

УДК 669.187.25

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПРЯМОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ МАРГАНЦЕМ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Дмитриенко А.В., аспирант кафедры металлургии черных

металлов (dmvliv@gmail.com)

Протопопов Е.В., д.т.н., профессор кафедры металлургии черных

металлов (protopopov@sibsiu.ru)

Дмитриенко В.И., к.т.н., доцент кафедры металлургии черных

металлов (dmvliv@gmail.com)

Якушевич Н.Ф., д.т.н., профессор кафедры металлургии цветных металлов

и химической технологии (kafcmets@sibsiu.ru)

Горюшкин В.Ф., д.х.н., профессор кафедры естественнонаучных

дисциплин (koax@sibsiu.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

Аннотация. Одним из путей повышения эффективности производства в черной металлургии является снижение расхода дорогостоящих и дефицитных ферросплавов. Большие возможности в этом направлении содержатся в технологии прямого легирования стали оксидными материалами. В настоящей работе проведено термодинамическое исследование процесса прямого легирования стали марганцевыми оксидными материалами (марганцевой рудой) и промышленное опробование этой технологии. Рассмотрены два варианта технологии прямого легирования: в окислительных условиях при плавке стали в современной 100-т электросталеплавильной печи и в восстановительных условиях при обработке стали на агрегате ковш – печь (АКП). Термодинамическое моделирование окислительного варианта технологии с помощью программного комплекса «Астра» показало, что существует возможность повысить содержание марганца в металле при вводе марганцевой руды. Определяющим фактором в этом процессе является текущее содержание углерода в стали. Для средне- и высокоуглеродистых сталей содержание марганца может быть повышено до 0,6 % и более. Для низкоуглеродистых сталей количество остаточного марганца определяется содержанием углерода в конце продувки кислородом. Приведена графическая зависимость. В восстановительных условиях основной реакцией процесса прямого легирования является $MnO + Si = Mn + SiO_2$. Термодинамический анализ дает довольно приблизительные данные, поэтому был применен полуэмпирический анализ, основанный на полученном из опытных промышленных результатов соотношении количеств оксидов FeO и MnO, содержащихся в шлаке в конце обработки стали на АКП. Такой вариант оценки процесса представляется возможным, так как система металл – шлак при длительной обработке стали на АКП приближается к равновесию. Используя это соотношение, а также условия сохранения исходной основности шлака и поддержания содержания FeO в шлаке на уровне около 1 %, было составлено балансовое уравнение, описывающее процесс прямого легирования марганцевой рудой в ковше. Уравнение позволило выполнить расчет основных технологических параметров процесса прямого легирования марганцевой рудой применительно к условиям производства. Получена хорошая сходимост теоретических расчетов и практических данных.

Ключевые слова: термодинамический анализ, прямое легирование, оксид марганца, внепечная обработка, марганцевая руда, продувка кислородом, шлак.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-933-938

ВВЕДЕНИЕ

Применение оксидных марганцевых материалов с целью прямого легирования стали вызывает большой интерес, поскольку позволяет получить значительный экономический эффект при сокращении расхода дорогостоящих марганцевых ферросплавов. При этом хорошо известно, что использование традиционных продуктов технологии производства марганцевых сплавов для раскисления и легирования стали обеспечивает сквозное извлечение марганца не более 50 % [1]. Особая привле-

кательность этого направления состоит в том, что для подобных технологий могут быть привлечены ресурсы небольших месторождений регионального значения.

Различные варианты технологии прямого легирования были опробованы в условиях производства стали в конверторах и электросталеплавильных печах. Выполнен большой объем исследований технологии прямого легирования. К наиболее известным работам по изучению использования оксидных материалов для легирования сталей массового назначения можно отнести работы [2 – 6].

В условиях дефицита ресурсов наиболее активно вопросами прямого легирования при выплавке сталей занимается Япония. В настоящее время в Японии около 50 % марганца вводят в сталь в виде марганцевой руды [7]. Большинство работ по использованию марганцевой руды ориентировано на выплавку стали в конверторах [8 – 13]. Значительный объем исследований по изучению процессов прямого легирования в условиях электросталеплавильного процесса выполнен и обобщен в работе [14].

Наиболее технологично и просто прямое легирование можно реализовать путем присадки агломерата или богатой марганцевой руды в печь или ковш, расплавления и обработки восстановителем. Таким образом, применять прямое легирование можно как в окислительных, так и в восстановительных условиях при внепечной обработке стали.

