

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Филиал ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ) в г. Златоусте
Факультет Техники и технологии
Кафедра Техники и технологий производства материалов

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент, ген. директор
ООО «ПКФ «УралМет»
_____ А.В. Новосёлов
«__» _____ 2021 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
профессор, д.т.н.
_____ И.В. Чуманов
«__» _____ 2021 г.

ХОЛОДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МЕСТА ДОСТАВКИ
ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА В ВАННУ ПРИ ЭШП
С ВРАЩЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДА

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР

Технологический контроль
доцент, к.т.н.
_____ А.В. Рябов
«__» _____ 2021 г.

Руководитель работы
проф., д.т.н.
_____ И.В. Чуманов
«__» _____ 2021 г.

Автор работы
студент группы ФТТ-250
_____ К.И. Белкина
«__» _____ 2021 г.

Нормоконтролер
инженер
_____ В.В. Седухин
«__» _____ 2021 г.

Златоуст 2021 г.

АННОТАЦИЯ

Белкина К.И. Холодное моделирование изменения места доставки электродного металла в ванну при ЭШП с вращением электрода. – Златоуст: ЮУрГУ, кафедра ТиТПМ; 2021, – 43 с., 8 ил., 5 табл., библиогр. список – 61 наим.

В ходе выпускной квалификационной работы изучены особенности электрошлакового переплава.

Рассмотрен метод электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода.

Дан обзор методов влияния внешних воздействий на процесс ЭШП. Подобрано оборудование и материалы, применяемые во время технологического процесса холодного моделирования.

Выявлены теоретические и фактические данные о месте доставки капель электродного металла.

Пояснительная записка подкреплена соответствующими иллюстрациями и презентацией.

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		К.И. Белкина			<i>Холодное моделирование изменения места доставки электродного металла в ванну при ЭШП с вращением электрода</i>	Лит.	Лист	Листов
Провер.		И.В. Чуманов					5	43
Реценз.		А.В. Новоселов				Филиал ЮУрГУ (НИУ) в г. Златоусте		
Н. Контр.		В.В. Седухин						
Утверд.		И.В. Чуманов						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	9
1.1 Особенности электрошлакового переплава.....	9
1.2 Метод электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода.....	15
1.3 Методы влияния внешних воздействий на процесс ЭШП.....	21
1.4 Основы и выбор методики «холодного» моделирования	23
2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	30
2.1 Методика проведения эксперимента.....	30
2.2 Результаты эксперимента	33
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	37
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	38

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						6
	Лист	№	Подпись	Дата		

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня без высококачественного металла технический прогресс просто невозможен. Широкое применение получил один из ведущих и перспективных технологических процессов в области специальной электрометаллургии – электрошлаковый переплав. Металл, подвергшийся электрошлаковому переплаву, отличается высокой чистотой по неметаллическим включениям, свободен от различного рода литейных дефектов ликвационного и усадочного происхождения, обладает высокой физической однородностью и чрезвычайно высокой плотностью структуры. Структура и качество слитка зависит от нескольких факторов, одним из которых является место доставки жидких капель электродного металла в металлическую ванну.

Целью выпускной квалификационной работы является определение методами холодного моделирования траектории движения жидких металлических капель и их места доставки с целью формирования пологой и минимальной по высоте металлической ванны путем вращения расходуемого электрода вокруг собственной оси.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи*:

- путем проведения расчётов выявить теоретическое место падения капли электродного металла в металлическую ванну;
- осуществить моделирование эксперимента с вращающимся электродом на холодной модели;
- произвести сравнение расчётных теоретических данных с данными, полученными в ходе проведения эксперимента.

Актуальность темы заключается в том, что сложный трёхмерный характер отрыва капель электродного металла с торца переплавляемого электрода препятствует разработке точной схемы, а высокие температуры и оптически непрозрачные среды затрудняют экспериментальные исследования процессов плавления при ЭШП. Таким образом, наиболее оптимальный метод изучения такого рода явлений – это физическое моделирование, с помощью которого

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						7
	Лист	№	Подпись	Дата		

сравнительно просто и наглядно можно изучать явления, зависящие от большого числа факторов.

Выпускная квалификационная работа состоит из следующих разделов: задание, аннотация, введение и основная часть. Основная часть включает в себя аналитический и технологический разделы, где, соответственно, рассматриваются технологические особенности ЭШП без вращения и с вращением расходуемого электрода, а также описана методика проведения эксперимента и выведены его результаты. Кроме того, выпускная квалификационная работа содержит заключение и библиографический список. В ходе работы сделаны выводы и заключение по теме выпускной квалификационной работы.

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						8
	Лист	№	Подпись	Дата		

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

1.1 Особенности электрошлакового переплава

Электрошлаковый переплав (ЭШП), разработанный институтом им. Е.О. Патона АН УССР, возник в результате усовершенствования электрошлаковой сварки. При сварке деталей под слоем флюса металл сварного шва часто по свойствам превосходит металл электрода. Это послужило основанием для разработки способов переплава электродов большого сечения под специально подобранными флюсами, обеспечивающими наиболее эффективное рафинирование металла, и обеспечило внедрение этого метода в металлургическое производство для получения металла высокого качества.

Характерной особенностью процесса ЭШП является отсутствие электрической дуги. Электрическая цепь между расходуемым электродом и наплавляемым слитком, к которым подводится разность потенциалов, замыкается через слой расплавленного шлака, который является источником нагрева и рафинирующей средой. При прохождении электрического тока через шлаковую ванну, в ней выделяется тепло (джоулево), необходимое для плавления расходуемого электрода, поддержания в расплавленном и перегретом состоянии шлаковой и металлической ванн. Шлак в жидком состоянии становится электропроводным, но обладает высоким сопротивлением. На этом участке электрической цепи выделяется много тепла, шлак нагревается до температуры 1700-2000 °С, в результате чего оплавляется погруженный в него конец расходуемого электрода. Металл электрода в виде отдельных капель перетекает в ванну кристаллизатора и спустя некоторое время кристаллизуется там в условиях направленного сверху вниз отвода тепла и высокого градиента температуры, создаваемого подогревом ванны шлаком сверху и охлаждением поддона и кристаллизатора водой [1].

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						9
	Лист	№	Подпись	Дата		

Рисунок 1 – Схема электрошлакового переплава: 1 – расходуемый электрод; 2 – шлаковая ванна; 3 – капли электродного металла; 4 – металлическая ванна; 5 – шлаковый гарнисаж; 6 – слиток; 7 – стенка кристаллизатора; 8 – зазор; 9 – затравка; 10 – поддон

При нормальном течении процесса ЭШП оплавливающийся торец электрода имеет форму правильного конуса, на вершине которого образуется только одна капля. На каплю электродного металла действует несколько сил: сила тяжести и электродинамические силы, отрывающие ее от электрода, и силы межфазного натяжения, противодействующие отрыву. Отрыв капли происходит в момент, когда гравитационные и динамические силы превысят силы межфазного натяжения. По сравнению с другими переплавными процессами при ЭШП на каплю действует выталкивающая сила, равная весу вытесненного шлака, поэтому

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						10
	Лист	№	Подпись	Дата		

масса отрывающейся капли в случае ЭШП больше, чем при других процессах капельного переплава.

После отрыва капля движется вертикально и практически независимо от глубины погружения электрода, электротехнических параметров процесса и свойств шлака проходит межэлектродный промежуток за 0,1-0,3 с. Падающая капля под действием кинетических сил погружается в объем жидкой ванны и вызывает волнообразное колебание поверхности ванны. В результате всплесков ванны в шлак попадают мелкие брызги металла.

