

## Zakaj ponovčne peči v jeklarnah

Joža Arh\*

### UVOD

Ponovčne peči so danes v elektrojeklarnah skoraj nenadomestljive naprave, ne le v proizvodnji kvalitetnih jekel, temveč tudi v vsakdanji proizvodnji masovnih vrst jekel, ker pač zagotavljajo višjo proizvodnjo električne obločne peči in zanesljivo obratovanje kontinuiranih livnih naprav.

Prve ponovčne peči so zgradili zato, da bi izboljšali kvaliteto jekla, povečanje storilnosti je bil vzporeden pojav. Danes je glavni namen povečanje storilnosti v jeklarnah.

Če so prve naprave postavljali v jeklarnah s proizvodnjo kvalitetnih jekel (ASEA — SKF), so jih kasneje gradili v konvertorskih jeklarnah, danes pa ima ponovčno peč že vsaka mini železarna v Evropi.

Ponovčne peči so danes tudi konstrukcijsko dognane, z boljšo kontrolo električnih parametrov, enostavnejše grajene, manjše so izgube toplote s sevanjem, mešanje jekla je boljše, dostop zraka v prostor nad talino je preprečen.

Prvo ponovčno peč sta zgradili firmi Asea in SKF na Švedskem že leta 1965, danes splošno znan kot ASEA — SKF postopek, leta 1967 pa Finkl Mohr v ZDA. Pri teh napravah je slonela rafinacija še na vakuumski degazaciji, mešanje pa je bilo pri ASEA — SKF še elektromagnetno.

Prvo ponovčno peč, kjer rafinacija poteka le preko žilindre, je 1971. leta zgradila firma Daido na Japonskem. Do leta 1981 je samo ta firma zgradila 46 naprav, od tega 80 % nad 50 t oziroma 39 % nad 100 t kapacitete. V ZRN je kar nekaj firm, ki gradijo ponovčne peči. Med najpomembnejšimi so GHH, Fuchs, Mannesman-Demag. Precej ponovčnih peči pa so zgradile železarne same, predvsem kadar je šlo za predelavo EO-peči v ponovčno peč.

Po letu 1980 beležimo hiter porast števila ponovčnih peči. Danes jih je že več kot 200, od tega preko 80 v Evropi, več kot 60 samo na Japonskem. Severna Amerika pa je z blizu 30 napravami daleč zadaj. 75 % vseh teh naprav je v elektrojeklarnah s kapaciteto 20 do 150 t.

Razlogi za hiter porast števila ponovčnih peči so v prvi vrsti dobri metalurški rezultati in zanesljivo vodenje procesa.

O ponovčnih pečeh so prvič poročali v večjem obsegu na prvi evropski konferenci, o elektrojeklarstvu leta 1983. Na drugi evropski konferenci o elektrojeklarstvu oktobra leta 1986 pa je bil govor tako rekoč že o masovni rabi ponovčnih peči v proizvodnji elektrojekla.

### ZAKAJ PONOVCNE PEČI

Rekli smo, da so ponovčne peči uporabljali na začetku izključno za proizvodnjo visoko kvalitetnih jekel. Seveda se je s tem tudi skrajšal čas rafinacije, ki je sicer zmanjševala storilnost peči. Že na začetku je bilo očitno, da je mogoče brez izjemno visokih prebodnih temperatur dosegati natančno kemično sestavo, kakor popolnoma nov nivo stopnje dezoksidacije in odžveplanje.

Razvoj ponovčnih peči, kakršnega poznamo danes, pa samo s proizvodnjo specialnih jekel ne bi bil mogoč.

Šele proizvodnja jekla v UHP pečeh, ki naj stalno delajo z enako visoko močjo, je privedla do tehnologije, ko je bilo treba izločiti iz peči rafinacijo jekla. In nazadnje je še razvoj kontinuirnega livanja in stalno iskanje načinov za dviganje storilnosti ter zniževanje stroškov privedlo do hitrega širjenja ponovčnih peči.

Natančna nastavitev temperature livanja je postala absolutna nujnost pri razvoju kontinuiranih livnih naprav z veliko hitrostjo livanja. S tem ko je bila dana možnost ogrevanja jekla v ponovci, temperatura jekla pri preobodu ni več odvisna od temperature livanja. Ponovčna peč tudi zagotavlja toplotno ravnotežje med temperaturo jekla in obzidavo ponovce in s tem omogoča zelo majhno pregretje, kar je ključni dejavnik za kvaliteto jekla.

