

Izdelava dinamo jekla po vod postopku v železarni Jesenice*

UDK: 669—982:669.14.018.583
ASM/SLA: D7a, D8m, TSn

J. Arh, B. Koroušič, J. Triplat

Prispevek obravnava probleme, ki nastopajo pri izdelavi jekel z zelo majhno vsebnostjo ogljika in so legirana s silicijem in aluminijem. Pri konvencionalnem postopku je težava predvsem pri vodenju oksidacije na meji ravnotežja pri majhni vsebnosti ogljika ter odstranjevanje velike količine dezoksidacijskih produktov žvepla in plinov iz jekla.

Izdelava dinamo jekel v vakuumu po VOD postopku je edina varianta, ki zagotavlja majhno vsebnost ogljika, žvepla in plinov ter zadostno čistočo jekla, ki je potrebna najprej zaradi nemotenega vlivanja dobre predelovalnosti v vročem in dobrih magnetnih lastnosti v izdelanem jeklu.

UVOD

Železarna Jesenice je edini proizvajalec dinamo jekla v Jugoslaviji. V elektro jeklarni pa predstavlja zaradi velike proizvedene količine najbolj masovno vrsto jekla. Pri izdelavi teh jekel imamo na Jesenicah že dolgotletne izkušnje in tradicijo.

Težave pri izdelavi jekel z majhno vsebnostjo ogljika, kot je dinamo jeklo, so privedle do odločitve in izbire VOD naprave za izdelavo dinamo jekla, nerjavnih jekel in legiranih jekel.

Po že dveletnem obratovanju in na osnovi dobrih rezultatov lahko trdimo, da je bila izbira postopka pravilna.

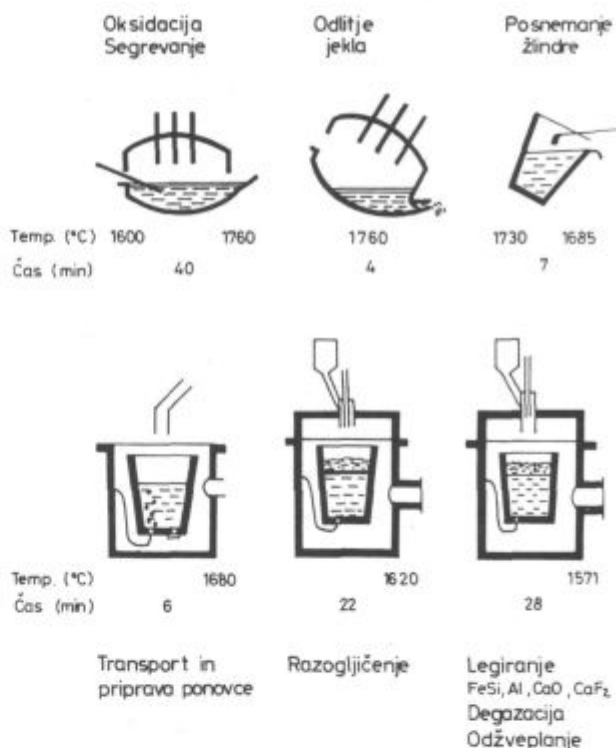
Izdelava dinamo jekel po VOD postopku je še vedno novost. V strokovni literaturi ni najti opisov in referenc, tako da je železarna Jesenice med redkimi proizvajalci v svetu.

Celotna tehnologija dupleks postopka EO peč-VOD naprava je narejena doma ob pomoči strokovnjaka Thyssen Edelstahlwerke. V glavnem je plod dela, znanja in izkušenj strokovnjakov železarne Jesenice.

OPIS IZDELAVE DINAMO JEKEL PO VOD POSTOPKU

Dinamo jeklo izdelujemo po dupleks postopku EO peč-VOD naprave. Vse naprave so grajene za 65 t teko-

čega jekla. Shematski prikaz obeh stopenj izdelave, to je v EO peči in v vakuumski komori, je podan na sliki 1.



