

Prof. dr. ing. Borut Marinček,
Katedra za metalurgijo na Züriški tehniški visoki šoli

DK: 187.25 : 662.341.1-188.5
ASM/SLA: D8j, D5

Pridobivanje železa potom direktne redukcije rud

V članku so podane na kratko teoretske osnove redukcije železnih oksidov. Opisani so najvažnejši postopki za pridobivanje metaliziranih peletov (Krupp, Lurgi, SL/RN ter Midrex, Purofer, Wiberg in Hyl). Poleg osnovnih principov avtor analizira bistvene prednosti in slabosti omenjenih postopkov. Kot praktični primer navaja tehnološke karakteristike jeklarne v Hamburgu, ki dela z metaliziranim vložkom. Poseben poudarek je na tehnologiji izdelave jekel v UHP — elektro peči — delo z večjo količino žlindre, procesi odžveplanja, odfosforenja, poraba električne energije, stroški izdelave jekel in drugo. Predavanje avtorja je sklenjeno z diskusijo o perspektivi uporabe metaliziranih peletov v jeklarstvu.

Direktno izreducirano železo ima obliko kroglic, premera okrog 10 mm, ki so nekoliko porozne in jih imenujemo železova goba ali tudi metalizirani peleti. Staro železo, kot osnovni vložek za pretaljevanje v elektro obločni peči, lahko z dodatki metaliziranih peletov oplemenitimo in dobimo čistejšo jeklo. Danes je v svetu poznanih že okoli 300 vrst postopkov direktne redukcije rud. Le malo postopkov dela uspešno. Kakšni so razni postopki in kako poteka razvoj v svetu je predmet tega članka.

OSNOVE DOBIVANJA METALIZIRANIH PELETOV

Diagram območja redukcije železovih oksidov do metaliziranega železa kaže sl. 1. Važna je količina kisika, ki se reducira iz rude tj. stopnja redukcije. Ta je nanešena na abscisi. Ordinata je razdeljena v dva dela: zgornje območje množina kisika in spodnje območje metaliziranega železa. Na levi strani je območje rud (Fe_2O_3 in Fe_3O_4) in desno železne gobe. Najprej se zmanjšuje koncentracija Fe_2O_3 in narašča Fe_3O_4 ; isto se zgodi z Fe_3O_4 in wüstitom ter wüstitom in kovinskim železom. Ko zvišujemo redukcijsko stopnjo pridemo v območje železove gobe. Goba bo torej sestavljena

na iz metalnega železa in wüstita (FeO). Čim večja bo redukcijska stopnja, več bo kovinskega železa in manj bo wüstita, oziroma kisika. Zelo dobro izreducirana goba ima redukcijsko stopnjo 0,95, slabše izreducirana pa 0,85. Med tema dvema stopnjama imamo industrijsko sestavo gobe.

Pri redukcijski stopnji 0,95 sestoji železna goba (brez jalovine) iz 91 % kovinskega železa in 9 % wüstita. Želimo, da je količina FeO čim manjša, ker bomo pozneje v elektro obločni peči rabili za njeno redukcijo redukcijske elemente (n. pr. C) in energijo oz. električni tok.

Prikazani diagram ni popolnoma točen. Zraven gobe pride še jalovina. Količina jalovine ostane tekom redukcije nespremenjena. Dobre rude imajo 1,5 do 5 % jalovine. Vse kar je več, dela v topilnicah težave, ker so za vezavo nekaterih komponent v jalovini potrebni večji dodatki CaO . Goba je torej sestavljena iz kovinskega železa (Fe_m), wüstita (FeO) in jalovine.

POSTOPKI PRIDOBIVANJA METALIZIRANIH PELETOV

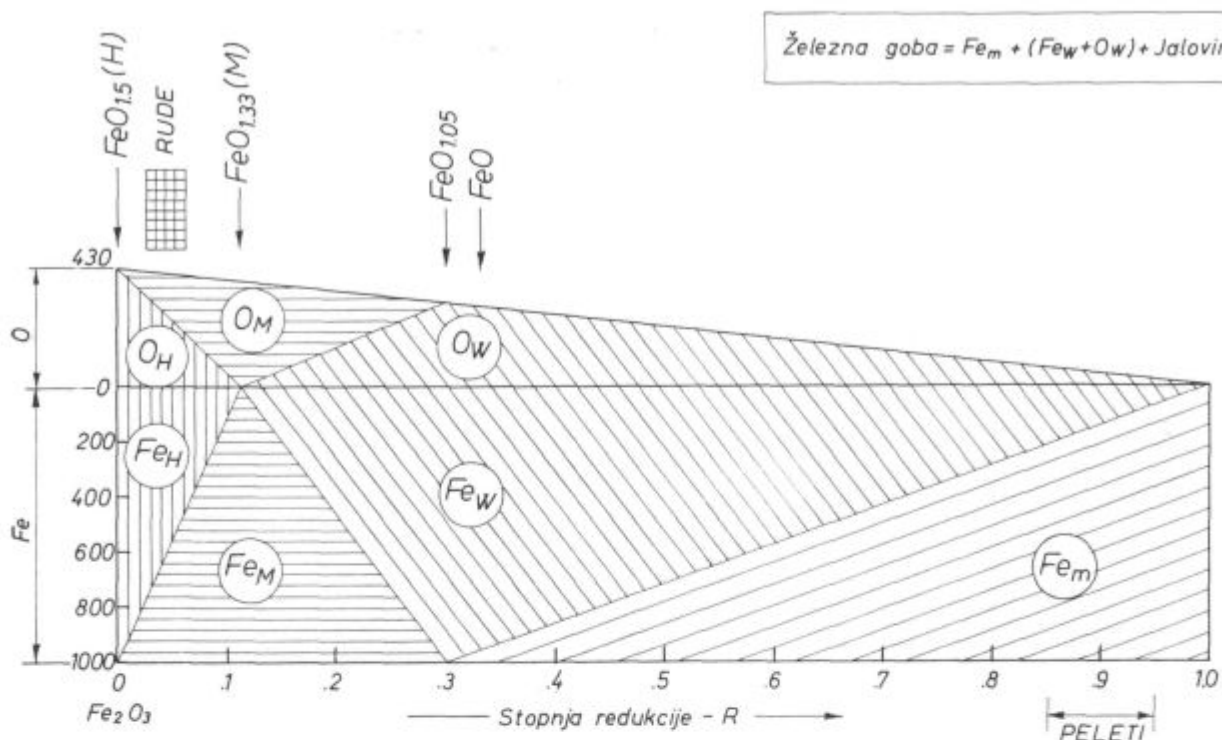
Po načinu redukcije delimo postopke v dve skupini:

