

Termodinamika v proizvodnji nerjavnih jekel

UDK: 669.14, 018.8, 669.184: 681, 34
ASM/SLA SS, Dn; P. 12

N. Smajić



Nova spoznanja v metalurški termodinamiki in teoriji metalurških procesov na področju izdelave nerjavnih jekel so rezultat intenzivnega raziskovalnega dela v zadnjih dvajsetih letih. Žal so rezultati teh raziskav praviloma podani v obliki ravnotežnih konstant, interakcijskih koeficientov, koeficientov aktivnosti itd., tj. v taki obliki, da so za jeklarja-praktika neuporabni. Zaradi tega smo iz množice objavljenih rezultatov izbrali najzanesljivejše ter jih z določenimi predpostavkami uporabili za termodinamično analizo sistema Fe-Cr-C-O. Dobljene rezultate podajamo v taki obliki, ki jeklarju-praktiku omogoča neposredno aplikacijo termodinamičnih zakonitosti v proizvodnji nerjavnih jekel.

1. UVOD

Termodinamične analize in proračuni ravnotežnih stanj v sistemu Fe-Cr-C-O so zelo aktualni že od uvedbe žilavenja s plinastim kisikom, ki je precej olajšalo proizvodnjo nerjavnih jekel.

Žilavenje s kisikom je namreč omogočilo uporabo odpadkov nerjavnega jekla v vložku, ker je čas žilavenja sedaj krajši, temperatura taline pa bistveno višja, zaradi česar so izgube kroma z odgorom v žlindro precej manjše.

Naša tehnologija izdelave nerjavnih jekel temelji na sedaj že klasični tehnologiji iz petdesetih let. Delo jeklarja-topilca sloni na zastarelih tehnoloških predpisih in lastnih izkušnjah in ne na poznavanju in aplikaciji termodinamičnih zakonitosti.

Medtem je prišlo do prave revolucije v tehnologiji izdelave nerjavnih jekel. Novi postopki VOD, AOD in CLU so v industrijsko razvitih deželah povsem izpodrinili klasično tehnologijo. Tako se po AOD postopku danes proizvaja 80 % vseh nerjavnih jekel na zahodu in praktično 100 % v ZDA.

Osnovni problem pri izdelavi nerjavnih jekel je selektivna oksidacija ogljika v talini, ki že vsebuje krom zaradi uporabe odpadkov nerjavnega jekla

v vložku. Vprašanje, kako pospešiti proces žilavenja, tj. oksidacijo ogljika in obenem preprečiti oksidacijo kroma, oz. zmanjšati odgor dragega kroma na minimum, je za jeklarsko prakso zelo pomembno.

Znano je, da je kvaliteta pridelanega jekla veliko odvisna od vsebnosti kisika v jeklu, ki je delno raztopljen, delno pa vezan v obliki oksidnih vključkov. Celo optimalna tehnologija dezoksidacije nam ne pomaga, če je talina neposredno pred dezoksidacijo vsebovala veliko količino kisika. Dodajmo še, da je od topnosti in vsebnosti kisika v talini močno odvisna tudi hitrost žilavenja, vsaj v prvi fazi (žilavenje do 0,1 % C), saj imamo v začetku oksidacije 12–15 atomov ogljika na en atom kisika, zaradi česar je dovolj velika intenzivnost dovajanja kisika, ki mora zagotavljati stalno nasičenost taline s kisikom, bistvenega pomena.

Na osnovi kemijske analize prvega preizkusa in temperature taline po končanem taljenju topilec lahko s pomočjo danih diagramov¹ takoj odgovori na naslednja vprašanja, ki so odločilnega pomena za nižje proizvodne stroške:

— Ali lahko po taljenju v danem primeru takoj začnemo s pihanjem kisika?

— Ali lahko zmanjšamo odgor kroma v žlindro in tako skrajšamo redukcijsko periodo in zmanjšamo porabo FeSi za redukcijo, s tem da še pred začetkom pihanja kisika nekoliko dvignemo temperaturo taline in koliko?

— Ali lahko del dragega FeCr s.a. nadomestimo z dodatkom cenejšega FeCr carb., oz. še cenejšega odpadnega silikokroma C-kvalitete še pred začetkom oksidacije in kolikšen naj bo ta dodatek?

— Kakšna je optimalna sestava vložka pri izdelavi nerjavnega jekla, npr. 18/8?

Upamo, da bodo rezultati tega dela prispevali k znižanju proizvodnih stroškov in zanesljivejšemu doseganju predpisane sestave (predvsem C in Cr). Primerno obdelani in preoblikovani v ustrezne algoritme za procesni računalnik ti rezultati lahko pripomorejo k uvajanju računalniškega vodenja procesa žilavenja pri izdelavi nerjavnih jekel.

Dr. N. Smajić, dipl. ing. metalurgije, samostojni raziskovalec na Metalurškem inštitutu

2. Sistem Fe — O

Topnost kisika v čisti Fe-talini je določena z ravnotežno konstanto reakcije, po kateri poteka oksidacija železa s kisikom, raztopljenim v talini:



Termodinamični podatki o prosti reakcijski entalpiji, oz. ravnotežni konstanti reakcije (1), ki so objavljeni v literaturi, se med seboj zelo dobro ujemajo. Za izračun aktivnosti in topnosti, oz. vsebnosti kisika v čistih Fe talinah v odvisnosti od temperature smo prevzeli vrednost po Elliotu²:

$$\log K = \frac{6320}{T} - 2,73 \quad (2)$$

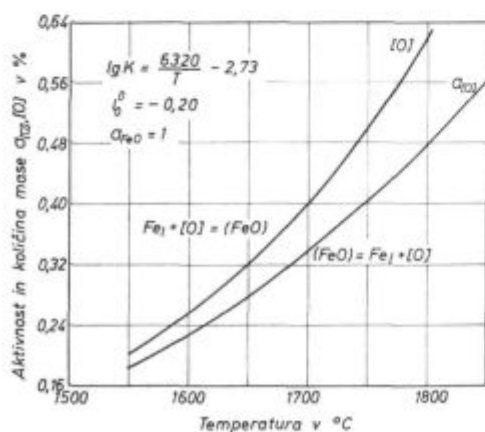
Ker je pri nasičenju taline s kisikom aktivnost FeO enaka 1, je aktivnost kisika ob nasičenju:

$$\log a_0 = -\frac{6320}{T} + 2,73 \quad (3)$$

Vsebnost kisika ob nasičenju pa je:

$$\log \% [\text{O}] = -\frac{6320}{T} + 2,73 - \frac{1873}{T} e_0^0 \% [\text{O}] \quad (4)$$

Zadnji člen zgornje enačbe vsebuje interakcijski parameter, ki ponazarja velikost medatomnih sil med atomi kisika v talini, korekcijski temperaturni faktor po Nelsonu³ in vsebnost kisika v talini ob nasičenju. Produkt teh treh faktorjev predstavlja logaritem koeficienta aktivnosti kisika pri dani temperaturi. V literaturi je v obdobju od 1936 do danes objavljeno več kot 30 različnih vrednosti za e_0^0 , ki se vse gibljejo v območju med 0 in -0,53. V novjšem času močno prevladuje vrednost -0,20 (Floridis in Chipman⁴, 1958; Elliot, Gleiser in Ramakrishna⁵, 1963; Pargeter⁶, 1967; Sigworth in Elliot⁷, 1974; Janke in Fischer⁸, 1976), kar smo tudi mi prevzeli.