Sekvenčno livanje je postalo osnovni element pri dvigovanju storilnosti oziroma zniževanju stroškov jeklarn. Ponovčna peč je zato kot vmesni člen med pečjo in kontilivom primarnega pomena, ker deluje kot blažilec.

### GLAVNE ZNAČILNOSTI POSTOPKA

Ponovčna peč je danes tisto orodje jeklarjev, ki se po svetu najhitreje širi. Da bi razumeli razloge za takšno ekspanzijo, si oglejmo njene funkcije znotraj evolucije sekundarne metalurgije. Različni cilji ponovčne metalurgije pri različnih napravah so zbrani v tabeli 1.1).

Te cilje lahko razdelimo v tri glavne skupine, ki so medsebojno odvisne:

— Metalurški cilji: kontrola kemične sestave, odstranjevanje neželenih elementov (H, N, P, O, S), kontrola vključkov modifikacija in zmanjševanje števila vključkov.

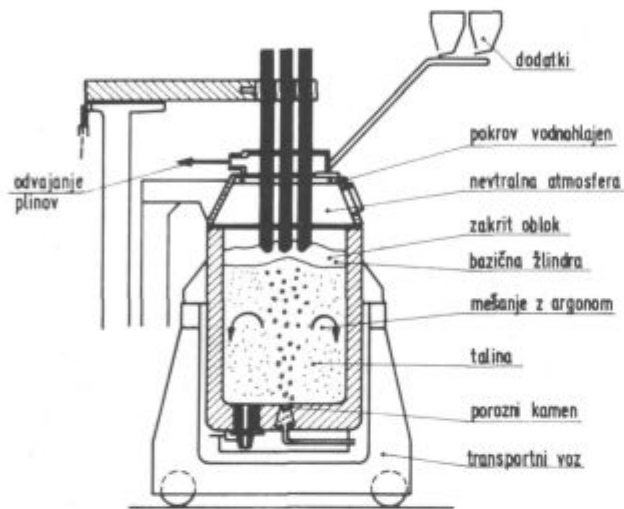
— Ogrevanje jekla: nastavitev natančne temperature taline ter homogenizacija temperature in kemične sestave.

- Produktivnost in stroški.
- Za doseg teh ciljev mora delovati:
- ogrevanje jekla, električno ali aluminotermično,
  - mešanje jekla
  - dodajanje legur,
  - kontrola atmosfere nad talino,
  - vakuumška degazacija.

\* Joža Arh, dipl. inž. met. — Železarna Jesenice

Tabela 1

Cilji in oprema	Kontrola homogeniz.	Temperat. ogrevanje	Korekt. sestave	Odstranitev elementov						Kontr. vključkov	Povečanje storiln.
				S	P	H	N	D	C		
Mešanje in legiranje	+	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0
Injektir. CaSi, žlinder	+	0	0/+	0	0	0	0	0	0	+	0
Injektiranje žic	0	0	+	+	0	0	0	0	0	+	0
Ponovna peč	++	++	+	0	0	0	0/+	0	+	+	++
VAD	++	++	++	0	0	0	+	0	++	+	+
VD	++	0	+	0	+	+	++	+	++	+	0
VOD	++	+	+	++	0	+	++	+	0/+	++	0/+
RH/DH	++	0	++	0	++	+	0/++	++	+	+	0/+
				0	++	++	++	++			



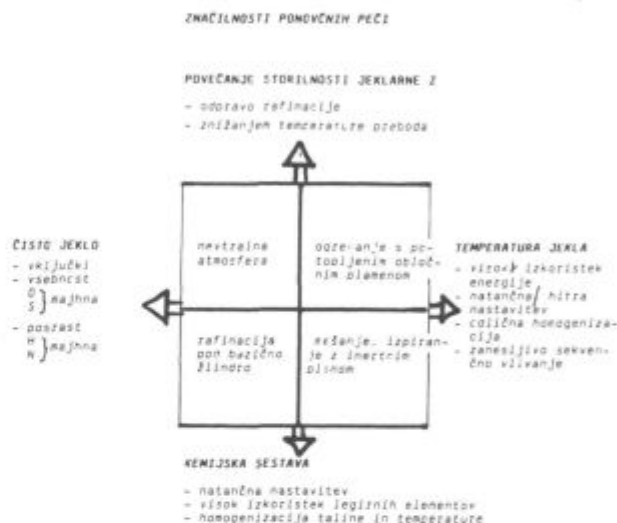
Shema ponovne peči

Slika 1:

Shema ponovne peči

Fig. 1:

Scheme of the ladle furnace



Slika 2:

Štiri glavne značilnosti postopka

Fig. 2:

Basic functions of ladle furnace process

Ponovna peč izpolnjuje vse pogoje, razen vakuumске degazacije, kombinacija z vakuumsko degazacijo pa je skoraj idealna.

