

УДК 669.187.28.539.55

**РАВНОВЕСНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЛАНТАНА В МЕТАЛЛЕ
ПОД ШЛАКОМ СИСТЕМЫ $\text{CaO-SiO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-15 \% Al}_2\text{O}_3\text{-8 \% MgO}^*$** *Уполовникова А.Г., к.т.н., старший научный сотрудник (upol.ru@mail.ru)**Бабенко А.А., д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии**цветных металлов (babenko251@gmail.com)**Смирнов Л.А., академик РАН, д.т.н., главный научный сотрудник (ntm2000@mail.ru)***Институт металлургии УрО РАН**

(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

Аннотация. Приведены результаты термодинамического моделирования равновесного содержания лантана в металле под шлаком системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, соответствующим химическому составу 16 точек плана локального симплекса. Использован программный комплекс HSC 8.03 Chemistry (Outokumpu) в совокупности с методом симплексных решеток планирования. Рассмотрен шлак, представленный оксидной системой $\text{CaO-SiO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-15 \% Al}_2\text{O}_3\text{-8 \% MgO}$ в широком диапазоне химического состава, при температурах 1550 и 1650 °С, и металл, содержащий 0,06 % С, 0,25 % Si, 0,05 % Al (здесь и далее указаны % (по массе)). Результаты математического моделирования представлены графически в виде диаграмм состав – равновесное содержание лантана. Отмечено заметное влияние основности шлака на равновесную концентрацию лантана в металле. Повышение основности шлака с 2 до 5 при температуре 1550 °С приводит к повышению равновесного содержания лантана в металле от 0,2 ppm в области концентрации оксида лантана 1 – 5 % до 7 ppm в области повышенной до 4 – 7 % концентрации оксида лантана, т.е. рост основности шлака благоприятно сказывается на развитии процесса восстановления лантана. Рост температуры металла также оказывает положительное влияние на процесс восстановления лантана. С повышением температуры до 1650 °С равновесное содержание лантана в металле увеличивается от 0,2 ppm в области концентрации оксида лантана 1 – 3 % до 12 ppm в области повышенной до 4 – 7 % концентрации оксида лантана. На диаграммах области химического состава шлаков, содержащих 56 – 61 % CaO, 12 – 14 % SiO_2 и 4 – 7 % La_2O_3 , обеспечивают в интервале температур 1550 и 1650 °С концентрацию лантана в металле на уровне 7 – 12 ppm. Подтверждена решающая роль основности шлака, концентрации оксида лантана и температурного фактора в развитии процесса восстановления лантана из шлаков изучаемой оксидной системы алюминием, растворенным в металле.

Ключевые слова: лантан, металл, шлак, планирование эксперимента, термодинамическое моделирование, диаграммы состав – свойство.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-11-12-946-951

ВВЕДЕНИЕ

Известно положительное влияние редкоземельных металлов (РЗМ) на механические, технологические и служебные свойства стали, которое обычно объясняется химическим воздействием на вредные примеси и связыванием их в более тугоплавкие химические соединения [1 – 8]. Микролегирующие стали РЗМ осуществляют, как правило, за счет присадок ферросплавов с РЗМ, использование которых увеличивает себестоимость стали. Одним из направлений решения проблемы себестоимости может быть микролегирующие стали РЗМ путем их восстановления из оксидных систем [9 – 17]. В работах [9, 10] рассмотрено влияние рафинирующего шлака, содержащего до 15 % Ce_2O_3 , на модифицирование включений Al_2O_3 : отмечена возможность восстановления церия из шлаков изучаемой оксидной системы и растворение его в стали в количестве от 6 ppm до 4 ppm. В работах [16, 17] подтверждена принципиальная возможность развития процесса восстановления церия из шлаков системы

$\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-15 \% Al}_2\text{O}_3\text{-8 \% MgO}$ алюминием, растворенным в металле. Показано, что в зависимости от температуры металла, основности шлака и содержания оксида церия в сталь, содержащую 0,06 % С, 0,25 % Si, 0,05 % Al, переходит от 0,055 до 16,0 ppm церия.

