

Optimiranje EOP — VOD postopka proizvodnje nerjavnih jekel

UDK:669.15-194.56:669.187.2
ASM/SLA: SS-e, 1-73

Nijaz Smajić

Izvedena je kratka analiza osnovnih problemov EOP-VOD postopka proizvodnje nerjavnih jekel in opisane možnosti optimizacije tega postopka z uporabo računalnika in matematičnega modela MIS-VOD, ki omogoča simulacijo vodenja vakuumske oksidacije, t. j. izvedbo modelnih poskusov, potrebnih za opredelitev optimalnih procesnih parametrov za vsako posamezno šaržo.

1. UVOD

Nerjavna jekla smo v slovenskih železarnah vse do leta 1984 proizvajali po tim. klasičnem postopku, t. j. v elektro obločni peči. Klasična tehnologija je bila v industrijsko razvitih deželah uspešno izpopolnjena v obdobju od 1950 do sredine šestdesetih let. Razvoj tega postopka je bil zelo uspešen, čeprav je skoraj v celoti temeljil na izkušnjah jeklarjev in je bil prispevek raziskovalcev s področja teorije metalurških procesov razmeroma zelo skromen. Teorija je torej zaostajala za prakso, kar je razmeroma pogosto, če ne kar značilno za metalurgijo. Leta 1967 so v takratni Edeltahlwerke Witten razvili postopek vakuumske oksidacije talin z visoko vsebnostjo kroma (VOD) in tako ustvarili možnost skoraj popolnoma selektivne oksidacije ogljika, kar je privedlo do bistvenega znižanja proizvodnih stroškov. Dve leti pozneje je firma Union Carbide v ZDA razvila lastni (AOD) postopek. Tako je bila klasična tehnologija opuščena, še preden so raziskovalci s področja teorije metalurških procesov utegnili kaj prispevati k njenemu razvoju. Ker se je klasična tehnologija pri nas obdržala še polnih 15 let, smo se na Metalurškem inštitutu v letih 1978—1980 ukvarjali (1, 2, 3) z raziskavami na področju termodinamične analize sistema Fe-Cr-C-O in Fe-Cr-C-Si-O, ki so imele namen izpopolnjevati klasični postopek izdelave nerjavnih jekel v naših železarnah. Leta 1981 smo to delo preusmerili na teoretske raziskave (4, 5, 6) novih, sodobnih postopkov, predvsem kompleks tehnologije EOP-VOD, da bi tako pripomogli k lažjemu osvajanju tega postopka v naših jeklarnah. Končno smo leta 1984 na Metalurškem inštitutu v Ljubljani razvili matematični model MIS-VOD, ki z uporabo računalnika omogoča izvedbo modelnih poskusov. Tukaj obravnavamo nekatere temeljne probleme te tehnologije z namenom, da bi jeklarjem praktikom olajšali obvladati težave, ki so specifične za to tehnologijo, in jih obenem seznanili z nekaterimi dognanji dosedanjega dela, ki jih je možno neposredno uporabiti v praksi. Obravnavamo predvsem problem pravilne priprave taline za vakuumsko oksidacijo v VOD ponovci, vprašanje sinhronizacije, t. j. časovne usklajenosti dela elektro obločne peči in VOD ponovce ter problem vzdržnosti ognjevarne obloge VOD ponovce.

2. OSNOVNI PROBLEMI EOP — VOD POSTOPKA

2.1 Pravilna priprava taline za VOD

Pravilna priprava taline za VOD obdelavo je bistvenega pomena za ekonomičnost in za produktivnost. Med primarno oksidacijo, ki jo običajno izvajamo v EO peči ali v LD konvertorju, moramo v večini primerov znižati vsebnost ogljika in silicija na tiste vrednosti, ki jih zahteva ritem dela v jeklarni, glede na nujno potrebo po časovno usklajenem delu EO peči in VOD ponovce. Maksimalno dovoljeni vsebnosti ogljika in silicija sta 1,2 % C in 0,20 % Si. Obenem moramo zagotoviti primerno temperaturo taline pri izlivu iz peči v VOD ponovco. Temperatura taline na začetku vakuumske oksidacije mora namreč biti v precej ozkem intervalu. Računati je treba, da morajo taline z visoko vsebnostjo ogljika imeti nekoliko nižjo temperaturo na začetku pihanja kisika zaradi velike eksotermne toplote, ki se sprošča med oksidacijo, sicer se lahko temperatura taline dvigne nad 1700° C, kar je zelo neugodno za vzdržnost obloge VOD ponovce. Težave so še večje, če imamo pri tem še veliko vsebnost Si in je zato priprava taline, t. j. faza primarne oksidacije, zelo pomembna. Čeprav je v določeni meri možno preprečiti oz. omiliti pričakovani veliki porast temperature taline zaradi velike vsebnosti C in ali silicija na ta način, da se odločimo za manj intenzivno oksidacijo, s tem da pihamo npr. le 700—800 m³ kisika na uro namesto napr. 1100—1200. To gre seveda na račun produktivnosti, ker se s tem daljša čas trajanja šarže, in kar je še slabše, pri tem se lahko poruši sinhronizacija dela peči in VOD ponovce. Obenem to pomeni, da je talina pri izlivu iz EO peči imela nepotrebno visoko temperaturo, za kar smo porabili nekaj odvečnih kilovatnih ur. Obseg primarne oksidacije je torej odvisen od številnih dejavnikov in ga narekuje predvsem zahteva po časovno usklajenem delu EO peči in VOD ponovce oz. predvideni čas, potreben za vakuumsko oksidacijo. Tega sicer lahko nekoliko spremenimo pri dani sestavi in temperaturi taline, vendar je tako natančno prilagajanje precej zahtevna naloga.

2.2 Časovna usklajenost EO peči in VOD ponovce

Časovno usklajeno delo v jeklarni je nujno treba doseči, sicer nastopajo velike težave — občuten padec produktivnosti in porast proizvodnih stroškov. Posebno veliki problemi v tem smislu nastopajo v starih jeklarnah, v katerih je bila zgrajena VOD naprava, medtem ko je pri novih jeklarnah, ki so že bile projektirane za tandem EOP-VOD, ta problem dosti manjši. V primeru VOD naprave ne dosežemo tako občutne rasti pro-

duktivnosti kot pri AOD konvertorju, ker je intenziteta vakuumske oksidacije omejena z močjo črpalk, medtem ko te omejitve v AOD konvertorju ni. Za časovno usklajeno delo je pomembna dosledna tehnološka disciplina in brezhibno vzdrževanje vseh naprav v jeklarni. S tehnološkega stališča je pomembno, da v določeni meri lahko omilimo motnje v sinhronizaciji EO peči in VOD naprave s krajšanjem ali podaljševanjem primarne oksidacije v EOP ter s spremembo intenzitete sekundarne, t. j. vakuumske oksidacije.

