

*На правах рукописи*



ПЯТЫГИН Дмитрий Александрович

**ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛА  
ПРИ ЭШП НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ С ВРАЩЕНИЕМ  
РАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДА**

Специальность 05.16.02 – “Металлургия черных, цветных и редких металлов”

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
2006

Работа выполнена на кафедре общей металлургии Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук,  
доцент  
Чуманов Илья Валерьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор  
Вдовин Константин Николаевич

кандидат технических наук,  
доцент  
Грибанов Виктор Павлович

Ведущее предприятие – ОАО “ЗМЗ” (Златоустовский  
металлургический завод)

Защита состоится «6» декабря 2006 г., в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.01 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76., корпус 1, ауд. 911.

Факс: 8(351)267-91-23, E-mail: dap@zb-susu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «3» ноября 2006 года.

**Ученый секретарь диссертационного совета**  
доктор физико-математических наук, профессор



Мирзаев Д.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В настоящее время во всём мире уделяется внимание снижению себестоимости выпускаемой продукции при увеличении её качества и наращивании объёмов производства. Наиболее перспективными способами повышения качества металла и улучшения их физико-механических свойств являются переплавные процессы, в частности электрошлаковый переплав (ЭШП). Ему подвергаются почти все основные классы сталей, в том числе и ответственного назначения. ЭШП предполагает активное управление процессом в направлении получения металла с минимальной концентрацией неметаллических включений определенной морфологии и дисперсности, повышения служебных свойств металла и, как следствие, повышения физико-механических свойств металлопродукции. Однако низкая энергетическая эффективность процесса, высокая стоимость электроэнергии (порядка  $\approx 30\%$  от себестоимости тонны электрошлакового металла приходится на электроэнергию) и используемых при переплаве флюсов не позволяет сделать электрошлаковый металл дешевым.

Снизить расход потребляемой электроэнергии при ЭШП возможно за счет ведения переплава на постоянном токе. Однако постоянный ток при ЭШП не нашел массового применения. Основными недостатками ЭШП на постоянном токе называют: высокую стоимость выпрямительного оборудования, отсутствие стабильности электрических параметров на протяжении всего переплава, относительно высокую загрязненность выплавленного металла неметаллическими включениями и появление кристаллизационных дефектов (пятнистая ликвация, изменение угла наклона столбчатых кристаллов в продольном сечении слитка, послойная кристаллизация) возникающих вследствие неконтролируемого движения шлаковой и жидкой металлической ванны.

В связи с выше изложенным, становится понятным **актуальность** проведенной работы, **целью** которой является изучение воздействия постоянного тока и центробежных сил при электрошлаковом переплаве расходуемых электродов на процессы плавления, транспортировки, кристаллизации металла и выявление параметров, позволяющих повысить технико-экономические показатели переплава и качество получаемого металла.

Работа выполнялась при финансовой поддержке: №01.20.0308443, тема «Исследование влияния скорости вращения расходуемых электродов на массовую скорость их плавления с целью создания системы автоматического бесступенчатого регулирования скоростью переплава при переплавных процессах», 2002 г.; МД-101.2003.08, тема «Изучение влияния центробежных сил при электрошлаковом переплаве на постоянном токе на макро- микроструктуру и механические свойства литого и деформированного металла», 2003 г.; грант для молодых учёных Челябинской области, тема «Разработка технологии электрошлакового переплава на постоянном источнике тока и исследование качества металла» в 2003 г.; № 02.444.11.7148, тема «Изучение процесса управления макро- и микроструктурой при получении новых материалов методом ЭШП на постоянном токе в поле действия внешнего воздействия», 2005 г.

Данная работа является продолжением работ Вачугова Г.А. и Чуманова В.И. Большое влияние на постановку проблемы и помощь в ее решении оказали работы авторов Истомина С.А. и Миронова Ю.В.

### **Цель работы**

Изучение воздействия постоянного тока и центробежных сил при электрошлаковом переплаве расходуемых электродов на процессы плавления, кристаллизации металла и выявление параметров, позволяющих повысить технико-экономические показатели переплава и качество получаемого металла.

### **Задачи работы**

В ходе выполнения работы необходимо решить следующие задачи.

1. Обосновать применение постоянного тока при ЭШП.
2. Решить задачи количественной и качественной оценки электромагнитных сил при ЭШП на постоянном токе, для конкретных технологических параметров.
3. Комплексно изучить изменения характера плавления, кристаллизации металла при электрошлаковом переплаве на постоянном токе с внешним воздействием (вращение расходуемого электрода вокруг своей оси).
4. Изучить качество экспериментального металла в литом и деформированном состоянии полученного ЭШП на постоянном токе с вращением расходуемого электрода.

### **Научная новизна**

Впервые осуществлен комплекс теоретических и экспериментальных исследований электрошлакового переплава на постоянном токе с вращением расходуемого электрода вокруг собственной оси – процессов плавления, транспортировки и кристаллизации металла, энергетической эффективности процесса и качества переплавленного металла.

1. Показано, что при электрошлаковом переплаве на постоянном токе без вращения электрода тепловой центр смещен относительно оси кристаллизатора вследствие действия на жидкий металл электромагнитных сил. Аналитическая оценка пондеромоторных сил, действующих на каплю электродного металла, ванну жидкого металла и шлака, подтвердила их негативное влияние на структуру формируемого слитка.

2. Подтверждено, что изменение скорости вращения расходуемого электрода при ЭШП на постоянном токе влияет на процессы плавления и кристаллизации металла так же, как и при ЭШП на переменном токе.

3. Показано позитивное влияние рассредоточения места падения капель электродного металла в жидкую металлическую ванну на ее форму и глубину, и, как следствие, на направление роста кристаллов. По мере приближения места падения капель ближе к стенкам кристаллизатора фронт кристаллизации становится более плоским, что обеспечивает рост кристаллов в осевом направлении. При этом увеличивается плотность слитка, уменьшается расстояние между осями I-го и II-го порядка.

4. Установлено, что при ЭШП на постоянном токе с вращением электрода рафинирующая способность процесса увеличивается, поскольку плёнка на торце электрода более равномерна, а толщина её меньше. Кроме того, в случае вра-

щения электрода отрывающиеся под действием центробежных сил капли металла имеют меньший размер и проходят более длинный путь в шлаке, что также способствует более полному удалению включений в шлак.

### **Практическая ценность**

Сформулированные положения о влиянии электромагнитных и центробежных сил, возникающих при ЭШП на постоянном токе с вращением расходуемого электрода, и предложенные на этой основе технологические решения позволили:

– предложить способ электрошлаковой плавки с вращением расходуемых электродов, в результате чего удаётся:

- экономить до 15% рабочего флюса,
- снизить расход электроэнергии на 38%,
- повысить производительность на 26% без увеличения подводимой мощности;

– предложить способ компенсации влияния электромагнитных сил на жидкую металлическую ванну;

– опытным путем в зависимости от подводимой мощности определить величину центробежных сил способных стабилизировать ванну жидкого металла;

– предложить рекомендации по определению оптимальной скорости вращения расходуемого электрода с учётом технологических параметров;

– повысить рафинирующую способность ЭШП на постоянном токе и стабилизировать металлическую ванну относительно оси слитка.

