

кий уровень содержания кислорода и отсутствие флокенов в готовых рельсах, снижает уровень загрязненности стали по строчкам хрупкоразрушенных оксидов и обеспечивает требуемый уровень ударной вязкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Железнодорожные рельсы из электростали / Н.А. Козырев, В.В. Павлов, Л.А. Годик, В.П. Дементьев. – Новокузнецк: Изд-во НПК, 2006. – 388 с.

2. Годик Л.А., Козырев Н.А., Корнева Л.В. // Сталь. 2009. № 3. С. 29, 30.
3. Юрьев А.Б., Годик Л.А., Козырев Н.А. и др. // Сталь. 2009. № 2. С. 30, 31.
4. Пат. 2415180 РФ. Способ производства рельсовой стали / И.В. Александров, Н.А. Козырев, Е.П. Кузнецов и др. Заявл. 25.11.2009; опубл. 27.03.2011.

© 2012 г. Н.А. Козырев, Е.В. Протопопов,
Р.С. Айзатулов, Д.В. Бойков
Поступила 7 октября 2011 г.

УДК 669.1.536.24.001.1:621.791.793

И.А. Павлюченков, С.А. Усенко

Днепродзержинский государственный технический университет

О РЕШЕНИИ СОПРЯЖЕННОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА ДЛЯ СЛИТКА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ

Развитие современного промышленного производства (особенно таких отраслей, как энергетическое машиностроение, электроника, черная металлургия) сопровождается постоянным повышением требований к применяемым в них деталям машин и агрегатов. Это влечет за собой необходимость использования слитков из сложноалегированных сталей и сплавов (в том числе и композитов), а также слитков больших геометрических размеров.

Среди металлургических процессов, которые обеспечивают получение качественного слитка, много лет достойное место занимают электрошлаковые технологии (электрошлаковая сварка и наплавка, переплав и литье, рафинирование металлов и т.д.) [1]. Электрошлаковые технологии в классическом варианте, как правило, основаны на переплаве расходного электрода и характеризуются некоторыми общими чертами, а именно, жесткой связью между температурными параметрами электрошлакового процесса и его производительностью, центральным подводом тепла к заготовке, периферийным (боковым) теплоотводом от нее. Однако эти особенности электрошлаковых технологий в некоторой степени ограничивают возможности выполнения предъявляемых требований.

На современном этапе развития электрошлаковых технологий нашел применение новый способ получения высококачественных слитков (разработан в институте электросварки им. Е.О. Патона), основанный на совместном применении токоподводящего секционного кристаллизатора и жидкого металла. Такая технология, используемая ЗАО «Новокраматорский машиностроительный завод», позволяет разделить процессы плавления и затвердевания металла [2].

Достаточно подробно теоретически изучены в отдельности электрические, тепловые и гидродинамиче-

ские процессы, происходящие в шлаковой и металлической ваннах при электрошлаковом переплаве [3, 4]. Но эти процессы неразрывно связаны друг с другом, и поэтому возникает задача комплексного их рассмотрения.

Целью настоящей работы является создание математической модели для решения сопряженной термогидродинамической задачи с учетом наличия внутренних источников тепла в шлаковой ванне и распределения температуры в охлаждающем потоке воды.

Особенностями процесса получения крупного слитка методом электрошлаковой наплавки жидким металлом в токоподводящем секционном кристаллизаторе являются использование секционного кристаллизатора (секции разделены по высоте между собой, каждая выполняет свою функцию), применение слитка (металлической вставки), который наплавляется в ходе процесса, в качестве макрохолодильника.

Процесс затвердевания металла (наплавляемого слоя) происходит в интервале температур ликвидуса t_L и солидуса t_S (переход из жидкого в твердое состояние с образованием двухфазной зоны).

Расчет ведется с момента заполнения полости кристаллизатора жидким металлом под слоем шлаковой ванны. Принимается, что жидкий металл подается в одном месте, мгновенно и равномерно распределяется по всей верхней поверхности кристаллизатора. Металлическая вставка имеет гладкую поверхность без дефектов. В процессе формирования слиток проходит ряд стадий, отличающихся теплофизическими и физико-химическими условиями. Задача является осесимметричной, поэтому в качестве расчетной области (рис. 1) выбрана половина поперечного сечения цилиндрического слитка.

