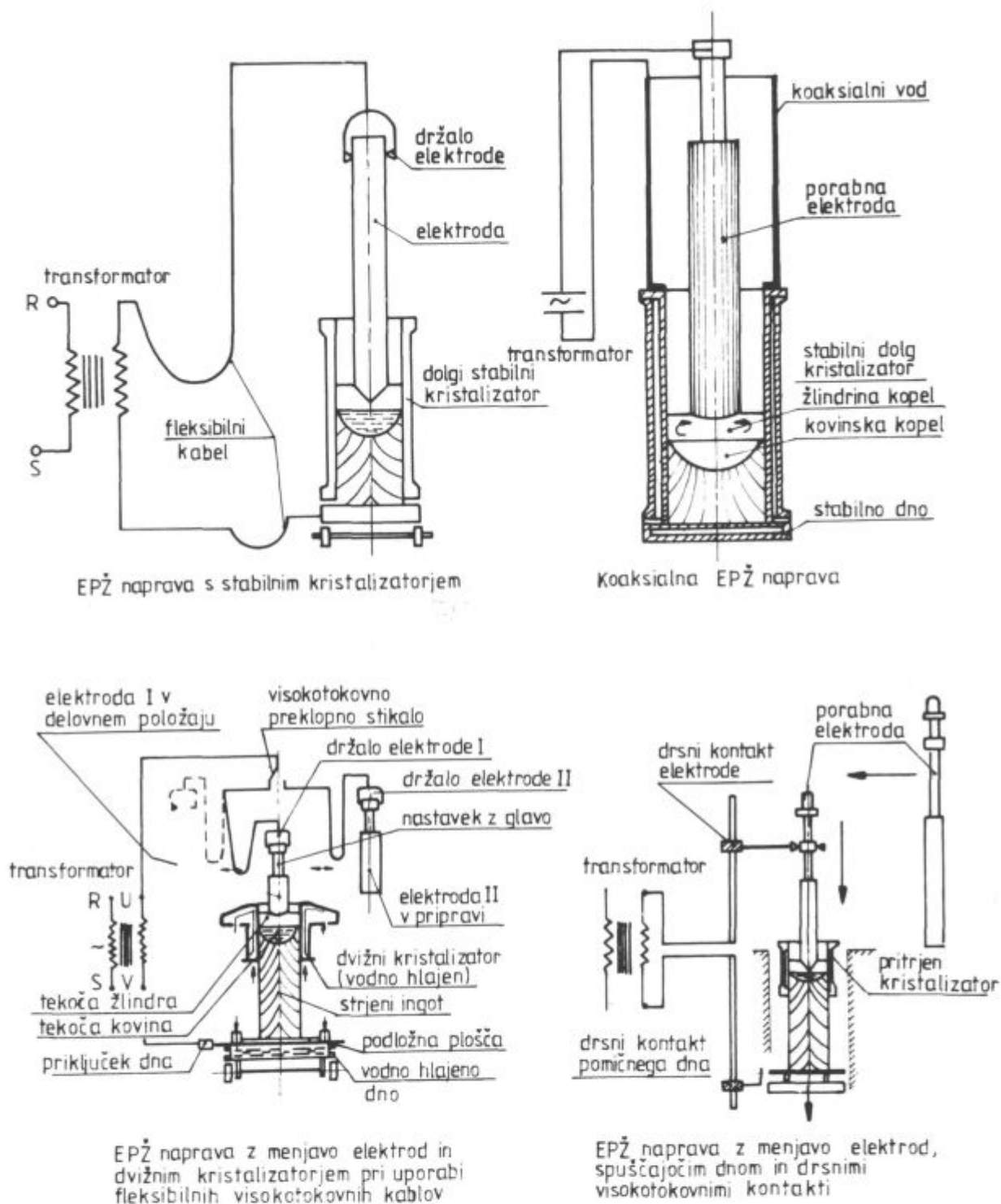
— EPŽ naprav z menjavo elektrod, ki imajo zelo razširjeno zanko jaklega toka in so omejene pri delovanju z mrežno frekvenco zaradi velike induktivne upornosti.

Na sl. 2a—2d so prikazani vsi štirje osnovni sistemi naprav, ki so bistvenega pomena v dosedanjem razvoju električnega pretaljevanja pod žlindro.

Pri novi napravi v železarni Ravne je z novim konceptom prvič uporabljenih več pomembnih novosti. S to napravo so bili izdelani doslej najdaljši EPŽ ingoti

Referat na 8. mednarodnem posvetovanju o vakuumski metalurgiji 30. 9.—4. 10. 1985 v Linzu.

dr. J. Rodič — SLOVENSKE ŽELEZARNE — YU 61000 Ljubljana  
dr. W. Holzgruber — INTECO — A-8600 Bruck a. Mur  
Mgr. M. Švajger, dipl. inž., J. Šegel, dipl. inž. — Slovenske železarne  
ŽELEZARNA RAVNE — YU 62390 Ravne na Koroškem



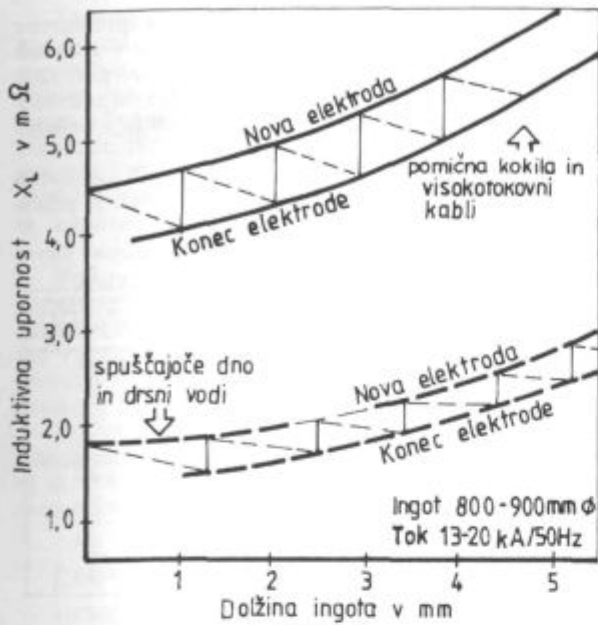
Slika 2  
Osnovni sistemi EPŽ naprav

Fig. 2  
Basic systems of ESR equipment

na svetu. Paralelni dovodni in povratni tokovodi ter visokotokovni drsniki so v celotnem sistemu omogočili bistvene izboljšave nad pričakovanji, saj se je izkazalo, da je s takim sistemom mogoče obratovati pri mrežni frekvenci do jakosti toka celo nad 50 kA. Indu-

ktivne izgube so pri novem sistemu približno 40 % tistih, ki so običajne pri doslej poznanih sistemih (sl. 3).