Slika 1
Shematski prikaz stopenj izdelave dinamo jekla v EO peči in VOD napravi

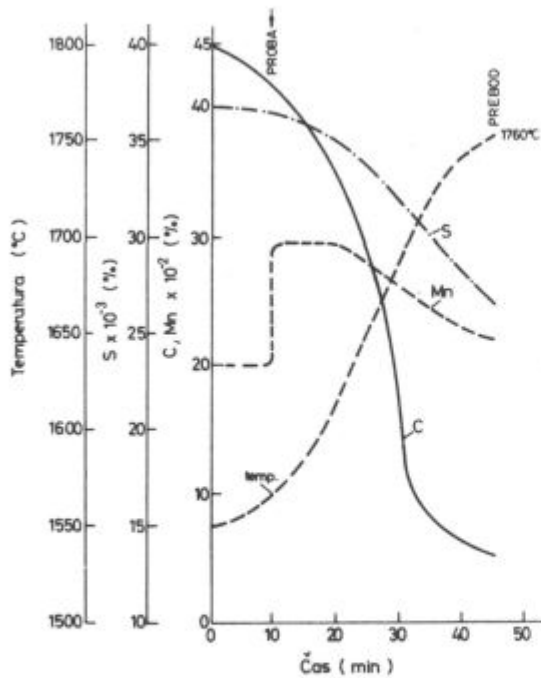
Fig. 1
Schematic presentation of stages in manufacturing electrical steel in an electric arc furnace and VOD set-up

PRVA STOPNJA — IZDELAVA JEKLA V EO PEČI

Razmere pri izdelavi jekla v EO peči so prikazane na sliki 2.

* Predavanje na 2. Evropskem kongresu o elektrojeklarstvu, Firenze, september 1986.





Slika 2
Spremembe kemijske sestave jekla v EO peči

Fig. 2
Variations of chemical composition of steel in the electric arc furnace

Izdelava jekla v peči je v bistvu zelo enostaven in kratek postopek. Vložek je tako sestavljen, da šarže raztalijo z okrog 0,30 do 0,50 % C. To je potrebno predvsem zaradi lažjega segrevanja taline na potrebno visoko temperaturo in čiščenja taline suspenzij nekovinskih vključkov. Pri sestavi vložka in izdelavi jekla je treba paziti še na vsebnost Mn, katerega koncentracija naj ne bo višja od predpisane analizne meje. Oksidacija začnemo pri visoki temperaturi, tako da je po oksidaciji že dosežena potrebna temperatura preboda, ki naj ne bo nižja od 1750. Da se izognemo preoksidaciji jekla v peči, je željeno, da zaključimo oksidacijo pri 0,03 do 0,05 % C. Oksidacija v EO peči je zmernejša in bolj enostavna, kot pri klasični izdelavi, saj ni potrebno pihati do ekstremno nizke vsebnosti C, ki je pri klasični izdelavi pri 0,02 % C.

Šarže samo še ogrejemo na potrebno temperaturo in izlijemo v dobro ogreto bazično obzidano ponovco, skupaj z žlindro.

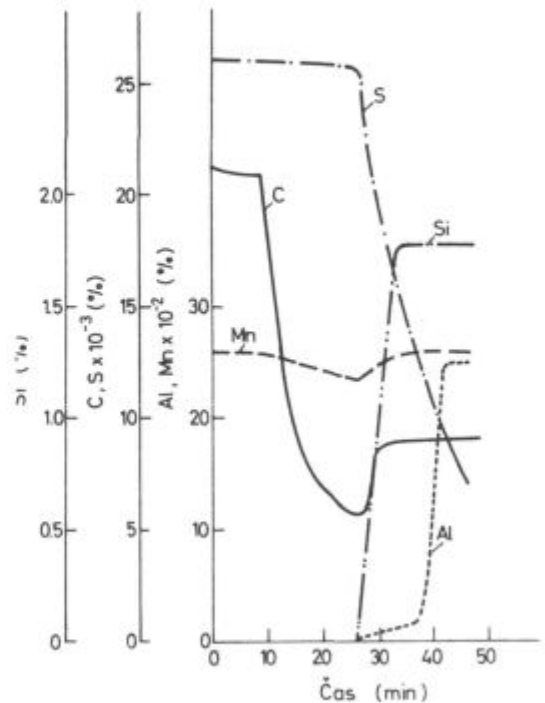
Nato posnamemo žlindro iz ponovce. Žlindro je treba dobro posneti, predvsem zaradi redukcije Mn v času legiranja, da ne zgrešimo predpisane analizne meje.

