

TERMODINAMIKA PROCESA IZDELAVE NERJAVNIH JEKEL, LEGIRANIH S TITANOM

IMPROVEMENTS TO THE PRODUCTION PROCESS FOR STAINLESS STEEL ALLOYED WITH TITANIUM

Blaženko Koroušič¹, Jože Triplat², Boštjan Arh¹

¹ Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija

² SŽ ACRONI, d. o. o., Jesenice, Slovenija
blazenko.korouasic@imt.si

Prejem rokopisa – received: 2003-07-17; sprejem za objavo – accepted for publication: 2003-10-21

Opisane so procesne značilnosti izdelave nerjavnih jekel, legiranih z titanom, v 90-tonski EOP (elektroobločna peč) z VOD-napravo in ponovčno pečjo. Kontinuirno litje slabov (100 %) je v uporabi v ACRONI-Jesenice. Pri nekaterih nerjavnih jeklih je potrebno legiranje s titanom, ker le-ta izboljšuje mehanske in korozivne lastnosti. Nerjavna Ti-jekla so namenjena za ploščate izdelke in so zelo občutljiva za nekovinske vključke, ki so rezultat sekundarne obdelave taline. Oksidni vključki nastajajo pri dezoksidacijskih procesih in zaradi reoksidacije taline z žlindro ali zračno atmosfero. Značilna za izdelavo nerjavnih jekel, legiranih s titanom, je tvorba titanovih nitridov, ki pod določenimi pogoji nastajajo že v talini. Nekovinski vključki: oksidni, sulfidni in nitridni, so lahko vzrok za številne težave med litjem jekla na KL-napravi (mašenje izlivenikov), kar se v končni fazi pokaže v površinskih napakah pri končnem izdelku.

Ključne besede: termodinamika, oksidni, sulfidni, nitridni vključki, lastnosti žlindre, dezoksidacija, dušik, žveplo, sekundarna metalurgija, titanova nerjavna jekla

This study focuses on the production of Ti-alloyed continuously cast stainless steels in a 90 electric-arc furnace, VOD (vacuum oxygen decarburization) furnace and an LF ladle furnace. For some stainless-steel grades, titanium is required as an alloying element to improve the mechanical properties and the corrosion resistance. Ti-alloyed stainless-steel grades for flat products are very sensitive to the non-metallic inclusions, whose origin is in the secondary metallurgy treatment. Oxide inclusions originate mainly from deoxidation or from re-oxidation with the slag or the atmosphere. In the production of Ti-alloyed steels, titanium may, under certain conditions, form a large amount of Ti nitride, the most common being TiN formed in the liquid steel. All oxide, sulphide and nitride inclusions may provoke nozzle clogging during continuous casting and be more or less the reason for surface defects on the final products.

Keyword: thermodynamics, oxide, sulphide, nitride inclusions, slag properties, de-oxidation, denitrogenization, desulphurization, sulphur capacity, secondary metallurgy, Ti-alloyed steels

1 UVOD

V segmentu proizvodnega programa jeklarne ACRONI-Jesenice je izdelava nerjavnih jekel udeležena po obsegu celotne proizvodnje s približno 20-odstotnim deležem, po finančnem učinku pa je prav gotovo na prvem mestu. V bogati paleti nerjavnih jekel igrajo pomembno vlogo tista, stabilizirana s titanom.

Celotna proizvodnja nerjavnih Ti-jekel poteka po tehnološki liniji: 90-tonska EOP in vakuumaska metalurgija z VOD-napravo v kombinaciji s ponovčno pečjo (LF) z zaključnim litjem taline na kontinuirni napravi. Proizvodnja nerjavnih jekel, stabiliziranih s titanom, pokriva predvsem skupino jekel kvalitete **AISI321** in **AISI316Ti**, pri katerih se vsebnost titana ravna po znanem pravilu o stabilizaciji ogljika in dušika v talini med legiranjem s titanom. Praktične izkušnje pri izdelavi nerjavnih jekel kažejo, da sta proizvodnja tekočega jekla, predvsem pa vodenje procesov sekundarne metalurgije, ter litje na kontinuirni napravi povezana s številnimi težavami, ki se kažejo v motnjah pri litju ter kasnejših posledicah pri ugotavljanju in odpravi težav, ki so povezane s tvorbo površinskih napak na odlitih in predelanih slabih.

