

5. Kulikov I.S. *Termodinamika oksidov* [Thermodynamics of oxides]. Moscow: Metallurgiya. 1986. 334 p.
6. Dashevskii V.Ya., Makarova N.N., Grigorovich K.V., Kashin V.I. Thermodynamics of solutions of oxygen in molten Fe–Ni. *DAN*. 1997. Vol. 357, No. 6, pp. 789–791. (In Russ.).
7. Hultgren R., Desai P.D., Hawkins D.T. etc. *Selected Values of the Thermodynamic Properties of Binary Alloys*. Metals Park, Ohio: Amer. Soc. Metals. 1973. 1435 p.
8. Dashevskii V.Ya. *Fiziko-khimicheskie osnovy raskisleniya zhelezonikelevykh splavov* [Physico-chemical basis deoxidation of iron-nickel alloys]. Moscow: Fizmatlit. 2011. 152 p. (In Russ.).
9. Froberg M.G., Wang M. Thermodynamic properties of sulphur in liquid copper-antimony alloys at 1473 K. *Z. Metallkd.* 1990. Vol. 81. H. 7. Pp. 513–518.
10. Chiang T., Chang Y.A. The activity coefficient of oxygen in binary liquid metal alloys. *Metall. Trans.* 1976. Vol. 7B. Pp. 453–457.
11. Snitko Yu.P., Surovoi Yu.N., Lyakishev N.P. The connection of parameters of the interaction with the atomic characteristics of components. *DAN*. 1983. Vol. 286, No. 5, pp. 1154–1156. (In Russ.).
12. Belyanchikov L.N. Universal method of recalculating the values of the interaction parameters of elements from one basis to another with help of the theory of quasi-regular solutions. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2009, No. 2, pp. 29–38. (In Russ.).
13. Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Leont'ev L.I. Thermodynamics of solutions of oxygen in complex deoxidation Fe–Co melts. *Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2014, No. 5, pp. 33–41. (In Russ.).

Received April 21, 2014

УДК 621.7

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ОЛОВА, РАСТВОРЕННОГО В ЖИДКОМ ЖЕЛЕЗЕ, ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЭКЗОГЕННЫМИ ТУГОПЛАВКИМИ НАНОФАЗАМИ*

*Анучкин С.Н., и.о. младшего научного сотрудника (ANC2@yandex.ru)
Бурцев В.Т., д.т.н., ведущий научный сотрудник
Самохин А.В., к.т.н., старший научный сотрудник*

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

Аннотация. Проведена термодинамическая оценка выбора наноразмерных частиц тугоплавких фаз Al_2O_3 и MgO для введения их в модельный расплав Fe–Sn. Усовершенствована методика приготовления композиционного материала, состоящего из смеси микропорошка железа и нанопорошков оксидов с дальнейшим получением прессованного композита, твердофазным рафинированием, введением композиционного материала в расплав. Изучены процессы взаимодействия наночастиц с поверхностно-активным Sn и установлено гетерофазное взаимодействие Al_2O_3 и MgO с Sn. Показано, что степень удаления Sn в системе Fe–Sn– Al_2O_3 составляет 17,1 – 22,8 % (отн.), в системе Fe–Sn– MgO – 19,8 – 24,6 % (отн.) в зависимости от времени изотермической выдержки (5 – 20 мин) и доли наночастиц в расплаве [0,06 – 0,18 %, (по массе)].

Ключевые слова: наночастицы, Fe–Sn, поверхностно-активные вещества, рафинирование, примеси цветных металлов.

