

15. Коновалов Р. П., Ланевский Э. Б. // Сталь. – 1974. – № 8. – С. 695-699.
16. Уразгильдеев А. Х., Пронских С. Н., Алымов А. А. и др. // Сталь. – 1977. – № 9. – С. 796-799.
17. Ebnett W. A., Ruttiger K., // Arch. Eisenh *ü* tt. – 1972. – № 12. – S. 879-886.
18. Fischer W. A., Bardenheuer P. W. // Arch. Eisenh *ü* tt. – 1968. – № 8. – S. 559-570.
19. Бааре Р. –Д., Бекерс Э., Пелике В. Г. // Чер. металлы. – 1962. – № 22. – С. 39-49.
20. Русов Р., Батев М., Петров П. // Рудодобив и металургия. – 1970. – № 8-9. – С. 36-40.
21. Коновалов Р. П., Ланевский Э. Б. // Металлургия черных металлов. – Алма-Ата: Казах. политехн. ин-т, 1973. – Вып. 1. – С. 87-92.
22. Коновалов Р. П., Ланевский Э. Б. // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1974. – № 9. – С. 67-72.
23. Mayer E. // ARS J. – 1961. – V. 31, № 12. – P. 1783-1785.
24. Adelberg M. // AIAA J. – 1976. – V. 5, № 3. – P. 1408-1415.
25. Корпачев В. Г., Попель С. М. // Физическая химия металлургических процессов. – Свердловск: Metallurgizdat, 1959. – № 93. – С. 64-92.
26. Коновалов Р. П., Ланевский Э. Б., Просвилов С. Н. // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1978. – № 6. – С. 40-44.
27. Дубров Н. Ф. // Сталь. – 1943. – № 3-4. – С. 13-20.
28. Мылко С. Н. // Черная металлургия. – М.: Metallurgizdat, 1955. – № 5. – С. 101-109.
29. Hoff H., Lessing H., Massing C. // St. Eis. – 1956. – № 22. – S. 1422-1452.
30. Колганов Г. С., Тарапуров Н. В. // Проблемы стального слитка. – М.: Металлургия, 1969. – С. 138-141.

Поступила 27.10.2009

УДК 669:532.516.13

Н. И. Захаров

Национальный технический университет, Донецк

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ВНЕПЕЧНОЙ ДЕГАЗАЦИИ СТАЛИ

Рассмотрены различные способы интенсификации массообменных процессов дегазации стали. Установлено, что при выборе способа интенсификации массообменных процессов необходим индивидуальный подход, учитывающий материальные и энергетические затраты.

Ключевые слова: массообмен, интенсификация, дегазация, азот, вакуумирование, аргон, электростатическое поле, диффузия, кинетическое звено.

Rozглянуто різні способи інтенсифікації масообмінних процесів дегазації сталі. Встановлено, що при виборі способу інтенсифікації масообмінних процесів необхідний індивідуальний підхід, що враховує матеріальні та енерговитрати.

Ключові слова: масообмін, інтенсифікація, дегазація, азот, вакуумування, аргон, електро-статичне поле, дифузія, кінетична ланка.

Different kinds of intensification mass-transfer processes for degassing of steel are discussed. Using the concrete kind, we must calculated material and energetical expenses.

Keywords: mass transfer, intensification, degassing, nitrogen, vacuum processing, argon, electrostatic field, diffusion, kinetics link.

Проблема дегазации стали остается одной из актуальных, так как газы, имеющиеся в металле, ухудшают его эксплуатационные свойства.

Наиболее перспективные способы рафинирования расплавов от растворенных

Получение и обработка расплава

газов (водорода, азота, кислорода) – внепечные, связанные с воздействием вакуума, продувки инертным газом, электростатического поля и др.

Распространенным способом внепечной дегазации стали является вакуумирование. Ускорение вакуумирования расплавов путем интенсификации массообменных процессов традиционно достигается сосредоточенной продувкой аргоном (при вакуумировании в ковше [1] или порционном вакуумировании [2]). Продувка аргоном перемешивает жидкую сталь, приводя к уменьшению толщины диффузионного пограничного слоя на границе «металл-вакуум» и к интенсификации массообменных процессов [3].

Для большей активизации технологии используют предварительный нагрев аргона перед подачей в жидкую ванну [4, 5]. Благодаря меньшему термическому расширению аргонной фазы при внедрении в расплав металла для данной интенсивности продувки образуется значительное количество мелких пузырей инертного газа. Интенсификация массообменных процессов в этом случае обусловлена возрастанием суммарной площади контакта «аргон-металл».

