

УДК 669.184

Б.М. Бойченко, Л.С. Молчанов, Е.В. Синегин, К.Г. Низяев, А.Н. Стоянов

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СОДЕРЖАНИЕ КИСЛОРОДА В СТАЛИ

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме снижения расхода дорогостоящих ферросплавов для раскисления и легирования стали путём точного прогнозирования содержания кислорода в металле перед обработкой. В ней представлена математическая модель, полученная на основании статистической обработки результатов лабораторного эксперимента.

Ключевые слова: активность кислорода, сталь, раскисление, легирование

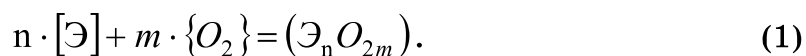
Постановка задачи исследования

Технологические операции производства стали непосредственно связаны с физико-химическими процессами окисления примесей в железо-углеродистом расплаве. При этом окончание процесса обезуглероживания связано с установлением равновесия между кислородом в расплаве и другими примесями. На данный момент для оценки содержания кислорода в готовой стали применяется уравнение Вечера-Гамельтона. Учитывая, что в нем участвует только углерод, то данное выражение может давать некорректный результат при оценке содержания кислорода в легированных сталях. Таким образом, задачей исследования является уточнение уравнения Вечера-Гамельтона, с целью адаптации его к легированным расплавам.

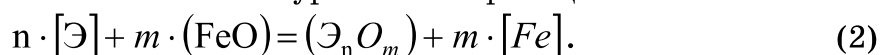
Анализ последних исследований и публикаций

Операции производства стали связаны с протеканием окислительных физико-химических превращений. При этом существует несколько механизмов поступления кислорода в объём металлической ванны:

а) продувка металлической ванны газообразным кислородом, при этом формируются первичная и вторичная реакционные зоны. В пределах первичной реакционной зоны протекает процесс тотального горения примесей по реакции:



Основным продуктом окисления примесей в первичной реакционной зоне является FeO. При попадании продуктов окисления примесей из первичной реакционной зоны в объём расплава образуется вторичная реакционная зона, в которой окисление примесей протекает за счет взаимодействия с FeO в соответствии с уравнением реакции:



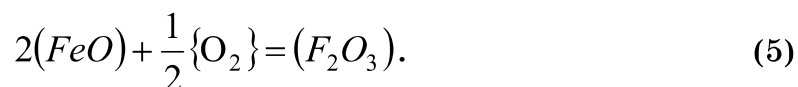
Кроме того вследствие введения в ванну газообразного кислорода наблюдается значительное переокисление металла, которое примерно в 2,2 раза выше равновесного содержания кислорода [1].

б) введение кислорода в металлическую ванну в виде оксидов (железородные материалы, прокатная окалина и т.д.). В ряде случаев при проведении окислительной плавки без возможности вдувания газообразного кислорода применяются материалы содержащие оксиды железа. Так механизм перехода кислорода из твердого материала в расплав осуществляется за счет переокисления шлака и дальнейшего взаимодействия металла со шлаком. Описать данный процесс можно системой уравнений протекающих одновременно химических реакций:



При такой форме ввода кислорода в расплав фактическая окисленность металла превышает равновесную в 1,2 раза [2].

в) окисление примесей за счет кислорода газовой фазы, который участвует в окислении. В ряде случаев при отсутствии прямого поступления кислорода в металлический расплав протекает стадийная миграция его через шлаковую фазу. Первоначально кислород газовой фазы взаимодействует со шлаком переокисляя оксиды железа по уравнению:



Далее перемещение кислорода осуществляется за счёт внедрения частиц переокисленных оксидов железа в расплав



и затем по реакции (4).

В процессе удаления примесей в металле устанавливается равновесие между кислородом и другими компонентами. Так для продувочных процессов производства стали установление равновесия между кислородом и другими компонентами расплава возможно только после предварительного раскисления. Равновесное содержание кислорода в металле (при установившемся равновесии) определяется, прежде всего, реакцией



Равновесное содержание кислорода в металле определяется исходя из активности углерода и парциального давления $\{\text{CO}\}$ по формуле

$$[\text{O}]^* = \frac{p_{\text{CO}}}{a_{[\text{C}]}f_{[\text{O}]}} \quad (8)$$

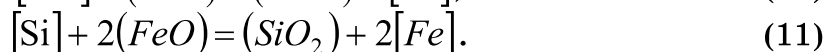
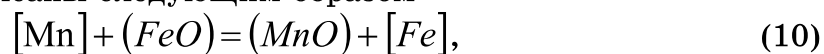
где p_{CO} – парциальное давление $\{\text{CO}\}$; $a_{[\text{C}]}$ – активность кислорода в металле; $f_{[\text{O}]}$ – коэффициент активности кислорода в металле.

