

Таким образом, качественное диффузионное раскисление снижает содержание окислов в шлаках, а соответственно и в металле, что способствует улучшению микроструктуры, снижению ширины границ зерен, а следовательно, способствует усилению межзеренных связей и повышению механических свойств сталей. Разработанная смесь значительно эффективнее традиционной. Расход ее существенно ниже традиционной. Применение ее ведет к повышению механических свойств стали и экономии ферромарганца. Экономический эффект составил свыше 1,2 млн руб.

В дальнейшем, в условиях ОАО «ОЗММ» испытали эффективность новой смеси при выплавке улучшаемой стали 34ХНЗМ, которая отливается в слитки и идет на изготовление поко-

вок. Анализ показал что, механические свойства стали существенно возросли. Особенно это отразилось на структурно-чувствительном показателе – ударной вязкости. Среднее значение КСУ выросло на 28,92%. Кроме того, увеличился уровень соответствия исследуемых сталей по ультразвуковой дефектоскопии.

Химические составы традиционных и экспериментальных плавок практически не отличались друг от друга. Свойства повысились благодаря более качественному диффузионному раскислению шлаков. Содержание закиси железа в шлаках снизилось на 40%. Существенно уменьшилась и загрязненность стали неметаллическими включениями с 2,263 до 0,83. Это позволило внедрить раскислительную смесь в производство.

Библиографический список

1. ПО «Уралвагонзавод» – лидер по производству высококачественных литых деталей в вагоностроении / Филиппенков А.А., Байков В.Н., Крупин М.А. и др. // Литейщик России. 2007. № 3. С. 43–45.
2. Кульбовский И.К., Солдатов В.Г., Иващенко Ю.М. Разработка технологии модифицирования жидкой стали 20ГЛ для отливок железнодорожного транспорта // Литейщик России. 2007. № 7. С. 17–19.
3. Голубцов В.А. Теория и практика введения добавок в сталь вне печи. Челябинск, 2006. 423 с.
4. Шуб Л.Г., Ахмадеев А.Ю. О целесообразности модифицирования стали // Металлургия машиностроения. 2006. № 5. С. 38–42.
5. Рогова В.П., Полянин Г.В., Мосунова И.В. Влияние вневпечной обработки на химсостав и свойства литой стали для вагоностроения // Металлургия машиностроения. 2004. № 4. С. 11–15.
6. Явойский В.И. Научные основы современных процессов производства стали. М.: Металлургия, 1987. 184 с.
7. Производство стальных отливок: Учебник для вузов / Козлов Л.Я., Колокольцев В.М., Вдовин К.Н. и др.; Под ред. Л.Я. Козлова. М.: МИСиС, 2003. 352 с.
8. Кинетика прямого восстановления окислов железа из расплавов / Шурыгин П.М., Бороненков В.Н., Крюк В.И. и др. // Известия вузов. Черная металлургия. 1965. № 2. С. 23–27.
9. Исследование кинетики прямого восстановления железа из расплавленных оксидов методом поляризационных кривых / Бороненков В.Н., Есин О.А., Шурыгин П.М. и др. // Электрохимия. 1965. № 10. С. 1245–1252.
10. Плышевский А.А., Белогунов В.Я., Михайлец В.Н. Кинетика восстановления окислов железа и кремния из шлаков углеродом // Известия вузов. Черная металлургия. 1982. № 8. С. 3–7.
11. Евстратов К.И., Купина Н.А., Малахова Е.Е. Физическая и коллоидная химия. М.: Высш. шк., 1990. 430 с.
12. Баландин Г.Ф., Васильев В.А. Физико-химические основы литейного производства. М.: Машиностроение, 1971. 224 с.

УДК 669.187

Чуманов И.В.

К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНОКУЛЯТОРОВ-ХОЛОДИЛЬНИКОВ ПРИ ПЕРЕПЛАВНЫХ ПРОЦЕССАХ*

Использование инокуляторов-холодильников (макрохолодильников) при электрошлаковой плавке может существенно повысить привлекательность процесса (особенно при получении крупных отливок), как в части снижения себестоимости, а именно уменьшения расхода электроэнергии и увеличения производительности за счет повышения вертикальной скорости кри-

сталлизации металла, так и качества получаемого металла по следующим параметрам:

- более дисперсная и разориентированная макроструктура;
- резкое повышение изотропности механических свойств;
- снижение доли межзеренного излома и повышения значения ударной вязкости;
- подавление развития макросегрегационных дефектов канального типа (шнуры);
- уменьшение головной обрезки слитков.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых докторов наук № МД 2610.2008.8.