Как известно, в расплаве стали и на границе «вакуум-металл» растворенный в нем газ (водород, азот, кислород) находится в виде ионов. Поэтому интенсификатором массообменных процессов может быть электростатическое поле с источником в вакуум-камере.

Если его напряженность на рассматриваемой межфазной поверхности выше критического значения, то ионы удаляемого водорода срываются с зеркала неподвижного металла, ускоряя его дегазацию за счет возрастания градиента концентрации удаляемого газа в жидкой ванне как движущей силы диффузионного процесса [6]. Этот интенсификатор эффективен как для диффузионного, так и диффузионно-адсорбционного лимитирования массопереноса.

При производстве ответственных марок стали может возникнуть потребность глубокой деазотации металла, доведения концентрации растворенного в жидкой ванне азота до очень низких значений ($< 0,01\%$). В этом случае лимитирующим звеном массопереноса является, как правило, кинетическое в силу энергетических трудностей объединения ионов азота в молекулы на межфазной границе [7, 8]. На этой стадии дегазации расплава целесообразно подключение электростатического поля умеренных напряженностей, которое, экономя электроэнергию, перераспределяет по зеркалу металла ионы удаляемого азота с образованием очагов более активной молизации этих частиц [9]. В этих условиях ускорение технологии достигается за счет интенсификации кинетического лимитирующего звена массопереноса.

Исходная система нестационарных дифференциальных уравнений, описывающих диффузионный процесс, включает уравнение конвективной диффузии, гидродинамики и неразрывности, записанных, в силу осевой симметрии задачи, в цилиндрической системе координат

$$\frac{\partial C}{\partial F_0} + \text{Pe} \left(\vec{v}, \vec{V}, C \right) = \text{Lu} \cdot \Delta \cdot C; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial F_0} + \text{Pe} \left(\vec{v}, \vec{V} \right) \vec{v} = -\text{Eu} \cdot \text{Pe} \cdot \vec{\nabla} \rho + \text{Pr} \cdot \Delta \vec{v} + \frac{\text{Pe}}{\text{Fr}} \cdot \vec{e}_g; \quad (2)$$

$$\frac{v_1}{\eta_1} + \frac{\partial v_1}{\partial \eta_1} + \frac{\partial v_3}{\partial \eta_3} = 0, \quad (3)$$

где $\vec{\nabla} = \vec{\nabla} \cdot L$, $\Delta = \Delta \cdot L^2$ – безразмерные дифференциальные операторы Гамильтона и Лапласа; $C = C/C_0$; C_0 – начальное размерное значение содержания растворенного в расплаве азота; $\text{Lu} = D/a$ – число Льюиса; $\vec{g} = g\vec{e}_g$; $P = P_0/P$; $\text{Pr} = \nu/a$;

$Eu = P_0 / (\rho v_0^2)$; $Fr = v_0^2 / (gL)$ – критерии Прандтля, Эйлера и Фруда соответственно;
 $Fo = a\tau / L^2$; $\bar{v} = \bar{v} / v_0$; $Re = v_0 \cdot L / a$; Fo – критерий Фурье; Рекритерий Пекле; \bar{v} – безразмерный вектор скорости с компонентами v_1 и v_3 ; L, v_0 – масштабы длины и скорости.

В рассматриваемом приближении на начальном этапе исследований анализируется область малых интенсивностей продувки и пренебрежимо малого газосодержания расплава.

Граничные условия:

– на твердых поверхностях рафинировочной цилиндрической емкости приняты нулевыми радиальная и вертикальная компоненты скорости жидкого металла, а также удельный диффузионный поток;

– безразмерные компоненты скорости расплава в рассматриваемом приближении на днище этой емкости определялись выражениями

$$v_1 = 0, \quad v_3 = v_0 \ell^{-\gamma} \eta_1^2 \quad (4)$$

в соответствии с характером распределения интенсивности продувки по днищу рафинировочной емкости с пористыми элементами, где η_1, η_3 – безразмерные координаты; γ – положительная константа;

– осевая симметрия задачи сводит к нулю на оси симметрии радиальную компоненту скорости стали и удельный диффузионный поток;

– на границе «вакуум - движущийся металл»

$$C = K_E \cdot K_N \cdot \sqrt{P_{N_2}} / C_0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial v_s}{\partial n} + \frac{\partial v_n}{\partial s} = 0, \quad (6)$$

где s и n – касательное и нормальное направления к межфазной границе; P_{N_2} – парциальное давление удаляемого азота в полости вакууматора; K_N – постоянная Сиверса для азота; распределение K_E по межфазной границе определяется по методике работы [10] для электростатического поля умеренных напряженностей.