2.3 Vzdržnost ognjevarne obloge

Število šarž, ki jih lahko prenese ognjevarna obloga VOD ponovce, veliko vpliva na proizvodne stroške. Vzdržnost obloge je odvisna od številnih dejavnikov, izmed katerih so najpomembnejši:

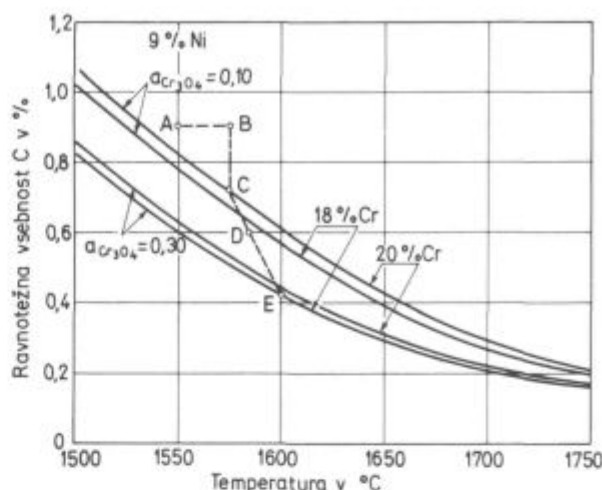
- stroga kontrola temperature taline v VOD ponovci, ki ne sme presegati 1700° C,
- čim manjša količina žlindre,
- pravilen dodatek apna oz. pravilna bazičnost žlindre,
- nizka začetna vsebnost Si v talini,
- pravilna obzidava in dobra kvaliteta opeke.

3. PRAVILNA PRIPRAVA TALINE ZA VOD

Za pravilno pripravo taline za vakuumsko oksidacijo sta pomembni predvsem potek primarne oksidacije v EOP ter obseg primarne oksidacije. Potek primarne oksidacije je pomemben zato, ker lahko med oksidacijo dosežemo določeno, načrtovano, predpisano vsebnost ogljika z manjšo ali večjo porabo energije, z različno stopnjo oksidacije kroma in z različno končno temperaturo taline. Obseg oksidacije pa mora biti vnaprej določen, glede na sestavo staljenega vložka, t. j. analizo prvega preizkušanca ter načrtovano končno vsebnostjo ogljika v talini, ki je namenjena vakuumski oksidaciji. Usklajeno delovanje EOP in VOD ne zahteva le vzdrževanja pravega ritma dela, t. j. ne gre le za časovno usklajenost, temveč morata biti usklajeni tudi sestava in temperatura taline. Končna sestava in temperatura taline na koncu primarne oksidacije sta torej predpisani z izbrano oz. zaželeno sestavo taline na začetku VOD oksidacije ter s temperaturo taline na začetku VOD obdelave, ob upoštevanju ohladišne taline v času od izliva iz EOP do začetka vakuumske oksidacije.

3.1 Optimalni potek primarne oksidacije

Obseg primarne oksidacije je torej opredeljen z razliko vsebnosti ogljika (silicija) na začetku in koncu primarne oksidacije. Delo v VOD komori naj bo čimbolj standardizirano, t. j. zaželeno je, da imajo taline na začetku vakuumske oksidacije po možnosti vedno enako sestavo in temperaturo. Na ta način se lahko izognemo napakam in lahko uporabljamo dobro utečen ter preizkušen način dela brez neprijetnih presenečenj. Seveda se občasno iz številnih vzrokov pojavi potreba po spremembi standardnih procesnih parametrov zaradi spreminjenih začetnih parametrov stanja taline, t. j. začetne sestave in temperature taline za VOD. Te nepravilnosti so neizogibne in nastopajo sicer le občasno, vendar zahtevajo od jeklarja odstop od običajne prakse in ustrezno ter pravočasno ukrepanje. Za pravilen potek primarne oksidacije pa moramo poznati ustrezna termodinamična ravnotežna stanja in nam zadošča, da poznamo ravnotežje C/Cr in C/Si, kar nam zagotavlja:



Slika 1
Temperaturni profil optimalnega poteka primarne oksidacije talin z 18–20 % Cr in 9 % Ni (EOP).

Fig. 1
Optimum course of primary oxidation for melts with 18–20 % Cr and 9 % Ni (EAF).

- minimalno porabo električne energije,
- najmanjšo možno toplotno obremenitev obloge EO peči,
- minimalno stopnjo oksidacije kroma v EOP,
- minimalno porabo reducentov,
- hitro ter enostavno redukcijo žlindre in
- zadosti nizko vsebnost Si, t. j. tako vsebnost silicija v talini za VOD, ki ne bo povzročala težav med vakuumsko oksidacijo.

Na sliki 1 vidimo diagram, ki prikazuje ravnotežno stanje med ogljikom in 18–20 % Cr v odvisnosti od temperature in aktivnosti Cr_3O_4 v žlindri pri 9 % Ni. Znano je, da se aktivnost Cr_3O_4 v žlindri giblje med 0,10 in 0,30. Večja vrednost ustreza večji vsebnosti kroma v žlindri, zaradi tega si želimo voditi primarno oksidacijo po zgornjih krivuljah na sliki 1, ki se nanašata na pogoje pri zmerni oksidaciji kroma (aktivnost $Cr_3O_4 = 0,10$), ter na talini z 18 % Cr (spodnja) in 20 % Cr (zgornja krivulja). Če želimo npr. začeti vakuumsko oksidacijo v VOD s talino, ki ima 0,6 % C, potem iz diagrama vidimo, da nam ob koncu primarne oksidacije zadošča temperatura 1600° C. Če smo delali pri nižji temperaturi, npr. 1550, potem iz diagrama vidimo, da bo aktivnost Cr_3O_4 že dosegla zgornjo dopustno mejo (0,30). Imeli bomo razmeroma veliko kroma v žlindri ter v zvezi s tem oteženo redukcijo žlindre. Višja temperatura od 1600° C ni priporočljiva zaradi nepotrebno povečane toplotne obremenitve obloge peči, nekoliko večje porabe električne energije, in kar je še bolj pomembno, previsoke začetne temperature v VOD, ki bo verjetno presegla 1700° C ob koncu vakuumske oksidacije. To bi seveda povzročilo preveliko porabo ognjevarne obloge VOD ponovce. Dodajmo temu še dejstvo, da višja temperatura primarne oksidacije ne bi pripomogla k znižanju oksidacije kroma, kot bi bilo pričakovati glede na termodinamične zakonitosti, in sicer zato, ker je določena stopnja oksidacije kroma, ki ustreza aktivnosti $Cr_3O_4 = 0,10$, praktično neizogibna. Globalno vzeto, se v talini brez dvoma vzdržuje ravnotežno stanje med Cr in C, toda lokalno (na površini taline) nimamo ravnotežja in je zato omenjena stopnja oksidacije kroma neizogibna. Ker med oksidacijo narašča temperatura tali-

ne, je v tem primeru jasno, da moramo takoj po staljenju začeti pihati kisik. Z nekoliko prakse je možno začeti pihati celo preje, t. j. še preden se je vložek popolnoma stalil, in tako privarčevati električno energijo. Ker so toplotne izgube močno odvisne od kapacitete peči oz. od mase taline, le praksa lahko pokaže, ali se v posamezni jeklarni lahko na ta način dosežejo kakšne prednosti.