Na sl. 1 je shematsko predstavljena ponovna peč. V splošnem sestoji iz jeklene ponovce z bazično obzidavo, ki je pokrita z vodnohlajenim pokrovom. Energijo dovajamo talini s tremi grafitnimi elektrodami. Da zaščitimo ognjestalno obzidavo, naj bodo elektrode potopljene v bazični žlindre. Iz tega razloga lahko vodimo ponovno peč z visokim  $\cos \varphi$  in dolgim obločnim plamenom, ki je zakrit z žlindra, pri čemer je izkoriščanje električne energije visoko. Med procesom jeklo stalno mešamo z inertnim plinom, ki ga uvajamo skozi porozni kamen v dnu ponovce, zato da dosežemo dobro razmešanje legiranih dodatkov, kakor tudi enakomerno porazdelitev temperature.

Štiri glavne značilnosti postopka so predstavljene na sl. 2. Te so:

- ogrevanje s pokritim obločnim plamenom, ki ne škoduje obzidavi,
- splakovanje in mešanje taline z inertnim plinom,
- rafinacija pod bazično reducirano žlindra,
- nevtralna ali rahlo reducirajoča atmosfera v prostoru nad talino.

Dobre metalurške rezultate lahko dosegamo le, če so izpolnjeni vsi štirje pogoji hkrati. N. pr.: ogrevanje s pokritim obločnim plamenom je izvedljivo le ob primerni sestavi žlindre in učinkovitem mešanju z inertnim plinom.

V celoti vzeto, s pomočjo ponovne peči dosegamo povečanje storilnosti peči; prvič zato, ker del metalurškega dela, to je rafinacijo, prenesemo v ponovco, in drugič, ker odpade prekomerno ogrevanje taline preko  $1700^{\circ}$  v peči. Prebodne temperature so najmanj za  $50^{\circ}$ C nižje kot pri delu brez ponovne peči. Legiranje elementov z visoko afiniteto do kisika lahko poteka brez pristopa kisika, ker sodobne naprave zagotavljajo nevtralno atmosfero v prostoru nad talino.

## MOČI TRANSFORMATORJEV

Moči transformatorjev so odvisne od velikosti ponovce, od metalurških zahtev in od maksimalne hitrosti ogrevanja v  $^{\circ}$ C/min upoštevajoč izgube, ter se gibljejo med 3 in 30 MVA. Specifične moči transformatorjev znašajo danes okrog 150 kVA/t. Takšna moč pa omogoča ogrevanje s hitrostjo okrog  $5^{\circ}$ C/minuto. Da pri takšnih, razmeroma močnih transformatorjih ne pride do večje obrabe obzidave, mora biti delilni krog majhen. Premer delilnega kroga je danes manjši od dvakratnega premera elektrod. Iz istega razloga so premeri elektrod majhni, kot je le mogoče, zato je specifična gostota toka precej visoka, okrog 30 Amp/cm<sup>2</sup>.

Pri predelavah električnih obločnih peči v ponovne peči pa transformator z električno opremo ostane, zato so moči transformatorjev pogosto večje, kot so potreb-

ne. Taki transformatorji delajo le s spodnjimi napetostnimi stopnjami.

Pri izbiri transformatorjev je treba upoštevati, da delajo ponovčne peči izključno le s tekočo talino.

Pri takem načinu obratovanja mora biti regulacija zelo natančna in hitra, reagirati mora na zelo majhne diferenčne signale. Površina taline v ponovci je majhna in zato močnejše valovi, po eni strani zaradi mešanja z inertnim plinom in ob dodajanju legiranih elementov ter po drugi strani zaradi različnih lastnosti žlindre. Preprečiti pa je treba naogljčenje taline. Regulacije EO peči, ki jih uporabimo za ponovčne peči, je treba zato modificirati in optimizirati.