### **На защиту выносятся:**

1) качественная и количественная оценка электромагнитных сил в зоне плавления электрода;

2) технологические особенности электрошлакового переплава на постоянном токе с вращением расходуемого электрода вокруг своей оси;

3) результаты комплексного исследования качества опытного металла, полученного ЭШП на постоянном токе с вращением расходуемого электрода.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы доложены и обсуждены: на Международной конференции «От булата до современных композиционных материалов», Курган, КГУ, 1999 г.; на XI-й и XII-й Международных конференциях «Современные проблемы электрометаллургии стали» (Челябинск, 2001 г. и 2004 г.); на Международной научно-практической конференции «Автоматизированный печной агрегат – основа энергосберегающих технологий металлургии XXI века» (Москва, МИСиС, 2002 г.); на IV Международной научно-технической конференции, посвящённой 120-летию академика И.П. Бардина «Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства» (Череповец, ЧГУ, 2003 г.); на Международной научной конференции «Современные проблемы теории и практики производства качественной стали» (Мариуполь, ПДГУ, 2004 г.)

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 24 печатных работы.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, содержит 137 страниц машинописного текста, 35 рисунков, список литературы 72 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Обоснована актуальность выбора темы диссертации. Показано, что разработка и внедрение новых технологий должны базироваться на активном управлении процессом ЭШП в направлении повышения тепловой эффективности, снижение расхода электроэнергии и улучшения качества получаемого металла.

### **СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Выполнен литературный обзор, в котором проанализированы теоретические и экспериментальные работы различных авторов, связанные с вопросом применения постоянного тока при электрошлаковом переплаве. На основе анализа литературных источников показано, что:

1. В настоящее время достаточно остро стоит вопрос использования недогруженных мощностей вакуумно-дуговых печей (ВДП), так как задачи, которые выполняли данные установки, успешно решаются методами внепечной обработки стали. Наиболее рационально представляется не демонтировать их, а реконструировать в электрошлаковые установки постоянного тока. Это позволит решить проблему дорогостоящего выпрямительного оборудования для печей ЭШП на постоянном токе. При реконструкции можно оставить вакуум-камеру, что позволит вести электрошлаковый процесс в контролируемой атмосфере или при низком вакууме.

2. При использовании постоянного тока в цепи электрошлаковой установки отсутствует реактивное сопротивление и связанные с этим потери энергии. Устраняется необходимость в дополнительном управлении переплавом для компенсации реактанца по мере расплавления электрода, т.к. укорочение электрода по мере его расплавления связано лишь с уменьшением активного сопротивления короткой сети.

3. При ЭШП на постоянном токе происходит электролиз шлака, вследствие этого на катоде и аноде наблюдаются приэлектродные падения потенциалов, определяемые напряжением разложения электролита и поляризационными перенапряжениями. Вследствие электролиза компоненты флюса диссоциируют на положительно заряженные катионы и отрицательно заряженные анионы. С увеличением количества крупных сложных анионов уменьшается подвижность катионов, а сопротивление шлаковой ванны и количество выделяемого током тепла увеличивается, что позволяет ожидать изменение тепловой эффективности, рафинирующей способности процесса и возможности восстановления легирующих элементов.

4. Электрохимические процессы вызывают появление катодных и анодных поляризационных перенапряжений, которые зависят от плотностей тока на электроде и поверхности жидкой металлической ванны. Диффузионные торможения в шлаке приводят к повышению приэлектродного сопротивления, что приводит к перераспределению в шлаковой ванне джоулевых источников теп-

лоты таким образом, что основное тепло выделяется в тонком слое у поверхности электрода, тем самым интенсифицируя процесс плавления.

5. В зависимости от полярности тока существует возможность снижения концентрации кислорода (обратная полярность) или водорода (прямая полярность). Однако отмечается, что вне зависимости от полярности тока рафинирующая способность процесса по неметаллическим включениям снижается.

6. В условиях электрошлакового переплава на постоянном токе возникающие магнитные поля, поляризационные эффекты в шлаковой ванне, внеосевой тепло- и массоперенос приводят к неконтролируемому, индивидуальному, интенсивному вращению шлаковой и жидкой металлической ванны в течение всего переплава. Данное обстоятельство приводит к значительному искажению структуры формируемого слитка (изменение угла наклона кристаллов в продольном сечении слитка), тем самым, исключая одно из основных достоинств электрошлакового металла – однородную структуру.

7. Стабилизировать жидкую шлаковую и металлическую ванну относительно оси слитка и повысить рафинирующую способность процесса возможно за счет применения внешнего воздействия на них. Среди рассмотренных методов, на наш взгляд наиболее перспективным является способ электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода вокруг своей оси.

В связи с выше изложенным, ставятся следующие основные задачи исследования.

1. Теоретически и экспериментально изучить поведение жидкой металлической ванны, а именно фронта кристаллизации, при электрошлаковом процессе на постоянном токе.

2. Разработать аналитические зависимости, учитывающие влияние внешнего воздействия на положение фронта кристаллизации при ЭШП на постоянном токе, обеспечивающего внеосевой тепло- и массоперенос и наилучшие условия рафинирования металла.

3. Разработать схему модернизации полупромышленной установки А-550 для ведения переплава, как на переменном, так и на постоянном токе, с возможностью вращения расходуемого электрода с различной скоростью.

4. Экспериментально исследовать влияние вращения расходуемого электрода на различные характеристики электрошлакового процесса на постоянном токе, в том числе: производительность, расход электроэнергии, стабильность процесса, влияние разогрева электрода на производительность и т.д.

5. Изучить влияние постоянного тока и вращения расходуемого электрода с различной скоростью на качество получаемого металла, как в литом, так и в деформированном состоянии.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДА ПРИ ЭШП НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

При электрошлаковом переплаве на постоянном токе электромагнитные силы действующие на жидкий металл и шлак значительно сказываются на характере плавления электрода и состояния шлаковой и металлической ванн во время процесса.

Эффект воздействия электромагнитных сил связан как с несимметричностью токоподводов, так и с наличием вблизи кристаллизатора несимметрично расположенных ферромагнитных масс, о чем свидетельствует опыт работы печей вакуумно-дугового переплава. При одностороннем подводе тока к поддону и электроду последний оплавляется в большей мере со стороны противоположной подводу тока (рис. 1,а) и как следствие этого смещение центра тепло- и массопереноса. Согласно модели Томмани и Край, ток при ЭШП разделяется на две составляющие: горизонтальную и вертикальную (рис. 1,б).

