



Оригинальная статья

УДК 669.187.28.539.55

DOI 10.17073/0368-0797-2021-8-581-587



ПРЯМОЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛИ ЦЕРИЕМ ПОД ШЛАКАМИ СИСТЕМЫ $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ВОССТАНОВИТЕЛЯМИ

А. Г. Уполовникова, А. А. Бабенко, Л. А. Смирнов, Л. Ю. Михайлова

■ Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

Аннотация. Оценка возможности прямого микролегирования стали церием выполнена с помощью термодинамического моделирования восстановления церия из шлаков системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3$, содержащих 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO , дополнительными присадками восстановителей (алюминия или ферросиликоалюминия), при температурах 1550 и 1650 °С с использованием программного комплекса HSC 6.1 Chemistry (Outokumpu). Показано, что в зависимости от дополнительных присадок алюминия или ферросиликоалюминия, температуры металла, основности шлака и содержания оксида церия в металл переходит от 0,228 до 40,5 ppm церия. При дополнительной присадке алюминия из шлака (Y_1), содержащего 1,0 % оксида церия, в металл при 1550 °С переходит 0,228 ppm церия. Повышение температуры системы до 1650 °С сопровождается незначительным увеличением концентрации церия, достигающей не более 0,323 ppm. При присадке в металл ферросиликоалюминия содержание церия в металле выше и составляет 0,402 и 0,566 ppm при 1550 и 1650 °С соответственно. При увеличении до 7,0 % концентрации оксида церия в шлаке (Y_2) наблюдается более существенный прирост содержания церия в металле, достигающий в диапазоне температур 1550 – 1650 °С, 1,65 – 2,31 ppm с присадками алюминия и 2,90 – 4,05 ppm с присадками ферросиликоалюминия. Наиболее ощутимое повышение содержания церия в металле наблюдается с ростом основности шлака. При формировании шлаков в области основности 2 – 3, содержащих 1 – 7 % Ce_2O_3 , равновесная концентрация церия в металле изменяется от 0,5 до 4 ppm с присадками алюминия и 1 – 7 ppm с присадками ферросиликоалюминия при 1550 °С. Смещение шлаков в область повышенной до 3 – 5 основности сопровождается при содержании 3 – 7 % Ce_2O_3 повышением равновесной концентрации церия в металле до 4 – 12 ppm с присадками алюминия и 7 – 20 ppm с присадками ферросиликоалюминия и, как следствие, повышением эффективности протекания процесса восстановления церия.

Ключевые слова: сталь, церий, шлак, основность, оксид церия, фазовый состав, планирование эксперимента, термодинамическое моделирование

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

Для цитирования: Уполовникова А.Г., Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Михайлова Л.Ю. Прямое микролегирование стали церием под шлаками системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ дополнительными восстановителями // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 8. С. 581–587. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-581-587>

Original article

DIRECT MICROALLOYING OF STEEL WITH CERIUM UNDER SLAGS OF $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ SYSTEM WITH ADDITIONAL REDUCING AGENTS

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

■ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

Abstract. An assessment of the possibility of steel direct microalloying with cerium was performed using thermodynamic modeling of cerium reduction from slags of $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3$ system containing 15 % Al_2O_3 and 8 % MgO , additional additives of reducing agents (aluminum or ferrosilicoaluminium), at temperatures of 1550 and 1650 °C using the HSC 6.1 Chemistry (Outokumpu) software package. Depending on the additional additives of aluminum or ferrosilicoaluminium, metal temperature, slag basicity and content of cerium oxide, 0.228 to 40.5 ppm of cerium transfers into the metal. With an additional additive of aluminum from slag (Y_1) containing 1.0 % of cerium oxide, 0.228 ppm of cerium is transferred to the metal at 1550 °C. An increase in the system temperature to 1650 °C is accompanied by a slight increase in cerium content, reaching no more than 0.323 ppm. When added to ferrosilicoaluminium metal, cerium content in the metal is higher and amounts to 0.402 and 0.566 ppm at 1550 and 1650 °C, respectively. When concentration of cerium oxide in the slag (Y_2) increases to 7.0 %, more significant increase in cerium content in the metal is observed, reaching in temperature range of 1550 – 1650 °C, 1.65 – 2.31 ppm with aluminum additives and 2.90 – 4.05 ppm with ferrosilicoaluminium additives. The most noticeable increase in cerium content in the metal is observed with an increase in slag basicity. During formation of slags with basicity of 2 – 3, containing 1 – 7 % Ce_2O_3 , the equilibrium concentration of cerium in the metal varies from 0.5 to 4 ppm with aluminum additives and 1 – 7 ppm

with ferro-silicoaluminium additives at 1550 °C. Slags transfer to the increased (up to 3 – 5) basicity is accompanied by an increase in the equilibrium content of cerium in the metal to 4 – 12 ppm with aluminum additives and 7 – 20 ppm with ferrosilicoaluminium additives at Ce_2O_3 content of 3 – 7 % and, as a result, an increase in efficiency of cerium reduction process.

