

## Vpliv preddezoksidacije nelegiranega jekla z ogljikom 0,12 do 0,2 na vsebnost oksidnih vključkov

Na osnovi obratovalnih parametrov, kot jih daje tehnološka praksa in rezultatov kemijskih raziskav 18 šarž, izdelanih v jeseniški martinarni, smo študirali vpliv količine dodanih preddezoksidantov in časa po dodatku na znižanje vsebnosti kisika v izdelanem jeklu. S praktično uporabnimi obrazci smo določili medsebojne odvisnosti med tehnologijo in potrebnim obsegom pred- in končne dezoksidacije. Tako dobljeni rezultati omogočajo sestavo optimalnih tehnoloških smernic.

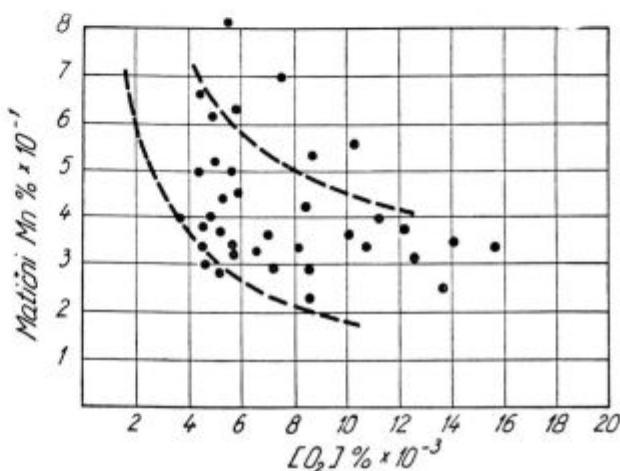
### Uvod

Spričo tesne povezave metalurških reakcij pri dezoksidaciji tekočega jekla z značajem oksidnih vključkov v izdelanem jeklu, je utemeljena zahteva, da mora jeklar izbrati tak način dezoksidiranja, po katerem ne bo le čim manj vključkov, ampak da bodo imeli vključki določeno kemijsko sestavo.

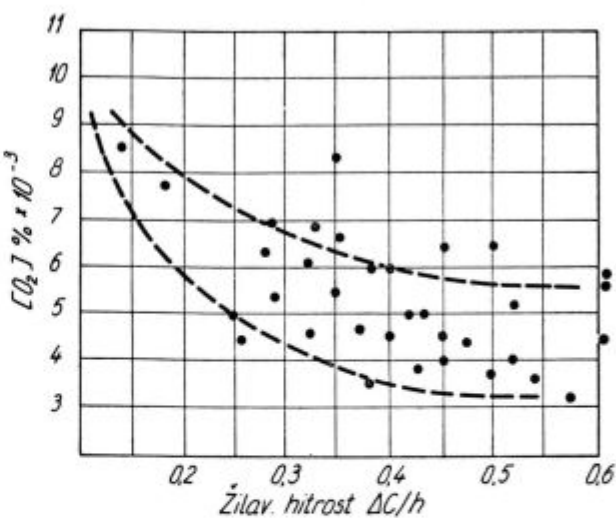
Praktična analiza vpliva nekega načina dezoksidiranja je možna samo tedaj, ko poznamo vsaj v glavnem komponente, ki narekujejo potrebo in obseg dezoksidacije. Skoraj pri vseh proizvodnih postopkih za izdelavo jekla dobimo ob koncu izdelavnega postopka v talini povečan kisik, ki ga odstranjujemo pri masovnih jeklih s pred- in končno dezoksidacijo. V dezoksidacijski fazi prehaja kisik v netopne spojine, ki se morejo izločiti iz taline.

Znan kisik nam praktično omogoča določitev količine potrebnih dezoksidantov, s katerimi moremo vezati prosti kisik do prav majhnih koncentracij; za izločanje dezoksidacijskih produktov pa sta odločilna le temperatura taline in kemijska sestava oksidnih komponent. Tudi če uporabimo najučinkovitejše dezoksidante, utegne biti kisik v jeklu zelo povečan, ako ni mogoče izločiti oksidnih komponent. V splošnem je praktično dognano, da je obseg dezoksidacije v veliki meri odvisen od vodenja rafinacije. Hitrost žilavenja kot funkcija proste količine kisika je v tej fazi tehnološkega postopka zelo pomembna. Konkretno ugotavljamo, da vpliva npr. povečana vsebnost matičnega mangana na zmanjšanje kisika, da bo pri manjši povprečni žilavilni hitrosti vsebnost kisika večja, da pa povečanje žilavilne hitrosti v zadnjih 25–30 minutah rafinacije povečuje kisik v talini. Na slikah 1, 2 in 3 ponazorjemo navedena razmerja za nelegirana jekla 0,12 do 0,45 % ogljika. Medtem ko povečanje povprečne žilavilne hitrosti nad določene vrednosti praktično ne vpliva na zmanjšanje proste količine kisika v talini, utegne znižanje hitrosti pod določeno vrednost znatno zvečati količino kisika.

Z močnimi dezoksidanti lahko vplivamo na zmanjšanje količine kisika. Pri izdelavi nelegiranih jekel je aluminij najbolj znani dezoksidant, ki je



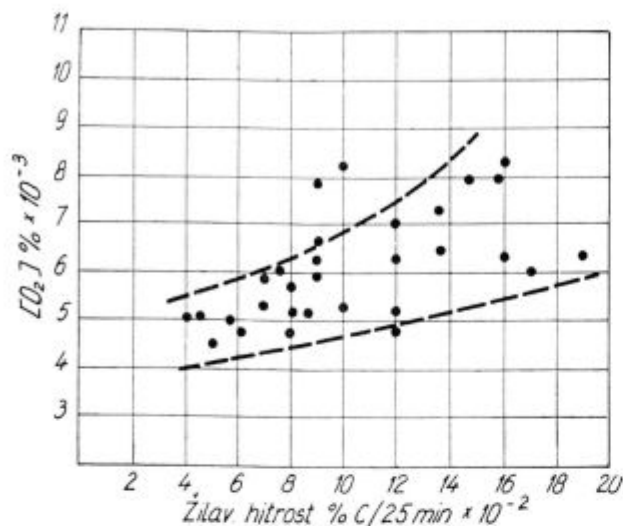
Sl. 1



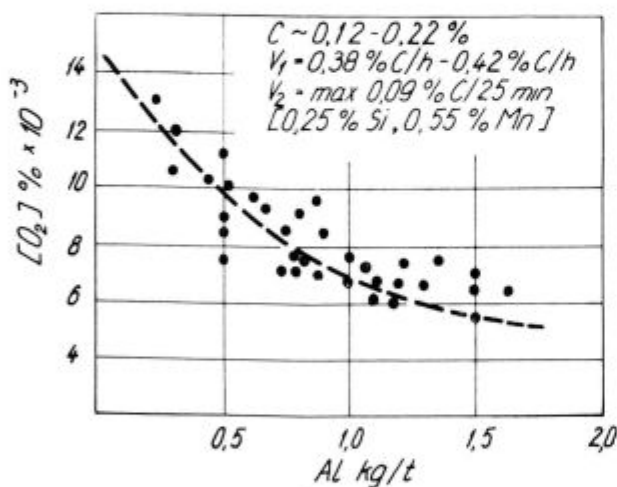
Sl. 2

že pri majhnih količinah v ravnotežju s praktično najmanjšimi količinami kisika. Na sliki 4 ponazorjemo vpliv dodatka aluminija na vsebnost skupnega kisika v izdelanem jeklu z 0,12 do 0,22 %

ogljika. Tudi po prikazanih razmerjih moremo ugotoviti, da je za konkretno kvaliteto določenā praktiāno maksimalna koliāina dodatka aluminija, nad katero se koliāina kisika ne spreminja veā bi-stveno.



Sl. 3



Sl. 4

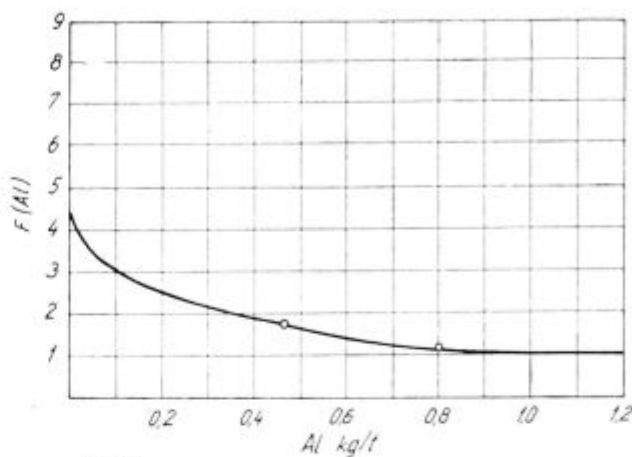
Na podlagi navedenega ima jeklar na voljo (po-leg bazicitete Źilindre in temperature) zlasti tri praktiāne faktorje, od katerih je odvisno, ali bo v izdelanem jeklu veā ali manj kisika.