ОЦЕНКА ПРЯМОГО ЛЕГИРОВАНИЯ В ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Для оценки процесса прямого легирования стали марганцем проведено термодинамическое моделирование с использованием программного комплекса «Астра» [15] для условий введения в печь марганцевой руды Дурновского месторождения (Кемеровская область). Исходные данные для моделирования: металл до присадки марганцевой руды содержал до 0,8 % С, ~0,2 % Мп; содержание основных компонентов в руде Дурновского месторождения: 47 % МпО, 14 % FeO, 21 % SiO₂, 2 % CaO, 2 % MgO, 4 % Al₂O₃; количество металла в дуговой сталеплавильной (ДСП) печи 100 т; количество исходного шлака в печи 5 т; состав шлака в печи: 20 % FeO, 45 % CaO, 16 % SiO₂, 8 % MgO, 3 % Al₂O₃, 8 % МпО; количество присаживаемой руды 400 – 1200 кг; температура процесса 1873 К.

Результаты моделирования процесса прямого легирования стали в окислительный период плавки при различном количестве присаживаемой марганцевой руды представлены на рис. 1.

Полученные данные показывают, что при выплавке стали в ДСП существует технологическая возможность повышения текущего содержания марганца в металле. Присадка руды в объемах, приведенных в расчетах, не вызывает технических затруднений и может быть легко осуществлена через свод печи. Однако для определения оптимального количества вводимой руды необходимо обязательно учитывать, при каком содержании углерода металл будет выпускаться из печи. При выплавке средне- и особенно высокоуглеродистых сталей содержание марганца в металле за счет прямого легирования может быть доведено практически до требований, предъявляемым к углеродистым и низколегированным немарганцовистым сталям (0,5 – 0,6 %).

Для низкоуглеродистых сталей присадки большого количества руды неэффективны, так как значительная

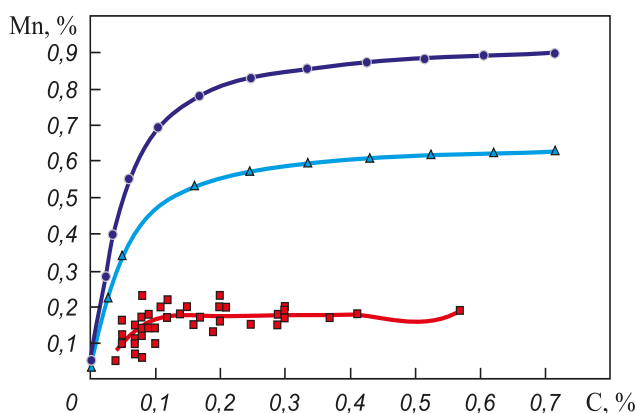


Рис. 1. Изменение содержания марганца в металле в ходе продувки при различном количестве присаживаемой марганцевой руды:

▲ – 400 кг; ● – 1200 кг; ■ – без присадок руды

Fig. 1. Changes in manganese content in metal during lancing with different amount of introduced manganese ore:

▲ – 400 kg; ● – 1200 kg; ■ – without ore additives

часть восстановленного марганца будет потеряна на заключительном этапе продувки металла кислородом. Как видно (рис. 1), для повышения содержания остаточного марганца примерно в два раза достаточно присаживать приблизительно 200 – 400 кг марганцевой руды.

Необходимо отметить, что при реализации продувки металла кислородом в ДСП, как правило, производится интенсивная подача порошкового углеродсодержащего материала на шлак, что, например, по данным работы [16] способствует снижению содержания МпО в шлаке.

Одним из важнейших показателей эффективности реализации процесса прямого легирования является извлечение марганца из оксидного материала. Показателем извлечения марганца может быть принят коэффициент извлечения, равный отношению количества марганца, усвоенного металлом, к количеству марганца, внесенного рудой. Теоретически этот коэффициент можно рассчитать с использованием данных равновесного распределения марганца между металлом и шлаком.

Наиболее совершенным методом оценки достижения равновесия в системе металл–шлак сталеплавильных систем может быть подход теории регулярных ионных растворов [17 – 19], хотя такой подход не дает достаточно точных данных [17]. При дальнейшем анализе для оценки пределов возможностей технологии прямого легирования использованы результаты проведенных промышленных опытных плавов.