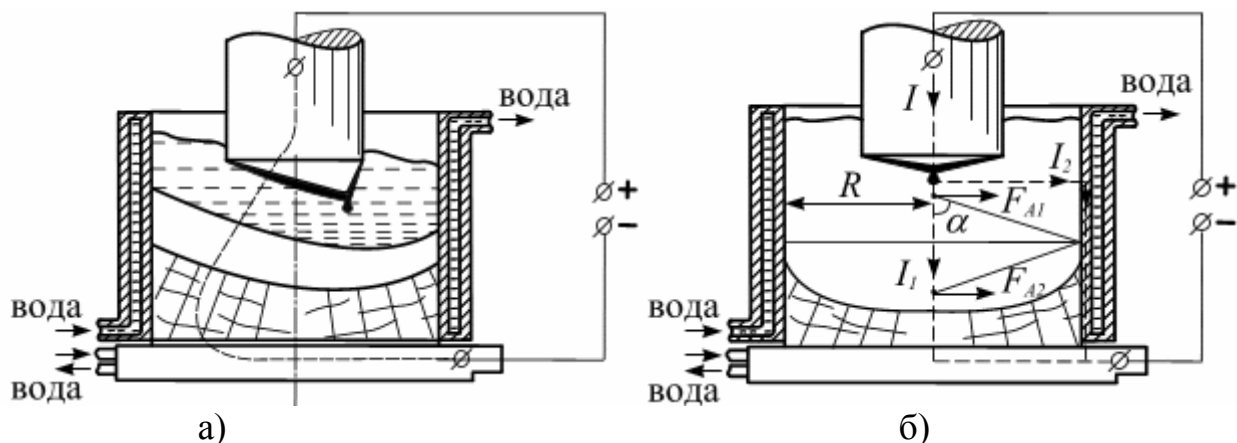


Рис. 1. Схема воздействия электромагнитных сил и распределение тока при ЭШП на постоянном токе

Горизонтальная ветвь тока протекает через шлаковую ванну, замыкается на кристаллизатор и поддон печи. Вертикальная ветвь тока протекает через шлаковую и жидкую металлическую ванну, затем через слиток и замыкается на поддон печи. Между токами действует электромагнитная сила – сила Ампера. Данные токи и электромагнитные силы оказывают значительное влияние на формируемую структуру получаемых слитков. Они вызывают неконтролируемое движение ванны жидкого металла и шлака и, как следствие, появление таких кристаллизационных дефектов как пятнистая ликвация, изменение угла наклона столбчатых кристаллов в продольном сечении слитка. Об этом свидетельствуют экспериментальные плавки с фиксацией жидкой металлической ванны, проведенные на кафедре «Общая металлургия» (рис. 2). Для компенсации действия электромагнитных необходимо произвести их качественную и количественную оценку. В реальной практике электрошлакового процесса обеспечить идеальную геометрию электрода (кривизна, разноутолщенность и т.п.) достаточно сложно, что, в свою очередь, исключает идеальную центровку. Предположим, что на ванну с металлом действует магнитная сила только в том случае когда, ось электрода смещена относительно оси кристаллизатора на некоторую величину  $L$  (рис. 3) и ток с электрода на ванну идет струйкой, а не рассеивается определенным образом как это происходит в действительности. Направление силы Ампера определяется по правилу левой руки, а направление напряженности магнитного поля тока определяется по правилу буравчика (рис. 3,а). Тогда напряженность магнитного поля в произвольной точке на струйке тока определится:



$$H = \frac{Ih}{4\pi r_0 \sqrt{h^2 + r_0^2}}. \quad (1)$$

Сила Ампера рассчитывается по формуле:

$$F_A = BIl \sin \alpha \quad (2)$$

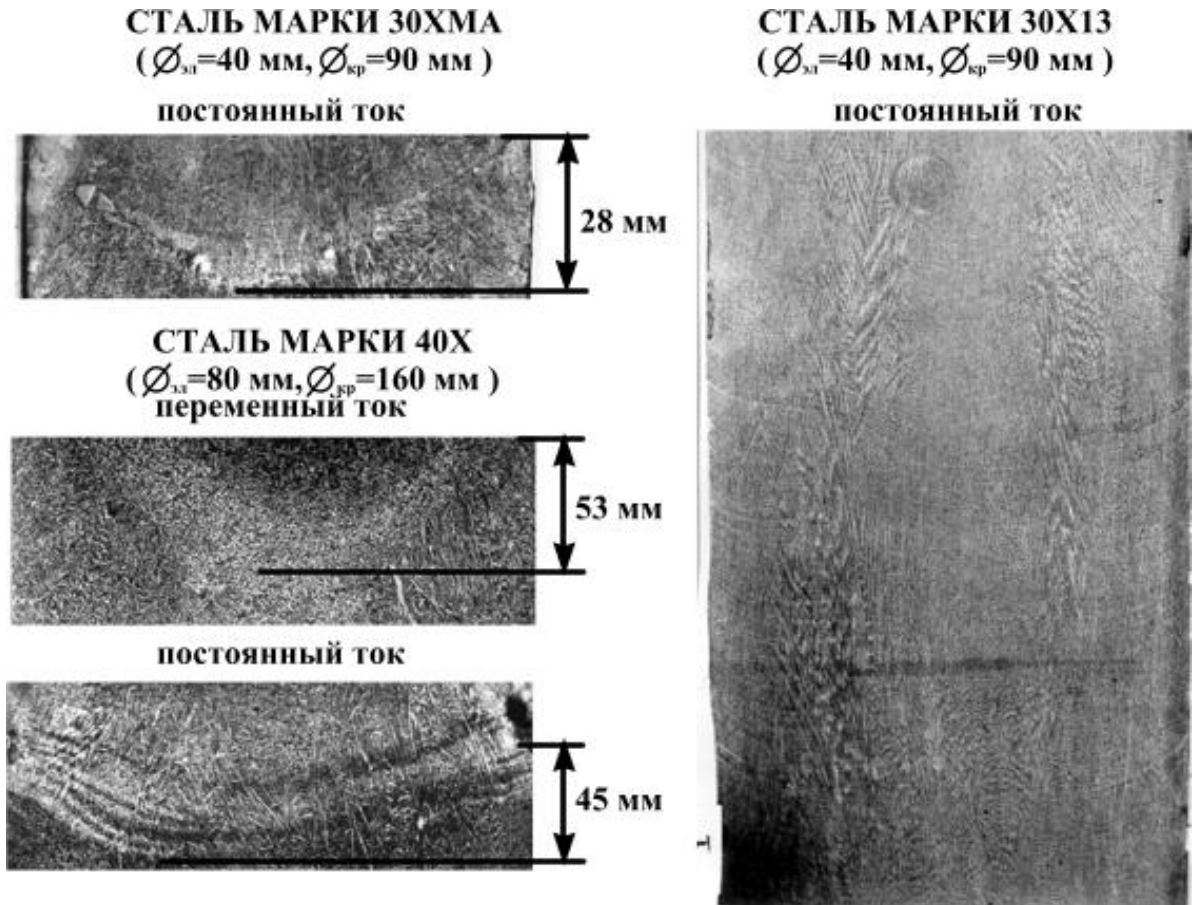


Рис. 2. Форма ванны жидкого металла и направленность кристаллов

Проинтегрировав, получим:

$$I = k \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{\sqrt{r_2^2 - L^2 \sin^2 \varphi - L \cos \varphi}} = \frac{4r_2 k}{(r_2^2 - L^2)} E\left(\frac{L}{r_2}\right). \quad (3)$$

Тогда полная сила Ампера, действующая на всю ванну:

$$F_{\text{Аполн}} = 2\pi AB - A \int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{h^2 + \left(\sqrt{r_2^2 - L^2 \sin^2 \varphi} - L \cos \varphi\right)^2}}{\sqrt{r_2^2 - L^2 \sin^2 \varphi} - L \cos \varphi} d\varphi, \quad (4)$$

где  $A = \frac{I^2 (r_2^2 - L^2) \mu_0 \mu}{16\pi h r_2 E\left(\frac{L}{r_2}\right)}$ ;  $B = \frac{\sqrt{h^2 + r_k^2}}{r_k}$ .