Statistiāno zasledovanje vpliva Źilavilnih hitro-sti in uāinkovitega dodatka aluminija na vsebnost kisika v izdelanem jeklu pri številnih nizko in srednje ogljiānih nelegiranih jeklih, brez pred-dezoksidacije, omogoāa sestavo praktiānega obraz-ca za kalkulacijo vsebnosti skupne koliāine kisika kot sledi:

$$O_2 = \frac{F(Al)}{C_2} \times \frac{0,5 \times K_1}{V_1} \times \frac{V_2}{K_2} \times 10^{-3} \%$$

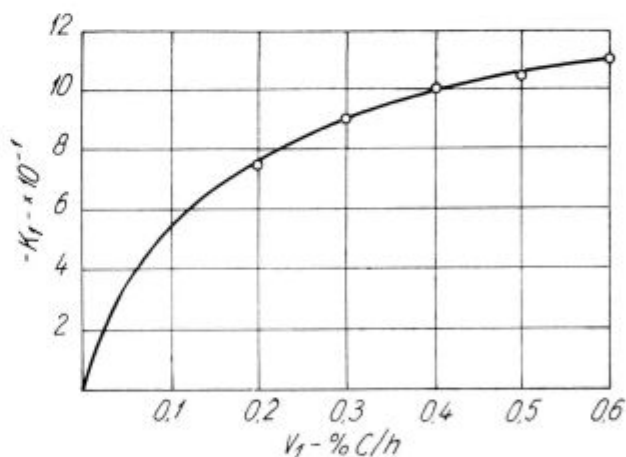
V obrazcu pomenijo:

F(Al) — odvisni faktor od dodatka aluminija (slika 5)



Sl. 5

K<sub>1</sub> — odvisni korekturni faktor od popreā-ne Źilavilne hitrosti (slika 6)



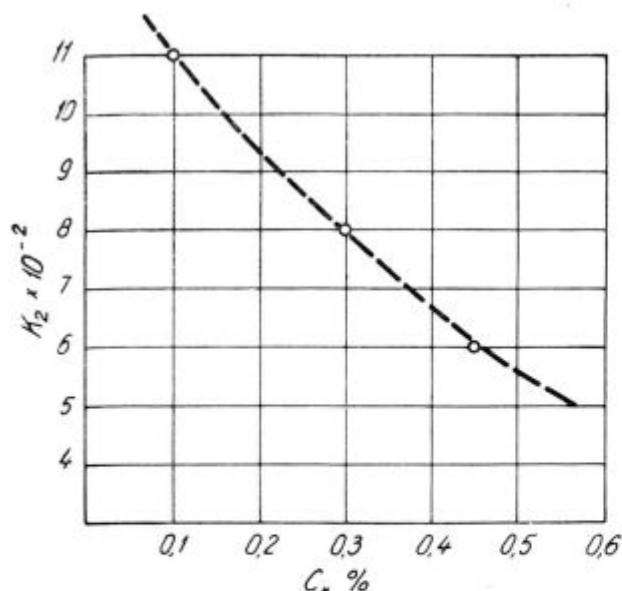
Sl. 6

K<sub>2</sub> — odvisni korekturni faktor od ogljika v izdelanem jeklu (slika 7)

C<sub>2</sub> — ogljik v izdelanem jeklu %

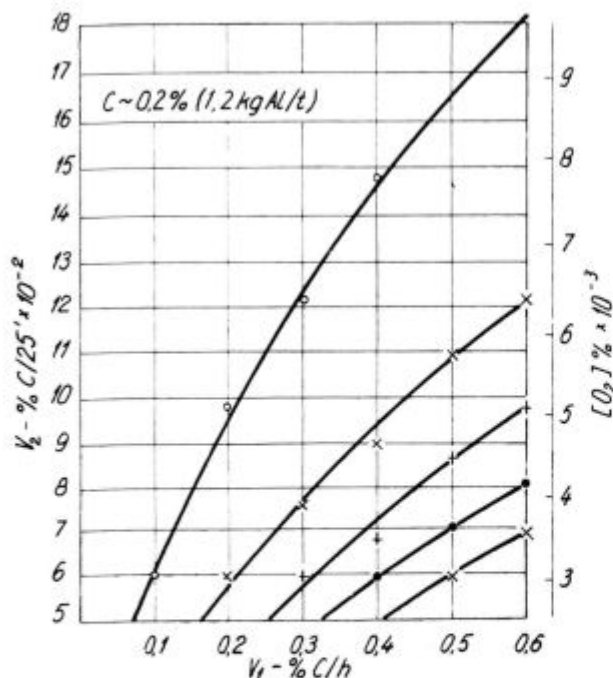
V<sub>1</sub> — popreāna Źilavilna hitrost % C/h

V<sub>2</sub> — Źilavilna hitrost v zadnjih 25 minutah rafiniranja



Slika 7

Vse upoštevane konstante smo določili po primerjavah vpliva določenih vrednosti posameznih komponent na stvarno količino skupnega kisika, določenega po metodi z nosilnim plinom. Odstopanja v primerjavi so osnove za določitev vrednosti posameznih konstant. Praktično izdelujemo šarže z ogljikom med 0,12 in 0,2 % pri povprečni žilavilni hitrosti  $V_1 = 0,38$  do 0,52 % C/h in končni žilavilni hitrosti  $V_2 = 0,07$  do 0,1 % C/25 min. Pri učinkovitem dodatku 1,2 kg aluminija na tono jekla, pravilni temperaturi in zadostni baziciteti žilindre bo v izdelanem jeklu znašal skupni kisik okrog 0,0058 do 0,0075 % (slika 8).



Slika 8

Skrainih vrednosti žilavilnih hitrosti zaradi zmanjšanja kisika v praksi ne moremo sprožiti. S povečanjem dodatka aluminija nad optimalno mejo je sicer možno povečati delež kislinotopnega aluminija v talini, to pa le delno vpliva na zmanjšanje kisika.

Stvarno preostane le možnost, da z dodatkom ustreznih preddezoksidantov zmanjšamo kisik v talini že pred prebodom, kar zahteva za končno dezoksidacijo v ponvi manjši dodatek ferosilicija in aluminija. Tako nastane manj oksidnih komponent in bo torej v izdelanem jeklu manj skupnega kisika.

#### Izdelava šarž s preddezoksidacijo

Da bi prikazali stvarni vpliv preddezoksidacije oziroma stopnjo učinkovitosti preddezoksidacije na zmanjšanje kisika ob koncu rafinacije, so nam v jeseniških SM pečeh A, M, V in K izdelali 18 nelegiranih šarž z 0,12 do 0,2 % ogljika. Za preddezoksidacijo smo uporabili silikomangan in silicijevo zrcalovino v količini, ki je vsebovala od 0,12 do 0,38 % silicija; za končno dezoksidacijo pa smo dodali aluminij.

Pri vseh šaržah smo vzeli vzorce za kisik po znani oziroma standardni metodi z malo prekrito kokilico, v kateri je aluminij, in sicer:

- vzorec št. 1 — ob koncu rafinacije pred dodatkom preddezoksidantov,
- vzorec št. 2 — po dodatku preddezoksidantov, ob različno dolgem času jemanja vzorca,
- vzorec št. 3 — v trenutku preboda,
- vzorec št. 4 — iz ponve 5 do 7 minut po prebodu,
- vzorec št. 5 — iz malega ingota, ki je bil odlit po končanem ulitju prve livne plošče.

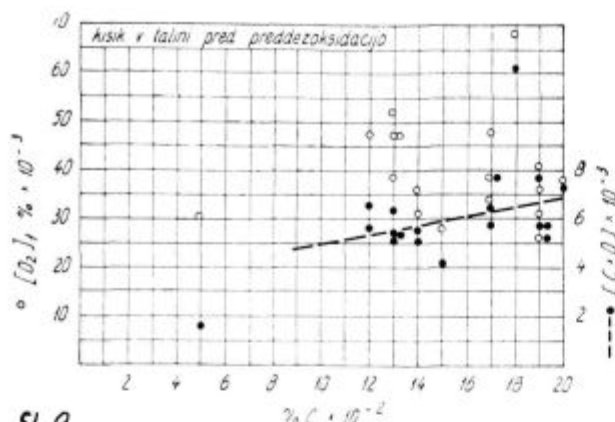
V vzorcih št. 1—4 smo določili skupni kisik po metodi z nosilnim plinom, v vzorcih št. 5 pa poleg kisika tudi sestavo oksidnih komponent  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  in  $(FeO + MnO)$  z mikroanalizo izolatov.

Z razpoložljivimi rezultati in s podatki, katere nam daje na voljo tehnologija izdelave šarž, smo poskušali pokazati praktični pomen vodenja rafinacije, izvedbo preddezoksidacije, časovni vpliv stopnje preddezoksidacije na kisik v talini ob času preboda ter stopnje dezoksidacije z aluminijem na vsebnost končnega kisika oz. vsebnost oksidnih vključkov v tem ingotu.

Na tabeli 1 navajamo:

1. uporabne parametre, katere daje tehnologija izdelavnega postopka in so vplivne komponente za analizo dezoksidacijske stopnje;
2. kemično analizo kisika v posameznih vzorcih
3. rezultate mikrokemičnih analiz izolata.

