

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОМПЛЕКСНОГО РАСКИСЛЕНИЯ СТАЛИ
МАРКИ 20ГЛ С АЛЮМИНИЕМ И КАЛЬЦИЕМ****Турсунов Нодиржон Каюмжонович**

канд. техн. наук, и.о. доцент,
доц. кафедры «Материаловедения и машиностроение»,
Ташкентский государственный транспортный университет,
Республика Узбекистан, Ташкент
E-mail: u_nadir@mail.ru

Уразбаев Талгат Тилеубаевич

ст. преподаватель кафедры «Материаловедения и машиностроение»,
Ташкентский государственный транспортный университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: talgat_1988.26@mail.ru

Турсунов Тохир Муратжонович

ст. преподаватель кафедры «Материаловедения и машиностроение»
Ташкентский государственный транспортный университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: t.tursunov87@gmail.com

**METHOD OF CALCULATION OF COMPLEX DEOXIDATION
OF STEEL GRADE 20GL WITH ALUMINUM AND CALCIUM****Nodirjon Tursunov**

Doctor of Philosophy (PhD)
of the Department «Materials Science and Mechanical Engineering» of TSTU,
Uzbekistan, Tashkent

Talgat Urazbaev

Senior lecturer
of the Department «Materials Science and Mechanical Engineering» of TSTU,
Uzbekistan, Tashkent

Tokhir Tursunov

Senior lecturer
of the Department «Materials Science and Mechanical Engineering» of TSTU,
Uzbekistan, Tashkent

АННОТАЦИЯ

Данная статья посвящается методике расчета совместного комплексного раскисления стали марки 20ГЛ. В качестве исследуемого металла выбрана сталь марки 20ГЛ. Показано, что при раскислении стали только алюминием продуктами являются оксиды алюминия (Al_2O_3), которые всплывают медленно из металла в шлак, следовательно, загрязненность металла неметаллическими включениями выше. Снижение загрязненности металла неметаллическими включениями связана, в первую очередь, с применением комплексного раскисления металла с алюминием и кальцием, приводящие к возникновению большого числа быстро удаляемых из металла жидких включений $CaO \cdot Al_2O_3$ и $3CaO \cdot Al_2O_3$. Улучшение эксплуатационной надежности и повышения механических свойств отливок, изготовленных из стали марки 20ГЛ, на сегодняшний день является актуальной задачей, что ведет к снижению затрат на их изготовление. Такая комплексная задача может решаться разными методами. Одним из них является совершенствование технологии раскисления стали.

ABSTRACT

This article is devoted to the method of calculating the joint complex deoxidation of steel grade 20GL. Steel grade 20GL was chosen as the metal under study. It is shown that when deoxidizing steel with only aluminum, the product is aluminum oxide Al_2O_3 , which floats slowly from the metal into the slag, therefore, the contamination of the metal with

non-metallic inclusions is higher. The decrease in contamination of the metal from non-metallic inclusions is primarily due to the use of complex deoxidation of the metal with aluminum and calcium, leading to the formation of a large number of liquid inclusions $CaO \cdot Al_2O_3$ and $3CaO \cdot Al_2O_3$ which are quickly removed from the metal. Improving the operational reliability and increasing the mechanical properties of castings made of 20GL steel is an urgent task today, which leads to a reduction in the cost of their manufacture. Such a complex problem can be solved in different ways. One of them is the improvement of steel deoxidation technology.

Ключевые слова: сталь 20ГЛ; комплексное раскисление; кислород; неметаллические включения; модификатор; кальций; алюминий.

Keywords: steel 20GL; complex deoxidation; oxygen; non-metallic inclusions; modifier; calcium; aluminum.

Введение

Для раскисления стали 20ГЛ, возможно, применение таких комплексных раскислителей, как силико-кальций, силикобарий, алюминий и кальций, а так же возможно применение сложных многокомпонентных лигатур, содержащих все указанные элементы. Для расчета комплексного раскисления стали марки

20ГЛ, использовалась методика, ранее описанная в литературах [1-8,15-17].

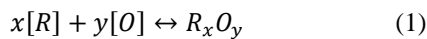
Метод. Термодинамические расчеты комплексного раскисления алюминием и кальцием. Проведен подробный термодинамический расчет вариантов раскисления стали марки 20ГЛ. Средний химический состав металла, принятый для исследования и термодинамического анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Химический состав стали марки 20ГЛ, % (масс.)

