

УДК 669.02/09

РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА ПРИ ПЛАВКЕ В ВАКУУМНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ*

Зубарев К.А., аспирант кафедры металлургии стали и ферросплавов (st-kirill@mail.ru)

Котельников Г.И., к.т.н., доцент кафедры металлургии стали

и ферросплавов (gikotelnikov@yandex.ru)

Лопатенко А.Д., аспирант кафедры металлургии стали

и ферросплавов (salat1313@yandex.ru)

Семин А.Е., д.т.н., профессор, зам. зав. кафедрой металлургии стали

и ферросплавов (asemin2007@yandex.ru)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Проблемой выплавки сплавов на основе железа в вакуумной индукционной печи (ВИП) является обеспечение рафинирования металла, одновременно сохранение легирующих элементов и получение заданного состава. Решить эту задачу невозможно без адекватного количественного описания процессов рафинирования сплавов в глубоком вакууме. Целью данной работы являлось создание адекватной модели испарения компонентов сплава на основе железа при плавке в ВИП. В качестве лимитирующей стадии процесса испарения принят акт перехода компонента в газовую фазу. Величину потока каждого компонента сплава в газовую фазу в этих условиях рассчитывали по уравнению Лангмюра. Разработанная модель дает адекватные результаты прогноза по испарению компонентов высоколегированных сплавов на основе железа при их выплавке в вакуумной индукционной печи в глубоком вакууме. Созданный алгоритм позволяет рассчитывать изменение состава сплава и массы на основе железа в ходе его рафинирования в вакуумной индукционной печи выбранной вместимости при заданном остаточном давлении и температуре.

Ключевые слова: модель, испарение, уравнение Лангмюра, сплавы на основе железа, вакуумная индукционная печь.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-11-815-818

Вакуумная плавка способствует рафинированию металла от примесей [1]. Однако ценные легирующие элементы могут при этом испаряться, что затрудняет получение стабильного химического состава сплава. Поэтому задачей работы является создание модели поведения всех компонентов легированных сплавов при рафинировании в вакууме. Это облегчит выбор шихтовых материалов, обеспечит эффективное удаление примесей из металла и создание ресурсосберегающей технологии производства.

В глубоком вакууме массоперенос компонентов в газовой фазе, как правило, не определяет процесс испарения. При выплавке сплавов в вакуумной индукционной печи (ВИП) происходит интенсивное перемешивание металла. Поэтому, в первом приближении, не будем учитывать затруднения в доставке компонентов на границу раздела металл–газ. Тогда в качестве лимитирующей стадии, определяющей поведение компонентов

металла, можно принять акт перехода компонента в газовую фазу (испарение компонента).

Плотность потока элементов в газовую фазу при плавке в глубоком вакууме, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ рассчитывается по уравнению Лангмюра [2]

$$w_i = \alpha_i (p_i - p_{\text{ост}}) \sqrt{\frac{M_i}{2\pi RT}}, \quad (1)$$

где p_i – равновесное давление пара данного компонента над расплавом заданного состава, Па; $p_{\text{ост}}$ – остаточное давление в вакуумной индукционной печи, Па; M_i – относительная атомная (или молекулярная в случае удаления H_2 , N_2 , O_2 и др.) масса компонента i ; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8314 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{кг} \cdot \text{моль})$; T – температура сплава, К; α_i – коэффициент Лангмюра.

Значение коэффициента α_i для реальных сплавов подбирается в результате пробного счета по модели и сравнения результатов расчета с экспериментальными данными [3, 4], т. е. в данном случае α является параметром адаптации модели.

Величину p_i определяли по закону Рауля [5]

$$p_i = p_i^0 x_i \gamma_i, \quad (2)$$

* Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы». Проект № 14.578.21.0023 «Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий производства сложнолегированных марок сталей и сплавов с заданными свойствами для деталей и узлов авиакосмической техники».

где p_i^0 – давление насыщенного пара над жидким чистым компонентом i ; x_i – мольная доля компонента i в сплаве; γ_i – коэффициент активности компонента.

