

*На правах рукописи*



Сергеев Дмитрий Владимирович

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛОЙ ЗАГОТОВКИ МЕТОДОМ  
ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА ПО ОДНОЭЛЕКТРОДНОЙ  
СХЕМЕ**

Специальность 2.6.2 - Metallургия черных, цветных и редких металлов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
2023

Диссертация выполнена на кафедре «Техника и технологии производства материалов» филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» в г. Златоусте.

**Научный руководитель:** **Чуманов Илья Валерьевич**, доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Савинов Александр Сергеевич**, доктор технических наук, доцент, директор института металлургии, машиностроения и материалобработки ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

**Аникеев Владимир Викторович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара

**Ведущая организация:** Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург.

Защита состоится «22» марта 2023 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.437.01 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ(НИУ), главный корпус, ауд. 1001.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ (НИУ), Ученый совет. Тел. (3513) 66-58-29, e-mail: [dazlatoust@inbox.ru](mailto:dazlatoust@inbox.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» и на сайте: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243701-d-21229801/sergeev-dmitriy-vladimirovich>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук, доцент



Шабурова  
Наталья Александровна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Полые стальные заготовки занимают значительную часть рынка металлопродукции. Данный вид заготовок применяется для деталей различного назначения: обечайки, венцы, трубы, сосуды высокого давления, шестерни и т.д., изготовление которых из металла, подвергнутого горячей деформации, затруднительно.

Металл, полученный методом электрошлакового переплава (ЭШП) в литом состоянии, сопоставим по ряду параметров металлу открытой выплавки, подвергнутому глубокой деформации. В связи с этим разработан ряд конструктивных и технологических решений по получению полых заготовок методом ЭШП. На данный момент наибольшее распространение в качестве основной технологии получила многоэлектродная схема. Несмотря на свое широкое распространение, технология имеет ряд недостатков, связанных с большим числом обслуживающего персонала, наличием машин для правки электродов и соблюдением соосности рабочих элементов. Указанные недостатки усугубляются тем, что получение электродов небольшого сечения весьма затратно в сравнении с электродами большого сечения.

Альтернативой традиционной может служить технология получения полых заготовки по одноэлектродной схеме выплавки с прошивающим дорном. Данная схема не получила широкого применения из-за невозможности исключения попадания капель электродного металла на прошивающую часть дорна, что приводило к его зарастанию и не позволяло получать заготовки заданной геометрии. Таким образом, поиск решений, позволяющих изменить место доставки электродного металла и исключить его попадание на прошивающую часть дорна, становится актуальной научно-технической задачей. Анализ технологических решений изменения места доставки электродного металла в жидкую металлическую ванну показал, что наиболее перспективной является технология с вращением расходуемого электрода. Данная технология позволяет изменить место доставки электродного металла в результате действия центробежных сил в пленке жидкого металла на оплавленной поверхности, что приводит к радиальному течению металла, вследствие чего формирование и отрыв капель жидкого металла происходит с периферии поверхности расходуемого электрода.

## **Степень разработанности темы исследования**

Вопрос, связанный с получением полых заготовок методом электрошлакового переплава, решается на протяжении всего периода существования процесса. Сегодня предпочтение отдается установкам с многоэлектродным подключением по бифилярным схемам, среди исследователей этого направления следует выделить работы Б.И. Медовара, Б.Е. Патона, Ю.В. Латаша и др.

Работы, направленные на изучение влияния вращения расходуемого электрода при реализации классической схемы электрошлакового переплава для получения цельной заготовки, показали, что наблюдается уменьшение глубины жидкой металлической ванны и образование более плоского фронта кристаллизации в результате смещения теплового центра. Также за счет изменений условий каплеобразования обеспечивается повышение рафинирующей способности процесса.

## **Цель работы**

Разработка технологии получения полых заготовки методом электрошлакового переплава по одноэлектродной схеме.

Для достижения данной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Выбран и обоснован технологический подход к достижению цели.
2. Проведено физическое моделирование с использованием прозрачных сред.
3. Разработана математическая модель процесса.
4. Разработана методика управления процессом.
5. Разработана конструкторская документация и проведена модернизация электрошлаковой установки А-550 на производственных мощностях ООО РМЗ «Нихард-Сервис».
6. Проведены опытные выплавки заготовок и исследованы их механические свойства на соответствие требованиям ООО «ЮУрМК».

## **Научная новизна и теоретическая значимость**

1. Впервые показано, что в случае вращения расходуемого электрода тепловой центр трансформируется в теплое кольцо, у которого внутренний периметр располагается на некотором расстоянии от оси формируемого слитка, что обусловлено величиной центробежных сил.