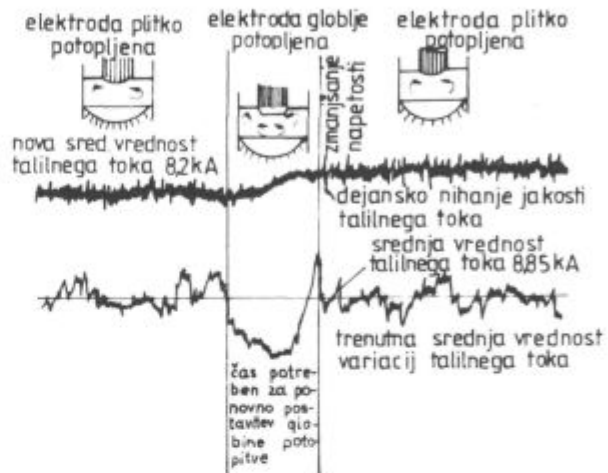
Pomembni so dosedanja dosežki z računalniško podprtim vodenjem proizvodnje in krmiljenjem EPŽ procesov, ker to predstavlja postopen razvoj do popol-



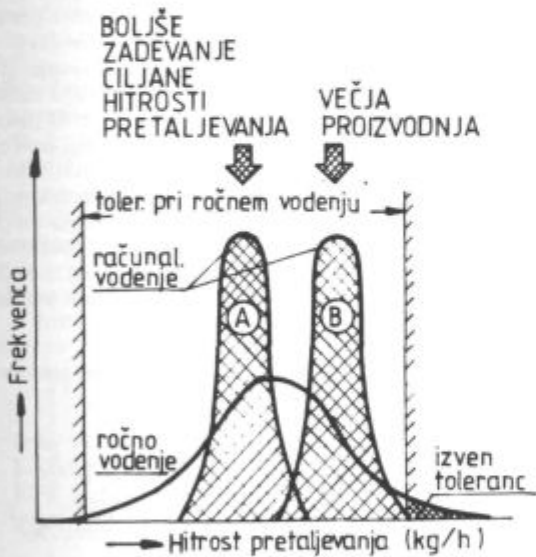
Slika 3  
Primerjava induktivnih izgub EPŽ naprav  
Fig. 3  
Comparison of induction losses of ESR equipment

vost ingotov. Z računalniškim krmiljenjem se nastavlja napetost transformatorja, medtem ko v sistem vključen, prav tako novo razviti krmilnik neprekinjeno vzdržuje optimalno globino potapljanja porabne elektrode pri zahtevani moči (sl. 5). Celoten postopek pretaljevanja se vodi pod pogoji, ki so optimalni za strukturo in površino ingotov.

Ingote za čim boljši izkoristek pretaljujemo na optimalno največjo dolžino in režemo na mero po naročilih

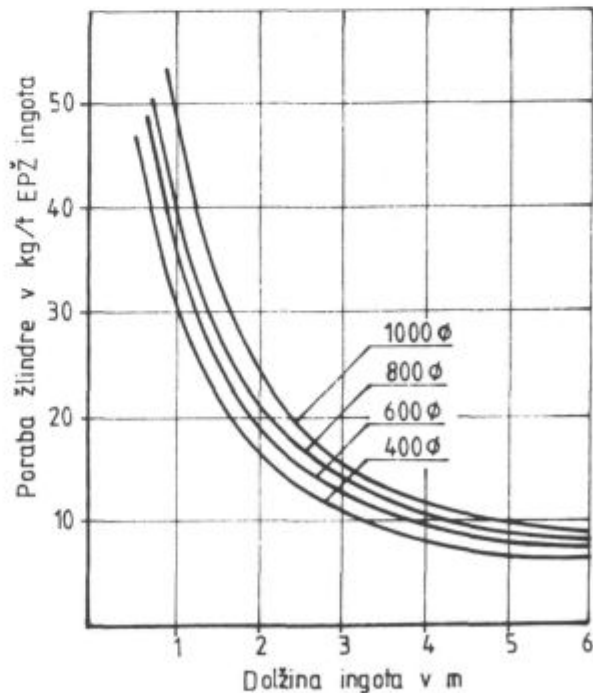


Slika 5  
Primer delovanja regulatorja potopitve elektrode  
Fig. 5  
Example of operation of electrode-dip regulator



- Računalniško vodenje EPŽ procesa:
1. Doseganje enakomerne hitrosti pretaljevanja (kvaliteta) enega ingota in več ingotov iste kvalitete
  2. Boljše zadevanje ciljne hitrosti pretaljevanja (A) in/ali večja proizvodnja (B)
  3. Boljše držanje talilne hitrosti znotraj toleranc

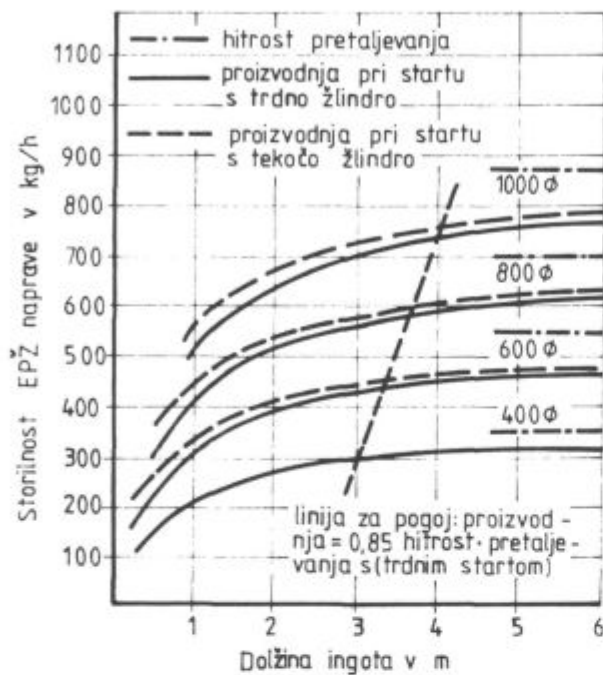
Slika 4  
Kvaliteta računalniškega in ročno vodenega EPŽ procesa  
Fig. 4  
Quality of computer and manual control of the ESR process



Slika 6  
Poraba žlindre na tono EPŽ ingota v odvisnosti od dolžine ingota za različne premere ingotov  
Fig. 6  
Consumption of slag per ton ESR ingot depending on the ingot lengths and diameters

ne avtomatizacije procesa (sl. 4). Osnovo tega razvoja predstavlja nov krmilni sistem, s katerim se vzdržuje konstantna hitrost pretaljevanja, ki je odločilna za kako-

kovačnice. Z izdelavo dolgih EPŽ ingotov se zmanjšuje specifična poraba žlindre (sl. 6), medtem ko se povečuje produktivnost naprave (sl. 7) in izkoristek dobrega jekla (sl. 7, 8).

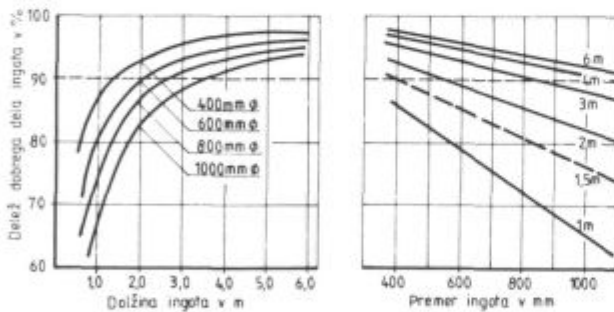


Slika 7

Storitnost EPŽ naprave v odvisnosti od dolžine in premera ingota

Slika 7

Output of ESR equipment after cropping, depending on length and diameter of ingot



Slika 8

Delež dobrega dela ingota po odrezu koncev v odvisnosti od dolžine in premera ingota

Fig. 8

Portion of sound ingot part after cropping, depending on ingot length and diameter

Prav pogosto se ustrezni kosi, izrezani iz nedeformiranih in toplotno obdelanih EPŽ ingotov, uspešno uporabljajo za izdelavo orodij in konstrukcijskih delov.

