

# Физическая химия и физика металлургических систем

УДК 669.017.3 + 661.8'06 + 544.015.3 + 544.015.4

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕАКЦИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАРГАНЦА, КРЕМНИЯ, МАГНИЯ, КАЛЬЦИЯ, АЛЮМИНИЯ С КИСЛОРОДОМ В БОРСОДЕРЖАЮЩЕМ РАСПЛАВЕ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Г.Г. Михайлов<sup>1</sup>, Л.А. Макроец<sup>1</sup>, Л.А. Смирнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск;

<sup>2</sup> Уральский институт металлов, г. Екатеринбург

Выполнен термодинамический анализ процессов взаимодействия бора, растворенного в жидкой стали, с компонентами металлического расплава: кислородом, алюминием, кальцием, магнием и углеродом. В работе, опираясь на результаты расчетов линий ликвидус для двойных диаграмм и поверхностей ликвидус для тройных оксидных диаграмм состояний с  $B_2O_3$ , разработана методика построения поверхностей растворимости компонентов в жидкой борсодержащей стали. Установлено, что марганец и кремний не способны блокировать окисление вводимого в сталь бора. В этом случае в основном бор при взаимодействии с кислородом, марганцем и кремнием образует жидкие оксидные (шлаковые) неметаллические включения. Кальций также не является эффективным защитником. Алюминий и магнийсодержащие лигатуры способны предотвратить окисление введенного в сталь бора и таким образом позволить стабилизировать технологию получения сталей, модифицированных бором. При тысячных долях процентов алюминия и магния исключается возможность взаимодействия растворенного в стали бора с оставшимся в стали кислородом. Для того чтобы сохранить в стали достаточное количество «эффективного бора», необходимо также разработать и эффективную систему деазотации стали за счет введения нитридообразующих элементов и вакуумирования.

*Ключевые слова:* термодинамика, раскисление, рафинирование, бор.

В работе [1] описано влияние микролегирования бором на механические свойства стали. Бор позволяет снизить анизотропию механических свойств, уменьшить размеры первичного литого зерна, увеличить прокаливаемость стали и повысить ее прочность при существенном снижении расхода легирующих компонентов. Максимальный эффект влияния бора достигается при содержании так называемого эффективного бора порядка 0,002–0,008 мас. %. Для того чтобы осознанно подходить к процессу легирования стали бором и его сохранению, необходимо рассмотреть, при каких содержаниях рафинирующих добавок, таких как алюминий, кальций, магний, кремний, марганец появляется возможность предохранить бор от взаимодействия с кислородом.

В работе [2] выполнены необходимые термодинамические расчеты оксидных борсодержащих двойных и тройных оксидных диаграмм состояний, установлены константы равновесия для реакций раскисления стали и процессов перехода оксидных компонентов из твердого в жидкое состояние (шлак). При проведении этих расчетов были установлены энергетические параметры теории субрегулярных растворов, интерпретирующей ак-

тивности компонентов оксидных расплавов, подобраны значения параметров взаимодействия для компонентов в металлических расплавах. Это позволило создать систему определения оксидных фаз, сопряженных с областью существования металлических расплавов, и путем термодинамических расчетов установить строение поверхностей растворимости компонентов жидкой стали.

Равновесие бора с кислородом в присутствии углерода и других легирующих и раскисляющих компонентов описывается химическими реакциями, приведенными в табл. 1.

На рис. 1 приведена поверхность растворимости компонентов в жидком металле (ПРКМ) систем Fe–B–O (а) и Fe–B–C–O (б). Из рис. 1, а следует, что по раскислительной способности бор приближается к кремнию и несколько превосходит раскислительные способности марганца и ванадия. Металл может находиться только в равновесии с оксидным расплавом (в области I на основе оксида железа, в области II – на основе оксида бора). В присутствии углерода (рис. 1, б) возможно образование газовой фазы на основе CO.

Активности компонентов металлического расплава рассчитывали по методу Вагнера с ис-