Качество переплавленного металла во многом зависит от теплового состояния металлической ванны, тесно связанного с тепловым состоянием шлаковой ванны. К числу факторов, особенно сильно влияющих на тепловое поле, относятся: диаметр электрода, химический состав шлака, сила тока и напряжение.

Ванна становится более плоской с увеличением диаметра расходуемого электрода и напряжения на шлаковой ванне и с уменьшением силы тока и сопротивления шлака. При малом отношении диаметра электрода к диаметру кристаллизатора увеличивается неравномерность выделения тепла в шлаковой ванне, основное количество которого выделяется под электродом, и возрастает глубина ванны в осевой части слитка. То же происходит и при уменьшении напряжения, т. е. при уменьшении межэлектродного промежутка. Влияние длины межэлектродного промежутка носит экстремальный характер, так как при чрезмерном удалении конца электрода от поверхности металлической ванны снижается температура металла и его качество ухудшается. Следовательно, имеются оптимальные значения длины межэлектродного промежутка, величина которого мало зависит от состава металла и шлака, а определяется главным образом диаметром электрода. При диаметрах электродов более 150 мм оптимальная длина промежутка равна примерно половине диаметра электрода. Увеличение силы тока и сопротивления шлака при неизменных прочих условиях сопровождается увеличением скорости плавления и приводит к увеличению глубины ванны и более сильно выраженной радиальной кристаллизации [2].

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						11
	Лист	№	Подпись	Дата		

Практический расход электроэнергии при электрошлаковом процессе, несмотря на достигнутые положительные результаты в этом направлении, достигает 1800 кВт·ч на тонну получаемого металла [3-6]. Это значительно больше теоретического расхода электроэнергии, необходимого для расплавления одной тонны углеродистой стали (около 450 кВт·ч на тонну) [7]. На непосредственное плавление расходуемого электрода при электрошлаковом переплаве, как показывают расчёты и опыт практического использования, тратится 25...50 % подведённой активной электрической мощности [4,5]. Исходя из этого, в энергетическом отношении, ЭШП нельзя назвать высокоэффективным процессом.

Количество тепла (Q), выделяемое в шлаковой ванне в единицу времени определяется известным соотношением

$$Q = 0,24 I^2 R_{\text{ш}} \tau, \quad (1)$$

где I – проходящий через шлаковую ванну ток, А; $R_{\text{ш}}$ – сопротивление шлаковой ванны, Ом; τ – время прохождения тока, с. В свою очередь величина тока находится в прямой зависимости от напряжения на шлаковой ванне.

Таким образом, количество выделяемого в шлаковой ванне тепла зависит от трёх электрических параметров процесса, которые тесно взаимосвязаны. Например, увеличение тока приводит к снижению напряжения на шлаковой ванне за счёт уменьшения его активного сопротивления. Изменения на шлаковой ванне в свою очередь приводят к изменению, её электрического сопротивления вследствие иного расположения в ней расходуемого электрода и температурного поля.

Электрический режим при электрошлаковом переплаве наряду с составом и качеством шлака определяет скорость плавления электрода, что, в свою очередь, оказывает влияние на степень рафинирования металла и структуру электрошлакового слитка. Экспериментально выявлено, что скорость подачи расходуемого электрода оказывает существенное влияние на электрический режим процесса, который, в свою очередь, влияет на ход кристаллизации слитка.

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						12
	Лист	№	Подпись	Дата		

Впервые связь между скоростью подачи электрода и величиной тока установлена в работе [8]. При одинаковом количестве шлака и напряжении увеличение тока вследствие повышения скорости подачи электрода ведёт к практически пропорциональному увеличению глубины металлической ванны. Фронт кристаллизации при этом изменяется от пологой формы до сильно вогнутой, а направленность кристаллов переходит из продольно-осевой в почти радиальную. Опыты, выполненные в ИЭС им. Е.О. Патона [5], показывают, что, влияя на глубину металлической ванны, то есть, изменяя мощность процесса и сечение электрода можно получать слитки с различной кристаллической структурой. Следовательно, для обеспечения высокого качества слитка при ЭШП необходимо иметь не только пологую форму дна металлической ванны, но и сравнительно неглубокую металлическую ванну.

Производительность ЭШП прямо связана с количеством электродного металла, поступающего в жидкую металлическую ванну в единицу времени. Увеличить количество транспортируемого электродного металла можно, обеспечив большую удельную тепловую мощность в шлаковой ванне. Как показано в работах [4,5,9] это достигается за счёт увеличения тока и напряжения, подаваемых на электрод. Повышения скорости плавления расходуемого электрода можно добиться также путём подбора геометрических параметров процесса, а именно, коэффициента заполнения кристаллизатора, представляющего собой отношение диаметра электрода к диаметру кристаллизатора [4,10-13]. Коэффициент заполнения, обеспечивающий максимальную производительность, равен 0,8 [12], а наиболее оптимальный при ЭШП – 0,6. Увеличение коэффициента заполнения кристаллизатора возможно до некоторого предела, обусловленного, главным образом, значительным возрастанием доли тока, проходящего через кристаллизатор, что сокращает срок службы последнего [14]. В тоже время, при любом диаметре электрода существует определённая максимальная скорость плавления, не зависящая от диаметра кристаллизатора, в котором ведётся переплав. Эта максимальная скорость плавления при нормальных условиях переплава не может быть

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						13
	Лист	№	Подпись	Дата		

превышена, так как даже с увеличением вводимой в шлак мощности температура шлака, окружающего торец электрода, не может бесконечно увеличиваться, что ограничивает количество тепла, идущего на плавление металла электрода

Производительность, т.е. скорость плавления электрода – это основной фактор, влияющий на глубину металлической ванны, следовательно, и на кристаллическую структуру, качество слитка, а также на стоимость производства. Существует общепринятое мнение, что глубина металлической ванны, равная половине диаметра формируемого слитка, для множества сплавов даёт хорошую структуру и высокое качество металла при приемлемых производственных затратах [12,15]. В определённых случаях, когда требуется получить металл особо высокого качества, стоимость не является основным показателем. Тогда может возникнуть необходимость уменьшения скорости плавления и глубины металлической ванны. С другой стороны, в случае переплава дешёвых (рядовых) сталей, к которым предъявляются невысокие требования по качеству, недопустимо увеличение стоимости производства. При таких условиях следует идти на увеличение скорости плавления, ведущее к увеличению глубины металлической ванны и снижению производственных затрат. Таким образом, при реализации электрошлаковой технологии на сегодняшний день следует руководствоваться приоритетными задачами в каждом конкретном случае.

Повышение производительности за счёт увеличения подводимой мощности к шлаковой ванне далеко не всегда оправдано, так как в этом случае утрачиваются такие преимущества процесса как рафинирующая способность, кроме того, не имея возможности увеличить скорость охлаждения, ухудшается, и кристаллическая структура формируемого слитка.