Известно, что в связи с ростом доли металлического лома в шихте дуговых сталеплавильных печей и конверторов происходит увеличение содержания вредных примесей цветных металлов в ответственных марках сталей и сплавов, что негативно влияет на служебные свойства изделий. Эффективные и экономически оправданные способы рафинирования металла от указанных примесей в настоящее время только разрабатываются и поэтому проблема их удаления является актуальной. Сложность ее решения требует нестандартного подхода для решения этой задачи. Для этого был предложен и экспериментально подтвержден следующий механизм удаления поверхностно-активных веществ (ПАВ) – примесей цветных металлов: при введении в жидкий металл экзогенных наноразмерных частиц тугоплавких фаз (НЧТФ) на образовавшейся межфазной границе частица–расплав происходит пе-

рераспределение ПАВ и их адсорбция на поверхности наночастиц, в результате которой образуются ансамбли Me –(НЧТФ + ПАВ). Из-за градиента ПАВ происходит перемещение ансамблей в расплаве, их объединение в агрегаты и дальнейшее удаление под влиянием сил адсорбционной природы на границы раздела фаз Me –футеровка, Me –шлак, Me –газ, т.е. реализуется процесс рафинирования металла от вредных ПАВ. В работе [1] исследовано гетерофазное взаимодействие НЧТФ Al_2O_3 , TiN с ПАВ-примесью – серой в модельной системе Ni–S (0,0775 – 0,1750 %**) и доказано, что введение НЧТФ приводит к уменьшению содержания серы в системе от 12 до 30 % (отн.) в зависимости от размерных факторов. Теоретически рассчитано влияние сил адсорбционной природы на скорость движения частиц в зависимости от их размера и показано, что для наноразмерных частиц скорость, обусловленная адсорбционными силами, превосходит гравитационную и увеличивается с уменьшением размера частицы. В работе [2] изучено введение гидрофильных наночас-

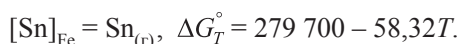
* Работа поддержана грантом РФФИ 12-08-00608-а.

** Здесь и далее % (по массе)

тиц SiO_2 в муллитокорундовую матрицу и показано увеличение срока службы керамических монокристаллических изделий на 25 – 30 %. В работе [3] исследовано влияние инокулятора карбонитрида титана со средним размером 100 нм и активирующих добавок Ti и Y на карбиды и гамма-штрих фазу сложнелегированного сплава никеля и показано, что за счет изменения в топографии и морфологии упрочняющих фаз и тонкой структуры происходит повышение жаропрочности в 2,5 – 2,8 раза и жаростойкости в 2,3 – 2,5 раза. Однако влияния НЧТФ на рафинирование металла обнаружено не было.

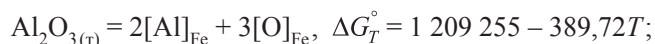
Ранее [4] исследовано гетерофазное взаимодействие НЧТФ Al_2O_3 [d_{cp} (БЭТ) = 57 нм] и TiN [d_{cp} (БЭТ) = 32 нм] в модельном сплаве Fe–Sn (0,0561 %) и показано, что введение в расплав НЧТФ различного размера в течение изотермической выдержки приводит к удалению Sn. Изучено влияние типа (Al_2O_3 и TiN), размера НЧТФ (25 – 115 нм), времени пребывания НЧТФ в расплаве (5 – 20 мин) и их концентрации (0,05 – 0,25 %) на гетерофазное взаимодействие НЧТФ с ПАВ и показано, что степень удаления Sn составляет от 7 до 21 % (отн.) в зависимости от указанных факторов. Настоящая работа является продолжением проведенных исследований.

Выбранная в данной работе для исследования система модельных расплавов Fe–Sn хорошо изучена. Исследования давления насыщенного пара Sn над расплавом Fe–Sn показали, что расплавы Fe–Sn, в отличие от Ni–Sn, характеризуются значительными положительными отклонениями от идеальности [5]. В расплавах Fe–Sn олово поверхностно-активно и с ростом температуры понижает поверхностное натяжение [6]. Проведена оценка возможности удаления олова за счет процесса испарения, представленного в виде суммарной реакции [7, 8]:



По уравнению зависимости константы равновесия реакции от температуры определено парциальное давление насыщенного пара P_{Sn} , которое при $[\text{Sn}] = 0,051\%$ и 1873 К равно $8,76 \cdot 10^{-2}$ Па. Очевидно, что в условиях эксперимента количество Sn, перешедшее из расплава в газовую фазу, пренебрежимо мало.