C	Mn	Si	S	P	Cr	Cu	Ni	Al	V
0,220	1,25	0,365	0,020	0,025	0,096	0,085	0,097	0,027	0,021

Реакцию раскисления стали можно представить в следующем виде [1-4]



$$K_p(T) = \frac{a_{R_xO_y}}{a_R^x \cdot a_O^y} \quad (2)$$

Растворимость кислорода в стали 20ГЛ ее раскислении по реакции (1) рассчитана из выражения константы равновесия.

$$K_p = \frac{(a_{R_xO_y})}{[a_R]^x \cdot [a_O]^y} = \frac{(a_{R_xO_y})}{[R]^x \cdot f_R^x \cdot [O]^y \cdot f_O^y} \quad (3)$$

При комплексном раскислении металлического расплава, активность оксидов, образующихся в результате процесса раскисления с разными раскислителями, меньше единицы, т.е. при одном и том же содержании элемента раскислителя можно получить металл с более низкой концентрацией кислорода [1]. При комплексном раскислении продукты раскисления (растворы оксидов) – плавятся при более низких температурах, чем чистые оксиды, это дает возможность к их коагуляции и более полному удалению из расплава стали.

В случае присутствия в расплаве металла нескольких элементов раскислителей для каждого можно записать реакции взаимодействия с кислородом [1].

$$n \cdot [R^I] + m \cdot [O] = R_n^I O_m \quad (4)$$

$$k \cdot [R^{II}] + p \cdot [O] = R_k^{II} O_p \quad (5)$$

В таком случае активности продуктов реакции будут меньше единицы, и за счет этого при одном и том же содержании элемента раскислителя можно получить низкую концентрацию кислорода в расплаве, чем при отдельном введении каждого раскислителя в металл [2].

Константы равновесия для реакции (4) и (5) выражаются через следующие уравнения

$$K_{R^I} = \frac{a_{R_n^I O_m}}{a_{R^I}^n \cdot a_O^m} = \frac{a_{R_n^I O_m}}{f_{R^I}^n \cdot [R^I]^n \cdot f_O^m \cdot [O]^m} \quad (6)$$

$$K_{R^{II}} = \frac{a_{R_k^{II} O_p}}{a_{R^{II}}^k \cdot a_O^p} = \frac{a_{R_k^{II} O_p}}{f_{R^{II}}^k \cdot [R^{II}]^k \cdot f_O^p \cdot [O]^p} \quad (7)$$

где $a_{R_n^I O_m}$, $a_{R_k^{II} O_p}$ – активности продуктов реакции;

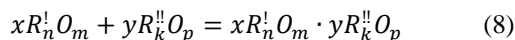
$[R^I]$, $[R^{II}]$, $[O]$ – массовые содержания элементов раскислителей и кислорода, соответственно;

f_{R^I} , $f_{R^{II}}$, f_O – коэффициенты активности по Генри элементов раскислителей и кислорода, соответственно;

n , m , k , p – стехиометрические коэффициенты.

При совместном раскислении расплава двумя элементами R^I и R^{II} преимущественное участие в реакции принимает более сильный R^I , однако если в

процессе получают сложные оксидные соединения $xR_n^I O_m \cdot yR_k^II O_p$, то это способствует участию в реакции более слабого раскислителя R^{II} . Реакцию образования сложного оксидного соединения $xR_n^I O_m \cdot yR_k^II O_p$ можно записать в следующем виде.



Константа равновесия для реакции (8) имеет следующий вид

$$K_{R^I R^{II}} = \frac{a_{xR_n^I O_m \cdot yR_k^II O_p}}{a_{R_n^I O_m}^x \cdot a_{R_k^II O_p}^y} \quad (9)$$

Если образующийся комплексный оксид $xR_n^I O_m \cdot yR_k^II O_p$ является единственным, то его активность $a_{xR_n^I O_m \cdot yR_k^II O_p}$ принимается равной единице, и уравнение (9) принимает вид.

$$K_{R^I R^{II}} = \frac{a_{xR_n^I O_m \cdot yR_k^II O_p}}{a_{R_n^I O_m}^x \cdot a_{R_k^II O_p}^y} = \frac{1}{a_{R_n^I O_m}^x \cdot a_{R_k^II O_p}^y} \quad (10)$$

