

УДК 669.621.74

В.А. Коровин, И.О. Леушин, В.А. Героцкий

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЦЕССОВ ПЛАВКИ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Аналитическими и численными методами исследовано получение требуемого жидкого расплава при плавке и модифицировании жидкого расплава при получении высокопрочного чугуна. Показано, что рассмотрение процессов плавки и внепечной обработки (модифицирование) жидкого чугуна с энергетической и технологической позиций позволяет объяснить и обеспечить заметное повышение практического результата.

Ключевые слова: плавка, модифицирование, массоперенос, высокопрочный чугун, жидкий металл, шлак, газ, включение, ковш с крышкой, лигатура.

Важнейшей задачей литейщиков является повышение качества отливок. Довольно трудно в настоящее время представить себе деталь, конструкцию, которые не испытывали бы необходимости повышения качества.

За прошедшее время были достигнуты значительные успехи в повышении качества ответственных деталей и построении различных теорий, объясняющих природу процессов, происходящих при получении отливки и, в частности, при получении требуемого жидкого расплава на основе взаимосвязи плавки и модифицирования.

При этом в большом количестве работ, посвященных исследованию данной проблемы, обращается внимание на возможность и перспективность создания комплексной технологии получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, взаимосвязанной с информацией о качестве металла по всей технологической цепочки, на основе привлечения системного анализа и синергетики. Оптимальную структуру, фазовый состав и механические свойства заготовок необходимо формировать в литом состоянии.

Знание закономерностей формирования расплава и затем литой структуры и создание активной технологии позволяют прогнозировать микроструктуру заготовки и конечные свойства отливки.

Улучшение технологического процесса рассматривается как постоянное требование производства. В области ковшевой металлургии процесс модифицирования играет очень большую роль.

Технологические требования процесса – это гарантированное обеспечение требуемого состава расплава в узких пределах допусков, а также минимально возможного времени обработки. В этом случае необходимо устанавливать оптимальные технологические параметры и располагать соответствующими стратегиями модифицирования.

Задача плавки заключается в получении жидкого металлического расплава нужной температуры, состава и структуры, обеспечивающих необходимые технологические свойства. Температура достигается соответствующим нагревом. Необходимый ее уровень без особых проблем устанавливается опытным путем, хотя, в принципе, может быть рассчитан теоретически.

Что касается структуры жидкого расплава, то при бесспорном ее влиянии на технологические свойства, научные знания о ней пока недостаточны. Таким образом, в практическом отношении главная задача реальной плавки заключается в получении определенного состава расплава.

Понятие состава требует разъяснения. Обычно под составом понимают химический состав из ограниченного ряда элементов, который регламентируется техническими условия-

ми, однако в металле присутствуют и другие элементы в виде неопределяемых примесей. Специфической частью состава металла следует считать неметаллические включения, а также растворенные в нем газы. Эти примеси отрицательно влияют на физико-механические свойства металла.

Таким образом, в задачи технолога при плавке входит получение регламентного состава по химическим элементам [1], ограничение содержания неметаллических включений в расплаве [2], ограничение содержания газов в расплаве [3].

Химсостав и содержание неметаллических включений и газов в металлической ванне при плавке непрерывно изменяются как в одну, так и в другую сторону. Началом плавки можно считать набор известными способами шихты и загрузку ее в печь. В составе шихты, кроме регламентируемых элементов, имеется некоторое количество неметаллических включений (НВ) и газов. Это различные загрязнения шихты и адсорбированные на ее поверхности газы. НВ и газы содержатся также в объеме металла кусков шихты.

С целью ограничения содержания нежелательных примесей используются, по возможности, чистая шихта и ее прокатка перед загрузкой в печь.

В период от расплавления шихты до выпуска металла из печи идут процессы ответственные за качество металла. Взаимодействия металла с контактирующими фазами обобщает схема процесса плавки (рис. 1).

Основой модели служат различные виды массопереноса, в результате которых и формируется состав жидкого металла, т.е. содержание элементов, газов, неметаллических включений, а также его структура, которая влияет на последующую кристаллизацию.