3.2 Obseg primarne oksidacije

Minimalni obseg primarne oksidacije je tista stopnja oksidacije v EOP, ki nam zagotavlja, da bo talina pri izlivu iz peči imela največ 1,0–1,2 % C in maksimalno 0,20 % Si. Ta predpis imajo v jeklarni v Wittnu in je seveda rezultat bogatih izkušenj z VOD tehnologijo izdelave nerjavnih jekel. Predpis je brez dvoma koristen, posebno v primeru, ko zaradi nižje cene uporabljamo FeCr charge, ki vsebuje veliko Si, vendar je preveč splošen in obenem ne omogoča točnejši izračun potrebnega dodatka CaO v takih primerih. Poznavanje termodinamičnega ravnotežja med ogljikom in silicijem v talini v odvisnosti od temperature ter trojnega ravnotežja med ogljikom, silicijem in kromom nam omogoča lažje delo in točen izračun potrebnega dodatka CaO. Iz analize prvega preizkušanca oz. taline, ki smo ji že dodali ves potreben krom, ki torej že vsebuje ves Si in končne, t. j. ravnotežne vsebnosti Si pri želenem končnem ogljiku in temperaturi, lahko ugotovimo obseg oksidacije silicija ter nato izračunamo potreben dodatek CaO. Ravnotežna vsebnost Si pri dani vsebnosti ogljika in npr. 18 % Cr ter 9 % Ni je odvisna od temperature, pa tudi od aktivnosti SiO_2 v žlindri. Aktivnost SiO_2 v žlindri se lahko spreminja v mejah od 0,03, pri zelo bazičnih žlindrah do 0,10. Pri ostalih enakih pogojih je ravnotežna vsebnost Si večja pri večji aktivnosti SiO_2 v žlindri. Kako se spreminja ravnotežna vsebnost Si v odvisnosti od vsebnosti ogljika v talinah z 18 % Cr in 9 % Ni kaže slika 2 za temperaturi 1550 in 1600 °C ter za aktivnosti SiO_2 v mejah od 0,03 do 0,10. Vzemimo primer taline, ki ima ob staljenju 0,90 % C, 20 % Cr in 9 % Ni pri temperaturi 1550 °C (točka A na sliki 1) ter 0,18 % Si (točka A

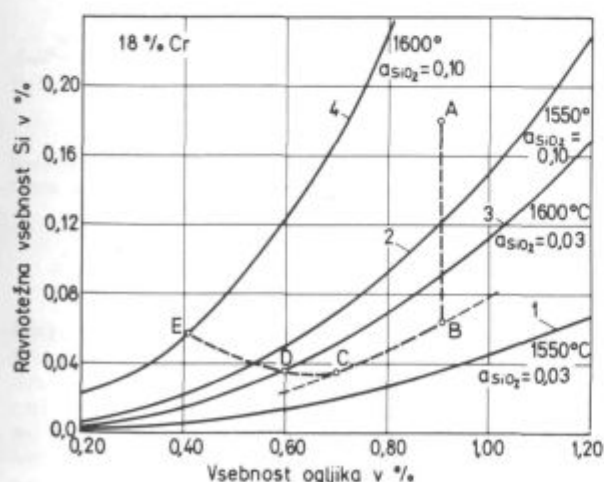
na sliki 2). Glede na termodinamično ravnotežje C/Cr (slika 1) ogljik štiti krom pred oksidacijo. Iz slike 2 pa obenem vidimo, da Si štiti ogljik pred oksidacijo, saj je točka A na sliki 2 nad krivuljo 1, ki kaže ravnotežje C/Si pri aktivnosti $\text{SiO}_2 = 0,03$ in 1550 °C, in celo nad krivuljo 2, ki velja za isto temperaturo, vendar za aktivnost $\text{SiO}_2 = 0,10$. Ob začetku pihanja kisika bo torej potekala skoraj popolnoma selektivna oksidacija Si, ki jo spremlja ustrezen porast temperature taline in aktivnosti SiO_2 v žlindri. Sestava taline se spreminja, kot kaže črtkana navpična črta AB na sliki 2. Pri tem temperatura taline raste, kot kaže črtkana vodoravna črta AB na sliki 1. S predpostavko, da med oksidacijo Si naraste temperatura do 1575 °C (točka B na sliki 1) ter aktivnost SiO_2 do 0,06, se v točki B (na sliki 2) vzpostavi binarno ravnotežje C/Si pri temperaturi 1575 °C in 0,06 % Si. Talina vsebuje še ca. 20 % Cr, 9 % Ni in 0,9 % C (točka B na sliki 1). Sedaj se začne istočasna oksidacija Si in C po črtkani krivulji BC na sliki 2 oz. po črtkani navpični črti BC na sliki 1. V točki C (na obeh slikah!) se doseže trojno ravnotežje Si/C/Cr in se začne oksidacija kroma. Istočasna oksidacija Si, C in Cr ima za posledico dvig temperature taline, porast aktivnosti Cr_2O_3 in SiO_2 v žlindri ter padec vsebnosti Si, C in Cr v talini. Tako se sestava taline in njena temperatura spreminjata, kot kaže črtkani krivulji CD na sliki 1 in 2. Kot vidimo s slike 2, se oksidacija Si ustavi in spremeni v redukcijo Si iz žlindre. Nadaljevanje oksidacije spreminja sestavo taline in njeno temperaturo po krivulji DE na sliki 1 in 2. V točki E ima talina temperaturo 1600 °C, 0,42 % C, 0,06 % Si in le 18 % Cr. Aktivnost Cr_2O_3 v žlindri je že približno dosegla zgornjo mejo (0,30). Nadaljevanje oksidacije bi povzročilo zelo intenzivno oksidacijo kroma in ga je treba takoj ustaviti. Dejansko bi v tem primeru bilo potrebno ustaviti oksidacijo že pri minimalni možni vsebnosti Si (pod 0,04 % Si — točka C na sliki 2), t. j. v točki C na sliki 2 in sliki 1, t. j., še preden se Cr toliko oksidira, da poraste aktivnost Cr_2O_3 v žlindri na 0,30. Tako velike preciznosti seveda v praksi ne moremo doseči, zato zadošča, da oksidacijo prekinemo v točki D oz. nekje med C in D. Tako smo lahko s to analizo poteka primarne oksidacije pokazali, da omenjene taline dejansko ne smemo oksidirati pod 0,6 % C (točka D), kar nam zagotavlja:

- minimalno možno vsebnost Si,
- minimalne izgube kroma z žlindro,
- lahko in hitro redukcijo žlindre z majhno porabo reductentov,
- minimalno porabo električne energije in
- minimalno toplotno obremenitev obloge EOP.