Keywords: steel, gray, slag, basicity, cerium oxide, phase composition, experiment planning, thermodynamic modeling

Funding: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 19-08-00825.

For citation: Upolovnikova A.G., Babenko A.A., Smirnov L.A., Mikhailova L.Yu. Direct microalloying of steel with cerium under slags of $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ system with additional reducing agents. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 581–587. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-581-587>

ВВЕДЕНИЕ

В связи с увеличением протяженности магистральных газопроводов на территории России все более актуальными являются исследования и разработка трубных сталей с комплексом высоких механических свойств. Одним из направлений решения проблемы производства высокопрочных трубных сталей является микролегирование стали редкоземельными металлами (РЗМ). Микролегирование стали РЗМ обеспечивает необходимый комплекс механических свойств [1 – 5].

Особо отмечается положительное влияние РЗМ на прочность, пластичность, ударную вязкость и стойкость к циклическому растрескиванию трубной стали 17Г1С. Показано, что высокая стойкость к общей и точечной коррозии, а также к сульфидному напряженно-коррозионному разрушению низколегированных сталей и сварных соединений может быть достигнута путем микролегирования стали РЗМ [3]. Срок службы труб из стали 17Г1С с РЗМ увеличивается на стадии роста усталостных трещин вследствие увеличения вязкости при циклическом разрушении стали. Согласно данным работы [4] в результате модифицирования стали марки 17Г1С церием из расчета 0,01 – 0,06 % существенно повысилась хрупкая прочность и достигнуто оптимальное соотношение хрупкой прочности и запаса вязкости. Введение церия и лантана в низкоуглеродистую сталь способствует образованию мелкозернистой структуры, поскольку РЗМ образуют неметаллические включения в расплавленной стали, которые служат гетерогенными центрами зародышеобразования во время затвердевания [5].

Микролегирование стали РЗМ осуществляют, как правило, за счет присадок ферросплавов, использование которых увеличивает себестоимость стали. Одним из направлений решения проблемы себестоимости может быть микролегирование стали РЗМ путем их восстановления из оксидных систем. Кроме того, отмечается положительное влияние Ce_2O_3 на физико-химические и рафинировочные свойства шлаков $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, структуру и механические свойства получаемого металла [6 – 15].

Так, добавление к шлаку Ce_2O_3 снижает активность Al_2O_3 из-за образования соединения $\text{Ce}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ [6] и тем самым позволяет повысить поглощаемость включений Al_2O_3 рафинирующим шлаком [9]. Показано, что температура плавления и вязкость шлака снижаются

с увеличением количества добавок Ce_2O_3 с массовым соотношением $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ на уровне 1,57. Диапазон вязкости шлаковой системы $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3$ составляет от 0,289 до 0,497 Па·с при 1500 °C [7]. Микроструктура выплавленного металла при добавлении оксидов РЗМ в шлак измельчается и состоит из феррита и небольшого количества перлита. Полученный металл характеризуется наименьшим (5 – 10 мкм) размером зерна при добавках в шлак оксида РЗМ в количестве 5,94 % (по массе) [8].

Добавление оксидов редкоземельных элементов в шлаки состава $\text{CaO} - \text{SiO}_2$ эффективно для увеличения сульфидной емкости. Например, добавка 1,83 % Ce_2O_3 (мол.) увеличивает сульфидную емкость примерно на 50 % для шлака основности 1,22 [10].

Кроме того, отмечается возможность восстановления церия из шлака изучаемой оксидной системы и растворения церия в стали в количестве 6 ppm, что имело эффект микролегирования в стали и модификации включения Al_2O_3 [11]. Термодинамический анализ показал, что включения типа $\text{Ce}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ будут образовываться с содержанием церия в диапазоне от 6,7 ppm до 3,6 ppm, когда содержание алюминия составляет 0,01 % (по массе) [12]. В работах [16, 17] подтверждена принципиальная возможность развития процесса восстановления церия из шлаков системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ 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 настоящей работе предпринята попытка, используя результаты термодинамического моделирования, оценить возможность и полноту протекания реакций восстановления церия из шлаков системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ дополнительными присадками в металл алюминия или ферросиликоалюминия при температурах 1550 и 1650 °C.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Оценка возможности прямого микролегирования стали церием выполнена с помощью термодинамического моделирования восстановления церия из шлаков системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3$, содержащих 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO, дополнительными присадками алюми-