В работе приведены результаты термодинамического моделирования равновесного содержания лантана в металле под шлаком системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, соответствующим химическому составу 16 точек плана локального симплекса, представленные графически в виде диаграмм состав – равновесное содержание лантана.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

С использованием программного комплекса HSC 8.03 Chemistry (Outokumpu), основанном на минимизации энергии Гиббса и вариационных принципах термодинамики [18 – 20] с применением метода симплексных решеток планирования, проведено термодинамическое моделирование равновесного содержания лантана в металле под шлаком системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$. Сущность метода симплекс-

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00825.

ных решеток планирования заключается в построении математической модели, которая связывает получаемые свойства с содержанием компонентов смеси [18]. Моделирование выполнено для температур 1550 и 1650 °С, рабочей массы тела 100 кг (100 % металла и 10 % шлака) при давлении воздуха окружающей среды в системе 0,1 МПа. При построении матрицы планирования на переменные составляющие системы CaO–SiO₂–La₂O₃–Al₂O₃–MgO были наложены ограничения: CaO/SiO₂ = 2 ÷ 5; 15 % Al₂O₃; 8 % MgO и 1 – 7 % La₂O₃. В результате наложения ограничений на изменение компонентов в системе исследованная область представлена локальным симплексом в виде двух концентрационных треугольников, вершинами которых являются точки Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ (рис. 1).

При планировании эксперимента концентрации исходных компонентов оксидной системы выражаются в массовых процентах, а псевдокомпонентов (Y_i) – в долях единиц. В таблице приведены результаты термодинамического моделирования равновесного содержания лантана в металле, содержащем 0,06 % С, 0,25 % Si и 0,05 % Al, под шлаком системы CaO–SiO₂–La₂O₃–Al₂O₃–MgO, соответствующим составу 16 точек плана локального симплекса, выраженному в координатах псевдокомпонентов и исходных компонентов.

Для описания зависимости равновесного содержания лантана в металле от состава шлака в качестве

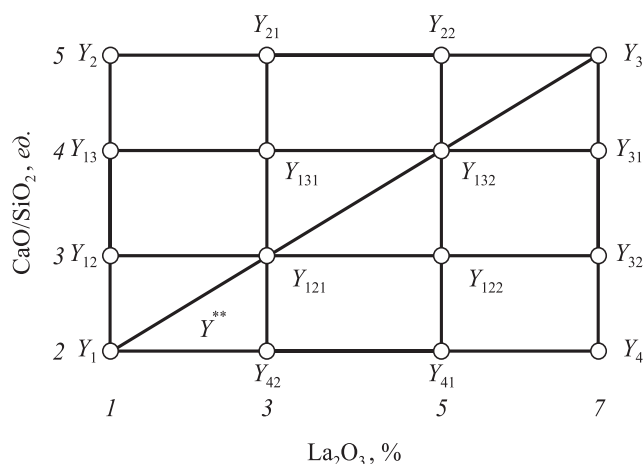


Рис. 1. Область варьирования состава шлака локального симплекса системы CaO–SiO₂–La₂O₃–Al₂O₃–MgO

Fig. 1. Variation range of the slag composition of local simplex of CaO–SiO₂–La₂O₃–Al₂O₃–MgO system

аппроксимирующей модели был выбран приведенный полином третьей степени, коэффициенты которого рассчитаны с использованием данных таблицы по формулам работы [18]. Искомые уравнения имеют вид:

– для концентрационного треугольника Y₁Y₂Y₃ локального симплекса и температуры 1550 °С:

Состав шлака и результаты термодинамического моделирования равновесного содержания лантана в металле

Composition of the slag and results of thermodynamic modeling of lanthanum equilibrium content in the metal