Ko smo posneli žlindro, šaržo prenesemo v vakuumsko komoro.

DRUGA STOPNJA — IZDELAVA JEKLA V VOD NAPRAVI

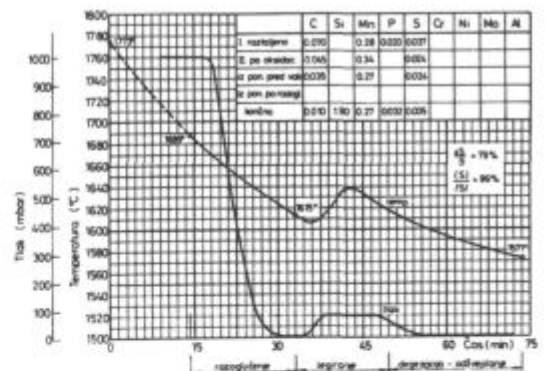
Iz ponovce vzamemo po prebodu vzorec za kemično analizo. Ko postavimo ponovco v vakuumsko komoro in priključimo cev za argon, izmerimo še temperaturo taline. Kemična analiza in temperatura sta izhodišči za nadaljni potek dela v vakuumski komori. Pri prenizki začetni temperaturi je potrebno šaržo najprej ogreti, pri

previsokem ogljiku pa pihati kisik, da pospešimo razogljčenje taline. Razmere pri izdelavi dinamo jekla v VOD komori kaže slika 3 in 4.



Slika 3
Spremembe kemijske sestave pri izdelavi dinamo jekla v VOD

Fig. 3
Variations of chemical composition in manufacturing electrical steel in the VOD equipment



Slika 4
Potek temperature in tlaka pri izdelavi dinamo jekla v VOD

Fig. 4
Temperature and pressure course in manufacturing electrical steel in the VOD equipment

Takoj po tem, ko smo izmerili temperaturo, pokrijejo komoro z vakuumskim pokrovom in obenem vključimo vakuumске črpalke.

Pri normalnih razmerah potekajo drugo za drugim razogljčenje, legiranje, degazacija in odzvepljanje.

Razogljčenje: Razogljčenje se začne takoj, ko začne padati tlak v vakuumski komori zaradi zniževanja parcialnega tlaka CO, za kar velja naslednja enačba: $(C) \times (O) = k \times p_{CO}$

Velikost razogljčenja je odvisna od vsebnosti aktivnega kisika. Kadar je ta prenizka, kar lahko ugotovljamo ali z direktnim merjenjem a_O ali pa posredno preko ogljika, takrat dodatno pihamo kisik skozi kopje direktno na talino pri znižanem tlaku, pri čemer selektivno odgoreva le ogljik.

Konec razogljčenja določimo po padcu tlaka v komori, pa tudi vizuelno z opazovanjem kuhanja skozi opazovalno okence.

Legiranje: Legiranje začnemo s preddezoksidacijo z večjo količino aluminija, ki ga damo v talino pri najnižjem tlaku skozi legirni sistem v pokrovu tako, kakor tudi ferosilicij in vse žlindrotvorne dodatke. Za legiranje uporabljamo droben FeSi 75 %, ki ga dodamo v dveh ali treh porcijah. Plini, ki se začno takoj izločati iz FeSi, povzročajo penjenje žlindre. Iz tega razloga večji ostanki žlindre ali dodajanje žlindrotvornih dodatkov pred razogljčenjem niso zaželeni. Ferosiliciju sledijo žlindrotvorni dodatki, pri čemer znaša dodatek apna od 12 do 15 kg/t.