ния или ферросиликоалюминия при температурах 1550 и 1650 °С. Использован программный комплекс HSC 6.1 Chemistry (Outokumpu), основанный на минимизации энергии Гиббса и вариационных принципах термодинамики [16–18], применен метод симплексных решеток планирования [19, 20]. При построении матрицы планирования на переменные составляющие системы CaO–SiO₂–Ce₂O₃–Al₂O₃–MgO были наложены ограничения: CaO/SiO₂ = 2 ÷ 5; 15 % Al₂O₃; 8 % MgO; 1–7 % Ce₂O₃. В результате наложения ограничений на изменение компонентов в системе исследованная область представлена локальным симплексом в виде двух концентрационных треугольников, вершинами которых являются псевдокомпоненты Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ (рис. 1).

Термодинамическое моделирование выполнено для рабочей массы тела 100 кг (90 % металла и 10 % шлака) при давлении воздуха окружающей среды в системе 0,1 МПа. Химический состав шлака в точках локального симплекса и результаты моделирования равновесного содержания церия в металле, содержащем 0,06 % С, 0,25 % Si и 0,05 % Al, приведены в таблице. В металл добавляли присадки вторичного алюминия или ферросиликоалюминия в количествах, обеспечивающих концентрацию алюминия в металле 0,15 и 0,20 % соответственно.

Химический состав шлака в точках локального симплекса и результаты термодинамического моделирования равновесного содержания церия в металле

Chemical composition of the slag at the local simplex points and results of thermodynamic modeling of cerium equilibrium content in the metal

№	Индекс шлака	Химический состав шлака, % (по массе)					Содержание церия, ppm, при температуре, °С			
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Ce ₂ O ₃	присадка алюминия		присадка ферросиликоалюминия	
							1550	1650	1550	1650
1	pY ₁	50,7	25,3	15,0	8,0	1,0	0,228	0,323	0,402	0,566
2	Y ₂	63,3	12,7	15,0	8,0	1,0	2,920	4,060	4,960	6,900
3	Y ₃	58,3	11,7	15,0	8,0	7,0	17,700	24,000	29,900	40,500
4	Y ₄	46,7	23,3	15,0	8,0	7,0	1,650	2,310	2,900	4,050
5	Y ₁₃	59,1	16,9	15,0	8,0	1,0	1,320	1,850	2,260	3,1600
6	Y ₁₃₂	56,0	16,0	15,0	8,0	5,0	6,310	8,740	10,800	14,90
7	Y ₂₂	60,0	12,0	15,0	8,0	5,0	13,300	18,200	22,500	30,700
8	Y ₁₂	54,9	21,1	15,0	8,0	1,0	0,586	0,823	1,010	1,410
9	Y ₁₂₁	53,2	20,8	15,0	8,0	3,0	1,660	2,320	2,870	3,990
10	Y ₂₁	61,6	12,4	15,0	8,0	3,0	8,260	11,400	14,000	19,300
11	Y ₁₃₁	57,5	16,5	15,0	8,0	3,0	3,840	5,340	6,5600	9,100
12	Y ₄₁	48,0	24,0	15,0	8,0	5,0	1,150	1,630	2,04	2,850
13	Y ₃₁	54,5	15,5	15,0	8,0	7,0	8,730	12,000	14,900	20,400
14	Y ₄₂	49,4	24,6	15,0	8,0	3,0	0,698	0,985	1,230	1,720
15	Y ₃₂	50,5	19,5	15,0	8,0	7,0	3,970	5,530	6,860	9,490
16	Y ₁₂₂	51,9	20,1	15,0	8,0	5,0	2,830	3,950	4,890	6,780

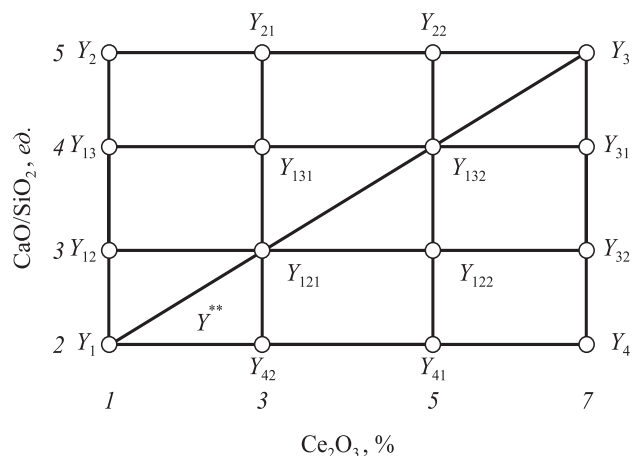


Рис. 1. Область варьирования состава шлака локального симплекса

Fig. 1. Area of variation of the slag composition of the local simplex

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты термодинамического моделирования восстановления церия из шлаков системы CaO–SiO₂–Ce₂O₃, содержащих 15 % Al₂O₃ и 8 % MgO, приведены в таблице и представлены в виде диаграмм состав – свойство (равновесное содержание церия в металле)

при температурах 1550 и 1650 °С с присадками алюминия (рис. 2) и ферросиликоалюминия (рис. 3) (на диаграммах синими линиями обозначены изолинии равновесного содержания церия, тонкими черными линиями – основность шлака ($B = \text{CaO}/\text{SiO}_2$), цифрами – их величина). Анализ диаграмм позволяет количественно оценить влияние температуры металла и химического состава шлака на содержание церия.

