

# Prispevek k optimizaciji proizvodnje dinamo jekel

UDK: 669.14.018.5  
ASM/SLA: ST-f

Koroušić, B., O. Kürner, J. Arh

*Problematika proizvodnje dinamo jekel z 2 % Si in 0,25 % Al v električni obločni peči. Analiza posameznih etap: oksidacija, rafinacija, prebod, obdelava taline v ponovci. Termodinamična analiza reakcij med žlindro in talino v fazi rafinacije v peči. Obnašanje kisika v tekočem jeklu s posebnim podarkom na kinetiko izločanja oksidnih vključkov v fazi mirovanja, prelivanja iz ponovce v ponovco in argoniziranja.*

## UVOD

*Železarna Jesenice ima dolgoletno tradicijo na področju izdelave tk. i. elektrotehničnih jekel, oziroma dinamo in trafo jekel.*

Zaradi nenehnega naraščanja proizvodnih stroškov, zlasti drastičnega povečanja cene električne energije v zadnjem desetletju, si prizadevajo proizvajalci, pa tudi številni porabniki teh jekel, da je kvaliteta jekla v predelanem stanju čim višja.

V železarni Jesenice proizvajamo dinamo jekla v 60-tonski električni obločni peči. Intenzivnejša proizvodnja EKC — kvalitet se je začela konec 1976. leta za oskrbo hladne valjarne. Današnja planska proizvodnja dinamo jekel znaša okoli 60.000 ton, kar predstavlja 12 % celotne proizvodnje železarne Jesenice.

Z začetkom masovne proizvodnje teh jekel so se začele pojavljati različne tehnološke, in delno tudi kvalitetne težave. Pri litju jekla je največ težav povzročalo mašenje izlivenikov in mešanje žlindre in jekla pri preobodu peči.

Ker ima železarna Jesenice v svojem investicijskem programu do 1985. leta nabavo VOD — postopka, kakor tudi napravo za vpihovanje Ca — zlitin, je razumljiva želja, da proizvodnjo dinamo jekel preusmeri na to novo tehnologijo, ki ima vrsto prednosti v primerjavi z obstoječo proizvodnjo. Toliko bolj je pomembno posneti sedanjo tehnologijo s procesnega, pa tudi z ekonomskega vidika, ker bo le na ta način možno izvršiti primerjavo med novo in staro tehnologijo.

V članku so opisani nekateri rezultati iz raziskovalne naloge\*, ki je del širšega projekta. Osnovni

cilj projektne naloge je izboljšanje obstoječe tehnologije in komparativni študij pri prehodu iz stare v novo tehnologijo.

## 1. TEHNOLOGIJA IZDELAVE DINAMO JEKEL

Le redko v metalurški literaturi zasledimo tako pomanjkljive informacije o določeni problematiki, kot je tehnologija izdelave dinamiko jekel. Največji del informacij se nanaša na tehnične karakteristike teh jekel (teksture, magnetne lastnosti, staranje itd.) (1—8), medtem ko je področje izdelave jekla (z izjemo nekaj informacij o izdelavi teh jekel v SM — pečeh) praktično nedostopno za strokovno literaturo (9—18).

Zato je pri tovrstnih raziskavah zelo težko delati primerjavo med našimi praktičnimi izkušnjami in rezultati drugih avtorjev.

Tehnološki proces izdelave dinamiko jekel v železarni Jesenice poteka po tk. i. klasičnem postopku:

— 60-tonsko električno obločno peč uporabljamo za taljenje vložka, oksidacijo ogljika, rafinacijo v peči,

— obdelava taline v ponovci (kar vključuje legiranje Si in Al) po metodi dveh ponovc,

— litje jekla v brame in njihova nadaljnja predelava v vroči valjarni.

(I) Vložek je sestavljen iz grodlja (13 %), starega železa (33 %), ostanek je krožni material. Zaželeno je, da vsota oligo-elementov  $Cu + 8 \times Sn$  ne prekorači mejo 0,5 %.

Taljenje vložka izvajamo intenzivno z uporabo kisika za rezanje starega železa. Taljenje traja v povprečju  $170 \pm 26$  min, kar pomeni, da je povprečna hitrost taljenja okoli 27 ton/uro. Po taljenju znaša povprečna sestava I. preizkušanca:

0,52 % C, 0,11 % Si, 0,33 % Mn, 0,020 % P, 0,039 % S, 0,18 % Cr, 0,23 % Cu, 0,15 % Ni.

V fazi taljenja dodajamo škajo ali rudo, apno, apnec in jedavec v skupni količini okoli 6 % teže kovinskega vložka.

(II) Oksidacija taline poteka s plinskim kisikom. Povprečna hitrost oksidacije ogljika (v času pihanja 20—45 min) znaša 0,62 % C/h.

\* Projekt C 2 — 0169: Tehnologija obdelave jekla s posebnimi postopki sekundarne rafinacije, 1981—1985

Med oksidacijo se v celoti odstrani Si, delno Mn, S, P in Cr, pri čemer se novo nastali oksidi (delno žvepla) prenašajo v žlindro.

Po končanem pihanju dosežemo naslednje povprečne vrednosti:

a) jeklo: 0,021 % C, 0,18 % Mn, 0,014 % P, 0,030 % S, 0,13 % Cr, 0,23 % Cu, 0,15 % Ni.

b) žlindra: 29 % CaO, 17 % SiO<sub>2</sub>, 19 % FeO, 8 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10 % MnO, 6 % MgO, 4 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,28 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 3 % CaF<sub>2</sub>.

c) temperatura taline: 1696 °C.