Из прологарифмированных уравнений для констант равновесия (6) и (7) для реакций (4), (5) можно определить зависимость активности кислорода в расплаве от концентрации каждого раскислителя.

$$\lg a_{R_k^II O_p} = \frac{pmx}{mx+py} \cdot \left(\frac{1}{p} \lg K_{R^{II}} + \frac{k}{p} \lg(f_{R^{II}} \cdot [R^{II}]) \right) - \frac{1}{mx} \lg K_{R^I R^{II}} - \frac{1}{m} \lg K_{R^I} - \frac{n}{m} \lg(f_{R^I} \cdot [R^I]) \quad (16)$$

$$\lg a_{R_n^I O_m} = \frac{mpy}{mx+py} \cdot \left(\frac{1}{m} \lg K_{R^I} + \frac{n}{m} \lg(f_{R^I} \cdot [R^I]) \right) - \frac{1}{py} \lg K_{R^I R^{II}} - \frac{k}{p} \lg(f_{R^{II}} \cdot [R^{II}]) - \frac{1}{p} \lg K_{R^{II}} \quad (17)$$

Замена активностей продуктов реакций в уравнениях (11) и (12) через выражения (16) и (17) позволяет рассчитать концентрацию кислорода в стали равновесную с элементами раскислителями.

$$\lg([O])_{R^I} = -\frac{x}{py+mx} \lg K_{R^I} - \frac{xn}{py+mx} \lg(f_{R^I} \cdot [R^I]) - \frac{1}{py+mx} K_{R^I R^{II}} - \frac{yk}{py+mx} \lg(f_{R^{II}} \cdot [R^{II}]) - \frac{y}{py+mx} \lg K_{R^{II}} - \lg f_O \quad (18)$$

$$\lg([O])_{R^{II}} = -\frac{y}{py+mx} \lg K_{R^{II}} - \frac{yk}{py+mx} \lg(f_{R^{II}} \cdot [R^{II}]) - \frac{1}{py+mx} K_{R^I R^{II}} - \frac{x}{py+mx} \lg K_{R^I} - \frac{xn}{py+mx} \lg(f_{R^I} \cdot [R^I]) - \lg f_O \quad (19)$$

$$\lg([O])_{R^I R^{II}} = -\frac{1}{py+mx} K_{R^I R^{II}} - \frac{x}{py+mx} \lg K_{R^I} - \frac{y}{py+mx} \lg K_{R^{II}} - \frac{xn}{py+mx} \lg(f_{R^I} \cdot [R^I]) - \frac{yk}{py+mx} \lg(f_{R^{II}} \cdot [R^{II}]) - \lg f_O \quad (20)$$

Авторы работы [4] предполагают следующий механизм взаимодействия кальция с примесями в металле. При вводе в жидкий расплав кальций испаряется - пары кальция, проходя через толщу металла, взаимодействуют с кислородом и восстанавливают глинозём, образовавшийся в металле при предварительном раскислении алюминием, образуя комплексные оксиды типах $CaO \cdot y Al_2 O_3$, температура плавления которых, в зависимости от состава может быть ниже температуры плавления стали. Рассмотрим два случая: в первом случае продуктом совместного раскисления кальцием и алюминием является соединение $CaO \cdot Al_2 O_3$ (вариант 1), во втором - $3CaO \cdot Al_2 O_3$, (вариант 2). Реакции образования

$$\lg(f_O \cdot [O])_{R^I} = \frac{1}{m} \cdot (\lg a_{R_n^I O_m} - \lg K_{R^I} - n \cdot \lg(f_{R^I} \cdot [R^I])) \quad (11)$$

$$\lg(f_O \cdot [O])_{R^{II}} = \frac{1}{p} \cdot (\lg a_{R_k^II O_p} - \lg K_{R^{II}} - k \cdot \lg(f_{R^{II}} \cdot [R^{II}])) \quad (12)$$

В случае совместного комплексного раскисления обоими раскислителями активности кислорода определяемыми уравнениями (11) и (12) равны.