В зависимости от присадок восстановителей (алюминия или ферросиликоалюминия), температуры металла, основности шлака и содержания оксида церия в металл переходит от 0,228 до 40,5 ppm церия (см. таблицу). При дополнительной присадке алюминия из шлака (Y_1), содержащего 1,0 % оксида церия, в металл при температуре 1550 °С переходит 0,228 ppm церия. Повышение температуры системы до 1650 °С сопровождается незначительным увеличением концентрации церия, достигающей не более 0,323 ppm. При присад-

ке в металл ферросиликоалюминия содержание церия в металле выше и составляет 0,402 и 0,566 ppm при температуре 1550 и 1650 °С соответственно. При увеличении до 7,0 % концентрации оксида церия в шлаке (Y_2) наблюдается более существенный прирост содержания церия в металле, достигающий в диапазоне температур 1550 – 1650 °С 1,65 – 2,31 ppm при использовании присадок алюминия и 2,9 – 4,05 ppm при использовании присадок ферросиликоалюминия.

Наиболее ощутимое повышение содержания церия в металле наблюдается с ростом основности шлака. При формировании шлаков, содержащих 1 – 7 % Ce_2O_3 , в области основности 2 – 3 равновесная концентрация церия в металле изменяется от 0,5 до 4 ppm при использовании присадок алюминия (рис. 2, а) и 1 – 7 ppm при использовании присадок ферросиликоалюминия (рис. 3, а) при температуре 1550 °С. Смещение шлаков в область повышенной до 3 – 5 основности сопровож-