Posebno področje razvoja predstavlja tehnologija pretaljevanja pod varovalno atmosfero, vse bolj aktualno pa postaja pretaljevanje s korekturami kemične sestave jekla in žlindre med procesom, kar že uporabljamo v redni proizvodnji.

V zadnjih letih so bile izvršene določene spremembe in izboljšave, tako v konstrukciji naprav kot v sistemih krmiljenja procesov, kar omogoča uvedbo že prej znanih posebnih procesov v redno proizvodnjo, in zato lahko pričakujemo, da bo njihov pomen v bližnji prihodnosti še naraščal.

Poskus primerjalnega vrednotenja štirih osnovnih značilnih sistemov pri današnji stopnji razvoja je prikazan v tab. 1.

Tab. 1: Primerjava karakteristik osnovnih tipov EPŽ naprav

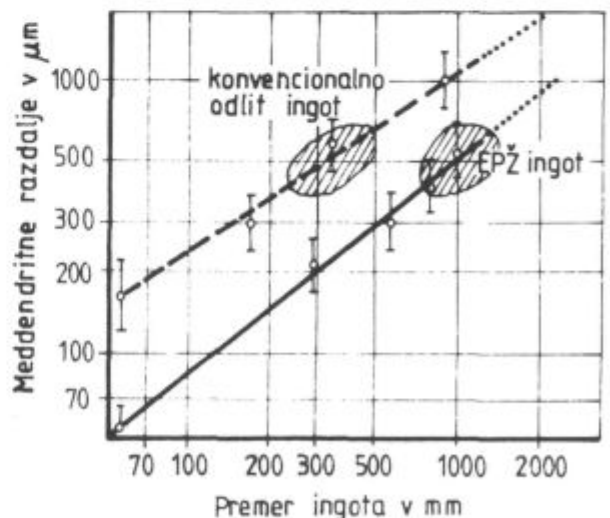
Tip naprave	Osnovni sistem s stalne kristalizatorjem	Kaskadno ali bifazna naprava s stalni kristalizatorjem	Naprava s kratkim pomen kristalizator in menjavi elektrode	Naprava s kratkim stalni kristalizator, menjavi elektrode in spuščanjem žlindre
Dolžina ingota	○	○	○	○
Dolžina elektrode	○	○	○	○
Menjava elektrode	○	○	○	○
Vadřevanje Cu kristalizatorjev	○	○	○	○
Dotapje do žlindre: kopeli	○	○	○	○
Dotapjanje v kopeli	○	○	○	○
Izmenične izgube peči	○	○	○	○
Stružki kristalizatorja	○	○	○	○
Poraba žlindre	○	○	○	○
Izpen ingota	○	○	○	○
Produktivnost	○	○	○	○
Pretaljevanje oblikovnih valjev	○	○	○	○

○ zela ugodno    ○ ugodno    ○ neugodno    ○ zela neugodno

### GLAVNE POSEBNOSTI KAKOVOSTI EPŽ JEKEL

Medtem ko je odžveplanje, homogenost sestave in temperature ter čistost glede na vsebnost nemetalnih vključkov danes zadovoljivo dosežena s procesi sekundarne metalurgije, je zagotavljanje določene makro- in mikrostrukture, posebno glede na makro izcejanje, mogoče edino s krmiljenjem strjevanja. Zato bodo zaradi vpliva na mehanske, tehnološke in fizikalne lastnosti pretaljevalni procesi obdržali ali celo pridobili še večji pomen v proizvodnji visokokvalitetnih materialov v kombinaciji z drugimi procesi sekundarne metalurgije.

Ne da bi se spuščali v podrobnosti, naj samo za primer navedemo, da je struktura EPŽ ingota s premerom 1000 mm glede na meddendritne razdalje enakovredna konvencionalnemu ingotu s premerom samo 300 mm (sl. 9).



Slika 9

Meddendritne razdalje v sredini ingota

Fig. 9

Interdendritic spacings in the centre of ingot

Doseganje enakomernije strukture po vsem preseku ingota je pomembno predvsem pri ledeburitnih, orodnih in brzoreznih jeklih. Iz grobe strukture ledeburitnega evtektika nastajajo ob neugodnih pogojih ogrevanja s koagulacijo grobi karbidi, ki močno poslabšajo lastnosti. Fina evtektiska struktura, ki jo je mogoče zagotoviti s strjevalnim procesom pri optimalnih pogojih pretaljevanja, omogoča zelo enakomerno razporeditev in ugodno velikost karbidov pri optimalnih pogojih vroče predelave.

Postopno optimiranje tehnologije po principih integralnega krmiljenja kakovosti, ki je osnovano na povratnih informacijah sistematičnih raziskav, vodi razvoj v smeri računalniško podprte avtomatizacije pretaljevanja in optimizacije proizvodnje z zagotovljeno kakovostjo in zanesljivostjo izdelkov.

Izkušnje z vplivi EPŽ postopka na lastnosti jekel in glavni razlogi za uporabo EPŽ procesov so že publicirani in dobro poznani, tako da jih ni potrebno posebej obravnavati.

### EKONOMIČNOST

Iskanje novih možnosti za pokrivanje stroškov pretaljevanja s prihranki materiala in dela in z boljšo zanesljivostjo kakovosti je interni problem proizvajalca. Odločitve je treba poiskati z dobro premišljenimi primerjalnimi kalkulacijami vložka, izkoristkov, tehnoloških operacij, toplotnih režimov, zanesljivosti kontrole, primerjave kakovosti, pretaljevanja izmečka in defektnih izdelkov ter drugih dejavnikov, med katerimi je pomembna tudi širša vloga proizvodov in proizvajalca na tržišču.

Posebej moramo omeniti, da take interne odločitve za uporabo EPŽ tehnologije prevladujejo v proizvodnji in da je neposrednih naročil za EPŽ jekla normalno le za manjši del letne proizvodnje.

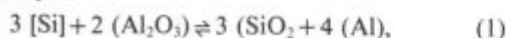
Tehnologija pretaljevanja dolgih ingotov prinaša pomembne ekonomske prednosti. Naše izkušnje z zmanjšanjem specifične porabe žlindre, s povečano produktivnostjo in boljšim izkoristkom dobrega materiala so bile že publicirane.

S pretaljevanjem dolgih ingotov in rezanjem teh na mero po naročilih iz kovačnic je mogoče zagotavljati kovačnici optimalne vložne dimenzije za odkovke.

