

УДК 669.18

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСПАРЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ РЕАКЦИОННОЙ ЗОНЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ХРОМСОДЕРЖАЩИХ РАСПЛАВОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ*

Румянцев Б.А.¹, аспирант кафедры «Металлургия стали и ферросплавов» (rumin_123@mail.ru)
Кололова О.А.¹, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия стали и ферросплавов» (o.a.komolova@gmail.com)
Григорович К.В.^{1,2}, член-корр. РАН, д.т.н., профессор, зав. кафедрой
«Металлургия стали и ферросплавов», зав. лабораторией
Гарбер А.К.¹, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия стали и ферросплавов»

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
(119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 49)

Аннотация. Работа посвящена изучению процессов испарения компонентов расплавов железа и систем Fe–Cr, Fe–Ni, Fe–Cr–Ni в зоне плазменного пятна при его обработке низкотемпературной плазмой аргона. Проведена серия экспериментов с различными массами обрабатываемого металла при изменении мощности дуги плазмотрона с целью определения условий, при которых достигается стабильность температурного режима поверхности обрабатываемого металла. Результаты показали, что для условий экспериментов, при которых поток плазмы полностью омывает поверхность капли металла, наиболее оптимальными являются мощность дуги не менее 2,0 кВт и масса навески металла в интервале от 5 до 10 г. Изучены процессы испарения в зависимости от состава расплава и определены константы скорости испарения. Установлено, что самой большой скоростью испарения в нейтральной атмосфере лабораторной плазменной печи из исследованной группы сплавов характеризовался расплав Fe–Cr–Ni. Определена температура поверхности расплава косвенным методом по интенсивности испарения. Установлено, что температура поверхности обрабатываемого плазмой расплава изменялась в диапазоне от 1950 до 2100 К при изменении мощности дуги в диапазоне от 1,6 до 2,4 кВт.

Ключевые слова: коррозионностойкая сталь, испарение, плазма, кинетика, температура.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-11-821-825

Производство коррозионностойких сталей с низким содержанием углерода представляет собой сложную задачу [1, 2]. Хорошо известно, что наиболее благоприятными условиями для селективного обезуглероживания высокохромистых коррозионностойких сталей являются высокая температура и низкое парциальное давление оксидов углерода над расплавом [3, 4].

В настоящее время производство высокохромистых коррозионностойких сталей осуществляется с помощью дулекс-процесса [5 – 8]. Альтернативой может являться выплавка высокохромистых коррозионностойких сталей в плазменной печи. Плазменная печь представляет собой агрегат, в котором можно выплавлять разные объемы металла. Обработка небольших объемов металла наиболее эффективна вследствие большого значения соотношения поверхность–объем. Более того, переход на плазменно-

дуговой переплав требует минимальных вложений для модификации дуговой печи постоянного тока [9, 10].

Особый интерес представляет изучение основных характеристик процесса взаимодействия плазменного факела и металлической ванны, таких как температура и площадь реакционной зоны, интенсивность обновления поверхности, поскольку это напрямую влияет на глубину обезуглероживания металла.

Косвенно оценить температуру в зоне воздействия плазменной дуги возможно по данным о скорости испарения металла с поверхности расплава, что было показано в работе [11]. Такая оценка дает среднее значение температуры поверхности с точностью ± 100 К.

Целью данного исследования было изучение процессов испарения расплава в зоне плазменного факела в зависимости от состава металла и мощности дуги и определение температуры поверхности расплава.

На лабораторной установке были проведены эксперименты по моделированию процессов, протекающих в зоне активного плазменного факела при его взаимодействии с расплавами на основе железа.

Процессы испарения компонентов расплава при плазменно-дуговой обработке изучались в лаборатор-

* Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 гг.». Соглашение о предоставлении субсидии № 14.578.21.0023 от 5 июня 2014 г. по теме «Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий производства сложнолегированных марок сталей и сплавов с заданными свойствами для деталей и узлов авиакосмической техники». Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57814X0023.

ной плазменной печи. Плавление пробы заданного состава проводили на медном водоохлаждаемом кристаллизаторе с использованием плазмы аргона. Используемая методика исследования моделировала процессы, протекающие в печи в реакционной зоне, так как размер поверхности капли исследуемого металла был соизмерим с активным пятном плазменной дуги.