Металл, полученный методом электрошлакового переплава, обладает повышенными эксплуатационными характеристиками по сравнению с металлом открытой выплавки и разливки. Это объясняется двумя основными факторами – лучшей рафинирующей способностью процесса в специально подобранном шлаке и условиями кристаллизации металла. Однако из-за необходимости двукратного металлургического передела его стоимость значительно, практически в 2 раза,

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						14
	Лист	№	Подпись	Дата		

превышает стоимость металла электродуговой плавки, который, благодаря глубокому внепечному рафинированию, может быть таким же чистым по ряду вредных примесей, как и металл ЭШП. Как показывает практика, расход электроэнергии при производстве электрошлаковых слитков более чем в 3 раза превышает расход электроэнергии, при выплавке стали в электропечах. Прежде всего, именно эти обстоятельства сдерживают сегодня использование процесса ЭШП [16,17].

1.2 Метод электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода
Затраты при производстве слитков методом ЭШП могут быть существенно снижены, если использовать технологию электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода вокруг его оси.

Суть способа заключается в придании электроду однонаправленного или реверсивного вращения вокруг своей оси или оси ванны при ассиметричном расположении электрода. Скорость вращения электрода зависит от его диаметра. Для электродов диаметром 40...250 мм она обычно составляет 30...90 об/мин [18]. Вращение электрода приводит к появлению центробежной силы, в результате воздействия которой достигают периферийного отрыва капель металла от оплаваемого торца электрода и рассредоточения места их падения в металлическую ванну. Указанные эффекты позитивно влияют на форму и глубину металлической ванны и, как следствие, на направление роста кристаллов. Фронт кристаллизации становится более плоским, что обеспечивает рост кристаллов в осевом направлении. При этом уменьшается расстояние между осями кристаллов I и II порядка [19].

Данная технология обладает целым рядом существенных преимуществ.

Во-первых, это, прежде всего возможность значительно повысить производительность процесса в ряде случаев до 25 % и более, причём без увеличения подводимой мощности на шлаковую ванну. Стремясь обеспечить прогрессирующее энергосбережение, следует непрерывно оптимизировать процесс теплопередачи к нагреваемому металлу, совершенствуя тепловую работу

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						15
	Лист	№	Подпись	Дата		

используемого печного агрегата. В нашем случае, это достигается за счёт трёх моментов: изменения гидродинамической обстановки в шлаковой ванне, принудительного съёма жидкого электродного металла, и уменьшения высоты шлаковой ванны.

Гидродинамическая картина при плавлении вращающегося электрода обратна той, которая имеет место только при вертикальном перемещении электрода. При вращении расходуемого электрода создаётся восходящий шлаковый поток под оплаиваемым электродом. Поднимаясь в подэлектродной зоне, инициируемый шлаковый поток, нагревается и достигает максимальной температуры непосредственно у оплаиваемого торца (рисунок 2, б). В отличие от обычной технологии, где шлак омывает оплаиваемый конус электрода, после того как он отдал своё тепло водоохлаждаемой стенке кристаллизатора, и, двигаясь по подэлектродной зоне, имеет максимальную температуру на границе с жидкой металлической ванной (рисунок 2, а).

Кроме того, следует отметить и то обстоятельство, что съём жидкого электродного металла в случае вращения электрода происходит преимущественно под воздействием центробежных сил, а не гравитационных, что характерно для принятой (классической) технологии переплава. Следовательно, при плавлении в поле действия центробежных сил, жидкая фаза (капля) с оплаиваемой поверхности эвакуируется несколько раньше в сравнении с оплаиванием без вращения, что позволяет быстрее готовить поверхность электрода для последующего плавления.

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						16
	Лист	№	Подпись	Дата		

Рисунок 2 – Особенности процесса ЭШП при классической технологии (а) и с вращением расходуемого электрода (б): ω – скорость вращения расходуемого электрода, об/мин; T_{\max} – эпицентр зоны с максимальной температурой в шлаковой ванне, °С; H_1, h_1 – соответственно высота шлаковой и металлической ванны при принятом процессе, мм; H_2, h_2 – соответственно высота шлаковой и металлической ванны при реализации технологии с вращением расходуемого электрода вокруг собственной оси, мм (разработанная технология); δ_1, δ_2 – толщина шлакового гарнисажа при реализации технологии без вращения и с вращением расходуемого электрода, соответственно, мм

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						17
Лист	№	Подпись	Дата			

В случае вращения расходуемого электрода, оплаваемый торец плоский и уровень шлака в кристаллизаторе ниже, чем при применении технологии без вращения, где высота шлаковой ванны больше за счёт вытеснения шлака погружённым в него конусом оплавления. Снижение площади контакта шлака с охлаждаемой стенкой кристаллизатора и приводит к снижению тепловых потерь, количество которых можно определить из формул для определения потерь тепла через шлаковый пояс для цилиндрической поверхности кристаллизатора, предложенной в работах [20, 21]. В зависимости от технологических параметров переплава данное обстоятельство позволяет снизить количество потерь на 9...13 %. Наличие плоского торца в процессе переплава с вращением расходуемого электрода, как отмечено выше, позволяет обеспечить требуемый межэлектродный промежуток при меньшем количестве флюса, что позволяет при реализации данной технологии вести процесс при меньшем количестве флюса на 10...15 %. Так же, данная технология дает возможность регулирования скорости переплава при электрошлаковой плавке путём изменения скорости вращения расходуемого электрода (рисунок 3).

Во вторых, использование вращения расходуемого электрода позволяет существенно повысить рафинирующую способность процесса. Это объясняется тем, что толщина слоя жидкого металла на торце электрода (плёнка) равномерна и минимальна, т.е. соизмерима с размером неметаллических включений, а именно эта граница является лимитирующей в процессе рафинирования, и капли проходят более длинный путь в шлаке. Кроме того, в случае вращения электрода, сходящие с его торца под действием центробежных сил капли металла имеют меньший размер, что также способствует вероятности оказаться неметаллическим включениям на межфазной границе с последующей экстракцией их флюсом [22].

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						18
Лист	№	Подпись	Дата			

Рисунок 3 – Схема регулирования скорости переплава при электрошлаковой плавке путём изменения скорости вращения расходуемого электрода: ω_1, ω_2 – соответственно начальная и конечная скорости вращения расходуемого электрода, об/мин; m_1, m_2 – масса шлака в начале и конце переплава, г; $R_{эл1}, R_{эл2}, R_{ш1}, R_{ш2}, R_{сл1}, R_{сл2}$ – соответственно сопротивление электрода, шлаковой ванны и слитка в начале и в конце переплава, $(\text{Ом м})^{-1}$; Q_1, Q_2 – количество тепла, выделяемого в начале и в конце переплава Вт; V_1, V_2 – скорость переплава в начале и в конце плавки, г/мин

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						19
	Лист	№	Подпись	Дата		

Важной особенностью для процесса рафинирования металла от неметаллических включений при ЭШП является продолжительность пребывания (или путь прохождения) капель в рафинирующем шлаке. Возникающие при вращении электрода центробежные силы обеспечивают радиальное течение жидкого металла на оплаиваемой поверхности электрода. При отрыве капли электродного металла получают ту или иную (прежде всего в зависимости от скорости вращения переплавляемого электрода) траекторию движения и, попадая в металлическую ванну, капли формируют геометрию её дна. Расстояние, которое проходят капли в этом случае, в среднем в два раза больше, чем при переплаве без вращения [23]. Рассредоточивая место доставки электродного металла, за счёт вращения электрода, удаётся получить мелкую и плоскую форму дна жидкой металлической ванны (фронт кристаллизации) на протяжении всего переплава. Это позволяет повысить качество кристаллической структуры получаемого слитка. Эксперименты по изучению глубины жидкой кристаллической ванны показали, что глубина ванны при ЭШП с вращением в 2 раза меньше, чем при ЭШП без вращения. В работе [24] отмечено, что при увеличении числа оборотов электрода, в центральной зоне слитка происходит удлинение кристаллов и уменьшение их ширины. Поскольку с увеличением числа оборотов расходуемого электрода уменьшается глубина ванны жидкого металла, наблюдается тенденция к уменьшению ширины кристаллов. Отрыв капли с периферийной части электрода приводит к паданию её ближе к стенке кристаллизатора, что обеспечивает большую глубину цилиндрической части ванны по сравнению с переплавом не вращающегося электрода. Изменение формирования жидкой металлической ванны привело к изменению фронта кристаллизации.