1. postopki redukcije s trdnim ogljikom: n. pr. Krupp-postopek, Lurgi oz. SL/RN
2. postopki redukcije s plini H_2 in CO : n. pr. Midrex - Purofer - Wiberg - Hyl - postopek.

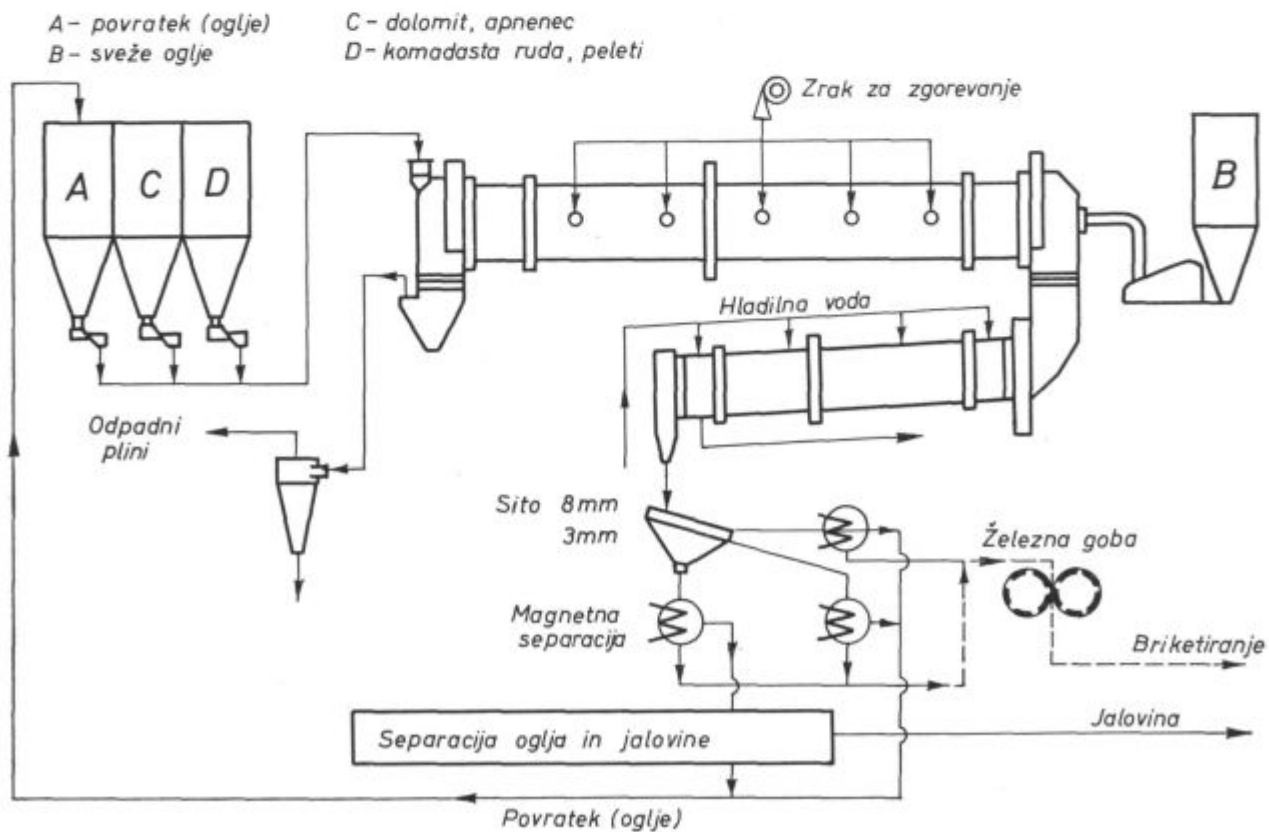
a) Postopki redukcije s trdnim ogljikom (Krupp- in SL/RN-postopek)