(III) Cilj rafinacije taline je odprava žvepla in delno znižanje vsebnosti kisika preko preddezoksidacije taline z FeMn-suraffine. Povprečni čas rafinacije znaša okoli 65 minut, pri čemer se temperatura taline zniža za okoli 50 °C. Kot bomo pokazali v nadaljnji analizi, ta faza zasluži precejšnjo pozornost zaradi nekaterih pomanjkljivosti, ki niso v skladu s teoretičnimi osnovami procesa rafinacije jekla.

(IV) Prebod taline iz peči izvršimo skupaj z žlindro v šamotno ponovco. Med prebodom dodajamo okoli 2/3 FeSi in le manjši del aluminija za vezavo kisika in zaščito Si pred oksidacijo. Zaradi legiranja taline s silicijem naraste temperatura taline na okoli 1965 K (= 1692 °C).

Povprečni izkoristki legiranja so: ETA-Si = 93 % in ETA-Al = 56 %.

Sestava taline: 0,031 % C, 1,28 % Si, 0,37 % Mn, 0,025 % P, 0,023 % S, 0,10 % Cr, 0,22 % Cu, 0,15 % Ni, 0,078 % Al.

Po času cca. 10 min se prelije talina iz 1. ponovce v 2. ponovco z dolomitno obzidavo in drsnim zapiralom. Pri tej operaciji se zadrži žlindra v celoti v 1. ponovci.

Talina se pri tem legira s preostalo količino Si in Al in takoj nato pokrije s sintetično žlindro (apno + jedavec).

Mirovanje taline v 2. ponovci traja v povprečju 10 minut, nakar sledi litje v brame.

## 2. METALURŠKE ZAKONITOSTI V PROCESU RAFINACIJE TALINE V PEČI IN PONOVCU

Po končani oksidaciji ogljika ima talina zelo visoko vsebnost aktivnega kisika, ki je pogojena z vsebnostjo ogljika in mangana, pa tudi z oksidacijskim potencialom žlindre.

Čprav del oksidativne žlindre odstranimo in dodamo večjo količino apna in jedavca, je vsebnost oksidov (FeO + MnO) še vedno visoka in se giblje okoli 13 do 15 %.

### 2.1 Rafinacija v peči

(i) Vsebnost kisika, ocenjena po kriteriju ogljika, sledi iz analize reakcije:



Termodinamična analiza reakcije (1) daje naslednjo vrednost za aktivnost ogljika:

$$a_{\text{O}} = \frac{P_{\text{CO}}}{K_1 \cdot \% \text{C}} \quad (2)$$

Z uporabo znane vrednosti K<sub>1</sub> in empiričnih ugotovitev za P<sub>CO</sub> v fazi kuhanja šarže (P<sub>CO</sub> = = 1.0 bar) lahko enačbo (2) zapišemo v obliki:

$$a_{\text{O}} = \frac{0,0021 \cdot P_{\text{CO}}}{\% \text{C}} = 0,0875 \quad (3)$$

Aktivnost kisika pri povprečni vrednosti 0,024 % C znaša torej okoli 0,09 %. Po kriteriju oksidacijskega potenciala žlindre lahko izhajamo iz reakcije:



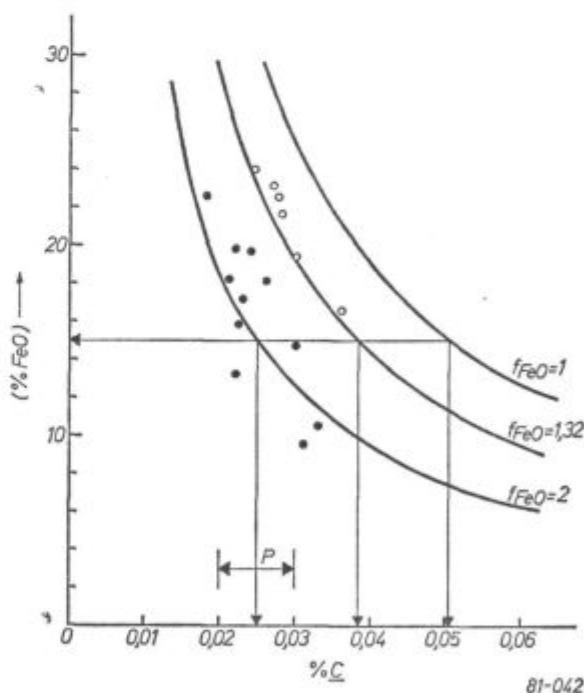
V tem primeru velja relacija:

$$a_{\text{O}} = \frac{a_{\text{FeO}}}{K_4} \quad (5)$$

Za konkretno sestavo žlindre v fazi rafinacije lahko po teoriji Čujka<sup>17</sup> ocenimo vrednost a<sub>FeO</sub> po relaciji:

$$a_{\text{FeO}} = \frac{f_{\text{FeO}}}{n'} = 0,223 \quad (6)$$

Po tej metodi dobimo vrednost aktivnosti kisika: a<sub>O</sub> = 0,06. Če povežemo oksidacijski potencial žlindre z vsebnostjo ogljika, dobimo odnose, ki jih prikazuje **slika 1**.