Технология выплавки стали в ДСП имеет следующие особенности: металл расплавляется, проводится дефосфорация, обезуглероживание, нагрев до заданной температуры. При этом используются средства интенсификации плавки: фурмы-горелки и фурмы для вдувания углеродсодержащего порошка для вспени-

вания шлака, после чего полупродукт выпускается в ковш и проводится внепечная обработка на АКП. При этом на выпуске производится отсечка шлака с помощью эркерного устройства печи. Для формирования активного ковшевого шлака на выпуске дополнительно присаживается шлакообразующая смесь на основе извести и плавикового шпата. Для предварительного раскисления металла параллельно присаживаются ферросплавы. После внепечной обработки на АКП металл разливают на МНЛЗ.

На опытных плавках марганцевую руду Дурновского месторождения присаживали в ковш совместно со шлакообразующей смесью в количестве 500 – 900 кг. При проведении опытных плавов углеродистых сталей выполняли предварительную сушку марганцевой руды. Обработаны результаты 50 проведенных опытных плавов без нарушения технологических инструкций: усредненный коэффициент извлечения марганца составил 0,98. Это является достаточно хорошим результатом и свидетельствует о стабильности процесса.

Сквозное усвоение кремния из кремнийсодержащих ферросплавов в проведенном исследовании составило 63 %. На плавках текущего производства без использования марганцевой руды этот показатель находится на уровне 67 %.

Прирост содержания фосфора за период внепечной обработки составил менее 0,002 %. Это значение на уровне или даже ниже показателя плавов текущего производства.

Необходимо отметить, что основной проблемой применения марганцевых руд и концентратов является довольно низкое (примерно до 40 %) содержание основного легирующего компонента (марганца) в пересчете на металлический марганец [20].

Таким образом, вместе с марганцем в металлургическую систему попадает большое количество оксидов, то есть шлакообразующих составляющих.

ОЦЕНКА ПРЯМОГО ЛЕГИРОВАНИЯ В ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Для оценки технологических пределов использования марганцевых руд для прямого легирования необходимо обязательно учитывать сопутствующие химические соединения, содержащиеся в руде.

Исходные данные и допущения для проведения оценочных расчетов: содержание основных компонентов в марганцевой руде: 47 % MnO; 14 % FeO; 21 % SiO₂; 2 % CaO; 2 % MgO; 4 % Al₂O₃; количество металла 100 т; масса исходного шлака в ковше 2 т; содержание основных компонентов в исходном шлаке в ковше: 0,79 % MnO; 1,34 % FeO; 20,2 % SiO₂; 51,5 % CaO; 8 % MgO; 5 % Al₂O₃.

Восстановление марганца и оксида железа из шлака и руды происходит за счет присадки кремния. Важным моментом в расчетах является оценка содержания окси-

дов марганца в шлаке по окончании внепечной обработки стали. Для этого по данным промышленных плавов провели оценку соотношения количеств оксидов FeO и MnO в ковшевом шлаке.

Полученные результаты приведены на рис. 2.

Как и ожидалось, между содержаниями оксидов FeO и MnO в шлаке существует характерная зависимость, которая позволяет по содержанию одного оксида предсказать содержание второго. Для оценочных расчетов принято, что содержание оксида FeO в шлаке АКП составляет 1,34 % (усредненное значение по опытным плавкам), а равновесное содержание оксида MnO составляет 0,79 % (расчетная величина в соответствии с уравнением, представленным на рис. 2). Все поступившие оксиды FeO и MnO (выше 1,34 % FeO и 0,79 % MnO), попадающие в шлак с марганцевой рудой, будут восстановлены кремнием, специально присаживаемым для этой цели в расплав. Основность шлака должна остаться на исходном уровне, для чего в ковш необходимо присаживать соответствующее количество извести. Указанные особенности технологии следует учитывать. Это необходимо для проведения полноценной десульфурации металла.

С учетом всех вышеперечисленных условий составлено балансовое уравнение, по которому рассчитаны основные параметры процесса прямого легирования при различных значениях количества присаживаемой марганцевой руды. Расчетные данные представлены на рис. 3.