2. Разработана математическая модель изменения гидродинамической обстановки в шлаковой и металлической ваннах при ЭШП с вращением расходуемого электрода вокруг собственной оси, показывающая, что траектория движения капель жидкого металла в шлаковой ванне зависит от пропорционального отношения квадрата скорости вращения расходуемого электрода к силе подводимого тока.

3. Выявлена зависимость влияния размеров прошивающего дорна, кристаллизатора и расходуемого электрода на скорость его вращения и место доставки электродного металла в жидкую металлическую ванну.

### **Практическая значимость работы**

1. Методом физического моделирования подтверждена возможность воздействием центробежных сил менять гидродинамическую обстановку в шлаковой ванне, обеспечивать радиальное течение жидкого металла на оплавленном торце и смещать тепловой центр в металлической ванне.

2. Создана компьютерная программа «Тепловая картина кристаллизующейся полый заготовки при ЭШП», позволяющая определять необходимые технологические параметры (величину тока, скорость вращения) для каждого конкретного случая реализации предлагаемой технологии.

3. Разработана конструкторская документация и проведена модернизация полупромышленной установки электрошлакового переплава А-550 для реализации технологии получения полый заготовки по одноэлектродной схеме.

4. Проведены опытные переплавы с вращением расходуемого электрода для получения полый заготовки с использованием прошивающего дорна на постоянном и переменном токе.

5. Результаты, представленные в диссертационной работе, внедрены и используются 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.

### **Методология и методы исследования**

Физическое моделирование проводилось с использованием моделирующих жидкостей, обеспечивающих равенство критериев подобия модели и реального процесса. Для анализа изменения гидродинамики процесса и тепловой картины использованы компьютерные программы: Matcad, MatLab, Ansys Fluent. В

экспериментальных исследованиях использована модернизированная полупромышленная установка электрошлакового переплава А-550. Для анализа микроструктуры и физико-механических свойств полученных слитков использована материальная база кафедры ТиТМ филиала ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в г. Златоусте. Оценка проводилась в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение», ГОСТ 9454-78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб», ГОСТ 5640-20 «Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры».

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты холодного моделирования, подтверждающие, что наряду с изменением гидродинамической обстановки в шлаковой ванне и течением жидкого металла на оплавленном торце происходит трансформация теплового центра в металлической ванне в тепловое кольцо.

2. Математическая модель теплового поля в шлаковой и металлической ваннах при воздействии на него центробежных сил.

3. Зависимости влияния диаметров прошивающего дорна, кристаллизатора и расходоуемого электрода на скорость вращения электрода и место доставки электродного металла в жидкую металлическую ванну.

4. Результаты исследования ударной вязкости, временного сопротивления разрыву, предела текучести, твердости и микроструктуры заготовок, полученных на переменном и постоянном токах.

### **Степень достоверности**

Достоверность обеспечивается надёжностью исходных данных, применением современных методов математического моделирования, использованием программных аппаратов и исследованием процессов с соответствием полученных результатов известным теоретическим закономерностям и данным по изучаемой тематике других исследователей, а также ответственным подходом автора к выполнению исследований и обработке первичных данных.

### **Апробация результатов**

Материалы по теме исследований были доложены и апробированы на следующих конференциях: Международная научно-практическая конференция.

Западно-Сибирский научный центр. «Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего», г. Кемерово, 30 ноября 2016; 70-я научная конференция «Наука ЮУрГУ», г. Челябинск, 25 апреля–4 мая 2018; Пятый междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии», г. Москва, 30 октября–01 ноября 2019; VI Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации», г. Екатеринбург, 20–3 мая 2019; 72-я научная конференция «Наука ЮУрГУ», г. Челябинск, 21–23 апреля 2020; XVI Международный конгресс сталеплавильщиков и производителей металла (ISCON-2021), г. Екатеринбург, 25–27 мая 2021; Международная научно-практическая конференция «Материаловедение и металлургические технологии», г. Сочи, 4–10 сентября 2022; Международная научная конференция «Физико-химические основы металлургических процессов имени академика А.М. Самарина», г. Выкса, 10–14 октября 2022.

**Личный вклад автора.** Научно-теоретическое обоснование, формирование цели и направления исследований, постановка задач, разработка и осуществление модернизации электрошлаковой установки А-550. Получение полых заготовок на модернизированной установке, их исследование, анализ и обработка результатов, выявление закономерностей, апробация результатов исследований, написание научных публикаций по теме диссертации, инициирование выступлений с докладами на научно-практических конференциях, подготовка текста диссертации.