Лабораторная установка включала плазменную печь постоянного тока с напряжением холостого хода до 140 В и рабочим током до 300 А, масса пробы исследуемого металла составляла 3 – 12 г. После помещения пробы в кристаллизатор и продувки печи аргоном в течение 10 – 15 мин включали плазмотрон. Эксперименты проводили при мощности дуги от 1,6 до 2,4 кВт, расходе плазмообразующего газа аргона 450 мл·мин⁻¹ и общем давлении газа в печи 0,1 МПа.

Исходный состав анализируемых сплавов приведен в таблице.

По окончании эксперимента химический состав металла определяли методом оптического эмиссионного спектрального анализа на спектрометре тлеющего разряда SA-2000 LECO с погрешностью не более ±1 % (отн.).

Взвешивание образцов до и после обработки в плазменной печи производили на лабораторных весах ED224S Sartorius с погрешностью 0,0001 г.

Эксперименты проводили на пробах различной массы, поэтому для сопоставления результатов величины потерь массы Δm , г были отнесены к площади поверхности испарения F , см². По результатам потерь массы проб за время плавки была рассчитана плотность потока испаряющегося вещества J по уравнению

$$J = \frac{\Delta m}{M\tau F}, \text{ моль} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (1)$$

где Δm – потеря массы пробы металла, г; M – молекулярный вес испаряющегося вещества, г·моль⁻¹; τ – продолжительность плавления, с; F – площадь поверхности капли, см².

Известны различные варианты оценки поверхности испарения металла в плазменном факеле. Так, в работе [11] для расчета скорости испарения принимали модель, согласно которой испарение металла происходит

Состав металла исследованных образцов

Composition of the metal of studied samples

Металл	Исходное содержание компонентов, % (по массе)					
	C	S	O	N	Cr	Ni
Fe	0,160	0,001	0,0208	0,0112	–	–
Fe–Cr	0,114	0,0012	0,0072	0,0147	18,05	–
Fe–Ni	0,127	0,0014	0,0104	н.о	–	10,23
Fe–Cr–Ni	0,100	0,0017	н.о	н.о	17,80	10,34

с площади пятна дуги, где температура достигает точки кипения металла. По приведенной оценке при токе дуги 50 – 250 А поверхность испарения составляет 0,5 мм². Предположения, сделанные в работе [11], частично подтверждаются результатами экспериментального исследования скорости испарения меди в пятне нагрева плазменной дугой [12]. Однако при этом отмечено, что заметное изменение скорости испарения в центральной зоне пробы по сравнению с периферией начинается только при токе свыше 500 А. В работах [13, 14] методом спектрометрического измерения интенсивности излучения паров металла в аргонной плазме на капле массой 30 г при токе 50 – 150 А было показано, что испарение происходит со всей поверхности, омываемой плазменным факелом и распределение давления пара железа над расплавом имеет М-образный характер с минимумом в центре пятна дуги. Основываясь на результатах работ [13, 14] принимали, что поверхность капли в проводимых экспериментах достаточно достоверно моделирует зону воздействия плазменного факела с расплавом. Площадь поверхности капли рассчитывали по формуле для шарового сегмента:

$$F = 2\pi rh, \text{ см}^2, \quad (2)$$

где r , h – соответственно радиус основания и высота капли расплава за вычетом толщины непроплавленного гарниссажного слоя.

Выполнена серия экспериментов, в ходе которых при массе пробы 8 – 10 г расплавление и выдержку в аргоновой плазме проводили при изменении мощности плазменной дуги в интервале от 1,6 до 2,4 кВт. Результаты экспериментов в виде рассчитанных значений интенсивности испарения хромоникелевого сплава Fe–Cr–Ni в зависимости от мощности дуги представлены на рис. 1.

