

На правах рукописи

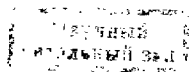
ЧУМАНОВ Илья Валерьевич

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЛАВЛЕНИЯ,  
ТРАНСПОРТИРОВКИ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛА ПРИ ЭНП

Специальность 05.16.02 - "Металлургия черных металлов"

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете.

Научный руководитель - доктор технических наук профессор  
РОЩИН В.Е.

Официальные оппоненты - доктор технических наук профессор  
ГУРЕВИЧ Ю.Г.  
кандидат технических наук  
ШВЕД Ф.И.

Ведущее предприятие - АО "Златоустовский металлургический  
завод"

Защита состоится "16" октября 1996 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 053.13.04 по присуждению ученых степеней при Челябинском государственном техническом университете.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинского государственного технического университета.

Ваш отзыв, скрепленный гербовой печатью, просим направлять по адресу: 454084, г. Челябинск, пр.им. В.И. Ленина, 76, ЧГТУ, ученый совет, т. 39-91-23.

Автореферат разослан "12" октября 1996 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
докт.физ.-мат. наук, проф.



Мирзаев Д.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Электрошлаковая технология нашла широкое применение не только для выплавки слитков, подлежащих дальнейшему металлургическому переделу, но и для получения отливок, близких по своей форме и размерам к готовым изделиям. Не случайно более 50% электрошлаковых установок сосредоточено на машиностроительных предприятиях. Более чем за 40 лет существования ЭШП проведено большое количество исследований по совершенствованию технологии процесса и созданию оборудования, позволяющего улучшить технико-экономические параметры переплава.

Перспективы развития электрошлаковой технологии предполагают активное управление процессом электрошлакового переплава в направлении повышения тепловой эффективности и улучшения качества получаемого металла.

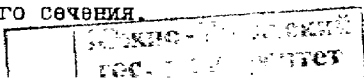
Качество электрошлакового слитка обусловлено в значительной степени соответствием скорости поступления жидкого металла с оплаваемого электрода скорости его кристаллизации в жидкой металлической ванне.

Однако эффективных способов, позволяющих повысить скорость кристаллизации электрошлакового слитка, практически нет. Данное обстоятельство приводит к тому, что для обеспечения плотной структуры слитка приходится искусственно сдерживать скорость плавления. Имеющиеся в литературе данные об электрошлаковой плавке с вращением расходуемого электрода, когда без увеличения величины тока и напряжения удается заметно повысить производительность и снизить расход электроэнергии, недостаточны. В тоже время, это направление представляет интерес с точки зрения дальнейшего совершенствования и поиска новых областей его применения.

Цель работы. Изучение возможности управления процессами плавления, транспортировки и кристаллизации металла при ЭШП за счет изменения скорости вращения расходуемого электрода.

Для этого необходимо решить следующие вопросы.

1. Разработать гидродинамическую и кинетическую модели переплава расходуемых электродов в поле действия центробежных сил.
2. Исследовать движение электродного металла в шлаковой фазе при различных условиях переплава.
3. На основании полученных зависимостей разработать технологию для получения отливок переменного сечения.



Научная новизна. В диссертации впервые:

- получены аналитические выражения, позволяющие рассчитывать оптимальную скорость вращения расходуемого электрода в зависимости от реальных условий электрошлаковой плавки;
- установлена зависимость между местом доставки капель электродного металла в жидкую металлическую ванну и скоростью вращения заготовки;
- разработана механизм управления скоростью плавления расходуемых электродов изменением скорости их вращения.

Практическая ценность работы.

1. Разработана технология получения отливок переменного сечения методом ЭШП с вращением расходуемого электрода вокруг своей оси ( Патент России № 2048553).
2. Предложен эффективный способ управления скоростью плавления электрода при электрошлаковой плавке, не требующий изменения подаваемых на электрод электрических параметров;
3. Разработана автоматическая схема поддержания постоянной скорости плавления расходуемого электрода.

На защиту выносятся:

1. Результаты аналитического исследования и экспериментального изучения кинетики течения и места доставки электродного металла в поле действия центробежных сил.
2. Технология получения отливок переменного сечения методом ЭШП с вращением расходуемого электрода.
3. Механизм управления скоростью плавления расходуемых электродов изменением скорости их вращения.

Апробация работы. Основные результаты работ доложены и обсуждены на: 1. Всесоюзном совещании "Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии", Новокузнецк, 1991 г.; 2. IX Международной научной конференции "Современные проблемы специальной электрометаллургии", Челябинск, 1995 г. 3. Международной научно-практической конференции "Новые ресурсосберегающие технологии и материалы", Челябинск, 1996 г.

Публикации результатов работы. По материалам диссертации опубликовано 6 статей и 3 тезиса докладов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, выводов, библиографического списка (115 источников) и приложения. Она изложена на 123 страницах машинописного текста, включающих 15 таблиц, 26 иллюстраций.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении раскрывается актуальность проблемы дальнейшего совершенствования технологий получения отливок переменного сечения методом ЭШП. Показано, что разработка и внедрение новых технологий должны базироваться на активном управлении процессом ЭШП в направлении повышения тепловой эффективности и улучшения качества получаемого металла.

Сформулированы цель работы и основные положения, выносимые на защиту.