Коэффициент активности γ_i рассчитывали по формуле [6]

$$\gamma_i = \gamma_i^\infty \frac{A_{\text{осн}} f_i}{A_{\text{спл}}}, \quad (3)$$

где γ_i^∞ – коэффициент активности элемента i в бесконечно разбавленном растворе в железе при температуре 1873 К [7 – 9]; f_i – коэффициент активности, описывающий отклонение реального раствора от модели бесконечно разбавленного раствора при условии использования массовых долей; $A_{\text{спл}}$ и $A_{\text{осн}}$ – масса моля сплава и его основы соответственно.

Для расчета f_i использовали параметры взаимодействия из работы [7]:

$$\lg f_{i,\tau+\Delta\tau} = \sum e_i^j [\% j]_{\tau+\Delta\tau}. \quad (4)$$

Экстраполяцию значений $\gamma_{i,\tau+\Delta\tau,T}$ с 1873К на температуру расплава T проводили по теории квазирегулярных растворов [6]:

$$\ln \gamma_{i,\tau+\Delta\tau,T} = \frac{1873(7000 - T)}{T(7000 - 1873)} \ln \gamma_{i,\tau+\Delta\tau,1873}. \quad (5)$$

Значение p_i^0 рассчитывали по уравнению [9]

$$\lg p_i^0 = A + \frac{B}{T} + C \lg T + DT, \quad (6)$$

где A, B, C, D – постоянные величины, принятые по справочным данным [10].

Недостающие значения p_i^0 рассчитывали самостоятельно по показателям теплоты испарения компонента и температуры его кипения [11].

Определив плотность потока w_i , найдем поток компонента $W_i = w_i F$, испаряющегося с поверхности металлической ванны площадью F .

Зададим некоторый достаточно малый шаг рафинирования расплава по времени $\Delta\tau$. Тогда изменение массы каждого компонента расплава на данном шаге будет равно

$$\Delta m_{i,\tau} = W_{i,\tau} \Delta\tau. \quad (7)$$

В момент времени $\tau + \Delta\tau$ масса компонента i будет равна

$$m_{i,\tau+\Delta\tau} = m_{i,\tau} - \Delta m_{i,\tau}. \quad (8)$$

Общая масса расплава через период $\Delta\tau$ в момент времени $\tau + \Delta\tau$:

$$m_{\Sigma,\tau+\Delta\tau} = m_{\Sigma,\tau} - \sum \Delta m_{i,\tau}. \quad (9)$$

Концентрация i -го элемента в металле в момент времени $\tau + \Delta\tau$:

$$[\% i]_{\tau+\Delta\tau} = \frac{m_{i,\tau+\Delta\tau}}{m_{\Sigma,\tau+\Delta\tau}} 100\%. \quad (10)$$

Изложенный алгоритм позволяет найти состав и массу сплава к моменту окончания элементарного периода рафинирования $\Delta\tau$. После окончания «первого» периода $\Delta\tau$ можно приступить к формированию исходных данных, необходимых для расчета плотности потока испаряющихся компонентов $w_{i,\tau+\Delta\tau}$ в следующем интервале времени $\Delta\tau$ и т. д. Рассчитанные состав и масса сплава могут быть сохранены в базе расчетных данных для последующей распечатки и построения графиков и анализа.

Для проверки адекватности модели использованы экспериментальные данные работы [3], в которой изучено удаление меди из железа в вакуумной индукционной печи. Исследование испарения меди проводили при давлении аргона 0,13 Па и температурах 1550, 1600, 1650 °С методом последовательного отбора проб, масса шихты составляла 500 г, начальное содержание меди в железе – 0,2 %, отношение $F/V = 0,238 \text{ см}^{-1}$, где V – объем металла.

Результаты расчетов и экспериментов представлены на рис. 1, из которого видно, что разработанная модель хорошо описывает экспериментальные данные. Адаптационный параметр α для всех экспериментов равен единице.