### RAZVOJ POSEBNIH TEHNOLOŠKIH UKREPOV PRI PRETALJEVANJU DOLGIH EPŽ INGOTOV

#### Spremembe sestave žlindre med procesom

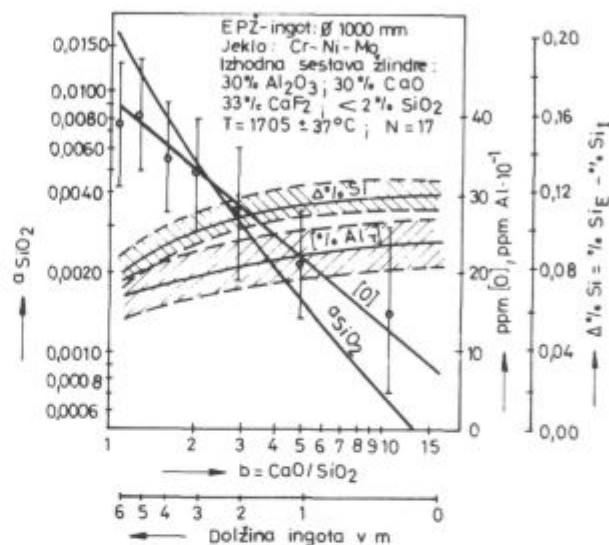
Zaradi oksidacijskih in redukcijskih reakcij se v EPŽ procesu vsebnost nekaterih elementov zaradi odgora zmanjšuje, vsebnost drugih elementov v jeklu pa povečuje. Oksidirajoči elementi prehajajo iz jekla v žlindro, drugi pa potujejo v nasprotni smeri zaradi redukcije. Najaktivnejša elementa sta aluminij in silicij. Njuna vsebnost v sestavi se spreminja po višini ingota zaradi reakcije:



Ta reakcija poteka proti desni intenzivneje pri nogi ingota kot pozneje pri glavi. S termodinamično analizo reakcije je ugotovljena naslednja odvisnost med reakcijskimi komponentami in temperaturo:

$$a_{Al}^{4/3} = a_{Si} \cdot \frac{a_{Al_2O_3}^{2/3}}{a_{SiO_2}} \cdot 10^{-\frac{11690}{T} + 1.582} \quad (2)$$

Po naših izkušnjah ( $Al_2O_3$ ) reducira  $[Si]$ , ker aktivnost  $SiO_2$  v žlindrini kopeli narašča po višini ingota, medtem ko vsebnost aluminija ali njegova aktivnost v jeklu upada (sl. 10). Vsebnost kisika in silicija v jeklu narašča po višini ingota. Medtem ko pri nogi ingota vsebnost kisika normalno ne preseže 10 ppm, je njegova vsebnost celo do štirikrat večja pri glavi 6 m dolgega ingota. Odgor silicija pri nogi  $\Delta \% Si = \% Si_{elektroda} - \% Si_{ingot}$  je v povprečju za 30 % večji kot pri glavi.

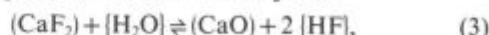


Slika 10  
Sprememba  $a_{SiO_2}$ , [% O], [% Al], in  $[\Delta \% Si]$  med pretaljevanjem dolgega ingota z dezoksidacijo žlindre

Fig. 10  
Variation of  $a_{SiO_2}$ , [% O], [% Al], and [% Si] during remelting of long ingot in a deoxidation of slag

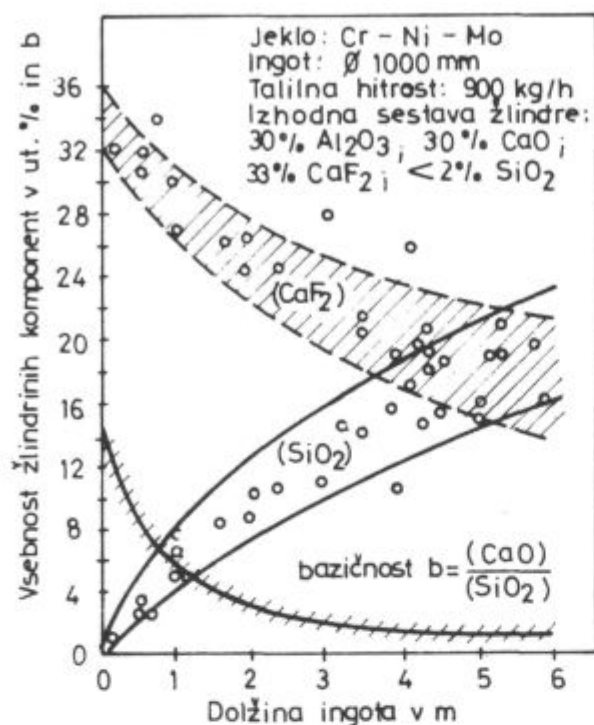
Diagram je izdelan po rezultatih pretaljevanja serije 6 m dolgih ingotov s premerom 1000 mm pri standardnih pogojih. To pomeni, da so bile aluminijeve granule za dezoksidacijo žlindre kontinuirno dozirane v žlindrino kopel s količino, ki zagotavlja povprečno vsebnost aluminija 0,024 % pri nogi in 0,017 % pri glavi. Taka dezoksidacijska stopnja pomeni, da imamo opravka z degresivnim povečevanjem  $SiO_2$  — vsebnosti v žlindri, ki se povečuje od začetne vsebnosti pod 2 %  $SiO_2$  do povprečne vsebnosti 18 %  $SiO_2$  (sl. 11) ob koncu pretaljevanja. Ker se vsebnost CaO in  $Al_2O_3$  v žlindrini kopeli le neznatno spreminja, se bazičnost žlindre močno zmanjšuje, tako da je razmerje  $CaO/SiO_2$  pri začetku povprečno 16 in pri koncu manj kot 2.

Fluor izpareva v skladu z reakcijami:



Zato opažamo močno redukcijo  $CaF_2$  vsebnosti v žlindrini kopeli. Ta se zmanjša od začetne 33 % do manj kot 20 % ob koncu pretaljevanja 6 m dolgega ingota.

Te spremembe ( $SiO_2$ ) in ( $CaF_2$ ) vsebnosti omogoča majhna količina žlindre, ki predstavlja 0,6 do 1 % teže ingota pri pretaljevanju 6 m dolgih ingotov in je določena na osnovi optimalne porabe električne energije. Taka majhna količina žlindre vpliva ugodno na potek pretaljevanja do dolžine 3 metrov. Z daljšimi ingoti postaja



Slika 11  
Sprememba sestave žlindre med pretaljevanjem dolгих ingotov z dezoksidacijo žlindre

Fig. 11  
Variation of slag composition during remelting long ingots by deoxidation of slag