### KONCEPTI POSTAVITVE NAPRAV 2

Pri načrtovanju ponovčnih peči v prostor je poleg že omenjenih kriterijev, kot je hitrost ogrevanja in metalurške zahteve, treba upoštevati tudi prostorske razmere. Pomembno je vedeti, kako bomo spravili ponovco pod ponovčno peč, kje jo sploh postaviti, kako je z žerjavi, kje bodo legirne naprave, kako priključiti odsesavanje plinov, ali je mogoča še dodatna sekundarna obdelava, n. pr. z injektiranjem prašnatih materialov, in podobno. Vse te predpostavke in zahteve so privedle do različnih izvedb teh naprav.

### IZVEDBA S STACIONARNO PLOŠČADJO

Od EO peči znani odmični portal z ogrodjem za nosila elektrod in ogrodjem za obešenje pokrova je tu montiran direktno na tla temelja brez priprave za vrtenje. V takem primeru mora ponovca ležati v vozu, s katerim jo prevažamo pod elektrode. Ta izvedba je primerna takrat, kadar lahko prevažamo ponovco na vozu med EO pečjo in ponovčno pečjo, s čimer si prihranimo čas za prestavljanje ponovce z žerjavom. Ker v primeru te izvedbe odpade vrtenje portalov, so kabli lahko mnogo krajši, kot pri EO pečeh. Opisana izvedba pride v poštev zlasti pri velikih ponovcah z veliko priključno močjo.

### PONOVČNE PEČI Z ODMIČNO PLOŠČADJO

V primeru, kadar moramo postaviti ponovco z jeklom pod elektrode z žerjavom, pride v poštev le izvedba z vrtljivo ploščadjo.

Možne so še druge izvedbe. Tako že obratuje naprava za ogrevanje jekla v ponovci na vrtljivem stolpu naprave za kontinuirano livanje. Namenjena je predvsem pokrivanju toplotnih izgub pri dolgih časih livanja. Do neke mere pa je možno tudi pregrevanje taline. Naprava je grajena tako, da jo lahko obračamo za kot  $\pm 175^\circ$ , zaradi česar lahko izmenično ogrevamo tudi ponovco, ki čaka na livanje. Takšna naprava zagotavlja veliko zanesljivost pri sekvenčnem livanju.

Znana je izvedba z vrtljivim krožnikom pri DDS na Danskem. Omogoča hitro menjavo ponovc, ker je ena ponovčna peč namenjena za obdelavo jekla iz dveh EO peči.

### METALURGIJA PROCESA

Metalurgija procesa je odločilna za uspeh. Oksidne žlindre se je treba znebiti, bodisi s prebodom brez žlindre, kar je najceneje, ali s posnemanjem.

Osnovni pogoji za ponovčno metalurgijo je sestava bazične žlindre, ki štiti jeklo proti atmosferi, štiti obzidavo ponovce pred obločnim plamenom in veže produkte rafinacije. Sestavljena mora biti tako, da je hitro tekoča. Jedavcu se je pri tem treba izogibati, ker najeda ognjestalno oblogo.

### DEZOKSIDACIJA JEKLA

Za običajni dvožlindrni postopek je značilna obarjalna dezoksidacija z aluminijem, pri kateri nastaja velika količina aluminatnih vključkov, ki se jih vseh ne da odstraniti.

Pri ponovčni metalurgiji pa spet prihaja do izraza difuzijska dezoksidacija, kakršno je poznal že Perrin, ki je leta 1933 patentiral svoj znameniti postopek dezoksidacije s staljeno žlindro, sestave  $\text{CaO} = 45\%$ ,  $\text{SiO}_2 = 22\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 33\%$ . Na teh osnovah je slonela rafinacija v majhnih EO pečeh vse do petdesetih let, ko so začeli graditi velike EO peči z veliko globino taline, ko difuzijska dezoksidacija ni bila več dovolj učinkovita in hitra.

Za difuzijsko dezoksidacijo velja razmerje

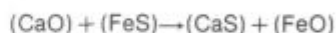
$$L_{\text{FeO}} = \frac{a(\text{FeO})}{a(\text{O})}$$

To pomeni, da moramo, če želimo znižati vsebnost kisika v jeklu, znižati najprej vsebnost (FeO) v žlindri. Ponovčne peči so prav za ta način dezoksidacije posebej primerne. Žlindra je ves čas dovolj vroča, ker jo ogrevamo z obločnim plamenom, zato jo lahko poljubno popravljamo in kontroliramo po videzu, na pogled. Siva barva pomeni prisotnost železovega in manganovega oksida. Ko barva žlindre postane svetla ali bela, pomeni, da je jeklo dezoksidirano. Vsebnost FeO v žlindri naj doseže pod 1 %.