Ta članek opisuje procesne značilnosti izdelave nerjavnih jekel, stabiliziranih s titanom, v jeklarni ACRONI-Jesenice po tehnološki liniji EOP+VOD+LF+CC.

2 PROCES IZDELAVE NERJAVNIH JEKEL, STABILIZIRANIH S TITANOM PO POSTOPKU EOP+VOD+LF+CC

Elektroobločna peč z ekcentričnim prebodom se uporablja predvsem za taljenje starega železa in ferolegur ter za nastavitev pravilne kemijske sestave in temperature pred prebodom taline v VOD-ponovco.

Vakuumski postopek obdelave taline ima ključni pomen v celotni tehnološki liniji, saj z njim dosegamo osnovne cilje, nizke vsebnosti ogljika, dušika in žvepla. Zelo zahtevna naloga je znižanje vsebnosti dušika v fazi intenzivne oksidacije ogljika s kisikom v vakuumu. Posebna skrb se posveča kontroli kisika ter njegovi interakciji s titanom pri legiranju z FeTi ter obdelavi taline s CaSi pred pričetkom litja jekla.

Slika 1 prikazuje shematsko predstavitev poteka tehnološkega procesa ter povprečni čas izdelave nerjav-

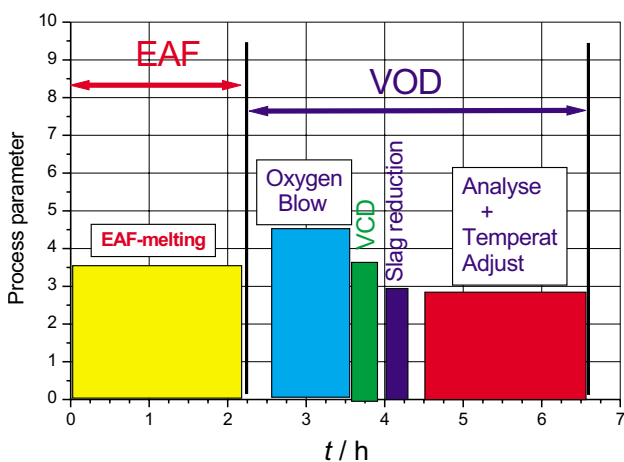
nih jekel v jeklarni ACRONI-Jesenice po opisani tehnološki shemi.

2.1 Ključne procesne faze med vakuumsko obdelavo jekel

Po končanem taljenju kovinskega vložka v EOP (povprečni časi so 80 min) in nastavitvi potrebnih parametrov taline (predpisana kemična sestava in temperatura taline) sledi prebod taline v pregreto VOD-ponovco in posnemanje pečne žlindre ob takojšnji priključitvi argona za mešanje taline. Kot je razvidno s **slike 1**, nadaljevanje procesa izdelave nerjavnih jekel poteka po vakuumskem postopku, pri katerem razlikujemo tri ključne procesne faze: oksidacijo s plinskim kisikom v vakuumu, prilagajanje kemične sestave taline ciljnim vrednostim ter nastavitev optimalne temperature taline pred začetkom litja na livni napravi. Dodatni proces pri izdelavi nerjavnih jekel, legiranih s titanom, je faza razduščenja, pri kateri se zniža vsebnost dušika za pribl. 30–45 $\mu\text{g/g}$ in je "know-how" podjetja ACRONI-Jesenice.

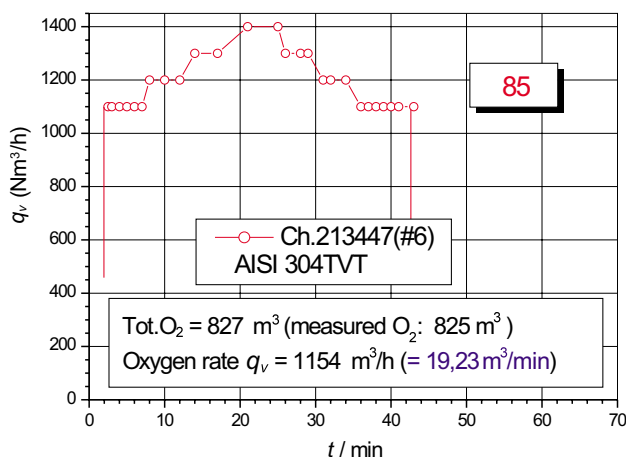
Odvisno od kemične sestave taline dodajamo poleg žilindrinih dodatkov (pribl. 5 kg/t CaO + 0,7 kg/t dolomita) še druge potrebne kovinske dodatke (FeCrHC, FeMnHC, FeMo ...), da pripeljemo kemično sestavo taline v optimalne meje, zato da po redukciji žlindre ni treba dodajati dragih legur, kot so FeCrLC, čisti Mn in druge.