Известно [3], что при невысоком содержании углерода и температуре металла около 1600°C концентрация кислорода в металле может быть определена согласно уравнению Вачера-Гамильтона

$$m \equiv [\text{C}] \cdot [\text{O}] = 0,0025. \quad (9)$$

Величина m мало изменяется с температурой, что обусловлено небольшим тепловым эффектом реакции (7). Однако авторами [4] отмечается, что увеличение содержания элементов-раскислителей может приводить к изменению равновесного содержания кислорода в металле.

Марганец и кремний обычно окисляются на поверхности контакта металла со шлаком по двухстадийным реакциям, суммарные уравнения которых могут быть записаны следующим образом



При этом существенно искажается расчетное по уравнения Вечера-Гамельтона расчетное значение равновесного содержания кислорода в расплаве.

Цели и задачи исследования

Задачами исследования является разработка методики и проведение эксперимента по изучению влияния содержания углерода, кремния и марганца в стали на равновесное содержание кислорода. На основании полученных данных производится уточнение модели Вечера-Гамельтона. Математическая модель, разработанная на основании результатов эксперимента, позволит определять равновесное содержание кислорода в расплаве с высоким содержанием примесей и может быть использована для осуществления рационального процесса раскисления и легирования.

Основные материалы исследования

Экспериментальную часть исследования осуществляли по средству плавления в печи Таммана образцов Fe-C сплава с различным содержанием углерода, кремния и марганца и определении в них после кристаллизации равновесное содержание кислорода, углерода, марганца и кремния. Определение равновесного содержания кислорода в металлических образцах проводили в соответствии с ГОСТ 17745-90, определение углерода, кремния и марганца – ГОСТ 28473-90. Эксперимент производили в печи сопротивления Таммана, по средству плавления металлического лома в алуновом тигле с последующим введением ферросилиция марки ФС-65 и графита (для достижения требуемого содержания кремния и марганца) и затем выдерживали в печи в течение 20 минут для усреднения химического состава расплава по объёму тигля. По окончании данного процесса тигель извлекали из печи, охлаждали и полученную отливку подвергали анализу для определения содержания углерода, кремния, марганца и равновесного кислорода. Полученные при эксперименте данные представлены в таблице 1.

В процессе изучения влияния растворённых в стали элементов раскислителей на равновесное содержание кислорода было проведено сопоставление данных полученных экспериментально с результатами расчета по уравнению Вечера-Гамельтона (представлена на рис. 1). Как видно из предварительного анализа экспериментальных данных фактическое содержание кислорода в металле существенно отличается от равновесного.

Таблиця 1

Экспериментальные данные

[O], ppm	[C], %	[Mn], %	[Si], %	[S], %	[P], %
240	0,19	0,5	0,05	0,021	0,09
192	0,17	0,47	0,05	0,03	0,08
191	0,18	0,47	0,07	0,029	0,01
222	0,19	0,5	0,05	0,025	0,012
232	0,16	0,48	0,05	0,025	0,08
184	0,2	0,51	0,06	0,025	0,09
192	0,19	0,5	0,07	0,023	0,013
174	0,18	0,49	0,05	0,033	0,018
170	0,17	0,49	0,06	0,03	0,016
152	0,18	0,47	0,05	0,029	0,015
200	0,19	0,49	0,07	0,03	0,014
169	0,19	0,5	0,05	0,024	0,013
172	0,17	0,51	0,06	0,024	0,012
224	0,14	0,49	0,04	0,025	0,01
165	0,17	0,51	0,06	0,026	0,013
150	0,18	0,51	0,06	0,029	0,015
214	0,15	0,52	0,04	0,029	0,011
219	0,18	0,52	0,06	0,028	0,09
169	0,18	0,61	0,05	0,029	0,016