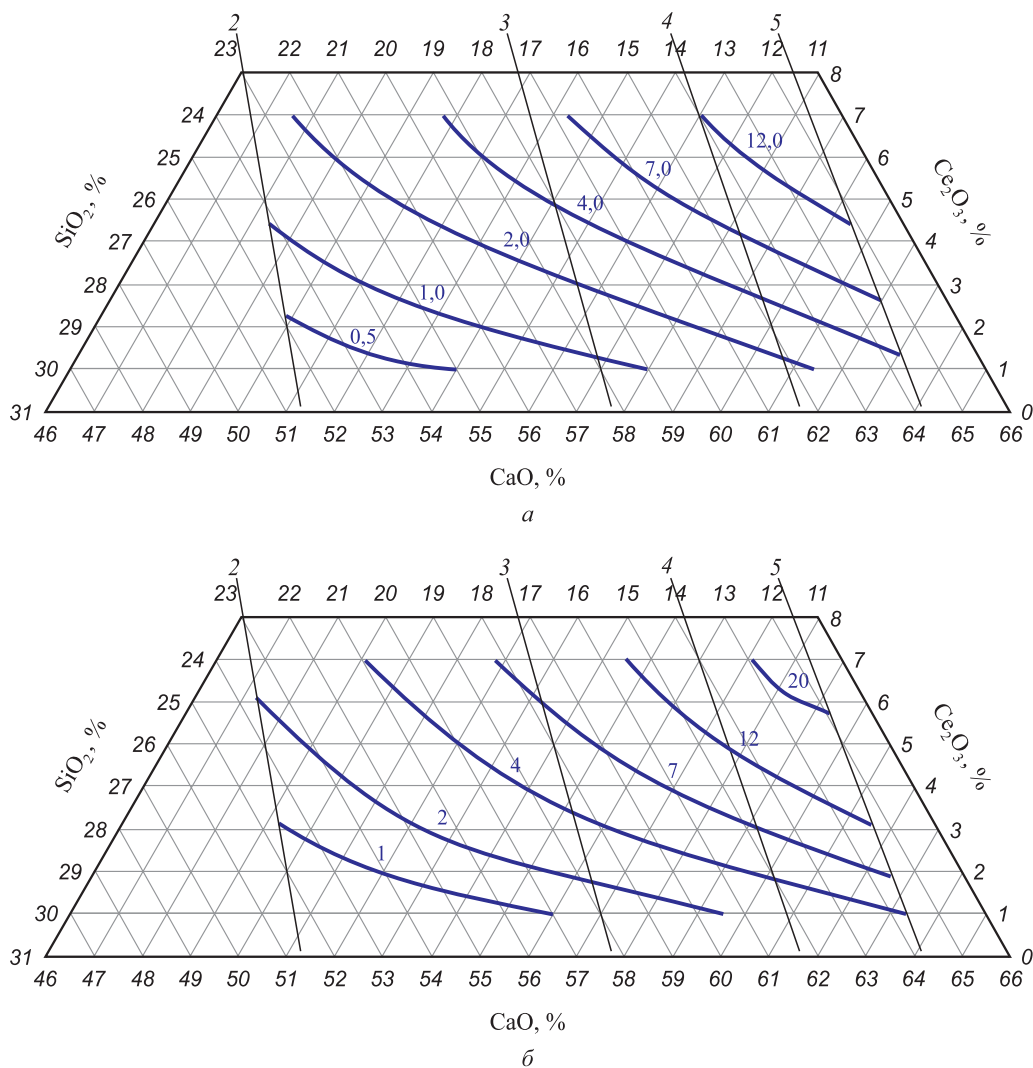


Рис. 2. Диаграмма равновесного содержания церия в металле, выдержанном под шлаком системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Ce}_2\text{O}_3$, содержащим 15 % Al_2O_3 и 8 % MgO , при температуре 1550 °С (а) и 1650 °С (б) с присадкой алюминия

Fig. 2. Diagram of cerium equilibrium content in the metal held under the slag of $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Ce}_2\text{O}_3$ system containing 15 % Al_2O_3 and 8 % MgO at temperatures of 1550 °С (а) and 1650 °С (б) with an aluminum additive