Kvaliteta apna, ki jo določajo velikost žaro izgub in vlage ter reaktivnost, je zelo pomembna za stopnjo odžveplanja in končno kvaliteto jekla.

Takoj za žlindrotvornimi dodatki dodamo še zadnje količine aluminija za legiranje.

DEGAZACIJA IN ODŽVEPLANJE

Degazacija teče vzporedno z legiranjem, saj se sproščajo velike količine plinov, predvsem iz FeSi, pa tudi iz apna, ki ni vedno najboljše kvalitete, kar se pozna tudi na instrumentih za merjenje tlaka, ki naraste, ker črpalke pač ne morejo odsesati veliko sproščenih količin plinov naenkrat.

Odžveplanje se začne, ko je formirana tekoča žlindra s primerno kemično sestavo za dobro odžveplanje. Pri tem izkoriščamo sedanje znanje o žlindrah in skušamo sestaviti žlindro tako, da je sulfidna kapaciteta žlindre kar največja. Al_2O_3 kot važna komponenta v žlindrah nastaja sam zaradi dezoksidacije taline in redukcije žlindre.

Pomembno za stopnjo odžveplanja pa sta poleg pravilne kemične sestave žlindre zlasti še čas in moč mešanja jekla in žlindre pri najnižjem dosegljivem tlaku (pod 1 mb) in zadostni količini žlindre.

Določanje konca procesa:

Ker nimamo možnosti za merjenje temperature v času procesa, določimo konec procesa empirično na osnovi povprečnega padca temperature v času procesa. Pri tem skušamo upoštevati najnižje možne temperature za livanje, ker so nizke livne temperature pač zagoto-

vilo za nizke vsebnosti topnega kisika in s tem boljše livnost.

Proces v vakuumski komori traja skupno od 50 do 70 minut.

VREDNOTENJE REZULTATOV

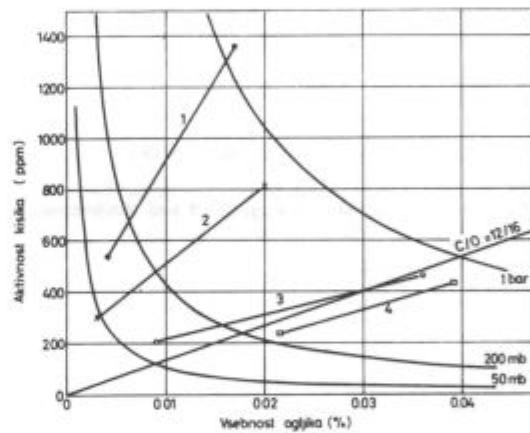
Do tehnologije, kakršno imamo danes, smo prišli skozi več razvojnih faz. Pri tem smo imeli dva glavna cilja:

1. izdelati jeklo z dobro livnostjo in dobro predelovalnostjo (plastičnostjo v vročem),

2. izdelati čim bolj čisto jeklo s čim manjšo vsebnostjo skupnega kisika in žvepla.

Oboje je med seboj tesno povezano. Velike količine Al_2O_3 , ki nastaja pri dezoksidaciji taline in redukciji žlindre, je treba z izpiranjem z argonom spraviti iz jekla v žlindro, za kar je potreben določen čas in določena energija mešanja.

Da preprečimo nastanek prekomernih količin Al_2O_3 , je treba delati tako, da je že ostanek kisika po razogljčenju čim nižji. To dosežemo, če šarže pri razogljčenju sledijo stehiometričnemu razmerju $C/O = 12/16$. Temu razmerju sledijo šarže z vsebnostjo ogljika pred razogljčenjem med 0,026 in 0,036 %, kar je razvidno tudi s slike 5.