Ob primerjavi vrednosti kisika na koncu rafinacije (vzorci št. 1) se pokažejo neka odstopanja, ki ne sledijo ravnotežnim razmerjem z ogljikom, temveč zavzemajo vrednosti v zelo širokih mejah (slika 9). Pač pa moremo zaslediti splošno odvis-



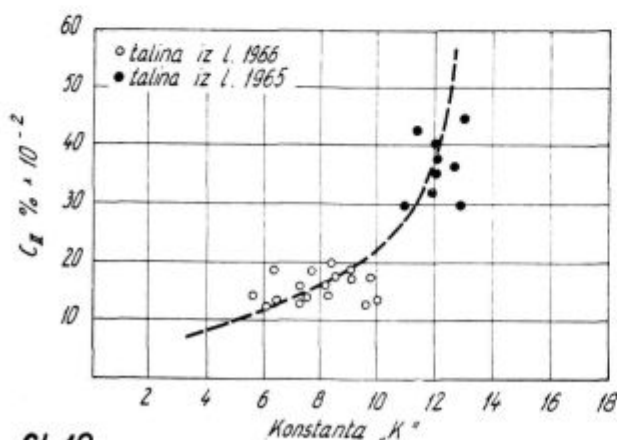
Sl. 9

nost produkta  $[C] \times [O]$  od ogljika: med vrednostjo ogljika 0,05 do 0,9 % bo produkt  $[C] \times [O]$  okrog 0,0035 do 0,01, kar ustreza vsebnosti kisika 0,07 do 0,011 %. Vpliv poprečne in deloma tudi končne žilavilne hitrosti na kisik ustreza že uvodoma navedenim razmerjem. Dodatek aluminija, ki naj upošteva koristen dodatek z ozirom na količino kislinotopnega aluminija v jeklu, vpliva na zmanjšanje kisika, vendar je ta vpliv neposredno odvisen od kisika v talini ob času preboda, ta pa je funkcija končnega ogljika, če sta ogljik in kisik uravnovešena. Menim, da potekajo reakcije v talini, ki je že v ponvi pretežno v uravnovešenih razmerah.

Med žilavilnimi hitrostmi in kisikom ob koncu rafinacije so odvisnosti, katerih poprečne vrednosti moremo zajeti v podobnem obrazcu, kot smo ga navedli uvodoma za kalkulacijo vrednosti skupnega kisika v izdelanem jeklu.

Obrazec za kalkulacijo količine kisika ob koncu rafinacije:

$$O_2 = \frac{K}{C_2} \times \frac{0,4 \times K_1}{V_1} \times \frac{V_2}{K_2} \times 10^{-3} \%$$

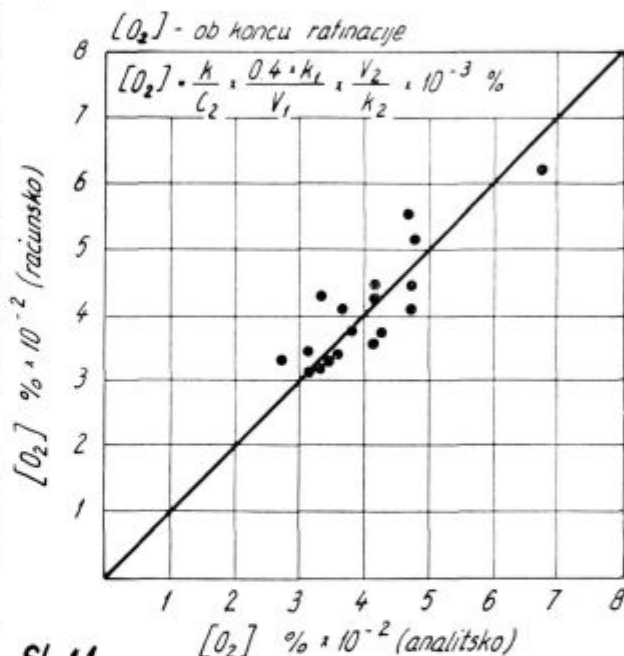


Sl. 10

Za jekla z 0,18 do 0,2 % ogljika smo ugotovili vrednost konstante  $K$  8 — 9, medtem ko je dajala ta vrednost pri mehkejših ali trših jeklih previsoke oziroma prenizke rezultate za kisik.

Pri primerjavi stvarnih in kalkulacijskih vrednosti kisika ob različnem ogljiku smo uporabili tudi rezultate prejšnjih preiskav višeoogljičnih jekel, ter določili vrednost konstante  $K$  kot kaže mo na sliki 10.

Če vzamemo v poštrev vsa navedena razmerja konstant in žilavilnih hitrosti pri določeni vsebnosti končnega ogljika, lahko zadovoljivo kalkuliramo vsebnost kisika ob koncu rafinacije, ki je merilo za količinski dodatek predeoksidantov v peči oziroma končnih dezoksidantov v ponev (slika 11).



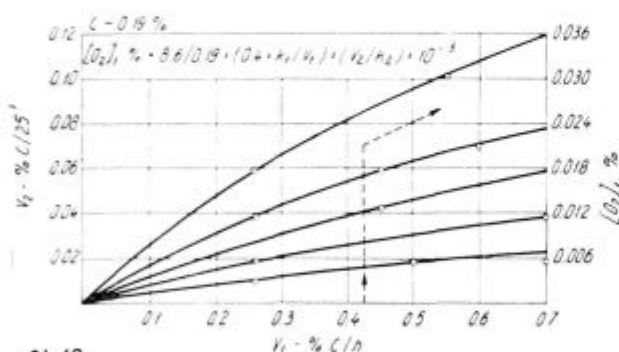
Sl. 11

Ta način kalkuliranja kisika ob koncu rafinacije ima uporabno vrednost z navedenimi konstantami pri normalnem toplotnem režimu in dodatku apna, ki ustreza baziciteti žilindre  $B_H$  — 2,2 do 2,5; to je praktično dosegljivo s specifičnim dodatkom apna 58—65 kg/t pri mehkejših jeklih, in 45—55 kg/t pri sredneogljičnih jeklih, če je delež grodlja v vložku 40—50 % in Si v grodlju 0,5 do 0,6 %. Navedena razmerja ne ustrezajo pri šaržah, ki vsebujejo v začetku rafiniranja zelo malo ogljika.

Če pomislimo, da moramo v naslednji fazi po rafinaciji, to je z dezoksidacijo, odstraniti večji del prostega kisika v talini ob koncu rafinacije — v jeklu z 0,15 % ogljika znaša kisik 0,032 do 0,045 %, količina prostega kisika pa v pravilno izdelanem jeklu največ 0,002 % — hkrati pa moramo doseči z uporabo ustreznih dezoksidantov, da bo v izdelanem jeklu ostalo čim manj oksidnih

produktov in še ti v določenem medsebojnem količinskem razmerju, je vsekakor način, kako zajeti tako obsežno odstranjevanje kisika, eden najpomembnejših teoretičnih in praktičnih prijemov v izdelavnem postopku.

Obratovalni parametri in analiza vsebnosti kisika ob koncu rafinacije (vzorec št. 1) potrjujejo, da s povečanjem poprečne žilavilne hitrosti in zmanjšanjem končne žilavilne hitrosti vplivamo na znižanje kisika ob koncu rafinacije. Teoretične vrednosti navedenih razmerij navajamo na sliki 12.



Sl. 12

Če naj za praktično vrednotenje teh razmerij vzamemo možne obratovalne parametre pri normalnih pogojih dela, potem bi poprečna žilavilna hitrost za jeklo s končnim ogljikom med 0,16 do 0,2 % znašala najmanj 0,43 % C/h, končna žilavilna hitrost pa največ 0,08 % C/25 min. Pri jeklu z 0,12 do 0,15 % ogljika naj bi bila poprečna žilavilna hitrost najmanj 0,43 % C/h, končna pa največ 0,06 % C/25 min. Končno žilavilno hitrost računamo v času do dodatka preddezoksidantov v peči.

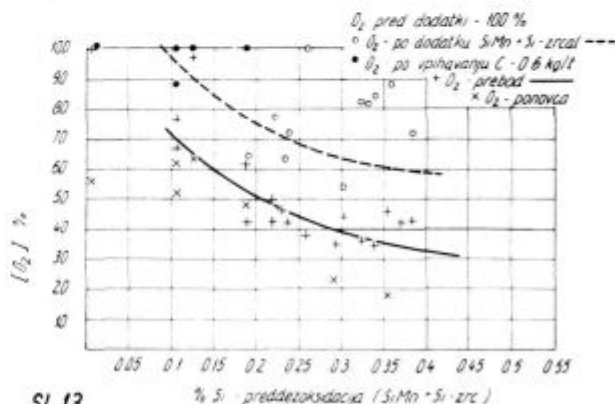
Povsem razumljivo je, da je tako z ozirom na čistost izdelanega jekla kot na ekonomiko proizvodnje zaželena čim manjša vsebnost kisika v talini ob prebodu, oziroma v ponvi pred končno dezoksidacijo. Izpust taline z veliko vsebnostjo kisika iz peči in prizadevanje, da bi zmanjšali kisik samo z dodajanjem dezoksidantov v ponev do želene stopnje čistosti, sta za praktika preveč tvegana za kvaliteto izdelavo jekla. Zato moramo smatrati možnost zmanjšanja kisika v talini že pred prebodom, to je s preddezoksidacijo v peči, kot nujno in redno fazo v tehnologiji izdelavnega postopka. Mislim, da rezultati na tabeli 1 — vsebnost kisika v vzorcih št. 1 in 3 — popolnoma potrjujejo obvezno izvajanje te prakse.