Несмотря на наблюдаемый разброс данных, обнаруживается отчетливая тенденция увеличения интен-

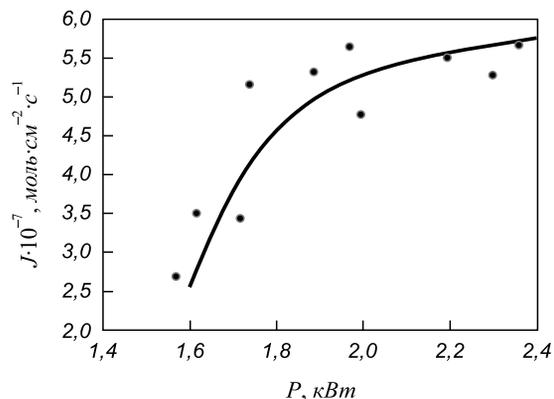


Рис. 1. Зависимость интенсивности испарения расплава Fe–Cr–Ni от мощности дуги плазменного факела

Fig. 1. The evaporation rate dependence of Fe–Cr–Ni melt from the arc plasma torch power

сивности испарения металла с увеличением мощности плазменного факела. При мощности плазменного факела свыше 1,8 кВт значения интенсивностей испарения с поверхности расплава в пределах экспериментальной погрешности не зависели от мощности дуги. Вычисленные значения интенсивности испарения J были сопоставлены с зависимостями плотности потока испаряющегося вещества от температуры, рассчитанными авторами работы [15] по результатам измерений скорости испарения образцов состава нержавеющей стали массой 2 г при плавке во взвешенном состоянии в атмосфере аргона при давлении 0,1 МПа и толщине диффузионного слоя $\delta_N = 0,025$ см (рис. 2).

Сравнение продемонстрировало хорошее совпадение результатов. Расчеты показали, что в проведенных экспериментах среднемассовая температура поверхности расплава составляла от 1950 до 2100 К в зависимости от мощности плазменного факела, которую изменяли в интервале от 1,6 до 2,4 кВт.

Экспериментально установлено (рис. 3), что при постоянной мощности дуги интенсивность испарения проб массой более 5 г практически не зависит от их массы, т. е. при массе пробы в интервале от 5 до 10 г условия тепло- и массопереноса на межфазной границе можно считать неизменными, а, следовательно, и температуру поверхности расплава постоянной.

Несмотря на, казалось бы, заметное различие абсолютных значений интенсивности испарения проб массой около 3 г и свыше 5 г, результаты экспериментов показали, что среднемассовая температура поверхности различается незначительно: при $J \sim 8 \cdot 10^{-7}$ моль·см⁻²·с⁻¹ для капли массой 3,5 г она составляла 2080 К, при

$J \sim 5 \cdot 10^{-7}$ моль·см⁻²·с⁻¹ для капли массой более 5 г $T = 2040$ К.

Полученные данные по кинетике испарения металла экспериментальных проб в зоне воздействия плазменного факела представлены на рис. 4 в виде зависимости потерь массы металла, нормированных на площадь поверхности капли от времени. Эксперименты проводили на пробах металла массой 8–10 г при мощности плазменного факела 2 кВт. По результатам опытов методом наименьших квадратов были построены линейные зависимости, что позволило определить значения константы скорости испарения металла по тангенсу угла наклона прямых:

Металл	$k, 10^{-5}, \text{г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Fe	1,6
Fe – Cr	1,6
Fe – Ni	1,5
Fe – Cr – Ni	2,4

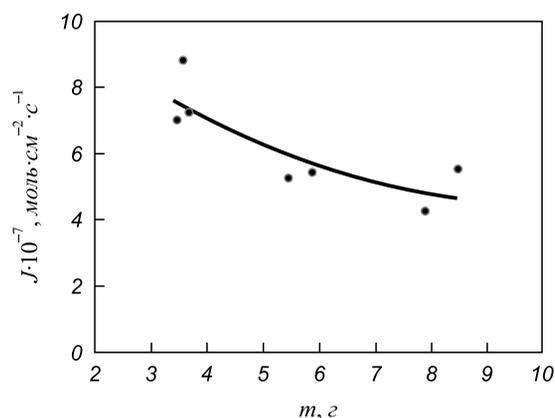


Рис. 3. Зависимость интенсивности испарения металла от массы проб при мощности дуги 2,0 кВт

Fig. 3. Dependence of the metal evaporation intensity on size of the samples at the arc power of 2.0 kW

