

3. Токовой О.К., Шабуров Д.В. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 9. С. 22 – 25.
4. Nunnington R.C., Sutcliffe N. The steelmaking and casting of Ti stabilized stainless steels. Present at the 59-th Electric Furnace Conference. Phoenix, Arisona, Nov. 2001. P. 1 – 39.
5. Granier B., Renard R., Coutures J.P. // High Temperature Ceramics (France). 1980. No. 17. P. 235 – 247.
6. Атлас шлаков. Справ. изд. Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1984. – 208 с.
7. Evans D., Pelke R.D. // Trans. AIME. 1964. Vol. 230. P. 1657 – 1662.

© 2013 г. О.К. Токовой, Д.В. Шабуров
Поступила 27 мая 2013 г.

УДК 621.74.045

И.О. Леушин, В.А. Ульянов, Л.И. Леушина

Нижегородский государственный технический университет

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ГАЗОВОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Аннотация. Рассматриваются теоретические предпосылки прогнозирования образования дефектов газового происхождения при использовании низкотемпературного прокаливании оболочковых форм перед их заливкой стальным расплавом. Обосновывается факт снижения вероятности образования газовых дефектов при реализации технологии низкотемпературного прокаливании.

Ключевые слова: литье по выплавляемым моделям, дефект газового происхождения, низкотемпературное прокаливание, газопроницаемость, газотворность.

FORECASTING THE FORMATION OF GAS-RELATED DEFECTS WHEN MODIFYING THE INVESTMENT CASTING TECHNOLOGY

Abstract. This paper addresses the theoretical premises for forecasting the formation of gas-related defects – when applying shell mold low-temperature firing prior to molds' pouring with a steel melt. The fact of a reduction in the probability of gas defects formation when applying low-temperature firing technique is substantiated.

Keywords: investment casting, gas-related defect, low-temperature firing, gas permeability, gas generation value.

В течение последних десятилетий в свете обострившейся необходимости повышения качества литья при жесткой экономии материальных, энергетических, трудовых и временных ресурсов проблеме прогнозирования образования литейных дефектов уделялось особое внимание. Существенные позитивные результаты в этой области были достигнуты как в России, так и за ее пределами. При этом доминирующие позиции в данном направлении уже традиционно занимают разработчики, использующие в качестве инструментария современные IT-технологии и мощный математический аппарат для оперативного выполнения массовых вычислений, связанных с применением сеточных методов типа метода конечных разностей и конечных элементов [1 – 4].

Однако в этой области до сих пор остаются белые пятна, касающиеся трудно прогнозируемых литейных дефектов, например, газового происхождения. Прежде всего, это объясняется недостаточной изученностью газового режима работы литейных форм в отличие от теплового и гидравлического, а также особенностями физико-химии газовых явлений, имеющих место при контактировании формы

с металлическим расплавом, в частности, в некоторых специальных способах литья, таких как литье по выплавляемым моделям (ЛВМ), что, как следствие, лишает разработчиков надежной теоретической базы для решения проблемы.

На этом фоне технологи-литейщики постоянно сталкиваются с необходимостью прогноза (пусть даже самого приблизительного) при освоении новых вариантов технологии по количеству и местам расположения в отливках таких дефектов газовой природы, как недолив, газовая раковина, вскип и т.д.

Применительно к ЛВМ стали это, в первую очередь, касается газообразных продуктов термодеструкции материала формы при прокаливании и взаимодействии ее с металлическим расплавом при заливке.

В этой связи авторами предлагается обратить внимание на разработки основоположников литейной науки.

Еще в 50 – 60-х годах прошлого века представителями Нижегородской (Рыжиков А.А., Спасский А.Ф.) и Московской (Куманин И.Б.) научных школ были изучены закономерности газовой выделения литейных форм при контакте с жидким металлом, которые можно обобщить соотношением [5 – 7]:

$$G = \Gamma \frac{2}{\sqrt{\pi}} b_{\phi} \Delta T S \sqrt{\tau}, \quad (1)$$

где G – количество газа, выделяющегося из материала формы за время τ ; Γ – газотворность материала формы; b_{ϕ} – теплоаккумулирующая способность материала формы; ΔT – температурный напор, определяемый разностью температур металла и формы; S – площадь поверхности контакта металла и формы; τ – текущее время.