№	Индекс шлака	Состав шлака									[La], ppm, при температуре, °С	
		В координатах псевдокомпонентов, дол.				В координатах исходных компонентов, % (по массе)					1550	1650
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	CaO	SiO ₂	La ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO		
1	Y ₁	1	0	0	0	50,7	25,3	1	15	8	0,064	0,09
2	Y ₂	0	1	0	0	63,3	12,7	1	15	8	3,850	5,92
3	Y ₃	0	0	1	0	58,3	11,7	7	15	8	10,300	16,10
4	Y ₄	0	0	0	1	46,7	23,3	7	15	8	0,310	0,50
5	Y ₁₃	0,33	0,67	0	0	59,1	16,9	1	15	8	3,430	5,56
6	Y ₁₃₂	0,33	0	0,67	0	56,0	16,0	5	15	8	1,070	1,76
7	Y ₂₂	0	0,33	0,67	0	60,0	12,0	5	15	8	0,450	0,69
8	Y ₁₂	0,67	0,33	0	0	54,9	21,1	1	15	8	1,470	2,31
9	Y ₁₂₁	0,67	0	0,33	0	53,2	20,8	3	15	8	4,200	6,82
10	Y ₂₁	0	0,67	0,33	0	61,6	12,4	3	15	8	8,750	13,70
11	Y ₁₃₁	0,33	0,33	0,33	0	57,5	16,5	3	15	8	1,350	2,25
12	Y ₄₁	0,33	0	0	0,67	48,0	24,0	5	15	8	2,570	4,13
13	Y ₃₁	0	0	0,67	0,33	54,5	15,5	7	15	8	0,750	1,21
14	Y ₄₂	0,67	0	0	0,33	49,4	24,6	3	15	8	0,210	0,34
15	Y ₃₂	0	0	0,33	0,67	50,5	19,5	7	15	8	6,650	10,40
16	Y ₁₂₂	0,33	0	0,33	0,33	51,9	20,1	5	15	8	0,140	0,21

$$C_{La} = 0,06X_1 + 3,8X_2 + 10,3X_3 - 4,4X_1X_2 - 13,9X_1X_3 + 2,8X_2X_3 + 1,6X_1X_2(X_1 - X_2) + 4,9X_1X_3(X_1 - X_3) + 0,3X_2X_3(X_2 - X_3) - 11,7X_1X_2X_3; \quad (1)$$

– для концентрационного треугольника $Y_1Y_2Y_3$ локального симплекса и температуры 1650 °С:

$$C_{La} = 0,09X_1 + 5,9X_2 + 16,1X_3 - 6,7X_1X_2 - 21,2X_1X_3 + 4,6X_2X_3 + 2,1X_1X_2(X_1 - X_2) + 6,6X_1X_3(X_1 - X_3) + 0,6X_2X_3(X_2 - X_3) - 17,6X_1X_2X_3; \quad (2)$$

– для концентрационного треугольника $Y_1Y_4Y_3$ локального симплекса и температуры 1550 °С:

$$C_{La} = 0,06X_1 + 0,3X_2 + 10,3X_3 - 0,05X_1X_2 - 13,9X_1X_3 - 11,3X_2X_3 + 0,08X_1X_2(X_1 - X_2) + 4,9X_1X_3(X_1 - X_3) + 3,2X_2X_3(X_2 - X_3) - 8,8X_1X_2X_3; \quad (3)$$

– для концентрационного треугольника $Y_1Y_4Y_3$ локального симплекса и температуры 1650 °С:

$$C_{La} = 0,09X_1 + 0,5X_2 + 16,1X_3 - 0,09X_1X_2 - 21,2X_1X_3 - 16,9X_2X_3 + 0,04X_1X_2(X_1 - X_2) + 6,6X_1X_3(X_1 - X_3) + 4,2X_2X_3(X_2 - X_3) + 11,9X_1X_2X_3; \quad (4)$$

где C_{La} – равновесное содержание лантана в металле; X_i – содержание i -го компонента в шлаке в координатах псевдокомпонентов, доли единиц.