Slika 1
Aktivnost in topnost kisika v čisti Fe talini
Fig. 1
Activity and solubility of oxygen in pure Fe melt.

Eksaktna matematična rešitev enačbe (4) žal ni mogoča. Obstaja sicer numerična metoda, ki je zelo zamudna in omogoča rešitev, ki ni povsem točna, vendar je možno doseči poljubno točnost, seveda na račun časa, potrebnega za numerični izračun. Ta problem smo rešili tako, da smo izdelali računalniški program za mini računalnik HP-97, ki omogoča rešitve s točnostjo, ki prekaša točnost kemijske analize.

Na sl. 1 vidimo tako dobljene rezultate (zgornja krivulja) v obliki krivulje, ki ponazarja topnost kisika v Fe talini ob nasičenju v odvisnosti od temperature. Spodnja krivulja na isti sliki kaže ustrezne aktivnosti kisika. Kot vidimo iz slike, topnost in aktivnost kisika v talini razmeroma hitro narašča s temperaturo. Nad zgornjo krivuljo poteka tvorba FeO vključkov, pod njo pa se FeO vključki raztapljajo v talini.

3. Sistem Fe — C — O

Topnost kisika v Fe-talinah, ki vsebujejo ogljik, je določena z reakcijo oksidacije ogljika:



Za izračun ravnotežne konstante reakcije (5) smo uporabili podatke^{2,9-13} ter iz njih izračunali srednjo vrednost:

$$\log K = \frac{1420}{T} + 1,91 \quad (6)$$

Aktivnost kisika v odvisnosti od sestave in temperature taline ter tlaka CO smo izračunali po enačbi (7):

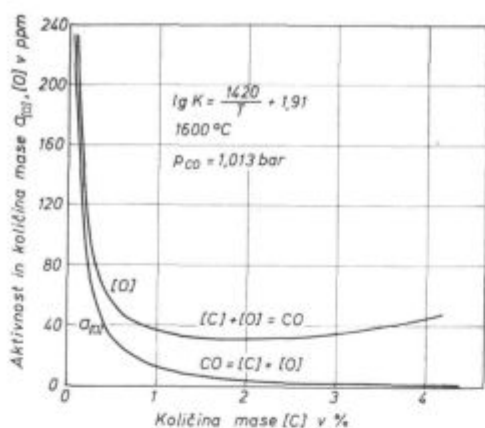
$$\log a_0 = -\frac{1420}{T} - 1,91 - \log \% [\text{C}] + \log p_{\text{CO}} - (e_c^c \% [\text{C}] + e_0^0 \% [\text{O}]) \quad (7)$$

Vsebnost kisika smo računali po enačbi:

$$\log \% [\text{O}] = -\frac{1420}{T} - 1,91 - \log \% [\text{C}] + \log p_{\text{CO}} - \frac{1873}{T} (e_c^c + e_0^c) \% [\text{C}] + (e_c^0 + e_0^0) \% [\text{O}] \quad (8)$$

Za računalniški program smo v (7) in (8) vnesli še interakcijske parametre o vplivu kroma na aktivnost ogljika in kisika, tj. e_c^{Cr} in e_0^{Cr} , tako da lahko določimo tudi vpliv kroma na ravnotežje med ogljikom in kisikom v talini. Krom namreč znižuje aktivnost ogljika in kisika, kar pomeni, da bodo taline s kromom vsebovale več kisika, tj. krom zvišuje topnost kisika v talinah sistema Fe-C-O, oz. Fe-C-Cr-O.

Na sl. 2 vidimo aktivnosti in topnosti, oz. vsebnosti kisika v sistemu Fe-C-O pri 1600°C in parcialnem tlaku $p_{\text{CO}} = 1,013$ bara v odvisnosti od vsebnosti ogljika v talini. Kot iz slike vidimo, aktivnost kisika stalno pada z rastočo vsebnostjo ogljika. Po drugi strani pa ima krivulja, ki kaže vsebnost



Slika 2

Aktivnost in topnost kisika v Fe-C talinah pri 1600° C in $p_{CO} = 1,013$ bara

Fig. 2

Activity and solubility of oxygen in Fe-C melts at 1600° C and $p_{CO} = 1.013$ bar.

kisika v odvisnosti od koncentracije ogljika v talini, minimum (31 ppm kisika pri 1,89 % C/). Pojav minimuma je tipičen za vse dezoksidante in je posledica dejstva, da z rastočo koncentracijo dezoksidanta raste njegova aktivnost ($e_{Me}^{Me} > 0$), medtem ko aktivnost kisika pri tem pada ($e_O^{Me} < 0$). To pomeni, da za vsak dezoksidant obstaja določena optimalna koncentracija, pri kateri je vsebnost kisika v talini najmanjša. Pri nadaljnjem porastu koncentracije dezoksidanta vsebnost kisika (torej tudi oksidnih vključkov) v jeklu narašča in je zato pri dezoksidaciji potrebno paziti, da dodatek dezoksidanta pravilno odmerimo. Ta pojav demonstrira, kako pomembno je poznavanje vpliva sestave, oz. posameznih elementov taline na topnost kisika v talini.

Za izračun topnosti kisika v sistemu Fe-C-O smo za vrednosti interakcijskih parametrov e_C^C in e_O^C prevzeli $e_C^C = 0,22$ in $e_O^C = -0,45$, ki v novejšem času prevladujejo v literaturi^{5, 7, 9, 13}.

4. Sistem Fe — Cr — O

Topnost kisika v Fe talinah, ki vsebujejo krom, je določena s termodinamičnim ravnotežjem med kisikom in kromom, raztopljenim v talini, ki je posledica reakcije oksidacije kroma:



oziroma:



Večina avtorjev je v novejšem času mnenja, da reakcija (9) poteka v talinah, ki vsebujejo do 8, oz. 9 % Cr, medtem ko reakcija (10) poteka pri višjih koncentracijah kroma. Reakcija (9) je veliko bolj raziskana¹⁴⁻¹⁹; pri tem se objavljene vrednosti ravnotežne konstante za to reakcijo razmeroma dobro ujemajo, razen ene¹⁴, ki precej odstopa od vrednosti ostalih avtorjev. Zato smo za izračun