**Публикации.** По результатам диссертационных исследований опубликовано 14 печатных работ, включая 5 работ в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией и индексируемых в базе данных Scopus, 2 патента на изобретения и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, изложена на 126 страницах машинописного текста, включающего 30 рисунков, 18 таблиц, списка использованных источников из 96 наименований отечественных и зарубежных источников, 3 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проанализированы способы и технологические решения, используемые для производства полых заготовок методом ЭШП, с указанием их преимуществ и недостатков. Данный анализ показал, что наиболее привлекательным направлением представляется совершенствование технологии получения полых заготовки по одноэлектродной схеме с прошивающим дорном. Для этого следует решить проблемы, связанные с зарастанием дорна электродным металлом и уменьшением теплового воздействия на его прошивающую часть. Как показывает проведенный анализ, наиболее полно эти проблемы можно решить, применив технологию вращения расходуемого электрода вокруг собственной оси при ЭШП. Реализация данной технологии обеспечивает условия доставки электродного металла, минуя головную часть прошивающего дорна, с одновременным изменением направления движения шлака с нисходящего на восходящий, тем самым влияя на тепловую картину процесса. Помимо этого, следует ожидать смещения направления потока электронов в шлаковой ванне относительно оси прошивающего дорна, что также снизит негативное влияние, оказываемое на прошивающий дорн при реализации одноэлектродной схемы.

**Вторая глава** состоит из трёх разделов. Первый раздел посвящен физическому моделированию и анализу полученных данных. Плотность выбранных материалов для моделирования сопоставлялась с плотностями реального металла и флюса. Использование этих материалов обеспечило равенство критериев подобия модели и реальных сред. Наблюдение за процессом в ходе физического моделирования подтвердило, что при наложении центробежных сил происходит изменение направления движения шлака с нисходящего на восходящий. В связи с тем, что использовался электрод малого сечения (20 мм), моделирование проводилось при высоких скоростях вращения электрода от 0 об/мин до 450 об/мин с шагом 150 об/мин. По мере увеличения скорости вращения расходуемого электрода течение жидкого металла на оплаиваемой поверхности электрода все больше приобретало радиальное направление (рисунок 1).

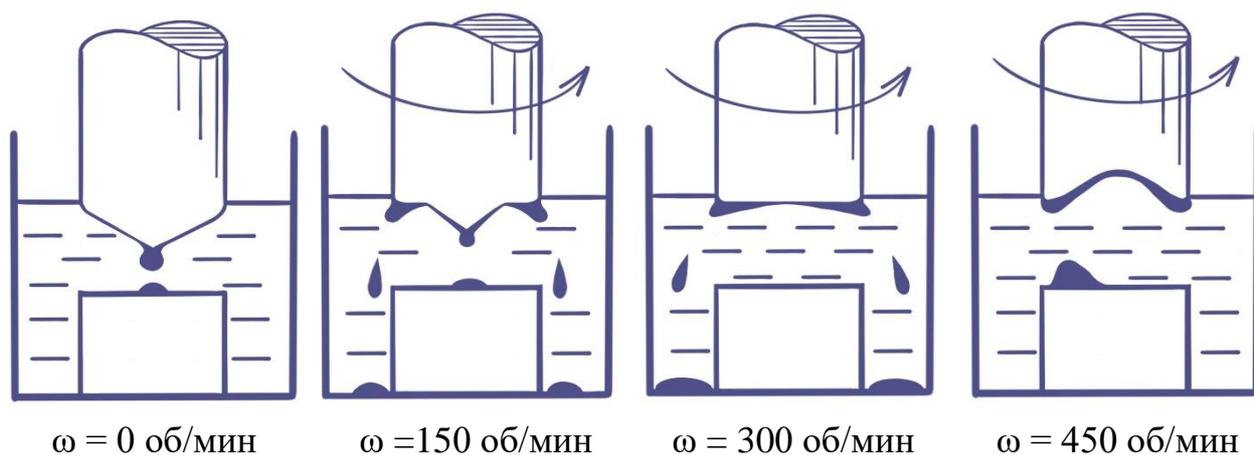


Рисунок 1 – Ход моделирования,  $\omega$  – скорость вращения электрода, об/мин

Отмечено существование промежуточной стадии, при которой течение объема металла на торце расходуемого электрода наблюдалось как в радиальном направлении, так и в осевом. Достижение определенной скорости вращения (300 об/мин) позволило приобрести центробежным силам величину, при которой обеспечивается течение всего объема жидкого металла в радиальном направлении. В данных условиях оплаваемая поверхность расходуемого электрода имеет плоскую форму.