Точка приложения полной силы Ампера определяется из условия:

$$F_{\text{Аполн}} R = \int_0^{2\pi} F_A \cos \varphi d\rho, \quad (5)$$

$$R = \frac{2\pi AB}{F_{\text{Аполл}}} - \frac{A}{F_{\text{Аполл}}} \int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{h^2 + \left(\sqrt{r_2^2 - L^2 \sin^2 \varphi} - L \cos \varphi\right)^2} \cos \varphi}{\sqrt{r_2^2 - L^2 \sin^2 \varphi} - L \cos \varphi} d\varphi. \quad (6)$$

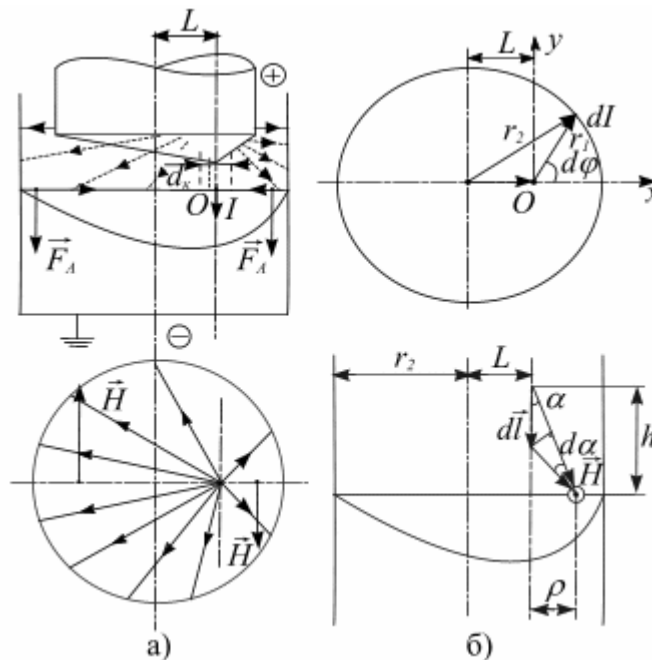


Рис. 3. Модель электрошлакового переплава на постоянном токе  
 а – схема определения напряженности магнитного поля; б – схема действия электромагнитных сил в шлаковой ванне

С помощью расчетов на ПВЭМ была произведена качественная и количественная оценка электродинамической обстановки в ванне жидкого металла (рис. 4) для конкретных параметров переплава.

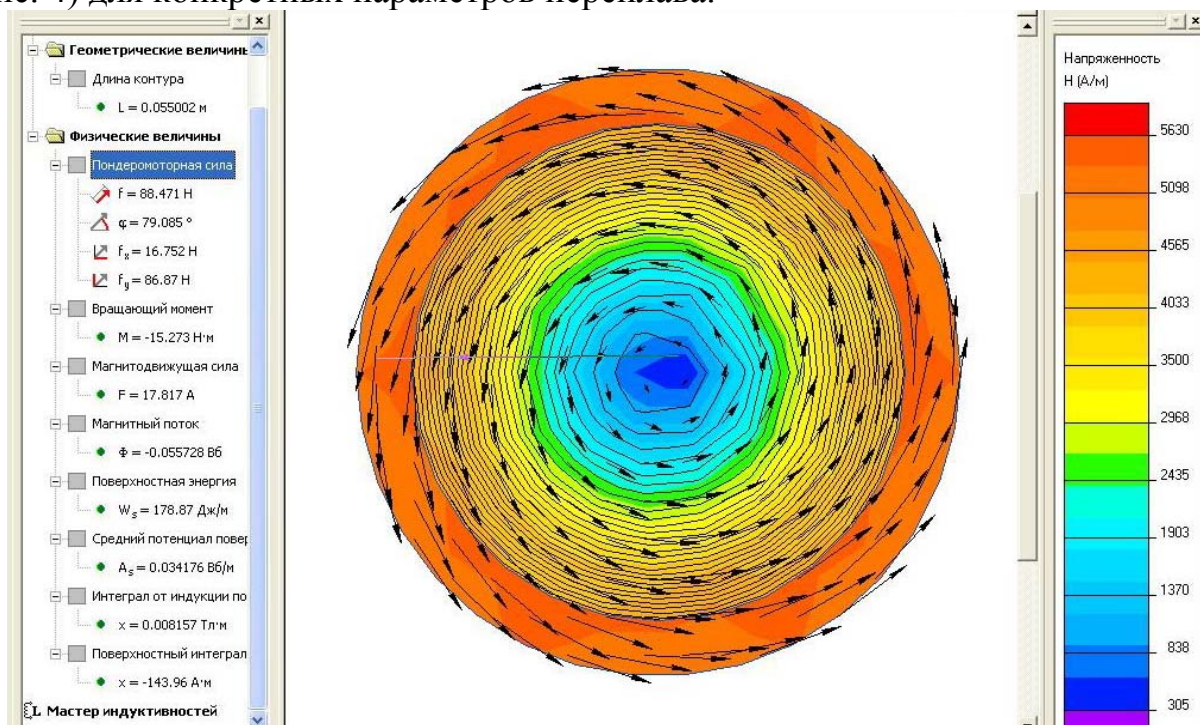


Рис. 4. Количественная и качественная оценка электромагнитных сил в ванне жидкого металла

Для качественной и количественной оценки электромагнитных сил задавали электрические (сила тока, напряжение, полярность) и технологические (геометрические размеры электрода, шлаковой и металлической ванн, материал и геометрия кристаллизатора, марка стали и флюса, магнитная проницаемость) параметры переплава. В ходе проведённых исследований получены значения сил, действующих на ванну жидкого металла: пондеромоторная сила  $f = 88,471$  Н, вращающий момент  $M = 15,273$  Н·м, магнитодвижущая сила  $F = 17,817$  А.

Рациональные условия для получения плоской ванны жидкого металла и максимальных значений производительности и рафинирующей способности процесса, будут достигнуты при обеспечении равномерной толщины плёнки по всей оплаиваемой поверхности, что возможно при наличии плоского оплаиваемого торца. Оценим минимальную скорость вращения электрода, при которой может реализоваться указанное выше условие, т.е. завершение трансформации конической формы торца электрода в плоскую.

Примем, что в произвольный момент времени высота конуса равна  $h$ , а длина его образующей равна  $l$ . Пусть также радиус  $r = R_{эл}$  цилиндрической части остается постоянным.