Вторая система, на которой была оценена адекватность данной модели, железо–олово [3]. Эксперимент проводили в вакуумной индукционной печи при давлении 0,13 Па и температуре 1550 °С, начальная масса металла составляла 500 г при отношении $F/V = 0,238 \text{ см}^{-1}$, начальная концентрация олова – 0,07 %. Экспериментальные и расчетные данные в виде зависимости кон-

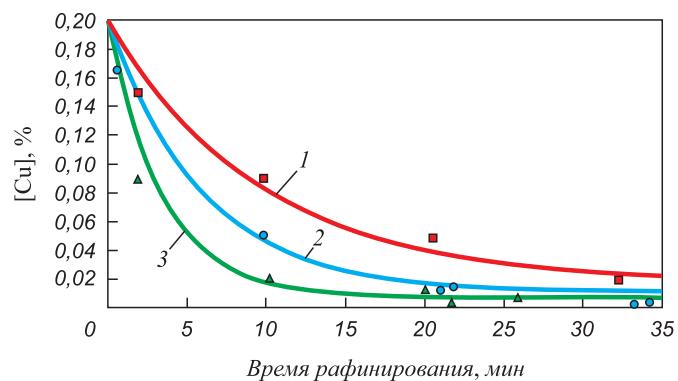


Рис. 1. Испарение меди из железа в ВИП при давлении аргона 0,13 Па. Линии – расчет по представленной методике. Точки – экспериментальные данные [1]: 1 – 1550 °С, 2 – 1600 °С, 3 – 1650 °С

Fig. 1. Copper vacuum evaporation from iron under argon pressure 0.13 Pa. Lines – proposed model. Dots - experimental data [1]: 1 – 1550 °С, 2 – 1600 °С, 3 – 1650 °С

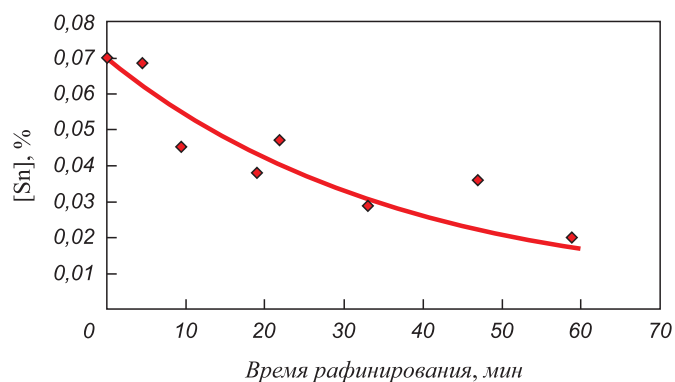


Рис. 2. Испарение олова из жидкого железа в ВИП при давлении аргона 0,13 Па и температуре 1550 °С. Линия – расчетные данные по предложенной методике. Точки – экспериментальные данные [1]

Fig. 2. Tin vacuum evaporation from iron under argon pressure 0.13 Pa and temperature 1550 °C. Lines – proposed model. Dots – experimental data [1]

центрации олова от времени рафинирования представлены на рис. 2. Адаптационный коэффициент α для системы Fe–Sn принят равным единице.

Из рис. 2 видно, что модель хорошо описывает экспериментальные данные по испарению олова из жидкого железа в глубоком вакууме.

Адекватность испарения легирующих элементов была проверена на примере сплава Fe – 18 % Cr – 9 % Ni [3]. Эксперимент проводили в вакуумной индукционной печи при давлении 0,13 Па и температуре 1650 °С, начальная масса сплава составляла 500 г при отношении $F/V = 0,238 \text{ см}^{-1}$, начальная концентрация хрома – 18,3 %. Экспериментальные и расчетные данные в виде зависимости концентрации хрома от времени рафинирования представлены на рис. 3. Адаптационный коэффициент α для хрома принят равным 0,85.

Из рис. 3 видно, что модель вполне удовлетворительно описывает экспериментальные данные по испарению хрома из сплава Fe – 18 % Cr – 9 % Ni в глубоком вакууме.