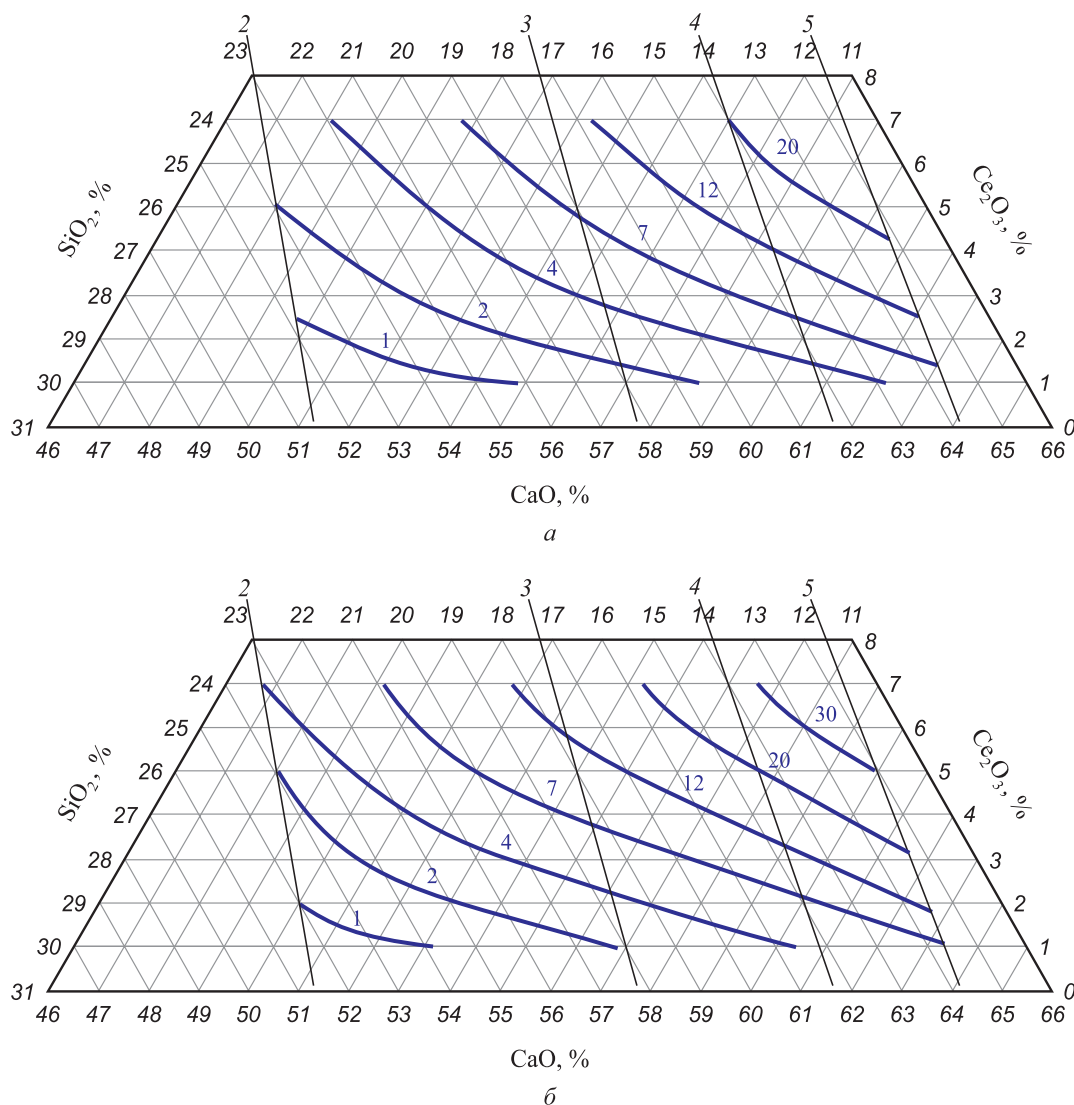


Рис. 3. Диаграмма равновесного содержания церия в металле, выдержанном под шлаком системы CaO–SiO₂–Ce₂O₃, содержащим 15 % Al₂O₃ и 8 % MgO, при температуре 1550 °C (а) и 1650 °C (б) с присадкой ферросиликоалюминия

Fig. 3. Diagram of cerium equilibrium content in the metal held under the slag of CaO–SiO₂–Ce₂O₃ system containing 15 % Al₂O₃ and 8 % MgO at temperatures of 1550 °C (a) and 1650 °C (b) with ferrosilicoaluminum additive

дается при содержании 3 – 7 % Ce₂O₃ повышением равновесной концентрации церия в металле до 4 – 12 ppm при использовании присадок алюминия и 7 – 20 ppm при использовании присадок ферросиликоалюминия и, как следствие, повышением эффективности протекания процесса восстановления церия. При температуре 1650 °C равновесная концентрация церия в металле в области основности 2 – 3 и содержании 1 – 7 % Ce₂O₃ изменяется в пределах 1 – 7 ppm при использовании присадок алюминия (рис. 2, б) и 1 – 12 ppm при использовании присадок ферросиликоалюминия (рис. 3, б). Смещение шлаков в область повышенной до 3 – 5 основности сопровождается при содержании 3 – 7 % Ce₂O₃ повышением равновесной концентрации церия в металле до 4 – 20 ppm при использовании присадок алюминия и 7 – 30 ppm при использовании присадок ферросиликоалюминия.

Положительное влияние температурного фактора, основности формируемых шлаков и содержания оксида церия в изучаемом диапазоне химического состава на процесс восстановления церия было качественно объяснено особенностями фазового состава формируемых шлаков и термодинамики химических реакций восстановления церия алюминием, растворенным в металле [16, 17].

Выводы

Установлено, что в зависимости от температуры металла, основности шлака и содержания оксида церия в сталь, содержащую 0,06 % углерода, 0,25 % кремния и 0,05 % алюминия, при использовании дополнительных присадок вторичного алюминия или ферросиликоалюминия, обеспечивающими концентрацию

алюминия в металле 0,15 и 0,20 % соответственно, переходит от 0,228 до 40,5 ppm церия. Положительное влияние температурного фактора, основности шлаков и содержания оксида церия в изучаемом диапазоне хи-