Термодинамический анализ выбора НЧТФ Al_2O_3 и MgO был основан на существующих термодинамических, кинетических, межфазных и других свойствах взаимодействия вещества в стандартных условиях с расплавами железа. Для выбранных частиц рассчитана стандартная энергия Гиббса реакции диссоциации в расплавах железа по суммарной реакции [7, 8]:



Произведена оценка характеристики смачиваемости, результаты представлены в таблице. Анализ данных таблицы показал, что оксиды являются термодинамически стабильными в расплавах железа и они лиофобны по отношению к нему.

Цель настоящего исследования состояла, во-первых, в исследовании поведения Sn в модельных расплавах Fe–Sn при введении в расплав НЧТФ Al_2O_3 [d_{cp} (БЭТ) = 41 нм] и MgO [d_{cp} (БЭТ) = 28 нм] и изучении влияния размерных факторов на гетерофазное взаимодействие НЧТФ с Sn и, во-вторых, в изучении влияния природы НЧТФ на поведение Sn при всех прочих равных условиях эксперимента.

Анализ нанопорошков Al_2O_3 и MgO, полученных плазмохимическим методом [10], показал, что они полидисперсны и распределение частиц по размерам близко к логарифмически нормальному. Дисперсный состав (анализатор Mastersizer 2000, Malvern) счетного распределения наночастиц характеризовался следующим составом: для Al_2O_3 : $d_{10} = 25$ нм; $d_{50} = 51$ нм; $d_{90} = 83$ нм, для MgO: $d_{10} = 23$ нм; $d_{50} = 36$ нм; $d_{90} = 62$ нм, где $d_{(x)}$ – размер, ниже которого располагается $x\%$ частиц. Удельную поверхность анализировали методом БЭТ на анализаторе Micrometrics TriStar 3000. Для Al_2O_3 она была равна $36,4$ м²/г, для MgO – $59,5$ м²/г. Форма частиц Al_2O_3 сферическая, форма частиц MgO кубическая. Состав НЧТФ Al_2O_3 характеризовался присутствием δ (50 – 60 %), θ (10 – 20 %) и γ фаз (10 – 20 %), а MgO – однофазный с присутствием незначительного количества Mg.

Прямое введение НЧТФ в жидкий металл проблематично, так как при нагреве они достаточно легко агломерируют, интенсивно взаимодействуют с адсорбированными газами и плохо смачиваются жидким металлом. Для введения НЧТФ в модельный расплав Fe–Sn была усовершенствована методика приготовления композиционного материала, содержащего микронные частицы Fe с внедренными в них НЧТФ и проведено исследование распределения НЧТФ в матрице Fe. Композиционный материал Fe + НЧТФ (2,5 %) готовили в планетарной мельнице в атмосфере Ar в течение 1 ч. После обработки смесь порошков подвергалась одноосному прессованию при давлении 35 МПа и дегазации в атмосфере Ar при 300 °С и в вакууме при 300 °С с последующим хранением в вакууме при 25 °С.

Распределение и внедрение НЧТФ в матрицу Fe были подтверждены анализом удельной поверхности компакта – 20-кратное уменьшение удельной

Значения ΔG° (Дж/моль) и θ (град) соединений в расплаве железа при 1823 К

Соединение	$T_{\text{пл}}$ К	ΔG	$\ln K_p$	θ
Al_2O_3	2327	479 309	–30,79	141 [9]
MgO	3098	225 269	–14,47	130 [9]

поверхности после обработки в планетарной мельнице (для Al_2O_3 с 1,27 до 0,06 m^2/g , для MgO с 1,35 до 0,08 m^2/g). Аналогичные зависимости наблюдали в работе [11], где изучали равномерность распределения НЧТФ в матрице Ni на растровом электронном микроскопе Quanta 3D FEG.