#### Analiza stopnje učinkovitosti preddezoksidacije

Preddezoksidacija omogoča občutno zmanjšanje kisika v talini, to pa je odvisno od količine preddezoksidanta in od časa reagiranja po dodatku preddezoksidantov. Z učinkovito preddezoksidacijo dosežemo v talini pred prebodom 0,013 do 0,016 % kisika proti 0,038 do 0,041 % kisika ob koncu rafinacije. Vsebnost kisika se zmanjša za

več kot 60 %; vendar poudarjam, da obsega to zmanjšanje tudi produkte medsebojnih reakcij preddezoksidanta in nevezanega kisika, to je dela še prostega kisika kot (FeO) in dela še preostalih oksidnih produktov dezoksidacije.

Za boljšo primerjavo smo navedli na sliki 13 vrednosti kisika v odstotku vrednosti ob koncu rafinacije oziroma pred dodatkom preddezoksidantov. Pri povečanju stopnje preddezoksidacije se zmanjša vsebnost kisika, toda v času 7—8 minut po dodatku ugotavljamo, da so rezultati bolj raztreseni, v času 10—12 minut po dodatku, to je tik pred prebodom, pa so razlike v vrednosti znatno manjše.



Sl. 13

Po rezultatih vsebnosti kisika v ponvi okrog 5—6 minut po prebodu ni mogoče izdelati enotne krivulje, ker nastaja v talini z različnimi dodatki ferosilicija in aluminija že dokončna dezoksidacija. Razmerja na sliki 13 moramo podrobneje analizirati:

1. Vpliv silicija v količini preddezoksidantov v določenem času izrazimo s praktičnim obrazcem:

$$dO_2 = k \sqrt{\frac{1}{Si}}$$

$dO_2$  pomeni razmerje vsebnosti kisika po preddezoksidaciji do kisika pred dodatkom, torej najvišja vrednost 1 za primer neučinkovite preddezoksidacije, oziroma brez nje. Vrednost konstante  $k$  je odvisna od časa jemanja vzorca za določitev kisika po dodatku preddezoksidantov. Za čas 7—8 minut po dodatku smo ugotovili vrednost  $k = 0,34$  za čas 10—12 minut po dodatku (v trenutku preboda) pa  $k = 0,22$ .

Z navedenimi vrednostmi moremo zadovoljivo slediti krivulje na sliki 13.

Konkretno: pri 0,2 % Si iz količine preddezoksidantov v času 7—8 minut po dodatku bo  $dO_2 = 0,34 \cdot 1 / \sqrt{0,2} = 0,76$

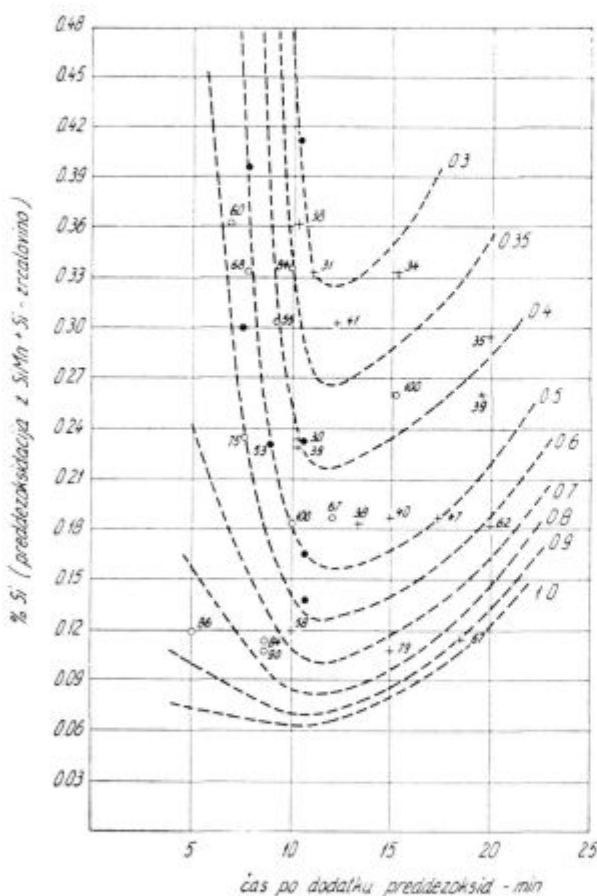
vsebnost kisika bo  $0,76 \times$  kisik pred dodatkom.

Pri 0,1 % Si iz količine preddezoksidantov v istem času po dodatku bo  $dO_2 = 1,07$ . To pomeni, da z dodanimi preddezoksidanti pri stopnji preddezoksidacije z največ 0,1 % Si praktično ni učinka, oziroma bo le minimalen. Praksa potrjuje, da je nujno določiti najmanjšo količino preddezoksidantov, ako naj vsaj deloma dosežemo učinek.

2. Razmeroma precej raztreseni rezultati vsebnosti kisika po sicer enakem dodatku preddezoksidantov so nastali zato, ker smo jemali vzorce št. 2 v različno dolgem času po dodatku.

Na tabeli 1 vidimo, da znaša čas po dodatku od 2—30 minut, kar utegne vplivati na kinetiko medsebojnih reakcij, predvsem pa na delež izločanja nastalih kompleksnih dezoksidacijskih produktov  $FeO \cdot MnO \cdot SiO_2$ .

Na sliki 14 smo poskusili zajeti vpliv časa po dodatku preddezoksidantov in vpliv vsebnosti Si v preddezoksidantih na  $dO_2$ . Ugotoviti moremo,

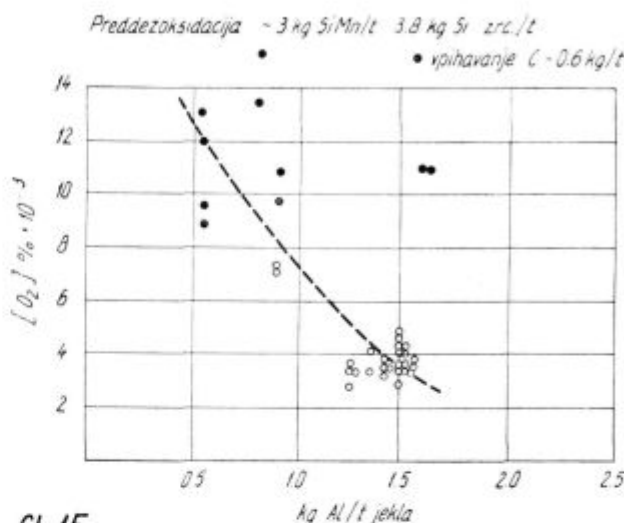


Sl. 14

da je učinkovitost preddezoksidacije odvisna od vsebnosti Si in od časa, ki ga dovolimo po dodatku za medsebojno reagiranje. Pri manjši vsebnosti Si je ta čas praktično manj pomemben, pri večji vsebnosti pa ima zelo pomembno vlogo. Kljub večjemu dodatku preddezoksidantov daje prekratek čas velik  $dO_2$ , predolg čas pa prav tako zmanjšuje stopnjo učinkovitosti. Pri količini Si od

0,15 % navzgor bo praktično 11—13 minut optimalni čas po dodatku za največji možni učinek preddezoksidacije.

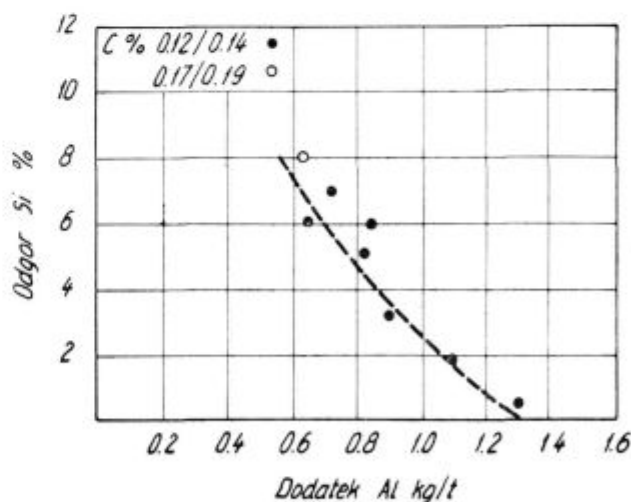
Dokončna dezoksidacija jekla je bila izvedena pri vseh poskusnih šaržah v ponvi z dodatkom ferosilicija in različnimi dodatki aluminija. Na sliki 15 kažemo vpliv aluminija na vsebnost konč-



Sl. 15

nega kisika v odlitem ingotu. Pri večini šarž znaša kisik okrog 0,003 do 0,0041 %, kjer smo pa zmanjšali dodatek preddezoksidantov v peči, in aluminija v ponvi, znaša končni kisik od 0,009 do 0,015 %.