В то же время реализация электрошлакового процесса с использованием индукторов-холодильников потребует не только использования дополнительного оборудования (дозаторы) и подготовки самих холодильников (измельчение их до нужного размера), но разработки непосредственно технологических режимов. Для этого необходимо провести следующие расчёты.

1. Расчет времени падения макрохолодильника через шлаковую ванну

Выведем формулу, связывающую расстояние, пройденное макрохолодильником, с временем падения (прохождения) его в шлаке. Для упрощения расчет будем вести для сферического макрохолодильника. Также примем, что влияние электродинамических и конвективных сил на движение макрохолодильника незначительно, тогда время падения можно определить из решения дифференциального уравнения движения шара в вязкой жидкости [1]:

$$V_M \rho_M \frac{d\omega}{dt} = V_M g(\rho_M - \rho_{\text{шл}}) - 0,5c_0 F \rho_M \omega^2, \quad (1)$$

где ω – скорость падения макрохолодильника (шара); c_0 – коэффициент гидродинамического сопротивления; F – сечение макрохолодильника (шара).

Вводя обозначения:

$$D_1 = \frac{4}{3}(R + \varepsilon)\rho_M,$$

$$D_2^2 = \frac{4}{3}(R + \varepsilon)g(\rho_M - \rho_{\text{шл}}),$$

$$D_3^2 = c_0 \frac{\rho_M}{2},$$

перепишем уравнение (1) в виде:

$$D_1 \frac{d\omega}{dt} = D_2^2 - D_3^2 \omega^2. \quad (2)$$

Интегрируя уравнение (2) дважды, в пределах от t_0 до t , находим соотношение, связывающее расстояние Z , пройденное макрохолодильником, с временем падения при $c_0 = \text{const}$ [2]:

$$Z = -\frac{D_2}{D_3}(t - t_0) + \frac{D_1}{D_3} \ln \frac{1 + y}{1 + y_0}, \quad (3)$$

где $y = \frac{D_2 + D_3 \omega_0}{D_2 - D_3 \omega_0} \exp[2D_2 D_3 (t - t_0)], \quad (4)$

$$y_0 = \frac{D_2 + D_3 \omega_0}{D_2 - D_3 \omega_0}. \quad (5)$$

Полученное уравнение, ввиду его нелинейности, решали с применением ПВТ. Расчет был проведен, используя следующие исходные данные:

$R=0,003$ м – радиус макрохолодильника;

$\varepsilon=0,0006$ м – толщина нарастающей шлаковой корочки [2];

$\rho_M=7800$ кг/м³ – плотность металла;

$\rho_{\text{шл}}=2400$ кг/м³ – плотность шлака;

$c_0=1$ – коэффициент гидродинамического сопротивления шлака [2];

$\omega_0=8,3$ м/с – начальная скорость ввода макрохолодильника;

$t_0=0,85$ с – время, затраченное при свободном падении макрохолодильника перед тем, как попасть в шлаковую ванну.

Подставляя исходные данные в уравнения (3), (4) и (5), находим время падения макрохолодильника радиусом 0,003 м в шлаковой ванне толщиной 0,269 м. Это время составляет $t=0,86$ с.

Но, на самом деле, при прохождении шлаковой ванны макрохолодильник оплавляється, т.е. его радиус уменьшается, следовательно, скорость его падения через шлак снижается. Таким образом, время падения макрохолодильника через шлак будет несколько выше, чем 0,86 с. Точное время падения макрохолодильника через шлак можно определить, решая уравнение (3) при условии, что радиус макрохолодильника стремится к нулю. Приблизительно это время получилось равным 1,02 с.

Время падения макрохолодильника лимитируется толщиной шлаковой ванны. Для расчета времени падения макрохолодильника радиусом 0,003 м через шлаковую ванну глубиной 0,269 м была принята величина намерзающей шлаковой корочки. По данным [2] эта величина для макрохолодильника радиусом 0,003 м составляет 0,0006 м. На самом деле, при падении макрохолодильника через шлак, шлаковая корочка сначала растет, затем при выравнивании теплофизических свойств макрохолодильника и окружающей его шлаковой ванны рост корочки прекращается, и она начинает быстро оплавляться. После ее расплавления начинает плавиться сам макрохолодильник.