Математические модели (1) – (4) оказались адекватными при уровне значимости 0,01 и были использованы для построения диаграмм равновесного содержания лантана в металле для температур 1550 и 1650 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты математического моделирования равновесного содержания лантана в металле представлены в виде диаграмм: химический состав шлаков системы CaO–SiO₂–La₂O₃, содержащих 15 % Al₂O₃ и 8 % MgO – равновесное содержание лантана в металле при температурах 1550 и 1650 °С (рис. 2). На диаграммах синими линиями обозначены изолинии равновесного содержания лантана, тонкими черными линиями нанесена основность шлака ($B = CaO/SiO_2$), цифрами – ее значения). Анализ приведенных диаграмм позволяет количественно оценить влияние температуры металла и химического состава шлака на содержание лантана.

Рост основности шлака благоприятно сказывается на развитии процесса восстановления лантана из шлака. Например, увеличение основности шлака с 2 до 5 при температуре 1550 °С приводит к повышению равновесного содержания лантана в металле от 0,2 ppm в области концентрации оксида лантана 1 – 5 % до 7 ppm в области повышенной до 4 – 7 % концентрации оксида лантана (рис. 2, а). При этом с ростом температуры до 1650 °С равновесное содержание лантана в металле увеличивается от 0,2 ppm в области концентрации оксида лантана 1 – 3 % до 12 ppm в области повышенной до 4 – 7 % концентрации оксида лантана (рис. 2, б).

Формирование шлаков в области химического состава, соответствующего 56 – 61 % CaO, 12 – 14 % SiO₂ и 15 % Al₂O₃, позволяет ожидать в интервале температур 1550 – 1650 °С концентрацию лантана в металле на уровне 7 – 12 ppm при содержании оксида лантана в исходном шлаке на уровне 4 – 7 % (рис. 2).

Выводы

Термодинамическое моделирование в совокупности с методом симплексных решеток планирования позволили с минимальными временными и материальными затратами получить новые данные о равновесном содержании лантана в металле, содержащем 0,06 % С, 0,25 % Si, 0,05 % Al, выдержанном под шлаком системы CaO–SiO₂–La₂O₃–15 % Al₂O₃–8 % MgO в широком диапазоне химического состава при температурах 1550 и 1650 °С. Формирование шлаков в области химического состава, соответствующего 56 – 61 % CaO, 12 – 14 % SiO₂ и 15 % Al₂O₃, позволяет ожидать в интервале температур 1550 – 1650 °С концентрацию лантана в металле на уровне 7 – 12 ppm при содержании оксида лантана в исходном шлаке на уровне 4 – 7 %. При этом подтверждены решающая роль основности шлака, концентрации оксида лантана и температурного фактора в развитии процесса восстановления лантана из шлаков изучаемой оксидной системы алюминием, растворенным в металле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов Л.А., Ровнушкин В.А., Орыщенко А.С., Калинин Г.Ю., Милуц В.Г. Модифицирование стали и сплавов редкоземельными элементами. Сообщение 1 // *Металлург*. 2015. № 11. С. 57 – 63.
2. Гольдштейн Я.Г., Ефимова Л.Б. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. – М.: *Металлургия*, 1986. – 271 с.
3. Torkamani H., Raygan Sh., Garcia-Mateo C., Rassizadehghani J., Palizdar Y., San-Martin D. Evolution of pearlite microstructure in low-carbon cast microalloyed steel due to the addition of La and Ce // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018. Vol. 49A. No. 10. P. 4495 – 4508.
4. Torkamani H., Raygan Sh., Garcia-Mateo C., Rassizadehghani J., Palizdar Y., San-Martin D. Contributions of rare earth element (La, Ce) addition to the impact toughness of low carbon cast niobium microalloyed steels // *Metals and Materials Int*. 2018. Vol. 24. No. 4. P. 773 – 788.