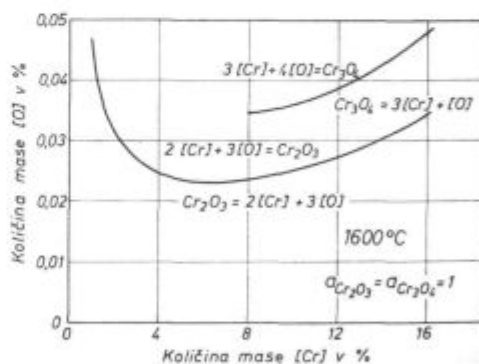
srednje vrednosti uporabili podatke tistih avtorjev¹⁵⁻¹⁹, ki se med seboj dobro ujemajo. Tako smo za srednjo vrednost ravnotežne konstante za reakcijo (9) dobili:

$$\log \bar{K}_{Cr_2O_3} = \frac{42246}{T} - 18,37 \quad (11)$$

Za oksidacijo kroma v Cr_3O_4 večina avtorjev uporablja podatke J. Chipmana²⁰, ki smo jih tudi mi prevzeli, tj.:

$$\log \bar{K}_{Cr_3O_4} = \frac{53500}{T} - 23,95 \quad (12)$$

Vrednosti za interakcijske koeficiente $e_{Cr}^{Cr} = 0$ in $e_O^{Cr} = -0,045$ smo prevzeli iz literature^{20, 21} oziroma od Fischerja in Jankea⁸. Pri tem smo prevzeli, da je aktivnost Cr-oksida ob tvorbi vključkov v talini enaka 1. Rezultate izračunov kaže sl. 3, na kateri vidimo topnost, oz. maksimalno vsebnost kisika v talinah sistema Fe-Cr-O v odvisnosti od vsebnosti kroma pri temperaturi 1600° C. Nad krivuljami je talina prenasajena s kisikom in zato nastopa tvorba vključkov Cr_2O_3 (spodnja krivulja), oz. Cr_3O_4 (zgornja krivulja). Pod ustrezno krivuljo pa se vključki razkrajajo v $/Cr/$ in $/O/$ tako, da imamo v vsakem primeru termodinamično ravnotežje med koncentracijo kroma in ogljika v talini. Tako kot v sistemu Fe-C-O tudi v sistemu Fe-Cr-O nastopa minimum na krivulji topnosti kisika. Kot vidimo iz slike 3, je topnost kisika močno odvisna od vsebnosti kroma v talini, minimum pa nastopa pri 6,43 % Cr, ko talina vsebuje le še 227 ppm kisika pri 1600° C.



Slika 3

Topnost kisika v Fe-Cr talinah pri 1600° C

Fig. 3

Oxygen solubility in Fe-Cr melts at 1600° C.

5. Sistem Fe-Cr-C-O

Po analizi binarnega sistema Fe-O in ternarnih sistemov Fe-C-O in Fe-Cr-O sedaj lahko pristopimo k analizi štirikomponentnega sistema Fe-Cr-C-O. V tem štirikomponentnem sistemu nastopata dve različni varianti, oziroma možnosti. V prvem primeru (varianta Fe-Cr-C-O) je vsebnost kisika določena z oksidacijo kroma, to je vsebnost ogljika

je enaka, oziroma manjša od takoimenovane kritične koncentracije, ki pri danih pogojih (parcialni tlak CO, sestava in temperatura taline) ravno še zadošča, da ščiti krom pred oksidacijo¹. Ker je torej koncentracija ogljika v talini nižja od kritične, vsebnosti kisika v talini omejuje oksidacija kroma, tj. reakcija (9) v področju do 8 % Cr, oz. reakcija (10) pri talinah, ki vsebujejo več kot 8 % Cr. Topnost kisika, tj. njegovo maksimalno vsebnost v tem primeru označujemo kot $/O/^{Cr}$ za razliko od $/O/^C$, ko je vsebnost kisika določena z oksidacijo ogljika. V tem drugem primeru govorimo o sistemu Fe-C-Cr-O, da bi na ta način poudarili odločilni pomen ogljika na vsebnost kisika v talini. Pravilno sestavljen vložek pri izdelavi nerjavnega jekla mora pri dani vsebnosti kroma vsebovati po taljenju nadkritično koncentracijo ogljika, tako da ogljik ščiti krom pred oksidacijo. Vsebnost kisika v talini je torej omejena in določena z reakcijo oksidacije ogljika $/C/ + /O/ = CO$. V končni fazi žilavenja, ko med žilavenjem koncentracija ogljika pade na kritično vrednost, se začne oksidacija kroma. Nadaljnje žilavenje poteka ob istočasnem odgoru kroma in ogljika. Vsebnost kisika v talini je v tej fazi določena z vsebnostjo ogljika in z vsebnostjo kroma. Le pri nepravilno sestavljenem vložku, kar sicer sploh ni redek primer, tj. ko vložek vsebuje preveč kroma, oz. premalo ogljika, nastopa takoj oksidacija kroma, vse dokler porast temperature in odgor kroma ne premakneta ravnotežja tako, da se končno doseže kritična koncentracija ogljika, od katere naprej žilavenje poteka ob istočasnem odgoru kroma in ogljika.

1. Varianta Fe-Cr-C-O

Topnost kisika v sistemu Fe-Cr-C-O je določena z vsebnostjo kroma v talini, oz. z reakcijo oksidacije kroma, kot v že obdelanem sistemu Fe-Cr-O. Razlika je v tem, da sedaj talina vsebuje poleg kroma še ogljik. Ker ogljik znižuje aktivnost kroma in kisika, topnost kisika v tem sistemu narašča z rastočo koncentracijo ogljika.

V termodinamičnih proračunih smo poleg že omenjenih interakcijskih koeficientov morali tokrat iz literature izbrati najbolj zanesljive interakcijske koeficiente, ki ponazarjajo vpliv ogljika na aktivnost kroma in kisika. Po pregledu literature^{5, 21-27} smo ugotovili, da se vrednosti za e_{Cr}^C gibljejo med $-0,058$ in $-0,157$. Izbrali smo vrednost Nakamura²¹, ker najbolj ustreza vrednosti za $e_{Cr}^{Cr} = -0,023$ po Maxwellovi enačbi, ki povezuje vrednosti e_y^x in e_x^y :

$$e_y^x = e_x^y - \frac{M_y}{M_x} + 0,00434 \left(1 - \frac{M_y}{M_x} \right) \quad (13)$$

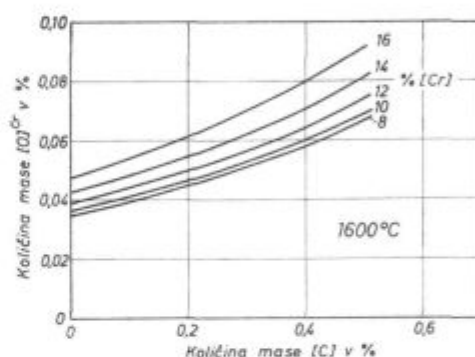
Za e_O^C smo izbrali vrednost $-0,45$, kateri po relaciji (13) ustreza $e_C^O = -0,34$.

Računalniški program, ki smo ga nato izdelali, omogoča izračun vsebnosti kisika $/O/^{Cr}$ v talinah

sistema Fe-Cr-C-O, v katerih je topnost kisika določena z vsebnostjo kroma (vsebnost ogljika manjša od kritične), in sicer v odvisnosti od temperature in sestave taline.

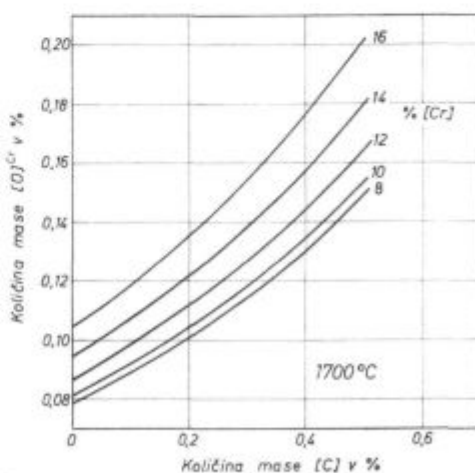
Na slikah 4, 5 in 6 prikazujemo vsebnost kisika v talinah tega tipa, ki vsebujejo 8, 10, 12, 14 in 16 % Cr, v odvisnosti od vsebnosti ogljika v talini za temperature 1600, 1700 in 1800° C.