Рентгенофазовый (дифрактометр Rigaku Ultima 4) и химический анализ (атомно-эмиссионный спектрометр с индуктивно-связанной плазмой фирмы Jobin Yvon, модель «Ultima 2») показал, что при незначительном времени обработки в планетарной мельнице (до 60 мин) на рентгенограммах пики остаются неизменными, величина намолта не превышает 0,05 %, а образование интерметаллидов и других химических соединений обнаружено лишь на уровне следовых концентраций.

Модельный сплав Fe–Sn (Fe марки ОСЧ 6-2) выплавливали в вакуумной печи сопротивления с графитовым нагревателем в корундизовом тигле емкостью 200 г при $P_{He+10\%H_2} = 0,1$ МПа с введением в расплав без нарушения герметичности добавки чистого олова марки ОВЧ-000 и с 20-мин изотермической выдержкой и кристаллизацией металла в тигле.

Опыты по изучению гетерофазного взаимодействия НЧТФ с Sn проводили в вакуумной индукционной печи, которая имеет специальный корзиночный индуктор, обеспечивающий концентрированный ввод в расплав

плав ВЧ энергии и интенсивное перемешивание металла с НЧТФ как на поверхности, так и внутри расплава. Плавки проводили при $P_{He+10\%H_2} = 0,2$ МПа. Нагрев и плавление металла контролировали оптическим пирометром ЭОП-66 с обработкой данных ПО «Экохром». Введение композиционного материала осуществляли без нарушения герметичности с последующей изотермической выдержкой (1660 °С) от 5 до 20 мин в зависимости от опыта. После окончания эксперимента определяли содержание Sn на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой с чувствительностью определения 0,001 %.

Всего было проведено 25 опытов с тремя типами сплавов: Fe–Sn (0,0561 %); Fe–Sn– Al_2O_3 (25–83 нм) и Fe–Sn– MgO (23–62 нм), результаты представлены в виде степени удаления олова $\alpha = [([Sn]_{исх} - [Sn]_{кон}) / [Sn]_{исх}]$, отн. %. На рис. 1, 2 показаны экспериментальные результаты гетерофазного взаимодействия НЧТФ с Sn, где на рис. 1, а и 2, а представлены зависимости $[Sn] = f(\tau)$ при доли НЧТФ в расплаве 0,12 %, а на рис. 1, б и 2, б зависимости $[Sn] = f(\% \text{ НЧТФ})$, где время выдержки металла было равно 600 с.

Анализ результатов доказал, что введение НЧТФ Al_2O_3 , MgO при изотермической выдержке 300–1200 с привело к снижению содержания Sn. Степень удаления олова α для системы Fe–Sn– Al_2O_3 состави-