$$\frac{1}{m} \cdot (\lg a_{R_n^I O_m} - \lg K_{R^I} - n \cdot \lg(f_{R^I} \cdot [R^I])) = \frac{1}{p} \cdot (\lg a_{R_k^II O_p} - \lg K_{R^{II}} - k \cdot \lg(f_{R^{II}} \cdot [R^{II}])) \quad (13)$$

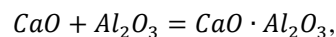
Уравнение (10) логарифмируется и определяются $\lg a_{R_n^I O_m}$ и $\lg a_{R_k^II O_p}$

$$\lg a_{R_n^I O_m} = -\frac{1}{x} \cdot (\lg K_{R^I R^{II}} + y \cdot \lg a_{R_k^II O_p}) \quad (14)$$

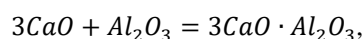
$$\lg a_{R_k^II O_p} = -\frac{1}{y} \cdot (\lg K_{R^I R^{II}} + x \cdot \lg a_{R_n^I O_m}) \quad (15)$$

Для нахождения зависимости активностей оксидов $R_k^II O_p$ и $R_n^I O_m$ от концентраций элементов раскислителей в уравнение (13) подставляются уравнения (14) и (15) соответственно.

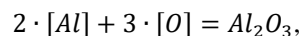
и выражения для констант равновесия сложных алюминатов кальция приведены ниже:



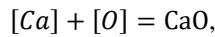
где
$$K_{CaO \cdot Al_2 O_3} = \frac{a_{CaO \cdot Al_2 O_3}}{a_{CaO} \cdot a_{Al_2 O_3}} \quad (21)$$



где
$$K_{3CaO \cdot Al_2 O_3} = \frac{a_{3CaO \cdot Al_2 O_3}}{a_{CaO}^3 \cdot a_{Al_2 O_3}} \quad (22)$$



где
$$K_{Al_2 O_3} = \frac{a_{Al_2 O_3}}{a_{Al}^2 \cdot a_O^3} = \frac{a_{R_n^I O_m}}{f_{Al}^2 [Al]^2 \cdot f_O^3 [O]^3} \quad (23)$$



где
$$K_{CaO} = \frac{a_{CaO}}{a_{Ca} \cdot a_O} = \frac{a_{R_k^{II}O_p}}{f_{Ca} \cdot [Ca] \cdot f_O \cdot [O]} \quad (24)$$

На основании данных [1-4] рассчитаны значения приведенных выше констант равновесия реакций образования сложных алуминатов кальция из оксидов при температуре 1873 К $K_{CaO \cdot Al_2O_3} = 6,262$ и $K_{3CaO \cdot Al_2O_3} = 1,57$. Согласно рекомендованным термодинамическим данным [3] принимаем выражение при 1873 К $\lg K_{Al_2O_3} = 13,7742$ и $\lg K_{CaO} = 10,481$.

$$\lg [O]_{CaO \cdot Al_2O_3} = -\frac{1}{4} \lg K_{CaO \cdot Al_2O_3} - \frac{1}{4} \lg K_{CaO} - \frac{1}{4} \lg K_{Al_2O_3} - \frac{1}{4} \lg (f_{Ca} \cdot [Ca]) - \frac{1}{2} \lg (f_{Al} \cdot [Al]) - \lg f_O \quad (25)$$

$$\lg [O]_{3CaO \cdot Al_2O_3} = -\frac{1}{6} \lg K_{3CaO \cdot Al_2O_3} - \frac{1}{2} \lg K_{CaO} - \frac{1}{6} \lg K_{Al_2O_3} - \frac{1}{2} \lg (f_{Ca} \cdot [Ca]) - \frac{1}{3} \lg (f_{Al} \cdot [Al]) - \lg f_O \quad (26)$$

$$\lg [O]_{Al_2O_3} = -\frac{1}{3} \lg K_{Al_2O_3} - \frac{2}{3} \lg (f_{Al} \cdot [Al]) - \lg f_O \quad (27)$$

Коэффициент активности компонента $a - f_a$ рассчитан по следующей формуле.

$$\lg f_a = [a] \cdot e_a^a + [b] \cdot e_a^b + [c] \cdot e_a^c + \dots \quad (28)$$

где a, b, c – компоненты в сплаве.

e_i^j – параметр взаимодействия первого порядка.