На основании численного исследования по методу конечных разностей можно установить следующие закономерности:

– при увеличении времени обработки металла происходит достаточно малое снижение содержания азота в расплаве в области малых интенсивностей его продувки аргоном;

– увеличение давления в вакууматоре и снижение интенсивности продувки замедляют процесс дегазации;

– отключение источника электрического напряжения приводит, как показывает расчет, к результатам по диффузионному процессу, близким к варианту наличия электрического поля.

Последнее имеет важное значение. Действительно, распределение концентрации удаляемого из металла азота на межфазной границе имеет области повышенного и пониженного значений этой характеристики в сравнении с вариантом $E = 0$ [10]. Следовательно, ускорение диффузии во второй области компенсируется замедлением процесса в первой области.

Отсюда следует вывод: электростатическое поле умеренных напряженностей для малых интенсивностей продувки жидкого стали аргоном усиливает локальные характеристики кинетического звена массопереноса и практически не влияет на интегральные характеристики звена диффузионного.

Получение и обработка расплава

Усиление кинетического звена массопереноса особенно важно при дегазации стали от растворенного азота, ионы которого, как известно, испытывают энергетические трудности при молизации на межфазной границе.

Если дегазация раскисленного металла от азота затруднена или блокирована слабым кинетическим лимитирующим звеном (малые концентрации удаляемого азота, либо повышенные значения концентрации поверхностно-активных элементов в расплаве), то благодаря перераспределению ионов этого газа по межфазной границе с помощью электростатического поля возникают локальные очаги более активной молизации рассматриваемых атомов и десорбции образованных молекул в полость вакууматора. Дегазация при этом может быть интенсифицирована и доведена до более низких концентраций удаляемого газа. Эти положения согласуются с выводами профессора В. И. Явойского, по которым, если дегазация лимитируется кинетическим звеном массопереноса, то есть химическим актом объединения атомов удаляемого газа в молекулы на межфазной границе, то это звено массопереноса (как и процесс дегазации в целом) усиливается с возрастанием квадрата (локальной) концентрации этих атомов на рассматриваемой границе.

На интенсификацию массообменных процессов существенное влияние оказывает рассредоточение продувки расплава аргоном по днищу ковша с использованием пористых элементов [11, 12]. Благодаря порам малого диаметра реализуется высокая суммарная поверхность «аргон-металл», обеспечивающая большие скорости массопереноса удаляемого из расплава газа в пузыри аргона. Если интенсивность продувки достаточно высокая и приближается к оптимальному, не выходя из пузырькового режима внедрения аргона в металл, то в отдельных случаях можно отказаться от одновременного вакуумирования, осуществляя продувку во время выпуска расплава из печи в ковш [13].

В результате при выборе способа интенсификации массообменных процессов технологии внепечной дегазации стали необходим индивидуальный подход, учитывающий в том числе материальные и энергозатраты (дороговизну аргона, импортных пористых огнеупорных блоков и др.).

Необходимо ускорить в Украине разработку и производство продувочных устройств на пористых элементах в направлении увеличения стойкости и дешевизны.