Kot vidimo iz teh diagramov, ogljik razmeroma močno povečuje topnost kisika v talinah tega tipa. Ta vpliv ogljika je močnejši pri višjih temperaturah. Posebno močen je vpliv temperature, kar vidimo iz primerjave med slikami 4, 5 in 6. Tako npr. talina, ki vsebuje 0,3 % C in 12 % Cr, vsebuje 570, 1270, oz. 3000 ppm kisika pri temperaturah 1600, 1700, oz. 1800° C. Pri tem je treba upoštevati, da je pri 1600° C koncentracija ogljika 0,3 % manjša od kritične, če talina vsebuje 12 % Cr, medtem ko npr. pri 1800° C ista koncentracija ogljika preprečuje oksidacijo kroma in je v tem



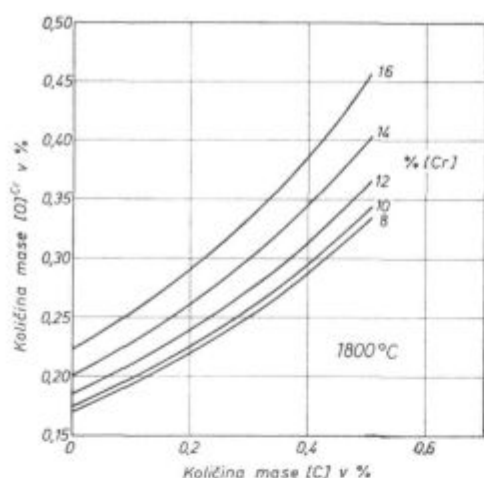
Slika 4
Vpliv kroma in ogljika na topnost kisika v talinah tipa Fe-Cr-C pri 1600° C

Fig. 4
Influence of chromium and carbon on the oxygen solubility in Fe-Cr-C melts at 1600° C.



Slika 5
Topnost kisika v talinah tipa Fe-Cr-C pri 1700° C

Fig. 5
Oxygen solubility in Fe-Cr-C melts at 1700° C.



Slika 6
Topnost kisika v talinah tipa Fe-Cr-C pri 1800°C
Fig. 6
Oxygen solubility in Fe-Cr-C melts at 1800°C.

primeru vsebnost kisika v talini regulirana z vsebnostjo ogljika. V tem primeru nastopa drugi tip taline, tj. imamo sistem Fe-C-Cr-O.

V talinah tipa Fe-C-Cr-O je topnost kisika določena z reakcijo $/C/ + /O/ = CO$.

Pri izdelavi nerjavnega jekla po taljenju vložka in kemični analizi prvega preizkušanca imamo dva možna primera:

a) Vložek je bil pravilno sestavljen, tj. za dano vsebnost kroma v talini je koncentracija ogljika višja od kritične, kar pomeni, da topilec lahko takoj začne s pihanjem kisika. Ogljik pri tem zgoreva in ščiti krom pred oksidacijo, temperatura taline narašča, vsebnost ogljika v talini pada, vse dokler ne doseže kritične koncentracije, pri kateri poleg ogljika začne zgorevati tudi krom.

Celoten potek žilavenja lahko torej razdelimo v dve sukcesivni fazi. V prvi poteka žilavenje brez odgora kroma, v drugi, končni fazi pa zgorevata istočasno ogljik in krom, ki prehaja v žlindro. Žilavenje moramo voditi tako, da je druga faza čimkrajša, oz. da se ji po možnosti izognemo.

b) Vložek je bil nepravilno sestavljen, tj. za dano vsebnost kroma v talini je koncentracija ogljika nižja od kritične in zato imamo nasproten primer, tj. sedaj krom ščiti ogljik pred oksidacijo! S poznavanjem teh ravnotežnih stanj lahko jeklar ukrepa takoj po staljenju vložka, oz. analizi prvega preizkušanca, in sicer tako, da ponovno vključi peč, tj. zviša temperaturo, bodisi z dovajanjem električne energije, bodisi z dodatkom FeSi. Šele potem, ko doseže zahtevano temperaturo, tj. tisto temperaturo, pri kateri ogljik ščiti krom pred oksidacijo, lahko začne s pihanjem kisika. V nasprotnem primeru, tj. če takoj po taljenju vložka začnemo s pihanjem kisika, kot se to običajno danes dela, najprej gori krom, temperatura taline hitro raste, vse dokler ne dosežemo kritično koncentracijo ogljika, pred tem je

del kroma že odgorel v žlindro. Prve faze žilavenja v tem primeru sploh ni; imamo le drugo fazo, tj. krom odgoreva v žlindro ves čas pihanja kisika.

Za prakso je torej pomembna predvsem topnost kisika v talinah tipa Fe-C-Cr-O, saj je v prvi fazi žilavenja, ki naj bo čimdaljša, vsebnost kisika omejena z ravnotežjem med kisikom, ogljikom in kromom, ki je posledica reakcije oksidacije ogljika v prisotnosti kroma. Ker krom znižuje aktivnost ogljika in kisika ($e_C^{Cr} = -0,023$; $e_O^{Cr} = -0,045$), bo ravnotežje med ogljikom in kisikom, ki je posledica reakcije $/C/ + /O/ = CO$, premaknjeno proti višjim koncentracijam kisika. Topnost kisika v talinah tipa Fe-C-Cr-O bo torej bistveno večja kot v sistemu Fe-C-O, kot rezultat omenjenega vpliva kroma.

V osnovi računalniškega programa, ki smo ga izdelali za izračun topnosti kisika v talinah sistema Fe-C-Cr-O, je algoritem:

$$\begin{aligned} & /C/ /O/ \exp. \left\{ 2,303 \left[\frac{1420}{T} + 1,91 + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1873}{T} \left(\sum_i e_O^{X_i} X_{i0} / X_i + \sum_i e_C^{X_i} X_{i0} / X_i \right) \right] \right\} - \\ & - p_{CO} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Pri tem so $e_O^{X_i}$ in $e_C^{X_i}$ interakcijski koeficienti, ki ponazarjajo vpliv posameznega elementa X, prisotnega v talini, na aktivnost kisika, oz. ogljika, X_i vsebnosti posameznih elementov v talini, izraženi v ut. % (količina mase), T-absolutna temperatura (K) in p_{CO} -parcialni tlak v atmosferah.

V izračunih smo uporabili vrednosti interakcijskih koeficientov pri 1873 K iz tabele 1.