Дальнейшее увеличение скорости вращения до 450 об/мин привело к изменению оплаваемой поверхности электрода с плоской на сферическую. При этом течение жидкого металла наблюдалось по внутренней поверхности сферы, сопровождаемое накоплением большого объема в нижней части сферы. Отрыв металла с оплаваемой поверхности в данном случае происходил в виде капли гораздо большего объема, чем в предыдущих случаях. В ходе моделирования осуществлялся отбор капель при скоростях вращения электрода:  $\omega = 0$  об/мин,  $\omega = 300$  об/мин,  $\omega = 450$  об/мин.

Результаты измерения размера и массы капель в зависимости от скорости вращения представлены в таблице 1.

Полученные результаты показали возможность путём воздействия центробежных сил менять гидродинамическую обстановку в шлаковой ванне и обеспечивать радиальное течение жидкого металла на оплаваемом торце.

Следующим этапом моделирования являлось наблюдение за поведением потока электронов в подэлектродной зоне при изменившейся гидродинамической обстановке в шлаковой ванне. Отклонения потоков электронов при полном радиальном течении металла имитировали нити,

снисходящие с оплаваемой поверхности. Моделирование показало смещение потока относительно оси расходуемого электрода за пределы прошивающего дорна, что, тем самым, дополнительно позволяет снизить тепловое воздействие на него (рисунок 2).

Таблица 1 – Результаты измерения размера и массы капель

| № п/п                        | $\omega = 0$ об/мин |                | $\omega = 300$ об/мин |                | $\omega = 450$ об/мин |                |
|------------------------------|---------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|
|                              | Диаметр капли, мм   | Масса капли, г | Диаметр капли, мм     | Масса капли, г | Диаметр капли, мм     | Масса капли, г |
| 1                            | 4,8                 | 0,51           | 3,2                   | 0,20           | 8,2                   | 1,90           |
| 2                            | 4,8                 | 0,50           | 3,2                   | 0,21           | –                     | –              |
| 3                            | 5,3                 | 0,78           | 3,1                   | 0,18           | –                     | –              |
| 4                            | 4,9                 | 0,55           | 3,1                   | 0,18           | –                     | –              |
| 5                            | 6,1                 | 0,82           | 3,3                   | 0,24           | 10,3                  | 1,04           |
| 6                            | 5,1                 | 0,63           | 3,3                   | 0,23           | –                     | –              |
| 7                            | 5,0                 | 0,55           | 3,1                   | 0,17           | –                     | –              |
| 8                            | 5,0                 | 0,60           | 3,1                   | 0,17           | –                     | –              |
| 9                            | 5,2                 | 0,71           | 3,2                   | 0,22           | –                     | –              |
| 10                           | 6,0                 | 0,80           | 3,3                   | 0,23           | 10,3                  | 1,03           |
| $X_{cp}$                     | 5,22                | 0,64           | 3,19                  | 0,20           | 9,6                   | 1,3            |
| Форма оплаваемой поверхности | Коническая          |                | Плоская               |                | Вогнутая              |                |

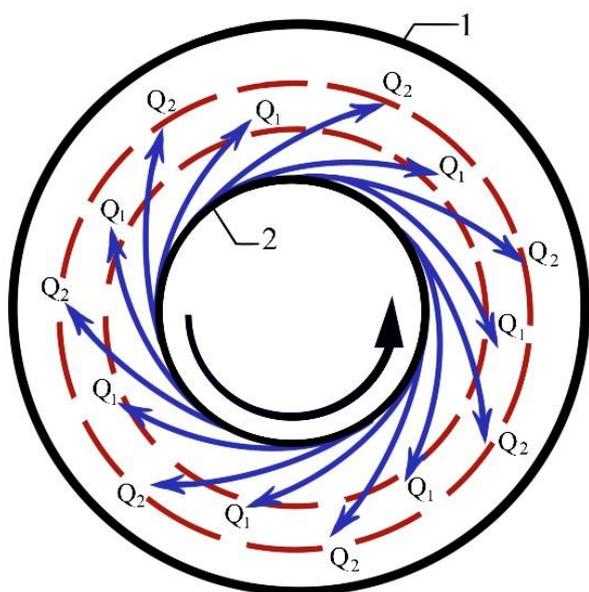


Рисунок 2 – Схема поведения потока электронов и каплей электродного металла: 1 – кристаллизатор; 2 – вращающийся электрод;  $Q_1$  – тепло, вносимое потоком электронов;  $Q_2$  – тепло, вносимое каплями электродного металла

Таким образом, результаты холодного моделирования показали возможность трансформации теплового центра в тепловое кольцо под действием центробежных сил.

Так как шлаковый пояс является электропроводной средой, в которой имеют место течения под действием электромагнитных сил, второй раздел посвящен оценке влияния на процесс центробежной и электромагнитной сил.