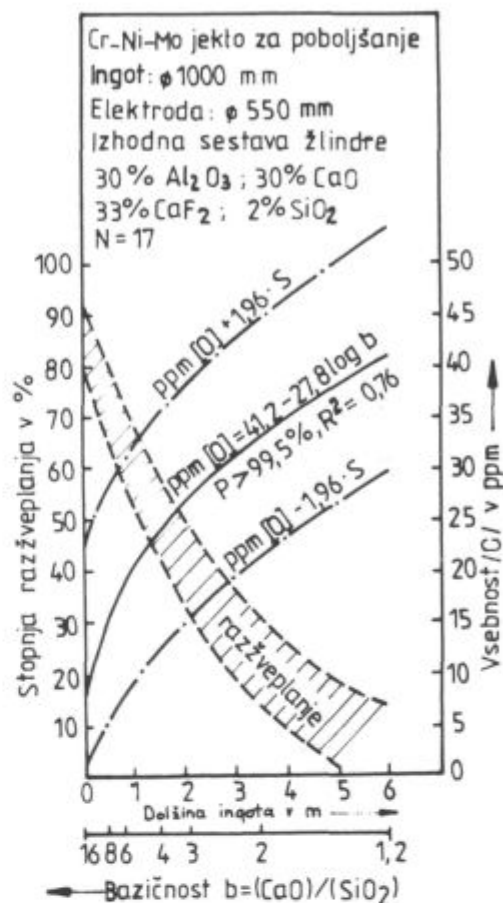
jajo spremembe fizikalno-kemičnih lastnosti takšne, da pogoji za uspešno pretaljevanje in metalurške reakcije niso več zadovoljivi in v nekaterih primerih celo nesprejemljivi. Tališče, viskoznost in specifična omska upornost žlindre se povečujejo z dolžino ingota. Višje tališče in večja viskoznost kažejo negativen vpliv v fazi zaključevanja ingota, ko se dovod električne energije postopoma zmanjšuje in se temperatura žlindre in kovine postopoma znižuje. Pri jeklih z nizkim tališčem se žlindra strjuje prva, delci že strjene žlindre se lahko ulovijo v tekočem jeklu in povzročajo grobe makro vključke v glavi ingota. Za uspešno zaključevanje ingota, brez makro vključkov in lunckerjev pri glavi, mora biti tališče žlindre najmanj 100° C nižje od tališča jekla. Večja specifična upornost žlindre pomeni, da se pretaljevanje ingota Ø 1000 mm in 6 m dolžine začne z jakostjo toka okrog 18 kA, medtem ko je nekoliko pred začetkom zaključevalne faze jakost toka okrog 13 kA zadostna za enako hitrost pretaljevanja.

#### Spremembe sestave jekla

Če se bazičnost žlindre pri pretaljevanju dolгих ingotov zniža, to zadržuje metalurške reakcije. Zaradi tega se stopnja odžveplanja stalno zmanjšuje od 80–90 % pri nogi do manj kot 10 % pri glavi 6 m dolgega ingota. Zaradi tega se odžveplanje zmanjšuje s povečevanjem dolžine ingota in je skoraj enako 0 pri glavi ingota.

Vsebnost kisika v jeklu se prav tako povečuje z dolžino ingota od manj kot 10 ppm pri nogi do več kot 40 ppm pri glavi (sl. 12).

Povečanje vsebnosti vodika med pretaljevanjem na zraku znaša od 1–1,5 ppm pri nogi in do 1 ppm pri gla-



Slika 12  
Stopnja razžveplanja in vsebnost kisika v jeklu v odvisnosti od dolžine ingota

Fig. 12  
Desulphurisation degree and oxygen content in steel depending on the ingot length

vi. S pretaljevanjem pod varovalno atmosfero je mogoče skoraj popolnoma preprečiti to povečanje.

#### Ukrepi za zmanjšanje sprememb v sestavi jekla med ного in glavo EPŽ ingota

Če želimo zagotoviti enakomerno sestavo ingota po vsej višini, moramo poskrbeti, da ostane sestava žlindre v toku celotnega časa pretaljevanja nespremenjena. Tega pri pretaljevanju na zraku ne moremo doseči brez posebnih ukrepov. Kontinuirno popraviljanje sestave žlindre je med pretaljevanjem omejeno, ker vsak večji poseg povzroči določeno motnjo v procesu. Število takih motenj naj bo čim manjše in njihovo trajanje naj bo čim krajše.

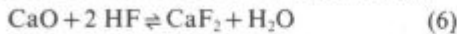
Poseben problem predstavlja pretaljevanje elektrod z neustrezno kemično sestavo ali starih rabljenih valjev različnega izvora, ker bi to povzročalo nedopustna odstopanja od predpisane kemične sestave in že vnaprej povzročalo heterogeno sestavo EPŽ ingotov. Ker so ti problemi kompleksni, lahko razlikujemo naslednje tehnološke ukrepe za zmanjšanje razlik v kemični sestavi med ного in glavo ingotov:

- ukrepi pri pretaljevanju elektrod istega izvora ali elektrod z enako kemično sestavo,
- ukrepi pri pretaljevanju elektrod različnega izvora in z različno kemično sestavo.

**Pretaljevanje elektrod istega izvora**

Razlike v sestavi med ного in glavo ingota so rezultat sprememb v sestavi žlindre, ki povzročajo tudi določene spremembe v sestavi jekel. Za zmanjševanje teh razlik je razvoj prinesel tri metode za popravljanje sestave žlindre med pretaljevanjem. Te tri metode se razlikujejo po cilju, ki ga želimo doseči, in po stopnji motenj v procesu.

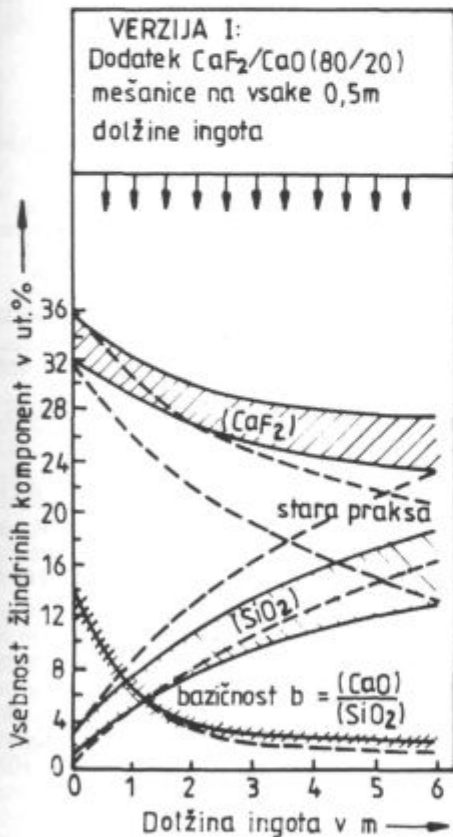
Metoda I je najpreprostejša in najcenejša, pa tudi najbolj pogosto uporabljena v vsakodnevni praksi. Pri tej metodi ni potrebe po večjih motnjah procesa. Za nevtralizacijo agresivnega fluorovodika se dodaja apno. Apno reagira s fluorovodikom po naslednji reakciji:



Pri izhodu čistilne naprave smo našli mešanico približno 80 %  $\text{CaF}_2$  in 20 %  $\text{CaO}$ . Količina te mešanice in vsebnost  $\text{CaF}_2$  je odvisna od premera kristalizatorja in od količine razvijajočih se plinov. Po pazljivem sušenju se mešanica nekontinuirno dozira v kristalizator približno na vsakih 0,5 m dolžine ingota s količino, ki zagotavlja  $\text{CaF}_2$  vsebnost v žlindri med 25 in 30 %. Zaradi dodatkov te mešanice je vsebnost  $\text{SiO}_2$  nekoliko manjša, vendar so ostale lastnosti, kot bazičnost, viskoznost in tališče, zadovoljive. Ta metoda je priporočljiva pri pretaljevanju jekel z manj kot 0,25 % ogljika. Vsebnost silicija v elektrodi naj bo blizu zgornje meje predpisane ke-

mične sestave in vsebnost žvepla v območju predpisanih mej. Količina žlindre se med pretaljevanjem povečuje, kar povzroča rahlo povečanje specifične porabe električne energije (sl. 13).