Vpliv temperature na interakcijske koeficiente pa smo računali po korekcijski enačbi Nelsona³:

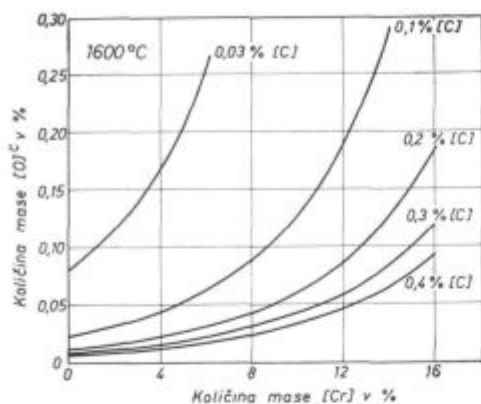
$$e_T = e_{1873} \frac{1873}{T} \quad (15)$$

Tabela 1: Vrednosti interakcijskih koeficientov pri 1600°C

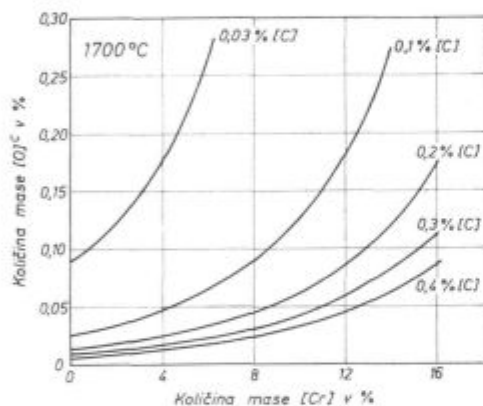
X	e_C^X	e_C^X	e_O^X
O	-0,20	-0,34	-0,156
C	-0,45	0,22	-0,113
Si	-0,13	0,106	-0,024
Mn	-0,026	—	—
Cr	-0,045	-0,023	0
Ni	0,005	0,012	—
Al	-3,9	0,043	—
Ca	-3,24	-0,097	—
P + S	-0,13	—	—

Krivulje na sl. 7, 8 in 9 kažejo tako izračunano topnost kisika v odvisnosti od vsebnosti kroma

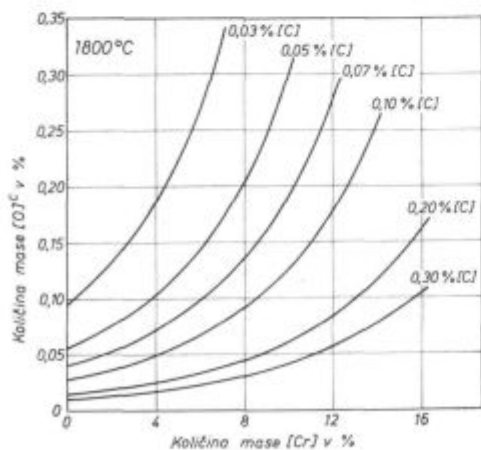
v talinah sistema Fe-C-Cr-O pri različnih vsebnostih ogljika in pri temperaturah 1600, 1700 in 1800° C.



Slika 7
Topnost kisika v talinah tipa Fe-C-Cr pri 1600° C
Fig. 7
Oxygen solubility in Fe-C-Cr melts at 1600° C.



Slika 8
Topnost kisika v talinah tipa Fe-C-Cr pri 1700° C
Fig. 8
Oxygen solubility in Fe-C-Cr melts at 1700° C.



Slika 9
Topnost kisika v talinah tipa Fe-C-Cr pri 1800° C
Fig. 9
Oxygen solubility in Fe-C-Cr melts at 1800° C.

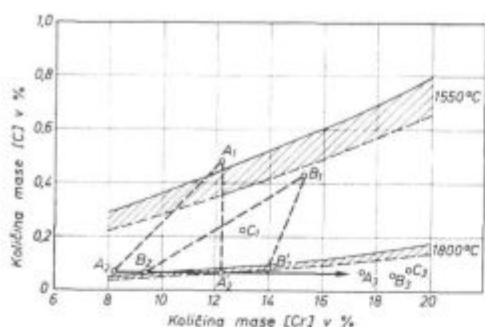
6. Opredelitev kriterijev za oceno dela

Termodinamični kriteriji omogočajo oceno pravilnosti sestave vložka ter oceno pravilnosti vodenja poteka oksidacije in takojšnje ukrepanje že po analizi prvega preizkušanca. S tem bi dosežani način dela, ki temelji na tehnoloških regulativih in izkušnjah nadomestili, oz. izpopolnili z aplikacijo termodinamičnih zakonitosti, kar bi lahko pomembno prispevalo k znižanju proizvodnih stroškov pri izdelavi nerjavnih jekel.

1. Kriterij za pravilnost sestave vložka

Pravilno sestavljen vložek preprečuje odgor kroma v žlindro že med taljenjem, kakor tudi v prvi fazi oksidacije, oz. pihanja kisika. To lahko uresničimo tako, da vložek pri dani vsebnosti kroma vsebuje določeno minimalno, oz. večjo vsebnost ogljika. V tem primeru ogljik ščiti krom pred oksidacijo. Potrebna vsebnost ogljika je seveda odvisna od vsebnosti kroma v talini ter od temperature taline. Če prevzamemo, da imamo po taljenju vložka temperaturo cca 1550° C, lahko za vsako vsebnost kroma v talini izračunamo ustrezno ravnotežno vsebnost ogljika. To je tista kritična koncentracija ogljika, pri kateri na temperaturi 1550° C ni možna oksidacija ogljika brez istočasnega odgora kroma v žlindro. To pomeni, da vložek mora biti sestavljen tako, da analiza prvega preizkušanca pokaže, da talina vsebuje nadkritično koncentracijo ogljika, tj. sestava taline glede na vsebnost kroma in ogljika mora ležati nad zgornjo krivuljo na sl. 10.

Za oceno pravilnosti sestave vložka je bistveno zgornje črtkano območje na sl. 10, ki velja za temperaturo taline 1550° C. Pri tem zgornja polno izrisana krivulja velja za talino, ki praktično ne vsebuje Si, Mn in Ni, spodnja prekinjena izoterma pa se nanaša na talino, ki vsebuje 1 % Si, 1 % Mn ter 8 % Ni. V praksi morajo torej vse taline, ob pravilni sestavi vložka, po taljenju imeti pri določeni vsebnosti kroma toliko ogljika, da njih sestave ležijo nad izotermnim območjem 1550° C ali vsaj znotraj njega. V primeru, da analiza prvega preizkušanca pokaže, da talina vsebuje premalo ogljika, kar zlahka ugotovimo s primerjanjem analize s sliko 10, to pomeni, da vložek ni bil pravilno sestavljen in da ne smemo začeti s pihanjem kisika, temveč moramo takoj ustrezno ukrepati. Najbolj učinkovit ukrep je segrevanje taline na ustrezno višjo temperaturo. Na sl. 10 so namreč zaradi boljše preglednosti vrisane le izoterme za 1550 in 1800° C. Med temi izotermami ležijo ostale izoterme za vmesne temperature. S takšnim ukrepanjem v odvisnosti od rezultatov kemične analize prvega preizkušanca se lahko izognemo nepotrebni odgoru kroma v žlindro, kar pomeni manjšo porabo kroma, krajši potek redukcije, manjšo porabo FeSi in večjo produktivnost peči, tj. nižje proizvodne stroške.



Slika 10

Kritična koncentracija ogljika pri $p_{CO} = 1,013$ bara za 1550 in 1800°C.

Polno izrisana krivulja: 0% Si, Mn in Ni.

Črtkana krivulja: 1% Si, 1% Mn in 8% Ni.