Slika 5
Potek razogljčenja nekaterih poskusnih šarž

Fig. 5
Course of decarburisation of some test melts

Iz diagrama na sliki 5 spoznamo tudi za jeklarje pomembno ugotovitev, da je vsebnost kisika v talini po razogljčenju najnižja pri šaržah z najvišjim izhodnim

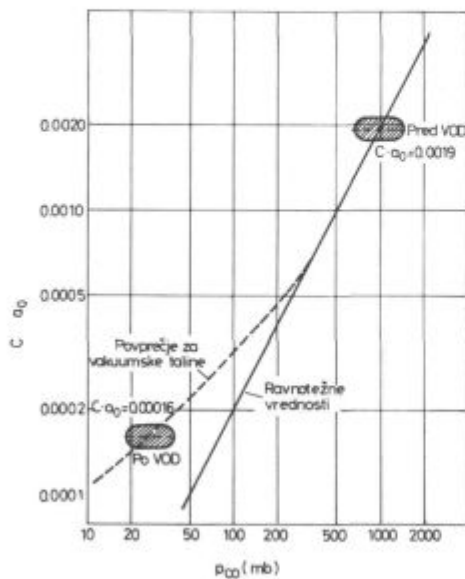
Tabela 1: Prikazujemo nekaj značilnih šarž z gibanjem ogljika in kisika v času razogljčenja v VOD

Šarža	a_O pred ppm	a_O po ppm	O_2 N m ₃	C pred %	Mn pred %	C po %	Mn po %	d C %	d O ppm
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1360	536	0	0,017	0,21	0,004	0,09	0,013	824
2	806	302	0	0,020	0,14	0,003	0,17	0,017	504
3	462	203	20	0,036	0,28	0,009	0,21	0,027	259
4	406	190	0	0,039	0,17	0,022	0,22	0,017	216

1. aktiven kisik pred razogljčenjem
2. aktiven kisik po razogljčenju
3. količina vpihanega O_2

4. 5. C in Mn pred razogljčenjem
6. 7. C in Mn po razogljčenju
8. C odstranjen z razogljčenjem
9. znižanje kisika v času razogljčenja

Iz navedenega je očitno, da če želimo zagotoviti čim nižje vsebnosti celotnega kisika v dinamo jeklu, je prvi pogoj že optimiranje tehnološke faze izdelave jekla v EO peči. Ali povedano z drugimi besedami, z oksidacijo ogljika v peči je treba prenehati pri 0,04 do 0,06 % ogljikom, kar sledi tudi iz znane odvisnosti produkta $C \times a_{O_2}$ v odvisnosti od tlaka p_{CO} , ki jo kaže slika 6.



Slika 6
Odvisnost produkta $C \times a_{O_2}$ od tlaka

Fig. 6
Relationship between the $C \times a_{O_2}$ product and the pressure

Pri šaržah 1 in 2 je začetna vsebnost ogljika premajhna in kisika previsoka. Pri šaržah 3 in 4 pa je začetna vsebnost kisika premajhna. Pri šarži št. 3 smo v času razogljčenja dodatno pihali kisik, zato je razogljčenje dobro. Pri šarži št. 4 kisika nismo pihali, zato razogljčenje ni zadostno.

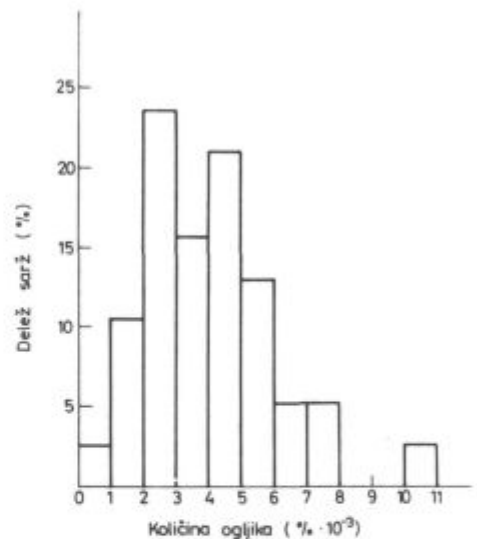
PRAKTIČNI REZULTATI DVELETNE PROIZVODNJE DINAMO JEKLA NA VOD NAPRAVI

Proizvodnja dinamo jekla v VOD napravi je enostavna in zanesljiva. Omogoča izdelavo jekla pri zelo različnih izhodnih stanjih, kot sta n. pr. visoka začetna vsebnost ogljika ali žvepla ali prenizka temperatura. V vsakem primeru je za uspeh nujen en sam pogoj, to je zanesljivo delovanje argonskega kamna. Brez mešanja z argonom ni VOD/VD postopka.