Slika 1

Ravnovesni odnosi med vsebnostjo FeO v žlindri in vsebnostjo ogljika v talini (faza rafinacije) pri T = 1918 K (= 1645 °C)

Fig. 1

Equilibrium relations between FeO content in slag and carbon content in melt (refining phase) at T = 1918 K (= 1645 °C)

(II) Dobljena analiza kaže, da je potrebno v fazi rafinacije izvršiti občutno znižanje vsebnosti aktivnega kisika, če želimo kontrolno znižanje mangana v talini. V nasprotnem primeru bo »odgor« mangana tako velik, da postane dodatek dragega FeMn-suraffine nesmiseln. Ta trditev je povsem v soglasju s praktičnimi rezultati, ki jih kaže slika 2.

Iz teh podatkov je razvidno, da se pri razmerju FeO/MnO = 2,22 več kot polovica Mn oksidira in da torej Mn v teh količinah ne more bistveno znižati vsebnost kisika.

Ker je v celotni fazi rafinacije vsebnost kisika visoka, so termodinamični pogoji za odpravo žvepla otežkočeni in edino visoka temperatura ugodno vpliva na kinetiko odžveplanja.

To dejansko tudi dokazuje primerjava vsebnosti žvepla po končani oksidaciji, oziroma rafinaciji taline (povprečne vrednosti):

po končani oksidaciji:  $\underline{S}_O = 0,030 \%$

po končani rafinaciji:  $\underline{S}_R = 0,024 \%$

Tudi v zadnji argument, ki smo ga omenili v zvezi z upravičenostjo faze rafinacije v peči, tj. odprava nekovinskih vključkov, lahko podvomimo, kajti pri tako visokem potencialu kisika v talini obstaja le manjša količina nekovinskih vključkov, kar smo dokazali s primerjavo med celotnim in aktivnim kisikom<sup>21</sup>.

Iz vsega povedanega zaključimo, da je faza rafinacije v peči pri sedanjih tehnološki shemi neutemeljena, zlasti preddezoksidacija s šibkim (toda dragim) dezoksidantom FeMn-suraffine in da bi jo

bilo mogoče v celoti odpraviti oziroma prenesti v ponovco, o čemer bomo spregovorili v naslednjem poglavju.

### 2.2 Proces v ponovci

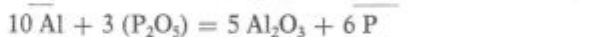
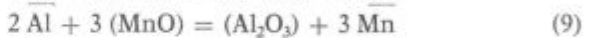
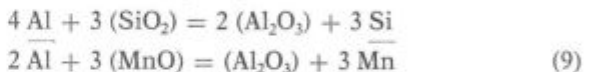
Po preobodu taline iz peči poteka v ponovci vrsta procesov in reakcij, ki močno vplivajo na čistočo jekla in nadaljnja dogajanja v ponovci:

1. ogrevanje predzlitin, oziroma dezoksidantov do temperature tališča —  $T_m$ ,
2. taljenje predzlitin, oziroma dezoksidantov,
3. ogrevanje na temperaturo tekočega jekla,
4. reakcija mešanja s tekočim jeklom,
5. reakcija v sistemu: tekoče jeklo — žindra — obloga — zračna atmosfera

Od vseh reakcij imata največji pomen reakciji:



oziroma medsebojni vplivi:



Zanimivo je vprašanje, kako vplivata prisotnost Si in Al na oksidacijski potencial taline.

Analiza reakcije  $\underline{Si} + 2 \underline{O} = (\underline{SiO}_2)$  daje naslednje informacije:

$$\Delta G_7 = -1,203 \cdot 445 + 386,64 T \text{ (J/mol)}$$

$$\log K_7 = \log \frac{a_{\underline{SiO}_2}}{a_{\underline{Si}} \cdot a_{\underline{O}}^2} = \frac{31038}{T} - 12,02 \tag{10}$$

$$\log a_{\underline{Si}} = \log \% \underline{Si} + 0,321 \% \underline{Si} + 0,056 \% \underline{Al} \tag{11}$$

$$\log a_{\underline{O}} = \log \% \underline{O} - 0,131 \% \underline{Si} - 0,02 \% \underline{Mn} - 0,74 \% \underline{Al} - 0,133 (\% \underline{P} + \% \underline{S}) \tag{12}$$

Pri analizi enačbe (10) izhajamo iz naslednjih podatkov, oziroma predpostavk:

1. temperatura taline v 1. ponovci znaša v povprečju  $1665 \pm 14 \text{ K}$  ( $= 1692 \pm 14 \text{ }^\circ\text{C}$ ),

2. povprečna teža taline v ponovci je 71,45 ton,

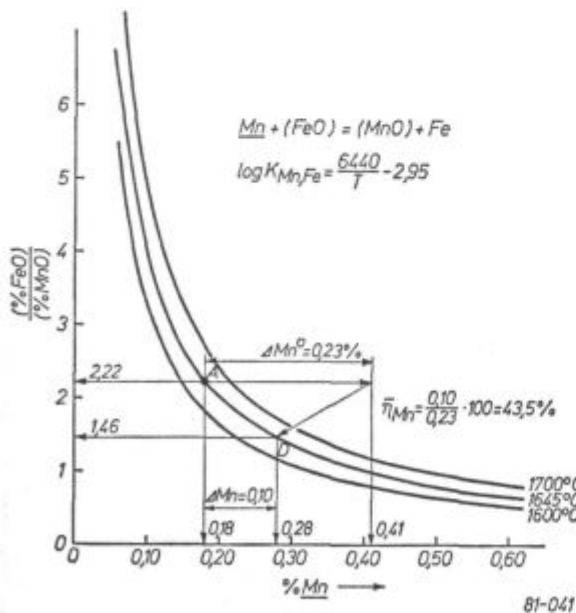
3. povprečna sestava taline v 1. ponovci naj bo identična sestavi taline pred preobodom z možnimi odstopanji pri C, S in P,