SL/RN-postopek uporablja za redukcijo rude rotacijsko peč (slika 2), ki je dolga do preko 100 metrov in ima premer do 6 metrov. Mešanica rude ali rudnih peletov svežega antracita in povratnega

* Predavanje je bilo na Ravnah 11. septembra 1972. leta
Članek sta pripravila po zapiskih predavanja: Dr. ing. B. Koroušič (Metalurški inštitut Ljubljana) in dipl. ing. V. Macur (Železarna Ravne)



Slika 1
 Shematska ponazoritev procesa izdelave železne gobe iz Fe-peletov



Slika 2
 Shematski potek SL/RN oziroma Krupp-postopka

antracita se doda v peč iz bunkerjev na levi strani. Mešanica se v peči ogreje na 900—1000° C in poteka redukcija po enačbi

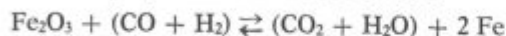


Peč ima v steni oz. v oblogi odprtine za dovod zraka, da lahko CO popolnoma zgori (do CO₂). Rabi se približno 3,5 · 10⁶ kcal na tono gobastega železa in to pri Lurgi- kakor pri Krupp-postopku.

Na koncu peči dobimo gobo, ki se v novi rotacijski peči hladi indirektno z vodo, preseje in neporabljeni antracit loči od gobe in se vrača nazaj v peč. Peči delajo s kapaciteto do 1000 t gobe/dan.

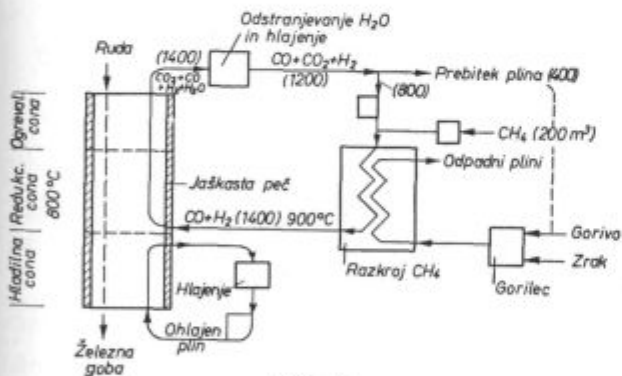
b) Postopki s plinastimi reducenti

Redukcija poteka na sledeč način:



Na tono železa je treba odstraniti 430 kg kisika. Za to redukcijo rabimo 560 m³ CO in H₂. Izrabi se samo 30 % plina, zato delajo vsi postopki s približno 1500 m³ CO in H₂.

Od plinastih postopkov je najbolj zanimiv *Midrex postopek*, ki ima najboljšo bodočnost. Naprava ima dva dela: en del predstavlja redukcijsko peč, drugi del pa proizvaja iz metana redukcijski plin CO + H₂ (sl. 3). Šahtna redukcijska peč je



Slika 3

Shematska ponazoritev Midrex-postopka
(številke v oklepajih: m³ plina/t Fe)

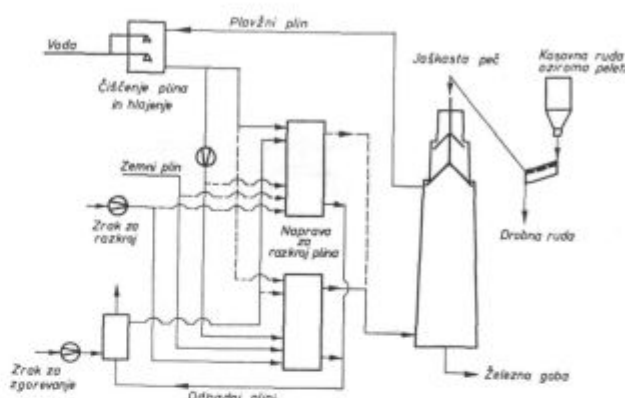
visoka okrog 10 m. Razdeljena je v tri cone: cona ogrevanja rude, redukcijska cona (okrog 800° C) in spodaj je hladilna cona. V redukcijsko cono se vpihava CO + H₂ s temperaturo okrog 900° C. Dimni plini gredo zgoraj iz peči v hladilno komoro (z vodno prho), kjer se ohladi in se izloči voda. Prečiščeni plin (CO + CO₂ + H₂) se meša s CH₄ in vodi v napravo za izdelavo novega redukcijskega plina po:



Reakcija je endotermna. Toploto dovajamo rekuperativno, da se reakcijski prostor ogreje na 900—1000° C. Rekuperativne cevi imajo premer 20 cm in so polnjene z nikljevim katalizatorjem, ki ima dve nalogi:

1. da prepreči izločanje ogljika in
2. omogoča, da poteka proces pri čim nižji temperaturi (ca 800° C).

Katalizator je zelo važen, ker je zelo občutljiv na žveplo in drog. Tona gobe rabi 3,5 · 10⁶ kcal kot zemeljski plin. Midrex postopek naredi v eni šahtni peči dnevno okoli 1000 ton železove gobe.