Potreben dodatek apna lahko izračunamo iz predvidene oksidacije Si, saj, kot vidimo, preide iz taline v žlindro 0,18–0,04=0,14 % Si.

4. ČASOVNA USKLAJENOST EOP — VOD

Usklajeno delo EO peči in VOD zadeva tudi časovno usklajenost, ki je s stališča produktivnosti in proizvodnih, predvsem pa energetskih stroškov zelo pomembna. S teoretskega stališča nam še tako skrbno projektiran ritem dela ne pomaga veliko v premagovanju pogostih motenj predvidenega ritma, zaradi različnih tehničnih težav in nepredvidenih zastojev. Termodinamika in njene zakonitosti nam na prvi pogled ne morejo dosti pomagati, vendar to povsem ne drži. Vzemimo primer, ko moramo zaradi zastoja v pripravi VOD ponovce oz. vakuumske naprave zadržati talino v EO peči. V takih primerih lahko seveda zadržujemo talino v EO peči ali pa skušamo zmanjšati izpad proizvodnje na ta



Slika 2

Termodinamično ravnotežje Si/C za taline z 18 % Cr pri temperaturah 1550 in 1600 °C in za aktivnost SiO_2 med 0,03 in 0,10.

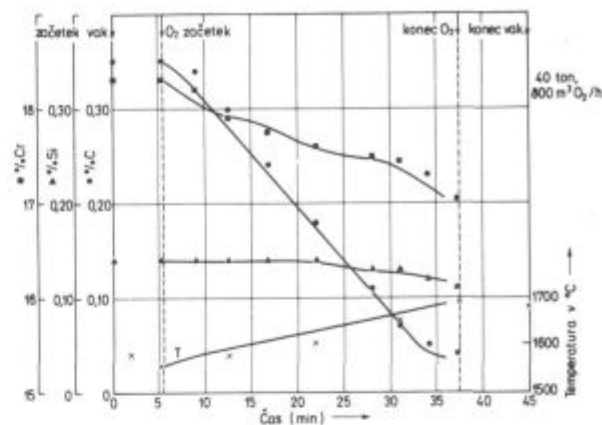
Fig. 2

Thermodynamic equilibrium Si/C for melts with 18 % Cr for 1550 and 1600 °C at a $\text{SiO}_2 = 0,03$ and 0,10.

način, da povečamo obseg primarne oksidacije in nadaljujemo s pihanjem kisika v peči do sicer neobičajno nizkih vsebnosti ogljika. S tem lahko bistveno zmanjšamo čas vakuumske oksidacije v VOD. Delno si v takih primerih jeklar lahko pomaga z diagramom na sliki 1, ki nam med drugim kaže, da lahko talino z 18 % Cr oksidiramo v EOP vse do 0,20 % C, vendar po strogo določenem temperaturnem programu. Še bolj je seveda, če imamo na razpolago ustrezen računalniški program, tako da nam računalnik lahko daje potrebna navodila v vsakem konkretnem primeru. Standardizirana in dobro utečena praksa nam sedaj ne pomaga. Vsak primer je specifičen in zahteva specifične ukrepe in vodenje oksidacije prilagojeno trenutnim razmeram. Dodajmo temu še dejstvo, da npr. 70-tonska šarža nerjavnega jekla, tipa 18/8, danes velja nekaj milijard starih denarjev (samo Ni stane čez 30.000 USA \$!). Povsem jasno je, da se glede na tako finančno vrednost ne moremo zadovoljiti z nekakim povprečno dobrim načinom dela, saj že majhne oscilacije v produktivnosti, izkoristku kroma, porabi električne energije, ferozlitin, ognjevarne obloge itn., pomenijo velik denar. Upoštevajoč ta dejstva, sodimo, da je potrebno uveljaviti pojmovanje, da je vsaka šarža specifična in jo je treba kot tako tudi obravnavati ter težiti za optimalnim vodenjem celotnega procesa izdelave pri vsaki konkretni šarži. Pri tem je treba še poudariti, da je optimalno vodenje ene šarže lahko daleč od optimuma pri neki drugi šarži. Standardizirana praksa je seveda dobra, vendar le prehodna rešitev, s katero se ni več mogoče zadovoljiti, ko nam računalniško vodenje proizvodnih procesov omogoča bistveno boljše rezultate.

4.1 Vpliv intenzitete pihanja kisika

Intenziteta pihanja kisika v VOD napravah je praviloma v mejah med 600 in 2000 m³ na uro. V večini primerov pa le redko vpihujemo več kot 1200 m³ kisika na uro. Če kopje za vpihovanje kisika ni vodno hlajeno, je intenziteta pihanja manjša, kot pri vodno hlajenem kopju. Če predpostavimo, da je izkoristek kisika konstanten v precej širokem delovnem območju intenzitete pihanja in sestave oz. vsebnosti ogljika, lahko pričakujemo, da bo čas, potreben za oksidacijo določene količine ogljika, obratno sorazmeren intenziteti pihanja. Raziskave v Wittenu (7) so pokazale, da se čas vakuumske oksidacije skrajša pri bolj intenzivnem pihanju kisika občutno bolj, kot lahko pričakujemo na osnovi predpostavke o enakem izkoristku. Izkoristek kisika je torej večji pri bolj intenzivnem pihanju. Potemtakem s spremembo intenzitete pihanja lahko precej vplivamo na čas VOD obdelave in na ta način lahko znova vzpostavimo načrtovani ritem dela oz. časovno usklajeno delo med EOP in VOD, če je pred tem prišlo do nepredvidenega zastoja. Za podrobnejšo analizo vpliva intenzitete pihanja na čas vakuumske oksidacije so bili izvedeni poskusi (9) v Aachenu in je bilo ugotovljeno, da obstaja razmeroma močna korelacija ($R = 0,88$) med specifično intenziteto pihanja (v kub. metrih kisika na uro in tono) in hitrostjo oksidacije ogljika. Za praktične namene bi potrebovali t. im. modelne poizkuse. Na metalurškem inštitutu smo razvili matematični model vakuumske oksidacije MIS-VOD (8), ki je dinamičnega tipa, t. j. vključuje poleg termodinamičnih tudi kinetične zakonitosti ter nam omogoča simulacijo vakuumske oksidacije, t. j. vodenje namišljene šarže ob upoštevanju vseh realnih pogojev, ki so tipični za prakso dane jeklarne. Računalniški program, izdelan na osnovi tega modela, nam tako mogoča izvedba »poskusov«, ki si jih v praksi sploh ne moremo privoščiti. Na ta način lahko ugot-