Таким образом, созданный алгоритм позволяет рассчитывать изменение состава и соответственно массы сплавов на основе железа при рафинировании их в вакуумной индукционной печи при заданном остаточном давлении и температуре. Результаты расчетов могут быть использованы для совершенствования действующей технологии и разработки инновационных технологий выплавки сплавов на основе железа.

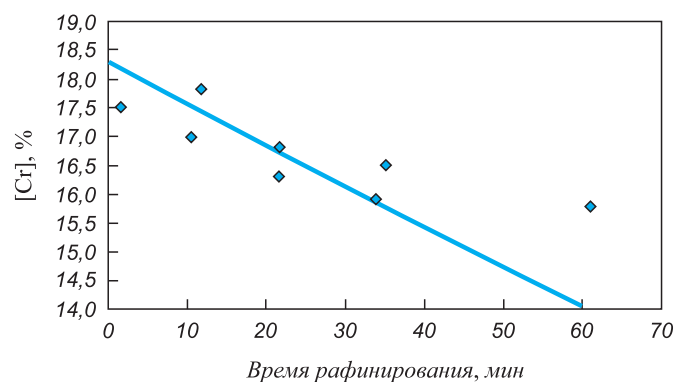


Рис. 3. Испарение хрома из сплава Fe – 18 % Cr – 9 % Ni в ВИП при давлении аргона 0,13 Па и температуре 1650 °С. Линия – расчетные данные по разработанной методике. Точки – экспериментальные данные [1]

Fig. 3. Chrome vacuum evaporation from Fe – 18 % Cr – 9 % Ni alloy under argon pressure 0.13 Pa and temperature 1650 °C. Lines – proposed model. Dots – experimental data [1]

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). – М.: МИСиС, 2001. – 632 с.
2. Григорян В.А., Стомахин А.Я., Уточкин Ю.И. и др. Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов. – 2-е изд. – М.: МИСиС, 2007. – 318 с.
3. Линчевский Б.В. Вакуумная индукционная плавка. – М.: Металлургия, 1975. – 240 с.
4. Производство стали и сплавов в вакуумных индукционных печах/ Г.Н. Огороков, А.Г. Шалимов, В.М. Антипов, Н.А. Тулин. – М.: Металлургия, 1972. – 192 с.
5. Кубашевский О., Олкок К.Б. Металлургическая термодинамика / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1982. – 392 с.
6. Григорян В.А., Беляничков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. – М.: Металлургия, 1987. – 272 с.
7. Балковой Ю.В. Алеев Р.А., Баканов В.К. Параметры взаимодействия первого порядка в расплавах на основе железа: Обзор информации. – М.: Ин-т «Черметинформация», 1987. – 42 с.
8. Steelmaking data sourcebook. The Japan society for the promotion of science. The 19th committee on steelmaking. Switzerland. Gordon and Breach Science Publishers. 1988. – 326 p.
9. Теория металлургических процессов / Д.И. Рыжонков, П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев и др. – М.: Металлургия, 1989. – 392 с.
10. Морачевский А.Г., Сладков И.Б. Термодинамические расчеты в металлургии. – М.: Металлургия, 1993. – 304 с.
11. Рузинов Л.П., Гуляницкий Б.С. Равновесные превращения металлургических реакций. – М.: Металлургия, 1975. – 416 с.

Поступила 15 октября 2015 г.

CALCULATION OF CHANGES IN COMPOSITION OF IRON-BASED ALLOYS DURING THE MELTING IN A VACUUM INDUCTION FURNACE

K.A. Zubarev, *Postgraduate of the Chair “Metallurgy of steel and ferroalloys”* (st-kirill@mail.ru)

G.I. Kotel'nikov, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy of steel and ferroalloys”*

(gikotelnikov@yandex.ru)

A.D. Lopatenko, *Postgraduate of the Chair “Metallurgy of steel and ferroalloys”* (salat1313@yandex.ru)

A.E. Semin, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Head of the Chair “Metallurgy of steel and ferroalloys”*