мического состава на процесс восстановления церия обусловлена особенностями фазового состава формируемых шлаков и термодинамики реакций восстановления церия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Гольдштейн Я.Г., Ефимова Л.Б. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. М.: Металлургия, 1986. 271 с.
2. Пилушенко В.Л., Вихлевщук В.А. Научные и технологические основы микролегирования стали. М.: Металлургия, 1994. 384 с.
3. Petryna D.Yu., Kozak O.L., Shulyar B.R., Petryna Yu.D., Hredil M.I. Influence of alloying by rare-earth metals on the mechanical properties of 17G1S pipe steel // *Materials Science*. 2013. Vol. 4. No. 5. P. 575–581. <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9540-3>
4. Макаренко В.Д., Киндрачук М.В., Бондарев А.А., Муравьев К.А. Влияние церия на механические и коррозионные свойства низколегированных трубных сталей // *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2014. № 3. С. 24–29.
5. 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. 49. No. 10. P. 4495–4508. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4796-8>
6. Yang X., Long H., Cheng G., Wu C., Wu B. Effect of refining slag containing Ce₂O₃ on steel cleanliness // *Journal of Rare Earths*. 2011. Vol. 29. No. 11. P. 1079–1083. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60602-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60602-3)
7. Wu C., Cheng G., Long H., Yang X. A thermodynamic model for evaluation of mass action concentrations of Ce₂O₃-contained slag systems based on the ion and molecule coexistence theory // *High Temperature Materials and Processes*. 2013. Vol. 32. No. 3. P. 207–214. <https://doi.org/10.1515/htmp-2012-0119>
8. Feifei H., Bo L., Da L., Ligang L., Ting D., Xuejun R., Qingxiang Y. 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. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60507-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60507-8)
9. Guo M.X., Suito H. Effect of dissolved cerium on austenite grain growth in an Fe – 0.20 mass % C – 0.02 mas % P alloy // *ISIJ International*. 1999. Vol. 39. No. 11. P. 1169–1175. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.39.1169>
10. Ueda S., Morita K., Sano N. Activity of AlO_{1.5} for the CeO_{1.5}–CaO–AlO_{1.5} system at 1773 K // *ISIJ International*. 1998. Vol. 38. No. 12. P. 1292–1296.
11. Wu C., Cheng G., Long H. Effect of Ce₂O₃ and CaO/Al₂O₃ on the phase, melting temperature and viscosity of CaO–Al₂O₃–10 mass % SiO₂ based slags // *High Temperature Materials and Processes*. 2014. Vol. 33. No. 1. P. 77–84. <https://doi.org/10.1515/htmp-2013-0025>
12. 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. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60507-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60507-8)
13. Wang L.J., Wang Q., Li J.M., Chou K.C. Dissolution mechanism of Al₂O₃ in refining slags containing Ce₂O₃ // *Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy*. 2016. Vol. 52. No. 1. P. 35–40. <https://doi.org/10.2298/JMMB140706004W>
14. Anacleto N.M., Lee H.-G., Hayes P.C. Sulphur partition between CaO–SiO₂–Ce₂O₃ slags and carbon-saturated iron // *ISIJ International*. 1993. Vol. 33. No. 5. P. 549–555. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.549>
15. Михайлов Г.Г., Макровец Л.А., Смирнов Л.А. Термодинамическое моделирование фазовых равновесий с оксидными системами, содержащими РЗМ. Сообщение 3. Диаграммы состояния
1. Gol'dshtein Ya.G., Efimova L.B. *Modification and Microalloying of Cast Iron and Steel*. Moscow: Metallurgiya, 1986, 271 p. (In Russ.).
2. Pilyushenko V.L., Vikhlevshchuk V.A. *Scientific and Technological Foundations of Steel Microalloying*. Moscow: Metallurgiya, 1994, 384 p. (In Russ.).
3. Petryna D.Yu., Kozak O.L., Shulyar B.R., Petryna Yu.D., Hredil M.I. Influence of alloying by rare-earth metals on the mechanical properties of 17G1S pipe steel. *Materials Science*. 2013, vol. 4, no. 5, pp. 575–581. <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9540-3>
4. Makarenko V.D., Kindrachuk M.V., Bondarev A.A., Murav'ev K.A. Influence of cerium on mechanical and corrosion properties of low alloyed pipe steels. *Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroyeniye*. 2014, no. 3, pp. 24–29. (In Russ.).
5. 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. 49, no. 10, pp. 4495–4508. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4796-8>
6. Yang X., Long H., Cheng G., Wu C., Wu B. Effect of refining slag containing Ce₂O₃ on steel cleanliness. *Journal of Rare Earths*. 2011, vol. 29, no. 11, pp. 1079–1083. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60602-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60602-3)
7. Wu C., Cheng G., Long H., Yang X. A thermodynamic model for evaluation of mass action concentrations of Ce₂O₃-contained slag systems based on the ion and molecule coexistence theory. *High Temperature Materials and Processes*. 2013, vol. 32, no. 3, pp. 207–214. <https://doi.org/10.1515/htmp-2012-0119>
8. Feifei H., Bo L., Da L., Ligang L., Ting D., Xuejun R., Qingxiang Y. 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. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60507-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60507-8)
9. Guo M.X., Suito H. Effect of dissolved cerium on austenite grain growth in an Fe – 0.20 mass % C – 0.02 mas % P alloy. *ISIJ International*. 1999, vol. 39, no. 11, pp. 1169–1175. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.39.1169>
10. Ueda S., Morita K., Sano N. Activity of AlO_{1.5} for the CeO_{1.5}–CaO–AlO_{1.5} system at 1773 K. *ISIJ International*. 1998, vol. 38, no. 12, pp. 1292–1296.
11. Wu C., Cheng G., Long H. Effect of Ce₂O₃ and CaO/Al₂O₃ on the phase, melting temperature and viscosity of CaO–Al₂O₃–10 mass % SiO₂ based slags. *High Temperature Materials and Processes*. 2014, vol. 33, no. 1, pp. 77–84. <https://doi.org/10.1515/htmp-2013-0025>
12. 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. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60507-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60507-8)
13. Wang L.J., Wang Q., Li J.M., Chou K.C. Dissolution mechanism of Al₂O₃ in refining slags containing Ce₂O₃. *Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy*. 2016, vol. 52, no. 1, pp. 35–40. <https://doi.org/10.2298/JMMB140706004W>
14. Anacleto N.M., Lee H.-G., Hayes P.C. Sulphur partition between CaO–SiO₂–Ce₂O₃ slags and carbon-saturated iron. *ISIJ International*. 1993, vol. 33, no. 5, pp. 549–555. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.549>
15. Mikhailov G.G., Makrovets L.A., Smirnov L.A. Thermodynamic modeling of the phase equilibria with oxide systems containing rare-earth metals. Report 3. State diagrams of oxide systems with Ce₂O₃