Slika 4

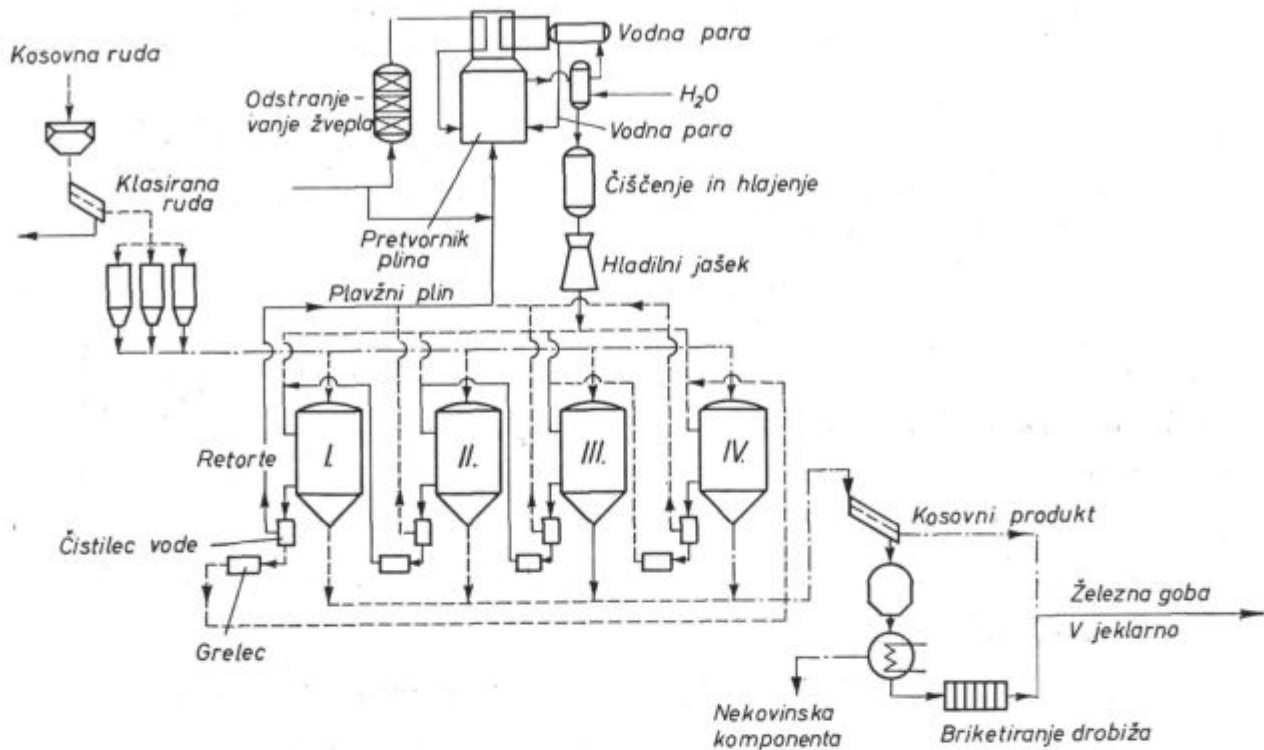
Shema delovanja Purofer-postopka

Purofer postopek (sl. 4) dela podobno kot *Midrex postopek*. Razlika je v tem, da dela regenerativno. Katalizator, ki je iz zmesi glinice in niklja, se ogreje na višjo temperaturo in akumulira toploto. Ko je zmes dovolj ogreta, se spusti CH₄ + CO₂, izvede reakcija (glej zgoraj) in porabi toploto. Slaba stran postopka je, da dela nekontinuirno. Spreminja se redukcijska stopnja, kar pa ni ugodno. Produkcija znaša 500 ton/24^h; verjetno postopek nima bodočnosti. Bodočnost imajo postopki, ki dajo enakomeren produkt s čim višjo stopnjo redukcije.