Концентрацию кислорода в расчетах определяем из уравнения (29) для сильного раскислителя, принимая активность продукта реакции и коэффициенты активности кислорода и раскислителя равными единице.

При активностях соединений $CaO \cdot Al_2O_3$ и $3CaO \cdot Al_2O_3$ равных единице и используя уравнения (20), (21) и (23) для реакции образования $CaO \cdot Al_2O_3$ и уравнения (20), (22) и (23) для реакции образования $3CaO \cdot Al_2O_3$. а так же соответствующие значения констант реакций образования данных соединений, уравнение (17) для расчета концентрации кислорода при комплексном раскислении алюминием и кальцием можно записать в виде:

$$\lg [O] = \frac{1}{m} (-\lg K_{R'} - n \lg [R']) \quad (29)$$

В паре алюминий, кальция более сильным раскислителем является алюминий, поэтому концентрацию кислорода для алюминия рассчитываем из выражения для константы равновесия реакции (23) по уравнению (30).

$$\lg [O] = \frac{1}{3} (-13,7742 - 2 \lg [Al]) \quad (30)$$

Таблица 2.

Параметры взаимодействия первого порядка e_i^j в железе при 1873 К [1-14]

$\begin{matrix} j \\ i \end{matrix}$	C	Mn	Si	Al	S	P	Cr	Ni	Cu	Ca	O
Al	0,091	-0,013	0,056	0,045	0,035	0,033	0,0034	-0,013	0,017	-0,047	-1,98
Ca	-0,34	0,0015	-0,096	-0,072	-0,283	-0,215	0,024	-0,002	-0,002	-0,002	-154
O	-0,45	-0,021	0,131	-1,17	-0,133	0,07	-0,04	0,006	-0,013	-61,6	-0,17

Определим, по формуле (28) коэффициент активности алюминия

$$\lg f_{Al} = 0,045 \cdot [Al] + 0,091 \cdot 0,224 - 0,013 \cdot 1,25 + 0,056 \cdot 0,365 + 0,033 \cdot 0,025 + 0,035 \cdot 0,02 + 0,0034 \cdot 0,097 - 0,013 \cdot 0,097 + 0,017 \cdot 0,085 - 0,047 \cdot [Ca] - 1,98 \cdot [O] = 0,043 \cdot [Al] - 0,047 \cdot [Ca] - 0,0146 - 1,98 \cdot [O] \quad (31)$$

Определим коэффициент активности кальция

$$\lg f_{Ca} = -0,072 \cdot [Al] - 0,34 \cdot 0,224 + 0,0015 \cdot 1,25 - 0,096 \cdot 0,365 - 0,215 \cdot 0,025 - 0,283 \cdot 0,02 + 0,024 \cdot 0,097 - 0,002 \cdot 0,097 - 0,002 \cdot 0,085 - 0,002 \cdot [Ca] - 154 \cdot [O] = -0,072 \cdot [Al] - 0,002 \cdot [Ca] - 0,117 - 154 \cdot [O] \quad (32)$$

Определим коэффициент активности кислорода

$$\lg f_O = -1,17 \cdot [Al] - 0,45 \cdot 0,224 - 0,021 \cdot 1,25 + 0,066 \cdot 0,365 + 0,07 \cdot 0,025 + 0,133 \cdot 0,02 - 0,04 \cdot 0,097 + 0,006 \cdot 0,097 - 0,013 \cdot 0,085 - 61,6 \cdot [Ca] - 0,17 \cdot [O] = -1,17 \cdot [Al] - 61,6 \cdot [Ca] - 0,089 - 0,17 \cdot [O] \quad (33)$$

Из полученных уравнений (31), (32), (33) подставляя в (25), а в место концентрации кислорода в левой

части уравнения подставляя в (30), получим уравнение (34) после ряда преобразований:

$$[O]_{CaO \cdot Al_2O_3} = 10^{-\frac{1}{4}(29,75 - 4,662 \cdot [Al] + 2 \cdot \lg[Al] - 246,6 \cdot [Ca] + \lg[Ca] - 158,64 \cdot 10^{\frac{1}{3}(-13,7742 - 2 \lg[Al])})} \quad (34)$$

Из полученных уравнений (31), (32), (33) подставляя в (26), а в место концентрации кислорода в