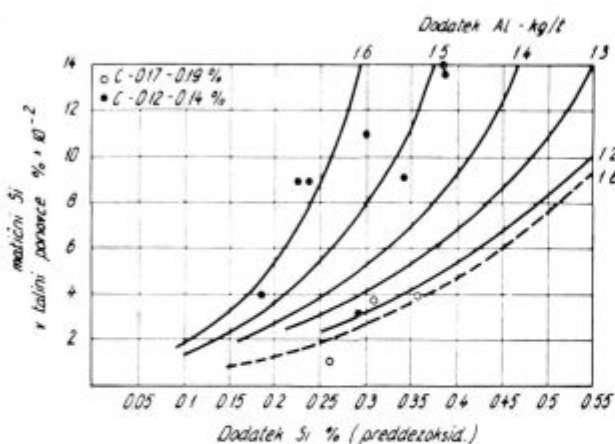
Šarža V5080 se ne ujema z navedenimi razmerji, ker je bila prehladna. Vpliv deleža kislinskega aluminija v jeklu je tesno povezan s stopnjo preddezoksidacije. Čeprav so rezultati maloštevilni, lahko vendar sklepamo, da zmanjšuje vsebnost aluminija odgor silicija v preddezoksidantih, kakor vidimo na sliki 16. Pri okrog



Sl. 16

1,2 kg aluminija na tono za jeklo z 0,12 do 0,14 % ogljika ni več odgora silicija; pri povečanem učinkovitem dodatku aluminija pa se pokaže v talini

vsebnost matičnega silicija od preddeoksidičnikov. Približno medsebojno odvisnost dodatka aluminija in matičnega silicija ponazorujemo na sliki 17 za jeklo z 0,17 do 0,19 % ogljika.



Sl. 17

### Učinkovitost dodatka aluminija

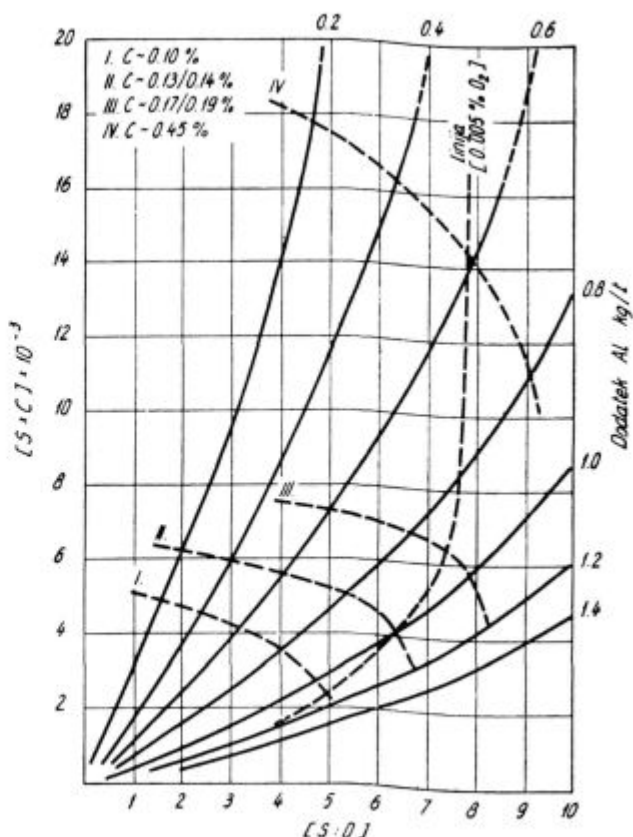
Glede dodatka aluminija moram poudariti, da je odvisen obseg reakcij, v katere mora posegati aluminij, od učinkovitosti tega dodatka. Praksa nam pove, da moremo z istim dodatkom aluminija in v enakih tehnoloških razmerah doseči v talini precej različne vsebnosti kislinotopnega aluminija. Praktično zanesljivo možnost ugotovitve stopnje učinkovitosti dodatka aluminija imamo s primerjavo produkta  $[C] \times [S]$  z razmerjem  $[S] : [O]$  za različne učinkovite dodatke aluminija. Z zasledovanjem rezultatov pri nizko — in srednjegljivi kvaliteta dobimo razmerje med navedenimi tremi parametri, ki dovoljuje praktične zaključke:

— s povečanjem produkta  $[C] \times [S]$  raste vrednost  $[S] : [O]$

— povečanje učinkovitega dodatka aluminija vpliva na naraščanje razmerja  $[S] : [O]$ , vendar regresivno do določene vrednosti učinkovito dodanega aluminija.

Na statistični podlagi določena razmerja dajo optimalno krivuljo, ki predstavlja rezultat normalnih medsebojnih razmerij oziroma normalne tehnološke prakse. Odstopanja omogočajo zanesljivo vrednotenje stopnje učinkovitosti dodanega aluminija, če je bila temperatura taline pravilna (slika 18).

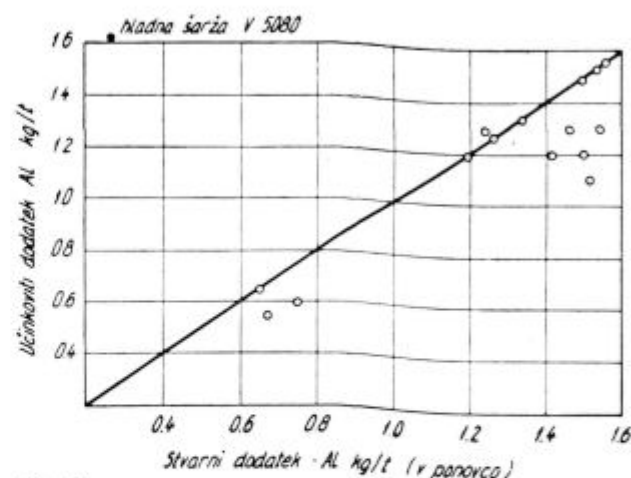
Konkretno: pri 0,17 do 0,19 % ogljika bo normalna vrednost  $[C] \times [S]$  okrog 0,7 do 0,8 in  $[S] : [O]$  7—9, če znaša učinkoviti dodatek aluminija 0,9 do 1,2 kg/t. Pri večji ali manjši vrednosti produkta  $[C] \times [S]$  bo pri enakem dodatku aluminija vrednost razmerja  $[S] : [O]$  večja ali manjša. Če pri določenem produktu  $[C] \times [S]$  in nakazani količini dodanega aluminija ne dosežemo



Sl. 18

ustrezne vrednosti  $[S] : [O]$ , lahko zanesljivo sklepamo, da dodatek aluminija ni bil toliko učinkovit kot je bilo predvideno.

Če analiziramo konkretnih 18 šarž s tega vidika, ugotavljamo učinkovitost dodatka aluminija tako, kot kaže slika 19. V splošnem povzemamo, da dajejo razmerja pod normalnimi pogoji, še zadovoljivo stopnjo izkoriščanja, razen pri hladni šarži V5080.



Sl. 19

Po zgoraj omenjenih medsebojnih razmerjih vpliva tehnološke prakse na vsebnost kisika sklepamo sledeče:

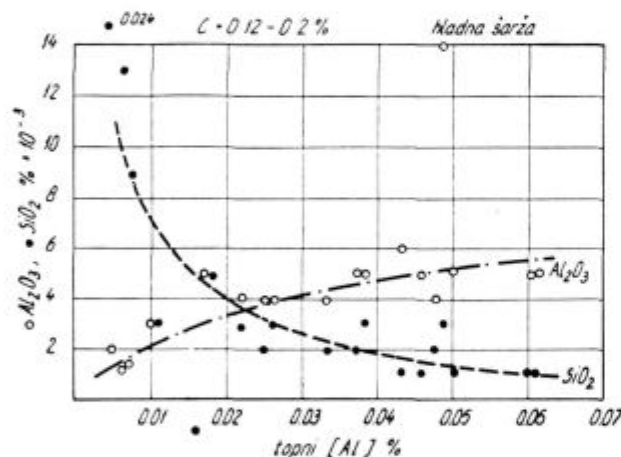
Za jeklo z 0,16 do 0,19 % ogljika je optimalni dodatek preddezoksidantov z vsebnostjo 0,2 do 0,3 % Si, čas preboda po dodatku 11–13 minut, učinkovit dodatek aluminija 1 do 1,2 kg/t, razmerje  $[S] \times [C] : [S] : [O]$  okrog  $0,55$  do  $0,75 \times 10^{-3}$ .

Za jeklo z 0,12 do 0,15 % ogljika je optimalni dodatek preddezoksidantov z vsebnostjo okrog 0,35 % Si, čas preboda po dodatku 11–13 minut, učinkovit dodatek aluminija 1,2 do 1,4 kg/t, razmerje  $[S] \times [C] : [S] : [O]$  okrog  $0,45$  do  $0,55 \times 10^{-3}$ .