4. vsebnosti silicija in aluminija naraščata v skladu z enačbo legiranja:

$$\underline{X} = \underline{X}_p + \tau_k \cdot \Delta X^0 \cdot \frac{(\% i)}{100}, \tag{13}$$

pri čemer je  $\underline{X}$  = dejanska vsebnost po končanem legiranju,

$\underline{X}_p$  = vsebnost elementa X pred pričetkom legiranja,



Slika 2

Odvisnost med sestavo žlindre (FeO/MnO) in vsebnostjo Mn v talini v fazi rafinacije

Fig. 2

Relationship between the (FeO/MnO) slag composition and Mn content in melt during the refining phase

$\eta_x$  = izkoristek elementa X pri le-  
giranju, (%)  
 $\Delta X^0$  = količina dodatka predzlitine  
(v %)  
(% i) = % udeležbe elementa x v  
predzlitini.

Na osnovi teh podatkov lahko izračunamo  
aktivnosti Si in O (enačbe 11 in 12):

$$\log a_{Si} = \log 1,28 + 0,321 \cdot 1,28 + 0,056 \cdot 0,078 = 0,522$$

$$a_{Si} = 3,30$$

$$\log a_O = \log \% O - 0,131 \cdot 1,28 - 0,02 \cdot 0,37 - 0,74 \cdot 0,078 = -0,133$$

$$(0,025 + 0,023) = \log \% O - 0,239$$

$$a_O = 0,577 \cdot \% O$$

$$\log K_7 = \frac{31038}{1692 + 273} - 12,02 = 15,795 - 12,02 = 3,775$$

$$K_7 = 5962$$

Za oceno vsebnosti kisika, če bi kisik bil pod  
kontrolno reakcije  $Si + 2 O = (SiO_2)$ , uporabimo  
1. predpostavko, da je  $a_{SiO_2} = 1$ .

To pomeni, da smo v talino dodali najprej FeSi.  
V tem primeru bi znašala ravnotežna vsebnost  
kisika:

$$O = \sqrt{\frac{1}{a_{Si} \cdot K_7 \cdot f_{O_2}^2}} = \sqrt{\frac{1}{3,3 \cdot 5962 \cdot 0,577^2}} = 0,0124 \%$$

Če izhajamo iz predpostavke, da je vsebnost  
kisika pred prebodom znašala okoli 0,09 %, potem  
lahko ocenimo »odgor« silicija:

$$\Delta \% Si = \frac{M_{Si}}{2 M_O} \cdot \Delta O = \frac{28,086}{32} \cdot (0,09 - 0,0124) = 0,0711 \text{ ali } 52 \text{ kg FeSi,}$$

$$\text{ozioroma } \eta_{Si} = \frac{1000 - 51}{1000} \cdot 100 = 94,9 \%$$

(praktično: 93 %).

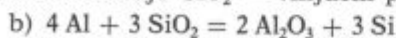
Pri tem nastanejo  $SiO_2$  — vključki v količini:

$$\Delta SiO_2 = \frac{M_{SiO_2}}{2 M_O} \cdot \Delta O = \frac{60,08}{32} \cdot (0,09 - 0,0124) = 0,152 \%$$

Ker istočasno dodajamo tudi Al, ta takoj  
reagira s kisikom v talini, tako nastanejo  $Al_2O_3$   
vključki po reakciji:



ali se reducirajo  $SiO_2$  — vključki po enačbi:



Potrebno količino Al za kompletno redukcijo  
 $SiO_2$  — vključkov izračunamo iz stehiometričnega  
razmerja:

$$\Delta \% Al = \frac{4 M_{Al}}{3 M_{SiO_2}} \cdot \Delta SiO_2 = \frac{4 \cdot 26,98}{3 \cdot 60,086} \cdot 0,152 = 0,0910$$

Ker smo dodali teoretično količino Al 0,135 %, ostane v talini

$$0,135 - 0,091 = 0,0441 \% Al,$$

ozioroma izkoristek Al znaša le 32,5 %. (praktična vrednost: 55 %)

V praktičnih pogojih delujeta istočasno Al in Si, tako da je končni rezultat kompleksna reakcija med številnimi reaktanti v tekočem jeklu, žlindri in s površino ognjevarnega gradiva.