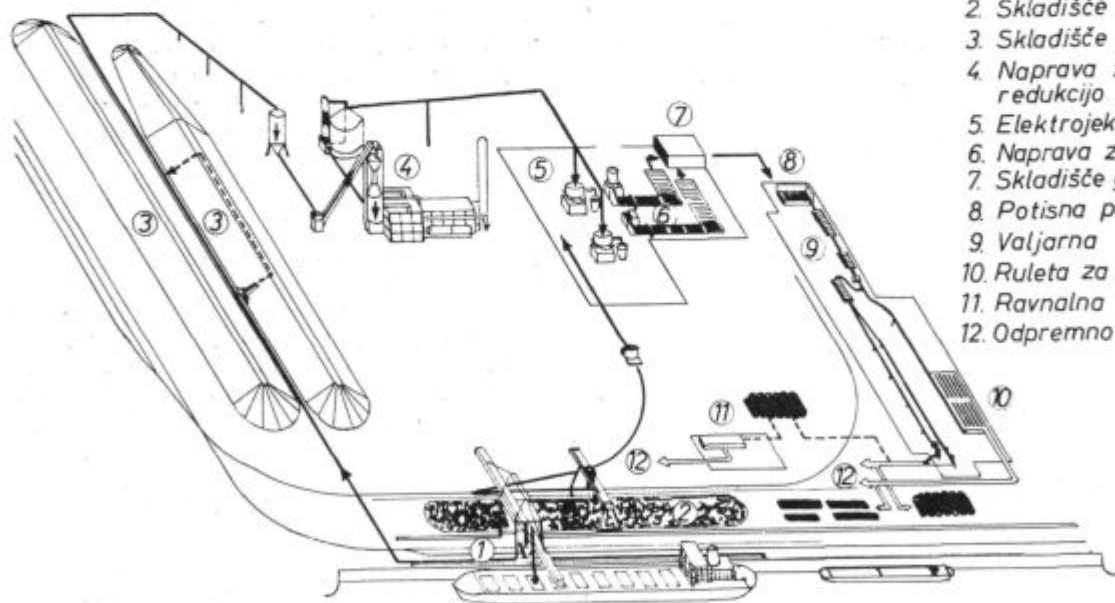
Hyl postopek (sl. 5) imajo samo v Mehiki, kjer imajo poceni metan; novo postrojenje se gradi v Braziliji. Reakcija CH₄ + H₂O ⇌ CO + 3 H₂ se vrši kontinuirno, redukcija rude pa diskontinuirno v posodah iz železa, ki imajo ca 20 ton. Posoda se zapolni z rudo, ki se postopoma s plinom reducira, hladi in nosi direktno v jeklarsko peč. Postopek ima prednost, da se pri plinski reakciji (gl. zgoraj) voda nastala z ohlajanjem izloči in dobimo plin, ki ima 25 % Co in 75 % H₂. Slaba stran je, da rabimo 4,5 · 10⁶ kcal na tono gobe.

PRIMER ŽELEZARNE V HAMBURGU (sl. 6)

To je primer integralne jeklarne, ki ima *Midrex postopek* pridobivanja gobastega železa. Jeklarne ima dve 90-tonski UHP elektro obločni peči. Gredice 120 × 120 × 15 m se delajo kontinuirno. Iz njih valjajo betonsko železo in razne profile. Skupno je zaposlenih 800 ljudi. Naredi se 300.000—400.000 ton jekla na leto. Ko bo zgrajena še ena valjarna, bodo naredili 500—600.000 ton jekla na leto.