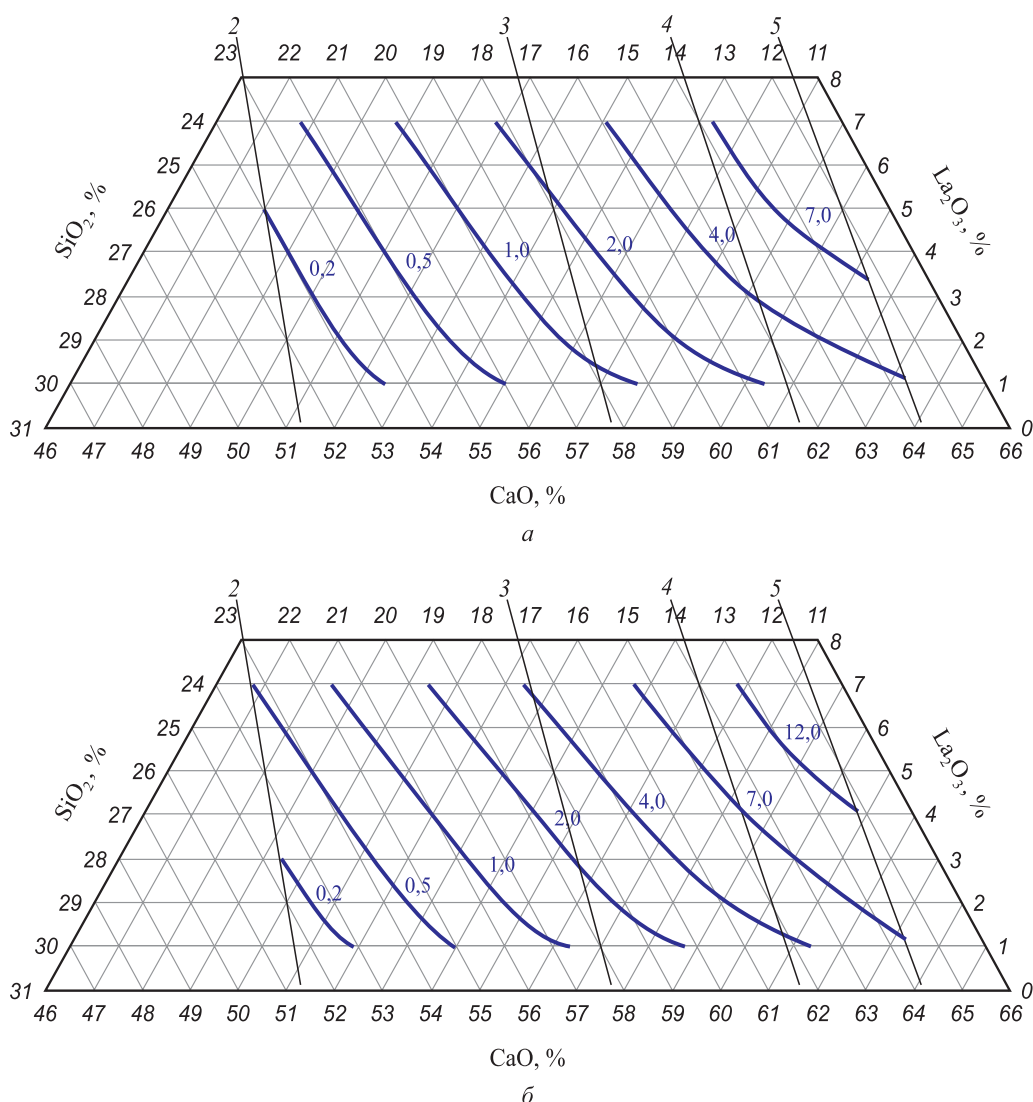


Рис. 2. Диаграмма равновесного содержания лантана в металле, выдержанном под шлаком системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$, содержащим 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO при температуре 1550 °C (а) и 1650 °C (б)

Fig. 2. Diagram of lanthanum equilibrium content in metal holding under the slag of $\text{CaO-SiO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$ system, containing 15 % Al_2O_3 and 8 % MgO at temperature of 1550 °C (a) and 1650 °C (b)