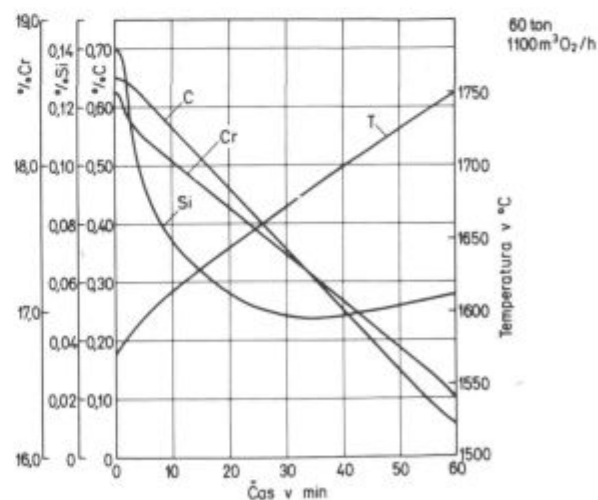
Slika 3

Primerjava rezultatov modela (krivulje) in dejanskih rezultatov.

Fig. 3

Comparison of the results calculated by mathematical model (curves) and the practical results (points) from ESW Witten (9).

vljamo vplive posameznih procesnih parametrov in začetnih pogojev na končni rezultat vakuumske oksidacije. Čeprav model še ne vključuje empiričnih parametrov, kot so npr. povprečni izkoristek kisika, srednja hitrost ohlajevanja taline v ponovci, itd., ki jih bo treba čimbolj natančno določiti za vsako jeklaro posebej, smo manjkajoče podatke nadomestili s predpostavljenimi vrednostmi in izvedli nekatere modelne poizkuse. Model smo najprej testirali na ta način, da smo simulirali vodenje VOD oksidacije nerjavnega jekla 4 različnih šarž, za katere je bil potek oksidacije podrobno opisan v strokovni literaturi (7, 9, 10). Tako slika 3 kaže primerjavo rezultatov simulacije s pomočjo modela (krivulje) z dejanskimi rezultati (točke) iz lit. (7). Kot vidimo, se rezultati modelnega poskusa presenetljivo dobro ujemajo z dejanskim potekom vakuumske oksidacije. Seveda bo potrebno verficirati model v naših jeklarah in ga po potrebi še dodelati, vendar nam že sedaj omogoča nekatera dognanja. Tako smo z namenom



Slika 4

Rezultati modelnega poskusa. Simulacija VOD oksidacije 60-tonske taline pri 1100 m³ kisika/uro.

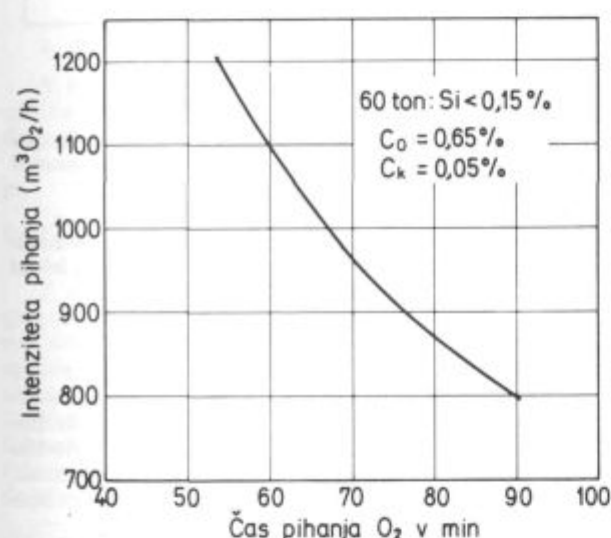
Fig. 4

Simulation of VOD processing for a 60 ton melt at 1100 m³ of oxygen per hour.

analize vpliva intenzitete pihanja kisika na čas, potreben za vakuumsko oksidacijo namišljene taline v VOD napravi, simulirali potek oksidacijske faze v pogojih, ki približno ustrezajo pogojem v jeseniški jeklarni. Na sliki 4 vidimo rezultate modelnega poskusa, t. j. simulacije vodenja VOD oksidacije taline. Izbrani so naslednji začetni pogoji:

- začetna temperatura taline: 1570° C,
- masa taline: 60 ton,
- intenziteta pihanja kisika: 1100 m³/uro,
- začetna sestava: 0,65 % C, 0,14 % Si, 0,30 % Mn, 18,50 % Cr, 9,0 % Ni.

Poleg poteka oksidacije ogljika, silicija in kroma vidimo na sliki tudi potek temperature ter čas, potreben za oksidacijo do željene vsebnosti ogljika. Pri omenjenih začetnih pogojih in izbranih procesnih parametrih vidimo, da bomo dosegli 0,05 % C po izteku 60 minut. Takrat bi morali prekiniti pihanje. Temperatura ob koncu pihanja bi bila 1750° C. Talina bi pri 0,05 % C vsebovala ca. 0,05 % Si in 16,40 % Cr. Vpliv intenzitete pihanja kisika na čas, potreben za oksidacijo 60-tonske šarže od 0,65 % C do 0,05 % C, kaže slika 5.



Slika 5

Vpliv intenzitete pihanja na čas pihanja kisika od 0,65 % C do 0,05 % C z 60-tonske šarže 18/8.

Fig. 5

Relationship between blowing rate and the time required for vacuum decarburisation of a 60 ton 18/8 melt from 0,65 % C to 0,05 % C.