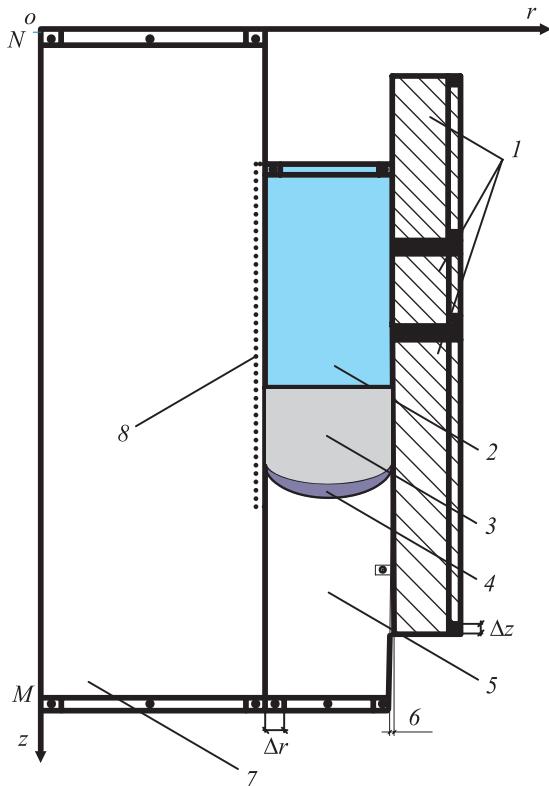


Рис. 1. Расчетная область zor для получения крупнотоннажного слитка методом ЭШН ЖМ:
 1 – зона секций токоподводящего секционного кристаллизатора;
 2 – зона шлаковой ванны; 3 – зоны наплавляемого слоя металла (3 – жидкая metallическая ванна; 4 – двухфазная зона;
 5 – зона закристаллизовавшегося металла);
 6 – литьевой (газовый) зазор; 7 – зона metallической вставки;
 8 – зона оплавления metallической вставки

Для математического описания теплопереноса в шлаковой ванне, металле, твердой вставке и медных стенках секционного кристаллизатора используется двухмерное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат с соответствующими краевыми условиями [3]

$$\rho_n(t)c_n(t)\frac{\partial t(r,z,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\lambda_n(t)r\frac{\partial t(r,z,\tau)}{\partial r}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda_n(t)\frac{\partial t(r,z,\tau)}{\partial z}\right] + f(r,z),$$

где ρ , c и λ – плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности рассматриваемой среды, $\text{кг}/\text{м}^3$, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ и $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$; t – температура рассматриваемой среды, $^\circ\text{C}$; τ – время процесса, с; n – индекс, соответствующий рассматриваемой среде (твердая metallическая вставка, шлаковая ванна, слой наплавляемого металла, медная стенка секционного кристаллизатора); $f(r,z) = 0,24\sigma^S|\text{grad}\phi|^2$ – интенсивность источников джоулева тепла, которые распределены в шлаковой ванне, $\text{Дж}/\text{м}^3$; σ^S – проводимость жидкого шлака; $\phi = \phi(r,z)$ – потенциал электрического поля

шлаковой ванны, определяется как решение уравнения $\text{div}(\sigma^2\text{grad}\phi) = 0$ (полное описание решения уравнений для определения функций $f(r,z)$ и ϕ представлено в работах [5, 6]).

Для приближенного учета конвективных течений в жидком металле в расчетах увеличиваем коэффициент теплопроводности расплавленного металла в m раз, сохраняя уравнение переноса тепла одинаковым как для твердой, так и для жидкой фаз. Коэффициент пропорциональности m опытный, его значение зависит от температуры и скорости движения потоков жидкого металла, способа подачи металла и т.д. Авторы работы [7] рекомендуют принимать значение коэффициента пропорциональности в пределах от двух до пяти.

