

Отзыв

**официального оппонента на диссертацию Матвеевой Марии Андреевны на тему:
«Исследование процесса формирования ванны жидкого металла с целью снижения
протяжённости переходной зоны при производстве многослойных слитков способом
электрошлакового переплава», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности
2.6.2 «Металлургия черных, цветных и редких металлов»**

Актуальность темы диссертационного исследования Матвеевой М.А. связана с необходимостью совершенствования материалов, стойких к усталостным напряжениям и коррозионно-эрозионным повреждениям в результате циклических термомеханических нагрузок, создания эффективных технологических процессов для производства металлургических заготовок из таких материалов. Одно из возможных направлений исследований - создание многослойных материалов с жидкофазным соединением слоёв, обладающих заданными свойствами в заданной последовательности. Это направление реализуется применением электрошлаковой технологии. Однако движение в этом направлении сопровождается рядом трудностей, среди которых стоит отметить управление химическим составом ванны жидкого металла и протяжённостью переходной зоны.

Технология ЭШП с вращением расходуемого электрода позволяет изменять место доставки капель электродного металла в металлическую ванну, что влияет на ее тепловое поле и способствует формированию относительно плоского фронта кристаллизации. Введение частиц, корректирующих химический состав металлической ванны при одновременном вращении расходуемого электрода, позволяет сформировать многослойный слиток с малой переходной зоной между слоями различного химического состава. При этом удельный вес вводимых частиц может быть сравним с удельным весом флюсов ЭШП. Актуальность работы Матвеевой М.А. подтверждена её поддержкой рядом грантов РФФИ.

Научная новизна работы отражена следующими положениями:

1. Математически обоснована и экспериментально подтверждена зависимость между положением фронта кристаллизации формируемого слитка и местом доставки капель электродного металла в металлическую ванну. Установлено, что минимальная глубина металлической ванны формируется в случае доставки капель электродного металла на $2/3$ радиуса в сторону стенки кристаллизатора.
2. Установлено влияние изменения места доставки капель электродного металла на свойства формируемого слитка. В случае переплава с вращением расходуемого электрода наблюдается рост показателей: плотности на 2%, микротвёрдости на 6 %, механических свойств металла слитка: $\sigma_B + 6 \%$, $\sigma_T + 7 \%$, $KCU + 38 \%$ в сравнении со свойствами металла слитка, полученного без вращения расходуемого электрода. Размер дендритной ячейки уменьшается на 26 %, возрастает однородность перечисленных характеристик в направлении поперек оси слитка.
3. Продемонстрирована возможность введения добавок карбидов вольфрама, титана и бора в металлическую ванну ЭШП посредством капель электродного металла. Установлено, что усвоение карбида вольфрама слитком составляет 85 %, карбида титана – 55 %, карбида бора – 24 %.

Практическая значимость работы заключается:

- в создании компьютерной программы «Тепловое состояние кристаллизующейся заготовки ЭШП с вращающимся электродом», позволяющей определять положение фронта кристаллизации слитка ЭШП в зависимости от технологических параметров переплава;
- в способе получения многослойных заготовок методом электрошлакового переплава, позволяющем уменьшить протяжённость переходной зоны между слоями;
- в установлении влияния расположения слоёв на усталостные характеристики и механические свойства нового многослойного материала. Значения механических характеристик многослойного материала после термической обработки по режиму – отжиг 1030 °С (охлаждение с печью) + закалка 1050 °С (охлаждение в масле) + отпуск при 400 °С – составляют: $\sigma_B = 1286$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1259$ МПа, $\delta = 12\%$, 64 HRC.
- в разработке нового способа введения добавок в каплю электродного металла при электрошлаковом переплаве для изменения химического состава металлической ванны.
- во внедрении и использовании в учебном процессе при подготовке студентов по направлениям 22.03.02 и 22.04.02 «Металлургия» в филиале ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в г. Златоусте результатов, полученных в диссертационной работе.