С уменьшением величины  $h$  изменение кинетической энергии вращения конической части запишется в виде:

$$dE_k = (\pi / 20) \omega^2 R_{эл}^4 \Delta\rho dh, \quad (7)$$

где  $\Delta\rho = \rho_M - \rho_{ш}$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_M$  – плотность жидкого металла, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ш}$  – плотность шлака, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  – угловая скорость вращения электрода, рад/с.

С уменьшением поверхности конуса изменение поверхностной энергии конической части электрода запишется в виде:

$$dE_{п} = \pi R_{эл} \sigma_{мш} dl, \quad (8)$$

где  $\sigma_{мш}$  – удельная поверхностная энергия границы раздела металл–шлак, Дж/м<sup>2</sup>.

Положим, что изменение поверхностной энергии равно изменению кинетической энергии

$$(1 / 20) \omega^2 R_{эл}^3 \Delta\rho (h_0 - h) = \sigma_{мш} (l_0 - l), \quad (9)$$

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

Если величина скорости  $\omega$  такова, что торец расходуемого электрода при вращении становится плоским, то  $h = 0$  и  $l = R_{эл}$ . Тогда, с учётом того, что  $l_0 = (h_0^2 + R_{эл}^2)^{1/2}$ , из соотношения (9) получим:

$$\omega^2 = \frac{20 \sigma_{мш} [(h_0^2 + R_{эл}^2)^{1/2} - R_{эл}]}{R_{эл}^3 \Delta\rho h_0}. \quad (10)$$

Оценим величину  $h_0$  из равенства силы поверхностного натяжения, действующей на контур круга радиуса  $R_{эл}$ , и веса слоя (капли) жидкого металла на поверхности конуса при  $\omega = 0$ . Имеем

$$\left(\frac{1}{3}\right)\pi R_{\text{эл}}^2 h_0 g D \rho \approx 2 \pi R_{\text{эл}} \sigma_{\text{мш}} , \quad (11)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Выражая  $h_0$ , из соотношения (11) и подставляя (10) получим

$$\omega^2 = \frac{10 g [((36 \sigma_{\text{мш}}^2 / D \rho^2 g^2 R_{\text{эл}}^2) + R_{\text{эл}}^2)^{1/2} - R_{\text{эл}}]}{3 R_{\text{эл}}^2} . \quad (12)$$

1. Осуществлена количественная и качественная оценка электромагнитных сил, действующих на ванну жидкого металла и шлака при ЭШП на постоянном токе.

2. Произведен расчет скорости вращения расходуемого электрода вокруг своей оси на основе оценки направления электромагнитного поля и значения пондеромоторных сил. Вращение электрода следует вести в направлении, обратном направлению магнитного поля.

3. Основываясь на процессе изменения формы торца расходуемого электрода и производительности процесса, сделан расчёт рациональной скорости вращения электрода при которой обеспечивается радиальное течение жидкого металла с оплаиваемой поверхности, наилучшие условия рафинирования и максимальная производительность при заданных технологических параметрах.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭШП НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ И КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА

С целью проверки полученных аналитических выражений, позволяющих расчетным путем определить оптимальную скорость вращения расходуемого электрода, были проведены экспериментальные плавки на полупромышленной печи А-550. Переплаву подвергались электроды из стали марки 40Х (Ø80 мм), 30Х13 и 30ХМА (Ø40 мм). Переплав вели на переменном и на постоянном токе обратной полярности, без вращения и с вращением электрода с различной скоростью. Технологические параметры переплава представлены в табл. 1.

Таблица 1

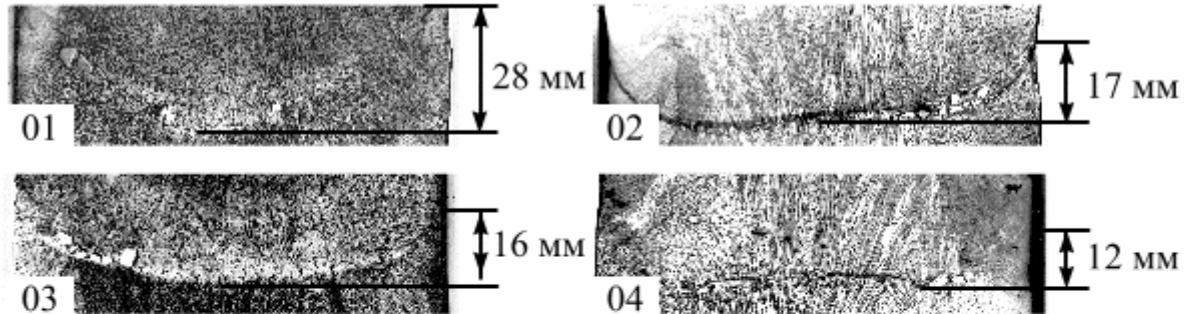
Технологические параметры опытных плавов

№ плавки	Марка стали	Род тока	Кол-во оборотов, об/мин	Диаметр кристаллизатора, мм	Диаметр электрода, мм
1	2	3	4	5	6
01	30ХМА	Пост.	0	90	40
02	30ХМА	Пост.	60	90	40
03	30ХМА	Пост.	90	90	40
04	30ХМА	Пост.	120	90	40
05	40Х	Перем.	0	160	80
06	40Х	Перем.	60	160	80
07	40Х	Пост.	0	160	80
08	40Х	Пост.	70	160	80
10	30Х13	Пост.	0	90	40

1	2	3	4	5	6
11	30X13	Пост.	90	90	40
12	30X13	Пост.	120	90	40
13	30ХМА	Перем.	0	90	40
14	30ХМА	Перем.	120	90	40
15	30ХМА	Пост.	0	90	40
16	30ХМА	Пост.	60	90	40
17	30ХМА	Пост.	90	90	40
18	30ХМА	Пост.	120	90	40

Плавки с фиксированием жидкой металлической ванны (рис. 5) показали, что при ЭШП на постоянном токе глубина жидкой металлической ванны уменьшается (53 мм – плавка № 05 против 45 мм – плавка №07 без вращения расходуемого электрода и 44 мм – плавка №06 против 34 мм – плавка № 08 при вращении расходуемого электрода со скоростью 60 об/мин), но при этом ось ванны смещена относительно оси слитка. Проведенные опытные плавки показали, что рассчитанная оптимальная скорость вращения 90 об/мин для электрода  $\varnothing 40$  мм, позволяет стабилизировать ванну жидкого металла относительно оси слитка и получить плоскую форму, и как следствие осевую направленность кристаллов. Плавка № 04 показывает, что превышение скорости вращения выше 90 об/мин приводит к тому, что в центральной части образуется выпуклость.