С увеличением скорости вращения электрода величина микронапряжений на периферии слитка уменьшается, а в центре – возрастает. В результате уровень микронапряжений по сечению слитка выравнивается. Превращение фронта кристаллизации в плоскость уменьшает градиент температуры по сечению, и, по-видимому, приводит к выравниванию микронапряжений [19].

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						20
	Лист	№	Подпись	Дата		

Следовательно, очень важно уметь прогнозировать место доставки электродного металла при применении электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода с целью создания пологой формы дна металлической ванны для формирования однородной кристаллической структуры.

Отмеченные преимущества позволили рассмотреть вопрос возможности управления местом доставки электродного металла в металлическую ванну посредством изменения величины скорости вращения электрода.

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

1.3 Методы влияния внешних воздействий на процесс ЭШП

Электрошлаковый переплав характеризуется переносом электродного металла в каплях через шлаковую ванну. Количество этих капель, скорость их отрыва, траектория движения в шлаковой ванне, форма электрода и металлической ванны являются важнейшими характеристиками переплава. Известно, что, влияя на эти характеристики, можно изменять гидродинамические и кинетические показатели переплава, а, следовательно, влиять на качество металла, себестоимость и структуру и свойства.

В настоящее время много зарубежных и отечественных исследователей занялись разработкой установок для внешнего воздействия на электрошлаковый переплав, их моделированием и изучением.

Модель является эффективным способом и преимуществом в экономии затрат и времени на эксперименты. Исследованию закономерностей капельного переноса при ЭШП посвящены работы [25-29]. Установлено влияние основных технологических параметров процесса (тока, напряжения, скорости плавления, рода и полярности тока, диаметра электрода и др.) на размер и время образования капель. Изучено влияние на капельный перенос механических воздействий и ультразвуковых колебаний [30].

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						21
	Лист	№	Подпись	Дата		

Механическая и ультразвуковая вибрация. Для внедрения в процесс ЭШП был предложен инновационный метод вибрирующего электрода. Доказано, что эффективное относительное движение между электродом и жидким шлаком помогает получить однородную структуру металла, и уменьшает потребление энергии [31,32]. В работах [33,34] автор сделал значительные успехи в моделировании процесса ЭШП путем разрешения передачи тепла и течения жидкость в шлаке и металле, в том числе с использованием модели $k-\varepsilon$ для представления турбулентной вязкости и турбулентности термальной проводимости в шлаке, и путем решения уравнения Максвелла для электромагнитного силового поля и пространственного распределения скорости джоулевого нагрева в шлаке.

Переплав с вращением кристаллизатора. В работах зарубежных авторов [35] исследовано влияние вращения кристаллизатора на размер неметаллических включений, а также скорость переплава и потребление энергии при ЭШП по бифилярной схеме подключения. Путем создания упрощенной модели ЭШП при вращении кристаллизатора показано лучшее удаление неметаллических включений за счет большей площади контакта капель металла и более длительном временем взаимодействия бассейна шлака.

Переплав с продувкой газом или газопорошковыми смесями. Авторами работы [36] выявлено, что наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату является способ перемешивания шлаковой ванны при электрошлаковом переплаве, включающий продувку через шлаковую ванну, в том числе через зону плавления расходуемого электрода, инертного газа.

Переплав в поле действия электромагнитных сил. Цель работы [18] заключалась в разработке физической модели плавления расходуемого электрода при ЭШП в условиях воздействия внешнего магнитного поля и изучении влияния продольного магнитного поля на плавление и каплеобразование электродного металла. В работе [37] рассматривается электрошлаковый переплав с наложением на шлаковый и металлический расплав реверсивного переменного магнитного поля.

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						22
	Лист	№	Подпись	Дата		

Перелав с токопроводящим кристаллизатором. Авторами работ [38-43] выявлено, что большие возможности управления глубиной и формой металлической ванны, а следовательно, и структурой выплавляемого слитка, открывает использование различных схем ЭШП в токоподводящем кристаллизаторе. Использование токоподводящего кристаллизатора позволяет организовать принудительное вращение расплава шлаковой ванны, благодаря чему обеспечивается выравнивание температуры по периметру токоподводящей секции и равномерное температурное поле ванны жидкого металла [39,43]. Целью работы [44] является исследование особенностей плавления в наведенной в токоподводящем кристаллизаторе шлаковой ванне электродов большого сечения и бестоковых заготовок.

1.4 Основы и выбор методики холодного моделирования

Течение плёнки на торце расходуемого электрода при ЭШП позволяет осуществлять эффективный теплообмен между металлом и шлаком. Толщина, режим течения и распределение скоростей в плёнке определяют скорость массопереноса и удаление неметаллических включений, а также тепловой поток от шлака к оплаиваемой поверхности заготовки. При принятой технологии электрошлакового процесса число Рейнольдса плёнки не превышает $1,0 \cdot 10^3$. В таких условиях число Нуссельта, характеризующее теплообмен в плёнке, сравнительно мало [45], поэтому перенос тепла и массы через плёнку происходит при неблагоприятных условиях. Это, в частности во многом обуславливает низкую долю тепла (30...40 % от выделяющегося в шлаке) используемого на плавление электродного металла. При ламинизированном характере течения жидкости в плёнке тепло от шлака через объём плёнки передаётся теплопроводностью. В этом случае величину теплового потока к оплаиваемому торцу расходуемой заготовки можно в общем случае определить при помощи закона Фурье:

$$q_{пл} = \frac{\lambda_{пл}}{\delta_{пл}} (T^* - T_{п}) \quad (2)$$

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						23
	Лист	№	Подпись	Дата		

где T^* – температура на межфазной границе, К; $T_{\text{п}}$ – температура плавления, К; $\lambda_{\text{пл}}$ – коэффициент теплопроводности Вт/(м К); $\delta_{\text{пл}}$ – толщина плёнки, м.

Подобным же уравнением (закон Фика) описывается и поток вещества через плёнку. Зависимость (2) показывает, что тепломассообмен через жидкую плёнку может быть улучшен за счёт её уменьшения и изменения условий тепломассообмена, а также искусственно вызванной конвекции. Как было показано ранее, достигнуть уменьшения толщины плёнки при существующей, традиционной схеме переплава, невозможно, так как вязкость металла, плотность металла и шлака практически не поддаются корректировке.

Более эффективно воздействовать на металлическую плёнку, можно за счёт дополнительных сил, превышающих силы тяжести, а именно вращением расходуемого электрода. В этом случае относительно простым техническим приёмом создаются значительные дополнительные усилия, действующие на металл в плёнке. Помимо изменения толщины плёнки вращение электрода может вызвать и ряд дополнительных эффектов, таких как повышение скорости плавления и изменение формы оплаваемого торца. Однако переплав металлических расходуемых электродов не позволил однозначно выявить механизм влияния центробежных сил на изменение формы торца, гидродинамику течения плёнки и влияния скорости вращения на процесс удаления неметаллических включений. Кроме того, проведённый аналитически расчёт в предыдущей главе, требует экспериментального подтверждения.