Полученные в работе новые научные данные, разработанные математические модели, подтвержденные практическими результатами, можно рекомендовать к применению на предприятиях и в научно-исследовательских организациях, занимающихся исследованиями и разработкой подобных материалов и технологий их получения.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений, поскольку выбранные автором методы исследований связаны с использованием высокотехнологичного лабораторного и точного аналитического оборудования, а также инструментов моделирования. Применены современные автоматизированные методы обработки данных.

Апробация работы и подтверждение опубликования основных положений и результатов

Результаты исследования доложены на 4 международных конференциях.

По результатам диссертационного исследования опубликовано 17 печатных работ, включая 11 работ в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в базе данных Scopus, автором получены 2 патента на изобретения и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Диссертационная работа оформлена в соответствии с действующими нормативами, состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованных источников из 139 наименований и 6 приложений. Работа изложена на 141 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка, 34 таблицы.

Автореферат, выполненный на 23 страницах, в достаточной степени отражает содержание диссертационной работы, основные научные положения диссертации, выводы и рекомендации.

Структура диссертации, распределение материала по разделам соответствует поставленной цели и задачам исследования, методическому подходу к аналитическому, экспериментальному исследованию и последующему теоретическому осмыслению, и синтезу его результатов.

Во введении обоснована актуальность научного исследования и охарактеризована проблема, сформулированы цели и задачи работы, отмечены научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы и степень разработанности вопроса исследования, приведена основная терминология, касающаяся получения многослойных металлических заготовок жидкофазными способами, включая технологии ЭШП.

В первой главе представлен аналитический обзор научно-технической литературы и публикаций по теме исследования. Рассмотрены достаточно подробно проблемы производства многослойных слитков ЭШП. На основе анализа влияния технологических факторов на геометрическую форму и размеры металлической ванны автор утверждает, что изменяя лишь технологические параметры процесса (скорость подачи электрода, подводимую мощность, глубину шлаковой ванны) невозможно сформировать плоский фронт кристаллизации при минимальной глубине металлической ванны без потери качества переплава. В качестве решения вопроса предлагает наложение центробежных сил в шлаковой ванне за счёт вращения расходуемого электрода вокруг собственной оси.

Вторая глава содержит результаты исследований влияния вращения расходуемого электрода из стали марки 30Х13 на свойства формируемого слитка в сравнении с традиционной одноэлектродной схемой ЭШП. Установлено более значительное (на 25%) снижение количества включений относительно расходуемого электрода в случае его вращения при одновременном повышении микротвердости образца. Автор демонстрирует выравнивание микротвердости (табл. 2.4, рис. 2.2 на с. 46-47) и размеров дендритной ячейки по сечению слитка, особенно заметное в центральной зоне слитка (табл. 2.5 на с. 48), повышение плотности и механических характеристик σ_B , σ_T и ударной вязкости KCU (табл. 2.6 на с. 49).

Снижение количества неметаллических включений, выравнивание значений микротвёрдости, повышение плотности и механических свойств автор объясняет положительным влиянием вращения расходуемого электрода на структуру формируемых слитков за счет изменения места доставки электродного металла ближе к стенке кристаллизатора в результате радиального течения металла с оплавленного торца электрода. Повышение плотности металла после ЭШП с вращением расходуемого электрода объясняется увеличением скорости кристаллизации в результате размывания теплового центра металлической ванны.

В третьей главе представлены результаты математического моделирования теплового поля с осевой симметрией в квазистационарном режиме при развитии центробежных сил в шлаковой и металлической ваннах, без учета конвекции, а также при ряде иных допущений.

На основе математической модели и выбранных алгоритмов решения автором разработана программа «Тепловое состояние кристаллизующейся заготовки в установке ЭШП», которая позволяет рассчитывать изотермы в объёме формируемого слитка, а также определять положение линий ликвидуса и солидуса в зависимости от химического состава переплавляемого электрода. Показано (рис. 3.6 на с. 74), что смещение места доставки капель электродного металла к стенке кристаллизатора, наряду с уменьшением коэффициента заполнения, уменьшает глубину металлической ванны и изменяет геометрию фронта кристаллизации. При этом перенос места доставки капель из подэлектродной зоны на $1/3$ радиуса в сторону стенки кристаллизатора уменьшает глубину металлической ванны более чем в два раза, а минимальная глубина

металлической ванны формируется в случае доставки капель электродного металла на $2/3$ радиуса в сторону стенки кристаллизатора.