На основе уравнений Навье-Стокса создана математическая модель, расчет по которой показал, что характер течения в шлаковой ванне ЭШП можно оценить по порядку величины отношения центробежной и электромагнитной сил:

$$\beta = \frac{f_{ц}}{f_{м}} = \frac{\pi^2 \cdot \rho \cdot R^4 \omega_0^2}{\mu_0 \cdot I^2}. \quad (1)$$

При  $\beta < 1$  характер течения и гидродинамику в шлаковой ванне определяет электромагнитная сила, а при  $\beta > 1$  существенной оказывается центробежная сила. Расчеты производились для электрода диаметром 60 мм. На рисунке 3 представлена зависимость соотношения центробежной и электромагнитной сил в зависимости от скорости вращения электрода при разных токах, проходящих через него.

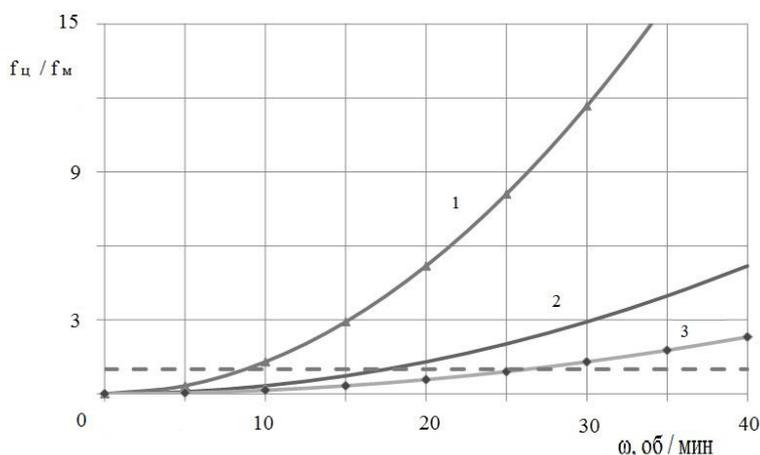


Рисунок 3 – Зависимость отношения центробежной и электромагнитной сил при разных токах через него: 1 – 0,5 кА; 2 – 1 кА; 3 – 1,5 кА (пунктиром показано значение  $\beta = 1$ )

Из рисунка видно, что для тока 1,5 кА при скорости вращения более 30 об/мин решающую роль оказывает центробежная сила. При частоте вращения этого электрода менее 25 об/мин более значимыми будут электромагнитные

силы, которые и будут определять характер течения шлаковой ванны (для электрода  $\varnothing 40$  мм).

Третий раздел главы посвящен прогнозированию изменения теплового поля в ходе наложения центробежных сил на расходуемый электрод. Математическая модель показала, что в случае вращения расходуемого электрода тепловой центр представляет собой кольцо, у которого внутренний периметр располагается на некотором расстоянии от оси формируемого слитка, определяемом величиной центробежных сил.

Моделируемая схема электрошлакового переплава с вращающимся электродом и внутренним кристаллизатором приведена на рисунке 4.

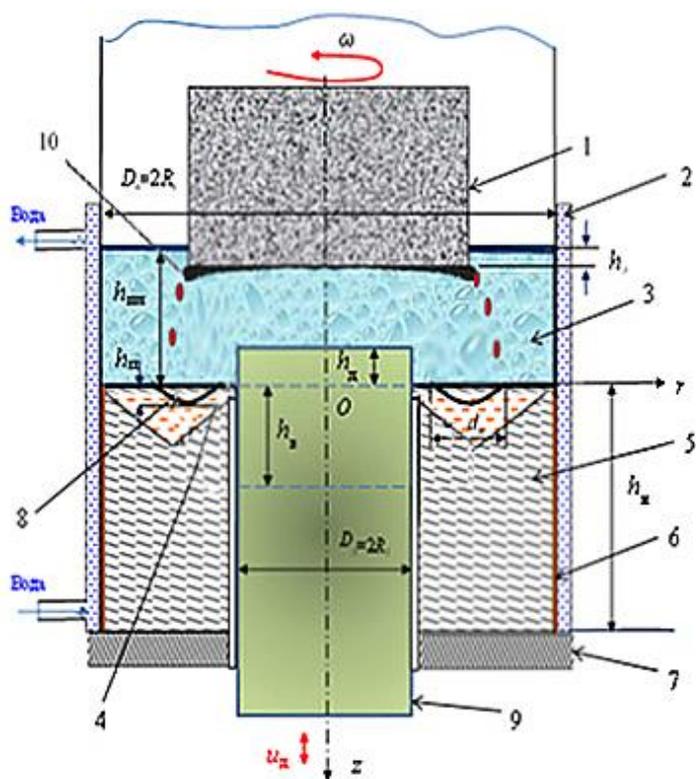


Рисунок 4 – Визуальная схема модели:

- 1 – вращающийся расходуемый электрод;
- 2 – кристаллизатор;
- 3 – флюс; 4 – ванна жидкого металла;
- 5 – закристаллизовавшийся металл; 6 – гарнисаж;
- 7 – поддон; 8 – место доставки электродного металла; 9 – дорн;
- 10 – пленка жидкого металла

При моделировании теплового поля металлической ванны печи ЭШП с дорном с вращающимся электродом был принят ряд допущений и ограничений:

– дорн имеет форму не усеченного конуса, а цилиндра диаметром  $D_d$  или радиусом  $R_d = D_d / 2$ . Это вполне допустимо, так как угол конуса цилиндра составляет  $1^\circ$ ;

– тепловой режим металлической ванны – непрерывный процесс подачи металла и его кристаллизация при этом положении линий ликвидуса и солидуса в рассматриваемой системе координат – остается неизменным;

- не учитываются конвективные течения металла в ванне;
- все капли металла, попадающие в ванну, имеют одинаковый средний диаметр, скорость и температуру;
- ЭШП с вращающимся электродом используется в режиме периферийного отрыва капель металла от его оплавленного торца. Это позволяет локализовать наиболее вероятное место падения капель на металлическую ванну;
- диаметр электрода больше диаметра дорна  $D > D_d$ ;
- высота получаемого слитка  $h_m$  существенно больше глубины жидкой ванны  $h_B$ .

С учетом принятых допущений расчетная область металлической ванны  $ABCD$  и основные ее размеры показаны на рисунке 5.

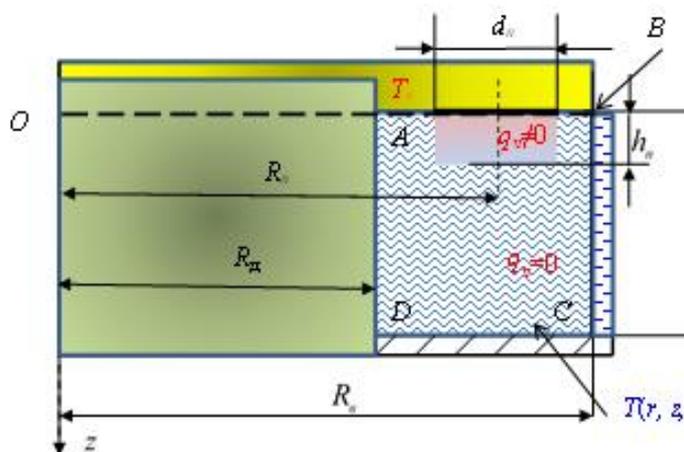


Рисунок 5 – Расчетная область жидкометаллической ванны

В ходе моделирования выведена аналитическая зависимость, позволяющая рассчитать скорость подачи дорна:

$$u_d = \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{D^2}{(D_k^2 - D_d^2)} V_{\text{п}}, \quad (2)$$

где  $u_d$  – скорость подачи дорна, мм/с;  $\rho_1$  – плотность электродного металла, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2$  – плотность затвердевшего металла, кг/м<sup>3</sup>;  $D$  – диаметр электрода, мм;  $D_k$  – диаметр кристаллизатора, мм;  $D_d$  – диаметр дорна, мм;  $V_{\text{п}}$  – скорость плавления электродного металла, мм/с.

На основе математической модели создана компьютерная программа с использованием среды разработки Matlab version R2017a, позволяющая на основе геометрических и технологических параметров ЭШП определять

необходимые скорости подачи прошивающего дорна и вращения расходуемого электрода с визуализацией тепловой картины процесса (рисунок 6).