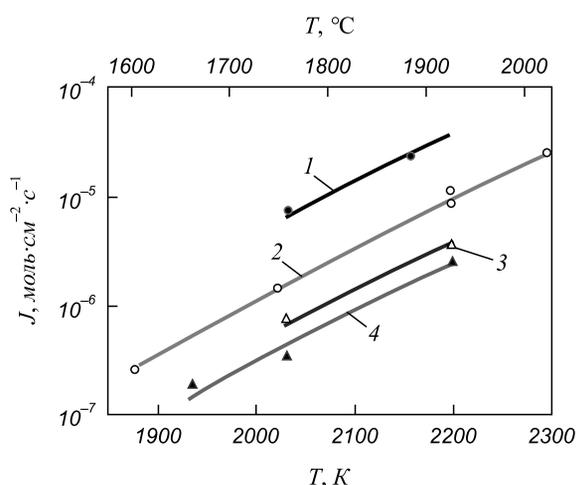


Рис. 2. Интенсивность испарения сплава X18Ni10 в зависимости от температуры (масса пробы 2 г, $\delta_N = 0,025$ см) [9]:

1 – $P = 0,006$ МПа; 2 – $P = 0,013$ МПа;
3 – $P = 0,066$ МПа; 4 – $P = 0,1$ МПа

Fig. 2: Evaporation rate of AISI 321 (Cr18Ni10) alloy depending on the temperature (weight – 2 g sample, $\delta_N = 0.025$ cm) [9].

1 – $P = 0.006$ МПа; 2 – $P = 0.013$ МПа;
3 – $P = 0.066$ МПа; 4 – $P = 0.1$ МПа

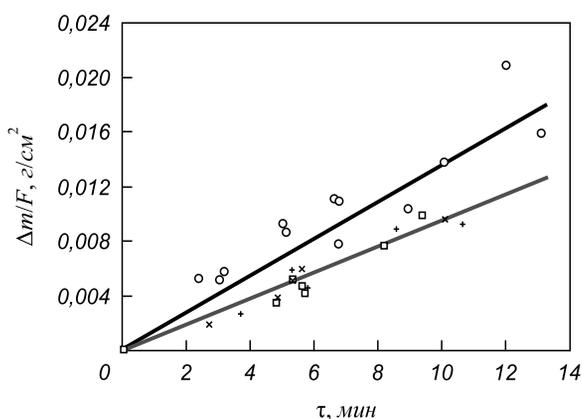


Рис. 4. Кинетика испарения исследуемых сплавов в аргонной плазме:

⊕ – Fe; □ – Fe – Cr; × – Fe – Ni; ○ – Fe – Cr – Ni

Fig. 4 Kinetics of evaporation of the investigated alloys in argon plasma.

⊕ – Fe; □ – Fe – Cr; × – Fe – Ni; ○ – Fe – Cr – Ni

Самой большой скоростью испарения в нейтральной атмосфере лабораторной плазменной печи из исследованной группы сплавов характеризовался расплав Fe–Cr–Ni. Содержание хрома и никеля по отдельности в расплавах железа не выявило заметного различия в скоростях их испарения по сравнению с испарением чистого железа. Как показали результаты спектрального анализа образцов после плазменного переплава, содержание легирующих практически не изменялось.

Выводы. На лабораторной установке проведены эксперименты по моделированию процессов, протекающих в зоне активного плазменного факела при его взаимодействии с расплавами на основе железа. Исследовано влияние мощности плазменной дуги в диапазоне 1,6–2,4 кВт и массы исследуемого расплава на скорость испарения и температуру поверхности. Установлена зависимость среднемассовой температуры поверхности расплава от мощности дуги, которая изменялась при проведении экспериментов в интервале 1950–2100 К.

Определены константы скорости испарения сплавов на основе железа. Установлено, что самой большой скоростью испарения в нейтральной атмосфере лабораторной плазменной печи из исследованной группы сплавов характеризовался расплав Fe–Cr–Ni. Содержание хрома и никеля по отдельности в расплавах железа не выявило заметного влияния на скорость их испарения по сравнению с испарением чистого железа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – М.: МИСиС, 1999. – 208 с.
2. Бабаков А.А., Приданцев М.В. Коррозионностойкие стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1971. – 319 с.
3. Бородулин Г.М., Мошквич Е.И. Нержавеющая сталь. – М.: Металлургия, 1973. – 319 с.