### Analiza izolata in mehanizem dezoksidacije

Za kvaliteto izdelanega jekla ni pomembna samo skupna vsebnost kisika, temveč v enaki meri medsebojna količinska razmerja posameznih oksidnih komponent v vključkih. To ugotavljamo z mikroanalizo anodnih ostankov — izolatov.

Iz analize izolata, ki predstavlja srednjo vrednost treh rezultatov za vsako šaržo posnemamo, da je odvisnost med količino  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  in dodatkom aluminija oziroma količino topnega aluminija v jeklu povsem jasna. Pri večji vsebnosti aluminija je v oksidnih vključkih več  $Al_2O_3$ , manj  $SiO_2$ , in kot je razvidno na prejšnji sliki št. 15, tudi manj kisika (slika 20).



Sl. 20

Tabela 1 kaže posamezne rezultate mikroanalize izolata. Navedeni praktični parametri tehnologije izdelave šarže in nekatera specifična medsebojna razmerja rezultatov tehnologije in analize vključkov vsiljujejo vrsto vprašanj, ki so za prakso resnega pomena:

— kinetika reakcij v preddezoksidacijski fazi po časovni odvisnosti in vsebnosti silicija v preddezoksidantih,

— vpliv aluminija na razmerje med  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  in  $FeO$  ter kinetika reakcij z aluminijem zlasti v pogledu izločanja dezoksidacijskih produktov.

Na osnovi rezultatov takšne analize lahko določimo praktične parametre, katerih namen je povečanje čistote izdelanega jekla.

Za prakso zadovoljiv odgovor na zgoraj navedena vprašanja nam daje splošni mehanizem dezoksidacije.

V nadaljnjem navajamo nekatere karakteristične primere razlage vpliva tehnološke prakse in načina dezoksidacije, katero nam daje mehanizem dezoksidacije:

Šarža A5544 — Č1206

C — 0,19 %, Si — 0,49 %, Mn — 0,45 %, Al — 0,048 %

$V_1$  — 0,33 % C/h,  $V_2$  — 0,08 % C/25 minut

Kalkulacijska količina kisika pred dodatkom preddezoksidantov znaša:

$$O_2 = 8,6/0,19 \times 0,4 \cdot 0,91/0,33 \times 0,08/0,095 \times 10^{-3} = 0,042 \%$$

Stvarna vsebnost kisika znaša 0,041 %.

Po dodatku silikomangana in silicijeve zrcalovine z vsebnostjo 0,38 % silicija ostane v trenutku preboda v talini količina 0,14 % matičnega silicija, ki je uravnovešena s približno 0,01 % prostega kisika. V času preddezoksidacije se razlika kisika  $(0,041 - 0,01) = 0,031$  % veže s silicijem, hkrati pa nastane okrog 0,062 %  $SiO_2$ . Iz peči gre talina z 0,017 %  $O_2$  (vzorec št. 3), zato ostane v njej poleg prostega kisika 0,01 % še 0,007 % vezanega kisika v obliki 0,014 %  $SiO_2$ . V času od dodatka preddezoksidantov do preboda se izloči torej približno  $(0,062 - 0,014) = 0,048$  %  $SiO_2$  ali 82 %. Izločitev te količine je bila izvedena v času 15 minut.

V ponvi bo v talini 0,014 % komponent  $SiO_2$ , iz obloge ponve pride okoli 0,006 %  $SiO_2$  (približno takšne vrednosti smo določili pri številnih dosedanjih raziskavah in tudi pri ugotavljanju teh razmerij ob zasledovanju vključkov z radioizotopi).

V jeklu je 0,49 % silicija, uravnovešenega z okrog 0,007 % prostega kisika. Razlika  $(0,01 - 0,007) = 0,003$  % kisika se veže s silicijem v 0,006 %  $SiO_2$ . Skupno se tvori 0,026 % komponent  $SiO_2$ .

Učinkoviti dodatek 1,2 kg aluminija/t tvori v talini 0,048 % kislinskega aluminija, uravnovešenega s sledovi prostega kisika.

Razlika  $(0,007 - 0,0005) = 0,0065$  % kisika se veže z aluminijem v okrog 0,013 %  $Al_2O_3$ .

Velika vsebnost aluminija dovoljuje obsežno redukcijo  $SiO_2$ ; iz analize izolata sledi, da je v vključkih še 0,002 %  $SiO_2$ . Razlika  $(0,026 - 0,002) = 0,024$  %  $SiO_2$  se reducira z aluminijem v približno 0,026 %  $Al_2O_3$ . Skupno se tvori 0,039 %  $Al_2O_3$ . Po analizi izolata je ostalo v vključkih okrog 0,004 %  $Al_2O_3$ , torej se je v konkretnem primeru izločilo  $(0,039 - 0,004) \cdot 100 : 0,039 = 88$  %  $Al_2O_3$  komponent.

V oksidnih vključkih bodo torej 0,004 %  $Al_2O_3$ , 0,002 %  $SiO_2$  in sledovi prostega kisika, kar da skupno 0,0035 % kisika. Analitsko določen znaša 0,0033 oziroma 0,0036 %.

Kalkulacija vsebnosti končnega kisika v izdelanem jeklu brez preddezoksidacije bi znašala:

$$O_2 = 0,8/0,19 \times 0,5 \cdot 0,91/0,33 \times 0,08/0,095 \times 10^{-3} = 0,006 \text{ ‰}.$$

Zaradi učinkovite preddezoksidacije je skupni končni kisik v jeklu 42 ‰ manjši.

Šarža V5077 — Č03V

C — 0,13 ‰, Si — 0,17 ‰, Mn — 0,37 ‰, kislinitopni Al — 0,018 ‰,

$V_1$  — 0,59 ‰ C/h,  $V_2$  — 0,1 ‰ C/25 minut.

Kalkulacijska količina kisika pred dodatkom preddezoksidantov znaša:

$$O_2 = 7,2/0,13 \times 0,4 \cdot 1,1/0,59 \times 0,1/0,104 \times 10^{-3} = 0,043 \text{ ‰}.$$

Z metodo z nosilnim plinom določeni kisik znaša 0,047 ‰.

Pri tej šarži smo skušali vplivati z dodatkom 0,6 kg karburita na določena razmerja glede na stabilizacijo ogljika in ev. preddezoksidacijo. Kot razvidimo na tabeli 1, se je po dodatku le malo zmanjšal kisik v vzorcu.

10 minut po dodatku karburita smo dodali preddezoksidante z vsebnostjo 0,11 ‰ silicija. 5 minut po dodatku — v trenutku preboda — so bili v talini le sledovi silicija, uravnovešenega s približno 0,022 ‰ kisika. Razlika  $(0,044 - 0,022) = 0,022 \text{ ‰}$  kisika reagira s silicijem in tvori hkrati približno 0,044 ‰  $SiO_2$ . Iz peči gre talina z 0,032 ‰ kisika, torej vsebuje poleg 0,022 ‰ prostega kisika tudi 0,01 ‰ kisika v obliki 0,02 ‰  $SiO_2$ .

V 5 minutah po dodatku preddezoksidantov v peč se je torej izločilo  $(0,044 - 0,02) \cdot 100 : 0,044 = 54 \text{ ‰}$   $SiO_2$ .

V jeklu je 0,17 ‰ silicija, uravnovešenega s približno 0,019 ‰ kisika. Razlika  $(0,022 - 0,019) = 0,003 \text{ ‰}$  kisika se veže s silicijem in tvori približno 0,006 ‰  $SiO_2$ . Iz ponvine opeke pride okrog 0,006 ‰  $SiO_2$ ; s talino iz peči pa 0,02 ‰  $SiO_2$ ; skupna količina znaša 0,032 ‰.

Dodatek aluminija 0,87 kg/t (učinkoviti dodatek znaša 0,62 kg/t) daje talini približno 0,016 ‰ kislinitopnega aluminija, ki se uravnovesi z 0,005 ‰ kisika. Razlika  $(0,019 - 0,005) = 0,014 \text{ ‰}$  kisika tvori z aluminijem 0,028 ‰  $Al_2O_3$ . Redukcija  $SiO_2$  do vsebnosti 0,005 ‰ (analiza izolata) da skupno 0,031 ‰  $Al_2O_3$ . Skupno se tvori 0,059 ‰  $Al_2O_3$ . Po analizi izolata ga zasledimo v vključkih 0,006 ‰, torej se je izločilo 90 ‰ skupno nastale količine komponent  $Al_2O_3$ .

V mehanizmu dezoksidacije pri tej šarži vidimo, da je po redukciji  $SiO_2$  z aluminijem ostalo v vključkih še 0,005 ‰  $SiO_2$ , torej znatno večja količina kot pri prejšnji šarži. S primerjavo se potrjujejo rezultati številnih dosedanjih raziskav v tej smeri, namreč da vpliva vsebnost topnega aluminija na obseg redukcije. Pri količini od 0,015 do 0,02 ‰ moremo pričakovati že več ali manj obsežno redukcijo  $SiO_2$ , pri manjših vsebnostih pa ni redukcije, oziroma je minimalna. Pri zelo veliki količini topnega aluminija so v vključkih le sledovi do 0,002 ‰  $SiO_2$ .