Metoda II se razlikuje od metode I v tem, da poleg dodajanja  $\text{CaF}_2$  ali  $\text{CaF}_2/\text{CaO}$  mešanice v zgornjem delu ingota en del žlindre zamenjamo enkrat ali dvakrat z novo žlindro. Ker je težko in zamudno ročno zmanjšati količino tekoče žlindre, priporočamo uporabo posebne črpalke. Ta metoda zagotavlja še manjšo vsebnost  $\text{SiO}_2$  v žlindri (sl. 14).

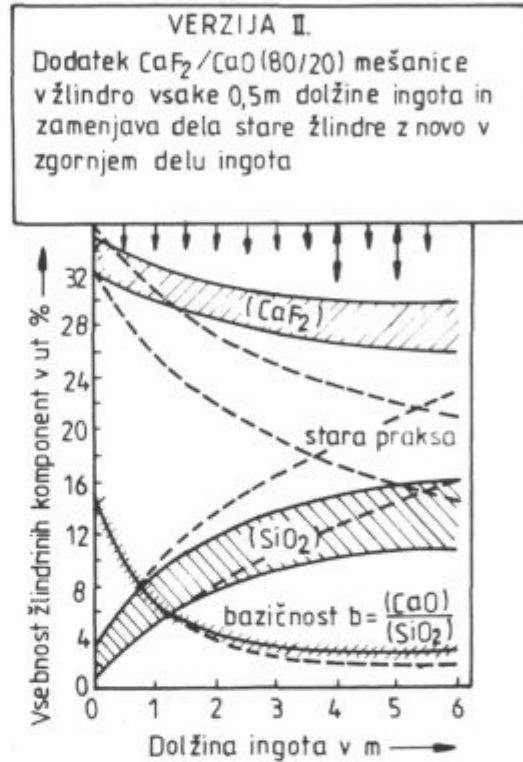


Slika 13

Sprememba vsebnosti ( $\text{SiO}_2$ ) in ( $\text{CaF}_2$ ) v žlindri kopeli v odvisnosti od dolžine ingota s korekturo sestave žlindre po metodi I

Fig. 13

Variation of ( $\text{SiO}_2$ ) and ( $\text{CaF}_2$ ) contents in slag bath depending on ingot length, and by correcting the slag composition according to the method I



Slika 14

Sprememba vsebnosti ( $\text{SiO}_2$ ) in ( $\text{CaF}_2$ ) v žlindri kopeli v odvisnosti od dolžine ingota s korekturo sestave žlindre po metodi II

Fig. 14

Variation of ( $\text{SiO}_2$ ) and ( $\text{CaF}_2$ ) contents in the slag bath depending on ingot length, and by correcting the slag composition according to the method II

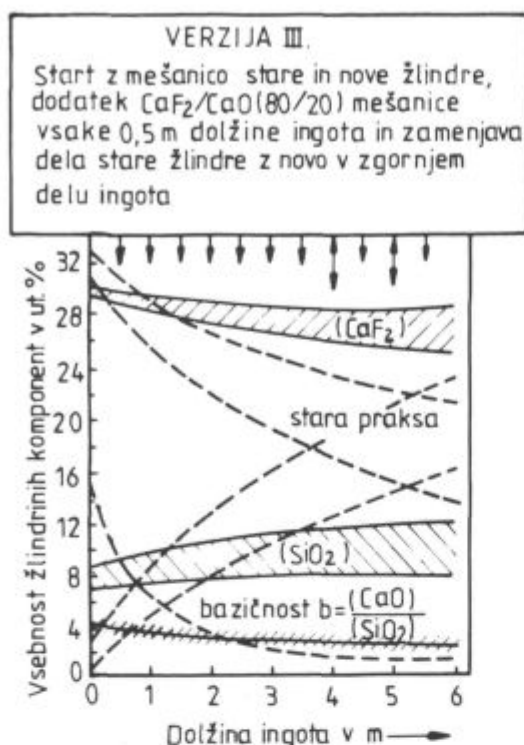
Metodo III smo razvili na osnovi dejstva, da skoraj vsak EPŽ ingot pretaljujemo samo na začetku pod žlindro visoke bazičnosti, kasneje pa se ta bazičnost zmanjša na 2.

Zato del stare rabljene žlindre dodamo novi žlindri že na začetku pretaljevanja, med pretaljevanjem so nato ukrepi enaki kot pri metodi II.

Prednosti te metode so:

- specifična poraba žlindre v kg/t je manjša,
- absorpcija plinov, predvsem vodika pri nogi, je manjša,
- višja vsebnost  $\text{SiO}_2$  v žlindri zmanjša izgube silicija pri nogi in s tem omogoča pretaljevanje z manjšo jakostjo toka.

Kasneje je potrebno izboljšati žlindro z dodatkom nove, in to nekajkrat, tako da bazičnost žlindre ne pade pod 2. S takim načinom lahko dosežemo najbolj enakomerno sestavo 6 m dolgih EPŽ ingotov (sl. 15). Z bolj



Slika 15  
Sprememba vsebnosti  $(SiO_2)$  in  $(CaF_2)$  v žlindrini kopeli v odvisnosti od dolžine ingota s korekturo sestave žlindre po metodi III

Fig. 15  
Variation of  $(SiO_2)$  and  $(CaF_2)$  contents in the slag bath depending on ingot length, and by correcting the slag composition according to the method III

ali manj enakomerno sestavo žlindre v toku celotnega procesa pretaljevanja dolgih ingotov ostanejo pogoji za reakcije med žlindro in kovino nespremenjeni, kar obenem zagotavlja manjše trosenje v porazdelitvi vsebnosti posameznih občutljivih kemičnih elementov vzdolž ingota.

**Krmiljenje kemične sestave ingota in pretaljevanje elektrod različnega izvora**

V splošnem se krmiljenje kemične sestave EPŽ ingotov izvaja z upoštevanjem reakcij med pretaljevanjem in s prilagajanjem kemične sestave uporabljenih elektrod. Če sestava elektrode ne ustreza predpisanim mejam, je potrebno določene popravke izvajati med pretaljevanjem.

Pretaljevanje elektrod različnega izvora, kot so na primer rabljeni valji, je ekonomsko zelo zanimivo, vendar tehnološko dokaj zahtevno. Običajno ni dovolj sortirati elektrode po vsebnosti pomembnih kemičnih elementov v sestavi, zato je potrebno uporabljati tehnologijo dodatnega legiranja v pogojih EPŽ procesa. V glavnem lahko razlikujemo dve različni metodi dodajanja legirnih elementov v kristalizator med pretaljevanjem:

a) Najpomembnejši in zelo prilagodljiv način dodajanja predstavlja uporaba kontinuirne dozirne naprave. Če take naprave nimamo, je še vedno mogoče dodajanje izvajati ročno v čim krajših časovnih presledkih. Zelo pomembna je zrnatost in predhodna priprava ferozlitin, n. pr. žarjenje.