Vakuumsko komoro pokrijemo in pričnemo evakuiranje. Ko v vakuumski komori dosežemo tlak okoli 300 mbar, se začne vpihovanje kisika na talino z vodnohlajenim kisikovim kopjem. Izbira profila in trajanje pihanja kisika v naslednjih 40–60 min sta izredno pomembna. Literatura o VOD-procesu navaja glavne tri faze pihanja kisika, medtem ko je realna praksa precej drugačna, kot je razvidno s **slike 2**. V prvi fazi pihanja



Slika 1: Shema poteka tehnološkega procesa ter povprečni čas izdelave nerjavnih jekel, stabiliziranih s titanom, v jeklarni ACRONI-Jesenice

Figure 1: Technological scheme for the production of stainless-steel grades alloyed with titanium at Steelworks ACRONI-Jesenice



Slika 2: Dinamika pihanja kisika za jeklo AISI316 v 90-tonsko VOD napravo

Figure 2: Blowing of oxygen for a melt of the steel grade AISI316 in the 90-ton VOD

kisika najprej oksidira silicij zaradi visoke afinitete do kisika, nato sledi oksidacija ogljika, ki se pokaže v tvorbi CO, ki ga vakuumske črpalke (večinoma delajo vodne črpalke do pribl. 0,2 % C in šele nato se vključujejo parni ejektorji) izčrpavajo in vzdržujejo tlak v komori okoli 100 mbar do 200 mbar. Proces oksidacije VOD je po navadi končan, ko talina doseže vsebnost ogljika okoli 0,09–0,11 % C (odvisno od ciljnega končnega ogljika), kar se pokaže v hitrem padcu tlaka do 40 mbar, padcu temperature dimnih plinov in pri kontroli procesa VOD s t. i. "PATMETROM" v naglem padcu vsebnosti CO v dimnih plinih.

V tej fazi izdelave jekla še ni mogoče dobiti podatkov o njegovi kemični sestavi, temperaturi taline ter vsebnosti kisika v njej, ker je vakuumsko komora še zaprta in vsako odpiranje in prekinitev procesa bi pomenilo podaljšanje izdelave in povzročilo velike toplotne izgube. Zato se v redni praksi takoj nadaljuje t. i. "**proces razogljčenja z lastnim kisikom – VCD-faza**". V tej tehnološki fazi preostali ogljik pod vakuumom reagira z lastnim kisikom v talini in žlindri in po 15 min do 25 min doseže ciljno vsebnost ogljika.

Šele po končani VCD-fazi se tlak v komori poveča in nato odpre pokrov na VOD-ponvi, nato sledi jemanje vzorca taline in merjenje temperature ter v zadnjih letih tudi merjenje aktivnega kisika.

Med pihanjem kisika v vakuumu poteka poleg ciljne oksidacije ogljika tudi oksidacija drugih elementov, in sicer predvsem Si, Mn in Cr. Del mangana tudi izpari, toda večina oksidiranih elementov se prenese v žlindro, kjer se vežejo v okside SiO₂, MnO, Cr₂O₃ itd. Večji del Cr₂O₃ v žlindri se mora nato reducirati, ker je oksidirana količina med 250 kg in 700 kg koristnega kovinskega vložka in bi ga morali v nadaljevanju procesa nadomestiti, in sicer ne več s cenejšim FeCrHC, temveč z dvakrat dražjim FeCrLC. Redukcija žlindre se izvde z dodatki FeSi + Al, po navadi v razmerju 5:1, pri čemer

se del silicija in manjši del aluminija legirata v talino. Vakuumska komora s ponovno se ponovno pokrije in pri nizkem tlaku se izvrši redukcija žlindre. Novo nastalo žlindro, v kateri ni več kovinskih oksidov, imenujemo **bela žlindra**, ki po končanem VOD-procesu na odlagalšču razpade, če niso izvedeni posebni ukrepi za njeno stabilizacijo.