### 1. ПРОЦЕССЫ ПЛАВЛЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ МЕТАЛЛА ПРИ ЭШП

Анализ литературных данных показывает, что плавление расходуемого электрода связано с количеством тепловой мощности, выделяемой в шлаковой ванне. Увеличение мощности обеспечивает и более высокую производительность электрошлакового процесса. Однако многочисленными исследованиями установлено, что повышение производительности установок при обычной схеме электрошлакового переплава ограничено условиями рафинирования переплавляемого металла и его кристаллизацией. Отмеченное обстоятельство обусловило появление ряда разработок, связанных с внешним воздействием на шлаковую и металлическую ванны при электрошлаковой плавке или на переплавляемый электрод, а также создание новых схем переплава. Среди них есть одно, которое позволяет делать это наиболее эффективно и комплексно т.е. влиять на производительность процесса и рафинирование металла, а также управлять кристаллической структурой формируемого слитка или отливки - это электрошлаковая плавка вращаемого вокруг собственной оси расходуемого электрода. Возникающие при этом центробежные силы обеспечивают радиальное течение жидкого металла с оплавленной части расходуемого электрода, вследствие чего капли электродного металла доставляются на периферию слитка. При радиальном течении электродного металла по плоскому торцу обеспечиваются более благоприятные условия рафинирования.

В литературе отмечается, что для конкретных условий переплава существуют оптимальные скорости вращения расходуемого электрода, когда эти процессы протекают наилучшим образом. Следовательно, умение прогнозировать выбор скорости вращения заготовки для создания оптимальных условий переплава представляются весьма актуальными. Прогнозирование места доставки электродного

металла в шлаковую и металлическую ванны позволили бы расширить диапазон применения данной технологии, в частности, для получения слитков или отливок переменного сечения.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ТЕЧЕНИЯ И МЕСТА ДОСТАВКИ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА В ПОЛЕ ДЕЙСТВИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

При электрошлаковом переплаве без вращения электродов малого и среднего сечения оплаваемый торец электрода имеет форму конуса. В рабочем режиме электрод равномерно оплавается по поверхности конуса, сохраняя его форму и размеры. Это означает, что тепловой поток равномерно распределен по поверхности конической части, и в каждый момент времени расплавляется слой металла определенной толщины. Вследствии стекания металла вниз толщина жидкого слоя увеличивается в направлении к вершине конуса.

Стремление получить минимальную по толщине и равномерно распределенную по оплаваемой поверхности электрода жидкую металлическую пленку продиктовано тем, что основное рафинирование металла происходит именно в этом слое, и чем меньше толщина слоя, тем эффективнее процесс очистки. Следовательно, условия рафинирования наименее благоприятны вблизи оси электрода. Поступление электродного металла с вершины его конической части в жидкую металлическую ванну приводит к увеличению глубины ее центральной части, что, в свою очередь, способствует нарушению структурной однородности слитка. В связи с этим создание при ЭШП таких условий, при которых толщина слоя жидкого металла на электроде была бы минимальной, а металлическая ванна, фронт кристаллизации и торец электрода в процессе переплава оставались плоскими, позволило бы повысить эффективность рафинирования металла. Такие условия можно обеспечить при радиальном течении жидкого металла по плоской оплаваемой поверхности, что достигается вращением переплавляемого электрода.

В силу указанных обстоятельств при реализации ЭШП с вращением возникает задача оценить минимальную скорость  $\omega$  вращения электрода, при которой могут реализоваться указанные выше условия. Для решения поставленной задачи нами предпринята попытка построения гидродинамической модели переплава расходуемого электрода в поле действия центробежных сил.

Допустим, что весь объем конической части электрода погруженной в шлак - жидкий, и в произвольный момент времени высота

конуса равна  $h$ , а длина его образующей равна  $l$ , радиус  $r$  цилиндрической части остается постоянным. Тогда с уменьшением величины  $h$  изменение кинетической энергии вращения конической части запишется в виде:

$$dE = \pi/20 (\omega^2 \cdot r^4 \cdot \Delta\rho \, dh), \quad (1)$$

где,  $\rho = \rho_0 - \rho_{\text{ш}}$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_0$  - плотность жидкого металла, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ш}}$  - плотность шлака, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  - угловая скорость вращения электрода, рад с<sup>-1</sup>. Одновременно из-за уменьшения поверхности конуса будет изменяться и поверхностная энергия конической части электрода  $E_{\text{пов.}} = k \pi \cdot r \cdot \sigma_{\text{sb}} \, dl$ . Предположим, что изменение поверхностной энергии равно изменению кинетической энергии.

$$(\pi/20) \omega^2 \cdot r^4 \cdot \Delta\rho \, dh \cong k \pi \cdot r \cdot \sigma_{\text{sb}} \, dl, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{sb}}$  - удельная поверхностная энергия границы раздела металл (электрод)-шлак, Дж·м<sup>-2</sup>. В интегральной форме запишется в виде:

$$(1/20) \omega^2 \cdot r^3 \cdot \Delta\rho \cdot (h_0 - h) \cong \sigma_{\text{sb}} \cdot (l_0 - l), \quad (3)$$

где  $h_0$ ,  $l_0$  - соответственно, высота конической части и длина образующей при  $\omega = 0$ .