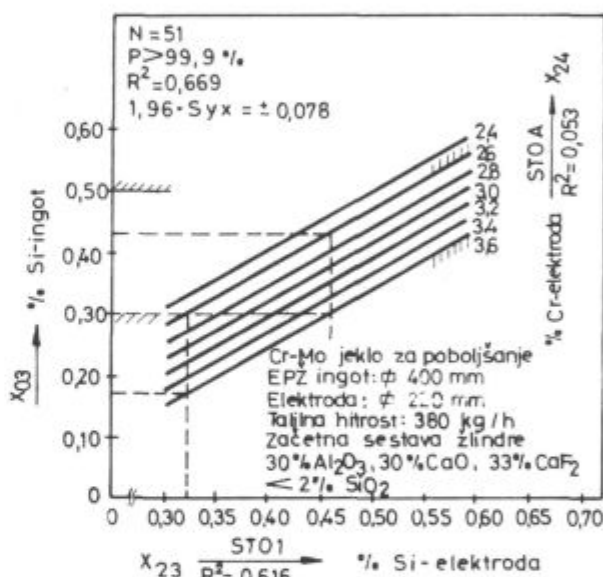
b) Dodatno legiranje določenega elementa z dodatno elektrodo, ki vsebuje določeno višjo vsebnost tega

elementa. Seveda je pri tem zelo važno, da upoštevamo tudi druge elemente, ki jih elektroda vsebuje. Ta dodatna elektroda ni zvezana z električnim izvorom in se lahko odstrani ali pa privari na osnovno elektrodo. Lahko tudi namestimo več takih elektrod okrog osnovne.

Za uspešno dodatno legiranje morajo biti izpolnjeni naslednji 4 pogoji:

- tališče ferozlitine mora biti zelo blizu tališču jekla,
- gostota ferozlitine mora biti enaka ali pa manjša od gostote jekla in večja od gostote tekoče žlindre,
- kadar dodajamo ferozlitine po postopku opisanem pod a), mora imeti ferozlitina ustrezno zrnatost,
- dodajanje mora potekati kontinuirno, če ne, pa mora biti izvajano v čim krajših časovnih presledkih.

Za razlago postopka legiranja prikazuje sl. 16 korelacijo med vsebnostjo silicija v elektrodi in EPŽ ingotu v odvisnosti od vsebnosti kroma v elektrodi. Pri standardnem EPŽ postopku moramo upoštevati določen odgor silicija, ki je odvisen od vsebnosti kroma. Vzemimo za primer predpisano območje za  $Si = 0,30 - 0,50 \%$  in  $Cr = 2,6 - 3,6 \%$ .



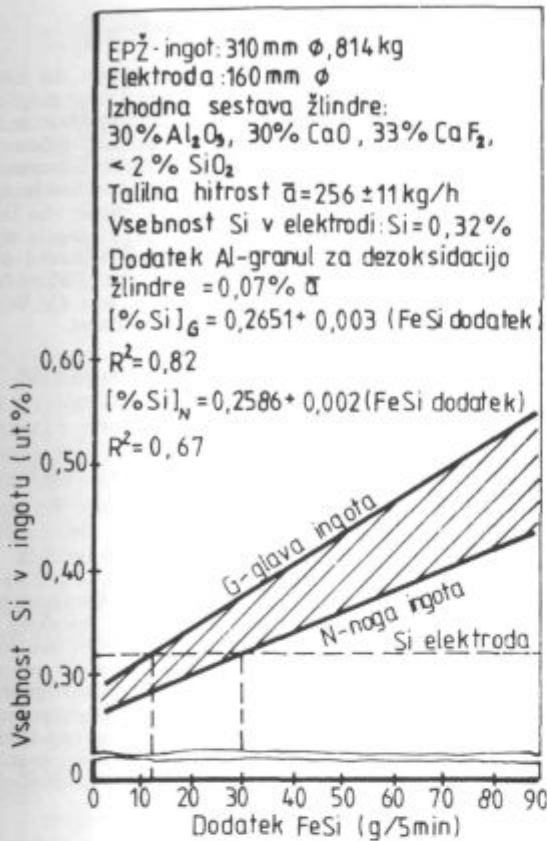
Slika 16  
Vsebnost  $[Si]$  v EPŽ ingotu v odvisnosti od vsebnosti  $[Si]$  in  $[Cr]$  v elektrodi

Fig. 16  
 $[Si]$  content in ESR ingot depending on  $[Si]$  and  $[Cr]$  contents in the electrode

Če je  $Cr = 2,6 \%$ , potem  $Si \geq 0,33 \%$  v elektrodi že zagotavlja vsebnost silicija v ingotu nad predpisano spodnjo mejo. Pri enaki vsebnosti silicija v elektrodi in pri enaki stopnji dezoksidacije žlindre bo vsebnost kroma na zgornji meji povzročila mnogo večji odgor silicija. V tem primeru lahko pričakujemo v EPŽ ingotu vsebnost  $Si = 0,17 \%$ . Za  $Cr = 3,6 \%$  v elektrodi mora biti vsebnost silicija v elektrodi nad  $0,46 \%$ , če hočemo zagotoviti silicij = min.  $0,30 \%$  v ingotu.

Taki nomogrami omogočajo določanje ustrezne kemične sestave šarž, ki so namenjene za EPŽ elektrode. Če iz kemične sestave razpoložljivih elektrod s pomočjo nomograma pričakujemo odstopanje kemične sestave EPŽ ingotov izven predpisanih mej, se odločimo za dodatno legiranje med pretaljevanjem.





Slika 17

Vpliv dodatka FeSi med pretaljevanjem Cr-Mo jekla na vsebnost [Si] pri glavi in nogi EPŽ ingota

Fig. 17

Influence of adding FeSi during remelting Cr-Mo steel on the [Si] content in the ESR-ingot top and base

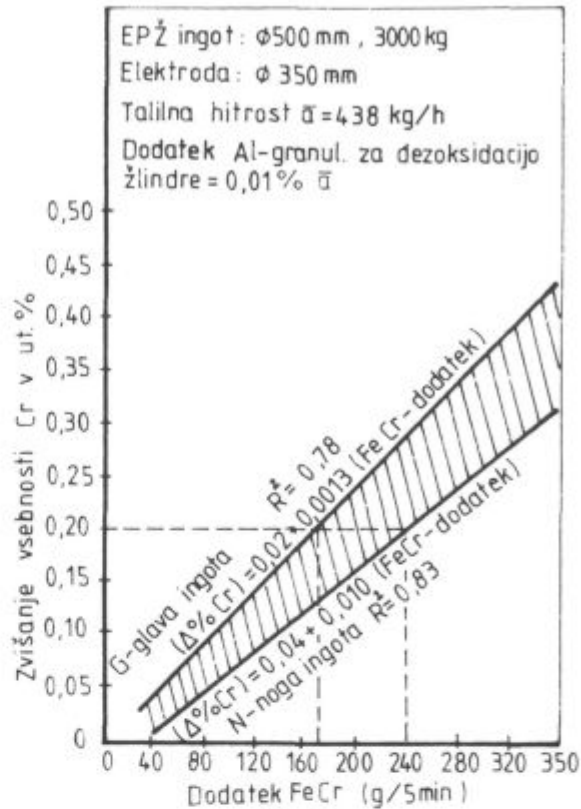
Sl. 17 prikazuje vsebnost silicija v ingotu z odvisnostjo od dodatkov ferosilicija, diskontinuirno vsakih 5 minut.