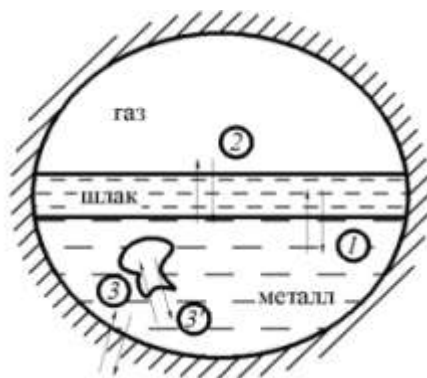


Рис. 1. Схема процесса плавки:

1 – металл-шлак; 2 – металл-газ; 3 – металл-инородные включения;
3' – металл-футеровка

Направление и полнота массопереноса зависят от разности концентраций мигрирующего компонента

$$C_M - C_\Phi \leq \Delta_{M\Phi},$$

где C_M – активная концентрация компонента в металле; C_Φ – в контактирующей среде; $\Delta_{M\Phi}$ – разность концентраций. При $\Delta_{M\Phi} < 0$ компонент переходит в металл, при $\Delta_{M\Phi} > 0$ – в контактирующую фазу.

Активные концентрации, или активности, более просто определяются для газовой фазы. В связи со слабым взаимодействием частиц они принимаются равными фактическим концентрациям компонентов. В жидких металлах и шлаках взаимодействие элементарных частиц сильное, в связи с чем химические активности отличаются от фактических концентраций в ту или иную сторону. Для неметаллических и шлаковых растворов разработаны методы расчета активностей через фактические концентрации компонентов [1, 2].

Чисто механическое распределение компонента между фазами вследствие разности

концентраций встречается редко. Обычно в распределении участвуют те или иные химические реакции. В таких случаях за действующие концентрации принимают таковые для равновесия реакции.

В общем случае массоперенос из одной фазы в другую включает следующие этапы:

- 1) перенос компонента к межфазной границе;
- 2) адсорбционно-химический акт на межфазной границе;
- 3) отвод продуктов реакции в объем фазы.

Первый и третий этапы осуществляются путем молекулярной или циркуляционной диффузии. Последняя называется конвективной или турбулентной. Вторым этапом обычно включает адсорбцию реагирующих частиц и последующий акт химического взаимодействия.

Ведущую роль при массопереносе играет его скорость, т.е. количество вещества перемещаемого в единицу времени. Молекулярная диффузия определяется вязкостью фазы. В газовой фазе ее скорость наибольшая, затем идет жидкая фаза, и твердой фазе скорость наименьшая.

Значительно возрастает скорость диффузии, когда частицы перемещаются не только за счет кинетического движения, но и вместе с потоками жидкой или газовой фазы. Такие потоки возникают как результат конвекции или перемешивания жидкой или газовой фазы. Соответственно перемешивание используется как эффективный способ ускорения массопереноса.

На схеме (рис. 1) и в реальных процессах плавки газовая фаза отделена слоем шлака. Толщина этого слоя может изменяться от нуля до величин, сопоставимых с глубиной металлической ванны. Слой шлака затрудняет массоперенос из газовой фазы, но не подавляет его совсем. Реагирующие компоненты могут диффундировать в металл через слой шлака.

Массоперенос между шлаком и металлической ванной наиболее важен при плавке, так как вносит наибольший вклад в формирование состава металла.

В условиях повышенных температур идет активный обмен компонентами между металлом и шлаком. Задача технолога при этом – способствовать переходу нежелательных примесей из металла в шлак, полезных – из шлака в металл и, по возможности, подавлять обратные процессы.

Третий вид массопереноса (рис. 1) связан с добавками твердых кусков металла в жидкую металлическую ванну. Это обычно или загрузка части шихты или доводка состава ферросплавами и лигатурами. Если твердые добавки имеют более низкую температуру плавления, чем базовый расплав, то они плавятся и затем распределяются в объеме ванны циркуляционным массопереносом. Если температура плавления добавок выше температуры расплава, то идет их растворение по диффузионному механизму.

Аналогичные моменты можно отметить и при модифицировании расплава чугуна.

Известно, что научно-технический прогресс во многом определяется уровнем развития науки о материалах, технологий их получения и обработки. Сегодня достигнуто понимание того факта, что для дальнейшего эффективного развития промышленности и, в частности, получения материалов с заданными свойствами необходим переход на новую методологию, т.е. рассмотрение проблем активного воздействия на расплав на комплексной позиции.

В традиционном способе модифицирования имеет место свободный доступ кислорода к лигатуре. При этом в связи с активной реакцией возникают потери магния на окисление, пироэффект и дымовыделение. Ограничения доступа кислорода позволит уменьшить отрицательные эффекты.