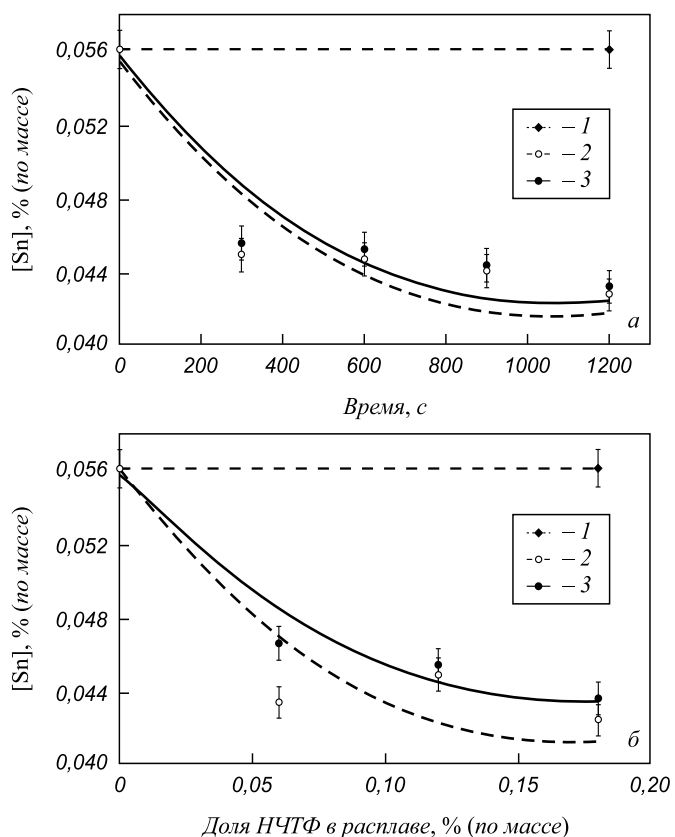
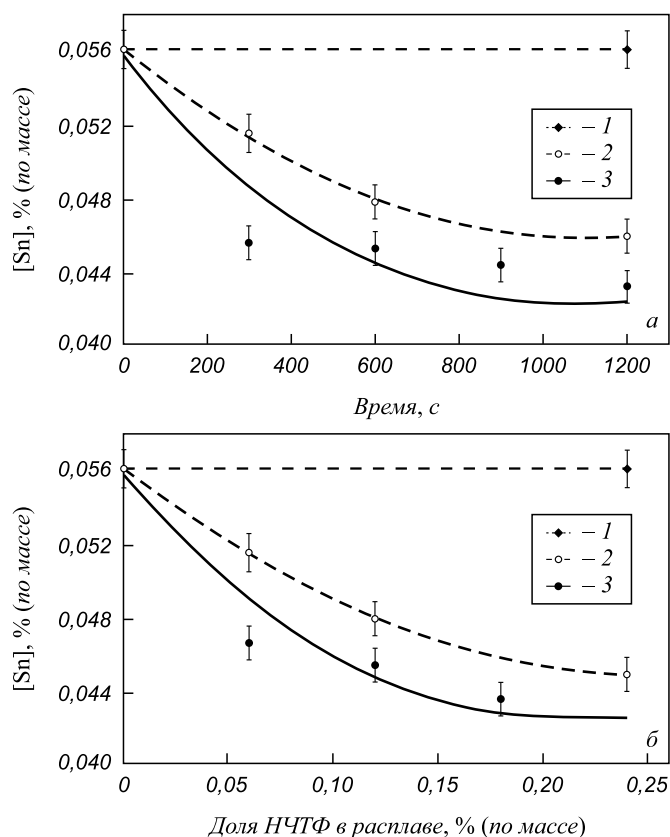


Рис. 1. Зависимость содержания олова в системе Fe–Sn от времени изотермической выдержки (а) и доли НЧТФ в расплаве (б):
1 – Fe–Sn; 2 – Fe–Sn– Al_2O_3 (34–115 нм) [4];
3 – Fe–Sn– Al_2O_3 (25–83 нм)

Рис. 2. Зависимость содержания олова в системе Fe–Sn от времени изотермической выдержки (а) и доли НЧТФ в расплаве (б):
1 – Fe–Sn; 2 – Fe–Sn– Al_2O_3 (25–83 нм);
3 – Fe–Sn– MgO (23–62 нм)

ла 17–23 % (отн.), а для системы Fe–Sn–MgO – 20–25 % (отн.). Термодинамический анализ процессов удаления Sn показал, что испарение Sn не может значительно повлиять на снижение его содержания в металле, что подтверждается опытом без введения НЧТФ. Поэтому можно сделать вывод об удалении Sn как примеси цветного металла, проявляющего поверхностно-активные свойства, по адсорбционному механизму.