Если величина  $\omega$  такова, что торец расходуемого электрода при вращении становится плоским, то  $h = 0$  и  $l = r$ . Тогда, с учетом, что  $l_0 = (h_0^2 + r^2)^{1/2}$  из соотношения (3) получим:

$$\omega^2 = \frac{20 \sigma_{\text{sb}} [(h_0^2 + r^2)^{1/2} - r]}{r^3 \cdot \Delta\rho \cdot h_0}. \quad (4)$$

Оценим величину  $h_0$  из равенства силы поверхностного натяжения, действующей на контур круга радиуса  $r$ , и веса слоя жидкого металла на поверхности конуса при  $\omega = 0$ . Имеем:

$$(1/3) \cdot \pi \cdot r^2 h_0 \cdot g \Delta\rho = 2\pi \cdot r \cdot \sigma_{\text{sb}}, \quad (5)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Выражая  $h_0$  из соотношения (5), имеем:

$$h_0 = \frac{6 \sigma_{\text{sb}}}{\Delta\rho \cdot g \cdot r}, \quad (6)$$

а подставляя его в (4), получим

$$\omega^2 = \frac{10 g [((36\sigma_{\text{sb}}^2 / \Delta\rho^2 g^2 r^2) + r^2)^{1/2} - r]}{3r^3}. \quad (7)$$

При вращении электрода со скоростью  $n$  оборотов в единицу времени

$$n = \omega/2\pi. \quad (8)$$

Значение  $\omega$ , определяемое соотношением (7), - это минимальное значение скорости, так как мы не учитывали работу сил сопротивления среды движению каплей жидкого металла, сходящих с вра-

щающегося электрода.

Из анализа выражения (7) для  $\omega$  следует, что для достижения указанных выше условий при увеличении радиуса электрода скорость его вращения можно уменьшить и наоборот. Величина  $\omega$  существенно зависит также от  $\Delta\rho = \rho_0 - \rho_{\text{ш}}$ . Если плотность  $\rho_0$  стали различных марок в большинстве случаев различаются незначительно, то плотность шлаков  $\rho_{\text{ш}}$  может отличаться на 50 и более процентов. Следовательно, при определении величины  $\omega$  значительную роль играет состав шлака.

Оценим величины  $\omega$  и  $n$  по соотношениям (7), (8), приняв, что  $\Delta\rho \approx 2500 \text{ кг/м}^3$ ,  $\sigma_{\text{сб}} \approx 1,8 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}$ ,  $r = 0,04 \text{ м}$ . Для выбранных параметров получим  $\omega \approx 5,5 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$ ,  $n \approx 0,9 \text{ с}^{-1} \approx 54 \text{ мин}^{-1}$ .

Таким образом, при реализации ЭШП с вращением электрода можно целенаправленно подбирать с достаточно большой точностью скорость его вращения в зависимости от радиуса электрода, марки стали и состава шлака.

В условиях электрошлакового переплава с вращением расходоуемого электрода большое значение имеет время переходного периода, в течение которого происходит трансформация конической формы торца оплаваемого электрода в плоскую. Если для этого требуется достаточно большой промежуток времени, то необходимо предусматривать либо конструктивные изменения в кристаллизаторе, либо технологические. Для определения времени перехода от конической формы торца до плоской целесообразно построить кинетическую модель этого процесса. Для чего рассмотрим силы, действующие на элементарный объем жидкого металла массой  $\Delta m$  на поверхности конической части электрода.

Как уже отмечалось, форма оплаваемого торца расходоуемого электрода малого и среднего сечения близка к конической. Если радиус основания конуса  $r_{\text{к}}$  при угловой скорости вращения  $\omega$  электрода, равной нулю, равен радиусу  $R$  электрода, то при  $\omega \neq 0$  и с ее увеличением  $r_{\text{к}}$  уменьшается и при некоторой  $\omega_{\text{к}}$  может стать равным нулю, т.е. оплаваемый торец электрода станет плоским. Возникает задача аналитически оценить зависимость  $r_{\text{к}}$  от  $\omega$  и времени вращения  $t$  при заданных и постоянных во времени других параметрах процесса. Схема действия сил и геометрии торца электрода, используемая для расчета и оценки зависимости  $r_{\text{к}}$  от  $\omega$  и  $t$ , приведена на рис.1.



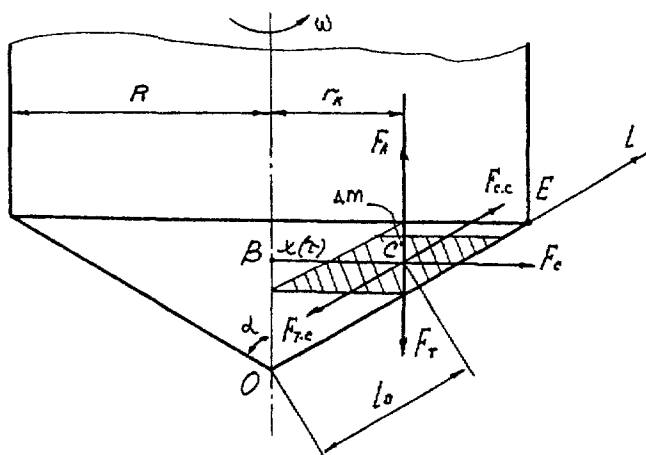


Рис.1. К нахождению зависимости радиуса основания оставшегося конуса от угловой скорости вращения электрода и времени вращения

Силы, действующие на элементарный объем металла массой  $\Delta m$ .  
 $F_{t.c} = F_t \cdot \cos \alpha$ ;  $F_{c.c} = F_c \cdot \sin \alpha$ ;  $F_a = \Delta m g \rho_0$ . (9)  
 Здесь  $g$  - ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ,  $\rho_0 = \rho_{ш}/\rho_c$ , где  $\rho_{ш}$  и  $\rho_c$  - плотности шлака и стали,  $kg/m^3$ .

Из схемы, приведенной на рисунке, следует, что

$$F_{c.c} = \Delta m \omega^2 x(\tau) \cdot \sin \alpha, \quad (10)$$

где  $x(\tau)$  - расстояние от оси электрода до центра выделенного объема, м.