2. Расчет динамики намерзания шлаковой корочки

Выведем расчетное соотношение для анализа динамики намораживания шлаковой корочки на макрохолодильник. Толщину шлаковой корочки, намерзающей на макрохолодильнике, можно оценить, зная количество тепла, пошедшее на его нагрев. Температура макрохолодильника при этом будет повышаться за счет снятия тепла перегрева

шлака, отвода теплоты кристаллизации шлака и тепла от затвердевающей корки шлака. Следовательно, уравнение теплового баланса можно записать в виде

$$dQ = dQ_{AK} + dQ_{KP}, \quad (6)$$

где dQ – количество тепла, поглощенное макрохолодильником; dQ_{AK} – количество тепла, отведенное от затвердевшей корки шлака в макрохолодильник; dQ_{KP} – теплота перегрева и кристаллизации шлака.

Величину dQ определим из условия, что все тепло, проходящее через поверхность макрохолодильника за время dt , идет на его прогрев:

$$dQ = V_M \rho c d\bar{T}, \quad (7)$$

где V_M – объем макрохолодильника; ρc – плотность и удельная теплоемкость металла; $d\bar{T}$ – изменение среднемассовой температуры за время dt .

Величину $d\bar{T}$ в случае сферического макрохолодильника определим из решения задачи о прогреве шара при граничном условии третьего рода [2]. Имеем:

$$d\bar{T} = (T_C - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} B_n \mu_n^2 \frac{a}{R^2} \exp(-\mu_n^2 \frac{dt}{R^2}) dt, \quad (8)$$

где T_C, T_0 – температура среды и начальная температура холодильника; R – радиус макрохолодильника;

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad B_n = \frac{6Bi^2}{\mu_n^2(\mu_n^2 + Bi^2 - Bi)}, \quad Bi = \frac{\alpha R}{\lambda},$$

где Bi – критерий Био; $\lambda = 25$ ккал/м·ч·°С – теплопроводность металла; μ – корни характеристического уравнения; $\alpha = 4000$ ккал/м²·ч·°С – коэффициент теплоотдачи конвекцией между макрохолодильником и средой.

Величины μ и B_n находим согласно [3]. Таким образом, для шарового макрохолодильника:

$$dQ = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho c (T_C - T_0) \times \sum_{n=1}^{\infty} B_n \mu_n^2 \frac{a}{R^2} \exp(-\mu_n^2 \frac{dt}{R^2}) dt. \quad (9)$$

Для определения величин dQ_{AK} и dQ_{KP} , входящих в правую часть уравнения (6), воспользуемся решениями, полученными для затвердевания снаружи шаровой отливки. В нашем случае на шарообразном макрохолодильнике должен

намерзнуть слой шлака. Учитывая, что толщина этого слоя небольшая, можно принять линейное распределение температуры по радиусу намерзающей корки ($n=1$), тогда:

$$dQ_{AK} = 2\pi R^2 (\rho c \Delta T)^* (1 + \frac{4}{3} \delta^2) d\varepsilon; \quad (10)$$

$$dQ_{KP} = 4\pi R^2 \rho^* [\eta + c^* (T_C^* - T_{KP}^*)] \times (1 + 2\delta + \delta^2) d\varepsilon, \quad (11)$$

Здесь величины, обозначенные звездочкой, относятся к среде, в которой движется макрохолодильник, т.е. к шлаковой ванне.

$$\Delta T^* = T_{\Pi}^* - T_{KP}^*, \quad (12)$$

где T_{KP}^* – температура кристаллизации шлака; T_{Π}^* – температура шлака в месте контакта с холо­дильником; $\delta = \frac{\varepsilon}{R}$; ε – толщина корки шлака;

T_C^* – температура среды.