4.2 Vpliv začetne sestave taline

Porušeni ritem dela zaradi nepredvidenih zastojev lahko znova vzpostavimo, tako da s spremembo intenzitete pihanja kisika skrajšamo oz. podaljšamo čas vakuumске oksidacije v VOD. V praksi pa bo treba kombinirati spremembo intenzitete pihanja s spremembo začetne vsebnosti ogljika. Le na ta način dobimo namreč večje možnosti, da ponovno dosežemo časovno usklajenost med EOP in VOD in tako ujamemo izgubljeni delovni ritem. Če VOD ponovca ni bila pravočasno pripravljena, lahko nadaljujemo primarno oksidacijo v EOP. Pri tem moramo seveda paziti na pravilen potek temperature, da bi preprečili prekomerno oksidacijo kroma, t. j. potek temperature mora ustrezati tistemu na sliki 1. Višja temperatura od tiste optimalne, ki je prikazana na sliki 1, je škodljiva za oblogo peči, nižja pa

povzroča nesprejemljivo veliko oksidacijo kroma na žlindro. V tem primeru bo imela talina na začetku VOD oksidacije nižjo vsebnost ogljika kot pri običajnem delu, kar bo seveda zahtevalo krajši čas oksidacije oz. ustrezno prilagajanje intenzitete pihanja kisika želenemu času oksidacije.

5. VZDRŽNOST OGNJEVARNE OBLOGE

Vzdržnost ognjevarne obloge VOD ponovce je bistvena za proizvodne stroške, zato je temu vprašanju potrebno posvetiti večjo pozornost. Osnovna dejavnika, ki najbolj ogrožata vzdržnost obloge, sta seveda temperatura in žlindra oz. količina in bazičnost žlindre. Obstočnost obloge je odvisna od začetnih pogojev, t. j. začetne sestave in temperature taline, ter od procesnih parametrov. Nezaželen dodatek CaO oz. prenizka bazičnost, previsoka intenziteta pihanja, visoka začetna vsebnost ogljika in silicija, visoka začetna temperatura taline, oksidacija do nepotrebno nizke vsebnosti ogljika, tj. predolgo pihanje kisika, so izredno škodljivi za obstojnost obloge. Zadošča že eden izmed naštetih dejavnikov za prekomerno obrabo obloge, pogosto pa nastopajo v kombinaciji, kar lahko povzroči katastrofalno obrabo obloge v žlindrni coni že v eni sami šarži! Število dejavnikov, ki so pomembni, akumulacija vpliva in sinergistični efekt, t. j. pojav močnejšega vpliva kombiniranih dejavnikov, jasno kažejo, kako težka je naloga jeklarja, ki se želi izogniti vsaj večjim napakam. Standardizirana praksa je trenutno edina rešitev, vendar so odstopanja od običajnega načina dela dostikrat neizogibna. Danes ni jeklarja, ki bi lahko pravilno in pravočasno ukrepal ter prilagodil vse našete veličine trenutnim pogojem, ko so le-ti zunaj običajnega načina dela. Edina rešitev je v računalniškem vodenju procesa, saj ni mogoče pričakovati od jeklarjev, da tako popolno obvladajo termodinamične zakonitosti in da so še sposobni, da v zelo kratkem času, ki je na razpolago, izvedejo ustrezne izračune. Obseg potrebnih izračunov je v nekaterih primerih tako velik, da je celo vprašljivo, ali lahko npr. mikroročunalnik izvede vse potrebne proračune v dovolj kratkem času, npr. 1–2 minuti. Pri tem je odločilnega pomena hitrost dela, in ne obseg spomina, ki ga ima računalnik.

5.1 Vpliv začetne sestave taline

Ob koncu vakuumске oksidacije vsebuje talina v VOD ponovci običajno med 0,05 in 0,10 % Si, kot so to pokazale naše prejšnje raziskave v okviru termodinamične analize sistema Fe-Cr-C-Si-O, kar se zelo dobro ujema z dejanskimi rezultati, sodeč po podatkih v strokovni literaturi. Le v redkih primerih lahko talina vsebuje ob koncu oksidacije manj kot 0,05 % Si, kar je seveda možno le v primeru, če je že na začetku imela zelo nizek Si in je bila brez žlindre oz. smo dodali ustrezno količino CaO in CaF₂ ter tako zagotovili visoko bazičnost in s tem v zvezi nizko aktivnost SiO₂ v žlindri (7,9). To pomeni, da lahko računamo z oksidacijo Si med vakuumsko oksidacijo, in sicer bo oksidirala količina Si, ki ustreza razliki med njegovo začetno in končno vsebnostjo. Kot končno vsebnost lahko prevzamemo vrednost 0,07 % Si. Za izračun potrebnega dodatka CaO rabimo še podatek o želeni bazičnosti. Medtem ko v EOP oz. pri klasični tehnologiji izdelave nerjavnega jekla ne potrebujemo bazičnosti, ki bi presegala 1,5–1,7, ker sicer znova naraščajo izgube kroma z žlindro, ker raste količina žlindre, v VOD ponovci lahko in celo moramo delati z večjo bazičnostjo. To velja pred-

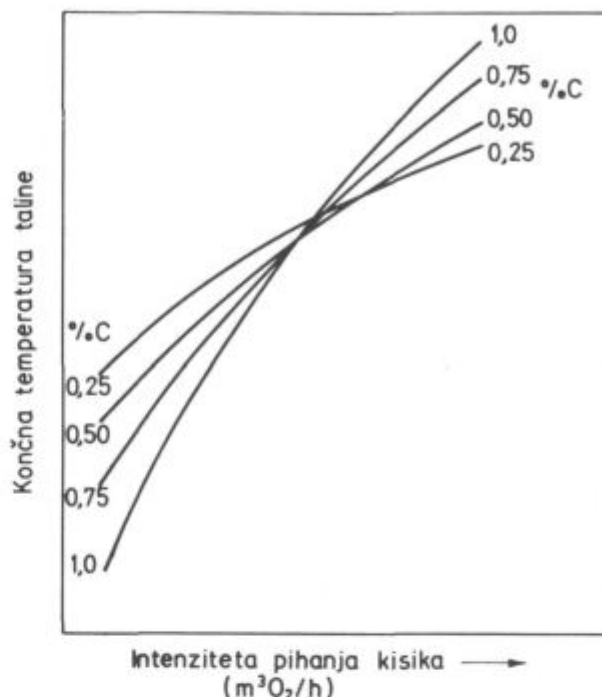
vsem za šarže z visoko začetno vsebnostjo ogljika. Tukaj ne omenjamo Si, ker njegovo nadpovprečno vsebnost pač kompenziramo s posebnim dodatkom CaO, kot je že omenjeno. Večja bazičnost, npr. 2,5–3 (ponekod delajo celo z bazičnostjo 3–5!) je potrebna pri večji vsebnosti ogljika zaradi tega, ker je čas oksidacije sedaj daljši in je obloga dalj časa izpostavljena vplivu žlindre in visoke temperature. Ustrezen dodatek CaO ustvari venec še neraztopljenega apna, ki obkroža t. im. »oko«, t. j. tisti del odkrite površine taline neposredno pod kopjem, v katerem talina »kuha« pod vplivom argona. Ker dodano apno potrebuje čas za raztapljanje, je prva žlindra (posebno pri talinah z visoko vsebnostjo Si) je zelo kisla in lahko močno poškoduje oblogo v žlindrni coni, čeprav bo končna analiza žlindre pokazala, da je bila bazičnost »običajna«. Šele ko se dodano apno raztopi, bazičnost poraste in je nevarnost mimo. Pomembno je torej, da uporabljamo kvalitetno »meko« žgano apno, ki se dovolj hitro raztaplja. Venec neraztopljenega apna ima torej zelo pomembno vlogo pri zaščiti obloge v žlindrni coni v začetku, t. j. takrat, ko je nevarnost največja. Problemov z oblogo zaradi previsoke vsebnosti Si v naših jekelnah zaenkrat ni, ker pač ne uporabljamo najcenejšega vira kroma, t. j. FeCr charge. Ta FeCr proizvaja tovarna TDR v Rušah in bo treba začeti poskuse z njegovo uporabo v vložku. Takrat bo treba posvetiti večjo pozornost možnim posledicam nezaustavne primarne oksidacije pri delu v VOD.