Уравнение движения для тела  $\Delta m$  вдоль направления  $l$  имеет вид

$$\Delta m \frac{d^2 l(\tau)}{d\tau^2} = \Delta m \omega^2 x(\tau) \sin \alpha - \Delta m g (1 - \rho_0) \cos \alpha. \quad (11)$$

Решением уравнения (11) при начальных условиях

$l(\tau) = l_0$  и  $dl(\tau)/d\tau = 0$  при  $\tau = 0$ , будет

$$l(\tau) = \left[ (l_0/2) - (g(1-\rho_0)\cos\alpha)/2\omega^2\sin^2\alpha \right] \cdot (e^{\tau \omega \sin\alpha} + e^{-\tau \omega \sin\alpha}) + (g(1-\rho_0)\cos\alpha)/\omega^2\sin^2\alpha. \quad (12)$$

Если масса металла, ушедшая с поверхности конической части, равна массе расплавленного за время  $d\tau$  ( $d\dot{m}_1 = d\dot{m}_2$ ) металла, имеем

$$2\pi\rho_c \cdot l(l - l_0) \sin\alpha \cdot \cos\alpha \, d\tau = (\eta u^2/qR_0) d\tau, \quad (13)$$

где  $\eta < 1$  - коэффициент, учитывающий долю теплоты, израсходованной на плавление;  $q$  - удельная теплота плавления,  $Dж/кг$ ;  $R_0$  - электрическое сопротивление шлака,  $Om$ ;  $u$  - напряжение в цепи

"электрод-шлак", В. Отсюда

$$r = \frac{\eta \omega^2}{2\pi q R_0 \rho_0 \sin \alpha \cdot \cos \alpha} \int_0^r \frac{d\tau}{l(l-l_0)} \quad (14)$$

Введем обозначения  $k, b, c$  и учитывая (12) соотношение (14) переищется в виде

$$r = \frac{4k}{(l_0 - c)^2} \int_0^r \frac{d\tau}{(e^{b\tau} + 2c/(l_0 - c))(e^{b\tau} - 2)} \quad (15)$$

Приняв  $r_k = R_0 - r$ , ( $r_k \leq R_0$ ) и интегрируя (15), получаем

$$r_k = R - \frac{\eta \omega^2 \sin^2 \alpha}{2\pi q g^2 \rho_0 R_0 (1 - \rho_0)^2 \cos^3 \alpha} \left[ \ln \frac{(1+c)e^{-b\tau}}{(c_1 + 1)} + c(1 - e^{-b\tau}) \right] \quad (16)$$

где  $c_1 = \frac{2c}{l_0 - c} = \frac{2g \cdot (1 - \rho_0 / \rho_0) \cos \alpha}{[l_0 \omega^2 \sin^2 \alpha - g(1 - \rho_0 / \rho_0) \cos \alpha]}$  (17)

Оценим  $c_1$  при  $\rho_0 = 0,5$ ,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\omega = 2\pi$  рад/с, тогда  $c_1 \approx (9,3 \dots 0,6)$ .

Пренебрегая значениями экспоненты и логарифма, из (16) получим

$$r_k = R - \frac{8\pi^2 \eta \omega^2 \sin^2 \alpha n^3}{g \rho_0 R_0 (1 - \rho_0) \cos^2 \alpha [4\pi^2 n^2 l_0 \sin^2 \alpha - g(1 - \rho_0) \cos \alpha]} \quad (18)$$

Пусть  $l_0$  - положение неустойчивого равновесия тела массой  $\Delta m$ .

При  $l_k < l_0$  металл станет отекать вниз, а при  $l_k > l_0$  он движется вверх. Тогда из условия  $F_{c.c} > F_{t.c}$  оценим величину  $l_0$ . Имеем:

$$\Delta m \omega^2 r(\tau) \sin \alpha > \Delta m g (1 - \rho_0) \cos \alpha \quad (19)$$

или

$$\omega^2 l_0 \sin^2 \alpha > g(1 - \rho_0) \cos \alpha \quad (20)$$

Если диаметр электрода обозначить через  $D$ , то относительно  $D$  и  $l_0$  можно записать условие схода металла с электрода:

$$\frac{D}{2\sin \alpha} > l_0 \quad \text{или} \quad D > l_0 \sqrt{3} \quad (21)$$

С учетом соотношений (20), (21) заменяя  $\omega$  числом оборотов электрода в единицу времени  $n$ , имеем

$$n > \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g(1 - \rho_0) \cos \alpha}{D \sin \alpha}} c^{-1} \quad (22)$$

Если  $\tau < 1$  с, то, пренебрегая в (16) значением логарифма, получим кинетическое соотношение вида

$$r_{\kappa} = R - \frac{8 \pi^2 \cdot \eta \mu^2 \omega^3 \sin^2 \alpha n^3 (1 - e^{-2\pi n \sin \alpha \tau})}{q \rho_c R_0 (1 - \rho_0) \cos^2 \alpha [4\pi^2 n^2 l_0 \sin^2 \alpha - g(1 - \rho_0) \cos \alpha]} \quad (23)$$

Таким образом, используя неравенство (22), можно по заданным величинам  $D$ ,  $\rho_{\text{ш}}$ ,  $\rho_c$ ,  $\alpha$  оценить число оборотов  $n$  электрода, при котором имеет место течение металла по поверхности конической части вверх к основанию конуса. Радиус основания конуса  $r_{\kappa}$  при этом уменьшается.

Соотношение (18) при условиях, указанных выше, определяет зависимость  $r_{\kappa}$  от  $n$  и входящих в него параметров.