После подстановки выражений (9)–(11) в уравнение теплового баланса (6) и интегрирования получим уравнение

$$A_1 \delta + A_2 \delta^2 + A_3 \delta^3 + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-\mu_n^2 \frac{dt}{R^2}) - c = 0, \quad (13)$$

где $A_1 = 3k(L_1 + \frac{\theta_H}{2})$; $A_2 = 3k(L_1 + \frac{\theta_H}{3})$;

$$A_3 = 3k(L_1 + \frac{\theta_H}{4});$$

$$c = A_1 \delta_1 + A_2 \delta_1^2 + A_3 \delta_1^3 + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-\mu_n^2 \frac{dt}{R^2});$$

$$k = \frac{(\rho c)^*}{\rho c}; \quad \theta_H = \frac{\Delta T^*}{\Delta T_0}; \quad L_1 = \frac{\eta^*}{c^* \Delta T_0} + \frac{\Delta T_{\text{ПЕР}}^*}{\Delta T_0};$$

$$\Delta T_{\text{ПЕР}}^* = T_C^* - T_{KP}^*; \quad \Delta T_0 = T_{\Pi}^* - T_0;$$

$$T_{\Pi}^* = T_{(X)}^* = T_{KP}^* + (T_C^* - T_{KP}^*) (1 - \frac{\varepsilon}{X}) \text{ при } x \geq \varepsilon.$$

Уравнение (13) связывает толщину шлаковой корочки, намерзающей на макрохолодильнике, с временем, в течение которого корочка достигнет своего максимального значения и начнет оплавляться. Решение уравнения (13) велось с помощью ПВТ. В качестве исходных данных принимались следующие значения:

$\rho^* = 2400$ кг/м³ – плотность шлака;

$c^* = 0,3$ ккал/(кг·°С) = 1260 Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость шлака;

$\rho = 7800$ кг/м³ – плотность металла;

$c = 0,165$ (ккал/кг·°С) = 693 Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость металла;

$T_{кр}^* = 1573$ К – температура кристаллизации шлака;

$T_C^* = 2048$ К – температура шлака;

T_{II}^* – температура шлака вблизи макрохолодильника;

$\varepsilon = 0,0006$ м – толщина шлаковой корочки;

$x = 0,0007$ м – окрестность макрохолодильника для вычисления температуры вблизи макрохолодильника;

$T_0 = 20^\circ\text{C} = 293$ К – начальная температура макрохолодильника;

$\eta^* = 0,015$ кг/м·с – динамическая вязкость шлака.

$B_n^* = 0,9959$ – константа, зависящая от критерия Био;

$\mu_n = 1,1656$ – корни характеристического уравнения

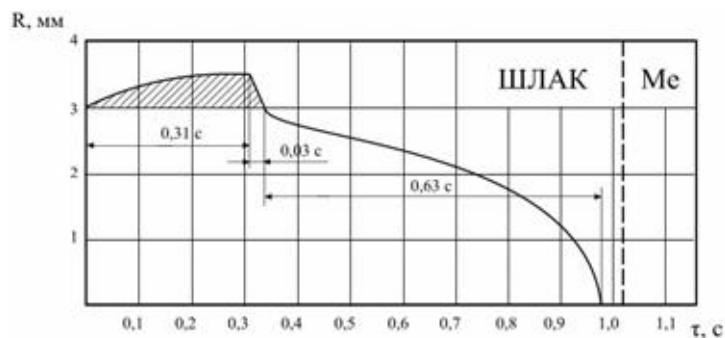
$$B_n = \frac{6Bi^2}{\mu_n^2(\mu_n^2 + Bi^2 - Bi)}$$

После подстановки исходных данных в уравнение (13) было получено значение времени, за которое шлаковая корочка достигнет своего максимального значения $\varepsilon = 0,0006$ м по мере падения макрохолодильника в шлаке ($t = 0,31$ с). После этого корочка начнет быстро оплавляться, а затем начнет расплавляться и сам макрохолодильник.

3. Расчет времени расплавления шлаковой корочки и макрохолодильника

После полного прогрева макрохолодильника, если он продолжает двигаться в перегретом расплаве, начнется оплавление шлаковой корки и самого макрохолодильника.

Для количественной оценки этого процесса допустим, что к макрохолодильнику тепло перегрева подводится с помощью теплопроводности и



Намерзание и оплавнение шлака на макрохолодильнике диаметром 6 мм и дальнейшее оплавнение макрохолодильника (заштрихована шлаковая корка)

конвекции, чему соответствует условие на оплавляющейся поверхности макрохолодильника [2].

$$\rho^* \eta \frac{d\varepsilon}{dt} = \lambda^* \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=\varepsilon}^* + \alpha_K (T_C^* - T_{кр}^*). \quad (14)$$

Кроме того, допустим, что в малой окрестности макрохолодильника поле температур шлака определяется формулой

$$T_{(x)}^* = T_{кр}^* + (T_C^* - T_{кр}^*) \left(1 - \frac{\varepsilon}{x} \right) \quad (15)$$

при $x \geq \varepsilon$.