5.2 Vpliv in kontrola temperature

Ena izmed najtežjih nalog pri usklajevanju dela EOP in VOD v postopku EOP-VOD je pravilna usklajenost temperature. Upoštevajoč ohlajanje taline med izlivom iz EOP in začetkom vakuumске oksidacije, mora biti temperatura pri izlivu iz EOP strogo kontrolirana. Če kot zgornjo dopustno temperaturo v VOD izberemo 1700°C, potem je jasno, da bo temperatura na koncu vakuumске oksidacije neposredno odvisna od začetne temperature. Končna, t. j. maksimalna temperatura v VOD ponovci je odvisna od:

- mase taline,
- intenzitete pihanja kisika,
- začetne temperature taline,
- začetne vsebnosti ogljika,
- začetne vsebnosti Si (če je ta nad 0,10 % Si),
- končne vsebnosti ogljika in
- intenzitete mešanja z argonom.

V primerih, ko smo prisiljeni, da v VOD ponovci živimo talino z vsebnostjo ogljika, ki je večja od tiste pri običajnem načinu dela, lahko prilagodimo intenziteto pihanja, t. j. znižamo intenziteto pihanja kisika, da bi tako preprečili dvig temperature nad 1700°C. Glede na to, da je maksimalna temperatura taline v VOD ponovci odvisna od 7 zgoraj naštetih dejavnikov, bi popolna raziskava, izvedena na klasičen način, zahtevala 78.125 poskusov, če bi vsak dejavnik nastopal s petimi različnimi vrednostmi. Če bi te poskuse izvajali v jekelni in bi vsak dan imeli eno poskusno šaržo, bi za to potrebovali 214 let! Ta primer jasno kaže nujnost prehoda k sodobnim raziskovalnim metodam, ki vključujejo matematično modeliranje in uporabo računalnika. Tudi z uporabo računalnika in ustreznega matematičnega modela je torej precej obsežna raziskava, saj gre za simulacijo vodenja 78.125 šarž, ki mora biti izpeljana v celoti, t. j. od začetka do konca namišljene vakuumске oksidacije. S predpostavko, da za simulacijo poteka ene šarže z računalnikom potrebujemo pri naših računalnikih, ki so večinoma zastareli že ob nakupu in so zaradi tega veliko počasnejši od sodobnih računalnikov srednjega razre-



Slika 6

Vpliv začetne vsebnosti C in intenzitete pihanja na maksimalno temperaturo v 60-tonski VOD ponovci pri začetni temperaturi 1550 in končni vsebnosti 0,05 % C.

Fig. 6

Influence of initial carbon content and blowing rate on maximum temperature in VOD. (At 0,05 % C in 60 ton melt, initial temperature 1550°C).

da, le eno minuto, bi potrebovali 54 dni neprekinjenega dela računalnika! To pomeni, da bo treba skrbno načrtovati take modelne poskuse in jih omejiti na konkretne zahteve jeklarjev, sicer bi dobili veliko in nepregledno množico števil, ki bi bile zato za prakso neuporabne. Očitno je edina rešitev v računalniškem vodenju procesa, vendar je to naloga, ki je še pred nami.

V okviru te študije smo izvedli 45 modelnih poskusov z uporabo računalnika. Pri tem smo spreminjali začetno vsebnost ogljika med 0,20 in 1,0 % C ter intenziteto pihanja med 800 in 1200 m³ kisika/uro. Rezultate prikazujemo grafično na sliki 6. Dobljeni rezultati so seveda le relativni, saj gre za rezultate modelnih poskusov, zato v diagramu na sliki 6 niso podane številčne vrednosti. Rezultati veljajo za naslednje okvirne pogoje:

- talina: 18/8,
 - začetna temperatura oksidacije: 1550°C,
 - začetna vsebnost Si: manj kot 0,15 % Si,
 - masa taline: 60 ton,
 - končna vsebnost ogljika: 0,05 % C
 - način pihanja: na površino taline,
 - talina na začetku oksidacije praktično brez žlindre.
- Diagram na sliki 6 nam daje osnovo za naslednji ugotovitvi:

- pri majhni intenziteti pihanja imajo višjo končno temperaturo taline z nizko vsebnostjo ogljika, medtem ko pri višjih intenzitetah pihanja višji začetni ogljik ustreza tudi višji končni temperaturi,
- za dano VOD napravo obstaja določena intenziteta pihanja, pri kateri je končna temperatura taline neodvisna od začetne vsebnosti ogljika!

Seveda je potrebno natančno ugotoviti to intenziteto pihanja, ki predstavlja optimalno intenziteto pihanja za standardno prakso. Pri tej intenziteti pihanja, izraženi za dano maso taline v kub. metrih kisika na uro, ne more biti neprijetnih presenečenj v obliki previsokih končnih temperatur taline ob koncu VOD oksidacije, če seveda ni bila prevelika začetna vsebnost Si ali/in previsoka začetna temperatura taline. Vsako ad hoc spreminjanje intenzitete pihanja in poskus njene prilagoditve spremenjenim pogojem v jeklarni, ki so le začasni, mora biti dobro premišljeno in skrbno preračunano, sicer lahko pride do prekomerne porabe obloge. Tako so nam že na začetku modelni poskusi pripomogli do zanimive ugotovitve. Natančne, t. j. absolutne vrednosti končnih temperatur v VOD ponovci bo možno vrisati v diagram na sliki 6 le po poprejšnjem umerjanju modela na konkretni VOD napravi. Toplotnih izgub ni mogoče zanesljivo oceniti, kaj šele opredeliti. Zato je prva naslednja naloga natančna verifikacija izdelanega matematičnega modela v naših jeklnah oz. njegovo umerjanje. To bo potem odprlo možnost izvajanja številnih skrbno načrtovanih modelnih poskusov, s katerimi bo mogoče izdelati bolj konkretne napotke za prakso.