Таблица 1

Температурные зависимости констант равновесия

№	Реакция	$\lg K$
1	$(\text{FeO}) = [\text{Fe}] + [\text{O}]$	$-6320/T + 4,734$
2	$(\text{B}_2\text{O}_3) = 2[\text{B}] + 3[\text{O}]$	$-44\,005/T + 15,615$
3	$(\text{SiO}_2) = [\text{Si}] + 2[\text{O}]$	$-30\,225/T + 11,56$
4	$(\text{MgO}) = [\text{Mg}] + [\text{O}]$	$-22\,457/T + 6,54$
5	$(\text{CaO}) = [\text{Ca}] + [\text{O}]$	$-31\,480/T + 12,55$
6	$(\text{MnO}) = [\text{Mn}] + [\text{O}]$	$-12\,175/T + 5,45$
7	$(\text{Al}_2\text{O}_3) = 2[\text{Al}] + 3[\text{O}]$	$-58\,320/T + 18,02$
8	$ \text{FeO} _{\text{тв.р}} = [\text{Fe}] + [\text{O}]$	$-8069/T + 5,8$
9	$ \text{MgO} _{\text{тв.р}} = [\text{Mg}] + [\text{O}]$	$-26\,500/T + 7,85$
10	$ \text{CaO} _{\text{тв.р}} = [\text{Ca}] + [\text{O}]$	$-34\,103/T + 13,46$
11	$ \text{MnO} _{\text{тв.р}} = [\text{Mn}] + [\text{O}]$	$-15\,017/T + 6,77$
12	$ \text{SiO}_2  = [\text{Si}] + 2[\text{O}]$	$-31\,000/T + 12,00$
13	$ \text{FeAl}_2\text{O}_4  = [\text{Fe}] + 2[\text{Al}] + 4[\text{O}]$	$-74\,580/T + 26,37$
14	$ \text{Al}_2\text{O}_3  = 2[\text{Al}] + 3[\text{O}]$	$-64\,000/T + 20,48$
15	$\{\text{CO}\} = [\text{C}] + [\text{O}]$	$-1168/T - 2,07$
16	$\{\text{CO}_2\} = [\text{C}] + 2[\text{O}]$	$-9616/T + 2,51$
17	$\{\text{Mg}\} = [\text{Mg}]$	$6670/T - 6,48$
18	$\{\text{Ca}\} = [\text{Ca}]$	$-1912/T - 2,69$

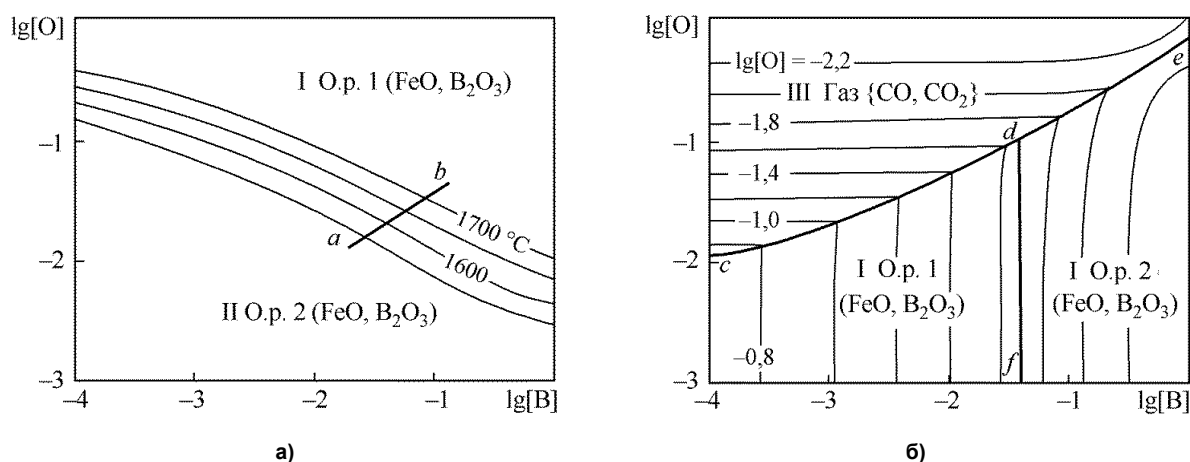


Рис. 1. ПКМ системы Fe–B–O–C,  $T = 1600\text{ °C}$ ,  $P_{\text{общ}} = 1\text{ атм}$ : а)  $[\text{C}] = 0$ ; б)  $[\text{C}] = 0,1\text{ мас. \%}$

пользованием параметров взаимодействия элементов, растворенных в жидком железе [1]. Активности компонентов оксидных расплавов рассчитывали по теории субрегулярных ионных растворов, энергетические параметры данной теории приведены в работе [1].

Анализ диаграммы состояния тройной системы FeO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> [2] и литературных данных позволил заключить, что в равновесии с метал-

лическим расплавом могут находиться кремнезем и два оксидных расплава (FeO, SiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). В присутствии углерода возможно образование газовой фазы (CO, CO<sub>2</sub>). Поэтому возможные фазовые равновесия при раскислении железа бором описывали химическими реакциями, приведенными в табл. 1. При расчетах учитывали условия нормировки состава оксидного расплава I и II:

$$x_{(Fe^{2+})}^I + x_{(Si^{4+})}^I + x_{(B^{3+})}^I = 1;$$

$$x_{(Fe^{2+})}^{II} + x_{(Si^{4+})}^{II} + x_{(B^{3+})}^{II} = 1;$$

состава жидкого металла:

$$[Fe] + [B] + [Si] + [O] + [C] = 100 \%$$

и газовой фазы:

$$P_{общ} = P_{\{CO\}} + P_{\{CO_2\}}.$$

Методика расчета составов равновесных фаз показана в монографии [3] на примере анализа равновесия жидкого металла с двумя оксидными фазами. При выполнении расчетов принималось, что оксидные расплавы представляют собой субрегулярные ионные растворы (подобранные энергетические параметры приведены в работе [2]).