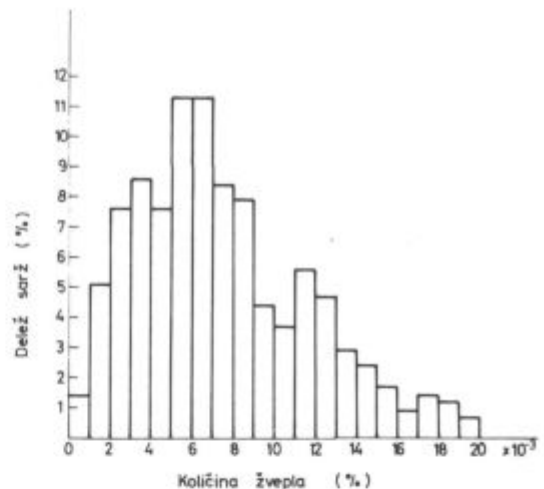
V tabeli 2 prikazujemo najbolj značilne pokazatelje VOD/VD postopka izdelave dinamo jekla.

Tabela 2: Značilni pokazatelji dveletne proizvodnje dinamo jekla po VOD postopku

	C pred VOD/VD			C po razoglj.		C končni			S končni		
	n	\bar{X}	S	n=39	n	\bar{X}	S	n	\bar{X}	S	
1984	158	0,0416	0,021	$\bar{X}=0,0044$	158	0,0104	0,0061	158	0,0086	0,0054	
1985	410	0,0278	0,0097	$S=0,002$	410	0,0128	0,0046	410	0,008	0,005	
jan. 86	30	0,024	0,0086	—	30	0,017	0,0038	30	0,0069	0,0047	
febr. 86	33	0,031	0,014	—	33	0,0098	0,0037	33	0,0089	0,0038	



Slika 7
Porazdelitev C po razogljčenju
Fig. 7
Distribution of S in final composition



Slika 8
Porazdelitev S v končni sestavi
Fig. 8
Distribution of S in final composition

Na sliki 7 vidimo porazdelitev ogljika po razogljčenju, na sliki 8 pa porazdelitev žvepla v končni sestavi.

Vzorcev za analizo po razogljčenju normalno ne jemljemo, ker ostane naprava zaprta. Za kontrolo procesa smo vzeli le 39 vzorcev, ki kažejo, da se da dosega ti zelo nizke vsebnosti ogljika. Najnižja doslej analizirana

na vsebnost C po razogljčenju znaša 0,0005 %, in sicer pri začetnih pogojih 0,025 C in 0,19 % Mn pred razogljčenjem. V končni analizi je bilo 0,0019 % C in 1,09 % Si.

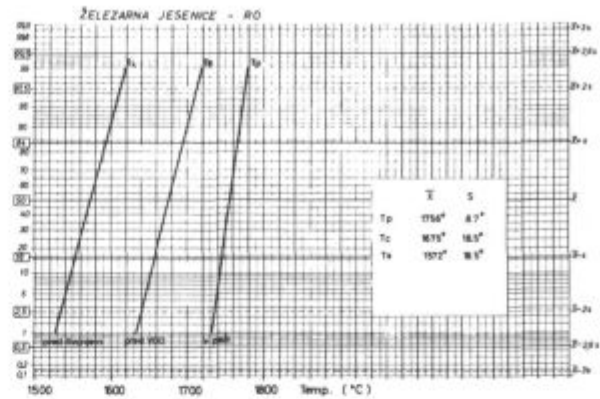
Postopno zmanjševanje standardne deviacije pri C in S v končni analizi kaže na vedno boljše delo.