Slika 5
Shematska predstava Hyl-postopka

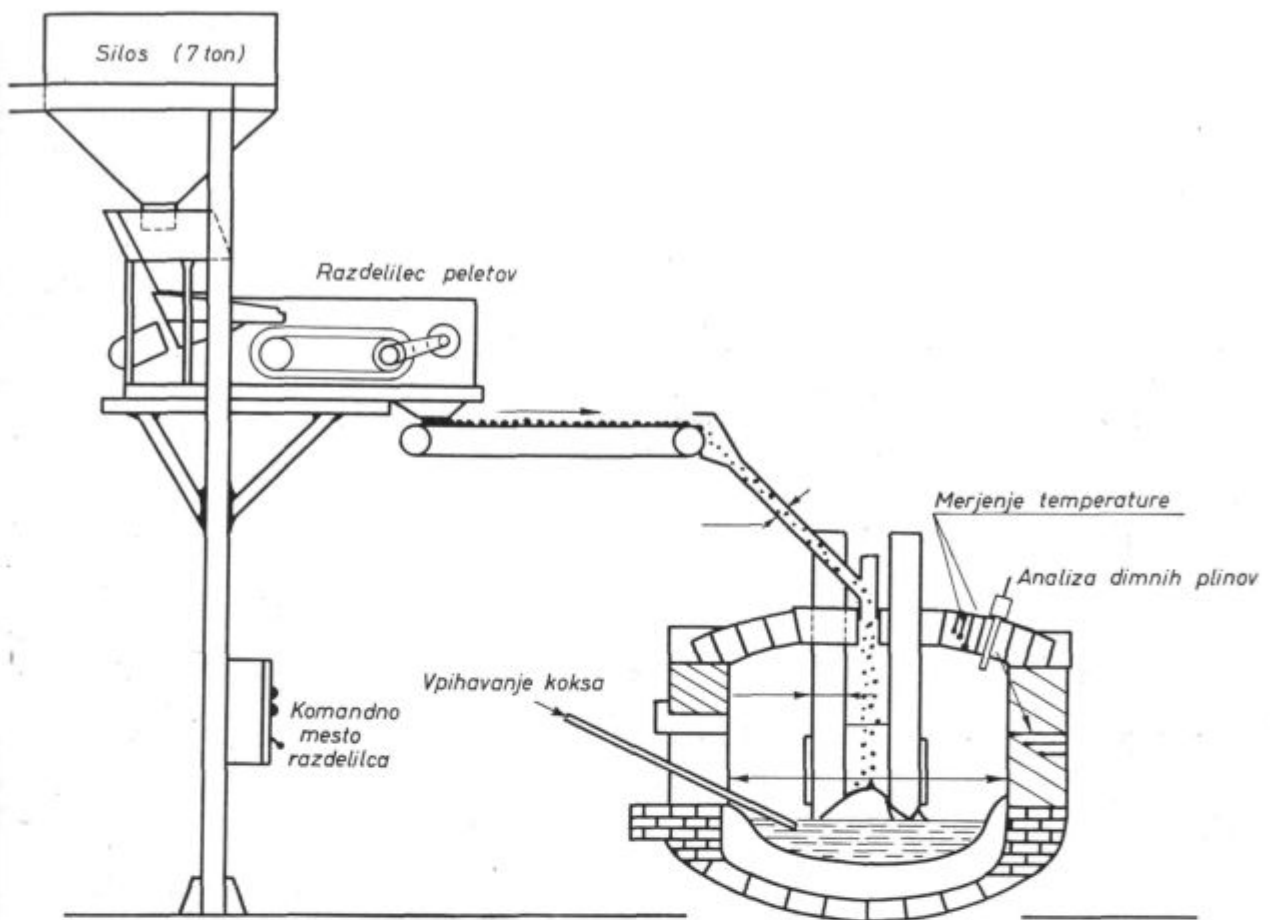


Slika 6
Jeklarna v Hamburgu

Metalizirani peleti imajo 1,5 % C in redukcijsko stopnjo 0,95. Ta ogljik se namenoma shrani za redukcijo wüstita v jeklarski peči; pri tem se peleti naogljijo tako, da se v redukcijski plin dovaja še nekaj metana, ki pri temperaturi okrog 500° C razpade v C + 2 H₂.

PREDELAVA ŽELEZOVE GOBE V ELEKTRO OBLOČNI PEČI

UHP elektro obročna peč v Hamburgu ima transformator z močjo 40 MVA. Peč najprej raztali 1/3 vložka iz starega železa. Po potrebi se pri začetku taljenja doda ruda in apno. Pelete začno



Slika 7

Naprava za kontinuirano dodajanje briketov

dovajati na vrh peči (sl. 7) s pomočjo transportnega traku in sicer po raztalitvi starega železa. V peč se dodajajo med polno obremenitvijo tj. peč se ne izklaplja. Količina žlindre je večja kot pri navadnem procesu, zato gredo elektrode v žlindro in obloka ne vidimo. Žlindro moramo z nagibanjem peči odstraniti. Odfosforenje je ugodno zaradi velike količine žlindre in dosti kisika.

Železarna v Hamburgu je bila prvotno zgrajena za betonsko železo. Danes pa že izdelajo 1/3 legiranih jekel. Izdelati nameravajo 2/3 legiranih jekel in ostalo betonsko železo. Gredice imajo odlično razteznost, ker je ruda čista. Metalizirane pelete izdelujejo iz švedskih rud. Poraba električne energije v UHP-peči je okrog 500 kWh/t. Danes jih stane tona železove gobe 180 DM. Od tega odpade 1/3 na predelavo in 2/3 na ceno rude. Z nekaterimi enostavnimi posegi bi se danes lahko poraba energije za proizvodnjo železove gobe dala znižati od $3,5 \cdot 10^6$ kcal/t na $2,0 \cdot 10^6$ kcal/t gobe tj. predelava bi se lahko pocenila še za 10–20 DM na tono, ev. tudi še več. Goba se mora pri vskladščanju dobro zaščititi, ker ima tendenco, da oksidira.

RAZPRAVA

F. Vizjak, Ravne: Kako vpliva sestava žlindre na procese pri proizvodnji jekla?

Prof. Marinček: Slabo je to, ker imamo veliko jalovine v gobi in zato bomo imeli tudi veliko žlindre. Čim več je jalovine, tem več je potrebno dodajati apna; bazičnost se drži v mejah 2 do 3 napram navadnemu postopku, ko je razmerje $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 3$ do 4,5.