Для изучения влияния размера наночастиц на адсорбционное удаление Sn на рис. 1 приведены зависимости изменения содержания Sn от времени изотермической выдержки (см. рис. 1, а) и доли НЧТФ в расплаве (см. рис. 1, б) систем Fe–Sn–Al₂O₃ (34–115 нм) [4] и Fe–Sn–Al₂O₃ (25–83 нм). Видно, что $\alpha_{\text{ср}}$ возрастала от 14 до 20 % (отн.) с уменьшением размера частиц ($d_{\text{ср}}$ БЭТ) от 57 до 41 нм. Эти данные подтвердили, что эффективность действия мелких фракций более значительная по сравнению с крупной фракцией и что для адсорбционного механизма удаления ПАВ важную роль играет размер и кривизна поверхности наночастиц.

Сравнение зависимостей $[\text{Sn}, \text{\%}] = f(\tau)$ после введения НЧТФ Al₂O₃ и MgO (см. рис. 2) показывает, что, во-первых, введение MgO приводит к незначительно более высокой степени удаления Sn [$\alpha(\text{Al}_2\text{O}_3) - 17 - 23 \text{\%}$ (отн.), $\alpha(\text{MgO}) - 20 - 25 \text{\%}$ (отн.)], во-вторых, подтверждена зависимость влияния размера наночастиц ($d_{\text{ср}}(\text{Al}_2\text{O}_3) = 41 \text{ нм}$ и $d_{\text{ср}}(\text{MgO}) = 28 \text{ нм}$) на процесс рафинирования и, в-третьих, меньшая лиофобность MgO существенно не влияет на процесс удаления ансамблей Fe–(MgO + Sn) из расплава.

Выводы. Исследовано гетерофазное взаимодействие наночастиц тугоплавких соединений Al₂O₃ (25–83 нм) и MgO (23–62 нм) с ПАВ – оловом в модельной системе Fe–Sn. Показано, что с учетом термодинамического анализа и опыта без введения НЧТФ удаление олова

происходит в результате гетерофазного взаимодействия НЧТФ с ПАВ с образованием ансамблей и их удалением на границу раздела фаз Me–газ, Me–шлак или Me–футеровка.

Подтверждена большая эффективность удаления ПАВ с помощью мелких фракций НЧТФ по сравнению с крупными фракциями, что соответствует общему правилу о важной роли размера и кривизны НЧТФ при адсорбционном механизме удаления ПАВ из жидкого металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анучкин С.Н., Бурцев В.Т., Самохин А.В., Гвоздков И.А. // *Металлы*. 2012. № 2. С. 11–19.
2. Kuznetsov D.V., Kostitsyn M.A., Konyukov Yu.V // *Refractories and industrial ceramics*. 2012. Vol. 53. No. 1. P. 54–58.
3. Eremin E.N., Filippov Yu.O., Eremin A.E. // *Russian Metallurgy (Metally)* 2010. No. 12. P. 1131–1135.
4. Анучкин С.Н., Бурцев В.Т., Самохин А.В. Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 75 лет: Сб. научных трудов. – М.: Интерконтакт Наука, 2013. С. 73–94.
5. Зайцев А.И., Зайцева Н.Е., Шахпазов Е.Х., Могутнов Б.М. // *Журнал физической химии*. 2002. Т. 76. № 12. С. 2129–2136.
6. Nogi K., Chung W.B., McLean A. etc. // *Materials Transactions JIM*. 1991. Vol. 32. No. 2. P. 164–168.
7. Buzek Z. *Fundamental Thermodynamic Data on Metallurgical Reactions and Interactions of Elements in System Significant for Metallurgical Theory and Practice*. – Ostrava: Vyzkumny ustav hutnictvi zelez, 1979. – 110 с.
8. Туркдоган Е.Т. *Физическая химия высокотемпературных процессов*. – М.: Металлургия, 1985. – 344 с.
9. Найдич Ю.В. *Контактные явления в металлических расплавах* – Киев: Наукова думка, 1972. – 196 с.
10. Цветков Ю.В. Самохин А.В. // *Автоматическая сварка*. 2008. № 11. С. 171–175.
11. Анучкин С.Н., Гвоздков И.А., Самохин А.В. и др. // *Физика и химия обработки материалов*. 2011. № 2. С. 71–78.