Выделение тепла кристаллизации (L) в двухфазной зоне наплавляемого металла учитывается заданием эффективной теплоемкости $c_{ef}(t)$ в следующем виде:

$$c_{ef}(t) = \begin{cases} c_{M_L}(t) & \text{при } t_m < t_{M_L}; \\ c_{M_S}(t) - L \frac{d\Psi}{dt} & \text{при } t_{M_S} < t_m < t_{M_L}; \\ c_{M_S}(t) & \text{при } t_m < t_{M_S}, \end{cases}$$

где c_{M_S} и c_{M_L} – удельная теплоемкость твердой и жидкой фазы наплавляемого металла; ψ – доля твердой фазы в контрольном участке слитка; $d\Psi/dt$ – темп кристаллизации; t_m – температура металла, $^\circ\text{C}$ (здесь индексом «м» обозначена рассматриваемая среда – область слоя наплавляемого металла).

Для учета изменения температуры в потоке охлаждающей воды и оценки степени его влияния на формирование слитка в кристаллизаторе в рассматриваемую математическую модель вводится одномерное уравнение энергии, учитывающее изменение температуры,

$$\rho_w(t)c_w(t)\frac{\partial t_w(z,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r}\left[\lambda_w(t)\frac{\partial t_w(z,\tau)}{\partial z}\right],$$

где ρ_w , λ_w , c_w и T_w – плотность, коэффициент теплопроводности, теплоемкость и температура воды, $\text{кг}/\text{м}^3$, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ и $^\circ\text{C}$.

Для реализации численных расчетов теплофизической задачи по математической модели, приведенной выше, используется метод контрольного объема [8]. Расчетная область (рис. 1) разбивается на непересекающиеся контрольные объемы с шагом Δr в радиальном и Δz в аксиальном направлениях с учетом равномерности сетки ($r = i\Delta r$). Значение температуры определяется в узловой точке, которая находится в центре контрольного объема. Дифференциальные уравнения интегрируют по каждому контрольному объему. Применена явная разностная схема. Численное решение электромагнитной задачи приведено в работах [5, 6].

Для расчетов в качестве исходных параметров использовали модельные данные: диаметр и высота ме-

таллической вставки 2 и 11 м соответственно; толщина слоя наплавляемого металла 0,20 м; металлическая вставка из стали 40Х; жидкий металл – сталь Зсп; флюс АНФ-94 (следующего химического состава 40 % CaF₂, 20 % Al₂O₃, 20 % SiO₂, 20 % CaO); напряжение на шлаковой ванне 50 В. Принимали, что электропроводность шлака является неизменной. Уровень тока определяли расчетным путем (для этого случая 34 280 А).

На рис. 2, 3 приведены тепловыделение и распределение температуры в шлаковой ванне (начальная температура 1650 °C). Основное количество тепла концентрируется в зоне токоподводящей секции кристаллизатора, обеспечивая формирование поверхности слитка. Максимальная температура шлаковой ванны в этой области составляет 1765,3 – 1779,5 °C. На границе раздела шлаковая ванна – жидкий металл (высота слоя шлака над зеркалом металла 0,03 м) средняя температура шлаковой ванны находится в интервале 1599,40 – 1606,60 °C, что позволяет обеспечить сохранение тепла на зеркале металла и поддерживать металлическую ванну в расплавленном состоянии.

Совместное численное решение уравнений позволяет получить распределение тепла в любой момент времени в каждой точке элемента системы (металлической