Разработан и осуществлен способ модифицирования чугуна в ковше с крышкой, в которой имеется отверстие для заливки чугуна (рис. 2).

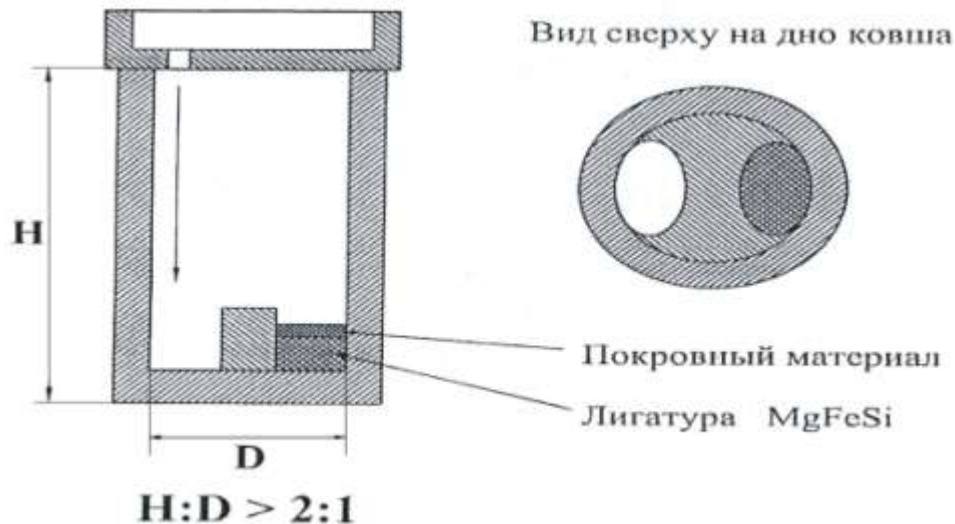


Рис. 2. Схема процесса модифицирования чугуна в ковше с крышкой

Перед заливкой чугуна в ковше находится объем воздуха, равный объемной емкости ковша плюс $\sim 10\%$. Для ковша емкостью в 1 т количество кислорода в нем составит

$$m_{O_2} = 1,1km_m c_0 \rho_g / \rho_m, \quad (1)$$

где m_{O_2} – масса кислорода в ковше, г; $k=3\div 4$ – коэффициент времени выпуска металла; m_m – емкость ковша, т; $c_0 = 0,21$ – концентрация кислорода в воздухе; $\rho_g = 1200 \text{ г/м}^3$ – плотность воздуха; $\rho_m = 7 \text{ т/м}^3$ – плотность чугуна.

Для ковша емкостью в 1 т $m_{O_2} = 1,1 \cdot 1 \cdot 0,21 \cdot 1200 / 7 = 39,6 \text{ г}$. В соответствии с химической формулой MgO, данный кислород может окислить следующее количество магния:

$$m_{Mg} = m_{O_2} A_{Mg} / A_O = 39,6 \cdot 24 / 16 = 59,4 \text{ г}, \quad (2)$$

где $A_{Mg} = 24$ и $A_O = 16$ – атомные массы магния и кислорода.

Нетрудно подсчитать, что для стандартной обработки чугуна 3% лигатуры с содержанием магния 5% затрата магния на окисление составит лишь 4% от добавленного количества.

После начала заливки металла через отверстие в крышке ковша воздух в объеме ковша нагреется, расширится и начнет выходить через неплотности между крышкой и ковшом. Дополнительно газ в ковше будет выжиматься поднимающимся уровнем металла. Некоторое сокращение объема газа возникнет в результате связывания кислорода. Однако это сокращение перекроется термическим расширением газа и подъемом уровня металла.

Приведенные соображения однозначно свидетельствуют о предотвращении доступа кислорода извне к реагирующей лигатуре из-за избыточного давления в ковше под крышкой.

Таким образом, в предложенной схеме организации модифицирования чугуна потери магния на окисление и соответственно пироэффект и дымовыделение будут минимальными.

Основой технологии модифицирования чугуна в ковше служит слив металла с некоторой высоты. При этом выделяется энергия, обеспечивающая перемешивание расплава, растворение и реагирование зерен, кусков лигатуры с жидким чугуном. Величина энергии пропорциональна высоте слива:

$$W = mgh, \text{ Дж}, \quad (3)$$

где m – масса металла, кг; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести; h – высота слива, м.