Zanimivo je vprašanje, koliko je lahko celotnega kisika v ravnotežju s talino in nekovinskimi vključki, ki nastanejo po prebodu. Odgovor na to vprašanje smo poskušali poiskati s quasi-teoretično izpeljano enačbo<sup>22</sup>:

$$\log \% O_C + \log f_O = 0,25 \log \left[ a_{Mn} \cdot a_{Si} \cdot 10^{\frac{36676}{T}} - 10,34 + a_{Al} \cdot a_{Si} \cdot 10^{\frac{62076}{T} - 21,82} \right] \quad (14)$$

Z uporabo te enačbe in podatkov o sestavi taline v 1. ponovci dobimo naslednje podatke:

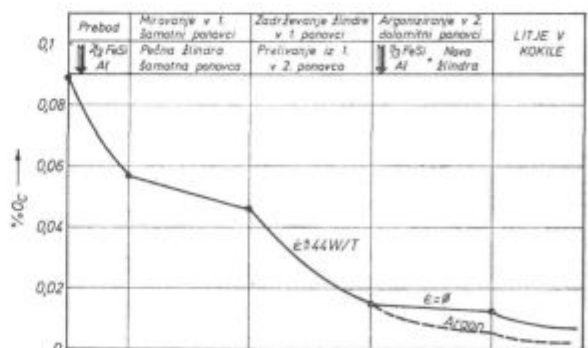
$$a_O = 0,0062$$

$$O_C = 0,0086 \%$$

Pri sedanji tehnologiji mora talina v 1. ponovci mirovati 10 minut (dejansko miruje  $8,04 \pm 2,22$  minute). V tem času poteka proces izločanja vključkov, ki se nadaljuje tudi v fazi prelivanja in mirovanja taline v 2. ponovci, ozioroma v fazi litja taline.

Na sliki 3 je prikazana teoretično možna kinetika izločanja, ki je izračunana na osnovi matematičnega modela in bo detajlno opisana na drugem mestu<sup>20, 23</sup>.

Iz slike 3 je razvidno, da na hitrost izločanja zelo ugodno vpliva faza prelivanja, ki jo lahko okarakteriziramo z energijo mešanja  $\epsilon = 44 \text{ W/t}^20$ . Precejšnje izboljšanje čistoče taline bi prineslo



Slika 3

Teoretično izpeljana kinetika izločanja nekovinskih (oksidnih) vključkov pri izdelavi dinamičnega jekla (kvalitete EKC-18)

Fig. 3

Theoretically deduced kinetics of precipitation of non-metallic (oxide) inclusions in manufacturing electric steel (EKC-18 quality)

nadaljevanje intenzivnega mešanja s plinskim argonom v količinah okoli 200 l Ar/min. Na ta način bi dosegli znatno nižje vsebnosti oksidnih nekovinskih vključkov (ki so pretežno korundnega tipa). Po naši oceni bi se znižala vsebnost celotnega kisika od sedanjih  $68 \pm 20$  ppm na okoli 36 ppm.

Znižanje vsebnosti kisika bi se pokazalo zlasti v fazi litja, ker bi s tem odpadle težave okoli mašenja izlivnikov, ki pri sedanji tehnologiji predstavljajo precejšnji problem.

## SKLEPI IN NAPOTKI ZA PRAKSO

V tuji in domači literaturi zasledimo le redke raziskave, ki se nanašajo konkretno na probleme tehnologije izdelave dinamiko-jekel. Večina raziskav se nanaša na študij uporabnih lastnosti, zlasti vpliv sestave, predelave in drugih tehnoloških dejavnikov na električne in strukturne lastnosti. Zelo malo (in tudi ti so večkrat kontradiktorni) zasledimo uporabnih podatkov o jeklarski praksi.

1. Priprava vložka je na splošno zelo pomembna operacija pri izdelavi jekla. Pri sedanji tehnologiji se je ustalila praksa, da je vložek sestavljen iz treh osnovnih komponent:

1. grodelj: teža okoli 8—10 ton, cca. 13 % udeležba,
2. krožni material: 30—32 ton, 54 % udeležba,
3. staro železo: 25 ton, 33 % udeležba,

2. Približna ocena termične bilance pokaže, da bi uporaba tekočega grodlja namesto sedanje prakse, tj. uporabe »mrzlega vložka« prinesla precejšnje prihranke pri energiji, ki smo jih ocenili na **4.600.000 kWh/na leto.**

3. Zanimivo je vprašanje žvepla v vložku. Naša ocena je pokazala, da največ žvepla prinese kovinski vložek, in sicer grodelj, oziroma kokilni liv. Del žvepla prinese tudi nekovinski vložek v obliki sulfida, oziroma sulfata (žgano apno reda velikosti 0.1 % S).

4. Povprečni časi za posamezne delovne faze so naslednji:

— taljenje:  $170 \pm 26$  min (1. proba), trajanje faze:  $170 \pm 26$  min

— oksidacija:  $218 \pm 31$  min (2. proba), trajanje faze:  $48 \pm 5$  min

— rafinacija: 252 min (3. proba), trajanje faze:  $65 \pm 3$  min

— prebod:  $283 \pm 32$  min, trajanje faze: cca 4 min

— čas zadrževanja v 1. ponovci:  $8 \pm 2$  min

— čas prelivanja iz 1. v 2. ponovco: 8 min (podatek iz obrata)

— čas zadrževanja v 2. ponovci:  $10 \pm 1,6$  min

5. Fazo taljenja karakterizirajo naslednji tehnološki podatki:

— povprečna hitrost taljenja vložka je 27 ton/h,

— povprečna vsebnost ogljika v 1. preizkušancu je  $0,52 \pm 0,20$  % C. Nekaj manj kot polovica analiziranih šarž ima vsebnost ogljika pod predpisano

mejo: 0,5 % C in 12 % šarž celo manj kot 0,3 % C. Posledica tega stanja je upočasnjeno izkuhanje šarže z znanimi negativnimi vplivi na odpravo plinov in nekovinskih vključkov, podaljšanje faze taljenja zaradi naogljichenja taline in pdb.