Primer uporabnosti diagrama:

A_1, B_1, C_1 — analiza prve probe šarž A, B in C

A_2 in B_2 — analiza druge probe (po oksidaciji)

A'_1 in B'_1 — optimalna analiza po oksidaciji

A_3, B_3, C_3 — končne analize

$\overline{A_1 A_2}$ in $\overline{B_1 B_2}$ — dejanski potek žilavenja

$\overline{A_1 A'_1}$ in $\overline{B_1 B'_1}$ — teoretično optimalni potek žilavenja

Fig. 10

Critical carbon concentration at $p_{CO} = 1.013$ bar, and 1550 and 1800°C.

Full line: 0% Si, Mn, and Ni.

Dashed line: 1% Si, 1% Mn, and 8% Ni.

Applicability of the graph:

A_1, B_1, C_1 — analyses of the first probes of A, B, and C heats

A_2 and B_2 — analyses of the second probes (after oxidation)

A'_1 and B'_1 — optimal analyses after oxidation

A_3, B_3, C_3 — final analyses

$\overline{A_1 A_2}$ and $\overline{B_1 B_2}$ — actual course of refining

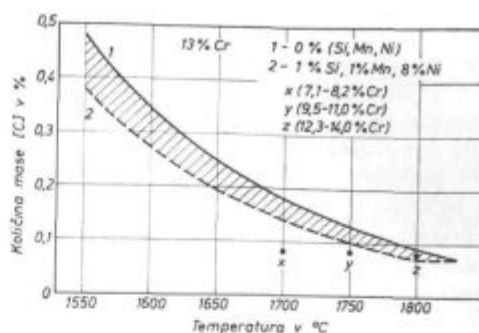
$\overline{A_1 A'_1}$ and $\overline{B_1 B'_1}$ — theoretically optimal course of refining

2. Kriterij za oceno pravilnosti poteka žilavenja

Optimalni potek žilavenja definirajmo kot tisti potek žilavenja, ki omogoča doseganje predpisane količine ogljika pri zgornji dopustni temperaturi obratovanja ob najmanjšem možnem odgoru kroma v žilindro in najmanjši toplotni obremenitvi peči. Če žilavimo ob prenizki temperaturi, bomo imeli prevelik odgor kroma; če zgornjo dopustno temperaturo presežemo ali če pri tej temperaturi obratujemo dalj časa, kot je to nujno potrebno, bomo imeli preveliko porabo ognjevarnega gradiva.

Pravilna izbira zgornje dopustne temperature obratovanja je seveda odvisna od stroškov, oz. prihrankov, je torej rezultat kompromisa. Če prevzamemo, da je zgornja dopustna temperatura obratovanja 1800°C, potem optimalni potek žilavenja taline, ki vsebuje 13% Cr, kaže diagram na sl. 11.

Za problem določanja optimalnega poteka žilavenja smo morali izdelati poseben program za računalnik. Program je prirejen tako, da izračuna krivuljo sinhroniziranega ogrevanja taline in odgora ogljika tako, da dosežemo predpisani ogljik točno pri zgornji dopustni temperaturi in ob mini-



Slika 11

Optimalni potek žilavenja taline s 13% Cr pri $p_{CO} = 1,013$ bara.

x, y, z — maksimalno možne vsebnosti kroma v talini ob koncu žilavenja pri 0,08% C pri zgornji dopustni temperaturi 1700, 1750 in 1800°C.

Fig. 11

Optimal course of refining the melt with 13% Cr at $p_{CO} = 1.013$ bar.

x, y, z — maximal possible chromium contents in the melt after refining if C = 0.08% and the upper permissible temperatures are 1700, 1750, and 1800°C.

malnem odgoru kroma v žilindro. Sinhronizacija poteka ogrevanja in žilavenja je izredno pomembna, ker je optimalni potek, ki ga kaže krivulji, oz. črtkano območje na sl. 11, možno uresničiti, oz. se mu v praksi približati le ob striktni kontroli temperature in vsebnosti ogljika v talini.

Če ima talina pri določenem % C nižjo temperaturo, kot to kaže sl. 11, bomo imeli prevelik odgor kroma, ki bi se mu lahko izognili. Če pa ima med žilavenjem talina pri danem % C previsoko temperaturo, ki se pozneje zniža tako, da ob koncu pihanja ne presežemo dovoljenih 1800°C, bomo imeli prekomerno porabo obloge peči, ne da bi pri tem zmanjšali odgor kroma.

Kriterij za oceno žilavenja je torej vsebnost C in Cr ter temperatura taline ob koncu pihanja. Ta trojna ravnotežna točka C-Cr-T je končni cilj, ki bi ga morali doseči natančno ob koncu pihanja. Optimalnemu poteku žilavenja se seveda lahko približamo predvsem ob uporabi procesnega računalnika, ki bi vodil proces oksidacije tako, da bi prejemal informacije o trenutni temperaturi taline ter vsebnosti C npr. vsake 2—3 minute, nakar bi sproti ukrepal.

7. Primeri uporabe dobljenih rezultatov

Uporabnost dobljenih rezultatov lahko preizkusimo z analizo šaržnih kartonov ene izmed naših jeklarn, iz katerih lahko razberemo analize in temperature taline v posameznih fazah izdelave nerjavnih jekel in jih primerjamo z optimalnimi vrednostmi, ki jih dajejo izračunana ravnotežna stanja.

1. Sestava vložka

Na sl. 10 vidimo tri primere šarž A, B in C. Po analizah prvega preizkušanca — točke A_1, B_1 in C_1 — bi topilec lahko s pomočjo tega diagrama takoj

ocenil, da je vložek v primeru A_1 pravilno sestavljen in da lahko takoj začne s pihanjem kisika. V primeru B_1 in C_1 , ki je posebno kritičen, je jasno, da ne smemo začeti s pihanjem, preden talino ne pregrejemo, in sicer je potrebna temperatura v primeru šarže B cca 1600°C za šaržo C pa cca 1650°C . Pri šarži C bi verjetno bilo racionalno dodati ustrezno količino 75 ali 90 % FeSi, kar bi olajšalo hitro pregrevanje taline na želeno temperaturo, ker je vsebnost ogljika v tej šarži odločno prenizka.

Ker je topilec v vseh treh primerih takoj po taljenju začel s pihanjem kisika, lahko pričakujemo, da so izgube kroma z odgorom v žlindro morale biti izredno velike v primeru C in da sta šarži A in B potekali verjetno normalno. Iz šaržnih kartonov smo videli, da sta šarži A in B res potekali običajno, analize drugih preizkušancev (tj. po pihanju) sta vrisani na sl. 10 kot točki A_2 in B_2 . V kartonu šarže C pa ni bilo rezultata drugega preizkušanca! Pri šarži C je bila namreč po pihanju tako velika količina zelo viskozne žlindre, da ni bilo mogoče vzeti preizkušanca za analizo. Šarža C je sploh potekala s težavo; čas trajanja šarže je bil daljši kot običajno, poraba kroma je bila tudi večja, produktivnost peči manjša, poraba FeSi večja itd. Vsemu temu se je bilo možno izogniti, če bi topilec analizo prvega preizkušanca (C_1) poiskal na diagramu na sl. 10, ugotovil, da je vsebnost ogljika v tem primeru prenizka in da je potrebno s pregrevanjem taline ali/in z dodatkom FeSi ustvariti takšne termodinamične pogoje, v katerih bo vsebnost ogljika in temperatura taline vsaj zadoščala, da bi še pred začetkom pihanja bil preprečen odgor kroma v žlindro.