Выводы

Процесс прямого легирования эффективен в широком диапазоне количества присаживаемой марганцевой руды, что позволяет легировать углеродистые и низколегированные стали с коэффициентом усвоения марганца не менее 0,97. Основным фактором, ограничивающим применение технологии прямого

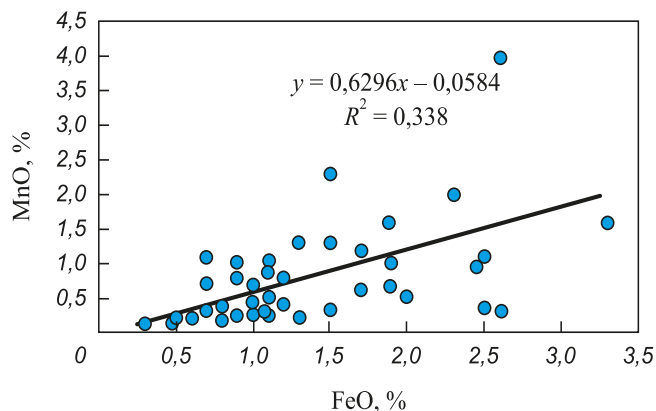


Рис. 2. Соотношение между содержаниями оксидов FeO и MnO в ковшевом шлаке при обработке на АКП

Fig. 2. Ratio between contents of FeO and MnO in ladle slag at LF processing

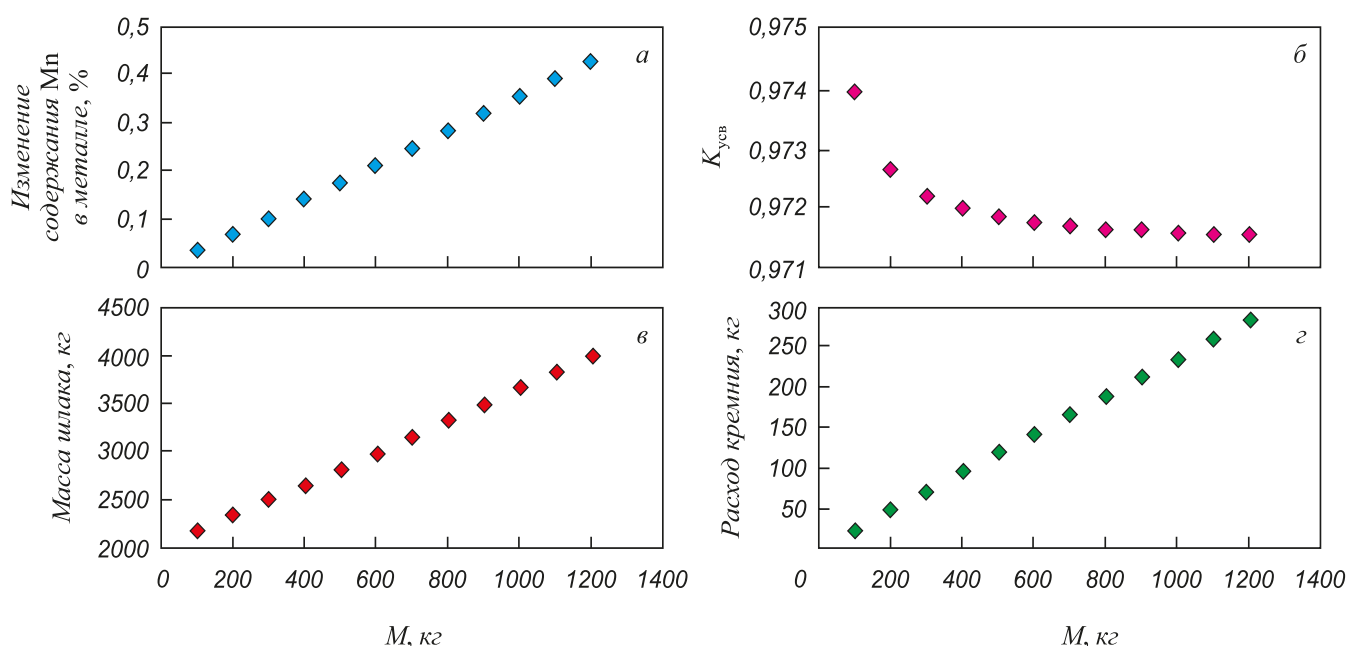


Рис. 3. Изменение содержания марганца в металле (а), изменение коэффициента усвоения ($K_{уcв}$) марганца (б), изменение количества шлака в ковше (в) и расход кремния на восстановление компонентов марганцевой руды (г) в зависимости от количества (M) присаживаемой марганцевой руды