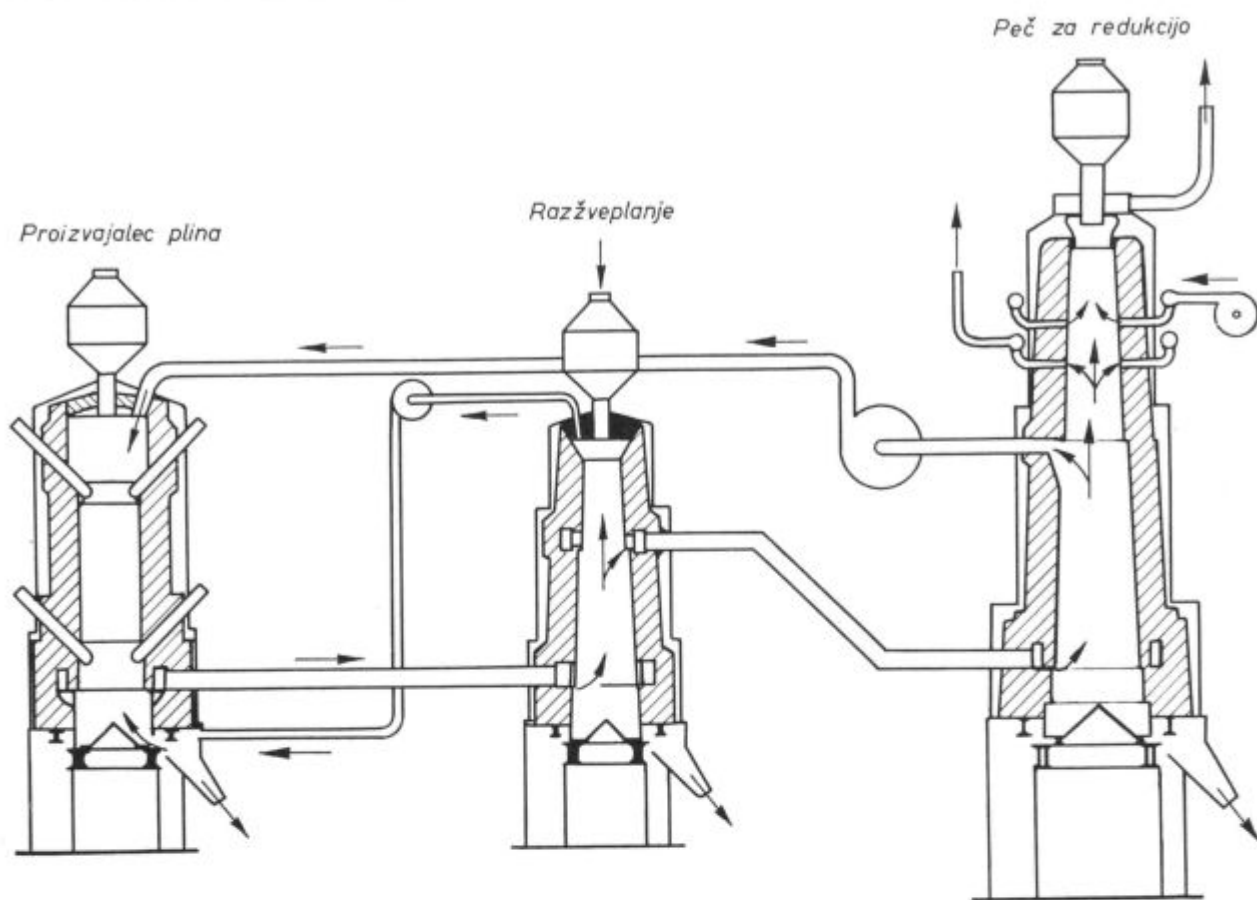
F. Mahorčič, Ravne: V Jugoslaviji nimamo ne rude, ne reductentov in bo potrebno tako napravo narediti nekje ob morju. Kako daleč se je razvil postopek z reductentom iz nafte?

Prof. Marinček: Wiberg postopek (slika 8) dela tudi z nafto. Potrebna toplota se dovaja električno. Peč za izdelavo redukcijskega plina se napolni s koksom in skozi vodi CO_2 , ki reagira z nafto in tvori se $\text{CO} + \text{H}_2$. Istočasno se lahko dovaja tudi CH_4 , ali pa se rabi koks. Te kombinacije so možne in se na teh postopkih danes dela.

V. Macur, Ravne: Kakšna je čistoča švedskih rud, ki jih uporabljajo pri Midrex postopku v Hamburgu in za koliko se dajo znižati škodljivi elementi?

Prof. Marinček: Švedske rude imajo 1,5 do 3,0% jalovine. Fosfor se pri izdelavi gobe ne da odpraviti, ampak pozneje v elektro obločni peči. Velika prednost postopka je, da uporablja metan, ki ima malo žvepla.

J. Arh, Jesenice: Ali lahko pelete zakladamo s košarami? Kakšni so praktični problemi pri izdelavi jekla zaradi velike količine žlindre?



Slika 8
Shema Wiberg-Söderfors postopka

Prof. Marinček: Peleti se dajo v obložno peč zakladati s košarami, vendar to ni ekonomično zaradi toplotnih izgub in izgub na času. Zlindra se pri obložni peči odstrani z nagnjenjem peči; pri tem teče žlindra v ponvo, ki je spodaj pod pečjo.

G. Klančnik, Ljubljana: Ali lahko v Sloveniji, v naslednjih desetih letih, računamo na uporabo metaliziranih peletov iz tujega tržišča, ali pa je boljše razviti lastno proizvodnjo metaliziranih peletov iz rud?

Prof. Marinček: Proizukcija metaliziranih peletov bo vedno večja in bo v naslednjih petih do desetih let znašala 5% produkcije jekla ali več, predvsem tam, kjer imajo ugodno surovinsko bazo. Za Slovenijo bi bilo ugodno, da se nekje ob morju postavi takšna naprava in naredi dolgoročno pogodbo z lastniki dobrih rud. V naslednjih 2–3 letih se bo videlo, kaj je bolj ekonomično: ali vzeti bolj revno rudo in jo obogatiti, ali pa kupovati bogato rudo iz Švedske, Liberije, Brazilije itd. Vsekakor je ugodno, če nisi vezan na uvoz.

G. Klančnik, Ljubljana: Proces pridobivanja železne gobe se bo v prihodnjih petih letih toliko izpopolnil, da bo na njega treba računati. Za čisti vložek smo v Sloveniji zelo zainteresirani. Poleg tega je surovo železo predrago.

Verjetno to muči tudi druge v svetu in bo treba davek plačati.

Prof. Marinček: Skrbno bo treba zasledovati razvoj tehnologije in ekonomičnosti v svetu. Kot primer naj velja postopek pridobivanja peletov v Hamburgu. Investicijski stroški na tona jekla, pridobljenega po LD postopku in v sklopu visokih peči, znašajo 800–900 DM. Investicijski stroški jekla, izdelanega v obložni peči na surovinski bazi peletov, pa znašajo 450 DM na tona jekla.