Четвёртая глава посвящена разработке способа получения многослойного слитка с минимальной переходной зоной между слоями за счет введения присадок, корректирующих химический состав металлической ванны, в сочетании с вращением расходуемого электрода по ходу переплава.

Автор исходит из предположений, что подача в шлак дисперсных присадок, имеющих больший удельный вес, нежели рабочий флюс, способных в процессе переплава изменять химический состав металлической ванны и свойства металла слитка, может обеспечить получение многослойного слитка, несмотря на то, что невозможно исключить взаимодействие этих присадок со шлаком. В качестве примера корректировки химического состава по углероду рассмотрен ввод чугуновой крупки. Количество вводимой добавки подбиралось таким образом, чтобы сформировать слой с концентрацией углерода в переплавляемом электроде на 1 % больше, чем исходная. Описаны результаты опытных плавок с целью проверки адекватности результатов математического моделирования, выполненного в третьей главе.

На основе исследования макроструктуры слитков (рис. 4.2, 4.3 на с.85, 86) продемонстрировано изменение геометрии фронта кристаллизации при использовании углеродсодержащей корректирующей присадки, которая создаёт градиент концентраций углерода в металлической ванне, формируя слой, отличающийся травимостью в реактиве Обергоффера.

В случае вращения расходуемого электрода наблюдается более пологая и менее протяженная зона переходного химического состава. Глубина металлической ванны, в случае переплава с вращением уменьшается в 3 раза. Фронт кристаллизации становится пологим, соответствуя результатам математического моделирования теплового состояния кристаллизующегося слитка.

Далее в главе 4 описаны результаты исследования химического состава и механических испытаний образцов, отобранных в продольном направлении от откованного на квадрат 35 мм и термообработанного прутка из экспериментального многослойного слитка. Установлено, что значения пределов прочности и условного предела текучести при различных видах термической обработки различаются на 4-5 %, что связано с многослойной структурой материала, сочетающей слои с различным содержанием углерода. В результате проведения усталостных испытаний плоских образцов III типа с галтельным переходом по ГОСТ 25.502-79 установлена повышенная долговечность образцов с продольным расположением слоев.

В пятой главе описано формирование в электрошлаковом слитке дисперсно-упрочненного слоя с помощью частиц карбидов, удельный вес которых близок к удельному весу флюсов ЭШП, а материал частицы вступает в химическое взаимодействие с флюсом. Добавки вводились с поверхности расходуемого электрода в каплю электродного металла с последующей доставкой в металлическую ванну без контакта с флюсом. Покрытие, состоящее из связующего компонента и частиц добавки (WC , TiC и VC размерами 0,5-3,0 мкм), наносилось на расходуемый электрод в месте, которое после ЭШП формирует слой, насыщенный металлическим компонентом карбида.

Исследование химического состава слитков с введением корректирующих добавок показало повышенное в 1,5-2,5 раза усвоение присадки по предложенной технологии с покрытием расходуемого электрода, которое автор диссертации объясняет отсутствием

непосредственного контакта добавок с каплей электродного металла, минуя взаимодействие со шлаком. В то же время автор отмечает заметный переход титана в шлак, где содержание TiO_2 достигает 2,1 %.

Наибольшая степень усвоения получена по добавкам карбида вольфрама. Показана принципиальная возможность введения в металлическую ванну и далее в слиток частиц с поверхности расходоуемого электрода благодаря радиальному течению металла на его торце и удовлетворительному смачиванию этих частиц железоуглеродистым расплавом. Следует, однако, отметить различие в форме пребывания введенных частиц в наплавленном слитке, связанное с различной термодинамической устойчивостью. Исследование образцов методом электронной сканирующей микроскопии показало, что вольфрам находится как в растворённом виде, так и в виде единичных карбидов. Титан представлен нитридами, карбонитридами и также частично растворён в металле. Бор находится в растворённом состоянии. Колебания концентрации элементов в слое составили 5...8 %.