Fig. 3. Change in manganese content in metal (a), change in recovery rate ($K_{уcв}$) of manganese (б), change in amount of slag in the ladle (в) and consumption of silicon for reduction of manganese ore components (г) depending on amount of introduced (M) manganese ore

легирования в условиях обработки стали на АКП, является увеличение количества шлака в ковше. В реальных условиях без дополнительных технологических мероприятий прямое легирование позволит увеличить содержание марганца в металле примерно на 0,3 %. Для достижения больших значений необходимо реализовать дополнительную операцию скачивания шлака из ковша, что осложнит реализацию технологии. Более высокие показатели эффективности можно обеспечить при применении прямого легирования в окислительных условиях с целью повышения содержания остаточного марганца в металле перед внепечной обработкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Булянда А.А., Наконечный А.Я., Мизин В.Г. Экономия марганца в конвертерном производстве стали // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1986. № 3. С. 12 – 13.
- Наконечный А.Я., Урцев В.Н., Афонин С.З., Синяков Р.В., Кудрин В.А., Хабибуллин Д.М., Шмаков А.В. Преимущества использования безотходных и экологически рациональных технологий прямого легирования для комплексного решения проблемы ресурсосбережения и охраны окружающей среды. – В кн.: Труды одиннадцатого конгресса сталеплавыльщиков. – М.: ОАО Черметинформация, 2011. С. 92 – 110.
- Бобкова О.С., Барсегян В.В. Перспективы развития технологий прямого легирования стали из оксидных расплавов // *Металлург*. 2006. № 9. С. 43 – 46.
- Толымбеков М.Ж., Такенов Т.Д., Ахметов А.Б. Прямое легирование стали марганцем. – Алматы: НИЦ «Гылым», 2003. – 304 с.
- Cacir Ali Fuat, Yaman Atilla Afes Tayfuu. Manganfalling aus schwefel sauer Losungen durch induzierte Oxidation // *Chem. Acta Turk*. 1982. Bd. 10. No. 1. P. 51 – 57.
- Черная металлургия зарубежных стран (обзор). Контракт № 062-3/36 от 23.05.96 г. – М.: АООТ «Черметинформация», 1996. – 74 с.
- Ubaruki T., Kanemoto M., Ogatoetal S. Development of smelting Reduction of Iron Ore-an Approach to Commercial Ironmaking // *Iron and Steelmaking*. 1990. No. 12. P. 30 – 37.
- Fruehan R.J. Condition and prospects of converter production development // *Process 6th International Iron and Steel Congress*, Nagoya, Oct. 21 – 26. 1990. No. 3. P. 73 – 85.
- Chappellen Ph. Application of manganese ore in steelmaking shop of plant Solla c Florange // *Revue de Métallurgie (France)*. 1989. Vol. 86. No. 12. P. 999 – 1001.
- Ibaraki Tetsuhari. Metallurgical effect of combined converter process with variable intensity of scavenging // *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1984. Vol. 70. No. 12. P. 897.
- Kaneko Tonhiyuki. Lowslag process converter melting. Disoxidation of manganese ore during lowslag process // *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1987. Vol. 73. No. 12. P. 275.
- Vargas-Ramirez M., Romero-Serrano A., Chavez-Alcala F. Reduction of MnO from molten slags with liquid steel of high carbon content // *Steel Research*. 2002. Vol. 73. No. 9. P. 75 – 80.
- Toshiyukk Kaneko. Definition of optimal composition of manganese agglomerate, which provide high speed of manganese disoxidation // *Current advances of materials and processes*. 1991. Vol. 4. No. 4. P. 1831 – 1838.
- Нохрина О.И. Развитие теории и разработка ресурсосберегающей технологии раскисления и легирования стали оксидными марганецсодержащими материалами: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новокузнецк, 2005. – 43 с.
- Климов В.Ю., Рыбенко И.А., Мочалов С.П. Разработка и применение компьютерной инструментальной системы для термодинамических расчетов на базе программного комплекса «Астра» // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2005. № 4. С. 54 – 60.
- Suk Min-Oh, Sung-Koo, Seo Chang-Woo, Kim Seon-Hyo, Kim Jeon-Sik, Shim Sang-Chut, Kim Jcong-Tae. The effect of carbon in

slag on steel reoxidation by $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-MnO-FeO}$ slags // *Steel Res. Int.* 2005. Vol. 76. No. 4. P. 287 – 295.

17. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин Ф.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. – М.: Металлургия, 1987. – 271 с.
18. Meraikib Mohammed. Effect of BaO , basicity and temperature on manganese distribution between slag and hot metal in blast furnace // *Steel Res. Int.* 2009. Vol. 80. No. 2. P. 99 – 106.

19. Банья С., Донг-Шим. Применение модели регулярных растворов к сталеплавильным шлакам. – В кн.: IX Советско-японский симпозиум по физико-химическим основам металлургических процессов. – М.: ИМЕТ АН СССР, 1983. С. 21 – 41.
20. Яковлев П.Д. Промышленные типы рудных месторождений: Учебное пособие для вузов. – М.: Недра, 1986. – 358 с.

Поступила 12 октября 2018 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 12, pp. 933–938.

DIRECT STEEL ALLOYING BY MANGANESE UNDER RECENT CONDITIONS OF ELECTRIC STEEL-MAKING

**A.V. Dmitrienko, E.V. Protopopov, V.I. Dmitrienko,
N.F. Yakushevich, V.F. Goryushkin**

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. One of the directions of increasing production efficiency in ferrous metallurgy is reduction of expensive and scarce ferroalloy consumption. Great opportunities in that direction are provided by technology of direct steel alloying by oxide materials. Thermodynamic study of the process of direct steel alloying by manganese oxide materials (manganese ore) and industrial testing of that technology has been done in that work. Two options of direct alloying technology have been considered: during steel melting in modern 100-ton EAF in oxidative conditions and during processing of steel on ladle furnace (LF) in reductive conditions. Thermodynamic modeling of oxidative technology option by TERRA software package has shown that there is opportunity to increase content of manganese in metal by manganese ore injection. Key factor in that process is current carbon content in steel. Content of manganese can be raised up to 0.6 % and more in medium- and high-carbon steel. Residual manganese in low-carbon steel is defined by value of carbon content in the end of oxygen lancing. Graphic dependence is provided. $\text{MnO} + \text{Si} = \text{Mn} + \text{SiO}_2$ is main reaction of the process of direct alloying under reductive conditions. Thermodynamic analysis gives very rough data. That is why semi-empirical analysis was performed, which was based on received industrial results of FeO and MnO proportion contained in slag in the end of steel processing at LF. That way of process estimation is considered reasonable, because of approximation to balance of metal-slag system during long processing of steel at LF. Using this proportion, and conditions of slag initial basicity retaining and maintaining of FeO content in slag at level around 1 %, balance equation describing process of direct steel alloying by manganese ore at ladle was derived. This equation helps to calculate basic technological parameters of the process of direct alloying by manganese ore as applied to specific conditions of production. Good convergence of theoretical calculation and practical data has been received.

Keywords: thermodynamic analysis, direct alloying, manganese oxide, ladle furnace, out-of-furnace processing, manganese ore, oxygen lancing, slag.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-933-938

REFERENCES

1. Bulyanda A.A., Nakonechnyi A.Ya., Mizin V.G. Manganese saving in converter steel production. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 1986, no. 3, pp. 12–13. (In Russ.).
2. Nakonechnyi A.Ya., Urtsev V.N., Afonin S.Z., Sinyakov R.V., Kudrin V.A., Khabibulin D.M., Shmakov A.V. The advantages of using waste-free and environmentally rational direct alloying tech-

nologies for a complex solution to the problem of resource saving and environment protection. In: *Trudy odinnadsatogo kongressa staleplavil'shchikov* [Proc. of the 11th Congress of Steelmakers]. Moscow: Chermetinformatsiya, 2011, pp. 92–110. (In Russ.).