© 2014 г. Анучкин С.Н., Бурцев В.Т., Самохин А.В.
Поступила 8 апреля 2014 г.

Izvestiya VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. No. 7. Vol. 57, pp. 16–20.

FEATURES BEHAVIOR OF TIN, DISSOLVED IN THE LIQUID IRON BY REACTION WITH EXOGENOUS REFRACTORY NANOPHASE

Anuchkin S.N., Acting Junior Researcher (ANC2@yandex.ru)
Burtsev V.T., Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher
Samokhin A.V., Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher

Institute of Metallurgy and Material Science named after Baykov A.A., RAS (Leninskii pr., 49, 119991, Moscow, Russia)

Abstract. Thermodynamic option pricing nanoscale particles of refractory phases of Al₂O₃ and MgO were spent for their introduction into the melt model of Fe–Sn. Preparing technique of a composite material consisting of a mixture of micropowder iron and oxide nanopowders were improved with further obtain extruded composite solid-refining by introducing the composite to the melt. The authors studied the interactions of nanoparticles with a surfactant Sn and investigated heterophase interaction Al₂O₃ and MgO with Sn. It was found that the degree of removal of Sn in the Fe–Sn–Al₂O₃ system was 17.1–22.8 rel. %, and in the Fe–Sn–MgO sys-

tem – 19.8–24.6 %. It depends on the time of isothermal aging (5–20 min) and the concentration of nanoparticles in the melt (0.06–0.18 wt. %).

Keywords: nanoparticles, Fe–Sn, surfactants, refining nonferrous metal impurities.

REFERENCES

1. Anuchkin S.N., Burtsev V.T., Samokhin A.V., Gvozdokov I.A. Influence of the size factors on heterophase interaction of exogenous nanoparticles of refractory compounds with sulfur in the model of nickel melt. *Metally – Russian Metallurgy (Metally)*. 2012. No. 2, pp.11–19. (In Russ.).
2. Kuznetsov D.V., Kostitsyn M.A., Konyukov Yu.V. Development of a procedure for modifying nanomaterials of mullite-corundum mixes in equipment with a high-intensity rotating electromagnetic field. *Refractories and industrial ceramics*. 2012. Vol. 53. No. 1, pp. 54–58.

3. Eremin, E.N. Filippov Yu.O., Eremin A.E. Promising Method of Producing Cast Billets from. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010. No. 12, pp. 1131–1135.
4. Anuchkin S.N., Burtsev V.T., Samokhin A.V. Physico-metal model of nickel and iron melts, containing surfactant and exogenous refractory nanophase. *Institut metallurgii i materialovedeniya im. A.A. Baikova RAN – 75 let, Sb. nauchnykh trudov* [Institute of Metallurgy and Material Science named after Baykov A.A., RAS – 75th Anniversary, References], Moscow: Interkontakt Nauka, 2013, pp. 73–94. (In Russ.).
5. Zaitsev A.I., Zaitseva N.E., Shakhpazov E.Kh., Mogutnov B.M. Thermodynamic characteristics of evaporation of liquid iron alloys with tin. *Zhurnal fizicheskoi khimii – Russian Journal of Physical Chemistry (A)*. 2002. Vol. 76. No.12, pp. 2129–2136. (In Russ.).
6. Nogi K., Chung W.B., McLean A. etc. Surface tension of liquid Fe–(Cu, Sn, Cr) and Ni–(Cu, Sn) binary alloys. *Materials Transactions JIM*. 1991. Vol. 32. No. 2, pp. 164–168.
7. Buzek. Z. *Fundamental Thermodynamic Data on Metallurgical Reactions and Interactions of Elements in System Significant for Metallurgical Theory and Practice*. Ostrava: Vyzkumny ustav hutnictvi zeleza. 1979. 110 p.
8. Turkdogan E.T. *Fizicheskaya khimiya vysokotemperaturnykh protsessov* [Physical chemistry of high temperature processes]. Moscow: Metallurgiya, 1985. 344 p. (In Russ.).
9. Naidich Yu.B. *Kontaktnye yavleniya v metallicheskih rasplavakh* [Contact phenomena in metallic melts]. Kiev: Naukova dumka, 1972. 196 p. (In Russ.).
10. Tsvetkov Yu.V. Samokhin A.V. Plasma Nanopowder Metallurgy. *Avtomaticheskaya svarka*. 2008. No. 11, pp. 171–175. (In Russ.).
11. Anuchkin. S.N., Gvozdokov I.A., Samokhin A.V., Serov G.V., Burtsev V.T. Properties of composite nanomaterial Al₂O₃/Ni, obtained by mechanochemistry. *Fizika i khimiya obrabotki materialov – Inorganic Materials: Applied Research*. 2011. No. 2, pp. 71–78. (In Russ.).