Сталь марки 30ХМА ( $\varnothing_{сл}=40$  мм,  $\varnothing_{кр}=90$  мм)



Сталь марки 40Х ( $\varnothing_{сл}=80$  мм,  $\varnothing_{кр}=160$  мм)

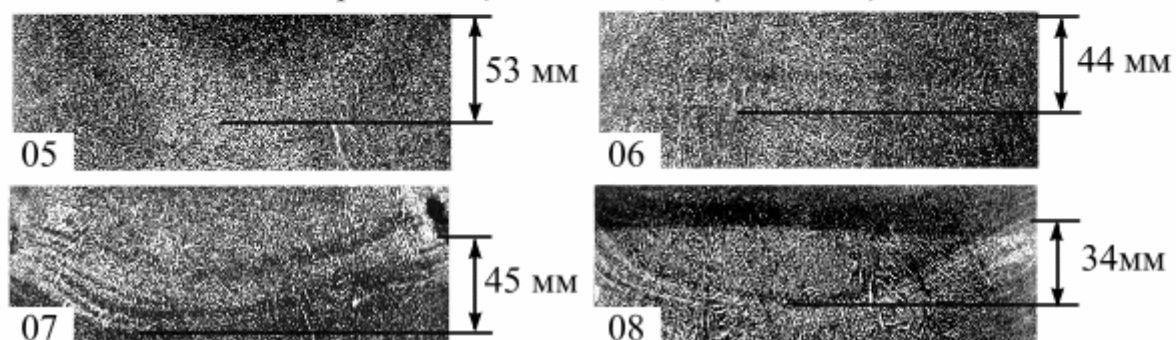


Рис. 5 Форма жидкой металлической ванны в зависимости от скорости вращения расходуемого электрода

Для более четкого выявления влияния рода тока и технологии вращения расходуемого электрода на технологические параметры переплава (расход электроэнергии, производительность) и качество полученного металла (кри-

сталлическое строение, содержание неметаллических включений) проведены сравнительные плавки №10-18.

Исследование технологических параметров зафиксированных при проведении опытных плавов и свойств выплавленного металла показало следующее.

1. Формы торцов электродов свидетельствуют о том, что при увеличении скорости вращения торец электрода приобретает плоскую форму, что обеспечивает преимущественно радиальное течение металла и, как следствие, наименьшую толщину пленки жидкого металла в центре переплавляемого электрода. При увеличении скорости вращения электрода выше оптимальной ( $\omega=90$  об/мин), на торце электрода образуется лунка.

2. Использование постоянного тока при переплаве стали марки 30ХМА-Ш приводит к увеличению массовой скорости переплава на  $\approx 26\%$  (8,43 кг/ч плавка № 13 против 11,42 кг/ч плавка № 15). В случае использования вращения расходуемого электрода со скоростью  $\omega=120$  об/мин ещё на  $\approx 22\%$  (11,24 кг/ч плавка № 15 против 14,40 кг/ч плавка № 18). Данные по удельному расходу электроэнергии свидетельствуют, что применение постоянного тока уменьшает расход электроэнергии на  $\approx 3\%$  (1680 кВт·ч/кг плавка № 13 против 1638,65 кВт·ч/кг плавка № 15), а в случае использования вращения расходуемого электрода со скоростью  $\omega=120$  об/мин ещё на  $\approx 51\%$  (1638,65 кВт·ч/кг плавка № 15 против 803,71 кВт·ч/кг плавка № 18).

3. Исследование макроструктуры опытных слитков показало, что при применении вращения расходуемого электрода зона столбчатых кристаллов имеет очень тонкое и плотное строение кристаллов почти вертикальной направленности. Это подтверждает замер расстояния между осями I и II-го порядка. Полученные данные свидетельствуют, что при применении постоянного тока расстояние между осями I-го порядка резко увеличивается к  $\frac{1}{2}$  радиуса слитка, а затем резко снижается к центру слитка. При применении вращения расходуемого электрода расстояние между осями выравнивается по сечению слитка (плавка №10  $\Delta l=0,119$  мм, плавка №11  $\Delta l=0,055$  мм, плавка №12  $\Delta l=0,039$  мм, где  $\Delta l$  – изменение расстояния между осями), а так же происходит уменьшение расстояния между осями (плавка №10  $l=0,234$  мм, плавка №11  $l=0,131$  мм, плавка №12  $l=0,147$  мм). Аналогичные результаты получены и при оценке расстояния между осями II-го порядка, расстояние между осями выравнивается по сечению слитка – плавка №10  $\Delta l=0,085$  мм, плавка №11  $\Delta l=0,078$  мм, плавка №12  $\Delta l=0,092$  мм, расстояния между осями – плавка №10  $l=0,167$  мм, плавка №11  $l=0,180$  мм, плавка №12  $l=0,192$  мм). Скорость вращения, обеспечивающая оптимальные технологические показатели (скорость наплавления, расход эл/эн) и качество макро- и микроструктуры, составила 90 об/мин.

4. Изучение распределения элементов в слитке, полученном методом ЭШП на постоянном токе с вращением электрода, показало, что применение опытной технологии приводит к некоторому увеличению угара легирующих элементов. Содержание марганца и кремния уменьшается во всех плавках, причем с увеличением скорости вращения электрода до 120 об/мин угар марганца и кремния максимальный. Это можно объяснить большей реакционной поверхностью.

Значительных изменений в содержании серы не отмечено. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что начальное содержание серы достаточно низкое в электродном металле.

5. Исследование изменения содержания неметаллических включений в зависимости от технологии электрошлакового переплава показало (рис. 6), что применение постоянного тока содержание неметаллических включений увеличивает несущественно. Ожидаемое увеличение содержания неметаллических включений при применении постоянного тока, не произошло, по-видимому, в результате малых размеров электрошлаковой установки. Применение вращения расходуемого электрода позволяет снижать содержание неметаллических включений и более равномерно распределять их по сечению слитка. Рафинирующая способность процесса с вращением расходуемого электрода увеличивается, поскольку плёнка на торце электрода более равномерна (плоский торец электрода), а толщина её меньше, в том числе в осевой области переплавляемого электрода, где загрязнённость неметаллическими включениями максимальна. Кроме того, в случае вращения электрода, отрывающиеся под действием центробежных сил капли металла имеют меньший размер и проходят более длинный путь в шлаке, что также способствует более полному удалению включений в шлак. И чем больше скорость вращения, тем меньше содержание неметаллических включений, причем почти полностью удаляются включения крупного размера. Однако следует отметить, что при превышении скорости вращения выше оптимальной достаточно резко возрастает содержание неметаллических включений мелкого размера.