левой части уравнения подставляя в (30), получим уравнение (35) после ряда преобразований:

$$[O]_{3CaO \cdot Al_2O_3} = 10^{-\frac{1}{6}(45,43 - 7,146 \cdot [Al] + 2 \cdot \lg[Al] - 369,98 \cdot [Ca] + 3 \cdot \lg[Ca] - 466,98 \cdot 10^{\frac{1}{3}(-13,7742 - 2 \lg[Al])})} \quad (35)$$

Получение уравнение (31) и (33) подставляем на (27), а в место концентрации кислорода в левой части

уравнения подставляя в (30), получим уравнение (36) после ряда преобразований:

$$\lg[O]_{Al_2O_3} = 10^{-\frac{1}{3}(13,3 - 3,424 \cdot [Al] + 2 \cdot \lg[Al] - 4,47 \cdot 10^{\frac{1}{3}(-13,7742 - 2 \lg[Al])})} \quad (36)$$

По полученным уравнениям (34) и (35), рассчитываем равновесную концентрацию кислорода при комплексном раскислении алюминием и кальцием

расплава при 1873К при условии образования сложных алюминатов кальция $CaO \cdot Al_2O_3$ и $3CaO \cdot Al_2O_3$. Результаты данных расчетов приведены на рисунке 1.

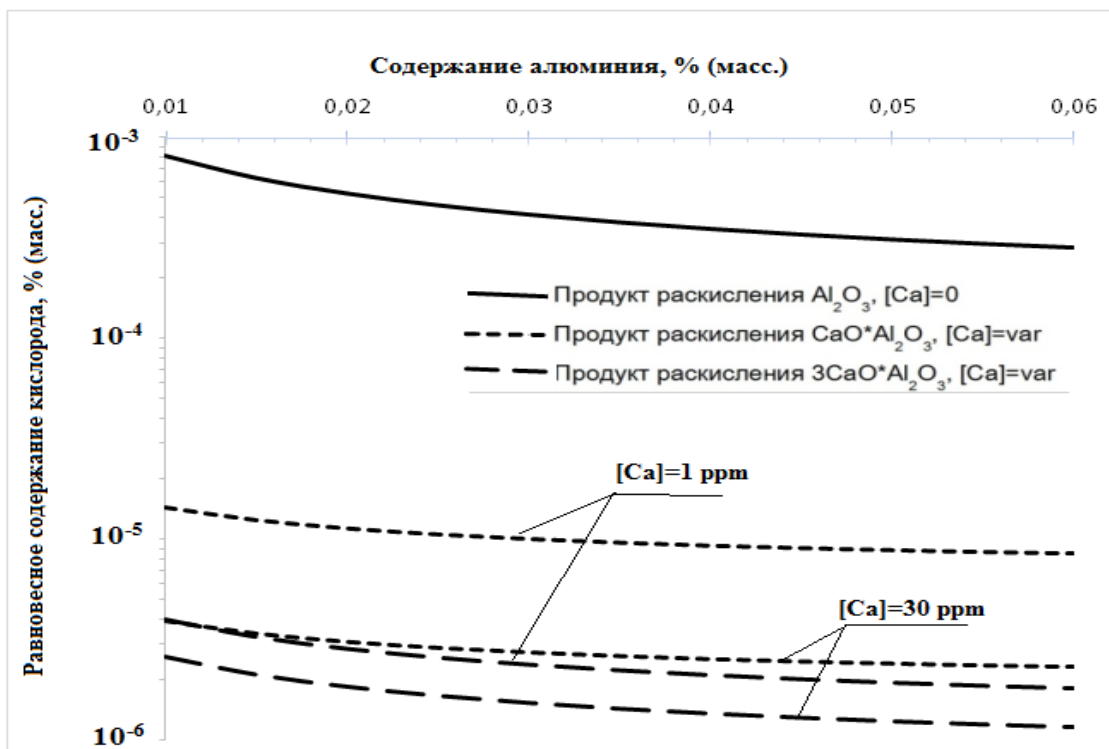


Рисунок 1. Зависимости растворимости кислорода в расплаве состава стали марки 20ГЛ при температуре 1873 К от концентрации кальцием и алюминием

Выводы

Проведенные термодинамические расчеты процессов раскисления показали возможность достижения низких концентрации кислорода в стали марки 20ГЛ, до уровня менее $1,5 \cdot 10^{-6}\%$ при концентрациях алюминия (0,03%) и кальция (30 ppm), что обеспечивает высокий уровень чистоты стали по неметаллическим включениям при использовании совместного раскисления кальцием и алюминием. При температуре 1600 °С продукты реакции кальция и алюминия в жидком состоянии лучше удаляются в шлак.