На рис. 2 представлены результаты расчета координат ПРКМ системы Fe–B–Si–O–C в виде проекции на плоскость составов при 1600 °C (а – [C] = 0; б – [C] = 0,1 мас. %). В областях I и II заданы составы жидкого металла, равновесного с оксидными расплавами; в области III – с кремнеземом, в области IV – с газовой фазой. Следует отметить на рис. 2 наличие двух зон составов металла, равновесного с оксидными расплавами. В области I оксидный расплав обогащен катионами железа Fe<sup>2+</sup> (FeO), в области II содержится значительное количество катионов бора B<sup>3+</sup> (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) или катионов кремния Si<sup>4+</sup> (SiO<sub>2</sub>), как это следует из

рис. 2. Из рис. 2, а видно, что кремнезем может образоваться при концентрациях кремния более 0,01 мас. % и бора менее 0,04 мас. %, выше линии bc. Излом линии bd показывает изменение состава оксидного расплава с высокого содержания x<sub>(Si<sup>4+</sup>)</sub>

на высокое содержание x<sub>(B<sup>3+</sup>)</sub>, что соответствует диаграмме состояния FeO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>.

Углерод оказывает влияние на процессы комплексного раскисления железа бором и кремнием. Следует учитывать влияние давления, т. е. рассчитывать и строить изотермические и изосоставные сечения ПРКМ необходимо при заданном внешнем давлении. Такое сечение при 1600 °C и концентрации углерода 0,1 мас. % представлено на рис. 2, б. Для области IV практически характерно постоянное содержание кислорода в металле, которое определяется концентрацией углерода (lg [O] ~ -1,66 или [O] = 0,022). Из рис. 2, б видно, что углерод оказывает влияние на строение ПРКМ системы Fe–B–Si–O. В присутствии углерода кремний и бор могут быть раскислителями только при концентрациях больше десятой доли процента.

В табл. 2 приведены составы оксидных расплавов, отвечающих изокислородной линии lg[O] = -2,2 ([O] ≈ 0,063 мас. %). Видно, что при изменении концентрации кремния от 0,0001 до 0,01 мас. % оксидный расплав 2 состоит в основном из катионов B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

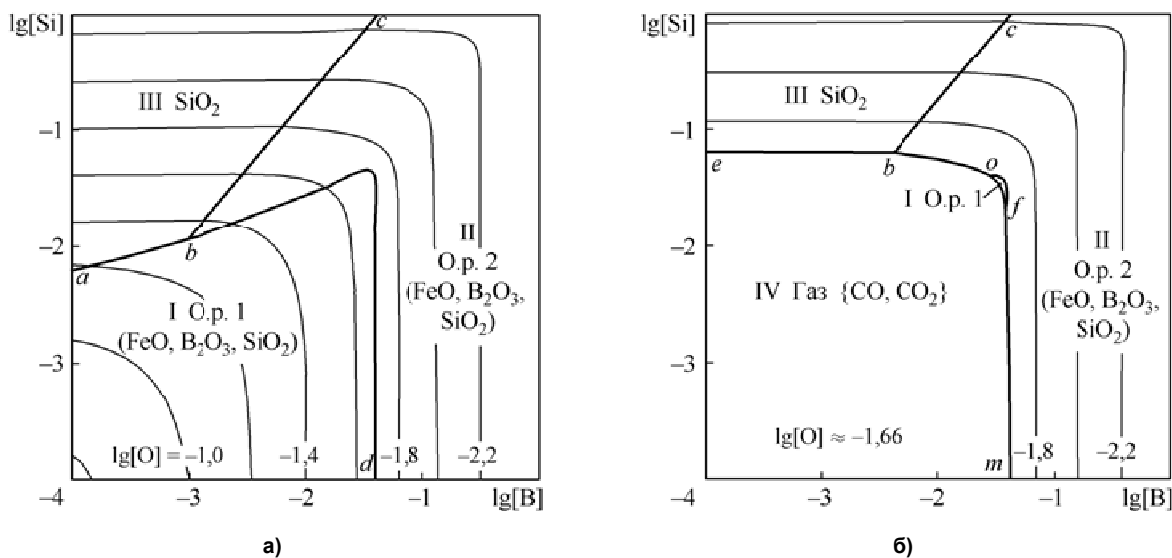


Рис. 2. ПРКМ системы Fe–B–Si–O–C, T = 1600 °C, P<sub>общ</sub> = 1 атм: а) [C] = 0; б) [C] = 0,1 мас. %