Из соотношения (23) можно определять зависимость  $r_{\kappa}$  от  $\tau$  (для случая  $\tau < 1$  с) при  $n = \text{const}$  или зависимость  $r_{\kappa}$  от  $n$  при  $\tau = \text{const}$ . Запишем, например, соотношение (23) для  $D = 300$  мм,  $\eta = 0,5$ ,  $q = 267$  кДж/кг,  $U = 32$  В,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\rho_c = 7004$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{ш}} = 3400$  кг/м<sup>3</sup>. Имеем

$$r_{\kappa} = 0,15 - \frac{1,2 \cdot 10^{-3} n^3}{R_0 [n^2 - 0,5]} (1 - e^{-5,43\pi\tau}) \quad (24)$$

Согласно неравенству (22) для электродов  $D = 300$  мм  $n > 2/3$  с<sup>-1</sup>. Пусть  $n = 1$  с<sup>-1</sup>. Тогда из соотношения (24) следует

$$r_{\kappa} = 0,15 - \frac{2,4 \cdot 10^{-3} (1 - e^{-5,43\tau})}{R_0} \quad (25)$$

Если  $R_0 = 3 \cdot 10^{-3}$  Ом, то получаем

$$r_{\kappa} = 0,15 - 0,8 \cdot (1 - e^{-5,43\tau}) \quad (26)$$

Соотношение (26) является кинетическим соотношением, определяющим при заданных выше конкретных значениях параметров изменение величины радиуса конической части электрода во времени.

Помимо перечисленных выше особенностей при ЭШП с вращением расходимого электрода возникает необходимость для конкретных условий переплава оценить место доставки электродного металла в жидкую металлическую ванну. Известно, что обеспечение пологой формы металлической ванны в кристаллизаторе на протяжении всего переплава позволяет получить хорошую кристаллическую структуру наплавленного слитка. Так, например, при получении отливок и заготовок переменного сечения целесообразно изменять место доставки электродного металла в жидкую металлическую ванну при переходе зоны плавки из одного сечения кристаллизатора в другое.

В силу указанных обстоятельств представляется актуальным уметь прогнозировать место доставки электродного металла, выбирая ту или иную скорость вращения при известных коэффициентах заполнения кристаллизатора и технологических параметрах процесса, обеспечивая при этом также хорошие условия рафинирования.

Для решения поставленной задачи начало системы координат XYZ выберем в центре торца электрода. Будем рассматривать движение капли по осям X, Y (движение по оси OZ не рассматривается). Примем, что сила сопротивления движению пропорциональна скорости движения капли; капля отрывается в момент времени  $\tau = 0$ , когда радиус-вектор, проведенный из центра торца электрода к точке отрыва, направлен вдоль оси OX;  $v_x = 0$  при  $\tau = 0$ .

Запишем уравнения движения

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{d\tau^2} = 0 \\ m \frac{d^2y}{d\tau^2} = -6\pi\gamma_K^2\eta \frac{dx}{d\tau} \end{cases} \quad (27) \quad \begin{cases} m \frac{d^2x}{d\tau^2} = 0 \\ \frac{d}{d\tau} \left( \frac{dy}{d\tau} \right) = -a \frac{dy}{d\tau} \end{cases} \quad (28)$$

где  $m$  - масса капли;  $\gamma_K$  - радиус капли;  $\eta$  - вязкость шлака,  $a = 6\pi\gamma_K^2\eta/m$ .

Начальные условия запишутся в виде:

при  $\tau = 0$ ;  $x(0) = R_0$ ;  $y(0) = 0$ ;  
 $\left. \frac{dx}{d\tau} \right|_{\tau=0} = 0$ ,  $\left. \frac{dy}{d\tau} \right|_{\tau=0} = v = 2\pi\omega R_0$ , (29)

где  $R_0$  - радиус электрода;  $\omega$  - число оборотов в единицу времени.

Интегрируя (28), найдем

$$\begin{cases} x = C_1\tau + C_2 \\ \frac{dy}{d\tau} = v_y = v - ay \end{cases} \quad (30)$$

С учетом условия (29)  $C_1 = 0$ ,  $C_2 = R_0$ ,  $C_3 = v$ , тогда  $x = R_0$ .

Повторное интегрирование (30) дает:

$$-1/a \ln|v-ay| = \tau + C_4; \ln|v-ay| = -a\tau - C_4.$$

При  $\tau = 0$ ,  $y = 0$  имеем, что  $\ln v = -C_4$ . Отсюда:

$$\ln \left| \frac{v-ay}{v} \right| = -a\tau, \quad \frac{v-ay}{v} = e^{-a\tau}.$$

$$1 - \frac{ay}{v} = e^{-a\tau}, \quad \frac{ay}{v} = 1 - e^{-a\tau}.$$

$$y = \frac{v}{a} (1 - e^{-a\tau}), \quad (31)$$

Из (30) следует, что если  $v_y = 0$ , то  $y_{\max} = \frac{v}{a}$ . (32)

Подставляя  $v$  и  $a$  в (32), получаем

$$U_{\max} = \frac{\omega R_0 m}{3\eta r_k} . \quad (33)$$

При переплаве заготовок малого и среднего сечения  $r_k \approx 0,005$  м. Тогда  $m \approx (4/3)\pi r_k^3 \rho_c \approx 0,004$  кг. Отсюда  $K_1 \approx m/r_k \approx 0,73$ . Коэффициент, учитывающий радиальное течение и электромагнитные силы, примем  $K_2 \approx 0,25$ . Тогда, например, при переплаве электрода  $D = 70$  мм ( $R_0 = 0,035$  м) под флюсом АНК-6,  $\eta = 0,18$  П·с при скорости вращения электрода  $60 \text{ мин}^{-1}$  ( $1 \text{ с}^{-1}$ )  $\omega = 2\pi = 6,28 \text{ с}^{-1}$  получаем  $U_{\max} = 0,3$  м.