5. Liu C., Revilla R.I., Liu Z., Zhang D., Li X., Terry H. Effect of inclusions modified by rare earth elements (Ce, La) on localized marine corrosion in Q460NH weathering steel // *Corrosion Science*. 2017. Vol. 129. P. 82 – 90.
6. Wang L., Lin Q., Ji J., Lan D. New study concerning development of application of rare earth metals in steels // *Journal of Alloys and Compounds*. 2006. Vol. 408-412. P. 384 – 386.
7. Wang L.-M., Lin Q., Yue L.-J., Liu L., Guo F., Wang F.-M. Study of application of rare earth elements in advanced low alloy steels // *Journal of Alloys and Compounds*. 2008. Vol. 451. No. 1-2. P. 534 – 537.
8. Liu H.-L., Liu C.-J., Jiang M.-F. Effect of rare earths on impact toughness of a low-carbon steel // *Materials and Design*. 2012. Vol. 33. No. 1. P. 306 – 312.
9. Yang Xi., Long H., Cheng G., Wu C., Wu B. Effect of refining slag containing Ce_2O_3 on steel cleanliness // *Journal of Rare Earths*. 2011. Vol. 29. No. 11. P. 1079 – 1083.
10. Wu C., Cheng G., Long H., Yang X. A thermodynamic model for evaluation of mass action concentrations of Ce_2O_3 -contained slag systems based on the ion and molecule coexistence theory // *High Temperature Materials and Processes*. 2013. Vol. 32. No. 3. P. 207 – 214.
11. Yang J., Hao F., Li D., Zhou Y., Ren X., Yang Y., Yang Q. Effect of RE oxide on growth dynamics of primary austenite grain in hardfacing layer of medium-high carbon steel // *Journal of Rare Earths*. 2012. Vol. 30. No. 8. P. 814 – 819.
12. Gou J., Wang Y., Wang C., Chu R., Liu S. Effect of rare earth oxide nano-additives on micro-mechanical properties and erosion behavior of Fe-Cr-C-B hardfacing alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 691. P. 800 – 810.
13. Zhang F., Chen Y., Wang Y., Dong F., Wu M. Influence of La_2O_3 on crystallization behavior of free-fluoride mould flux and heat transfer of slag films // *Journal of Rare Earths*. 2011. Vol. 29. No. 2. P. 173 – 177.
14. Hao F., Liao B., Li D., Dan T., Ren X., Yang Q., Liu L. Effects of rare earth oxide on hardfacing metal microstructure of medium carbon steel and its refinement mechanism // *Journal of Rare Earths*. 2011. Vol. 29. No. 6. P. 609 – 613.
15. Wu C., Cheng G., Long H. Effect of Ce_2O_3 and $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3$ on the phase, melting temperature and viscosity of $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-10 \text{ mass } \% \text{SiO}_2$ based slags // *High Temperature Materials and Processes*. 2014. Vol. 33. No. 1. P. 77 – 84.
16. Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Уполовникова А.Г., Нечволод О.В. Термодинамическое моделирование восстановления

- церия из шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-15 \% Al}_2\text{O}_3\text{-8 \% MgO}$ алюминием, растворенным в металле // Бутлеровские сообщения. 2019. Т. 59. № 9. С. 140 – 145.
17. Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Уполовникова А.Г., Михайлова Л.Ю. Построение диаграмм равновесного содержания церия в металле под шлаком системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-15 \% Al}_2\text{O}_3\text{-8 \% MgO}$ // Бутлеровские сообщения. 2019. Т. 60. № 10. С. 140 – 145.
18. Планирование эксперимента при исследовании физико-химических свойств металлургических шлаков. Методическое пособие / В.А. Ким, Э.Н. Николай, А.А. Акбердин и др. – Алма-Ата: Наука, 1989. – 116 с.

19. Ким В.А., Акбердин А.А., Куликов И.С. и др. Использование метода симплексных решеток для построения диаграмм типа состав – вязкость // Изв. вуз. Черная металлургия. 1980. № 9. С. 167 – 168.
20. Бабенко А.А., Жучков В.И., Леонтьев Л.И., Уполовникова А.Г., Копышев А.А. Равновесное распределение бора между металлом системы Fe - C - Si - Al и борсодержащим шлаком // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 9. С. 752 – 758.

Поступила в редакцию 23 января 2020 г.

После доработки 4 февраля 2020 г.