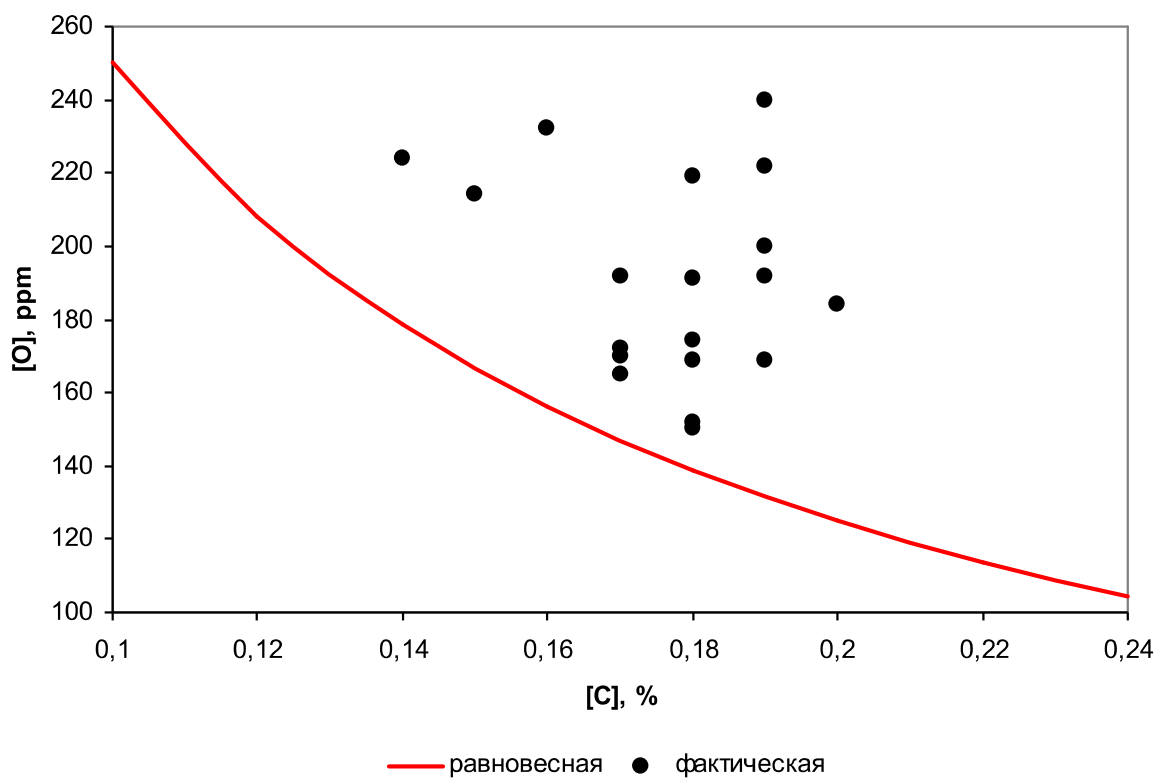


Рисунок 1 – Сравнение равновесной и фактической концентрации кислорода в стали

Для определения влияния химического состава стали на содержание растворённого в ней кислорода был выполнен регрессионный анализ, результаты которого приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Регрессионная статистика экспериментального массива

Множественный R	R ²	Нормированный R ²	Стандартная ошибка	Наблюдения
0,9874	0,9750	0,9147	0,00057	19

Таблица 3

Оценка значимости полученных коэффициентов регрессии

Параметр	[Mn]	[Si]
Коэффициенты регрессии	0,005142	0,01409
Стандартная ошибка	0,001491	0,0134
t-статистика	3,449054	1,051535
P-Значение	0,003064	0,307731

Таким образом, полученная модель имеет вид

$$[C] \cdot [O] = 0,01409[Si] + 0,005142[Mn] \quad (12)$$

Выводы и перспективы дальнейших исследований

1. Установлено влияние содержания наиболее распространённых легирующих компонентов стали на содержание кислорода в металле.

2. Предложена математическая модель для описания содержания кислорода в металле, на основании которой может быть разработана технология экономного легирования стали. Математическая модель может быть усовершенствована в случае производства качественных сталей легированных прочими элементами, имеющими высокое сродство к кислороду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баптизманский В.И. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса / В.И. Баптизманский, В.Б. Охотский. – Киев-Донецк: Вища школа, 1981. – 184 с.
2. Лифшиц С.И. Мартеновское производство стали / С.И. Лифшиц. – Харьков-Москва: Государственное научно-техническое издательство литературы по чёрной и цветной металлургии, 1953. – 212 с.
3. Теорія металургійних процесів [Підручник] / В.Б. Охотський, О.Л. Костьолов, В.К. Сімонов [та ін.]. – К.: ІЗМН, 1997. – 512 с.
4. Меджибожский И.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов: [Учеб.пособие] / И.Я. Меджибожский. – К.-Донецк: Вища школа, 1979. – 280 с.