Основные замечания по работе

1. Полнота анализа литературы и постановка задачи:

Несмотря на заявление о том, что традиционными методами нельзя управлять формой металлической ванны и переходной зоны, автор активно пользуется на практике этими методами, а роль вращения электрода в таком управлении явно не выражена. Не поставлена задача исследования влияния скорости вращения электрода на качество слитка, размер переходных зон и усвоение корректирующих добавок.

2. Теоретические расчеты и обоснования:

В работе отсутствует анализ влияния протяженности переходных зон на достижение повышенных качественных характеристик, который бы соответствовал цели исследования, не разработан способ определения оптимального количества слоев на единицу длины в слитке ЭШП.

При оценке глубины проникновения падающих капель в металлическую ванну не учтено поверхностное натяжение капель.

3. Программа и методики экспериментов:

Отсутствует планирование проведения экспериментов и ранжирование факторов по степени влияния на компактное размещение слоя: вид добавок, гранулометрический состав, место ввода, скорость вращения РЭ, тип шлака, масса ванны и др. Отсутствует обоснование размера частиц и массы добавляемого материала.

Из текста не ясно, чем обусловлено прекращение подачи электроэнергии при подаче дополнительного материала.

4. Результаты экспериментов, их обработка и интерпретация:

Использованный в модельных экспериментах режим переплава заведомо «холодный»: вводится слишком мало энергии и выделяется мало тепла, поэтому плоскую ванну можно получить и без вращения электрода. Косвенное подтверждение – неудовлетворительное качество поверхности слитков, особенно в опытах с модифицированием, когда $I=0,8$ кА. Режим переплава, обеспечивающий формирование слитка с плотной направленной структурой и хорошим качеством поверхности: для электрода Ø40 мм: $I=1,7$ кА, $P=84$ кВА, $R=29,2$ мОм; для электрода Ø70 мм: $I=3,0$ кА, $R=18$ мОм, $P=162$ кВА. В модельных экспериментах задана скорость сплавления электрода 120 мм/мин, которая в 2-3 раза выше, чем по известным отечественным и

японским методикам: (61,7 мм/мин и 46,8 мм/мин, соответственно).

5. Прочие замечания и рекомендации:

В работе отсутствует какое-либо упоминание об экономической эффективности. Возможность и необходимость применения способа переплава с вращающимся электродом при промышленном производстве многослойных слитков вызывает сомнение.

В актах внедрения (Приложения А и Б) акцентированы лишь технологические режимы деформации и термообработки многослойных заготовок, которые позволили откорректировать параметры процессаковки многослойных ножевых заготовок, что выходит за рамки специальности 2.6.2.

Несмотря на указанные недостатки, теоретические и экспериментальные разработки, выполненные автором диссертации, полученные практические результаты, особенно способ получения многослойных заготовок методом электрошлакового переплава, позволяющий уменьшить протяжённость переходной зоны между слоями, заслуживают высокой оценки.

Заключение по работе

Кандидатская диссертация Матвеевой Марии Андреевны является достойным современным продолжением комплекса работ научных сотрудников кафедры техники и технологии производства материалов филиала ЮУрГУ в г. Златоусте.

В целом результаты исследований и выводы, сделанные автором, свидетельствуют, что ею решена научная проблема создания многослойных материалов с жидкофазным соединением слоёв, обладающих заданными свойствами в заданной последовательности с минимальной протяжённостью переходной зоны между слоями, благодаря применению метода электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода.

Диссертация является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор диссертации Матвеева Мария Андреевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2 - Металлургия черных, цветных и редких металлов.

Официальный оппонент
заведующий лабораторией
специальной металлургии
АО «НПО «ЦНИИТМАШ»,
доктор технических наук



Левков Л.Я.

03 апреля 2025 г.

Наименование организации: АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

Почтовый адрес: 115088, РФ, Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д.4

Телефон: +7 495 6758300

Адрес электронной почты: LYLevkov@cniitmash.com

Подпись Левкова Леонида Яковлевича заверяю

Заместитель генерального директора
по управлению персоналом



Маркова Л.В.