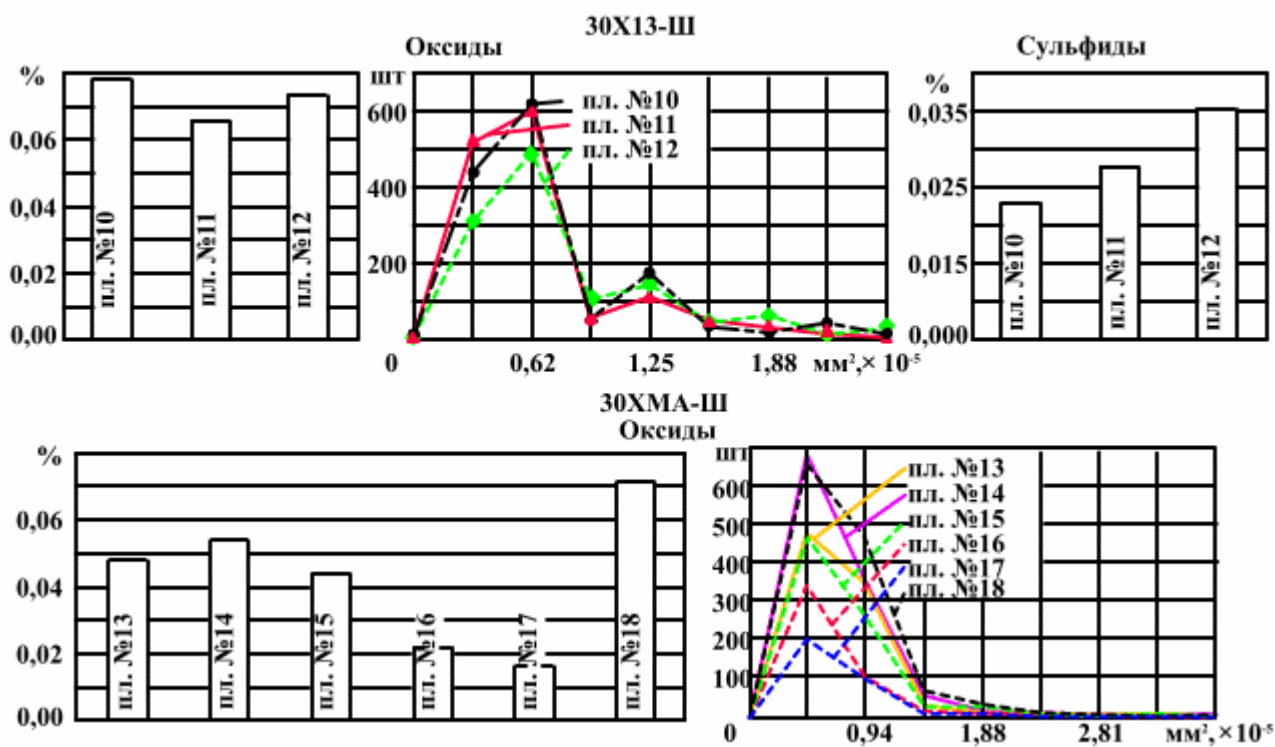


Рис. 6. Содержание неметаллических включений в зависимости от схемы переплава

6. Анализ механических свойств показал, что металл, выплавленный по всем схемам переплава, удовлетворяет требованиям ГОСТа. Следует отметить,

что с увеличением скорости вращения электрода присутствует увеличение пластических свойств и снижение прочностных свойств металла.

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Отказ от использования печей ВДП связан, во-первых, с переходом на новые технологии производства и обработки стали и появлением возможности получения аналогичных материалов по качеству, чистоте и механическим свойствам методами ковшевой металлургии, которые при том же уровне качества позволяют получать металл с меньшей себестоимостью. Во-вторых, сокращение объемов производства высококачественных сталей и сплавов обусловлено объективными условиями современного отечественного машиностроения. Металлургические предприятия по сути вынуждены поддерживать на своем балансе оборудование, не используемое в производственном процессе, но требующее определенных затрат на содержание. В дальнейшем, даже при возникновении потребности в таких металлургических процессах, придется затратить существенные суммы на расконсервацию данного оборудования и приведение его в работоспособное состояние. Однако такой вариант развития событий маловероятен. Скорее всего, такие производственные участки будут подлежать демонтажу и ликвидации, мероприятия также весьма затратные.

Таким образом, целесообразным был бы вариант реконструкции подобного производства, обеспечивающий сохранение дорогостоящего оборудования и имеющихся производственных площадей. Так, печи ВДП, располагающиеся в Электросталеплавильном цехе № 3 (ЭСЦ № 3) ОАО «ЗМЗ» и в полной мере не задействованные в течение ряда лет, возможно, переоборудовать в печи электрошлакового переплава (ЭШП), работающие на постоянном токе, сохранив при этом дорогостоящее оборудование и реализовав достоинства применения постоянного тока. Данное мероприятие потребует за собой дополнительные расходы по демонтажу части оборудования (табл. 2) и установке нового (табл. 3). Расчеты приведены на 01.01.06.

Таблица 2

Затраты на демонтаж устаревшего оборудования, тыс. руб.

Наименование конструктивного узла	Первоначальная стоимость	Остаточная стоимость	Затраты на демонтаж	Стоимость металлоконструкций	Капитальные вложения
Поддон печи ВДП	160	96	16	–	112
Система гляделок	320	192	32	–	224
АСУ	1280	640	384	–	1024
Маслостанция	480	256	64	32	288
Итого	2240	1184	496	32	1648

На основе проведенных расчетов, общая величина капитальных вложений составляет 3 млн. 908 тыс. руб.

Перевод печей ВДП в печи ЭШП на постоянном токе, с использованием технологии вращения расходуемого электрода может позволить задействовать



простаивающее оборудование. Проведенные исследования и опытные плавки на лабораторном оборудовании показали достаточно высокую экономическую эффективность предлагаемой технологии. Результаты расчетов технико-экономических показателей предлагаемой технологии в сравнении с существующими вариантами приведены в табл. 4.

Таблица 3

Затраты на приобретение и монтаж нового оборудования тыс. руб.

Наименование оборудования	Общая стоимость
Сферический поддон	240
Фильтр ЭГА-1-30-9-6-3	83,2
Система аргопровода	64
АСУ	1600
Защита пульта управления	16
Итого	2259,2

При стоимости 1000 кВт/час – 1062 руб. затраты на электроэнергию при выплавке 1 т стали составят на установке ЭШП стандартной комплектации 1784,16 руб., а при выплавке на установке ВДП – 1278,65 руб.

При использовании вращения электрода затраты на электроэнергию могут быть снижены до уровня 1042 кВт/т или соответственно 1106,60 руб./т. Таким образом, при производстве 1 т стали с использованием вращающегося электрода на установках ВДП, переоборудованных в установки ЭШП, работающими на постоянном токе, экономия по электроэнергии составит 677,56,88 руб. С учетом всего объема производства за год (приблизительно 2 тыс. т.) годовая экономия по потреблению электроэнергии составит более 1300 тыс. руб.

Таблица 4

Технико-экономические показатели производства стали марки 30ХГСА

Параметр	Металл ЭШП	Металл ВДП	Предлагаемая технология
Вес слитка, кг	2170	2710	2170
Форма кристаллизатора	Квадрат, 390	Круг, 510	Квадрат, 390
Продолжительность плавки, мин	450	590	324
Расход электроэнергии на плавку, кВт/час	3646	3263	2260
Расход электроэнергии на 1 т, кВт/час	1680	1204	1042
Скорость наплавления, кг/мин	4,8	5,06	6,7

Кроме того, повышение скорости переплава позволяет увеличить объемы производства стали на 28 %, что составит величину порядка 760 т в год.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. Изучен процесс ЭШП на постоянном токе, дано научное обоснование и экспериментально подтверждено влияние пондеромоторных сил на ванну жидкого металла и, как следствие, положение и форму фронта кристаллизации. По-

казано, что при ЭШП на постоянном токе снижается расход электроэнергии при одновременном увеличении производительности процесса.