Следует отметить, что результаты получены при достаточно общих допущениях: скорость плавления не лимитирует процесс удаления металла с электрода; угол наклона постоянен; выражение (33) справедливо для тех случаев, когда высота конической части больше или равна нулю; при расчете движения капли в шлаке не рассматривается движение по оси OZ.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЕРЕПЛАВА В ПОЛЕ ДЕЙСТВИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ В ПРОЗРАЧНОЙ СРЕДЕ

С целью проверки полученных аналитических выражений, позволяющих расчетным путем определить оптимальные скорости вращения электродов различных диаметров, в лабораторных условиях проведено исследование на прозрачной модели. Модель установки выполнена с учетом геометрических зависимостей теории подобия. Собственно среды, имитирующие шлак и металл, выбирали с учетом равенства критериев Грасгофа и соблюдая соотношения  $\rho_{\text{ш}}/\rho_c$ , удовлетворяющее условию равенства критерия Архимеда. Из этих соображений в качестве металла был выбран сплав Вуда с температурой плавления  $68^\circ\text{C}$  и плотностью  $9,68 \text{ г/см}^3$ . В качестве раствора, имитирующего шлаковую ванну, использовали раствор глицерина с температурой плавления  $17,9^\circ\text{C}$  и плотностью  $1,26 \text{ г/см}^3$ .

Экспериментальная часть работы предполагала:

- наблюдение поведения оплавленной части расходуемого электрода при различных скоростях вращения электрода;
- наблюдение места доставки электродного металла в зависимости от скорости вращения и коэффициента заполнения кристаллизатора;
- исследование зависимости между скоростью вращения электрода и размером образовавшихся капель электродного металла;
- определение зависимости между скоростью вращения электрода и

числом капель электродного металла, сходящих с оплавленного торца за единицу времени.

Исследование, проведенное на холодной модели, показало, что без вращения оплавленный торец сохранял характерную для электродов при ЭШП конусную форму с углом при вершине 100–120°. Увеличение скорости вращения электрода приводит к постепенному увеличению угла при вершине и уменьшению высоты оставшегося конуса, далее к образованию плоской формы, и, наконец, к формированию торца вогнутой формы. Во всех случаях момент появления плоского торца совпадает с расчетными параметрами.

Полученные в ходе модельных экспериментов данные по изменению радиуса капли показали, что с увеличением скорости вращения электрода радиус капли сначала уменьшается, а затем возрастает. Минимальный размер капли имеет место при отрыве капель с плоского торца электрода. Этому моменту соответствует и максимальная частота отрыва капель, что подтверждает наличие оптимальной скорости плавления и производительности процесса.

Максимальный радиус капель наблюдается при образовании вогнутости в оплавленной поверхности, что соответствует минимальной частоте их отрыва. Данное обстоятельство объясняет и значительное ухудшение рафинирования металла при переходе плавления в область скоростей вращения, дающих обратную конусность.

Анализ данных о месте доставки электродного металла показал хорошую сходимость расчетных предположений с фактическими результатами, полученными при эксперименте в области рабочих скоростей вращения, т.е. когда реализуется радиальное течение электродного металла.

#### 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ МЕТОДОМ ЭШП С ВРАЩЕНИЕМ РАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДА

Существующие методы получения отливок переменного сечения методом ЭШП в большинстве случаев не позволяют получать качественный слиток из электрода постоянного сечения вследствие различия коэффициентов заполнения кристаллизатора. Поскольку при производстве отливок переменного сечения количество рабочего флюса выбирается исходя из большего диаметра кристаллизатора, требуется специальное отверстие в кристаллизаторе для слива избытков шлага при переходе к меньшему сечению. При этом не обеспечивается постоянство фронта кристаллизации, и, как следствие,

имеет место неоднородность кристаллической структуры. Использование способа получения отливок из электродов переменного сечения существенно увеличивает их стоимость и также в большинстве случаев не обеспечивает требуемого качества.

Более перспективной является технология получения отливок переменного сечения с вращением расходуемого электрода, когда скорость вращения варьируется в зависимости от коэффициента заполнения кристаллизатора.

Рассмотрим некоторые особенности данной технологии на примере получения валка холодной прокатки. Как правило, диаметр прокатного валка и шейки отличаются в два и более раза. Вследствие этого в большем сечении кристаллизатора необходимо плавить металл при малой высоте шлаковой ванны, а электродный металл (капли) доставлять ближе к стенкам кристаллизатора. Достигнуть этого можно, вращая расходуемую заготовку с соответствующей скоростью, при которой центробежные силы, действующие в пленке жидкого металла на оплавленном торце, способны обеспечить радиальное течение электродного металла и необходимую траекторию. При этом возникает восходящий шлаковый поток к оплавленному торцу, а максимальная температура шлака достигается в подэлектродной зоне. В силу этого обстоятельства более рационально используется тепло шлаковой ванны. В результате преобладания центробежных сил над гравитационными сход электродного металла осуществляется в радиальном направлении, что определяет отсутствие традиционного конуса оплавления и делает возможным ведение плавки при меньшей высоте шлаковой ванны.