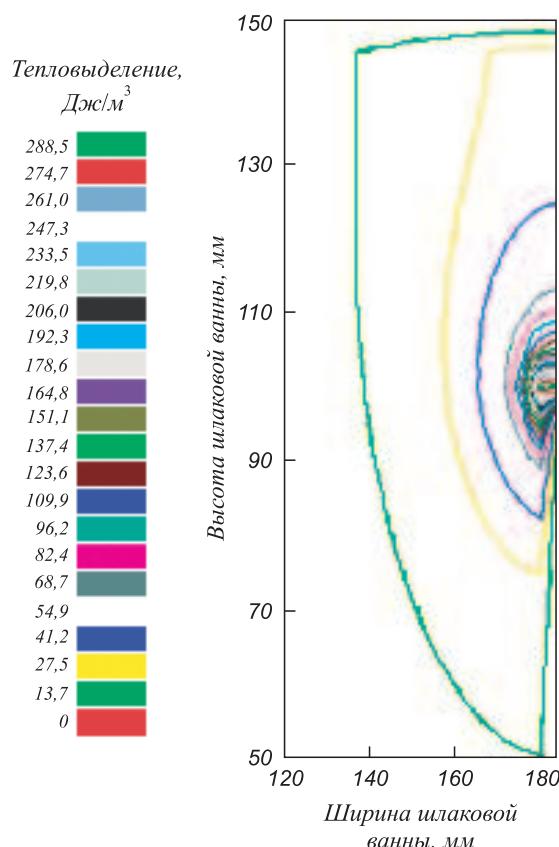


Рис. 2. Тепловыделение в шлаковой ванне

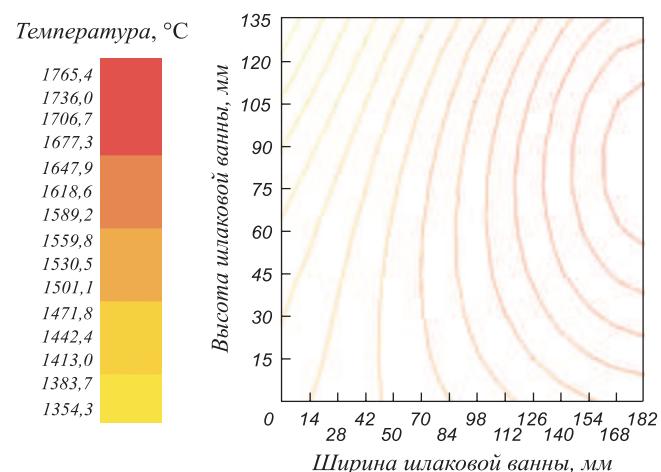


Рис. 3. Распределение температуры в шлаковой ванне

вставке, шлаковой ванне, наплавляемом слое, потоке охлаждающей воды, медных стенках секционного кристаллизатора). Результатами расчета являются зависимости тепловыделения в шлаковой ванне, распределения поля температур в шлаковой ванне, распределение тепловых потоков в металлической ванне от энергетических параметров, зависимость температуры поверхности слитка в кристаллизаторе и на выходе из него от расхода охлаждающей воды в кристаллизаторе и т.д.

Выходы. Представлена совместно решенная математическая модель тепловой и электрической задачи для процесса получения и охлаждения слитка методом электрошлаковой наплавки жидким металлом. Приведены результаты численного решения по представленной модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Медовар Б.И., Медовар Л.Б., Саенко В.Я., Чернеч А.В. // Проблемы специальной электрометаллургии. 1999. № 3. С. 3 – 8.
2. Патон Б.Е., Медовар Л.Б., Саенко В.Я. // Проблемы специальной электрометаллургии. 2002. № 3. С. 3 – 9.
3. Махненко В.И., Медовар Л.Б., Саенко В.Я. и др. // Современная электрометаллургия. 2008. № 4. С. 30 – 43.
4. Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве / Под ред. Б.И. Медовара. – Киев: Наукова думка, 1978. – 304 с.
5. Демченко В.Ф., Крикент И.В. // Математичне моделювання. 2002. № 1 (8). С. 16 – 20.
6. Крикент И.В. // Математичне моделювання. 1994. № 1. С. 57 – 59.
7. Стальнй слиток. В 3 т. Т. 1 Управление кристаллической структурой / Ю.А. Самойлович, В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова и др. / Под ред. В.И. Тимошпольского, Ю.А. Самойлова. – Минск: Беларусская наука, 2000. – 583 с.
8. Самарский А.А., Вабищев П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.