V oksidnih vključkih te šarže je 0,006 ‰  $Al_2O_3$ , 0,005 ‰  $SiO_2$  in 0,005 ‰ prostega kisika, torej skupno 0,0105 ‰ kisika.

Analitsko ugotovljenega kisika je 0,0099 do 0,011 ‰.

Kalkulativna količina kisika znaša:

$$O_2 = 1,6/0,13 \times 0,5 \times 1,1/0,59 \times 0,1/0,104 \times 10^{-3} = 0,012 \text{ ‰}.$$

S preddezoksidacijo smo torej zmanjšali kisik za približno 13 ‰. Menim, da je bila količina preddezoksidanta pri tej šarži mnogo premajhna, zlasti pa je bil majhen dodatek aluminija, zaradi česar se razmeroma poveča količina kisika oziroma oksidnih vključkov v jeklu.

Šarža V5073 — Č03V

C — 0,13 ‰, Si — 0,2 ‰, Mn — 0,42 ‰, Al — 0,005 ‰,

$V_1$  — 0,46 ‰ C/h,  $V_2$  — 0,1 ‰ C/25 min.

Proti kisiku 0,047 ‰ pred dodatkom 0,6 kg karburita/t se je po dodatku zmanjšal kisik na 0,042 ‰. 8 minut po tem dodatku smo dodali še 0,11 ‰ Si v obliki silikomangana; 2 minuti kasneje pa, v trenutku preboda, so bili v talini le sledovi Si, kar je uravnovešeno s približno 0,015 ‰ kisika. Razlika  $(0,042 - 0,015) = 0,027 \text{ ‰}$  kisika reagira s silicijem in tvori 0,054 ‰  $SiO_2$ . Iz peči gre talina z 0,036 ‰ kisika, zato je v njej poleg 0,015 ‰ prostega kisika še 0,021 ‰ kisika v obliki 0,042 ‰  $SiO_2$ . Izločanje  $SiO_2$  v času 2 minut po dodatku znaša 22 ‰. Iz mehanizma dezoksidacije pri prejšnjih šaržah ugotavljamo, da narašča s časom obseg izločanja  $SiO_2$ . MnO · FeO (preddezoksidanti). Torej se bodo izločali ti oksidi v žlindro pri konkretni šarži V 5073 tudi v nadaljnjem času do litja livnih plošč. V času 17 minut, to je do začetka litja ingotov, bo delež izločanja okrog 85 ‰ in v vključkih bo ostalo približno še  $(15/100) \cdot 0,042 = 0,006 \text{ ‰}$   $SiO_2$ .

V jeklu je 0,2 ‰ Si, ki je uravnovešen s ca. 0,01 ‰ kisika. Razlika  $(0,015 - 0,010) = 0,005 \text{ ‰}$  kisika reagira s silicijem; hkrati se tvori 0,01 ‰  $SiO_2$ . Iz ponvine opeke pride okrog 0,006 ‰  $SiO_2$ , skupno nastala količina  $SiO_2$  znaša 0,022 ‰. Dodatek aluminija v količini 0,77 kg/t (učinkoviti dodatek znaša le 0,5 kg/t) da 0,005 ‰ topnega aluminija, ki je uravnovešen s približno 0,005 ‰ kisika. Razlika  $(0,010 - 0,005) = 0,005 \text{ ‰}$  kisika reagira z aluminijem v 0,010 ‰  $Al_2O_3$ . Po analizi izolata je v oksidnih vključkih 0,001 ‰  $Al_2O_3$ , torej se je izločilo iz taline 90 ‰ komponent  $Al_2O_3$ .

Zaradi majhne vsebnosti topnega aluminija ni redukcije  $SiO_2$ . V oksidnih vključkih je 0,001 ‰  $Al_2O_3$ , 0,022 ‰  $SiO_2$  in 0,005 ‰ prostega kisika, kar je skupaj približno 0,016 ‰ kisika. Analitsko določena količina kisika znaša 0,013 do 0,015 ‰. Kalkulacijska vrednost kisika v vzorcu, odlitem po odlitju prve plošče, znaša:

$$O_2 = 1,6/0,13 \times 0,5 \times 1,01/0,46 \times 0,1/0,104 \times 10^{-3} = 0,013 \text{ ‰}.$$

Proti kisiku, določenem po mehanizmu dezoksidacije oziroma po analizi izolata, ugotavljamo

TABELA 1

| Šarža  | V <sub>1</sub><br>‰ ΔC/h | V <sub>2</sub><br>‰ ΔC/25' | C × S  | C ‰  | Al<br>kg/t | [Al] ‰<br>topni | [O <sub>2</sub> ] ‰<br>anal. | S : O      | N <sub>2</sub> ‰           |
|--------|--------------------------|----------------------------|--------|------|------------|-----------------|------------------------------|------------|----------------------------|
| A 5554 | 0.33                     | 0.08                       | 0.0053 | 0.19 | 1.2        | 0.048           | 0.0033/36                    | 8.2        | 0.0041<br>0.0038<br>0.0049 |
| M 6323 | 0.06                     | 0.03                       | 0.0051 | 0.13 | 0.82       | 0.01            | 0.0070/71                    | 5.5        | 0.0046<br>0.0045<br>0.0056 |
| V 5047 | 0.55                     | 0.07                       | 0.0076 | 0.19 | 1.5        | 0.022           | 0.0038/41                    | 10.1       | 0.0027<br>0.0032<br>0.0043 |
| V 5044 | 0.67                     | 0.13                       | 0.006  | 0.2  | 1.54       | 0.025           | 0.0037/42                    | 7.7        | 0.0022<br>0.0029<br>0.0042 |
| V 5041 | 0.45                     | 0.08                       | 0.0074 | 0.19 | 1.56       | 0.050           | 0.003/41                     | 11.1       |                            |
| K 5067 | 0.70                     | 0.09                       | 0.0054 | 0.13 | 1.46       | 0.038           | 0.0043/46                    | 9.6        |                            |
| K 5068 | 0.28                     | 0.12                       | 0.0054 | 0.12 | 1.47       | 0.025           | 0.0042/38                    | 11.2       |                            |
| V 5063 | 0.38                     | 0.11                       | 0.0099 | 0.18 | 1.28       | 0.043           | 0.0034/41                    | 15.0       |                            |
| V 5073 | 0.46                     | 0.1                        | 0.0057 | 0.13 | 0.77       | 0.005           | 0.013/15                     | 3.2        |                            |
| V 5077 | 0.59                     | 0.1                        | 0.0049 | 0.13 | 0.87       | 0.016           | 0.011/099                    | 3.8        | 0.0033<br>0.0037<br>0.0044 |
| V 5080 | 0.15                     | 0.06                       | 0.0051 | 0.17 | 1.67       | 0.049           | 0.011/11                     | 2.8 hl. š. |                            |
| V 5093 | 0.47                     | 0.11                       | 0.0068 | 0.17 | 0.63       | 0.007           | 0.0088/98                    | 4.3        |                            |
| V 5096 | 0.52                     | 0.08                       | 0.0056 | 0.14 | 0.67       | 0.006           | 0.013/12                     | 3.2        | 0.0030<br>0.0031<br>0.0042 |
| M 6309 | 0.51                     | 0.07                       | 0.0056 | 0.14 | 1.58       | 0.039           | 0.0037/36                    | 11.1       | 0.0027<br>0.0034<br>0.0044 |
| M 6310 | 0.38                     | 0.1                        | 0.0067 | 0.19 | 1.42       | 0.046           | 0.0033/36                    | 10.1       | 0.003<br>0.0025<br>0.0046  |
| M 6308 | 0.47                     | 0.09                       | 0.0046 | 0.14 | 1.55       | 0.062           | 0.0030/34                    | 10.1       | 0.0025<br>0.0034<br>0.0043 |
| A 5569 | 0.57                     | 0.08                       | 0.0075 | 0.17 | 1.25       | 0.061           | 0.0027/37                    | 13.6       | 0.0034<br>—<br>0.0046      |
| M 6305 | 0.43                     | 0.08                       | 0.006  | 0.15 | 1.35       | 0.033           | 0.0034/36                    | 11.1       | 0.003<br>0.0034<br>0.0040  |

delno manjšo vrednost, torej bi smeli sklepati, da je verjetno delno izločanje SiO<sub>2</sub> tudi pri tvorbi SiO<sub>2</sub> od dodatka ferosilicija v ponev. Pri tej šarži se je konkretno v času 17 minut računsko izločilo približno 30—35 ‰ SiO<sub>2</sub>.

Preddezoksidacija ni imela praktičnega učinka glede zmanjšanja kisika pred dokončno dezoksidacijo.

Šarža V 5080 — č. 1204

C — 0,17 ‰, Si — 0,12 ‰, Mn — 0,5 ‰, Al — 0,049 ‰,

V<sub>1</sub> — 0,15 ‰ C/h, V<sub>2</sub> — 0,06 ‰ C/25 minut.