Primer šarže C jasno kaže uporabnost, oz. praktično vrednost izvedenih termodinamičnih proračunov, ki so grafično oblikovani na sl. 10 v obliki diagrama, ki omogoča takojšnjo oceno pravilnosti sestavljenega vložka in odločitev o potrebnih ukrepih še pred začetkom pihanja.

2. Potek žilavenja

Poleg ocene poteka že končanega žilavenja diagram na sl. 11 omogoča **vođenje procesa oksidacije** v skladu z že prej definiranim optimalnim potekom, ki pri danih pogojih zagotavlja minimalne izgube kroma.

Na sl. 11 vidimo med drugim tri točke X, Y in Z, ki kažejo maksimalno možno vsebnost kroma v talini, ki ima ob koncu oksidacije predpisanih 0,08 % ogljika pri temperaturi 1700, 1750, oziroma 1800°C .

Predpostavimo, da je dopustna maksimalna temperatura 1800°C . Na sl. 11 vidimo (točka Z), da oksidacijo lahko vodimo tako, da ob koncu pihanja talina doseže istovrstno maksimalno dovoljeno temperaturo 1800°C in predpisani ogljik (0,08 % C) ter 12,3—14,0 % Cr v odvisnosti od vsebnosti Si in Mn (od 0 % do 1 %) ter Ni (od 0 % do 8 %).

Iz slike 10 vidimo, da smo pri šaržah A in B ob koncu pihanja imeli (točki A_2 in B_2) 8,2, oz. 9,4 % Cr. Torej precej manj kot bi bilo možno, če bi oksidacijo vodili natančno po termodinamično optimalni poti, ki bi nam zagotovila (točka Z) 12,3—14,0 % Cr v talini.

Ker je vsebnost kroma že v vložku A, oz. po staljenju (A_1), bila 12,2 %, te šarže tudi s procesnim računalnikom ne bi mogli voditi tako, da bi ob koncu pihanja imeli 12,3—14,0 % Cr. Lahko bi pa znižali ogljik na predpisanih 0,08 % brez odgora kroma v žlindro tako, da bi talina po pihanju imela enako vsebnost kroma (12,2 %) kot pred pihanjem (točka A'_2). Razlika med A'_2 in A_2 je 12,2 — 8,2 = 4,0 % Cr, ki je dejansko odgorel v žlindro, kar bi bilo možno preprečiti z vođenjem procesa oksidacije po termodinamično optimalni poti. Žal neposredna uporabnost diagrama na sl. 11 ni možna. Optimalno vođenje procesa oksidacije bi bilo možno le ob poprejšnjem uvajanju procesnega računalnika in kontroli temperature in vsebnosti ogljika v talini med pihanjem, in sicer bi potrebovali meritve približno vsake 2—3 minute.

Lahko torej zaključimo, da sta tudi šarži A in B, ki sta vođeni razmeroma dobro v sedanjih pogojih dela, še vedno bili precej oddaljeni od optima (primerjaj točki A_2 in B_2 s točko B'_2 na sl. 10).

Šarža A bi lahko pri svoji vsebnosti ogljika vsebovala 14 % Cr, če pa pustimo vsebnost kroma v vložku ob strani, potem bi oksidacija lahko bila vođena tako, da bi proces potekal po vertikali $A_1A'_2$, torej brez izgube kroma v žlindro. Pihanje pri šarži B je bilo možno končati pri točki B'_2 namesto v B_2 in bi tako v žlindri na koncu pihanja imeli odgor le 1,3 % Cr, namesto 5,9 % Cr. Dodatno bi se bilo možno izogniti predolgemu pihanju, saj je šarža B končana pri nepotrebnem prenizkem ogljiku (točka B_3) 0,06 %, kar sicer manj velja tudi za šaržo A (0,07 % C — A_3). Tako bi torej z aplikacijo termodinamičnih zakonitosti in uvajanjem merilnih sond za merjenje temperature in vsebnosti ogljika med pihanjem lahko bistveno izboljšali sestavo vložka in vođenje oksidacije pri izdelavi nerjavnih jekel.

8. ZAKLJUČKI

1. Na osnovi določenih v termodinamičnih analizah običajnih predpostavk ter v novejši literaturi objavljenih podatkov o interakcijskih parametrih in ravnotežnih konstantah smo s pomočjo mikroročunalnika HP-97 in ustreznega programa, ki smo ga izdelali, izračunali termodinamična ravnotežna stanja v sistemu Fe-Cr-C-O v staljenem stanju v področju, ki je pomembno za proizvodnjo nerjavnih jekel;

2. opredeljen je kriterij za oceno pravilnosti sestave vložka;

3. opredeljen je kriterij za oceno uspešnosti žilavenja;

4. definiran je teoretično optimalni potek oksidacije, pri katerem je odgor kroma v žlindro minimalen pri dani končni vsebnosti ogljika v talini in zgornji dopustni temperaturi taline. Specificirani % C in zgornja dopustna temperatura morata biti dosežena istočasno ob koncu pihanja, kar zagotavlja minimalen odgor kroma v žlindro;

5. izdelani so ustrezni diagrami kot pripomoček za sestavljanje optimalnega vložka za oceno uspešnosti žilavenja in za vodenje oksidacije po krivulji termodinamično optimalne poti.