3. Bobkova O.S., Barsegyan V.V. Prospects of technologies for the direct alloying of steel from oxide melts. *Metallurgist*. 2006, vol. 50, no. 9-10, pp. 463–468.
4. Tolymbekov M.Zh., Takenov T.D., Akhmetov A.B. *Pryamoe legirovanie stali margantsem* [Direct alloying of steel with manganese]. Almaty: NITs "Fylym", 2003, 304 p. (In Russ.).
5. Cacir Ali Fuat, Yaman Atilla Afes Tayfu. Manganfalling aus schwefel sauer Losungen durch induzierte Oxidation. *Chem. Acta Turk*. 1982, Bd. 10, no. 1, pp. 51–57.
6. *Chernaya metallurgiya zarubezhnykh stran (obzor). Kontrakt № 062-3/36 ot 23.05.96 g.* [Ferrous metallurgy of foreign countries (review). Contract no. 062-3/36, May 23, 1996]. Moscow: Chermetinformatsiya, 1996, 74 c. (In Russ.).
7. Ubaruki T., Kanemoto M., Ogatoetal S. Development of smelting Reduction of Iron Ore-an Approach to Commercial Ironmaking. *Iron and Steelmaking*. 1990, no. 12, pp. 30–37.
8. Fruehan R.J. Condition and prospects of converter production development. *Process 6th International Iron and Steel Congress, Nagoya, Oct. 21 – 26. 1990*, no. 3, pp. 73–85.
9. Chappellen Ph. Application of manganese ore in steelmaking shop of plant Solla c Florange. *Revue de Métallurgie (France)*. 1989, vol. 86, no. 12, pp. 999–1001.
10. Ibaraki Tetsuhari. Metallurgical effect of combined converter process with variable intensity of scavenging. *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1984, vol. 70. no. 12, pp. 897.
11. Kaneko Tonhiyuki. Lowslag process converter melting. Disoxidation of manganese ore during lowslag process. *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1987, vol. 73, no. 12, pp. 275.
12. Vargas-Ramirez M., Romero-Serrano A., Chavez-Alcala F. Reduction of MnO from molten slags with liquid steel of high carbon content. *Steel Research*. 2002, vol. 73, no. 9, pp. 75–80.
13. Toshiyukk Kaneko. Definition of optimal composition of manganese agglomerate, which provide high speed of manganese disoxidation. *Current advances of materials and processes*. 1991, vol. 4, no. 4, pp. 1831–1838.
14. Nokhrina O.I. *Razvitie teorii i razrabotka resursosberegayushchei tekhnologii raskisleniya i legirovaniya stali oksidnymi marganetsosoderzhashchimi materialami: Avtoref. diss. d-ra tekhn. nauk* [Development of theory and resource-saving technology of deoxidation and alloying of steel with manganese oxide materials: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Novokuznetsk, 2005, 43 p. (In Russ.).
15. Klimov V.Yu., Rybenko I.A., Mochalov S.P. Development and application of computer tool system for thermodynamic calculations based on Astra software package. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2005, no. 4, pp. 54–60. (In Russ.).

16. Suk Min-Oh, Sung-Koo, Seo Chang-Woo, Kim Seon-Hyo, Kim Jeon-Sik, Shim Sang-Chut, Kim Jcong-Tae. The effect of carbon in slag on steel reoxidation be $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-MnO-FeO}$ slags. *Steel Res. Int.* 2005, vol. 76, no. 4, pp. 287–295.
17. Grigoryan V.A., Belyanchikov L.N., Stomakhin F.Ya. *Teoreticheskie osnovy elektrostaleplavil'nykh protsessov* [Theoretical foundations of electric melting processes]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 271 p. (In Russ.).
18. Meraikib Mohammed. Effect of BaO , basicity and temperature on manganese distribution between slag and hot metal in blast furnace. *Steel Res. Int.* 2009, vol. 80, no. 2, pp. 99–106.
19. Ban'ya S., Dong-Shim. Application of the model of regular solutions to steel slags. In: *LX Sovetsko-yaponskii simpozium po fiziko-khimicheskim osnovam metallurgicheskikh protsessov* [9th Soviet-Japanese Symposium on the Physico-Chemical Fundamentals of Metallurgical Processes]. Moscow: IMET AN SSSR, 1983, pp. 21–41. (In Russ.).
20. Yakovlev P.D. *Promyshlennye tipy rudnykh mestorozhdenii: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Industrial types of ore deposits: Manual for Universities]. Moscow: Nedra, 1886, 358 p. (In Russ.).

Information about the authors:

A.V. Dmitrienko, Postgraduate of the Chair of Ferrous Metallurgy (dmvliv@gmail.com)

E.V. Protopopov, Dr Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (protopopov@sibsiu.ru)

V.I. Dmitrienko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (dmvliv@gmail.com)

N.F. Yakushevich, Dr Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Non-Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering" (kafcmetsibsiu.ru)

V.F. Goryushkin, Dr Sci. (Chem.), Professor of the Chair of Science named after V.M. Finkel (koax@sibsiu.ru)

Received October 12, 2018