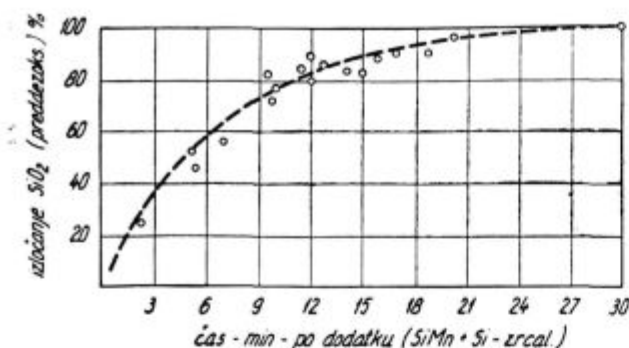
Na osnovi mehanizma dezoksidacije prejšnjih šarž obsega pri tej šarži izločanje SiO<sub>2</sub> 57 ‰ v času 7 minut po dodatku preddezoksidantov. Dodatek aluminija 1,67 kg/t da v talini 0,049 ‰ topnega aluminija, ki je uravnovešen s sledovi prostega kisika. Skupno nastala količina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (reakcija aluminija s prostim kisikom in redukcija SiO<sub>2</sub> do 0,003 ‰) znaša 0,068 ‰. Če bi bila šarža normalno topla, bi moral biti delež izločanja komponent Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> okrog 88—90 ‰, kakor smo ugotovili pri prejšnjih

| 1     | O <sub>2</sub> ‰ anal. |       | 4     | Vključki (izolat)                   |                       |                | (O <sub>2</sub> ) ‰<br>iz vklj. | Čas po<br>preddezoksid.<br>min. |     | preddez.<br>Si ‰ | odgor<br>Si<br>± ‰ |
|-------|------------------------|-------|-------|-------------------------------------|-----------------------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|-----|------------------|--------------------|
|       | 2                      | 3     |       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>‰ | SiO <sub>2</sub><br>‰ | ‰<br>(FeO+MnO) |                                 |                                 |     |                  |                    |
| 0.041 | 0.029                  | 0.017 | —     | 0.004                               | 0.002                 | 0.002          | 0.0035                          | 15'                             | 82  | 0.38             | + 0.14             |
| 0.041 | 0.027                  | 0.019 | —     | 0.003                               | 0.003                 | 0.020          | 0.007                           | 17'                             | 90  | 0.19             | — 0.05             |
| 0.034 | 0.024                  | 0.014 | —     | 0.004                               | 0.003                 | 0.004          | 0.0045                          | 14'                             | 86  | 0.23             | + 0.09             |
| 0.038 | 0.032                  | 0.013 | —     | 0.004                               | 0.002                 | 0.004          | 0.002                           | 16'                             | 88  | 0.34             | + 0.09             |
| 0.031 | 0.017                  | 0.013 | —     | 0.005                               | 0.001                 | 0.002          | 0.0035                          | 12'                             | 80  | 0.30             | + 0.11             |
| 0.041 | 0.048                  | 0.016 | —     | 0.005                               | 0.001                 | 0.009          | 0.005                           | 19'                             | 90  | 0.26             | + 0.01             |
| 0.047 | 0.039                  | 0.014 | —     | 0.004                               | 0.003                 | 0.004          | 0.0043                          | 30'                             | 100 | 0.32             | + 0.04             |
| 0.068 | —                      | 0.024 | 0.015 | 0.006                               | 0.001                 | 0.002          | 0.004                           | 20'                             | 97  | 0.29             | + 0.03             |
| 0.047 | 0.042                  | 0.036 | 0.029 | 0.002                               | 0.024                 | 0.018          | 0.017                           | 2'                              | 22  | 0.11             | — 0.07             |
| 0.047 | 0.044                  | 0.032 | 0.024 | 0.005                               | 0.005                 | 0.022          | 0.010                           | 5'                              | 54  | 0.11             | — 0.06             |
| 0.047 | 0.052                  | 0.030 | 0.023 | 0.018                               | 0.003                 | 0.004          | 0.011                           | 7'                              | 57  | 0.18             | + 0.04             |
| 0.038 | —                      | 0.038 | 0.022 | 0.0015                              | 0.009                 | 0.022          | 0.010                           | —                               | —   | —                | — 0.08             |
| 0.031 | 0.035                  | 0.033 | 0.020 | 0.0012                              | 0.013                 | 0.028          | 0.013                           | 10'                             | 72  | 0.12             | — 0.06             |
| 0.043 | 0.039                  | 0.016 | 0.009 | 0.005                               | 0.003                 | 0.002          | 0.0045                          | 12'                             | 77  | 0.36             | + 0.04             |
| 0.034 | 0.027                  | 0.014 | —     | 0.005                               | 0.001                 | 0.002          | 0.0035                          | 10'                             | 71  | 0.22             | + 0.09             |
| 0.034 | 0.028                  | 0.012 | —     | 0.005                               | 0.001                 | sledovi        | 0.0031                          | 12'                             | 90  | 0.33             | + 0.11             |
| 0.031 | —                      | 0.013 | —     | 0.006                               | 0.0005                | sledovi        | 0.0036                          | 10'                             | 78  | 0.37             | + 0.14             |
| 0.028 | 0.018                  | 0.011 | —     | 0.004                               | 0.002                 | 0.004          | 0.004                           | 13'                             | 87  | 0.23             | + 0.07             |

šaržah. Delež Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> v oksidnih vključkih bi znašal 0,007 ‰. Po analizi izolata pa dobimo v vključkih 0,018 ‰ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, kar pomeni, da se je izločilo približno le 73 ‰ teh komponent. Vzrok slabšega izločanja je prenizka temperatura šarže. Zaradi prenizke temperature dobimo v vključkih 0,018 ‰ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,003 ‰ SiO<sub>2</sub> in sledove prostega kisika, kar da skupaj približno 0,011 ‰ kisika. Analitsko določena količina je ista. Iz analize vzrokov slabšega izločanja Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oziroma prevelikega kisika pri tej šarži sklepamo, da je pri dezoksidaciji

jekla z aluminijem nujno potrebna višja temperatura kakor sicer pri dezoksidaciji ob minimalnem dodatku aluminija.

V navedenih nekaj primerih kaže mehanizem dezoksidacije kinetiko medsebojnih reakcij, nakazuje verjetnost nastanka posameznih oksidnih komponent, jasno osvetljuje količinski in časovni vpliv preddezoksidacije na zmanjšanje kisika na koncu rafinacije, zlasti pa potrjuje odločilno vlogo količine kislinotopnega aluminija v talini.



Sl. 21

Na sliki 21 je ponazorjen vpliv časa na obseg izločanja SiO<sub>2</sub> kot kompleksen oksid FeO . MnO . SiO<sub>2</sub> od preddeoksidacije, na sliki 22 pa primerjam delež izločanja med oksidnimi komponentami Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in SiO<sub>2</sub> kakor dovoljuje mehanizem dezoksidacije.

### Sklepi

V vzorcih nelegiranih SM jekel z 0,12 do 0,2 % ogljika smo zasledovali razmerja med kisikom, posameznimi oksidnimi komponentami v izolatu in tehnološko prakso izdelave šarž. Vzorci so bili vzeti iz taline z malo, z lesenim pokrovom prekrito standardno kokilo, v kateri je prebitek aluminija.

Vse šarže smo preddeoksidirali z določeno količino silikomangana in silicijeve zrcalovine; po dodatku sta bila vsebnost silicija v preddeoksidantih in čas reagiranja različna.

S takšnimi spremembami smo se lahko lotili študija in dosegli praktične rezultate o vplivu preddeoksidacije na vsebnost kisika v talini.

Medsebojno vrednotenje parametrov tehnološke prakse, analize oksidov v izolatu, analize kisika in stopnje učinkovitosti preddeoksidacije ter dodatka aluminija daje vrsto diagramov, po katerih lahko praktično sklepamo o osnovnih tehnoloških smernicah, kako bi v izdelanem jeklu dosegli čim manjšo količino oksidnih vključkov oziroma, da bi imeli takšno sestavo, ki dovoljuje zadovoljivo izločanje v žlindro.

Izločanje komponent Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> je zelo uspešno pri temperaturi okrog 1590 do 1600° C (pri konkretni kvaliteti). V talini ostane 8 minut po dodatku aluminija približno še 10 do 12 % teh oksidov, po 15—18 minutah pa približno 8—10 %. Po treh minutah znese delež izločanja okrog 65 %.

V odvisnosti od količine preddeoksidantov glede na vsebnost silicija, je optimalni čas za prebod med 11. in 13. minuto po dodatku. Prehitro in prepozno odpiranje preboda zmanjšuje stopnjo preddeoksidacije.

Pri konkretnih šaržah lahko znaša zmanjšanje kisika zaradi učinkovite preddeoksidacije okrog 30—45 % proti vrednostim kisika pri šaržah brez preddeoksidacije. Pri učinkoviti preddeoksidaciji znaša zmanjšanje dodatka aluminija 18—25 %. Pozitivni rezultati o vsebnosti kisika in količine oksidnih vključkov zahtevajo, da vključimo preddeoksidacijo v tehnološki cikel izdelave jekla kot obvezno delovno fazo.