Šele po končani redukciji in degazaciji, ki trajata tudi od 20 min do 25 min, odkrijemo ponev in, odvisno od analize vzorca in temperature taline, izvedemo dokončno korekturo kemične sestave. Če je treba uravnavamo tudi temperaturo taline (z dodatki t. i. "hladilnega vložka"), ker ima nastavitev livne temperature izreden pomen za kvaliteto odlitega slaba.

Tabela 1: Podatki o sestavi VOD-žlindre po njeni redukciji
Table 1: Chemical composition of the VOD slag after slag reduction

Šarža	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Bazič.
	%	%	%	CaO/SiO ₂
213445	22,1	9,6	59,8	2,7
213446	25,0	8,8	58,5	2,3
213447	21,1	10,6	59,0	2,8
213448	21,5	11,5	60,9	2,8
213457	18,3	9,2	61,9	3,4
213458	23,7	9,9	58,8	2,5
213459	21,1	10	60,9	2,9

2.2 Kontrola procesa redukcije žlindre

V fazi pihanja kisika v vakuumsko komoro poteka vrsta reakcij med elementi, raztopljenimi v jeklu, in plinskim kisikom. Oksidirajo se predvsem elementi C, Si, Mn, Cr, Al, Ti in tudi Fe. Zaradi različnega poteka posameznih reakcij (spreminja se sestava taline, sestava in količina žlindre, temperatura taline, tlak v komori) se med procesom spreminjajo tudi termodinamični in kinetični pogoji za posamezne reakcije. Zlasti je pomembno za ekonomijo VOD-procesa ugotavljanje razmer, ko se prične intenzivna oksidacija kroma, ker pri tem izredno hitro narašča temperatura taline zaradi eksotermne oksidacije kroma. Oksidirani krom se v obliki oksida Cr₂O₃ prenaša v žlindro in zaradi visokega tališča žlinder, bogatih s Cr₂O₃, začne naglo naraščati

tudi temperatura liquidusa in žlindra postaja trdna in nereaktivna.

Zelo zanesljiv kvantitativni model za oceno optimalnega izračuna reducenta pri redukciji žlindre po končani VCD-fazi sloni na predpostavki, da mora biti celotni kisik, vpihan med vakuumsko oksidacijo, razen kisika, porabljenega za oksidacijo C in Si (za tvorbo CO in SiO₂), kasneje reduciran z dodatki FeSi in Al⁶.

Faktor bazičnosti žlindre CaO/SiO₂ je pomemben parameter, ker omogoča oceno uspešnosti redukcije kroma iz žlindre.

Kontrola žvepla ima velik pomen za kvaliteto nerjavnih jekel, ker se pri visokih vsebnostih žvepla poslabšajo mehanske in korozijske lastnosti in, kar je zelo pomembno, opaža se kompleksen vpliv žvepla na količino nastalega delta-ferita.

Znano je, da ima največji vpliv na odpravo žvepla temperatura, sestava žlindre ter aktivnost kisika v talini.

Naše dosedanje raziskave so pokazale in tuji viri to potrjujejo, da ima na porazdelitev žvepla med žlindro in talino pri temperaturah okoli 1550–1600 °C zelo močan vpliv aktivnost CaO v žlindri. V **tabelah 1 in 2** je zbranih nekaj podatkov o analizi žlindre in oceni aktivnosti CaO s programom GPRO-SLAG² pri dejanskih temperaturah izdelave jekla.

$$C_s = \frac{K_s \cdot a_{CaO}}{F} = (\% S) \cdot \sqrt{\frac{P_{O_2}}{P_{S_2}}}$$

kjer C_s označuje kapaciteto žvepla, K_s konstanto ravnotežja za reakcijo CaO+1/2S₂(g) = CaS+1/2O₂(g), ki jo izračunamo po znani enačbi:

$$\lg K_s = \frac{-\Delta G^0}{19,144 \cdot T}$$

Termodinamične vrednosti za reakcijo odžveplanja: ΔG⁰ (J/mol) = 97067 – 6,87 · T

a_{CaO} = aktivnost oksida CaO v tekoči žlindri,

(% S) = masni delež vsebnosti žvepla v žlindri v (%)

P_{S₂} in P_{O₂} sta parcialna tlaka S₂(g) in O₂(g) v plinski fazi nad žlindro

F = faktor za prehod iz aktivnosti CaS v masnih deležih S (%).