Z intenzivnim mešanjem taline z inertnim plinom ves čas dovajamo pod žlindro svežo talino in tako reakcije rafinacije pospešujemo. Difuzijska dezoksidacija je torej zagotovilo za doseganje majhne vsebnosti kisika v jeklu in s tem boljše čistoče jekla.

### ODŽVEPLANJE JEKLA

Odžveplanje je vedno tesno povezano z dezoksidacijo, kar izhaja iz znane enačbe



oziroma konstante ravnotežja

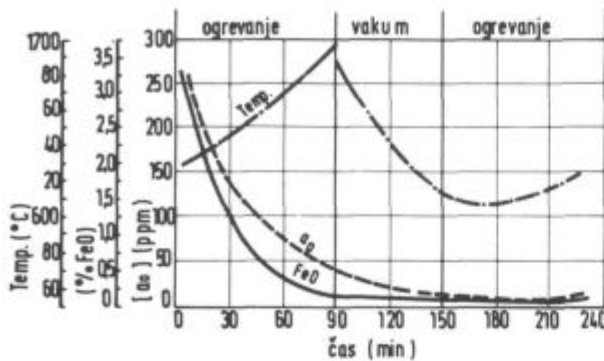
$$K = \frac{a_{\text{CaS}} a_{\text{FeO}}}{a_{\text{CaO}} \times a_{\text{FeS}}}$$

Tako kakor se v času procesa znižuje vsebnost FeO v žlindri, raste tudi stopnja odžveplanja. Pri tem je treba poskrbeti za takšno sestavo žlindre, ki bo imela visoko sulfidno kapaciteto.

Stopnja odžveplanja je odvisna od intenzivnosti mešanja in narašča z naraščanjem energije mešanja. Dodatno mešanje z inertnim plinom na meji med žlindro in jeklom s kopjem od zgoraj povečuje stopnjo odžveplanja.

Za stopnjo odžveplanja navajajo različne vrednosti, odvisno od vrste jekla (% C), v splošnem pa se giblje od 65 do 85 % po vsaj 30-minutni obdelavi.

Za uspeh rafinacije je ključnega pomena kontrola atmosfere nad talino. Od tega sta odvisni čistoča in stopnja odžveplanja. Infiltracija zraka med pokrovom in ro-



Slika 3:

Prikaz gibanja temperature, aktivnosti kisika v talini in FeO v žilindri med rafinacijo v ponovci 3)

Fig. 3:

Temperature and oxygen activity of the melt and ironoxide content of the slag during the ladle refining process. 3)

bom ponovce je s tesnenjem treba preprečiti. Če to ni doseženo, se stopnja odžveplanja zmanjša za polovico.

Kaj se da dosežati v kombinaciji ponovna peč in desoksidacija v vakuumu kaže sl. 3. Stopnja odžveplanja v času prvega ogrevanja je okrog 50 %. Ko je dosežena temperatura 1680—1690°C prenesejo ponovco v vakuumsko komoro pri čemer se aktivnost kisika v talini in FeO v žilindri še dalje znižuje. Degazacija v vakuumu naj traja vsaj 15 minut. Po taki obdelavi je dosežena aktivnost kisika od 10—15 ppm in 0,2 do 0,3 % FeO v žilindri.

Če je potrebno še nadaljnje odžveplanje ali korektura analize, ponovco ponovno prenesemo na ogrevno mesto.

Takšen način obdelave uporabimo za doseganje ekstremno nizkih vrednosti kisika in žvepla.

Na Jesenicah že imamo vakuumski napravi v obeh Jeklarnah, zato bodo takšne najbolj zahtevne obdelave možne.

### PRIKAZ POSTOPKA 1

Poglejmo, kaj lahko dosežemo s tipično moderno 100 t ponovno pečjo, ki dela v 40-minutnem ciklu pri atmosferskem pritisku:

- Hitrost ogrevanja po tem, ko je doseženo toplotno ravnotežje: 5°C/min.
- Nastavitev temperature:  $\pm 4^{\circ}\text{C}$  natančno
- Poraba električne energije: 30/40 kWh/t
- Poraba elektrod 8/10 g/kWh.
- Naogljčenje: 1 do 1,5 ppm/minuto ogrevanja pri mešanju s plini in 0,8 do 1 ppm/minuto pri induktivnem mešanju
- Stopnja odžveplanja 65 do 85 % po 30-minutni obdelavi
- Skupna vsebnost kisika 10 do 50 ppm, odvisno od vrste jekla, načina dezoksidacije (Si ali Al) in tesnosti ponovce.
- Prirastek dušika: manj kot 5 ppm
- Prirastek vodika: manj kot 1 ppm, vendar je to močno odvisno od redukcije žilindre
- Prirastek fosforja od 5 do 50 ppm, odvisno od ostanka žilindre v ponovci
- Povečanje storilnosti: za mini železarno s KL za gredice okrog 9 do 13 %.