Составы оксидного и металлического расплавов, отвечающие изокислородной линии lg[O] = -2,2 (рис. 2, а)

Таблица 2

lg[Si]	lg[B]	x <sub>(Fe<sup>2+</sup>)</sub>	x <sub>(B<sup>3+</sup>)</sub>	x <sub>(Si<sup>4+</sup>)</sub>
-4,00	-0,50	0,0033	0,9967	0,0000
-2,80	-0,50	0,0033	0,9963	0,0004
-2,00	-0,50	0,0032	0,9941	0,0026

## Физическая химия и физика металлургических систем

Аналогично рассмотрены системы Fe–B–Mg–O–C (рис. 3), Fe–B–Ca–O–C (рис. 4), Fe–B–Mn–O–C (рис. 5), Fe–B–Al–O–C (рис. 6).

На рис. 3, а представлены результаты расчета координат ПРКМ Fe–B–Mn–O в виде проекции на плоскость составов при 1600 °С. В области I заданы составы жидкого металла, равновесного с оксидным расплавом; в области II – с твердым раствором оксидов на основе MgO. Линия *cd* показывает проекцию области составов металла, равновесного с газообразным магнием. Из рис. 3, а видно, что магний участвует в раскислении – или в виде комплексного раскислителя с бором с образованием жидких оксидных включений, или в виде чистого магния.

Изотермическое и изосоставное сечение ПРКМ при 1600 °С и концентрации углерода 0,1 мас. % представлено на рис. 3, б. В области IV нанесены составы жидкого металла, равновесного с газовой фазой на основе CO ( $p_{CO} \approx 0,98$  атм), в области V – на основе газообразного магния ( $p_{Mg} \approx 0,98$  атм). Область IV характеризует постоянное содержание кислорода в металле, которое определяется концентрацией  $[O] = 0,022$  мас. %.

Из табл. 3 и рис. 3, а следует, что мольная доля  $x_{(B^{3+})}$  при концентрации магния  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  мас. % может достигать в оксидной фазе величин 0,3–0,6 при  $\lg[O] = -2,2$  и концентрации бора в металле от 0,001 до 0,1 мас. %.

На рис. 4, а представлены результаты расчета координат ПРКМ Fe–B–Ca–O в виде проекции на плоскость составов при 1600 °С. В области I заданы составы жидкого металла, равновесного с оксидным расплавом; в области II – с твердым раствором оксидов на основе CaO. Линия *no* показывает проекцию области составов металла, равновесного с газообразным кальцием. Из рис. 4, а видно, что кальций участвует в раскислении при любых концентрациях – или в виде комплексного раскислителя с бором с образованием жидких оксидных включений, или в виде чистого раскислителя с образованием CaO. При концентрации кальция в жидком металле порядка сотых долей процента и концентрации бора порядка тысячных долей процента на раскисление будет расходоваться в основном кальций.

В табл. 4 также можно отметить, что при содержании в металле кальция на уровне 0,0001–0,003 мас. % в оксидном расплаве  $x_{(B^{3+})} = 0,32$ –0,62.

Концентрация бора при этом изменяется от 0,001 до 0,1 мас. %

Изотермическое (1600 °С) и изосоставное ( $[C] = 0,1$  мас. %) сечение ПРКМ Fe–B–Ca–O–C приведено на рис. 4, б. В области IV нанесены составы жидкого металла, равновесного с газовой фазой на основе CO ( $p_{CO} \approx 0,95$  атм), в области V – основе газообразного кальция ( $p_{Ca} \approx 0,96$  атм). Область IV характеризует постоянное содержание