Опытная технология получения отливок переменного сечения на примере прокатного валка выглядит следующим образом (рис.2):

- переплав расходуемого электрода в нижней части кристаллизатора (область нижней шейки) ведется в стационарном режиме (без вращения) или с малой скоростью вращения;
- при переходе процесса в зону большего диаметра кристаллизатора следует увеличить скорость вращения расходуемого электрода до величины, обеспечивающей при радиальном течении электродного металла доставку его ближе к стенкам кристаллизатора;
- при переходе процесса из зоны бочки в зону наплавления верхней шейки прокатного валка скорость вращения снижают (возможно до нуля).

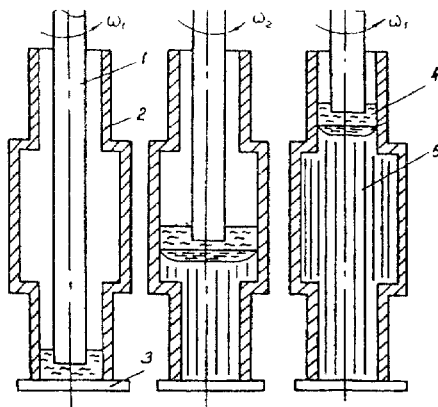


Рис.2. Предлагаемая технологическая схема получения цельнолитого прокатного валька методом ЭШП с вращением: 1-электрод; 2-кристаллизатор; 3-поддон; 4-шлаковая ванна, 5-слиток.

Качество металла электрошлаковой плавки в значительной степени определяется структурной и химической неоднородностью слитка, которые, в свою очередь, определяются во многом стабильностью теплового режима. Для этого при ЭШП стремятся поддерживать скорость плавления постоянной, а также поддерживать постоянство линейной и массовой скорости кристаллизации. С этой целью мощность, подводимую на шлаковую ванну, задает постоянной. На практике это осуществляется переключением ступеней напряжения трансформатора. В работе предлагается способ регулирования постоянства скорости плавления вращением расходуемого электрода, так как изменение скорости вращения расходуемого электрода при неизменных электрических параметрах вызывает значительное (до 20%) изменение скорости переплава.

Анализ изменения электрических характеристик по ходу плавки позволил предложить технологию, согласно которой расходуемый электрод в начальный момент переплава вращают с линейной скоростью, обеспечивающей максимальную производительность процесса при заданных электрических и шлаковых режимах, а в процессе переплава скорость вращения равномерно снижают пропорционально падению сопротивления на электроде и шлаковой ванне.

Для реализации этой технологии следует иметь исходные данные по скорости вращения, обеспечивающей максимальную производительность при хороших условиях рафинирования в зависимости от сечения электрода, химического состава переплавляемого металла и применяемого рабочего флюса, а также от величины электрических



параметров. Для этого можно использовать выражения, полученные в разделе 2.

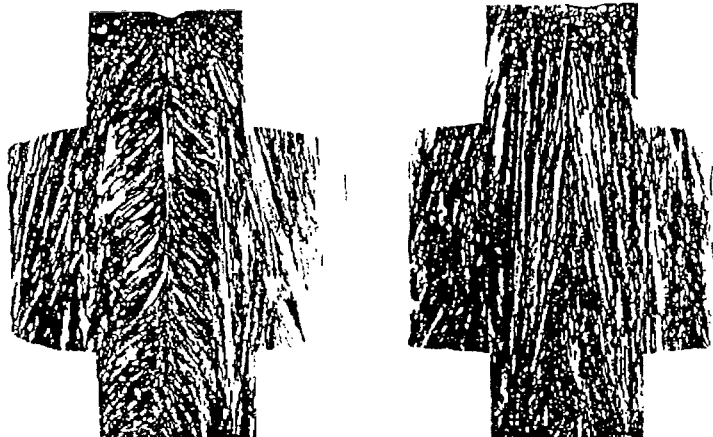
Для подбора скорости вращения, позволяющей компенсировать изменение сопротивления на электроде и шлаковой ванне, разработан специальный автоматический регулятор.

При реализации технологии получения отливок переменного сечения представляется возможным использовать такой автоматический регулятор. Поскольку слитки имеют достаточно большую высоту, то это значительно сказывается на изменении электрических параметров по ходу плавки. Выбор скорости вращения при переходе в новое сечение кристаллизатора (когда имеет место резкое изменение коэффициента заполнения кристаллизатора) производится вручную, а далее плавку можно переводить в автоматический режим регулирования скорости вращения.

#### 5. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭШП С ВРАЩЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Исследование проводилось на установке А-550, оснащенной механизмом вращения и автоматическим регулятором, в кристаллизатор переменного сечения с размерами шейки валика 100 мм, бочки 200 мм. Для переплава использовали сталь 20Х13. Переплав осуществляли под флюсом АНФ-6. Выплавку слитков проводили по двум вариантам: первый - переплав без вращения (обычная технология); второй - переплав с вращением электрода и с изменением скорости вращения расходуемого электрода при переходе в новое сечение кристаллизатора. Выбор начальной скорости вращения электрода производили по методике, изложенной в разделе 2. Оценка  $w$ ,  $n$  и  $U_{\max}$  позволила рекомендовать скорость вращения  $n_1 = 70$  об/мин, а для большого сечения  $n_2 = 120$  об/мин. С учетом кинетического соотношения изменение скорости вращения производили сразу при переходе в новое сечение кристаллизатора.

Исследование полученных отливок (рис.3) показало, что слиток, полученный с вращением, имеет более правильную геометрию. В случае переплава с вращением слиток отличается большей однородностью кристаллической структуры, кристаллы центральной части имеют более ярко выраженную вертикальную ориентацию. Угол наклона кристаллов как в центральной зоне, так и в периферийных областях на участках большого сечения примерно одинаков и соответствует  $\approx 75+85^\circ$ .