F. Vizjak, Ravne: Ali na proizvodnjo peletov vpliva tudi ogljik in redukcijna sposobnost oksidov?

Prof. Marinček: Danes se veliko dela na določevanju redukcijne sposobnosti oksidov. Koliko ti vplivajo, se še ne ve točno. V šahtni peči je dovolj časa in vprašanje redukcijne sposobnosti ni tako važno. Važen je razpad med redukcijo; nekatere rude so pri tem bolj občutljive, druge manj.

B. Koroušič, Ljubljana: Kakšen je pomen metalizirane vložke glede na razvoj kontinuiranih postopkov proizvodnje jekla?

Prof. Marinček: Kontinuirni postopki imajo interes za železarne, ki delajo vedno iste produkte npr. betonsko železo. Pri drugih, ki delajo različne produkte, ni važno.

V. Rac, Ravne: Kakšna legirana jekla so se do sedaj že proizvajala in ali lahko za vložek vzamemo legirane odpadke?

Prof. Marinček: Zaželeno je, da se dela s čistimi odpadki. Peleti prinesejo dosti kisika in imamo pri taljenju »odgor« nekaterih elementov kot so Si, Mn, Cr itd.

J. Arh, Jesenice: Koliko odstotkov vložke odpade na pelete?

Prof. Marinček: V Hamburgu so delali poskuse z uporabo 0–100% dodanih metaliziranih peletov. Običajno vzamejo 50% starega železa in 50% peletov.

F. Mahorčič, Ravne: V Sloveniji imamo plavže. Ali bi lahko koristili pelete z nižjo redukcijno stopnjo kot vložek za plavž?

Prof. Marinček: Novi članek v Stahl und Eisen piše, da uporaba metaliziranih peletov odkriva novo dobo v proizvodnji plavžev. Poveča se proizvodnja peči. Izkoristek kalorij pa je dosti slabši kot v klasični visoki peči. Važno je, da bo bodoča peč imela za redukcijno sredstvo samo CO.

G. Klančnik, Ljubljana: Uporaba železove gobe v obločni peči bi prinesla nekatere koristi kot npr. znižanje porabe kWh, povečano produktivnost itd. Zavedati pa se moramo, da je železova goba danes dražja od starega železa. Vendar, mi smo proizvajalci kvalitetnih in plemenitih jekel, zato je za nas odločilna kvaliteta jekel. Če se doseže bolj kvalitetno plemenito jeklo in poleg tega znat-

no višji odstotek izplena (ker je pri tem manj slabega produkta), potem je treba videti koristi v multiplikativni ekonomičnosti.

Prof. Marinček: To je centralno vprašanje metaliziranih peletov. Peleti prinesejo različne prednosti in gledati se mora samo kombinacija teh prednosti.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Artikel sind im kurzen die theoretischen Grundlagen für direkte Reduktion der Eisenoxyde gegeben. Die wichtigsten Verfahren für die Gewinnung der metallischen Pellets (Krupp, Lurgi, SL/RN, Midrex, Purofer, Wiberg und Hyl) sind angegeben. Es werden die Grundprinzipien so wie die wesentlichen Vor- und Nachteile dieser Verfahren analysiert. Für den praktischen Beispiel werden die technologischen Merkmale der Hamburger Stahlwerke, welche mit den vorreduzierten Pellets im

Einsatz arbeiten, angewendet. Besondere Betonung gilt der Technologie der Stahlerzeugung im UHP Elektroofen, der Arbeit mit grösserer Schlackenmenge, dem Entphosphorungs- und Entschwefelungsvorgang, dem Energieverbrauch, dem Kostenaufwand bei der Stahlerzeugung und anderem.

Der Vortrag des Autors wird mit einer Diskussion über die Aussichten der Anwendung der vorreduzierten Pellets in der Stahlerzeugung beschlossen.

SUMMARY

Theoretical fundamentals of the reduction of iron oxides are shortly described, on the most important processes for production of metallized pellets (Krupp, Lurgi, SL/RN and Midrex, Purofer, Wiberg, and Hyl) are presented. Beside the basic principles, author also analyses the essential advantages and disadvantages of the mentioned processes. As a practical example, technological scheme of the Hamburg steel works which uses metallized

charge is explained. Technology of steel manufacturing in UHP electrofurnace, work with greater amount of slag, desulphurisation and dephosphorisation processes, electrical energy consumption, costs of steel manufacturing are specially stressed. Author's paper was complemented by the discussion on the prospect of using metallized pellets in steel-making.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено короткое описание теоретической основы восстановления окисей железа. Описаны самые важные процессы получения металлизированных окатышей (Krupp, Lurgi, SL/RN, Midrex, Purofer, Wiberg и Hyl). С учётом основных принципов, автор излагает существенные преимущества и недостатки упомянутых процессов. В виде примера из промышленности рассмотрены технологические характеристики сталеплавильного завода

в Гамбурге, который работает с металлизированным садом. Особено подчеркнута важность технологии производства стали в электрической печи, работа с большим количеством шлака, о способах десульфурации и уменьшения фосфора, расход электроэнергии, производственные расходы стали и пр. В заключении статьи рассмотрено о перспективности употребления окатышей в производстве стали.