2. Аналитическая оценка пондеромоторных сил действующих на каплю электродного металла, ванну жидкого металла и шлака подтвердила негативное влияние на структуру формируемого слитка (пятнистая ликвация, изменение угла наклона столбчатых кристаллов в продольном сечении слитка, послойная кристаллизация) и позволила сформулировать гипотезу о возможности управлением формой фронта кристаллизации посредством внешнего воздействия (вращение расходуемого электрода).

3. Установлено смещение центра тяжести ванны жидкого металла, относительно оси кристаллизатора, в зависимости от скорости вращения расходуемого электрода для конкретных технологических параметров переплава. На основании полученной зависимости составлена программа для качественной и количественной оценки пондеромоторных сил, действующих на электродный металл и ванну жидкого металла, позволяющая получить рациональные режимы скорости вращения расходуемого электрода для стабилизации формы и положения фронта ванны жидкого металла.

4. Разработана и реализована электрическая схема перевода полупромышленной электрошлаковой установки А-550 с переменного на постоянный ток.

5. Экспериментальные исследования электрошлакового переплава на постоянном токе с внешним воздействием подтвердили позитивное влияние расщепления места падения капель электродного металла в жидкую металлическую ванну на форму ванны, направление роста кристаллов, расстояние осей дендритов, процессы рафинирования при кристаллизации от растворимых и взвешенных примесей.

6. Сформулированные положения об электрошлаковом переплаве на постоянном токе с вращением расходуемого электрода позволили рекомендовать технологические параметры электрошлаковой плавки с вращением расходуемых электродов, в результате чего удаётся сэкономить до 15% рабочего флюса, снизить расход электроэнергии на 38%, повысить производительность на 26% без увеличения подводимой мощности.

7. Исследовано качество опытного металла и сопоставлено с обычными плавками. Установлено, что предложенный способ позволяет получать металл по качеству структуры, содержанию неметаллических включений и физико-механических свойств не хуже, чем при действующей технологии.

8. Установлено, что рафинирующую способность процесса с вращением расходуемого электрода увеличивается, поскольку плёнка на торце электрода более равномерна (плоский торец электрода), а толщина её меньше, в том числе в осевой области переплавляемого электрода, где загрязнённость неметаллическими включениями максимальна. Кроме того, в случае вращения электрода, отрывающиеся под действием центробежных сил капли металла имеют меньший размер и проходят более длинный путь в шлаке, что также способствует более полному удалению включений в шлак.

9. В процессе работы был получен патент на способ получения расходуемых электродов для ЭШП (Пат. №2233895 Российская Федерация. Способ по-

лучения расходуемых электродов / Чуманов В.И., Чуманов И.В., Вотинов В.В., Пятыгин Д.А. опубл. 2004, Бюл. №22.) и получена приоритетная справка на способ ЭШП на постоянном токе с вращением расходуемого электрода (Пат РФ Способ электрошлакового переплава. Регистрационный №2006126937, дата поступления 24.07.2006 г.)

### **Основное содержание диссертации опубликовано в работах**

1. Особенности электрошлакового процесса на постоянном токе в поле действия центробежных сил / И.В. Чуманов, Г.П. Вяткин, В.И. Чуманов, Д.А. Пятыгин // От булата до современных материалов: Тез. докл. Международной научно-технической конференции. – Курган: КГУ, 1999. – С. 16–18.

2. Чуманов И.В., Чуманов В.И., Пятыгин Д.А. Исследование поведения неметаллических включений при электрошлаковом переплаве расходуемого электрода в поле действия центробежных сил // Фундаментальные проблемы металлургии: Тез. докл. 2-й межвузовской научно-технической конференции. – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – С. 62–64.

3. Чуманов И.В., Рощин В.Е., Пятыгин Д.А. Особенности электрошлакового процесса на постоянном токе с вращением электрода // Современные проблемы электрометаллургии стали: Материалы XI Международной конференции. – Челябинск: ЮУрГУ, 2001. – С.117–118.

4. Чуманов И.В., Рощин В.Е., Пятыгин Д.А. Повышение эффективности электрошлакового переплава // Электрометаллургия. – 2001. – №12. – С. 30–33.

5. Чуманов И.В., Рощин В.Е., Пятыгин Д.А. Особенности электрошлакового процесса на постоянном токе с вращением электрода // Электрометаллургия. – 2002. – №1. – С. 45–46.

6. Чуманов И.В., Пятыгин Д.А. Изучение влияния центробежных сил на изменение фронта кристаллизации при электрошлаковом переплаве на постоянном токе // Фундаментальные проблемы металлургии: Сб. материалов Третьей межвузовской научно-технической конференции. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. №5(20). – 2003. – С.37–39.

7. Чуманов И.В., Пятыгин Д.А. Макро-, микростроение и механические свойства электрошлакового металла // Физические свойства металлов и сплавов: Сб. тезисов докладов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. 2003. – С. 117–121.

8. Чуманов И.В., Пятыгин Д.А. Особенности электрошлакового переплава на постоянном токе в поле действия центробежных сил // Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства: сб. материалов IV Международной научно-технической конференции, посвящённой 120-летию академика Бардина. – Череповец: ЧГУ, 2003. – С. 40–43.

9. Чуманов И.В., Пятыгин Д.А., Потапов В.И. Математическое моделирование электромагнитного перемешивания жидкометаллической ванны // Вестник ЮУрГУ. Серия “Металлургия”. – 2003. – Вып. 3. – 2(18). – С. 40–42.

10. Чуманов И.В., Пятыгин Д.А., Потапов В.И. О оптимальной скорости вращения расходуемого электрода при электрошлаковой переплаве // Материа-

лы и технологии: Межгосударственный сборник научных трудов. – Магнитогорск: МГТУ. 2004. – С. 165–168.

11. Чуманов И.В., Чуманов В.И., Пятыгин Д.А. Исследование качества электрошлакового металла выплавленного на постоянном токе с вращением расходуемого электрода // Современные проблемы теории и практики производства качественной стали: Материалы Международной научной конференции. Мариуполь: ПДГУ, 2004. – С. 86–88.

12. Чуманов И.В., Пятыгин Д.А. Электрошлаковый переплав на постоянном токе с вращением расходуемого электрода // Современные проблемы электрометаллургии стали: Материалы XII Международной конференции. – Челябинск: ЮУрГУ, 2004. – С. 161–162.

13. Чуманов И.В., Пятыгин Д.А. Особенности электрошлакового переплава на постоянном токе с вращением расходуемого электрода // Известия вузов. Черная металлургия. – 2006. – №3. – С. 22–25.

14. Чуманов И.В., Пятыгин Д.А. Удаление неметаллических включений при ЭШП на постоянном токе // Известия вузов. Черная металлургия. – 2006. – №7. – С. 25–26.

Пятыгин Дмитрий Александрович

**ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛА  
ПРИ ЭШП НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ С ВРАЩЕНИЕМ  
РАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДА**

*Специальность 05.16.02 – “Металлургия черных, цветных и редких металлов”*

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать 27.10.2006. Формат 60x84 1/16. Печать трафаретная.

Усл.печ.л. 1,25. Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 350/107.

---

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