Vsebnost ogljika v končni analizi je glede na nizko vsebnost C po razogljčenju razmeroma visoka, odvisna pa je predvsem od vsebnosti C v FeSi in količine dodanega FeSi.

VOD/VD postopek omogoča doseganje zelo nizke vsebnosti žvepla, kar je razvidno iz tabele 2 in s slike 8. Stopnja odžveplanja je visoka, v povprečju 74 %, z najvišjimi vrednostmi do 93 %, a v tabeli 3 prikazujemo nekaj značilnih kemičnih sestav žlindre pri duplex procesu EOP/VOD.

Na koncu prikazujemo še porazdelitev temperature pri izdelavi dinamo jekla za EO peč in VOD postopek.

Glej sliko 9.



Slika 9
Porazdelitev temperature pri izdelavi dinamo jekla za EO peč in VOD postopek

Fig. 9
Distribution of temperature in manufacturing electrical steel in the electric arc furnace and by the VOD process

Tabela 3: Nekaj kemičnih sestav žlindre, značilnih za proizvodnjo dinamo jekla po postopku EOP/VOD

Sarža	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	CaF ₂ S	%	
2 po prebodu po razogljčenju po odžveplanju (CaO, Al ₂ O ₃ , CaF ₂)	13,7	3,92	22,6	7,45	6,68	28,5	9,30	18,2	0,128	
	7,9	3,06	18,7	7,01	7,00	40,03	6,80	3,07	0,26	
	6,0	19,0	1,14	0,20	0,12	60,4	3,5	6,7	0,478	
	$\frac{S}{S} = 87\%$			$\frac{(S)}{ S } = 159$		$S_x = 0,003\%$				
5 po odžveplanju (CaO, Al ₂ O ₃ , CaF ₂)	1,60	27,11	1,70	0,26	0,33	47,5	7,36	12,65	0,463	
		$\frac{S}{S} = 92\%$			$\frac{(S)}{ S } = 463$		$S_x = 0,001\%$			
		$\frac{S}{S} = 91\%$			$\frac{(S)}{ S } = 120$		$S_x = 0,004\%$			
6 po odžveplanju (CaO, Al ₂ O ₃ , CaF ₂ /SiO ₂)	5,98	27,1	0,57	0,48	0,02	57,3	2,80	4,71	0,480	
		$\frac{S}{S} = 91\%$			$\frac{(S)}{ S } = 120$		$S_x = 0,004\%$			
		$\frac{S}{S} = 76\%$			$\frac{(S)}{ S } = 129$		$S_x = 0,008\%$			
7 po odžveplanju (CaO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂)	4,28	30,7	0,86	0	0	56,45	5,96	0	1,03	
		$\frac{S}{S} = 76\%$			$\frac{(S)}{ S } = 129$		$S_x = 0,008\%$			
		$\frac{S}{S} = 76\%$			$\frac{(S)}{ S } = 129$		$S_x = 0,008\%$			

ZAKLJUČKI

Od začetka leta 1984 izdelujemo na Jesenicah dinamo jekla po duplex postopku EO peč-VOD postopek. VOD naprava je grajena za obdelavo 65 t tekočega jekla. Poleg dinamo jekla izdelujemo v VOD napravi še nerjavna jekla in druga legirana jekla, ki jih je treba zaradi visoke vsebnosti plinov razpliniti.

V svetu dinamo jeklo le redko delajo po VOD postopku. Zato so dobljeni rezultati za jeklarje še tem bolj zanimivi.

Prednosti izdelave dinamo jekla po EOP/VOD postopku v primerjavi s klasičnim postopkom v EO peči so:

- izdelava jekla v EO peči je krajše in enostavnejše
- preoksidaciji taline v peči se lahko izognemo
- vsebnost C v izdelanem jeklu je občutno nižja
- za legiranje uporabljamo cenejše surovine
- odpade uporaba CaSi
- zanesljivost izdelave jekla je večja
- livnost jekla je odlična
- predelovalnost jekla pri valjanju je boljša

Dobri proizvodni rezultati so potrdilo, da smo se pri izbiri tipa naprave pravilno odločili.