Растворение или реагирование зерен лигатуры требует определенного времени. Если слив будет продолжаться меньше этого времени, зерна не успеют раствориться, прореагиро-

вать полностью. В противном случае часть энергии окажется излишней. С учетом этого процесс характеризуется мощностью, в выражение которой входит время:

$$P = W / \tau = mgh / \tau, \text{ Дж/с (Вт)}, \quad (4)$$

где τ - время слива металла.

В оптимальном режиме модифицирования время τ должно совпадать со временем растворения, реагирования зерен лигатуры. Последнее определяется из практики, например, наблюдением за реагированием зерен лигатуры, добавленных на поверхность расплава.

При свободном сливе металла в ковш время τ , как правило, не регулируется.

В предложенном способе модифицирования металл попадает в ковш через промежуточную крышку – чашу с калиброванным отверстием в дне (рис. 1). Диаметр этого отверстия определяет время слива металла. Для расчета диаметра выпускного отверстия в чаше на основе гидравлических закономерностей истечения жидкости получено следующее выражение:

$$d = \left(4m / \tau_p \rho \mu \sqrt{2gh} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ м}, \quad (5)$$

где m – масса металла, кг; τ_p - время растворения зерна лигатуры, с; ρ - плотность жидкого металла, кг/м³; $\mu = 0,85 \div 0,95$ - коэффициент расхода; h – высота столба металла в чаше, м.

Далее приводится пример расчета диаметра выпускного отверстия в чаше:

- масса металла $m = 1000$ кг;
- время выпуска металла из печи $\tau = 20$ с;
- время реагирования лигатуры $\tau_p = 70$ с;
- плотность жидкого чугуна $\rho = 7000$ кг/м³;
- коэффициент расхода $\mu = 0,9$;
- высота столба металла в заливочном ковше $h = 0,15$ м.

$$d = \left(\frac{4 \cdot 1000}{70 \cdot 3,14 \cdot 7000 \cdot 0,9 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,15}} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,041 \text{ м} = 4,1 \text{ см}.$$

С целью повышения энергии и мощности модифицирования был изготовлен специальный ковш с увеличенным отношением высоты к диаметру (2:1) (рис. 1). Лигатура ФСМг5 закладывалась в углубление на дне ковша и накрывалась стальной высечкой, как это делается в обычном сэндвич-процессе. Крышка на ковше ориентировалась так, чтобы струя не попадала на лигатуру. Незначительные пироэффект и дымовыделение наблюдались лишь в начале заливки. Усвоение магния превысило 50%, стабилизировались структура и свойства чугуна.

Количество вводимого модификатора и замедлителя определялось в зависимости от содержания магния в лигатуре, содержания серы в исходном расплаве и доли преобладающей фракции лигатуры.

Описываемый способ получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом обеспечивает требуемую структуру при использовании модификатора фракцией 0 – 30,0 мм лигатуры ФСМг, при этом снижается расход модификатора, уменьшается пироэффект и дымовыделение, стабилизируется процесс модифицирования.

Таким образом, анализ процессов плавки и внепечной обработки жидкого чугуна с энергетической и технологической позиций позволяет объяснить и обеспечить достижение заметного повышения практического результата при реализации в производстве.

Библиографический список

1. Григорян, В.А. Теоретические основы электросталеплавильных процессов / В.А. Григорян, Л.Н. Белянчиков, А.Я. Стомахин. – М: Металлургия, 1979. – 256 с.

2. **Явайский, В.И.** Теория процессов производства стали / В.И. Явайский. – М.: Metallurgy, 1967. – 792 с.
3. **Попель, С.И.** Теория металлургических процессов: учебное пособие для вузов / С.И. Попель, А.И. Сотников, В.Н. Бороненков. – М.: Metallurgy, 1986. – 463 с.
4. **Высокопрочные чугуны для отливок.** – М.: Машиностроение, 1982. – 222 с.

*Дата поступления
в редакцию 07.06.2010*

V.A. Korovin, I.O. Leushin, V.A. Gerotsky

**INTERRELATION OF SMELTING PROCESSES
AND MODIFYINGS OF HIGH-TENSILE PIG-IRON**

Analytical and numerical methods investigate modifying of liquid melt at reception of high-tensile pig-iron. Smelting processes and treatments (modifying) of liquid pig-iron are considered from power and technological positions that provides appreciable improvement in quality.

Key words: fusion, modifying, weight carrying over, high-tensile pig-iron, liquid metal, slag, gas, plugging, a ladle pot with a cover, a rich alloy.