Received April 8, 2014

УДК 6.69.184.14

КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТОРНЫЙ ПРОЦЕСС С КОМБИНИРОВАННЫМ ПУЛЬСИРУЮЩИМ ДУТЬЕМ

Явойский А.В., д.т.н., профессор кафедры «Металлургия стали и ферросплавов» (msif.misis@isis.ru)

Хисамутдинов Н.Е., д.т.н., профессор

Белов В.В.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

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

Аннотация. Проанализированы способы управления технологическим режимом плавки в конвертерах с комбинированным дутьем. Наиболее перспективным из них является продувка сталеплавильной ванны нестационарными (пульсирующими) газовыми струями. Рассмотрены протекающие в сталеплавильной ванне процессы, которыми можно управлять с помощью нестационарного режима комбинированной продувки при соответствующем подборе амплитудно–частотных характеристик (АЧХ) газовых струй. Приведены результаты опытно–промышленных испытаний нестационарного (пульсирующего) комбинированного дутья в 160–т конвертерах. Разработаны конструкции газодинамических модулей, обеспечивающих расширение регулируемого диапазона АЧХ пульсаций дутья, предназначенные для оснащения донных фурм. Фурмы предлагаемой конструкции позволят увеличить возможности управления технологическим процессом в конвертере с комбинированным дутьем.

Ключевые слова: конвертор, фурма, сопло, пульсации, амплитудно–частотные характеристики (АЧХ), газодинамический модуль (ГДМ).

В настоящее время, когда около 70 % всей стали выплавляется в конвертерах, металлургам–сталеплавильщикам приходится одновременно решать, на первый взгляд, взаимоисключающие задачи: повышение производительности сталеплавильных агрегатов, прежде всего кислородных конверторов; увеличение доли перерабатываемого лома в составе металлошихты, в первую очередь в кислородных конвертерах; обеспечение потребителей качественным металлическим полупродуктом с минимально возможными отклонениями по химическому составу, загрязненности неметаллическими включениями и содержаниями серы и фосфора. С этой целью было разработано около 30 разновидностей процессов с комбинированной продувкой конверторной ванны, предусматривающих, наряду с верхней кислородной продувкой, вдувание через днище нейтрального или инертного газа [1–3]. Несмотря на различия в способах комбинированной продувки по составу дутья,

конструкциям применяемых продувочных устройств, общим для них является получение стали с низким содержанием вредных примесей, высокий выход годного и благоприятные условия службы огнеупоров футеровки. Эти преимущества обеспечиваются благодаря улучшению перемешивания сталеплавильной ванны, что открывает широкие перспективы перед кислородно–конвертерным процессом с комбинированным дутьем.

Хотя комбинированный кислородно–конверторный процесс активно эксплуатируется в течении 25 лет, он до сих пор недостаточно изучен. Сведения о характере направленной циркуляции расплава для условий комбинированной продувки ограничены. Противоречивы данные о целесообразных приемах улучшения перемешивания ванны. Нет надежных сведений относительно расхода нейтрального (или инертного) газа через днище, выбора рациональной высоты расположения верхней кислородной фурмы, а также вариантов разме-