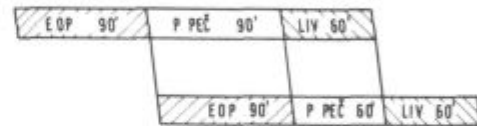
### KAJ PRIČAKUJEMO OD PONOVICE PEČI

V jeklarni 2 je bila že s samim projektom predvidena VAD naprava. Danes bi se odločili za ločeni napravi, posebej za VD/VOD napravo, ki jo že imamo, in posebej za ponovno peč. Takšna kombinacija je cenejša in bolj praktična.

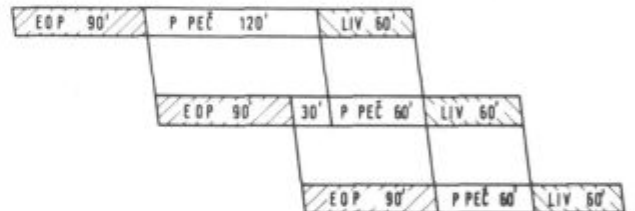
Predvsem za celotni proizvodni program ne potrebujemo vakuumске obdelave jekla. Pri jeklih, kjer plini (H, N) niso problem in kjer ni potrebno razogljčenje, je obdelava v ponovni peč cenejša. To pa je pri nas pretežno ves program navadnih konstrukcijskih jekel.

Ponovna peč pomeni večjo ekonomičnost in večjo zanesljivost pri obratovanju konti liva. S ponovno pečjo pa bo mogoče vlivanje vsaj dveh šarž v sekvenci, kar je ključnega pomena pri zniževanju stroškov. Kako bi bilo to videti pri vlišanju treh šarž v sekvenci, pa je razvidno s sl. 4. Zanesljivo vlivanje dveh ali treh šarž v sekvenci omogoča le ponovna peč.

2 šarži v sekvenci



3 šarže v sekvenci



Slika 4:

Prikaz izdelave šarž, EO peč ponovna peč, KL pri sekvenčnem livanju dveh in treh šarž

Fig. 4:

Scheme of the production process arc furnace, ladle furnace and continuous casting of two or three melts in sequence

Imeti ponovno peč pomeni izdelati kvalitetno jeklo, doseči toplotno ravnotežje med talino in obzidavo, s čimer so lahko temperature jekla na skrajni spodnji meji in nastavljene v zelo ozkih tolerancah, tudi samo  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ . To pa dalje pomeni tudi možnost hitrejšega vlišanja, predvsem pa bolj čisto jeklo in lepšo površino.

V jeklarni 1 bi postavitev ponovne peči pomenile:

- povečanje storilnosti z odpravo rafinacije v peči in zaradi znižanja prebodnih temperatur,
- znižanje stroškov z manjšo porabo energije in elektrod (krajši čas od preboda do preboda), boljša vzdržnost obzidave,
- večja zanesljivost pri kontinuirnem livanju — odpadejo vrnjene šarže,
- boljša kvaliteta jekla — možnost direktnega valjanja gredic brez čiščenja.

### OBZIDAVA PONOVC

Ponovce so do nivoja žindre obzidane ali aluminatno ali pa z dolomitno opeko (keramično vezani dolomit). V žilindrni coni uporabljajo krommagnezitne opeke z do-

datkom C. Vzdržnost; obzidave so boljše kot pri VOD obdelavi.

Porozni kamni v dnu so navadno z usmerjeno poroznostjo, ker sta večji tako zanesljivost kot prepustnost za plin.

### LITERATURA

1. H. Legrand, Sofresid — Pariz, Zbornik konference o sekundar, metalurg., Aachen 1987, 449—454
2. J. Druppel R 5 1/5 PART I EEC 86
3. W. Meyer VEW AG Kapfenberg, Zbornik konference o sekundarni metalurgiji, Aachen 1987, 162