Tabela 2: Parametri žlindre, izračunane vrednosti aktivnosti CaO v žlindrah a_O in kapacitete žvepla po končani redukciji žlindre
Table 2: Slag parameters and calculated values of CaO-activities a_O and sulphide capacities in the slag after slag reduction

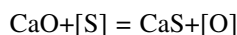
Šarža	(S)	% S		(% S)	a _O (izr.)	a _{CaO}	C _s	T/°C
	%	Pr. SR ²⁾	Po SR ¹⁾	% S	(μg/g)			
213445	0,280	0,018	0,002	140	1,1	0,529	0,0041	1575
213446	0,170	0,013	0,002	85	1,5	0,519	0,0035	1526
213447	0,210	0,011	0,001	210	1,2	0,524	0,0037	1542
213448	0,220	0,009	0,002	110	1,2	0,538	0,0042	1580
213457	0,190	0,009	0,002	95	2,6	0,540	0,0035	1528
213458	0,280	0,013	0,003	93	3,4	0,510	0,0045	1599
213459	0,180	0,009	0,001	180	1,5	0,540	0,0038	1551
Povprečje	0,228	0,012	0,002	130	1,8	0,529	0,0039	1557

1) Po SR = po redukciji žlindre, 2) Pr. SR = pred redukcijo žlindre

Oceno vsebnosti topnega kisika dobimo iz porazdelitve žvepla, in sicer po enačbi:

$$\lg(C_s) = \lg\left(\frac{(\%S)}{[\%S]} \cdot a_0\right) + \frac{935}{T} - 1,375$$

Bilanca žvepla pred redukcijo žlindre in po njej dodatno podkrepi ugotovitev, da so analizirane taline praktično dosegle ravnotežne razmere glede reakcije, ki kontrolira vsebnost žvepla, in sicer:



- 1) Pri redukciji žlindre se zniža vsebnost žvepla (**tabela 2**) od 0,012 % na 0,002 % S. Pri povprečni masi taline jekla 84350 kg se prenese v žlindro $84350 \cdot (0,012 - 0,002)/100 = 8,43$ kg žvepla.
- 2) Pri ocenjeni, povprečni masi žlindre 3525 kg in predpostavki, da žlindra vsebuje največ 0,0020 % S, je prirastek žvepla po redukciji $8,43 \cdot 100/3525 + 0,002 = 0,24$ % S (eksperimentalne vrednosti vsebnosti žvepla v žlindri so pokazale vrednost 0,22 % S).

2.3 Kontrola aluminija po redukciji žlindre

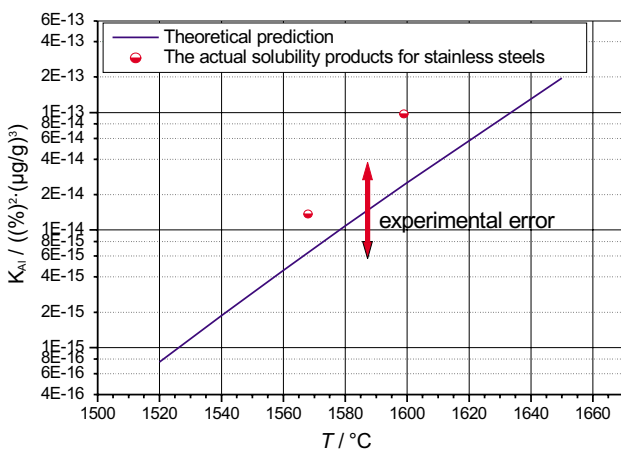
Za doseganje ciljne sestave nerjavnih jekel, stabiliziranih s titanom, je v končni analizi treba zagotoviti zadostno količino aluminija. Dodani aluminij za redukcijo žlindre zahteva relacija med aluminijem in kisikom:



Termodinamična analiza te reakcije pokaže, da lahko predpostavimo, da bo aktivnost Al_2O_3 v nekovinskih vključkih enaka 1, kar poenostavi izračun. Zato velja:

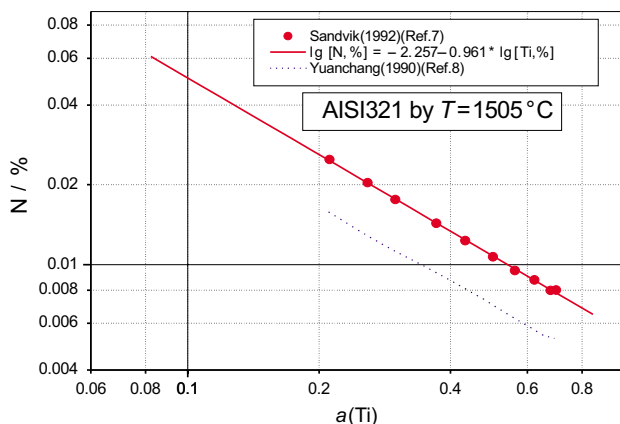
$$\lg([\% \text{Al}]^2 \cdot a_0^3) = -\frac{64000}{T} + 20,57$$

Pri znani temperaturi taline in aktivnosti kisika oziroma aluminija lahko izračunamo medsebojna razmerja, kot to nazorno prikazuje **slika 3**. Odvisnost topnostnega produkta dezoksidacije z aluminijem $[\% \text{Al}]^2 \cdot a_0^3$ od



Slika 3: Odvisnost med produktom topnosti $K_{Al} = [\% \text{Al}]^2 \cdot a_0^3$ in temperaturo za industrijske razmere VOD-postopka

Figure 3: Relationship product of solubility $K_{Al} = [\% \text{Al}]^2 \cdot a_0^3$, versus temperature for industrial conditions of the VOD process



Slika 4: Primerjava eksperimentalno ugotovljenih vrednosti vsebnosti Ti in N v izračunanih iz produkta topnosti za AISI 321 pri 1505 °C

Figure 4: Comparison of the actual Ti and N contents with those calculated from the solubility product for AISI 321 at 1505 °C^{7,8}

temperature z vrisanimi podatki iz merjenja aktivnosti kisika za šarži 213445 in 213458 se v mejah točnosti analize lepo ujema s teoretično pričakovanimi vrednostmi.

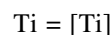
2.4 Kontrola titana

Titan ima veliko afiniteto do kisika, dušika in ogljika. V tekoče jeklo se titan dodaja v obliki predlegure Fe+Ti(+Al). Pri temperaturah nad 1500 °C takoj reagira in tvori oksidne, nitridne ali karbonitridne vključke. Stabilizacija nerjavnih jekel s titanom je vezava ogljika s titanom, in količina titana se ravna po znani enačbi:

$$(\text{masni delež Ti, \%}) = 6 \cdot (\% \text{ C} + \% \text{ N})$$

Skupna vsota obeh elementov: % C + % N naj ne presega 300 μg/g, ker pri povečanju vsebnosti enega od elementov pride (odvisno je od temperature taline) do prekoračitve meje topnosti. **Slika 4** prikazuje primer topnostnega produkta titana in kisika $[\% \text{Ti}] \cdot [\% \text{Ni}]$ za jeklo AISI 321 pri temperaturi 1505 °C^{7,8}.

Osnovno reakcijo za raztapljanje titana v tekočem jeklu zapišemo v obliki:



Gibbsova prosta energija raztapljanja v temperaturnem območju od 1450 °C do 1650 °C je definirana z enačbo:

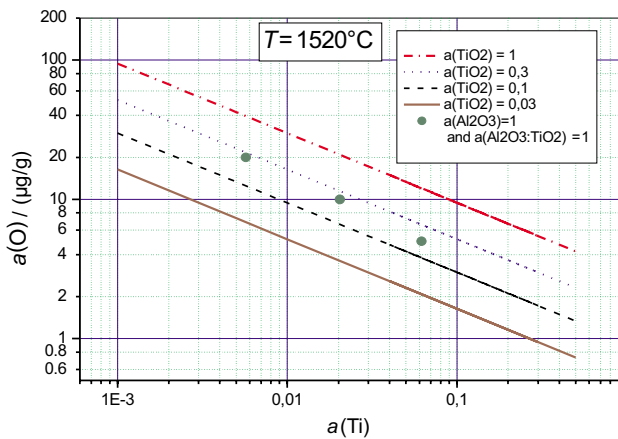
$$\Delta G^0 \text{ (J/mol)} = -54900 - 44,83 \cdot T$$

V industrijskih razmerah doseže izkoristek kovinskega Ti pri streljanju FeTi-žice vrednosti med 50 % in 70 % (odvisno od vsebnosti Al v talini). Raztopljeni titan reagira najprej z kisikom po reakciji:



za katero lahko zapišemo naslednjo enačbo za prosto energijo:

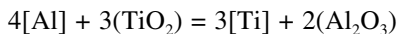
$$\Delta G^0 = -647014 + 225,87 \cdot T(\text{K}) \text{ (J/mol)}$$



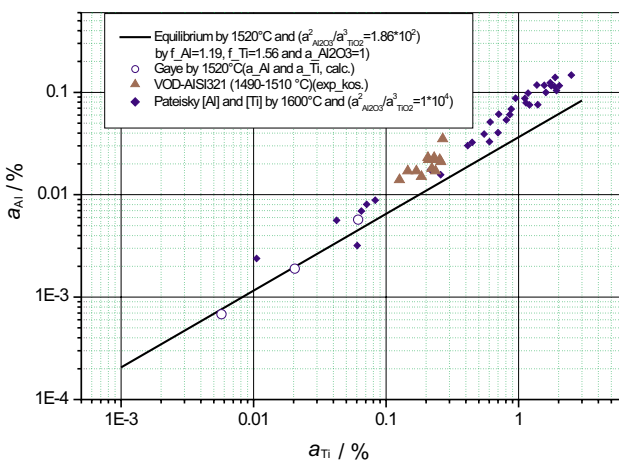
Slika 5: Izračunana korelacija med aktivnostjo kisika pri 1520 °C in aktivnostjo titana pri različnih razmerah zaradi aktivnosti žlindre
Figure 5: Calculated correlation between the oxygen activity at 1520 °C and the titanium content for different conditions of slag activity

ki daje pri 1600 °C vrednost konstante $K_{Ti,O} = 1,79 \cdot 10^6$ oziroma produkt topnosti $a_{Ti} \cdot a_{O}^2 = 5,59 \cdot 10^{-7}$. Pri padajoči temperaturi dezoksidacijska moč titana narašča, kar je razvidno s **slike 5** za $T = 1520$ °C in različne aktivnosti TiO_2 v žlindri.

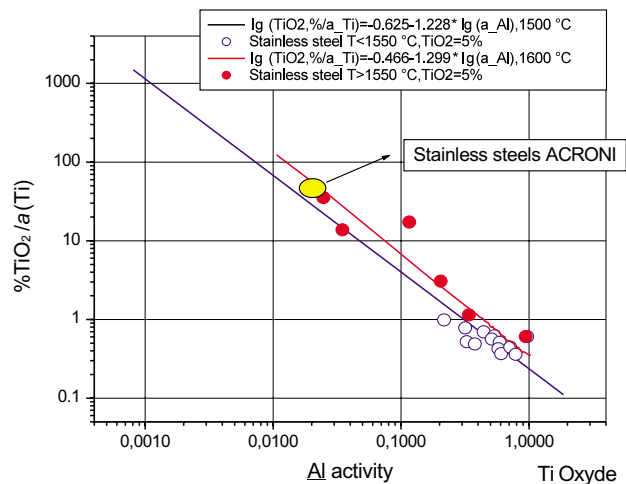
Na koncu se vzpostavi še ravnotežje med drugimi partnerji v talini. Predvsem je pomembna reakcija med Ti ter oksidi SiO_2 in Al_2O_3 . Vključki Al_2O_3 po dodatku Al v talino reagirajo z raztopljenim titanom po reakciji:



Slika 6 prikazuje lastno izpeljavo odvisnosti med vsebnostjo Ti in Al v primerjavi z ugotovitvami drugih avtorjev. Gaye H. in sodelavci⁹ so izračunali termodinamične odnose v sistemu Fe-Ti-Al-O, in ki omogočajo oceno korelacije med razmerjem $(\% TiO_2)/[a_{Ti}]$ in aktivnostjo Al v talini pri temperaturah med 1500 °C in 1600 °C⁹.



Slika 6: Primerjava dejanskih vsebnosti Ti in Al s teoretično izračunanimi vsebnostmi pri različnih razmerah zaradi aktivnosti žlindre
Figure 6: Comparison of the actual Ti and Al contents with the calculated values for different conditions of slag activity



Slika 7: Izračunane odvisnosti porazdelitve titana in dejansko ugotovljene vrednosti za ponovno obdelavo nerjavnih jekel v vakuumu

Figure 7: Computed Ti equilibrium distribution ratio and a comparison with the industrial data for vacuum ladle treatments of stainless steels

Na **sliki 7** je prikazano razmerje med titanom in aluminijem za talino nerjavnih jekel z vrisanim povprečjem za industrijsko analizirane šarže pri izdelavi jekel AISI321 ter AISI 316Ti.