6. Faza oksidacije s plinskim kisikom ima pri izdelavi dinamiko jekel velik pomen. Oglejmo si osnovne tehnološke značilnosti sedanje prakse:

— povprečna hitrost razogljichenja znaša 0,01 % C/min, kar pri nizkolegiranih jeklih štejemo v zelo počasno oksidacijo. Vzrok za to je iskati v nezadostni intenziteti pihanja kisika, ki bi po normativih znanih jeklarn morala znašati v naših pogojih min.  $0,30 \text{ m}^3 \text{ O}_2/\text{tono}$ , min. in max.  $0,50 \text{ m}^3 \text{ O}_2/\text{tono}$ , min. Na ta način bi dosegli hitrost razogljichenja (pri C = 0,5 % v 1. preizkušancu): min. 0,024 % C/min in max. okoli 0,04 % C/min. S tem bi skrajšali čas oksidacije od sedanjih  $48 \pm 5$  min na 20, oziroma celo na 12 minut.

7. Povprečna vsebnost ogljika po končanem pihanju leži v predpisanih mejah (0,02—0,03 % C). Vsebnost Mn je nekoliko nizka ( $X = 0,18$  % Mn). Temperature se gibljejo okoli  $1696 \pm 27$  °C.

8. Posebno pozornost zasluži sestava žlindre po končani oksidaciji. Analiza je pokazala, da je bazičnost ( $B = \% \text{ CaO}/\% \text{ SiO}_2$ ) znatno nižja od optimalne ( $B = 1,75$ ), kar ima direktni vpliv na oksidacijski potencial žlindre in s tem na hitrost oksidacije ogljika (v 1. fazi pihanja, ko je % C 0,2).

9. Termodinamična analiza sistema žlindra — talina je pokazala, da je po končanem pihanju s kisikom doseženo skoraj ravnotežno stanje, kar je pomembna ugotovitev raziskav. Namreč s tem se odpira možnost, da proces kontroliramo z merjenjem kisika v talini in na osnovi teh meritev damo zanesljiv podatek o: % C, % Mn, % FeO v žlindri.

10. Cilj rafinacije taline v peči je doseči primerno termično stanje taline pred prebodom, zagotoviti predpisano sestavo taline in preprečiti dvig vsebnosti dušika. Tudi pri tej fazi obstaja vrsta odprtih vprašanj, ki bodo predmet nadaljnjih raziskav.

— V preoksidirano talino (po naši oceni je  $a_0 = 0,09$ ) dodajamo FeMnS/nizek C), ki kot šibki dezoksidant reagira s kisikom in so zato izgube Mn okoli 50 %.

11. Legiranje in končna dezoksidacija, spremljana s kombiniranimi dodatki CaSi in CaSiAl, je vsekakor ključna delovna operacija v celotnem tehničnem procesu.

12. Po sedanji tehnologiji dodajamo cca. 13 kg 98 % FeSi/t in okoli 1,3 kg Al/tono v 1. ponovco. Zaradi visoke aktivnosti kisika v talini se precejšnji del Al oksidira (izguba na Al je ocenjena na okoli 70 %) in manjši del Si (izguba okoli 12 %).

13. V tekočem jeklu so termodinamično stabilni samo  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vključki. Zaradi eksotermnega učinka raztapljanja Si in reakcije Al in Si s kisikom pride do dviga temperature za cca. 55 °C. V fazi miro-

vanja poteka proces izločanja  $Al_2O_3$  — vključkov, ki pa ni tako učinkovit. Po naših ocenah se v času 8 minut odpravi le okoli 18 % vseh vključkov, prisotnih v talini.

14. Naslednja zelo pomembna je faza preli-vanja taline iz ponovce v ponovco. Naši grobi iz-računi so pokazali, da pri tej operaciji dovedemo okoli 44 W/t energije, ki prispeva velik delež k intenzivnemu izločanju oksidnih nekovinskih vključkov.

15. Analiza kinetike izločanja nekovinskih vključkov v ponovci kaže, da bi dosegli zelo ugod-ne rezultate glede čistoče jekla, če bi fazo miro-vanja taline v 2. ponovci nadomestili s fazo me-šanja taline z Ar.

Pri intenziteti mešanja, npr. 200 l Ar/min in s povprečnim časom mešanja 20 minut bi lahko dosegli znatno nižjo vsebnost celotnega kisika, ki bi se sukala okoli 36 ppm v primerjavi s sedanjim stanjem —  $68 \pm 20$  ppm. S tem bi odpadle tudi številne težave okoli mašenja izlivnika pri ulivanju, ker bi se vsebnost  $Al_2O_3$  — vključkov znatno znižala.