Сложный трёхмерный характер течения металла на торце переплавляемого электрода препятствует разработке точной схемы, а высокие температуры и оптически непрозрачные среды затрудняют экспериментальные исследования процессов плавления при ЭШП. Таким образом, наиболее оптимальный метод изучения такого рода явлений – это физическое моделирование, с помощью которого сравнительно просто и наглядно можно изучать явления, зависящие от большого числа факторов. Существующие модели, предложенные Б.И. Медоваром с соавторами [46], а также в работе [47] получившие своё законченное развитие, рассматривая различные стороны процесса ЭШП, не

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						24
	Лист	№	Подпись	Дата		

затрагивали гидродинамики течения плёнки, эволюции торца и места доставки электродного металла в случае вращения переплавляемого электрода (заготовки).

На сегодняшний день при помощи существующих моделей изучены различные стороны принятого процесса ЭШП. Однако процесс действия центробежных сил в условиях применительно к процессу ЭШП до не давних пор не моделировался [22]. В частности, не изучена схема доставки электродного металла в металлическую ванну. Открытым остается вопрос, связанный с ухудшением рафинирующей способности процесса при увеличении скорости вращения до «высоких» значений и его механизмом.

При создании методики моделирования, как и авторы [46-49], изначально полагаем, что отсутствие электрического тока не оказывает существенного влияния на течение электродного металла. Для правильного подбора моделирующих сред, а, следовательно, и объективности самого моделирования необходимо рассмотреть ряд уравнений, описывающих процесс плавления и течения металла в плёнке, а также течение шлака у поверхности электрода, представляя уравнения в безразмерном виде. Так, передача тепла через объём плёнки в процессе фазового превращения на её границе, согласно данным работы [50], описывается уравнением:

(3)

в котором, $\lambda_{пл}$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $T_n, T_{п}$ – начальная температура и температура плавления, К; $\delta_{пл}$ – толщина плёнки, м; $R_{эл}, R_{max}$ – произвольный и максимальный радиусы электрода, м; $q_{пл}$ – тепловой поток, Вт/м²; c_p – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); $m_{эл}$ – масса электродного металла, кг; $\alpha_{эл}$ – угол при вершине конуса электрода, град; $\tau_{пл}$ – время передачи тепла, с.

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						25
	Лист	№	Подпись	Дата		

Приведённое уравнение даёт характеризующий скорость фазового перехода специфический критерий

$$K_{ф.п.} = \frac{q_{пл}}{(c_p \Delta T)_{ш-пл}} \quad (4)$$

где ΔT – разность температур фаз, К.

Согласно данным, радиус большей части поверхности конуса на торце электрода превышает постоянную $[\sigma_{пл}/(\rho_m g)]^{0,5}$ ($\sigma_{пл}$ – коэффициент поверхностного или межфазного натяжения, Н/м; ρ_m – плотность металла плёнки, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²), поэтому наиболее существенное влияние на течение металла оказывают силы вязкости и тяжести. Поэтому число Рейнольдса можно представить в таком виде:

$$Re = \frac{Q_{эл} [(R_{эл}^{max})^2 - R_{эл}]}{2\pi \nu_m R_{эл} (R_{эл}^{max})^2} \quad (5)$$

где $Q_{эл}$ – объёмная скорость плавления, м³/с; ν_m – кинематическая вязкость металла в плёнке, м²/с;

На распределение скоростей в плёнке оказывает влияние наличие волн на внешней поверхности. Степень развития волн капиллярной природы характеризуется числом Капицы, которое для нашего случая имеет вид

$$Kp = \frac{\sigma_{пл}^3}{\nu_m^2 \rho_m^2 \Delta \rho_{м-ш} g \cos(\alpha_{эл}/2)} \quad (6)$$

где $\Delta \rho_{м-ш}$ – разность плотностей фаз, кг/м³.

На распределение скоростей в плёнке металла оказывает влияние и движение шлака в приэлектродном слое. Взаимодействие сил молекулярного трения и подъёмной силы обусловленной различием плотностей в разных точках неизотермического потока, характеризуется критерием (числом) Грасгофа [51]

$$Gr = \frac{9,8 R_{эл}^3}{\nu_{ш}^2 \sin^3(\alpha_{эл}/2)} \beta_{шл} \Delta T_{ш-пл(м)} \quad (7)$$

И СИМПЛЕКСОМ ВЯЗКОСТИ

$$K_B = \frac{v_{ш}^*}{v_{ш}} \quad (8)$$

характеризующим температурное изменение вязкости шлака у поверхности электрода ($v_{ш}$) по сравнению с его вязкостью в объёме ванны ($v_{ш}^*$). В уравнении (6) через символ (β), обозначен коэффициент объёмного расширения, K^{-1} .

Представленные критерии позволяют при равенстве их для образца и модели получить адекватную картину процесса плавления, протекающую при ЭШП. При выборе модельных сред возможно сильное различие значений числа Капицы для образца и модели. По мнению авторов [47], это не играет существенной роли, так как влияние поверхностных слоёв на структуру течения металла проявляется лишь соотношением $Re \approx Kp^{1/11}$.

Соответственно среду, имитирующую шлак и металл, следует выбирать исходя из равенства чисел критериев Грасгофа и соблюдая соотношение $\rho_{ш} / \rho_{м}$, удовлетворяющее условию равенства чисел Архимеда.

Физические свойства реальных материалов заимствованы из следующих работ: вязкость, плотность, коэффициент объёмного расширения и температуры шлаков приняты по данным [52,53,54], плотность и вязкость металлов по данным [55], удельная теплота плавления и теплоёмкость по данным [53], межфазные свойства по данным [52,56].

Учитывая, что рафинирование металла происходит при переплаве электродов различного состава и диаметра, с различной морфологией неметаллических включений в зависимости о предшествующего раскисления [57], то в качестве модельного прототипа (образца) приняли процесс течения плёнки при переплаве под флюсом АНФ-6 расходуемого электрода из технически чистого железа. Удельную скорость плавления электрода приняли $0,128 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$ [58], начальный угол при вершине конуса электрода 120 град.

Свойства сред, обычно используемые при моделировании металлургических процессов, приводятся в работе авторов [59]. Анализ этих данных, а также сравнение величин удельной теплоты плавления, и удельной теплоёмкости

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						27
	Лист	№	Подпись	Дата		

различных веществ показал, что обеспечить равенство представленных выше критериев можно, если использовать в качестве металла воду и водные растворы солей, а шлаки различной вязкости моделировать раствором масла ВМ-1 в керосине. Однако проведённое моделирование на этих средах показало, что они наиболее адекватно отражают процесс только при стационарном (без вращения) переплаве расходуемого электрода. Кроме того, даже при стационарном процессе приходилось для наблюдения за линиями тока жидкости в стекающую плёнку вводить краситель (трассер), образующий с жидкостью плёнки идеальный раствор. В качестве красящего вещества использовали растворы метилфиолета и перманганата калия. В связи с тем, что введение красителя непосредственно в объём плёнки нарушает структуру течения, раствор красящего вещества вводили при помощи шприцев и затем замораживали в объёме расходуемой заготовки из дистиллированной воды. О режиме течения жидкости обычно судят по распределению красящего вещества в потоке [60], однако малый объём и низкая концентрация красителя в объёме плёнки не позволили установить точно местоположение красящего вещества в объёме стекающей плёнки, а тем более место доставки капли в импровизируемую металлическую ванну [47].