Če želimo držati vsebnost silicija v ingotu enako kot v elektrodi 0,32 %, moramo dodajati po 30 g ferosilicija na vsakih 5 minut pri nogi in le 12 g ferosilicija na vsakih 5 minut pri glavi. Zmanjšanje dodatkov je potrebno zaradi naraščanja  $SiO_2$ . Različen odgor silicija povzroča različne izkoristke dodanega ferosilicija, ki so med 77 % pri nogi in okrog 85 % pri glavi.

Tako sl. 18 predstavlja pogoje za legiranje kroma.

Za povečanje 0,20 % kroma z legiranjem je potrebno pri nogi dodati 240 g ferokroma na vsakih 5 minut. Zaradi odgora kroma je treba dodatke zmanjšati na 175 g ferokroma na vsakih 5 minut pri glavi. Izkoristek FeCr-affin je okrog 98 % pri nogi in 99 % pri glavi. Približne spremembe izkoristka se spreminjajo z razmerjem  $(Cr_2O_3)/[Cr]$  — ki znaša od  $1,5 \times 10^{-2}$  pri nogi do  $3,2 \times 10^{-2}$  pri glavi.

Razvili smo posebne dozirne naprave, ki omogočajo kontinuirno doziranje katerekoli količine ferozlitine z granulacijo do 5 mm in dodatno legiranje silicija, kro-



Slika 18

Vpliv dodatka FeCr-affine med pretaljevanjem na naraščanje vsebnosti [Cr] pri glavi in nogi EPŽ ingota

Fig. 18

Influence of adding FeCr affine during remelting on the increased [Cr] content in ESR-ingot top and base

ma, vanadija in ogljika, pri čemer lahko več elementov legiramo istočasno. Stopnja dodatnega legiranja je omejena s specifičnimi pogoji EPŽ postopka in je odvisna tudi od premera ingota, ki ga pretaljujemo. V glavnem je mogoče dolegirati silicij do 0,30 %, krom do 0,60 %, vanadij do 0,20 % in ogljik do 0,15 %.

### NADALJNI RAZVOJ

Opisani tehnološki razvoj, moderna izvedba proizvodnih naprav in računalniško podprt sistem krmiljenja predstavljajo solidno osnovo za nadaljnji razvoj.

Glede na izkušnje z varovalno atmosfero se razvija pretaljevanje s povečanim pritiskom plina nad žindrino kopeljo. Zaprta EPŽ naprava za pretaljevanje pod visokim tlakom dušika že več let uspešno obratuje.

Tehnologija za proizvodnjo votlih EPŽ ingotov je bila že delno preizkušena, vendar ne kaže, da bi bila ekonomsko uspešno uporabna v vsakodnevni proizvodnji zaradi mnogih omejevalnih dejavnikov.

EPŽ proizvodnja oblikovanih okroglih teles (n. pr. valjev), ki jih ni potrebno kovati, je tehnološko in ekonomsko izredno zanimiva, posebno zato, ker so se taki valji že uveljavili v uporabi.

## ZUSAMMENFASSUNG

Eine Übersicht über die Entwicklung von der Einführung der ersten ESU Anlagen bis zum heutigen Stand mit den Haupteigenschaften der Entwicklungsstufen werden gegeben. Die wichtigsten Parameter des Schlackenverbrauches des Energieaufwandes, des Ausbringens, so wie die technologischen Grundparameter der Umschmelzung werden angegeben.

Besondere Betonung gilt der Beschreibung der Entwicklung der Anlagen mit der charakteristischen elektrischen Ausführung, der heutigen Technik der ESU Anlagen und dem Stand der Regeltechnik. Von besonderer Bedeutung sind die Wassergekühlten Hochstromschleifkontakte. Auserdem ist eine Neuheit die Elektronische Regelung der Eintauchtiefe der Elektrode und die rechnerische Steuerung der Umschmelzgeschwindigkeit, was von entscheidender Bedeutung für die Güte der ESU Blöcke ist.

Neue Entwicklungen an ESU Anlagen haben die Umschmelzung von Blöcken grösserer Breite und Länge möglich gemacht. Die Umschmelzung von Ingots grösseren Durchmessers war durch die Schmelzstromstärke begrenzt, grösserer Längen aber durch die Änderung der chemischen Zusammensetzung von Schlacke und Stahl während der Umschmelzung.

Die Entwicklung an der Umschmelztechnologie von langen Ingots macht die Erzeugung von 6 m langen Ingots möglich. Durch die Technologie des Zulegierens während des ESU Verfahrens ist auch die Anwendung von Elektroden verschiedenen Ursprunges möglich geworden, was die Wirtschaftlichkeit der Umschmelzung günstig beeinflusst.

## SUMMARY

A review of development since the introduction of the first ESR equipment till now is given with the basic characteristics of the development stages, together with the most important parameters on consumption of slag, and energy, on yields, and on basic technological parameters of remelting. A special emphasis is given to the description of the development of equipment with the characteristic electric performance, the present techniques of ESR equipment, and to the state of regulation techniques. Important are the water-cooled high-current slide contacts. Besides, the novelty is also the electronic regulation of the dipping depth of electrode, and the computer control of the remelting rate which is the decisive parameter for the quality of ESR ingots.

The development of ESR equipment enabled the remelting of ingots of bigger diameters and lengths. Before, remelting of bigger diameters was limited by the melting-current strength, and of longer lengths by the variation of the chemical composition of slag and steel during the remelting. The development of the technology of remelting longer ingots enables at present manufacturing ingots up to 6 m, and the technology of additional alloying under the conditions of the ESR process enables the application of various electrodes which has a beneficial influence on the economy of remelting.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведен обзор развития и введения первых устройств ЭСП-а до теперешней степени с главными характеристиками степеней развития, также кодовые обозначения расхода шлака, энергии, выходов и основные технологические параметры переплава. Особо почеркнуто развитие устройств с характерным электрическим выполнением, современная техника устройств ЭСП-а и состояние регулировочной техники. Особое значение имеют контакты скольжения, охлаждаемые с водой. Кроме этого представляет новизну электронная регулировка глубины погружения электроды, а также управление быстроты переплавки при помощи вычислительной машины, что представляет решающий параметр на качество заготовок ЭСП-а.

Развитие устройств ЭСП-а дало возможность вести переплавку заготовок более крупных диаметров и длины, так как их переплавка была ограничена от величины тока расплавления, а заготовок увеличенной длины от изменения химического состава шлака и стали в течении расплавления.

Развитие технологии переплавки длинных заготовок дало возможность изготавливать заготовки длины до 6 м, технология же легирования при условиях процесса ЭСП-а — употребление электрод различного источника, что оказывает благоприятное влияние на экономичесность переплава.