#### Literatura

- Borisenko, V. G. et al: Rafinacija trafo jekla pri termični obdelavi, Stal, 1 (1963) s. 81—83 (DK — 981210 — 41)
- Koroleva, V. A., M. I. Ševstjuk: Študij pogojev tvorbe nitridov aluminija v trafo jeklu pri ogrevanju, Stal 11 (1966) s. 1038—1041 (DK — 981211 — 41)
- Ageev, G. A. et al: Nove vrste hladno-valjanih elektro-tehničnih jekel, Stal 5 (1967) s. 453—455 (DK — 981212 — 41)
- Levin, A. M. et al: Aluminij v proizvodnji hladnovalja-nega trafo jekla, Stal 5 (1967) s. 459—462 (DK — 981213 — 41)
- Levin, A. M. et al: Nekovinski vključki v hladnovaljani trafo pločevini, Stal 5 (1967) s. 462—467 (DK — 981214 — 41)
- Javojskaja, T. N. et al: Obnašanje dušika v trafo jeklu pri termični obdelavi, Stal 12 (1968) s. 1131—1133 (DK — 981215 — 41)
- Koncevaja, E. M. et al: Izdelava pločevine nizkoogljič-nega trafo jekla z izboljšanimi magnetnimi lastnostmi, Stal 12 (1969) s. 1129—1130 (DK — 981216 — 41)
- Borisenko, V. G. et al: Osnovni principi režima tehnoloških procesov proizvodnje elektrotehničnih jekel, Stal 8 (1969) s. 738—740 (DK — 981217 — 41)
- Bohuš, O: Parametri, ki vplivajo na kvaliteto jekla pri izdelavi orientirane trafo pločevine, Hutnicke listy 3 (1969) s. 161—166 (DK — 981218 — 41)
- Klemm, P., G. Naumann: Eintwicklung und Produktion von hochwertigem Dynamoband, Neue Hütte, H. 8 (1973) s. 469—475 (DK — 981219 — 41)
- Družinin, V. V. et al: Strukturne spremembe v vroče valjani trafo pločevini z vsebnostjo do 0,12 % Al, Stal 9 (1974) s. 841—842 (DK — 981220 — 41)
- Radin, F. et al: Raziskave faktorjev, ki prispevajo krhkosti visoko-silicijevih elektrotehničnih jekel, Stal 4 (1975) (DK — 981221 — 41)
- Martin, P. et al: Praktische Erfahrungen zur Herstellung, zur Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten von kalt-gewalzten Dynamobändern, Neue Hütte H. 10 (1975) s. 593—595 (DK — 981222 — 41)
- Papperhoff, W., W. Pitsch: Eisen-Silizium Legierungen mit höheren Siliziumgehalten als Werkstoffe für die Elektrotechnik, Arch. für Eisenhüttenwes., Nr. 11 (1976) s. 685—689 (DK — 981223 — 41)
- Eršova, L. P. et al: O krhkosti hladnovaljane trafo pločevine, Stal 2 (1976) s. 171—174 (DK — 981224 — 41)
- Bolling, F. et al: Hochwertige Elektrobleche für die Energietechnik, Stahl u. Eisen Nr. 22 (1981)
- Čujko, N. M.: Trafo-jekla, Izd. »Metallurgija« Moskva (1970)
- Molotilova, B. G. et al: Zveplo v elektrotehničnih jeklih, Izd. »Metallurgija« Moskva (1973)
- Interna poročila Zelezarne Jesenice: C 2/24 (Arh, Ravnik), 1977, ibid. C 2/25 (Arh), 1977, ibid. C 2/26 (Arh, Ravnik), 1977, ibid. (Senica), 1981
- Koroušič, B., O. Kürner, J. Arh: Določitev optimalnih tehnoloških pogojev modificirane in vakuumske tehnologije za izdelavo dinamiko jekla kot osnova za kakovostno in ekonomsko primerjavo med obema tehnologijama — I. del, Poročila Metalurškega inštituta v Ljubljani, december (1981) MI št. 895 (81-006)
- Koroušič, B. et al: Application of oxygen probe for optimization of steel deoxidation, Voest-Alpine Continuous Casting Conference (1981)
- Koroušič, B. Wirkung der Stahldesoxidation auf die Entschwefelung und die Art der nichtmetallischen Einschlüsse bei der Stahlerschmelzung, Radex-Rundschau H. 3 (1980) s. 249—259 (DK — 981522 — 5)
- Koroušič, B: Vpliv mešanja in sestave žindre v ponovci na kinetiko izločanja nekovinskih vključkov in »odgor« aluminija, XXIX. jesensko posvetovanje strokovnjakov črne in barvne metalurgije ter livarstva Slovenije, Portorož 1. in 2. oktober (1981)

## ZUSAMMENFASSUNG

In der fremden wie auch in der einheimischen Fachliteratur gibt es nur wenige Forschungsarbeiten die sich mit den konkreten Problemen der Technologie der Erzeugung von Dynamo Stahl befassen würden. Die meisten Forschungsarbeiten beziehen sich auf das Studium der Gebrauchseigenschaften, besonders den Einfluss der chemischen Zusammensetzung der Verarbeitung und anderer Technologischer Einflüsse auf die elektrischen und Gefügeeigenschaften. Es gibt nur wenige brauchbare Daten (und auch die sind manchmal widersprechend) über die Stahlherstellungspraxis.

Nach der zur Zeit angewendeten Technologie werden cca 13 kg 98 % Fe Si/t und etwa 1,3 kg Al/t in die erste Pfanne gegeben. Wegen der hohen Sauerstoffaktivität in der Schmelze wird ein beträchtlicher Teil von Al (der Al Verlust wird auf 70 % geschätzt) und ein kleinerer Teil von Si oxydiert (etwa 12 %). Im flüssigen Stahl sind thermodynamisch beständig nur die  $Al_2O_3$  Einschlüsse. Wegen des exothermen Effektes der Silizium-auflösung und der Reaktion von Al und Si mit dem Sauerstoff kommt zu einer Temperaturerhöhung von cca 55 °C. In der folgenden Ruhephase verläuft der Prozess der Ausscheidung von  $Al_2O_3$  Einschlüssen welcher aber nicht so sehr wirkungsvoll ist.