При условии удовлетворительной дегазации расплава до заливки в форму соотношение (1) вполне может быть использовано в качестве опорного для количественного прогноза газовых дефектов в отливках.

Газотворность Γ для каждого материала определяется экспериментально по методике, регламентированной ГОСТ 23409.12 «Смеси формовочные и стержневые. Методы определения газотворности». Из формулы (1) становится очевидным, что практикуемая в последнее время на предприятиях оценка материалов только по величине Γ не может считаться оправданной.

Теплоаккумулирующая способность формы вычисляется по известной формуле

$$b_{\phi} = \sqrt{\lambda c \rho}, \quad (2)$$

где λ – теплопроводность материала формы; c – удельная теплоемкость материала формы; ρ – массовая плотность материала формы.

Теплофизические характеристики материала формы λ , c и ρ , входящие в формулу (2), могут определяться как экспериментальным, так и расчетным путем по известным методикам, либо извлекаются из баз данных программ компьютерного моделирования формирования отливки.

Остальные величины в соотношении (1) легко измеряются или задаются для проведения оценочного прогнозного расчета.

Вывод из всего сказанного очевиден: для проведения полноценного прогноза газовых дефектов необходима кропотливая работа специалистов производственных и исследовательских лабораторий для скорейшего создания мощного статистического массива информации по газотворности различных материалов форм.

Кроме того, можно утверждать, что соотношения (1) и (2) вполне применимы для сравнения вариантов литейной технологии, что очень важно для цеховых технологов уже сейчас, до решения вышеназванной задачи.

Приведем пример. Авторами данной статьи в составе творческого коллектива был разработан и предложен к внедрению в действующее производство новый вариант технологии ЛВМ, предусматривающий низкотемпературное прокаливание оболочковых форм перед их заливкой стальным расплавом, обеспечивающий существенное сокращение затрат на электроэнергию. Суть состоит в том, что в состав материала оболочковой

формы вводится определенное количество кислородсодержащих веществ (окислителей). Экзотермические реакции, протекающие в ходе прокаливания с участием вводимых кислородсодержащих окислителей, способствуют получению дополнительного количества кислорода, необходимого для интенсификации процесса прокаливания оболочковых форм [8].

Однако производственниками высказывались опасения, что некоторые специфические черты новой технологии (присутствие в материале оболочки кислородсодержащей добавки, способной к термодеструкции при заливке; повышенная пористость материала формы и пониженная температура формы) могут привести к дополнительному газовыделению формы при заливке и, как следствие, к образованию дефектов типа «неметаллическое включение», «окисление и обезуглероживание поверхностного слоя отливок», «недолив» и т.д.

В этой связи выполнялся оценочный прогнозный расчет по формулам (1) и (2), предусматривающий сравнение базового и нового вариантов технологии.

Прежде всего, были выявлены величины, фигурирующие в указанных формулах, значения которых различаются для обоих вариантов: Γ , b_{ϕ} и, соответственно, λ , c , ρ и ΔT . Далее анализировалась каждая из этих величин.

В работе [9] отмечается, что наилучшая заполняемость обеспечивается при заливке сталью кварцевых оболочек на этилсиликатном связующем, нагретых до температуры 650 – 700 °С. Еще ранее авторы работы [10] на основе многочисленных экспериментальных данных убедительно доказывают, что при температурах порядка 700 – 750 °С из материала формы отводится до 70 % содержащейся в нем влаги и других летучих. Очевидно, речь идет о полном удалении физико-химически и физико-механически связанной воды, а также газообразных продуктов разложения тяжелых предельных углеводородов парафиновой группы из остатков модельной композиции. В оболочке частично остается химически связанная вода (кристаллизационная и цеолитная влага возгоняются, а конституционная остается), в основном участвующая в процессе структурирования связующего. Здесь же отмечается более активное протекание структурных превращений в связующем в присутствии кислорода: они фактически завершаются в температурном интервале 750 – 770 °С (это соответствует условиям реализации новой технологии). И, наконец, построенные авторами работы [10] кривые газотворности позволяют однозначно сказать, что к 700 – 750 °С материал оболочки расходует около 70 % своего газотворного потенциала.