(а)

(б)

Рис.3. Макроструктуры продольных тепловатов из заготовок переменного сечения стали 20К13 (а-без вращения; б-с вращением)

Исследования показали, что уровень микронапряжений по сечению слитка выравнивается в случае применения опытной технологии. Подтверждением большей однородности является и изменение плотности стали, при некотором ее уменьшении имеет место заметное выравнивание ее от периферии к центру.

Оценка неметаллических включений показала, что в большинстве плавок стали 20К13 с вращением электрода по сравнению с металлом, выплавленным по принятой технологии, происходит уменьшение концентрации неметаллических включений с  $9,8 \cdot 10^3$  мк/мм<sup>3</sup> до  $4,8 \cdot 10^3$  мк/мм<sup>3</sup>, т.е. на 50%, увеличение количества чистых полей от 54,3% до 64,2%, а также снижение относительной плотности, занятой неметаллическими включениями, с  $4,1 \cdot 10^{-2}\%$  до  $3,3 \cdot 10^{-2}\%$ .

Повышение рафинирующей способности стало возможным за счет выравнивания толщины пленки жидкого металла, по плоскому оплавленному торцу и уменьшения ее толщины. Созданы условия для образования капель электродного металла меньших по размеру, чем при обычной технологии, также позитивно сказывается на удалении неметаллических включений. Кроме того, наличие неглубокой металлической ванны, которая имеет место при радиальном течении электродного металла, способствует всплыванию включений на границу "шлак- металл".

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана гидродинамическая модель переплава электрода при ЭШП в поле действия центробежных сил, позволяющая для конкретных условий переплава рассчитать скорость вращения, которая обеспечивает радиальное течение электродного металла.

2. Получено кинетическое соотношение, позволяющее в любой момент времени определить радиус конической части электрода (остаточной конусности). О использовании кинетического соотношения дана оценка скорости вращения электрода при заданных параметрах процесса, при которых оплавленный торец расходуемого электрода становится плоским.

3. Рассмотрено движение капли металла в шлаке при наложении на переплавляемый электрод центробежных сил. Получено соотношение, которое позволяет определить положение капли в горизонтальной плоскости, а также выражение, позволяющее рассчитать место доставки электродного металла в ванну кристаллизатора.

4. На основании полученных зависимостей составлена программа расчета на персональном компьютере, позволяющая при введении конкретных данных для электрошлакового переплава получить оптимальные режимы скоростей вращения электродов с учетом всех выше рассмотренных особенностей.

5. Разработана методика физического моделирования процесса плавления электрода в поле действия центробежных сил и о ее применении исследованы гидродинамика, каплеобразование, движение капель в шлаковой ванне при электрошлаковой плавке. Проверена сходимость расчетных данных математических моделей с данными эксперимента.

6. Разработана технология получения отливок переменного сечения из электрода постоянного сечения, не требующая изменения количества рабочего флюса в процессе переплава и позволяющая вести плавку при меньшем на 10-15% количестве флюса, необходимого на плавку, а также повысить без увеличения подводимой мощности скорость переплава на 20-25% при использовании традиционных флюсов.

7. Предложен способ управления скоростью плавления расходоемого электрода изменением скорости вращения в зависимости от изменения сопротивления на электроде и в шлаке. Разработан автоматический регулятор задания необходимой скорости.

8. Проведены опытные плавки по предлагаемой технологии получения отливок переменной формы, исследовано качество металла и сопоставлено с результатами обычных плавкок.

9. Результаты работы расширяют представление о сущности ЭШП о вращении заготовки. Они могут быть использованы для получения фасонных отливок высокого качества с минимальными затратами, на печах любого типа без существенного изменения действующих электрошлаковых установок.

*Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:*

1. Чуманов В.И., Белозеров В.П., Чуманов И.В. Математическая модель переплава вращающегося электрода //Тезисы докладов Всесоюзного совещания "Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии, Новокузнецк, 1991, с.138-139.
2. Чуманов В.И., Белозеров В.П., Чуманов И.В. Математическая модель переплава вращающегося электрода //Известия вузов. Черная металлургия, 1991, №12, с. 74-75.
3. Чуманов В.И., Белозеров В.П., Чуманов И.В. Кинетическая модель переплава вращающегося электрода //Известия вузов. Черная металлургия, 1994, №8, с. 57-60.
4. Чуманов В.И., Чуманов И.В. Влияние условия периферийного капельного переноса при ЭШП на структуру и свойства стали // Совершенствование маш. материалов, конструкций машин и методов обработки деталей: Об. научн. тр. -Челябинск: ЧГТУ, 1996, с. 3-II.
5. Чуманов И.В., Родион В.Е. Влияние технологических параметров ЭШП на скорость переплава расходных электродов //Тезисы докладов IX Международной научной конференции "Современные проблемы специальной электрометаллургии", Челябинск, 1995, с. 67-68.
6. Чуманов И.В., Чуманов В.И. Расчет движения капли электродного металла в шлаке //Известия вузов. Черная металлургия, 1995, №12, с. 22-23.
7. Чуманов В.И., Родион В.Е., Чуманов И.В. Электрошлаковая технология получения отливок переменного сечения //Тезисы докладов Международной научно-практической конференции "Новые ресурсосберегающие технологии и материалы", Челябинск, 1996, с. 32.
8. Чуманов В.И., Белозеров В.П., Чуманов И.В. Патент России № 2048553 "Способ получения слитка переменного сечения электрошлаковым переплавом".

УОП Издательства. 454080, г.Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.  
Тираж, 100 экз.