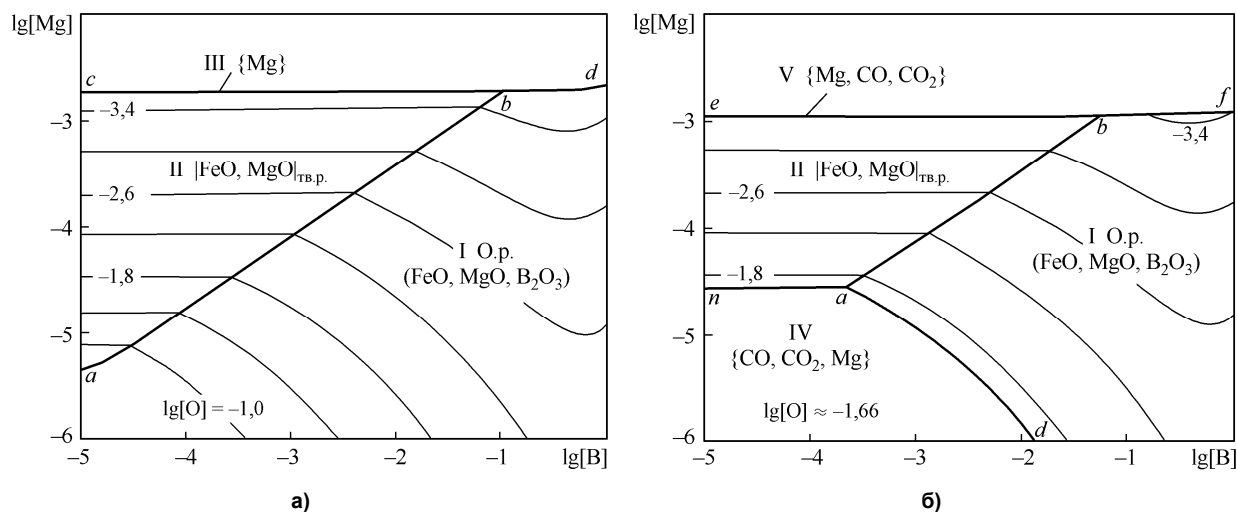


Рис. 3. ПРКМ системы Fe–B–Mg–O–C,  $T = 1600$  °С,  $P_{общ} = 1$  атм: а)  $[C] = 0$ ; б)  $[C] = 0,1$  мас. %

Составы оксидного и металлического расплавов, отвечающие изокислородной линии  $\lg[O] = -2,2$  (рис. 3, а)

Таблица 3

$\lg[Mg]$	$\lg[B]$	$x_{(Fe^{2+})}$	$x_{(B^{3+})}$	$x_{(Mg^{2+})}$
-4,0725	-3,00	0,004	0,317	0,679
-4,8177	-1,80	0,005	0,455	0,540
-5,6358	-1,00	0,011	0,596	0,393

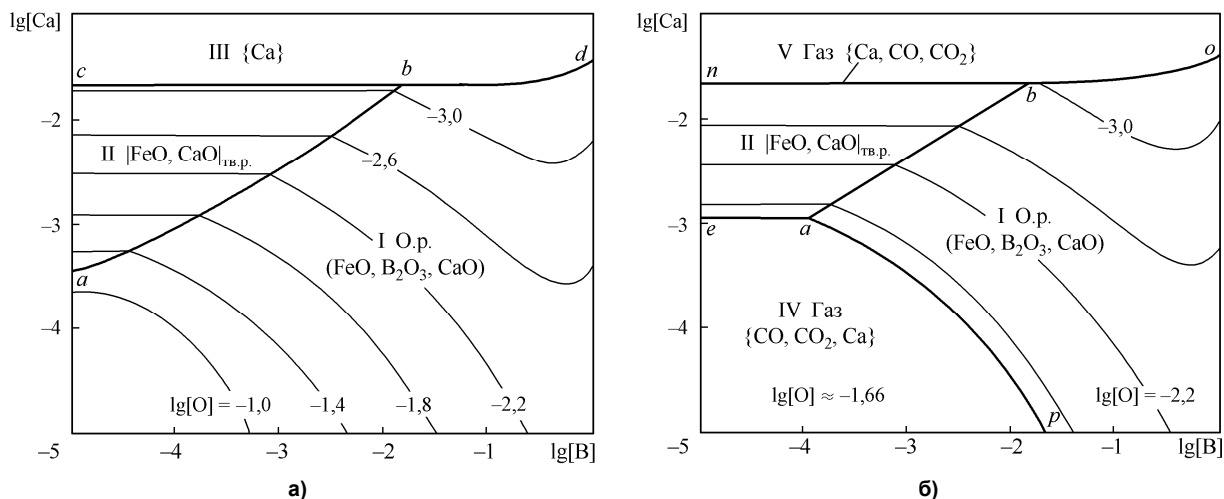


Рис. 4. ПКМ системы Fe–B–Ca–O–C,  $T = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{общ}} = 1\text{ атм}$ : а)  $[\text{C}] = 0$ ; б)  $[\text{C}] = 0,1\text{ мас. \%}$

Составы оксидного и металлического расплавов, отвечающие  
изокислородной линии  $\lg[\text{O}] = -2,2$  (рис. 4, а)

Таблица 4

$\lg[\text{Ca}]$	$\lg[\text{B}]$	$x_{(\text{Fe}^{2+})}$	$x_{(\text{B}^{3+})}$	$x_{(\text{Ca}^{2+})}$
-2,5985	-3,00	0,023	0,316	0,661
-3,4094	-1,80	0,015	0,478	0,507
-4,3230	-1,00	0,017	0,623	0,360

кислорода в металле, которое определяется концентрацией углерода ( $[\text{O}] = 0,022\text{ мас. \%}$ ).