На этом основании записываем соотношение:

$$\Gamma_{\text{нов}} \approx (1,2 \div 1,3) \Gamma_{\text{баз}}, \quad (3)$$

где соответствующие индексы относятся к новому и базовому вариантам технологии ЛВМ.

Для теплопроводности пористого материала (к таковому относим материал оболочки) в соответствии с уравнением Лихтенекера [11] имеем

$$\lambda = \lambda_{\text{д}}^{1-m} \lambda_{\text{н}}^m, \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{д}}$ – теплопроводность диспергированной фазы; $\lambda_{\text{н}}$ – теплопроводность непрерывной (матричной) фазы; m – пористость материала формы.

Учитывая, что в качестве диспергированной фазы выступает воздух, для которого принимаем $\lambda_{\text{д}} \approx 0,05$ Вт/м·К, а в качестве матричной – кварцевый песок, для которого $\lambda_{\text{н}} \approx 0,25$ Вт/м·К [12], получаем для новой технологии $\lambda_{\text{нов}} = 0,05^{1-m_{\text{нов}}} \cdot 0,25^{m_{\text{нов}}} = (0,081 \div 0,112)$ Вт/м·К.

При этом, по данным [13], $\lambda_{\text{баз}} = 0,18$ Вт/м·К, т.е.

$$\lambda_{\text{нов}} \approx (0,45 \div 0,62) \lambda_{\text{баз}}. \quad (5)$$

Для теплоемкости пористого материала [11] расчет ведется по формуле

$$c = c_{\text{ист}}(1 - m), \quad (6)$$

где $c_{\text{ист}}$ – теплоемкость матричной фазы материала.

Учитывая, что $m_{\text{баз}} = 0,1 \div 0,15$ [14], а $m_{\text{нов}} = 0,3 \div 0,5$ (по экспериментальным данным авторов), получаем

$$\frac{c_{\text{нов}}}{c_{\text{баз}}} = \frac{c_{\text{ист}}(1 - m_{\text{нов}})}{c_{\text{ист}}(1 - m_{\text{баз}})} = \frac{1 - m_{\text{нов}}}{1 - m_{\text{баз}}} = 0,55 \div 0,82,$$

откуда

$$c_{\text{нов}} = (0,55 \div 0,82) c_{\text{баз}}. \quad (7)$$

Для оценки массовой прочности пористого материала используется формула, математически изоморфная соотношению (6) [11]:

$$\rho = \rho_{\text{ист}}(1 - m). \quad (8)$$

Поэтому по аналогии с (7), получаем

$$\rho_{\text{нов}} = (0,55 \div 0,82) \rho_{\text{баз}}. \quad (9)$$

И, наконец, для температурного напора: при изготовлении стальных отливок для базовой технологии $(\Delta T)_{\text{баз}} = 1550 - 1000 = 550$ К, для новой технологии $(\Delta T)_{\text{нов}} = 1550 - 750 = 800$ К.

Тогда

$$(\Delta T)_{\text{нов}} \approx \frac{800}{550} (\Delta T)_{\text{баз}} = 1,45 (\Delta T)_{\text{баз}}. \quad (10)$$

В итоге, с учетом (1), получаем $\frac{G_{\text{нов}}}{G_{\text{баз}}} \approx \frac{\Gamma_{\text{нов}}}{\Gamma_{\text{баз}}} \frac{(b_{\text{ф}})_{\text{нов}}}{(b_{\text{ф}})_{\text{баз}}} \times \frac{(\Delta T)_{\text{нов}}}{(\Delta T)_{\text{баз}}}$, но, учитывая (2), имеем $(b_{\text{ф}})_{\text{нов}} = (\lambda_{\text{нов}} c_{\text{нов}} \rho_{\text{нов}})^{1/2}$

и $(b_{\text{ф}})_{\text{баз}} = (\lambda_{\text{баз}} c_{\text{баз}} \rho_{\text{баз}})^{1/2}$, что приводит к

$$\frac{G_{\text{нов}}}{G_{\text{баз}}} = \frac{\Gamma_{\text{нов}}}{\Gamma_{\text{баз}}} \left(\frac{\lambda_{\text{нов}}}{\lambda_{\text{баз}}} \right)^{1/2} \left(\frac{c_{\text{нов}}}{c_{\text{баз}}} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_{\text{нов}}}{\rho_{\text{баз}}} \right)^{1/2} \frac{(\Delta T)_{\text{нов}}}{(\Delta T)_{\text{баз}}},$$