Nach unseren Schätzung werden in der Zeit von acht Minuten nur etwa 18 % aller Einschlüsse die in der Schmelze anwesend sind abgetragen.

Die nächste sehr wichtige Phase ist das Umgießen der Schmelze aus der ersten in die zweite Pfanne. Unsere groben Ausrechnungen zeigten, dass bei dieser Operation etwa 44 W/t Energie Zuführt wird die eine intensive Ausscheidung der oxydischen nichtmetallischen Einschlüsse bewirkt. Aus der Analyse der Ausscheidungskinetik der nichtmetallischen Einschlüsse in der Pfanne ist zu entnehmen, dass günstigere Ergebnisse in Hinsicht der Reinheit des Stahles erzielt werden konnten wenn die Ruhephase der Schmelze in der zweiten Phase durch eine intensive Argonspülung zu ersetzen wäre.

Bei einer Spülintensität von zum Beispiel 200 l Ar/Min und einer durchschnittlichen Spülzeit von 20 Minuten konnte ein befrächtlich niedriger Gesamtsauerstoffgehalt um etwa 36 ppm im Vergleich zum jetzigen Zustand  $68 \pm 20$  ppm erzielt werden. Damit würden auch die zahlreichen Schwierigkeiten mit dem zuschmieren der Ausgüsse entfallen da der Gehalt von  $Al_2O_3$  — Einschlüssen beträchtlich niedriger wäre.

## SUMMARY

Foreign and domestic references present only few investigations treating the concrete technological problems of making electric steel. Most investigations treat the applied properties, mainly the influence of composition, working and other technological processes on the electric and structural properties. Very few data (being even contradictory) as applicable data on the steelmaking practice can be found.

According to the present technology about 13 kg of 98 % FeSi/t and about 1.3 kg Al/t are added in the first ladle. Due to high oxygen activity in the melt a great part of Al oxidises (Al loss is estimated to about 70 %) together with the smaller part of Si (loss about 12 %).

In molten steel thermodynamically only  $Al_2O_3$  inclusions are stable. Due to the exothermic effect of the Si dissolution and the reactions of Al and Si with oxygen the temperature rises for about 55 °C. During the holding period  $Al_2O_3$  inclusions precipitate but the process is not very

efficient. According to our estimations only 18 % of all present inclusions are removed in 8 minutes.

The next very important step is pouring melt from ladle to ladle. Our rough estimations show that about 44 W/t energy is introduced in this operation and it contributes a great deal to intensive precipitation of oxidic, non-metallic inclusions.

Analysis of the kinetics of non-metallic inclusions in the ladle shows that very favourable results on steel purity would be obtained if the holding period in the second ladle is substituted by melt stirring with argon.

With the stirring intensity e.g. 200 l Ar/min and with an average stirring time of 20 minutes essentially lower content of total oxygen can be obtained, being about 36 ppm in comparison with the present state of  $68 \pm 20$  ppm. Thus many difficulties with stuffing of the pouring nozzle in casting can be eliminated since content of  $Al_2O_3$  inclusions would be highly reduced.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В домашней и в литературе зарубежных стран весьма редко запомним исследования, которые конкретно относятся на проблемы технологии изготовления динамных сталей. Большинство исследований обсуждают изучение свойств применения этих сталей, влияние состава, переработки и других технологических активностей на электрические и структурные свойства. Очень мало обнаружим данные (они же часто также противоречивые), которые касаются практики сталеварства динамных сталей.

По теперешней технологии мы добавляем в расплав стали прибл.: 13 кг 98 % FeSi (т и около 1,3 кг Al) т в первый ковш. Благодаря сильной активности кислорода в расплаве значительная часть Al (потеря Al составляет прибл. 70 %) и меньшая часть Si (потеря около 12 %) окисляются.

В жидком расплаве стали термодинамически стабильны только включения  $Al_2O_3$ . Вследствии экзотермического действия расплавления Si и реакции Al и Si с кислородом получается повышение т-ры на прибл. 55 °C. В фазе успокоения происходит процесс выделения включений  $Al_2O_3$ , хотя это действие менее эффективное. По нашей оценки в этой фазе в течении 8-ми минут

выделяются только прибл. 18 % всех включений, существующих в расплаве. Следующая очень значительная фаза это переаливание расплава из ковша в ковш.

Наши грубые расчеты показали, что при этой операции мы подаем прибл. 44 Вт/т энергии, которая представляет большой вклад в интенсивное выделение включений неметаллических оксидов. Кинетический анализ выделения неметаллических включений в ковше показал, что можно бы было, что касается чистоты стали получить очень благоприятные результаты, если бы фазу успокоения расплава во втором ковше заменил с фазой смешивания расплава с Ar.

При интенсивности смешивания, если возьмем как пример 200 лит Ar/мин. в продолжении 20-ти минут можно бы было получить гораздо более низкое содержание кислорода, которое бы составляло около 36 ppm при сравнении с теперешним состоянием содержания  $68 \pm 20$  ppm. На основании этого бы были отклонены также многочисленные затруднения, что касается засорения разливочного стакана при разливки, так как бы существенно уменьшилось содержание включений  $Al_2O_3$ .