3 SKLEPI

Tehnologija izdelave nerjavnih jekel, legiranih s titanom, zahteva zelo natančno kontrolo vseh faz tehnoloških procesov, pri čemer je izrednega pomena kontrola dušika, kisika, žvepla ter aluminija in optimalna sestava rafinacijske žlindre. Analizirana je tehnologija izdelave dveh jekel vrste AIS321 in AISI316Ti v jeklarni ACRONI. Rezultate raziskav podajamo v naslednji obliki:

Izdelava nerjavnih jekel, legiranih s titanom, poteka po tehnološki liniji: 90-tonska EOP in vakuumsko oksidacija s kisikom v VOD-napravi, rafinacija in legiranja v VOD-LF-napravi ter litje v slabe na kontinuirni livni napravi.

V fazi vakuumске oksidacije se izvaja razduščenje jekla, ki zagotavlja vsebnosti dušika pod kritično mejo produkta topnosti $[Ti] \cdot [N]$.

Legiranje titana z FeTi se izvaja v skladu z empirično ugotovljenim merilom $[Ti] = 6 \cdot (C+N)$, pri čemer je pomembna še korelacija z vsebnostjo Al v talini pred pričetkom legiranja ter kemična sestava žlindre.

Mikroanaliza nekovinskih vključkov je pokazala, da tekoče jeklo pred začetkom litja vsebuje vključke, ki so rezultat rafinacije in legiranja jekla. Drobni nitridi tipa TiN nastajajo že v talini. Količina in porazdelitev nekovinskih vključkov v talini sta direktno povezana s težavami litja (mašenje izlivenikov) ter z nastankom površinskih napak na odlitih slabih ter s tvorbo razpok med predelavo jekla.

4 LITERATURA

- ¹ Koroušić, B.: Fundamental thermodynamic aspects of the CaO-Al₂O₃-SiO₂ system, *Steel research* 62 (1991) 7, 285-288
- ² Koroušić, B.: Use of a Mathematical Model GPRO to Describe Complex Gas – Metal Reactions, *Kovine, zlitine, tehnologije*, 28 (1994) 4, 609-611
- ³ Koroušić, B., A. Rosina: Contributions to the computer predictions of the homogeneous and heterogeneous equilibrium compositions for the gas atmospheres, *Veitsch – Radex Rundschau* (1994) 1-2, 523-530
- ⁴ Görnerup, M., O. Wijk: Sulphide capacities of the CaO-Al₂O₃-SiO₂ slags at 1550, 1600 and 1650 °C, *Scandinavian Journal of metallurgy*, 25 (1996) 103-107
- ⁵ Duffy J. A., M. D. Ingram: *Journal Amer. Chem. Soc.*, 93 (1971) 6448-54
- ⁶ Koroušić, B., J. Triplat, A. Rozman: Evaluation of the role slag chemistry and chemical interactions in EAF for stainless steel production, *Sixth International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts*, Stockholm, Sweden-Helsinki, Finland, 12.–17. junij 2000
- ⁷ Rajaniemi, M.: Thermodynamics of titanium nitride formation in stainless steel and its effects on clogging during casting, *Scaninject VI*, 6th International conference on refining processes, Lulea, Sweden, 2.–4. junij 1992, 157-174
- ⁸ Yuanchang, G., W. Changzhen: Interaction coefficients in Fe-C-Ti-I (i = Si, Cr, Al, Ni) systems, *Metall. Trans. B*, 21B (1990) 543-547
- ⁹ Gaye, H., J. Lehmann, P. Rocabois, F. Ruby-Meyer: Slag modelling and industrial applications, *Proc. of the Sixth Inter. Conf. on Molten Slags, Fluxes and Salts*, Stockholm, Sweden-Helsinki, Finland 12.–17. junij 2000
- ¹⁰ Pateisky, G., H. Biele, H. J. Fleischer: The reactions of titanium and silicon with CaO-Al₂O₃-CaF₂ slags in the ESR Process, *Reports of the International Symposium on Special Electrometallurgy*, Kijev, junij 1972, 110-121