Принята к публикации 7 февраля 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 11-12, pp. 946-951.

EQUILIBRIUM CONTENT OF LANTHANUM IN METAL UNDER THE SLAG OF $\text{CaO-SiO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-15 \% Al}_2\text{O}_3\text{-8 \% MgO}$ SYSTEM

A.G. Upolovnikova, A.A. Babenko, L.A. Smirnov

Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Thermodynamic modeling results of lanthanum equilibrium content in metal under the slag of $\text{CaO-SiO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ system corresponding to chemical composition of 16 points of local simplex plan are presented using the HSC 8.03 Chemistry (Outokumpu) software package in combination with the simplex planning lattice method. In the work, slag is represented by $\text{CaO-SiO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-15 \% Al}_2\text{O}_3\text{-8 \% MgO}$ oxide system in a wide range of chemical composition for temperatures of 1550 and 1650 °C, and metal contains 0.06 % C, 0.25 % Si, 0.05 % Al (in this expression and hereinafter in mass.%). The results of mathematical modeling are shown graphically in the form of composition - equilibrium content diagrams of lanthanum. There is significant effect of slag basicity on the lanthanum equilibrium content in metal. An increase in slag basicity from 2 to 5 at temperature of 1550 °C leads to an increase in the lanthanum equilibrium content from 0.2 ppm in the region of lanthanum oxide concentration of 1 – 5 % to 7 ppm in the region of increased concentration of lanthanum oxide to 4 – 7 %, hence the increase in slag basicity favorably affects development of lanthanum reduction. Increase in metal temperature also has positive effect on lanthanum reduction process. As temperature rises to 1650 °C, the lanthanum equilibrium content in metal increases from 0.2 ppm in the region of lanthanum oxide concentration of 1 – 3 % to 12 ppm in the region of increased concentration of lanthanum oxide to 4 – 7 %. In diagrams of chemical composition of slag containing 56 – 61 % CaO, 12 – 14 % SiO_2 and 4 – 7 % La_2O_3 , the lanthanum content in metal at level of 7 – 12 ppm is ensured in temperature range from 1550 to 1650 °C. Therefore, there can be confirmed a decisive role of slag basicity, concentration of lanthanum oxide and temperature factor in development of lanthanum reduction from slags of the studied oxide system by aluminum dissolved in metal.

Keywords: lanthanum, metal, slag, experimental planning, thermodynamic modeling, composition-property diagrams.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-11-12-946-951