ZUSAMMENFASSUNG

Seit Anfang des Jahres 1984 werden Dynamo Stähle in Jesenice nach dem Duplex Verfahren LBO — VOD Verfahren erzeugt. Die VOD Anlage ist für die Behandlung von 65 t flüssig Stahl ausgelegt. Ausser Dynamo Stählen werden in der VOD Anlage noch nichtrostende Stähle und andere legierte Stähle, die wegen des zu hohen Gasgehaltes zu entgasen sind erzeugt.

Wie bekannt werden Dinamo Stähle in der Welt nur selten nach dem VOD Verfahren erzeugt. Deshalb sind die erzielten Ergebnisse in Jesenice für die Stahlwerker um so mehr interessanter.

Vorteile der Erzeugung von Dynamo Stahl nach dem LBO/VOD Verfahren im Vergleich zum Konventionellen Verfahren im LB Ofen sind:

- Erzeugung von Stahl im LB Ofen ist kürzer und einfacher
- die Überoxydation der Schmelze im Ofen kann vermieden werden
- Endkohlenstoff im fertigen Stahl ist erheblich niedriger
- für das legieren werden billigere Legierungen angewendet
- entfällt Gebrauch von CaSi
- Zuverlässigkeit der Erzeugung von Stahl ist grösser
- Vergiessbarkeit von Stahl ist hervorragend
- Verformbarkeit von Stahl beim Warmwalzen von Brammen ist besser. Gute Produktionsergebnisse sind Bestätigung dafür, dass wir uns bei der Auswahl des Anlagentypes richtig entschlossen haben.

SUMMARY

Since the beginning of 1984 the electrical steel in Jesenice Ironworks is manufactured by the duplex electric arc furnace — VOD-process. The VOD set-up was built for treatment of 65 t molten steel. Beside the electrical steel also stainless and other alloyed steel are manufactured since they must be degassed due to high gas contents.

Electrical steel is in the world seldom manufactured by the VOD-process. Therefore the obtained results are still more interesting for steelmakers.

The advantages of manufacturing electrical steel by the EAF-VOD process compared with the standard process in an EAF are:

- manufacturing the steel in EAF is shorter and simpler,
 - overoxidation of melt in the furnace can be avoided,
 - carbon content in final steel is essentially lower,
 - cheaper raw materials can be used for alloying,
 - application of CaSi is deserted,
 - reliability of manufacturing is greater,
 - steel castability is excellent,
 - workability of steel in rolling is better.
- Good production results are the confirmation that the choice of the type of equipment was correct.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Начиная с 1984 года в металлургическом заводе Железарна Есенице изготавливается динамная сталь дуплекс процессом: дуговая электропечь — вакуумное устройство. Вакуумное устройство построено для обработки 65 т. расплавленной стали. Кроме динамной стали в этом устройстве изготавливаются также нержавеющие и прочие легированные стали, из которых надо вследствие высоко-го содержания газов эти газы удалить.

В общем изготовление динамной стали в вакуумном устройстве выполняется довольно редко и, поэтому, полученные результаты представляют значительный интерес для сталеваров.

Преимущество изготовления динамной стали способом дуговая печь — вакуумное устройство в сравнении с классическим способом в дуговой электропечи следующие:

- изготовление в дуговой печи короче и проще;
 - предварительная окисление не необходимо;
 - содержание углерода в изготовленной стали существенно ниже;
 - для легирования можно употребить более дешёвые сплавы;
 - отпадает употребление
 - изготовление стали более надёжное;
 - текучесть стали превосходная;
 - переработка стали во время прокатки улучшена.
- Хорошие производственные результаты доказывают, что был выбор типа устройства со стороны металлургического завода Есенице вполне правильный.