Были рассмотрены системы Fe–B–Mn–O–C ( $[\text{C}] = 0$ ; 0,1 мас. %). На рис. 5, а представлены результаты расчета координат ПКМ системы Fe–

B–Mn–O в виде проекции на плоскость составов при  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Из вида ПКМ следует, что в основном возможно образование жидких оксидных включений в данной системе. При концентрациях бора в жидком железе, отвечающих координатам

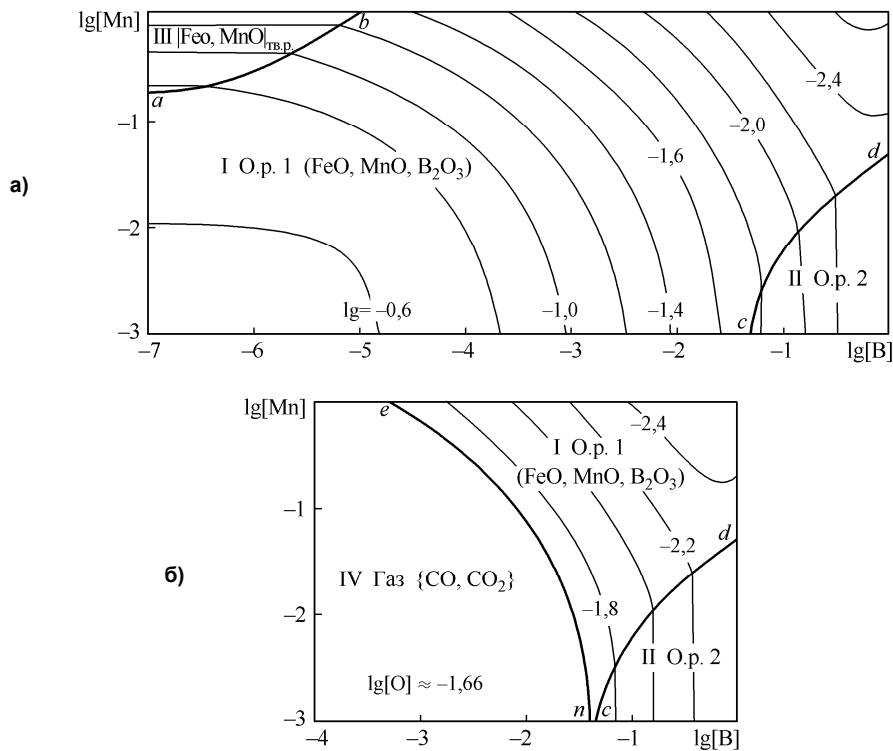


Рис. 5. ПКМ системы Fe–B–Mn–O–C,  $T = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{общ}} = 1\text{ атм}$ : а)  $[\text{C}] = 0$ ; б)  $[\text{C}] = 0,1\text{ мас. \%}$

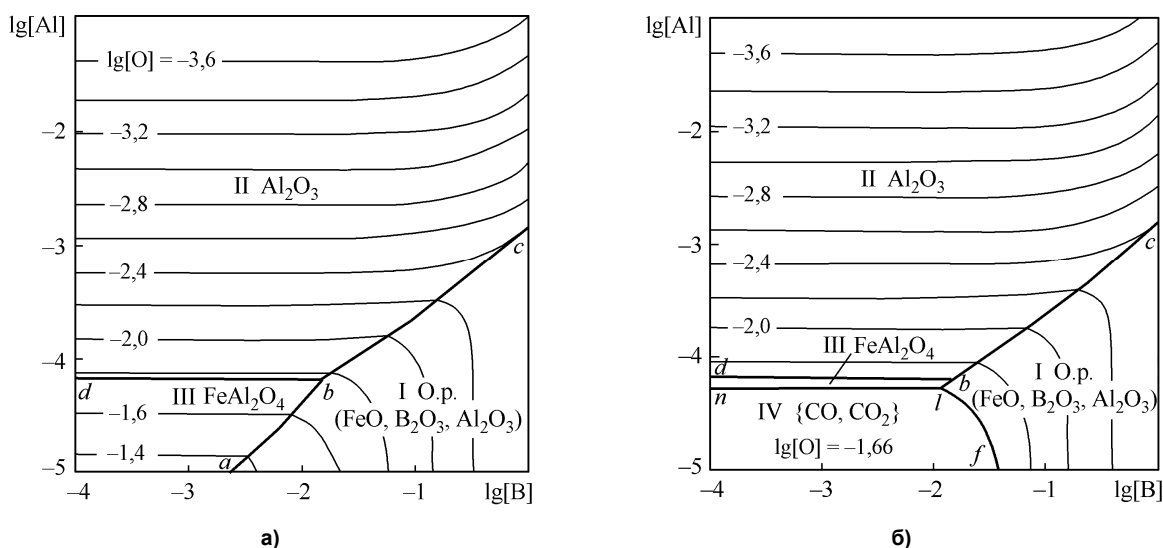


Рис. 6. ПРКМ системы Fe–B–Al–O–C,  $T = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{общ}} = 1\text{ атм}$ : а) [C] = 0; б) [C] = 0,1 мас. %