- оксидных систем с Ce_2O_3 и CeO_2 // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2015. Т. 15. № 4. С. 5–14.
<https://doi.org/10.14529/met150401>
16. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Nechvoglod O.V. Термодинамическое моделирование восстановления церия из шлаков системы $CaO - SiO_2 - Ce_2O_3 - 15\% Al_2O_3 - 8\% MgO$ алюминием, растворенным в металле // Бултеровские сообщения. 2019. Т. 59. № 9. С. 140–145.
 17. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Михайлова Л.Ю. Построение диаграмм равновесного содержания церия в металле под шлаком системы $CaO - SiO_2 - Ce_2O_3 - 15\% Al_2O_3 - 8\% MgO$ // Бултеровские сообщения. 2019. Т. 60. № 10. С. 140–145.
 18. Babenko A.A., Жучков В.И., Леонтьев Л.И., Уполовникова А.Г., Коньшев А.А. Равновесное распределение бора между металлом системы Fe-C-Si-Al и боросодержащим шлаком // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 9. С. 752–758.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-7-752-758>
 19. Планирование эксперимента при исследовании физико-химических свойств металлургических шлаков. Методическое пособие / В.А. Ким, Э.И. Николай, А.А. Акбердин, И.С. Куликов. Алма-Ата: Наука, 1989. 116 с.
 20. Ким В.А., Акбердин А.А., Куликов И.С., Николай Э.И. Использование метода симплексных решеток для построения диаграмм типа состав – вязкость // Известия вузов. Черная металлургия. 1980. № 9. С. 167.
 - and CeO_2 . *Vestnik YuUrGU. Seriya "Metallurgiya"*. 2015, vol. 15, no. 4, pp. 5–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/met150401>
 16. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Nechvoglod O.V. Thermodynamic modeling of cerium reduction from slags of $CaO - SiO_2 - Ce_2O_3 - 15\% Al_2O_3 - 8\% MgO$ 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 diagrams of equilibrium content of cerium in metal under slag of $CaO - SiO_2 - Ce_2O_3 - 15\% Al_2O_3 - 8\% MgO$ system. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2019, vol. 60, no. 10, pp. 140–145. (In Russ.).
 18. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I., Upolovnikova A.G., Konyshev 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.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-7-752-758>
 19. Kim V.A., Nikolai E.I., Akberdin A.A., Kulikov I.S. *Planning an Experiment in Study of Physicochemical Properties of Metallurgical Slags. Manual*. Alma-Ata: Nauka, 1989, 116 p. (In Russ.).
 20. Kim V.A., Akberdin A.A., Kulikov I.S., Nikolai E.I. Use of simplex lattice method to construct composition-viscosity diagrams. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1980, no. 9, pp. 167. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алена Геннадьевна Уполовникова, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-6698-5565

E-mail: upol.ru@mail.ru

Анатолий Алексеевич Бабенко, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0003-0734-6162

E-mail: babenko251@gmail.com

Леонид Андреевич Смирнов, академик РАН, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-6324-4032

E-mail: uim@ural.ru

Людмила Юрьевна Михайлова, к.т.н., научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-9154-8244

E-mail: ferrostal@bk.ru

Alena G. Upolovnikova, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0002-6698-5565

E-mail: upol.ru@mail.ru

Anatolii A. Babenko, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0003-0734-6162

E-mail: babenko251@gmail.com

Leonid A. Smirnov, Academician, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0002-6324-4032

E-mail: uim@ural.ru

Ljudmila Yu. Mikhailova, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0002-9154-8244

E-mail: ferrostal@bk.ru

ВКЛАД АВТОРОВ:

Уполовникова А.Г. – термодинамический расчет, анализ, написание текста статьи.

Бабенко А.А. – анализ, корректировка текста статьи.

Смирнов Л.А. – корректировка статьи, научное руководство.

Михайлова Л.Ю. – построение диаграмм, оформление статьи.

Поступила в редакцию 23.03.2020

После доработки 13.04.2020

Принята к публикации 12.05.2021

Received 23.03.2020

Revised 13.04.2020

Accepted 12.05.2021