С учетом выражения (15) уравнение динамики плавления (14) примет вид

$$\eta \rho^* \frac{d\varepsilon}{dt} = \left(\frac{\lambda^*}{\varepsilon} + \alpha_K \right) (T_C^* - T_{кр}^*), \quad (16)$$

интегрируя которое, при условии $(T_C^* - T_{кр}^*) = \text{const}$, получаем:

$$(t_0 - t) (T_C^* - T_{кр}^*) = \eta \rho^* \left(\varepsilon - \varepsilon_0 - \frac{\lambda^*}{\alpha_K} \cdot \ln \frac{\lambda^* + \alpha_K \varepsilon}{\lambda^* + \alpha_K \varepsilon_0} \right) \alpha_K, \quad (17)$$

где $\varepsilon_0 = 0,0006$ м – толщина шлаковой корки в момент времени $t_0 = 0$ с; $\eta = 0,015$ кг/м·с – вязкость шлака; $\rho^* = 2400$ кг/м³ – плотность шлака; $\lambda^* = 7$ Дж/м·с·°С – теплопроводность шлака; $\alpha_K = 4667$ Дж/м²·с·°С – коэффициент теплоотдачи конвекцией.

Подставляя исходные данные в формулу (17), находим, что шлаковая корочка расплавится при прохождении макрохолодильника через шлаковую ванну за 0,03 с. Подставляя в формулу (17) значения плотности металла, радиуса макрохолодильника в момент времени $t_0 = 0$ с и теплопроводности металла, можно определить время, необходимое для расплавления самого макрохолодильника в шлаковой ванне. Это время составляет 0,63 с. Таким образом, при прохождении макрохолодильника через шлаковую ванну уже в ней макрохолодильник вместе со шлаковой корочкой успевает полностью расплавиться и в металлическую ванну он попадает в виде капли жидкого металла. Это можно изобразить в виде диаграммы (см. рисунок).

4. Расчет скорости подачи макрохолодильников

Рассчитаем объем и массу одного цилиндрического макрохолодильника:

$$V_i = \pi R^2 \cdot l, \quad (18)$$

где R – радиус основания цилиндрического макрохолодильника; l – длина макрохолодильника;

$$m_i = \rho \cdot V_i, \quad (19)$$

где V_i – объем макрохолодильника; ρ – плотность металла макрохолодильника.

Согласно формулам (18) и (19) получаем:

$$V_i = 3,14 \cdot 0,003^2 \cdot 0,006 = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3,$$

$$m_i = 7800 \cdot 1,7 \cdot 10^{-7} = 1,326 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Поскольку за период переплава ($\tau=15504 \text{ с}$ =

=4,31 ч опытная плавка) можно ввести 233 кг макрохолодильников, то скорость подачи макрохолодильников в шлаковую ванну

$$v_{M/X} = \frac{m_i \cdot \tau}{233}. \quad (20)$$

Получаем

$$v_{M/X} = \frac{1,326 \cdot 10^{-3} \cdot 15504}{233} \approx 0,1 \text{ с}.$$

Таким образом, скорость ввода макрохолодильников в шлаковую ванну составляет 1 макрохолодильник за 0,1 с. Если использовать два дозатора, то скорость подачи будет составлять 1 макрохолодильник за 0,2 с в каждом дозаторе. Отталкиваясь от полученных результатов, возможна выработка конкретных технологических рекомендации.

Библиографический список

1. Ключев М. М., Никулин А. А. Скорость движения и степень нагрева металлической капли в шлаке при электрошлаковом переплаве // Черметинформация. 1970. № 4. С. 32–34.
2. Теплофизические основы ввода макрохолодильников в слиток ЭШП / Медовар Б. И., Самойлович Ю. А., Кошман В. С. и др. // Проблемы специальной электрометаллургии. Киев: Наук. думка, 1979. С. 66–76.
3. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. М.: Госэнергоиздат, 1963. 527 с.