4. Inomoto T., Matsuo V., Yano M. Evaluation of the chemical vacuum effect in decarburization treatment by argon-inged steel under normal atmosphere // *ISIJ International*. 2014. Vol. 55. No. 4. P. 723 – 726.
5. Фриц Э. Технология производства коррозионностойкой стали: тенденции, разработки и новые проекты // *Черные металлы*. 2003. № 9. С. 69 – 76.
6. Генкин В.Я. Пути оптимизации мартеновских цехов: установка электропечей, агрегатов внепечной обработки металла, УНРС // *Электromеталлургия*. 2000. № 5. С. 10 – 13.
7. Дуб В.С., Иодковский С.А., Куликов А.П., Дурьнин В.А. Опыт использования мартеновских печей с агрегатами внепечной обработки для производства высококачественной и высоколегированной стали // *Электromеталлургия*. 2003. № 1. С. 31 – 35.
8. Римкевич В.С., Буцкий Е.В., Брагин В.И. Освоение технологии выплавки стали с использованием агрегата внепечной вакуумной обработки // *Электromеталлургия*. 1998. № 4. С. 25 – 28.
9. Римкевич В.С., Сисев А.А., Муруев С.В., Блохин М.В. Возможность совершенствования традиционной выплавки нержавеющей стали // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2012. № 8. С. 23 – 28.
10. Чередниченко В.С., Кузьмин М.Г., Аньшаков А.С. Плазменные установки для плавки и восстановления металлов // *Электromеталлургия*. 2009. № 9. С. 20 – 27.
11. Sato M. Evidence for Chromium Evaporation Influencing the Oxidation of 304L: The Effect of Temperature and Flow Rate *Adv // Mater. And Process*. 1988. Vol.1. No. 5. P. 1390.
12. Kashiwaja Y., Onishi S., Ishii K. Spectroscopic study on Metal Vapor and Mechanism of Vaporization in Plasma Refining // *Proceedings of the Sixth International Iron and Steel Congress*. 1990. Nagoya, ISIJ, P. 551 – 558.
13. Григорян В.А., Алеев Р.А., Кочетов А.И., Прянишников М.И. Кинетика испарения жидкого железа // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1973. № 3. С. 16 – 18.
14. Дроздов Н.Н., Бурцев В.Т., Филиппов С.И., М.Р. Лютикова М.Р. Изучение механизма и кинетики испарения серы методом взвешенной капли // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1977. № 5. С. 22 – 24.
15. Fischer W.A., Janke D., Stahlschmidt K. Die Verdampfung von Eisen und seiner Begleitelemente Kupfer und Mangan beim Schwebeschmelzen unter vermindertem Druck // *Archiv f.d. Eisenhüttenwesen*. 1974. B. 45. No. 11. S. 757 – 764.

Поступила 19 июля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 11, pp. 821–825.

INVESTIGATION OF THE EVAPORATION PROCESSES OF COMPONENTS OF CHROMIUM-CONTAINING MELTS BY LOW TEMPERATURE PLASMA TREATMENT

B.A. Rumyantsev¹, O.A. Komolova¹, K.V. Grigorovich^{1,2}, A.K. Garber¹

¹National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

²Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, Moscow, Russia

Abstract. The article describes the studies the evaporation of components in molten iron and Fe–Cr, Fe–Ni, Fe–Cr–Ni systems in plasma spot area during processing of low-temperature argon plasma treatment. A series of experiments was carried out with different weights of the treated metal. changing the arc power of the plasma torch determine the conditions under which stability of treated metal surface is achieved. The results showed that for the experimental conditions under which the plasma flow completely washes the surface of the metal droplets are most suitable: arc power is not less than 2.0 kW and metal

sample mass is in the range of 5 to 10 grams. The dependence between evaporation process and chemical composition of melts was studied. Also, evaporation rate constants were determined. It was found that the greatest rate of evaporation in a neutral atmosphere of a laboratory plasma furnace have Fe–Cr–Ni. It was determined the temperature of the melt surface by the indirect method – the evaporation rate. The surface temperature of the melt which was treated by plasma torch varied in the range from 1950 to 2100 K for changing the arc power in the range of 1.6 to 2.4 kW.