Поэтому, исходя из выше изложенных соображений в качестве материала для переплава в модели был выбран легкоплавкий на основе висмута сплав Вуда (50 % Bi, 25% Pb, 12,5 % Sn и 12,5 % Cd) с температурой плавления 68 °С и плотностью 9,68 г/см³. А в качестве имитирующей шлаковую ванну жидкости выбран раствор глицерина (C₃H₈O₃) с температурой плавления 17,9 °С и плотностью 1,26 г/см³ [53,54]. Плотности выбранных материалов сопоставимы с плотностями реальных металла и флюса. Подбор этих материалов обеспечивает равенство критериев модели и реальных сред (техническое железо, флюс АНФ-6). Проведённый анализ показывает, что при использовании вышеназванных модельных сред процесс находится в области автомодельности. Основные критерии реального металла (образца) и модели представлены в таблице 1.

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						28
	Лист	№	Подпись	Дата		

Таблица 1 – Значения критериев образца и модели течения плёнки по торцу электрода

№ п/п	Критерий	Значения	
		Образец	Модель
1	Рейнольдса	0...101	0...101
2	Грасгофа	$2,74 \cdot 10^5$	$2,20 \cdot 10^5$
3	Капицы	$1,23 \cdot 10^8$	$9,31 \cdot 10^8$

2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

2.1 Методика проведения эксперимента

Сплав Вуда (ГОСТ 10928-90) (рисунок 4) в специальной емкости помещался в печь (рисунок 5), которая была нагрета до 150 °С.

После полного расплавления сплав Вуда разливался в специально подготовленную изложницу (рисунок 6) для получения электрода (рисунок 7).

После полного затвердевания электрод изымался из изложницы. Электрод имел следующие геометрические параметры: $d = 20$ мм, $l = 141$ мм.

Далее электрод помещался в держатель, затем погружался в ванну с глицерином, который имел температуру, равную 120 °С. Диаметр ванны с глицерином составлял 52 мм. Вращение осуществлялось с помощью двигателя 17HD40005-22В. В процессе работы установки производился замер траектории падения жидких капель сплава Вуда.

Рисунок 4 – Сплав Вуда

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						30
	Лист	№	Подпись	Дата		

Рисунок 5 - Печь ПКЛ 1,2-12

Рисунок 6 – Изложница

Рисунок 7 – Электрод

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						31
	Лист	№	Подпись	Дата		

Рисунок 8 – Установка

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						32
	Лист	№	Подпись	Дата		

2.2 Результаты эксперимента

Наблюдение за поведением оплавленной части расходуемого электрода, а также наблюдение места доставки электродного металла в зависимости от скорости вращения расходуемого электрода позволило получить данные, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Изменение места доставки электродного металла в зависимости от скорости вращения электрода и коэффициента заполнения кристаллизатора

ω , об/мин	30	45	60	75	90
l , см	0,9	1,4	2,1	2,5	3,0
	0,8	1,4	2,0	2,5	3,1
	0,9	1,5	2,0	2,6	3,0
l_{CP} , см	0,85	1,45	2,05	2,55	3,05

Необходимо отметить, что измеряемая величина (l) представляет собой расстояние между двумя противоположно упавшими каплями электродного металла при заданной скорости вращения электрода. Наглядно картину изменения места доставки электродного металла можно наблюдать, вращая заготовку с различной скоростью и фиксируя верхний горизонт наплавленного слитка.

Зависимость между скоростью вращения расходуемого электрода и числом капель электродного металла, сходящих с торца электрода за единицу времени (1 мин), показана в таблице 3. Для большей объективности данные, представленные в таблице 2 и характеризующие изменение места доставки электродного металла при изменении скорости вращения расходуемого электрода, целесообразно сравнить с результатами теоретического расчёта движения капли электродного металла в шлаке при вращении расходуемого электрода.

Такой расчёт показывает, что движение капли электродного металла в шлаковой ванне можно описать уравнением:

$$Y_{\text{max}} = \frac{4\pi R_{\text{эл}} r_{\text{кап}}^2 \rho_{\text{кап}} \omega}{9\eta_{\text{ш}}} \quad (9)$$

где Y_{\max} – максимальное расстояние от торца электрода до места падения капли электродного металла, м; $R_{\text{эл}}$ – радиус расходуемого электрода, м; $r_{\text{кап}}$ – радиус капли электродного металла, м; $\rho_{\text{кап}}$ – плотность электродного металла, кг/м³; $\eta_{\text{ш}}$ – динамическая вязкость шлака, Па·с.

Данная формула в нашем случае справедлива при скорости вращения расходуемого электрода $2 \text{ с}^{-1} < n < 3 \text{ с}^{-1}$, то есть тогда, когда торец расходуемого электрода получает и сохраняет плоскую форму.

Для осуществления расчета места доставки электродного металла по формуле (9) принимаем, что: $\eta_{\text{ш}} = (0,87 \dots 1,39) \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\rho_{\text{кап}} = 9680 \text{ кг/м}^3$.

Таблица 3 – Число оторвавшихся с оплаваемого торца капель электродного металла при изменении скорости вращения расходуемой заготовки

ω , об/мин	0	30	60	75	90	105	120
N_1 , шт	15	21	27	31	36	36	31
N_2 , шт	15	20	29	32	37	35	31
N_3 , шт	15	21	28	31	36	35	31
N_4 , шт	15	20	27	33	35	35	32
N_5 , шт	16	21	28	33	35	35	31

Таблица 4 – Теоретическое изменение места доставки электродного металла при вращении расходуемого электрода

n , с ⁻¹	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$r_{\text{КАП}}$, мм	0,90	0,70	0,60	0,50	0,45	0,40	0,60	0,80
$Y_{\text{МАХ}}$, мм	0	0,20	0,29	0,28	1,05	1,73	2,00	2,53

При переплаве электрода без вращения на модельной установке его оплаваемый торец сохранял характерную для электродов ЭШП конусную форму, с углом при вершине 100...120 град. Проведённый эксперимент позволил наглядно показать эволюцию торца расходуемого электрода. Можно сделать вывод о том, что форма торца расходуемого электрода, в процессе переплава с вращением, проходит три стадии превращений от конусной через плоскую до вогнутой.

Существование плоского торца расходуемого электрода наблюдается для электрода $\varnothing 20$ мм в области скорости вращения $2,5 \text{ с}^{-1} < n < 3,0 \text{ с}^{-1}$;

Увеличение скорости вращения расходуемого электрода приводит к постепенному увеличению угла при его вершине (уменьшению высоты оставшегося конуса). Полученные данные не противоречат материалам, представленным в работе [47].

При больших частотах вращения переплавляемого электрода в диапазоне 180 об/мин и более на модели наблюдали образование поверхности оплавления вогнутой формы, характерной для торцов расходуемых электродов при вакуумно-дуговом переплаве.

Дальнейшее увеличение скорости вращения снова приводит к образованию плоского торца, а затем оплаваемый торец вновь приобретает коническую форму. Однако рассматривать процесс при скорости вращения электрода более 200 об/мин представляется нецелесообразным.

Полученные в ходе экспериментов данные о месте доставки электродного металла позволяют говорить о том, что с увеличением частоты вращения расходуемого электрода увеличивается расстояние, которое преодолевает капля после отрыва от торца электрода (таблица 5).