линии  $cd$ , возможно образование оксидного расплава на основе  $B_2O_3$ . Изотермическое ( $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и изосоставное (концентрация углерода 0,1 мас. %) сечение ПРКМ приведено на рис. 5, б. В области IV нанесены составы жидкого металла, равновесного с газовой фазой на основе CO. Эта область характеризует постоянное содержание кислорода в металле, которое определяется концентрацией углерода ( $[O] = 0,022\text{ мас. \%}$ ). Из рис. 5, б видно, что, например, при  $[Mn] < 0,1\text{ мас. \%}$  и  $[B] < 0,01\text{ мас. \%}$  раскислителем является углерод.

На рис. 6, а представлены результаты расчета координат ПРКМ Fe–B–Al–O в виде проекции на плоскость составов при  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Из вида ПРКМ следует, что при концентрациях алюминия порядка 0,001–0,01 мас. % возможно образование в качестве неметаллического включения только корунда. Жидкие неметаллические включения при обычных концентрациях алюминия и бора в жидком железе не образуются.

Рассчитано и построено изотермическое ( $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и изосоставное ( $[C] = 0,1\text{ мас. \%}$ ) сечение ПРКМ системы Fe–B–Al–O–C (рис. 6, б). В области IV нанесены составы жидкого металла, равновесного с газовой фазой на основе CO. Эта область характеризует постоянное содержание кислорода в металле, которое определяется концентрацией углерода ( $[O] = 0,022\text{ мас. \%}$ ). Из рис. 6, б видно, что при обычных концентрациях раскислителя (алюминия)  $[Al] = 0,001$  и  $[B] = 0,005\text{ мас. \%}$  в равновесии с металлом будет только корунд и, следовательно, бор не будет окисляться кислородом металла.

Из табл. 6 и рис. 6, а следует, что в металле, содержащем тысячные доли бора, невозможно окисление бора в присутствии алюминия. Ощутимые количества окисленного бора могут появиться при образовании оксидного расплава (область I рис. 6, б).

Выполненные расчеты показывают, что в принципе предварительное глубокое раскисление стали алюминием, кальцием, и магнийсодержащими лигатурами создают условия для блокирования реакций окисления бора, вводимого на конечных стадиях рафинирования стали. Из работ А.Е. Сёмина и А.И. Потапова [4, 5] следует, что в основном перед введением бора в металл необходимо максимально снизить и содержание азота в стали путем введения сильных нитридообразующих элементов, таких как алюминий, титан, РЗМ. Причем нитридообразование будет происходить при температурах, близких к началу процесса кристаллизации стали, т. е. необходимо установить координаты ПРМ для систем Fe–Al–Ti–B–C–N–C.

### Заключение

1. Установлены координаты поверхностей растворимости для систем Fe–B–Mg–O–C, Fe–B–Ca–O–C, Fe–B–Mn–O–C, Fe–B–Al–O–C, Fe–B–Si–O–C.

2. В результате термодинамического анализа определено, что при современных методах рафинирования стали, позволяющих достигнуть глубины рафинирования по кислороду до 0,0002 мас. %, введение бора после процесса раскисления не приводит к потерям эффективного бора за счет взаимодействия с остатками кислорода в стали.

3. Из последних литературных данных следует, что необходимо блокировать взаимодействие бора с азотом для получения стабильного содержания бора (эффективного бора) в стали путем введения сильных нитридообразующих компонентов и вакуумирования стали.

Работа поддержана грантом РФФИ № 13-08-12167.

### Литература

1. Еланский, Г.Н. *Сталь и периодическая система элементов Д.И. Менделеева: учеб. пособие для вузов по направлению «Металлургия»* / Г.Н. Еланский. – М.: МГВМИ, 2012 – 196 с.

2. Михайлов, Г.Г. *Термодинамическое моделирование фазовых равновесий в оксидных системах, содержащих  $B_2O_3$*  / Г.Г. Михайлов, Л.А. Макровец, Л.А. Смирнов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2014. – № 14 (4). – С. 11–16.

3. Михайлов, Г.Г. *Термодинамика металлургических процессов и систем* / Г.Г. Михайлов,

Б.И. Леонович, Ю.С. Кузнецов. – М.: Издат. Дом МИСИС. – 2009. – 519 с.