откуда, усредняя, имеем

$$\begin{aligned} \frac{G_{\text{нов}}}{G_{\text{баз}}} &= 1,25 \cdot (0,54)^{1/2} \cdot (0,69)^{1/2} \cdot (0,69)^{1/2} \cdot 1,45 = \\ &= 1,25 \cdot 0,73 \cdot 0,83 \cdot 0,83 \cdot 1,45 = 0,91 \end{aligned}$$

или

$$G_{\text{нов}} \approx 0,91 G_{\text{баз}}. \quad (11)$$

Полученный результат наглядно демонстрирует, что при реализации нового варианта технологии вероятность образования газовых дефектов не превышает таковую для базового варианта.

Авторами предлагается собственная версия объяснения полученного результата: в условиях новой технологии горение с соответствующим связыванием кислорода в порах формы создает эффект дополнительного вакуумирования, способствующего более полной реализации газотворного потенциала оболочки на стадии ее прокаливания даже при температуре, более низкой по сравнению с базовой технологией.

Тем не менее, учитывая нестрогий характер соотношения (3), следует обратить внимание на практические меры по снижению $\Gamma_{\text{нов}}$. К ним можно отнести, например, обеспечение направленного газоотвода от рабочей полости формы на стадии заливки повышением газопроницаемости упрочняющих слоев или спекаемости рабочего слоя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамов А.А., Сабиров Д.Х., Тихомиров М.Д., Денисов Л.Ю. Компьютерные технологии в литейном производстве: Тр. VII Съезда литейщиков России. – Новосибирск: Изд. дом «Историческое наследие Сибири», 2005. С. 208 – 216.
2. Воронин Ю.Ф., Лосев А.Г., Махотина А.В. // Литейщик России. 2004. № 4. С. 35 – 41.
3. Петровский П.В., Лосенкова М.В., Аликин П.В., Никифоров П.Н. Литейные компьютерные технологии в действии. Тр. X Съезда литейщиков России. – Казань: Изд-во «Вертолет», 2011. С. 456 – 462.
4. Вольнов И.Н. // Литейщик России. № 6. 2007. С. 14 – 17.
5. Медведев Я.И. Газовые процессы в литейной форме. – М.: Машиностроение, 1980. – 200 с.
6. Рыжиков А.А. Теоретические основы литейного производства. – Москва, Свердловск: Машгиз, 1961. – 447 с.
7. Куманин И.Б. Вопросы теории литейных процессов. Формирование отливок в процессе затвердевания и охлаждения сплава – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
8. Леушина Л.И., Нищенков А.В., Палавин Р.Н. Технология низкотемпературного прокаливания оболочковых форм точного литья: Тр. VI Междунар. НПКС «Прогрессивные литейные технологии» – М.: НИТУ МИСиС, 2011. С. 167 – 169.
9. Пепелин Б.А., Беляев В.М. // Литейное производство. 1988. № 8. С. 15 – 16.
10. Танкелевич Б.Ш., Демидова А.А., Абадаев А.В. // Литейное производство. 1979. № 12. С. 21 – 22.

11. Васильев Л.Л., Танаева С.А. Теплофизические свойства пористых материалов – Минск: Наука и техника, 1971. – 265 с.
12. Зальцман Э.С. Теплообмен отливки и формы – Электросталь: ЭПИ МГИСиС, 2006. – 260 с.
13. Васин Ю.П., Лонзингер В.А. // Литейное производство. 1987. № 2. С. 20 – 21.
14. Александров В.М., Кулаков Б.А., Лонзингер В.А. // Литейное производство. 1984. № 4. С. 19 – 21.

© 2013 г. И.О. Леушин, В.А. Ульянов,
Л.И. Леушина

Поступила 12 сентября 2013 г.