Keywords: stainless steel, evaporation, plasma, kinetics, temperature.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-11-821-825

REFERENCES

1. Gol'dshtein M.I., Grachev S.V., Veksler Yu.G. *Spetsial'nye stali* [Special steel]. Moscow: MISiS. 1999, 208 p. (In Russ.).

2. Babakov A.A., Pridantsev M.V. *Korroziionno stoikie stali i splavy* [Corrosion-resistant steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 319 p. (In Russ.).
3. Borodulin G.M., Moshkevich E.I. *Nerzhavayushchaya stal'* [Stainless steel]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 319 p. (In Russ.).
4. Inomoto T., Matsuo V., and Yano M. Evaluation of the chemical vacuum effect in decarburization treatment by argon-injected steel under normal atmosphere. *ISIJ International*. 2014, vol. 55, no. 4, pp. 723–726.
5. Frits E. Technology of production of corrosion-resistant steel: trends, developments and new projects. *Chernye metally*. 2003, no. 9, pp. 69–76. (In Russ.).
6. Genkin V.Ya. Ways of optimization of open-hearth shops: electric installation, secondary metallurgy units, continuous casters. *Elektrometallurgiya*. 2000, no. 5, pp. 10–13. (In Russ.).
7. Dub V.S., Iodkovskii S.A., Kulikov A.P., Duryinin V.A. Experience in the use of open-hearth furnaces with secondary treatment units for production of high-quality and high-alloy steel. *Elektrometallurgiya*. 2003, no. 1, pp. 31–35. (In Russ.).
8. Rimkevich V.S., Butskii E.V., Bragin V.I. Mastering the technology of steel smelting unit with ladle vacuum treatment. *Elektrometallurgiya*. 1998, no. 4, pp. 25–28. (In Russ.).
9. Rimkevich V.S., Sisev A.A., Muruev S.V., Blokhin M.V. Opportunities for improvement of the traditional smelting of stainless steels. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2012, no. 8, pp. 23–28. (In Russ.).
10. Cherednichenko V.S., Kuz'min M.G., An'shakov A.S. Plasma systems for melting and recovery of metals. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 9, pp. 20–27. (In Russ.).
11. Sato M. Evidence for Chromium Evaporation Influencing the Oxidation of 304L: The Effect of Temperature and Flow Rate. *Adv. Mater: And Process*. 1988, vol. 1, no. 5. p. 1390.
12. Kashiwaja Y., Onishi S., Ishii K. Spectroscopic study on Metal Vapor and Mechanism of Vaporization in Plasma Refining. *Proceedings of the Sixth International Iron and Steel Congress, 1990. Nagoya*. ISIJ, pp. 551–558.
13. Grigoryan V.A., Aleev R.A., Kochetov A.I., Pryanishnikov M.I. Evaporation kinetics of liquid iron. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1973, no. 3, pp. 16–18. (In Russ.).
14. Drozdov N.N., Burtsev V.T., Filippov S.I., Lyutikova M.R. Study of the mechanism and kinetics of sulfur evaporation by method of weighted drop. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1977, no. 5, pp. 22–24. (In Russ.).
15. Fischer W.A., Janke D., Stahlschmidt K. Die Verdampfung von Eisen und seiner Begleitelemente Kupfer und Mangan beim Schwebeschmelzen unter vermindertem Druck. *Archiv f.d. Eisenhüttenwesen*. 1974, B. 45, no. 11, S. 757–764.

Acknowledgements. The work was performed within the framework of the Federal Target Program “Research and development on priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2014-2020”. Grant agreement no. 14.578.21.0023 of 5 June 2014 “Development and introduction of resource-saving technologies complexly alloyed grades of steels and alloys with desired properties for components and parts of aerospace units” Unique identifier of agreement is RFMEFI57814X0023.

Information about the authors:

B.A. Rumyantsev, Postgraduate of the Chair “Metallurgy of Steel and Ferroalloys” (rumin_123@mail.ru)

O.A. Komolova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy of Steel and Ferroalloys”(o.a.komolova@gmail.com)

K.V. Grigorovich, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the of the Chair “Metallurgy of Steel and Ferroalloys”, Head of the Laboratory

A.K. Garber, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy of Steel and Ferroalloys”

Received July 19, 2016