REFERENCES

- Smirnov L.A., Rovnushkin V.A., Oryshchenko A.S., Kalinin G.Yu., Milyuts V.G. Modification of steel and alloys with rare-earth elements. Part 1. *Metallurgist*. 2016, vol. 59, no. 11-12, pp. 1053–1061.
- Gol'dshteyn Ya.G., Efimova L.B. *Modifitsirovanie i mikrolegirovanie chuguna i stali* [Modification and Microalloying of Cast Iron and Steel]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 271 p. (In Russ.).
- Torkamani H., Raygan Sh., Garcia-Mateo C., Rassizadehghani J., Palizdar Y., San-Martin D. Evolution of pearlite microstructure in low-carbon cast microalloyed steel due to the addition of La and Ce. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018, vol. 49A, no. 10, pp. 4495–4508.
- Torkamani H., Raygan Sh., Garcia-Mateo C., Rassizadehghani J., Palizdar Y., San-Martin D. Contributions of rare earth element (La, Ce) addition to the impact toughness of low carbon cast niobium microalloyed steels. *Metals and Materials Int*. 2018, vol. 24, no. 4, pp. 773–788.
- Liu C., Revilla R.I., Liu Z., Zhang D., Li X., Terry H. Effect of inclusions modified by rare earth elements (Ce, La) on localized marine corrosion in Q460NH weathering steel. *Corrosion Science*. 2017, vol. 129, pp. 82–90.
- Wang L., Lin Q., Ji J., Lan D. New study concerning development of application of rare earth metals in steels. *Journal of Alloys and Compounds*. 2006, vol. 408-412, pp. 384–386.
- Wang L.-M., Lin Q., Yue L.-J., Liu L., Guo F., Wang F.-M. Study of application of rare earth elements in advanced low alloy steels. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008, vol. 451, no. 1-2, pp. 534–537.
- Liu H.-L., Liu C.-J., Jiang M.-F. Effect of rare earths on impact toughness of a low-carbon steel. *Materials and Design*. 2012, vol. 33, no. 1, pp. 306–312.
- Yang Xi., Long H., Cheng G., Wu C., Wu B. Effect of refining slag containing Ce_2O_3 on steel cleanliness. *Journal of Rare Earths*. 2011, vol. 29, no. 11, pp. 1079–1083.
- Wu C., Cheng G., Long H., Yang X. A thermodynamic model for evaluation of mass action concentrations of Ce_2O_3 -contained slag systems based on the ion and molecule coexistence theory. *High Temperature Materials and Processes*. 2013, vol. 32, no. 3, pp. 207–214.
- Yang J., Hao F., Li D., Zhou Y., Ren X., Yang Y., Yang Q. Effect of RE oxide on growth dynamics of primary austenite grain in hardfacing layer of medium-high carbon steel. *Journal of Rare Earths*. 2012, vol. 30, no. 8, pp. 814–819.
- Gou J., Wang Y., Wang C., Chu R., Liu S. Effect of rare earth oxide nano-additives on micro-mechanical properties and erosion behavior of Fe-Cr-C-B hardfacing alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, vol. 691, pp. 800–810.
- Zhang F., Chen Y., Wang Y., Dong F., Wu M. Influence of La_2O_3 on crystallization behavior of free-fluoride mould flux and heat transfer of slag films. *Journal of Rare Earths*. 2011, vol. 29, no. 2, pp. 173–177.
- Hao F., Liao B., Li D., Dan T., Ren X., Yang Q., Liu L. Effects of rare earth oxide on hardfacing metal microstructure of medium carbon steel and its refinement mechanism. *Journal of Rare Earths*. 2011, vol. 29, no. 6, pp. 609–613.
- Wu C., Cheng G., Long H. Effect of Ce_2O_3 and $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3$ on the phase, melting temperature and viscosity of $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-10 mass \% SiO}_2$ based slags. *High Temperature Materials and Processes*. 2014, vol. 33, no. 1, pp. 77–84.

16. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Nechvoglod O.V. Thermodynamic modeling of cerium reduction from slags of CaO-SiO₂-Ce₂O₃-15 % Al₂O₃-8 % MgO system with aluminum dissolved in metal. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2019, vol. 59, no. 9, pp. 140–145. (In Russ.).
17. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Mikhailova L.Yu. Construction of equilibrium content diagrams of cerium in metal under the slag of CaO-SiO₂-Ce₂O₃-15 % Al₂O₃-8 % MgO system. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2019, vol. 60, no. 10, pp. 140–145. (In Russ.).
18. Kim V.A., Nikolai E.N., Akberdin A.A. etc. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii fiziko-khimicheskikh svoistv metallurgicheskikh shlakov. Metodicheskoe posobie* [Experimental Planning in Study of Physicochemical Properties of Metallurgical Slags. Manual]. Alma-Ata: Nauka, 1989, 116 p. (In Russ.).
19. Kim V.A., Akberdin A.A., Kulikov I.S. etc. Using the simplex lattice method in construction of composition-viscosity diagrams. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1980, no. 9, pp. 167–168. (In Russ.).
20. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I., Upolovnikova A.G., Konyshv A.A. Equilibrium distribution of boron between metal of Fe-C-Si-Al system and boron slag. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 9, pp. 752–758. (In Russ.).

Funding. The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant N-08 19-08-00825.

Information about the authors:

A.G. Upolovnikova, *Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher*
(upol.ru@mail.ru)

A.A. Babenko, *Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Nonferrous Metals* (babenko251@gmail.com)

L.A. Smirnov, *Academician, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher*
(sekretar@uim-stavan.ru)

Received January 23, 2020

Revised February 4, 2020

Accepted February 7, 2020