УДК 669-154

Е.В. Шильников¹, А.В. Алпатов², С.Н. Падерин¹

¹ОАО «Металлургический завод «Электросталь»

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ КИСЛОРОДА ПРИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ 08X18H10T

Аннотация. Определены фактические активности кислорода в жидком металле во время внепечной обработки высоколегированной стали 08X18H10T при помощи кислородных датчиков. Рассчитаны активности компонентов металлического и оксидного растворов с использованием моделей псевдосубрегулярного раствора для жидкого металла и псевдорегулярного ионного раствора для жидкого шлака, величины энергетических параметров которых определены и опубликованы в предыдущих работах авторов. Получено и использовано уравнение для расчета активности кислорода, равновесного с компонентами жидкой стали Fe–Cr–Ni–Mn–Si–C–Al–Ti, восьмикомпонентного шлака FeO–MnO–CaO–MgO–SiO₂–CrO_{1,5}–AlO_{1,5}–TiO₂ и газовой фазы. На исследованных плавках показано, что система «металл–шлак–газовая фаза» в конце процесса раскисления металла значительно ближе к состоянию равновесия, чем в конце окислительного процесса. Рассчитаны движущие силы процесса раскисления по разности химических потенциалов фактического и равновесного кислорода.

Ключевые слова: активность кислорода, термодинамические модели, коррозионнотойкая сталь, шлак, внепечная обработка.

THERMODYNAMICAL ANALYSIS OF OXYGEN BEHAVIOR DURING LADLE TREATMENT OF HIGH ALLOYED CORROSION RESISTANT STEEL 08X18H10T

Abstract. The actual activities of oxygen in liquid metal during ladle treatment high alloyed steel have been determined with using oxygen sensors. Activities of components of liquid steel and slag with using pseudosubregular solution for liquid metal and pseudoregular ion solution for liquid slag have been calculated. An equation has been obtained and used to calculate the oxygen activity in equilibrium with components of liquid steel Fe–Cr–Ni–Mn–Si–C–Al–Ti, slag FeO–MnO–CaO–MgO–SiO₂–CrO_{1,5}–AlO_{1,5}–TiO₂ and gas phases. The study showed that the system “metal–slag–gas phase” at the end of the process of deoxidation of the metal is much closer to equilibrium than at the end of the oxidation process.

Keywords: activity of oxygen, thermodynamical models, corrosion resistant steel, slag, ladle treatment.

По современной технологии производства высоколегированной стали раскисление металла производят в период внепечной обработки. Поэтому актуальным является теоретическое и экспериментальное исследование поведения кислорода в жидких многокомпонентных растворах, к которым относятся высоколегированные стали, в восстановительных условиях.

Исследованию поведения кислорода в бинарных и многокомпонентных жидких металлических растворах посвящено большое количество работ как в отечественной, так и в зарубежной литературе. Однако термодинамический анализ активности кислорода в жидкой восьмикомпонентной металлической системе Fe–Cr–Ni–Mn–Si–C–Al–Ti применительно к восстановительному периоду выплавки коррозионнотойкой стали 08X18H10T в литературе отсутствует.

В сталеплавильном цехе завода «Электросталь» на трех опытных плавках стали 08X18H10T (условные номера 1, 2 и 3) исследовано поведение кислорода в металле в 20-т ковше в период внепечного рафиниро-

вания металла на агрегате вакуумной обработки стали (АВОС). Одновременно с отбором проб металла и шлака выполнены замеры ЭДС. и температуры металла. На рисунке показана схема внепечной обработки и отбора проб жидкой стали и жидкого шлака.

Замеры ЭДС выполнены кислородными датчиками из твердого электролита ZrO₂, стабилизированного MgO, с электродом сравнения из смеси порошков Cr + Cr₂O₃. Фактические активности кислорода по результатам измерений рассчитаны с учетом электронной проводимости твердого электролита по уравнению

$$a_{\text{O}} = P_{\text{O}_2(x)}^{1/2} = \left[\left(P_e^{1/4} + P_{\text{O}_2(c)}^{1/4} \right) \exp\left(-\frac{FE}{RT} \right) - P_e^{1/4} \right]^2, \quad (1)$$

где $a_{\text{O}} = P_{\text{O}_2(x)}^{1/2}$ – активность кислорода в исследуемом расплаве; $P_{\text{O}_2(c)}$ – парциальное давление кислорода в электроде сравнения ($\ln P_{\text{O}_2(c)} = -89\,545/T + 20,21$); P_e – параметр электронной проводимости твердого элект-