Таблица 5 – Фактическое изменение места доставки электродного металла при вращении расходуемого электрода

$n, \text{ с}^{-1}$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$Y_{\text{MAX}}, \text{ мм}$	0	0,21	0,29	0,27	1,05	1,75	2,01	2,51

Из приведенных данных следует, что в области существования плоского торца наблюдается удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных данных. Из этого можно заключить, что приведенные выше аналитические выражения для прогнозирования места доставки электродного металла можно применять и для реальных процессов ЭШП. Внешний вид колец доставки капель, зафиксированный на модельной установке при прерывании переплава, при

различных скоростях вращения свидетельствует о значительном влиянии на этот параметр скорости вращения электрода.

В ходе проведения экспериментов на модельной установке было отмечено, что с увеличением частоты вращения расходуемого электрода наблюдается увеличение числа капель электродного металла, оторвавшихся с торца электрода за единицу времени. Однако при достижении определенной частоты вращения расходуемого электрода происходит уменьшение числа капель электродного металла, оторвавшихся от торца электрода за единицу времени.

По нашему мнению, это связано с образованием вогнутости на торце расходуемого электрода, а, следовательно, с увеличением радиуса и массы образующихся капель электродного металла.

Как видим, данные, полученные на модели, хорошо согласуются с реальным процессом.

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						36
	Лист	№	Подпись	Дата		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены существующие представления о способах внешних воздействий на электрошлаковый переплав с целью повышения тепловой эффективности процесса, активного влияния на рафинирующую способность и формирование фронта кристаллизации металлической ванны. Наиболее полно решить поставленные вопросы позволяет реализация ЭШП, с вращением расходоуемого электрода вокруг собственной оси.

Разработана методика физического «холодного» моделирования процесса плавления электрода в поле действия центробежных сил и с её применением исследован характер движения капель металла в шлаковой ванне.

Показано, что за счёт воздействия центробежных сил на плёнку жидкого металла достигается его периферийный сход с оплаваемого электрода и рассредоточение тепловых центров в шлаковой ванне и металлической ванне. Вращение электрода обеспечивает получение плоского торца электрода. Подтверждено, что технология с вращением электрода позволяет изменить фронт кристаллизации.

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

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						37
	Лист	№	Подпись	Дата		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клюев М.М. Metallургия электрошлакового переплава / Клюев М.М. , Каблуковский А. // – М. : Metallургия. – 1969. – 256 с.
2. Латаш Ю.В., Матях В.Н. Современные способы производства слитков особо высокого качества. – Киев: Наук. думка, 1987. – 336 с.
3. Хольцгрубер В., Плекингер Э. Metallургические основы электрошлакового переплава сталей // Черные металлы. – 1968. – № 12. – С.30–41.
4. Латаш Ю.В., Медовар Б.И. Электрошлаковый переплав. – М.: Metallургия, 1970. – 239 с.
5. Электрошлаковые печи / Патон Б.Е., Медовар Б.И., Ступак Л.М. и др. – Киев: Наук. думка, 1976. – 414 с.
6. Глебов А.Г., Мошкевич Е.И. Электрошлаковый переплав. – М.: Metallургия, 1985. – 343 с.
7. Поволоцкий Д.Я., Рошин В.Е., Мальков Н.В. Электрометаллургия стали и ферросплавов. – М.: Metallургия, 1995. – 592 с.
8. Латаш Ю.В. Некоторые особенности электрошлаковой плавки расходующих электродов большого сечения // Автоматическая сварка. – 1958. – №6. – С. 76–83.
9. Исследование модели плавления расходующего электрода / Ю. Кошима, М. Кашо, Т. Тойда и др. // В кн.: Электрошлаковый переплав. – Киев.: Наук. думка, 1976. – С. 414.
10. R.J. Roberts // Proceedings of the 2nd International Symposium on Electrosly Remelting Technology, Part II, Mellon Institute, Pittsburgh, September 23–25, 1969.
11. Модано О. Метод подготовки и соединения электродов для электрошлакового переплава // В кн.: Электрошлаковый переплав. – Киев: Наук. думка, 1973. – С. 60–74.
12. Metallургические и экономические аспекты современных заводов ЭШП, основанные на результатах, полученных на установках ЭШП фирмы «Гебрюдер Бёлер» / В. Хольцгрубер, П. Махнер, Х. Кубиш и др. // В кн.: Электрошлаковый переплав. – Киев: Наук. думка, 1973. – С. 33–50 с.

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						38
	Лист	№	Подпись	Дата		

13. Выбор рациональных значений геометрических параметров плавильного пространства и электродов с использованием математической модели ЭШП / И.В. Бочарников, Ю.А. Скоснягин, Е.Д. Гладкий и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. – 1990. – № 2. – С. 22–26.

14. Анодное разрушение кристаллизаторов при ЭШП / Б.И. Медовар, В.Л. Артамонов, В.М. Баглай и др. // В кн.: Рафинирующие переделы. – Киев: Наук. думка, 1974. – С. 35–40.

15. Лучек Дж., Робертс Р. Дж. Оценка факторов, влияющих на эффективность печей ЭШП // В кн.: Электрошлаковый передел. – Киев: Наук. думка, 1975. – Вып. 3. – С. 157–164 с.

16. Волков А.Е., Лактионов А.В., Шалимов А.Г. Перспективы использования электрошлаковых технологий // Электрометаллургия. – 1998. – №1. – С.35–37.

17. Патон Б. Е., Медова Л. Б. Электрошлаковому переделу 50 лет / Б.Е. Патон, Л.Б. Медова // Электрометаллургия. – 2008. – №11. – С. 32–36.

18. И. В. Протокилов, Физическое моделирование капельного переноса электродного металла при ЭШП с наложением импульсных магнитных полей / И.В. Протокилов, В.Б. Порохонько // Современная металлургия. – 2017. – №3. – С. 9–13.

19. Чуманов И. В. Повышение тепловой эффективности электрошлакового передела и качества металла путем воздействия на процессы плавления, транспортировки и кристаллизации вращением расходуемого электрода: дис. . . . канд. техн. наук / Чуманов Илья Валерьевич. – Чел., 2002. – 322 с.

20. Свенчанский А.Д., Смелянский М.Я. Электрические промышленные печи. – М.: Энергия, 1970. – 264 с.

21. Егоров А.В. Расчёт мощности и параметров электроплавильных печей. – М.: МИМиС, 2000. – 272 с.

22. Чуманов И.В., Рошин В.Е. Особенности моделирования электрошлакового передела на прозрачных моделях // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 1998. – №8. – С.30–36.

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						39
	Лист	№	Подпись	Дата		

23. Чуманов И.В. , Чуманов В.И. Расчёт движения капли электродного металла в шлаке / И.В. Чуманов, В.И. Чуманов // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 1995. – №12. – С. 22–23.

24. Чуманов И.В. Влияние вращения расходуемого электрода при ЭШП на анизотропию свойств получаемого слитка / Чуманов И.В. , Матвеева М.А. , Сергеев Д.В. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2019. – № 2. – С. 91–96

25. Б. И. Медовар, Физическое моделирование процесса ЭШП расходуемых электродов / Медовар Б.И. , Бойко Г.А. , Сердюкова В.П. // Пробл. спец. электрометаллургии. – 1978. – № 9. – С. 38–48

26. Ю. Кожима, Исследование модели плавления расходуемого электрода при ЭШП / Ю. Кожима, М. Като, Т. Тойода, М. Иноце // Электрошлаковый переплав. –1975. – № 3. – С. 54–62.