Literatura

1. N. Smajić: Termodinamična analiza sistema Fe-Cr-C-O, Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani, naloga št. 639/1978.
2. J. F. Elliot: 32nd Electric Furnace Conference, Pittsburgh 1974 — Proceedings vol. 32, 1975, str. 62—73.
3. E. C. Nelson: Transactions of Metallurgical Society AIME, št. 1, 1963, str. 181—191.
4. T. P. Floridis in J. Chipman: Transactions of Metallurgical Society AIME, 212, 1958, str. 549—553.
5. J. F. Elliot et al.: Thermochemistry for Steelmaking, Addison-Wesley, 1963.
6. J. K. Pargeter: Canadian Metallurgical Quarterly, 6, št. 1, 1967, str. 21—37.
7. G. K. Sigworth in J. F. Elliot: Metals Science, št. 9, 1974.
8. W. A. Fischer in D. Janke: Archiv für Eisenhüttenwesen, 47, št. 10, 1976, str. 589—594.
9. E. T. Turkdogan et al.: Journal of Iron and Steel Institute, 181, 1955, str. 123—128.
10. S. Banya in S. Matoba: Physical Chemistry of Process Metallurgy, 1. izd., G. R. St. Pierre, 1959.
11. T. Fuwa in J. Chipman: Transactions of Metallurgical Society AIME, 218, 1960, str. 887—891.
12. A. J. Poljakov et al.: Izvestija Akademii Nauk SSSR, Metallurgija i Teplivo, št. 1, 1961, str. 3—9.
13. H. Schenck in H. Hinze: Archiv für Eisenhüttenwesen, 32, št. 7, 1966, str. 545—550.
14. B. V. Linčevskij in A. M. Samarin: Dokladi AN SSSR, 89, 1953, str. 701—704.
15. E. T. Turkdogan: Journal of Iron and Steel Institute, 178, 1954, str. 278—283.
16. E. T. Turkdogan in R. J. Fruehan: Canadian Metallurgical Quarterly, 11, št. 2, 1972, str. 371—384.
17. Y. Nakamura et al.: Transactions of Iron and Steel Institute of Japan, 11, 1971, str. 456—459.
18. M. Schmidt: Stahl und Eisen, 88, 1968, str. 135—168.
19. J. S. Kulikov: Raskislenie Metallov, M. Metallurgija, 1975, str. 504.
20. J. Chipman: Journal of Iron and Steel Institute, 180 — II. del, junij 1955, str. 97—106.
21. Y. Nakamura et al.: International Conference Iron and Steel Tokyo, 1970, Proceedings, 1971, str. 455—459.
22. H. Schenck in E. Steinmetz: Stahl und Eisen-Sonderberichte, št. 7, 1968.
23. M. G. Froberg et al.: Archiv für Eisenhüttenwesen, 39, št. 8, 1968, str. 587—593.
24. F. D. Richardson in W. E. Dennis: Journal of Iron and Steel Institute, 175, 1953, str. 257—263.
25. T. Fuwa in J. Chipman: Transactions of Metallurgical Society AIME, 218, 1960, str. 887—891.
26. K. Goto et al.: Tetsu-to-Hagane Overseas, 3, 1963, str. 184—189.
27. H. Schenck et al.: Archiv für Eisenhüttenwesen, 39, št. 11, 1968, str. 803—808.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Grundproblem bei der Erzeugung von nichtrostendem Stahl ist die selektive Oxydation von Kohlenstoff in der Frischperiode. Im Artikel werden die thermodynamischen Gleichgewichtszustände im System Fe-Cr-C-O im erschmolzenen Zustand und zwar in Abhängigkeit von der Temperatur, der Badzusammensetzung, und von dem CO Partialdruck über dem Bad behandelt. Mit Hilfe der Rechenprogramme, welche einem Mikrorechner des Types HP-97 bzw. HP-41c zugeordnet sind, und aus der Fachliteratur ausgesuchten und zuverlässigsten Daten über die Gleichgewichtskonstanten und die Wechselwirkungskoeffiziente ist die Sauerstofflöslichkeit in Systemen Fe-O, Fe-C-O, Fe-Cr-O und Fe-Cr-C-O ausgerechnet worden. Die thermodynamischen Bedingungen — kritischer Kohlenstoffgehalt und thermodynamisch optimaler Frischverlauf sind bestimmt worden. Die selektive Kohlenstoffoxydation ist nur in dem Falle möglich, wenn der Kohlenstoffgehalt in der Schmelze grösser, als der kritische ist. Der kritische Kohlenstoffgehalt ist abhängig, von der Temperatur und der Zusammensetzung der Schmelze, und

vom CO Partialdruck über der Schmelze, und entspricht dem thermodynamischen Gleichgewicht zwischen Cr und C im System Fe-Cr-C-O. Thermodynamisch optimaler Frischverlauf verlangt eine exakte Kontrolle der Temperatur der Schmelze, und von CO Partialdruck über der Schmelze, und sichert auch, dass am Ende von Sauerstoffblasen, der gewünschte Kohlenstoffgehalt, und die obere zulässige Badtemperatur, bei kleinsten Chromverlusten in der Schlacke erreicht werden. Es sind zwei Diagramme ausgearbeitet worden nach welchen der Einsatz regelrecht zusammengesetzt werden kann, und nach dem Einschmelzen einen überkritischen Kohlenstoffgehalt haben muss. Die Diagramme dienen auch zur Überwachung der Frischperiode.

Wenn der Kohlenstoffgehalt im Bad nach dem Einschmelzen kleiner als der kritische ist, muss der Schmelzer vor dem Sauerstoffblasen die Badtemperatur erhöhen oder die Badzusammensetzung korrigieren. Die Anwendung von Prozessrechner für die Führung der Frischperiode wird empfohlen.

SUMMARY

The basic problem in manufacturing stainless steel is the selective oxidation of carbon during the oxidation process. The paper treats the thermodynamic equilibria in the molten Fe-Cr-C-O system depending on temperature, melt composition, and CO partial pressure above the melt. Using computer programs adjusted for the HP-97 and HP-41c microcomputers and taking the most reliable data on equilibrium constants and interaction coefficients from references, the oxygen solubilities were calculated for the Fe-O, Fe-C-O, Fe-Cr-O, and Fe-Cr-C-O systems. Thermodynamic criteria — critical carbon concentration, and thermodynamically optimal oxidation process are defined. Selective oxidation of carbon is possible only if carbon concentration in the melt is above the critical one. Critical carbon concentration depends on the composition and temperature of the melt, and on the CO partial pressure above the melt, and it corresponds to the thermodynamical

equilibrium between the Cr and C in the Fe-Cr-C-O system. Thermodynamically optimal oxidation process demands strict monitoring of the melt temperature and the CO partial pressure above the melt, and it ensures that simultaneously the desired carbon control and the upper allowed melt temperature will be achieved with the minimal chromium loss by the slag at the end of blowing. Diagrams were constructed which enable the correct composing the feed which must after melting down contain overcritical carbon concentration, and enable the estimation of the control of the oxidation process. If carbon concentration in the melt after melting down is subcritical the smelter must increase the melt temperature and correct the melt composition before the commencement of blowing. Application of the process computer is suggested for monitoring the oxidation process.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной вопрос при производстве нержавеющей стали представляет селективное окисление углерода в фазе фришевания. В статье рассмотрены термодинамические равновесные значения в системе Fe-Cr-C-O в расплавленном состоянии стали в зависимости от т-ры, состава расплава и парциального давления CO над расплавом. При помощи программы для вычислительной машины, приготовленной для микросчетчика типа HP-97 отн. HP-41 и взятых из литературы самых надежных данных о константах равновесия и взаимодействующих коэффициентов, вычислена растворимость кислорода в системах Fe-O, Fe-C-O, Fe-Cr-O и Fe-Cr-C-O.

Определены термодинамические критерии — критическая концентрация углерода и ход термодинамического оптимального процесса фришевания. Селективное окисление углерода возможно только в случае, если его концентрация в расплаве больше критической концентрации. Критическая концентрация углерода зависит от состава и от т-ры расплава, также от парциального

давления CO над расплавом, и отвечает термодинамическому равновесию между Cr и C в системе Fe-Cr-C-O.

Термодинамический оптимальный ход процесса фришевания выполняется под условием точного соблюдения контроля т-ры расплава и парциального давления CO над расплавом и заверяет, что к концу продувания будут одновременно получены: требуемое содержание углерода и верхняя допустимая т-ра расплава при минимальном переходе хрома в шлак. Выработаны две диаграммы, которые дают возможность для составления шихты и после расплавления можно твердо рассчитывать на надкритическую концентрацию углерода, а также и на оценку хода процесса фришевания. Если концентрация углерода в расплаве после расплавления шихты ниже критической, то сталевар должен до продувания расплава с кислородом повысить т-ру, или же поправить состав расплава. Для управления процессом фришевания рекомендуется применение вычислительной машины.