В случае комплексного раскисления стали алюминием и кальцием содержание кислорода и активность кислорода ниже, чем при раскислении одним алюминием.

На основании полученных результатов можно заключить, что данная схема расчета, может быть основанием для расчета растворимости кислорода для сталей марки 20ГЛ в варианте комплексного раскисления с двумя элементами раскислителя.

Список литературы:

1. Демин К.Ю. Исследование влияния микролегирования и модифицирования на металлургическое качество стали и служебные свойства железнодорожных колес. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. 2012.
2. В.Я. Дашевский, Н.Н. Макарова, К.В. Григорович, В.И. Кашин Комплексное раскисление железо-никелевых расплавов // *Металлы*, 2002, №1 стр. 18-25.
3. Григорович К.В., Демин К.Ю., Арсенкин А.М. и др. Перспективы применения барийсодержащих лигатур для раскисления и модифицирования транспортного металла. // *Металлы*. 2011. № 5. с. 146-156.
4. Григорович А.К. Гарбер. Анализ процессов комплексного раскисления расплавов углеродистых сталей. *Металлы*. 2011. № 5, с. 171-180.
5. Турсунов Н.К., Семин А.Е., Саноккулов Э.А. Исследование процессов дефосфорации и десульфурации при выплавке стали 20ГЛ в индукционной тигельной печи с дальнейшим обработкой в ковше с использованием РЗМ // *Черные металлы*. - 2017. №1.- с. 33-40.
6. С.Н. Падерин, Г.В. Серов, Е.В. Шильников, А.В. Алпатов // *Электрохимический контроль и расчеты сталеплавильных процессов*, Москва 2011 г. С 283.
7. Температурная зависимость десульфурации металла в сталеплавильных агрегатах. Г.И. Котельников, А.Е. Семин, Р.С. Кулиш, С.А. Мотренко, С.Ю. Сапунов // *Электрометаллургия*. № 8. 2010. С. 12-15.
8. *Steelmaking Data Sourcebook*, Gordon&Breach Science Publ, N.Y.-Tokyo, 1988.325p.
9. Снитко Ю.П., Суровой Ю.Т., Лякишев Н.П. Соотношение между параметрами взаимодействия и атомными характеристиками компонентов // *Докл. АН СССР*. 1983. Т. 268. № 5.С.1154-1156.
10. Katsnelson A.M., Dashevskiy V.Ya., Kashin V.I. Carbon Activity in Fe-, Co-, Ni- and Mn- Based Melts at 1873 K// *Steel Research*. 1993 V. 64. P.197-202.
11. Sigwoith G.K., Elliott J.F. The Thermodynamics of Liquid Dilute Iron Alloys // *Metall Science*. 1974. V. 8. N 9. P. 298-308.
12. *The Recommended Values for the Reaction in Steelmaking* 2nd Ed., Ed. by The 19 Committee (Ironmaking), Japan Soc. Promotion of Sci., Tokyo. 1984. 254 p.
13. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. М.: *Металлургия*, 1987, 272 с.
14. Турсунов Н.К., & Тоиров О.Т. (2021). Снижение дефектности рам по трещинам за счёт применения конструкции литниковой системы.
15. Toirov O., & Tursunov N. (2021, June). Development of production technology of rolling stock cast parts. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 264, p. 05013). EDP Sciences.
16. Уразбаев Т.Т., & Зайнитдинов О.И. (2020). Повышение механических свойств боковой рамы двухосной тележки грузовых вагонов. *Вестник транспорта Поволжья*, (1), 27-34.
17. Djanikulov A.T., Mamayev S.I., & Kasimov O.T. (2021, April). Modeling of rotational oscillations in a diesel locomotive wheel-motor block. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1889, No. 2, p. 022017). IOP Publishing.
18. Kasimov O.T., Djanikulov A.T., & Mamayev S.I. (2021, November). Modeling the bending of the tire surface by pads during braking. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2402, No. 1, p. 070030). AIP Publishing LLC.