4. Потапов, А.И. *Исследование процессов микролегирования стали бором с целью совершенствования технологии производства борсодержащей стали: автореф. дис. ... канд. техн. наук* / А.И. Потапов. – М.: МИСИС, 2013. – 27 с.

5. Влияние химического состава и режима аустенизации на прокаливаемость стали 35ГР / А.И. Потапов, И.Т. Маликов, В.И. Уразов, А.Г. Семин // *Электрометаллургия*, 2009. – № 11. – С. 37–40.

**Михайлов Геннадий Георгиевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой физической химии, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; mikhailovgg@susu.ac.ru.

**Макровец Лариса Александровна**, инженер кафедры физической химии, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; makrovetsla@susu.ac.ru.

**Смирнов Леонид Андреевич**, академик Российской Академии наук, д-р техн. наук, профессор, директор, Уральский институт металлов, г. Екатеринбург; sekretar@uim-stavan.ru.

Поступила в редакцию 3 марта 2015 г.

## THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE COUPLING REACTION OF MANGANESE, SILICON, MAGNESIUM, CALCIUM, ALUMINUM WITH OXYGEN IN THE BORON-CONTAINING MELT BASED ON IRON

G.G. Mikhailov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, mikhailovgg@susu.ac.ru,

L.A. Makrovets, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, makrovetsla@susu.ac.ru,

L.A. Smirnov, Ural Institute of Metals, Yekaterinburg, Russian Federation, sekretar@uim-stavan.ru

The thermodynamic analysis of the interaction of boron dissolved in liquid steel with components of metal melt, such as oxygen, aluminium, calcium, magnesium and carbon is carried out. The authors managed to develop a technique of drawing component solubility surfaces in liquid boron-bearing steel based on calculations of liquidus lines and surfaces for binary and ternary oxide phase diagrams with  $B_2O_3$ . It was established that manganese and silicon can not block oxidation of boron introduced into steel. In this case boron interacting with oxygen, manganese and silicon forms liquid oxide (slag) non-metallic inclusions. Calcium is not an effective protector of boron. Addition of alloys containing aluminium and magnesium can prevent oxidation of the introduced boron and thus enables to stabilize the production technology of boron-modified steels. With one thousandth of percent of aluminium and magnesium the possibility of boron dissolved in steel with retained oxygen is excluded. In order to retain a sufficient amount of “effective boron” in steel it is necessary to develop an effective system of denitration of steel by introducing nitride forming elements and vacuum degassing.

*Keywords: thermodynamics; deoxidation; refinement; boron.*

### References

1. Elanskiy G. N. *Stal' i periodicheskaya sistema elementov D.I. Mendeleeva* [Steel and the Mendeleev Periodic System of Elements]. Moscow, MGVMI Publ., 2012. 196 p.

2. Mikhailov G.G., Makrovets L.A., Smirnov L.A. *Termodinamicheskoe modelirovanie fazovykh ravnovesiy v oksidnykh sistemakh, soderzhashchikh  $B_2O_3$*  [Thermodynamic Modeling of Phase Equilibria in Oxide Systems Containing  $B_2O_3$ ]. *Bull. of the South Ural St. Univ. Ser. Metallurgy*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 11–16. (in Russ.)

3. Mikhailov G.G., Leonovich B.I., Kuznetsov Yu.S. *Termodinamika metallurgicheskikh protsessov i sistem* [Thermodynamics of Metallurgical Processes and Systems]. Moscow, MISiS Publ., 2009. 520 p.

4. Potapov A.I. *Issledovanie protsessov mikrolegirovaniya stali borom s tsel'yu sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva borsoderzhashchey stali*. Avtoreferat kand. diss. [Investigation of Processes of Microalloying Steel with Boron in Order to Improve the Technology of Boron-Bearing Steel Production. Abstract of cand. diss.]. Moscow, 2013. 27 p.

5. Potapov A.I., Malikov I.T., Urazov V.I., Semin A.G. Vliyanie khimicheskogo sostava i rezhima austenizatsii na prokalivaemost' stali 35GR [Effect of Chemical Composition and Austenitizing Conditions on the Hardenability of 35GR Steel]. *Electrometallurgiya*, 2009, no. 11, pp. 37–40. (in Russ.)

*Received 3 March 2015*

---

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Михайлов, Г.Г. Термодинамический анализ реакций взаимодействия марганца, кремния, магния, кальция, алюминия с кислородом в борсодержащем расплаве на основе железа / Г.Г. Михайлов, Л.А. Макровец, Л.А. Смирнов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 5–12.

### REFERENCE TO ARTICLE

Mikhailov G.G., Makrovets L.A., Smirnov L.A. Thermodynamic Analysis of the Coupling Reaction of Manganese, Silicon, Magnesium, Calcium, Aluminum with Oxygen in the Boron-Containing Melt Based on Iron. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 5–12. (in Russ.)