Список литературы

1. *Металлургия стали* / В. И. Явойский, Ю. В. Кряковский, В. П. Григорьев и др. – М.: Металлургия, 1983. – 584 с.
 2. *Каблуковский А. Ф., Крикунов Б. П., Неровный Ю. М.* Промышленное внедрение аргоно-вакуумного порционного рафинирования стали // *Металлург.* – 1987. – № 8. – С. 19-20.
 3. *Явойский А. В., Явойский В. И., Терзиян С. П.* Кинетические особенности удаления водорода из расплавов на основе железа // *Изв. вузов. Чер. металлургия.* – 1981. – № 7. – С. 5-8.
 4. Пат. 3129234 ФРГ, МКИ С 22 В 9/02. *Verta hrenzum Spulen von Metalschmelzen inebesonvon stahlscglSchmelzen mit inerten Gasen* / E. Becker, G. Holtschneider, A. Kubon. – Оубл. 10.02.83.
 5. *Найдек В. Л., Наривский А. В., Ганжа Н. С.* Дегазация алюминиевых сплавов вакуумно-плазменной обработкой их расплавов // *Процессы литья.* – 2008. – № 3. – С. 35-38.
 6. *Кайбичев А. В., Легинских Б. М.* Рафинирование жидких металлов и сплавов в электрическом поле. – М.: Наука, 1983. – 120 с.
 7. *Shiro B., Tadahiro S., Nideo T.* Скорость десорбции азота из жидкого железа и его расплавов // *Тэцу то хаганэ. Iron and Steel Inst. Jap.* – 1974. – V. 60, № 10. – P. 1443-1453.
 8. *Tosisada S., Akira S. Masaesu H.* Исследование механизма выделения азота из жидкого железа // *Тэцу то хаганэ J. Iron and Steel Inst. Jap.* – 1975. – V. 61, № 12. – P. 450-451.
 9. *Захаров Н. И., Троцан А. И., Овдиенко А. А.* Об использовании электростатического поля в технологии внепечной дегазации стали // *Процессы литья.* — 2009. – № 1. – С. 8-11.
- ISSN 0235-5884. Процессы литья. 2010. № 4 (82)*

10. Захаров Н. И., Троцан А. И. Учет в законе Сиверта фактора воздействия на движущийся металл электростатического поля // Там же. – 2009. – № 3. – С. 15-16.
11. Баканов К. П., Бармотин И. П., Власов Н. Н. Рафинирование стали инертным газом. – М.: Металлургия, 1975. – 229 с.
12. Борнацкий И. И., Мачикин В. И., Живченко В. С. Внепечное рафинирование чугуна и стали. – Киев: Техника, 1979. – 167 с.
13. Захаров Н. И., Троцан А. И., Дюдкин Д. А. Массообменные процессы внепечной дегазации стали. – Донецк: NORD PRESS, 2009. – 156 с.

Поступила 22.02.2010

УДК 669.162.275:669-154

**В. Б. Бубликов, В. П. Латенко, В. В. Суменкова,
А. И. Хоменко*, Е. П. Нестерук, Ю. Д. Бачинский,
В. Я. Хоружий, Т. В. Зеленская**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ ФЕРРОСПЛАВА ФС65РЗМ15 В ЖИДКОМ ЧУГУНЕ

Проведены исследования процессов, протекающих при плавлении ферросплава ФС65РЗМ15 в жидком чугуне. С использованием закалочного-структурного метода исследована диффузия и физико-химическое взаимодействие основных компонентов системы «ферросплав - жидкий чугун». Показано, что параллельно с процессом плавления интенсивно протекает диффузионный перенос кремния и РЗМ в чугун, а железа – в ферросплав. Определены скорости диффузии кремния и железа в переходной зоне. Содержание РЗМ в зоне плавления в несколько раз меньше по сравнению с исходным ферросплавом. Повышение температуры жидкого чугуна на 50 °С в два раза уменьшает ширину переходной зоны и увеличивает скорость встречной диффузии химических элементов.

Ключевые слова: чугун, плавление, модифицирование, ферросплав, диффузия, фазовый состав.

Проведено дослідження процесів, що протікають при плавленні феросплаву ФС65РЗМ15 в рідкому чавуні. З використанням гартівно-структурного методу досліджені дифузія і фізико-хімічна взаємодія основних компонентів системи «феросплав - рідкий чавун». Показано, що паралельно з процесом плавлення інтенсивно протікає дифузійний перенос кремнію і РЗМ в чавун, а заліза - в феросплав. Визначено швидкості дифузії кремнію та заліза у перехідній зоні. Вміст РЗМ в зоні плавлення в кілька разів менше в порівнянні з вихідним феросплавом. Підвищення температури рідкого чавуну на 50 °С в два рази зменшує ширину перехідної зони та збільшує швидкість зустрічної дифузії хімічних елементів.

Ключові слова: чавун, плавлення, модифікування, феросплав, дифузія, фазовий склад.

Researches of the processes proceeding at ferroalloy FeSi65REM15 fusion in liquid cast iron are conducted. By using of a quenching-structural method diffusion and physico-chemical interaction of the basic components of system «ferroalloy - liquid metal» are investigated. It is shown that in parallel with fusion process diffusion transfer of silicon and REM in cast iron and iron in ferroalloy