6. PREDLOGI IN ZAKLJUČKI

V študiji nekaterih osnovnih problemov vakuumske oksidacije smo raziskovali vplive začetnih in procesnih dejavnikov na:

— pravilno pripravo taline za vakuumsko oksidacijo,

— časovno usklajeno delovanje tandema EOP-VOD in

— vzdržnost ognjevarne obloge VOD ponovce.

Z uporabo računalnika in izdelanega matematičnega modela MIS-VOD smo izvedli 45 modelnih poskusov simulacije vodenja vakuumske oksidacije taline z 0,65 % C, 0,15 % Si, 0,30 % Mn, 18,5 % Cr in 9 % Ni. Za začetno temperaturo taline smo izbrali vrednost 1550° C. Za maso taline smo prevzeli vrednost 60 ton. Izbrani pogoji v grobem ustrezajo pogojem v jeklarni železarne Jesenice. Pomembnejši rezultati teh prvih modelnih poskusov so:

— Ugotovili smo potreben čas pihanja kisika za oksidacijo do 0,05 % C v odvisnosti od intenzitete pihanja. Izdelani diagram lahko uporabljamo kot pripomoček v praksi pri vakuumski oksidaciji 60-tonske taline v VOD ponovci. Zaenkrat je to le groba orientacija, kar bo možno izboljšati z natančnim umerjanjem izdelanega modela, t. j. z njegovim prilagajanjem razmeram v dani jeklarni.

— Odvisnost končne temperature vakuumske oksidacije od začetne temperature taline je preprosta: končna temperatura je toliko večja, za kolikor višja je bila začetna temperatura taline.

— Modelne raziskave medsebojne odvisnosti med začetno vsebnostjo ogljika, intenziteto pihanja kisika in končno temperaturo so pokazale, da za vsako VOD napravo obstaja določena intenziteta pihanja, ki nam zagotavlja skoraj enako končno temperaturo taline, neodvisno od začetne vsebnosti ogljika. Ta ugotovitev velja v naslednjih pogojih:

a) Predvidena, načrtovana, želena vsebnost ogljika ob koncu vakuumske oksidacije je enaka (0,05 % C).

b) začetna temperatura taline mora biti enaka in

c) začetna vsebnost Si mora biti pod 0,15 % Si.

— Povsem nepričakovano smo z modelnimi poskusi ugotovili, da imajo pri majhni intenziteti pihanja (npr. 800 m³ kisika/uro v 60 tonski ponovci) največjo končno temperaturo taline z nizko začetno vsebnostjo ogljika. Ta rezultat pomeni, da pri majhni intenziteti pihanja ob veliki začetni vsebnosti ogljika prevladujejo toplotne izgube, ki so zelo odvisne od časa pihanja. Pri tem smo raziskali delovno območje od 0,2 % C, do 1,0 % C in od 800 do 1200 m³ kisika/uro. Za nadaljevanje raziskovanja problematike vakuumske oksidacije predlagamo:

— umerjanje izdelanega modela v jeklnah Jesenice in Ravne,

— izvajanje modelnih poskusov za rešitev nekaterih specifičnih problemov v posamezni jeklarni, predvsem problemov usklajenega delovanja EOP in VOD v pogledu temperature, začetne oz. končne vsebnosti ogljika ter optimiranja vzdržnosti ognjeobstoje obloge VOD ponovce.

Literatura

1. Smajić, N.: Termodinamična analiza sistema Fe-Cr-C-O, Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani, N. 639, december 1978
2. Smajić, N.: Termodinamična analiza sistema Fe-Cr-C-O II. del, Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani, N. 743, december 1979
3. Smajić, N.: Termodinamična analiza sistema Fe-Cr-C-O III. del, Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani, n. 839, december 1980
4. Smajić, N.: Intenziviranje razogljčenja med vakuumsko oksidacijo nerjavnega jekla in vpliv na njegovo čistočo, Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani, N. 81-001, december 1981
5. Smajić, N.: Intenziviranje razogljčenja med vakuumsko oksidacijo nerjavnega jekla in vpliv na njegovo čistočo, II. del, Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani, N. 82-004, september 1982
6. Smajić, N.: Intenziviranje razogljčenja med vakuumsko oksidacijo nerjavnega jekla in vpliv na njegovo čistočo, II. del, Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani, N. 83-002, september 1983

ZUSAMMENFASSUNG

Die Störungen in einer zeitlich abgestimmten Wirkung zwischen LB Ofen — VOD Anlage, die wegen unvorsehbarer Stillstände eintreten können, können erfolgreich durch die Änderung des Umfanges der primären Oxidation im LB Ofen und mit einer entsprechenden Anpassung des Verlaufes und des Umfanges des Frischprozesses in der VOD Anlage bewältigt werden. Durch eine optimale Vorbereitung der Schmelze für das Vakuumfrischen, bei welcher die Anfangstemperatur

der Schmelze der chemischen Zusammensetzung angepasst werden muss, kann man einen zu grossen Pfannenverschleiss vermeiden. Die Modelluntersuchungen haben ergeben, dass für jede VOD Anlage eine bestimmte Sauerstoffblasintensität existiert, bei welcher die End bzw. die maximale Temperatur der Schmelze praktisch von dem Anfangskohlenstoffgehalt unabhängig ist.

SUMMARY

The disturbances in temporally harmonized operation of the arc furnace and VOD set-up appearing due to periodic and unforeseen standstills can be effectively overcome by varying the extent of primary oxidation in the arc furnace, and with an adequate adjusting of the course and the extent of vacuum oxidation. In order to prepare the melt in optimal way for the VOD its composition must be adjusted to the temperature of

the beginning of vacuum oxidation since this is the only way to avoid the excessive wear of ladle lining. Model investigations showed that each VOD set-up has its own characteristic blowing rate of oxygen where the final, i. e. maximal melt temperature, is practically independent on the initial carbon content.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неполадки координации времени действия ЕО — печи и VOD — устройства получаются вследствие периодических и непредвиденных простоев. Эти неполадки можно эффективно преодолеть с изменением объема первичного окисления в дуговой электропечи (ЕО) и соответствующим приспособлением протекания и объема окисления под вакуумом. Для оптимального приготовления расплава для VOD — устройства состав расплава должен соответствовать первоначальной температуре окисления под ва-

куумом, так как только таким образом можно избежать слишком большого расхода футеровки ковша. Исследования, выполненные на основании моделей показали, что для каждого отдельного VOD — устройства требует определенную интенсивность вдувания кислорода, при которой конечная т. е. максимальная температура расплава практически независима от первоначального содержания углерода.