27. Т. Гаммаль, Влияние электрического тока на капле образование при ЭШП / Гаммаль Т. , Хаген И. , Мюлленберг Р. // Электрошлаковый переплав. – 1978. – №9. – С. 62–69

28. А.А. Троянский, Особенности процессов массообмена в пленочной стадии процесса ЭШП / А.А. Троянский, А.Х. Дымнич, Л.Б. Медовар, А.Д. Рябцев // Современ. электро-металлургия. – 2005. – № 4. – С. 6–9

29. Клюев М. М. , Металлургия электрошлакового переплава / Клюев М.М., Каблуковский А. // – М. : Металлургия. –1969. – 256 с.

30. В.П. Куделькин, Воздействие ультразвуковых колебаний на капельный перенос металла при электрошлаковом переплаве / В.П. Куделькин, М.М. Клюев, С.И. Филиппович. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1969. – № 3. – С. 54–59

31. Murgaš M, Electro-slag Remelting of High-Speed Steel Using a Magnetic Field. / Murgaš M, Chaus A S, Pokusa A, et al. // ISIJ International. – 2000. – V. 40, №10. – P. 980–986

32. Poole G.M. Numerical Modeling of Macro-segregation in Binary Alloys Solidifying in the Presence of Electromagnetic Stirring. / Poole G. M., Heyen M.,

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						40
	Лист	№	Подпись	Дата		

Nastac L., et al. // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2014. –V. 45, №10. – P. 1834–1841

33. Choudhary M. Some general characteristics of heat and fluid flow phenomena in electric melting and smelting operations. / Choudhary M. , Szekely J. // Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. – 1981. –V. 90. – P. 164–173.

34. Dilawari A. H. Calculation of current-voltage relationships and heat-generation patterns in electro-slag refining process. / Dilawari A H, Szekely J. // Iron Making and Steelmaking. – 1977. – V. 4, №5. – P. 308–312

35. X. Shi, / Effect of mold rotation on the bifilar electroslag remelting process / X. Shi, L. Chang, J. Wang // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2015. – V. 22, №10. – P. 1033–1042

36. Pat. (JP) № 52124423 (A), Stirring up method of molten slug in casting of electro slug / Setsuji Minehisa, Tatsuo Inui, Yoshinori Shiraki // опубл. 19.10.1977

37. H. Wang, Influences of the Transverse Static Magnetic Field on the Droplet Evolution Behaviors during the Low Frequency Electroslag Remelting Process / H. Wang, Y. Zhong, Q. Li, W. Li, W. Ren, Z. Lei, Z. Ren, Q. He // ISIJ International. – 2017. – V. 57, № 12. – P. 2157–2164

38. Медовар Л. Б. , Исследование влияния параметров двухконтурной схемы ЭШП на размеры и форму металлической ванны / Л. Б. Медовар, А. К. Цыкуленко, А. В. Чернец и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. – 2000. – № 4. – С. 3–7

39. Цыкуленко А. К. , Некоторые новые области применения электрошлаковой технологии / Цыкуленко А. К. , Медовар Л. Б. , Чернец А. В. // Пробл. спец. электрометаллургии. – 2002. – № 2. – С. 9–11.

40. Медовар Л. Б. , Электрошлаковые технологии получения крупных кузнечных слитков / Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, А. П. Стовпченко и др. // Современ. электрометаллургия. – 2010. – № 3. – С. 5–10.

41. Медовар Л. Б. , ЭШП и современные подходы к управлению затвердеванием крупного кузнечного слитка / Л. Б. Медовар, А. П. Стовпченко, А. Н. Головачев, Б. Б. Федоровский // Там же. – 2013. – № 3. – С. 12–18.

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						41
	Лист	№	Подпись	Дата		

42. Кусков Ю. М. Электрошлаковый процесс без расходуемого электрода с использованием некомпактного присадочного материала // Пробл. спец. электрометаллургии. – 1992. – № 2. – С. 28–32

43. Томиленко С. В. , Устройство электромагнитного перемешивания для токоподводящих кристаллизаторов, обеспечивающее регулируемое вращение шлаковой ванны / Томиленко С. В. , Кусков Ю. М. , Ус В. И. // Пробл. спец. электрометаллургии. – 1993. – № 3. – С. 16–19

44. Ю. М. Кусков. Торцевая электрошлаковая наплавка электродом большого сечения в токопроводящем кристаллизаторе. / Ю. М. Кусков, В. Г. Соловьев, В. А. Жданов // Автоматическая сварка. – 2017. – №11. – С. 40–45.

45. Kutateladse S.S., Gododin J.J. Heat transfer in bilm condensation of ruovli moving vapour. – International Journde of heat and mass transfer. – 1979. – №12. – p. 1593–1599.

46. Медовар Б.И., Бойко Г.А. Сердюков В.П. Физическое моделирование процесса ЭШП расходуемых электродов // Пробл. спец. электрометаллургия. – 1978. – № 9. – С. 38–48.

47. Иваненко О.Г. Исследование процесса плёночного течения и капельного переноса при электрошлаковом переплаве: Дис. ... канд.техн.наук. – Челябинск, 1981. – 146 с.

48. Меликов В.В., Герасимов В.Н. О физическом моделировании электрошлаковых процессов //В кн.: Современные проблемы электрометаллургии стали, Труды II Всесоюзной конференции. – Челябинск.: ЧПИ, 1975 – №166. – С. 167–174.

49. Пентигов И.В., Генис И.А. Исследование электрических полей одноэлектродных печей ЭШП // В кн.: Пробл. спец. электрометаллургия. – 1978. – № 8. – С. 10–21

50. Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М. Теплообмен в жидкостных плёнках. – Киев.: Теплотехника, 1072. – 194.

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						42
	Лист	№	Подпись	Дата		

51. Грухман А.А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1963. – 254 с.
52. Клюев М.М., Каблуковский А.Ф., Metallургия электрошлакового переплава. – М.: Metallургия, 1969. – 256 с.
53. Таблицы физических величин. Справочник под ред. Киксина И.К. – М.: 1976. – 1006 с.
54. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. – М.: Наука. – 1965. – 248 с.
55. Бертман А.А., Самарин А.М. Свойства расплавов железа. – М.: Наука. – 1969. – 277 с.
56. Юдина В.М., Явойский В.И. Смачивание и ассимиляция неметаллических включений окисными и фторидными шлаками // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 1966. – №3.– С.15–21.
57. Михайлов Г.Г., Поволоцкий Д.Я. Термодинамика раскисления стали. – М.: Metallургия. – 1993. – 144 с.
58. Жмойдин Г.И. Гидродинамика течения металла с плавящегося в шлаке электрода // В кн.: Восстановление и рафинирование железа. – М.: Наука, –1968. – С. 91–104.
59. Гречко А.В., Нестеренко Р.Д., Кудинов Ю.А. Практика физического моделирования на металлургическом заводе. – М.: Metallургия. – 1976. – 224 с.
60. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматиздат, 1959. – 669 с.
61. Чуманов В.И., Чуманов И.В. Влияние вращения расходуемого электрода на производительность процесса при электрошлаковом переплаве // Пробл. спец. электрометаллургии. – 1997. – № 4. – С. 8–10.

					22.04.02.2021.848.00.00 ПЗ ВКР	Лист
						43
	Лист	№	Подпись	Дата		