(asemin2007@yandex.ru)

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)
(4, Leninskii ave., Moscow, 119049, Russia)

Abstract. The problem of melting the iron-based alloys in a vacuum induction furnace is to provide a metal refining while maintaining alloying elements and ensuring the specified composition. It is impossible to solve this problem without the appropriate quantitative description of deep vacuum refining processes. The objective of the research was to create an adequate model of iron-based alloy components evaporation in deep vacuum. The act of the component transition into the gas phase is taken as the limiting stage of the vacuum evaporation process. The flow of each alloy component was calculated with Langmuir's equation. The model developed by the authors gives the adequate results of prediction the iron-based high alloy components evaporation during smelting in a vacuum induction furnace with deep vacuum. The algorithm developed in this work makes possible to calculate the alteration of the alloy composition and the mass of iron during refining in a vacuum induction furnace with selected capacity, residual pressure and temperature.

Keywords: model, vacuum evaporation, Langmuir's equation, iron-based alloy, vacuum induction furnace.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-11-815-818

REFERENCES

1. Kablov E.N. *Litye lopatki gazoturbinnykh dvigatelei (splavy, tekhnologiya, pokrytiya)* [Cast blades of gas turbine engines (alloys, technology, coatings)]. Moscow: MISiS, 2001, 632 p. (In Russ.).
2. Grigoryan V.A., Stomakhin A.Ya., Utochkin Yu.I. etc. *Fiziko-khimicheskie raschety elektrostaleplavil'nykh protsessov* [Physical and chemical calculations EAF process]. Moscow: MISiS, 2007, 318 p. (In Russ.).
3. Linchevskii B.V. *Vakuumnaya induktsionnaya plavka* [Vacuum induction melting]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 240 p. (In Russ.).
4. Okorokov G.N., Shalimov A.G., Antipov V.M., Tulin N.A. *Proizvodstvo stali i splavov v vakuumnykh induktsionnykh pechakh* [Production of steel and alloys in vacuum induction furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 192 p. (In Russ.).
5. Kubaschewski O., Alcock C.B. *Metallurgical Thermochemistry*. Oxford, New York, Pergamon Press. 1967. (Russ.ed.: Kubaschewski O., Alcock C.B. *Metallurgicheskaya termokhimiya*. Moscow: Metallurgiya, 1982. 392 p.).
6. Grigoryan V.A., Belyanchikov L.N., Stomakhin A.Ya. *Teoreticheskie osnovy elektrostaleplavil'nykh protsessov* [Theoretical foundations of EAF process]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 272 p. (In Russ.).
7. Balkovoi Yu.V. Aleev R.A., Bakanov V.K. *Parametry vzaimodeystviya pervogo poryadka v rasplavakh na osnove zheleza: Obzor. inform.* [Options interaction of the first order in molten iron-based melts: Overview]. In-t “Chermetinformatsiya”. Moscow: 1987, 42 p. (In Russ.).
8. *Steelmaking data sourcebook. The Japan society for the promotion of science. The 19th committee on steelmaking*. Switzerland. Gordon and Breach Science Publishers. 1988. 326 pp.
9. Ryzhonkov D.I., Arsent'ev P.P., Yakovlev V.V. etc. *Teoriya metallurgicheskikh protsessov* [Theory of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 392 p. (In Russ.).
10. Morachevskii A.G., Sladkov I.B. *Termodinamicheskie raschety v metallurgii* [Thermodynamic calculations in metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1993, 304 p. (In Russ.).
11. Ruzinov L.P., Gulyanitskii B.S. *Ravnovesnye prevrashcheniya metallurgicheskikh reaktsii* [Equilibrium conversion of metallurgical reactions]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 416 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was performed under the Federal Program “Research and development on priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2014 – 2020 years”. Project no. 14.578.21.0023 “Development and introduction of resource-saving production technologies of complexly alloyed steels and alloys with specified properties for parts and assemblies of aerospace engineering”.

Received October 15, 2015