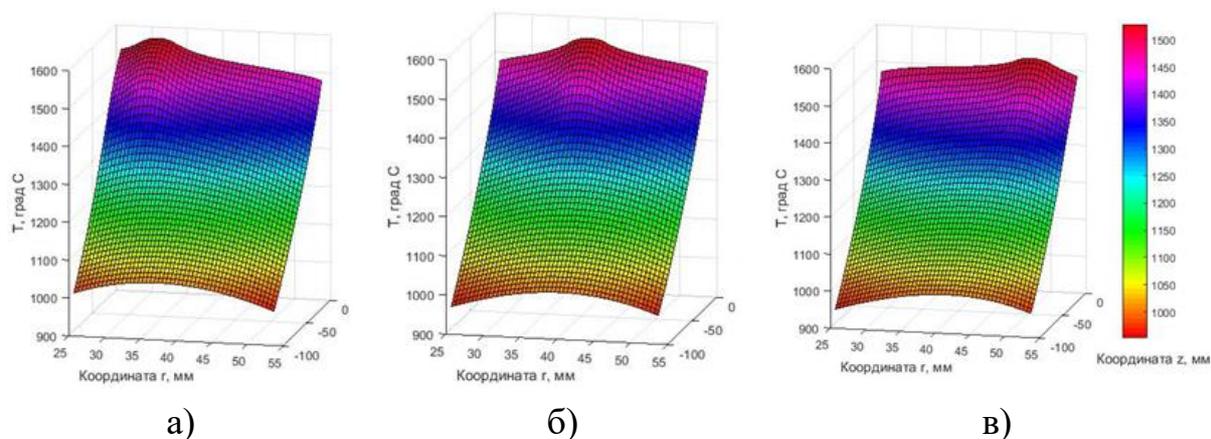


Рисунок 6 – Визуализация температурного поля кристаллизующегося слитка в виде трехмерной поверхности при различном месте доставки электродного металла: а) –  $R_{п}=70$  мм; б) –  $R_{п}=77$  мм; в) –  $R_{п}=87$  мм

**Третья глава** состоит из трех разделов. В первом разделе представлен процесс модернизации, создания дополнительных узлов и органов управления полупромышленной печи А-550 с последующим описанием опытных переделов по получению полых и цельных слитков ЭШП с вращением расходуемого электрода на производственных мощностях ООО РМЗ «Нихард-Сервис». Следует отметить, что проведение переделов каких-либо затруднений не вызвало. После выгрузки заготовки гарнисаж легко отделялся с поверхности. Визуальный осмотр показал бездефектное состояние как наружной, так и внутренней поверхностей полученных заготовок.

Второй раздел посвящен исследованию образцов из выплавленных на переменном токе полых заготовок стали марки 30X13 (слиток 1.21). В качестве эталонов сравнения были получены слитки сплошного сечения той же марки стали с вращением расходуемого электрода (слиток 1.11).

Чтобы оценить влияние технологии получения полой заготовки на макроструктуру отливки определялось расстояние между осями дендритов второго порядка ( $L_2$ ). Темплеты вырезались в осевом направлении. Выявление структуры проводилось реактивом Обергоффера. Измерение проводилось в центральной части слитков (рисунок 7) и на  $\frac{1}{2}$  радиуса (рисунок 8). В случае формирования полого слитка  $L_2$  меньше, чем у слитка сплошного сечения на

23,6 %, что указывает на измельчение структуры отливки при реализации технологии получения полой заготовки.

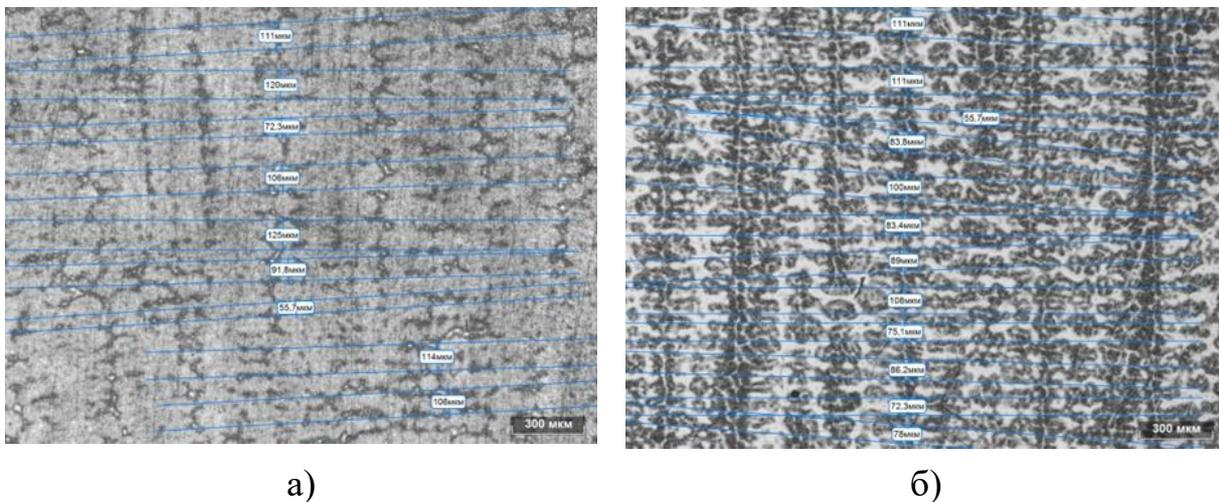


Рисунок 7 – Микроструктура центральной области слитков:

а) – слиток 1.11; б) – слиток 1.21;  $\times 50$

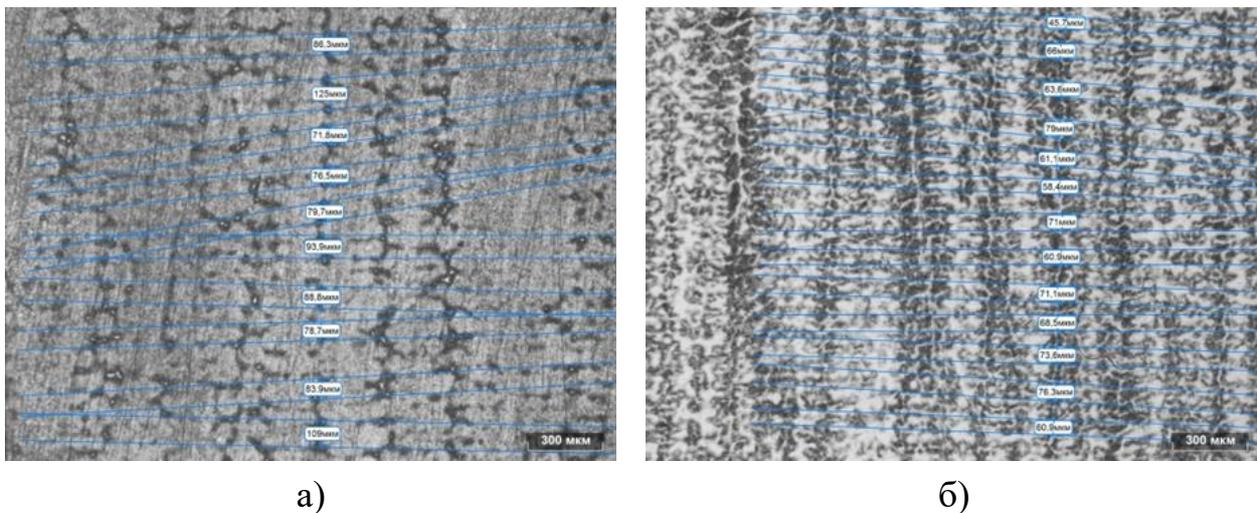


Рисунок 8 – Микроструктура  $\frac{1}{2}$  радиуса слитков:

а) – слиток 1.11; б) – слиток 1.21;  $\times 50$

Также имеется разница в расстоянии между ветвями дендритов второго порядка и по сечению слитка. В центральной части слитка  $L_2$  больше чем на  $\frac{1}{2}$  радиуса, что объяснимо меньшей скоростью теплоотвода из осевой части в сравнении с  $\frac{1}{2}$  радиуса, находящейся ближе к охлаждаемой стенке кристаллизатора. В таблице 2 приведены результаты измерений  $L_2$  для полой и сплошной отливок.

Таблица 2 – Расстояние между дендритными ветвями второго порядка

| Образец                         | $L_2$ , мкм |
|---------------------------------|-------------|
| Центральная область слитка 1.11 | 102         |
| ½ радиуса слитка 1.1 1          | 85,4        |
| Среднее значение                | 93,7        |
| Центральная область слитка 1.21 | 78,8        |
| ½ радиуса слитка 1.21           | 64,3        |
| Среднее значение                | 71,5        |

Исследования механических свойств показали повышение показателей механических свойств слитков полого сечения, а именно: повышение ударной вязкости на 10–15 %, увеличение временного сопротивления, твердости и предела текучести на 10 % (таблица 3).

Таблица 3 – Средние значения показателей механических свойств слитков

| Слитка   | Ударная вязкость КСУ, $t^\circ = 20^\circ \text{C}$ | Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа | Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа | Твердость НВ |
|----------|---|--|---------------------------------------|--------------|
| Сплошные | 31  | 732                                      | 587                                   | 277          |
| Полые    | 33  | 745                                      | 593                                   | 291          |

Результаты физико-механических испытаний подтверждают соответствие полученных слитков на переменном токе требованиям, предъявляемым заказчиком (ООО «ЮУрМК») к заготовкам для изготовления деталей «Вставка спайдера».

Так как известно, что плавильные мощности, работающие на постоянном токе, менее энергоемкие, третий раздел посвящен исследованию возможности получения полых заготовок методом ЭШП с прошивающим дорном на постоянном токе. Отсутствие электрошлаковых установок на постоянном токе объясняется возникающим эффектом «электромагнитного дутья», который сводит на нет все преимущества электрошлаковой технологии. Ранее проведенные работы коллег позволили реализовать электрошлаковый переплав на постоянном токе для получения цельных слитков при реализации технологии вращения. С целью изучения возможности получения полых заготовок на

постоянном токе на основе вышеупомянутых моделей разработан решатель, позволяющий определить необходимые скорости вращения.

Для определения величины электромагнитной силы, возникающей во время протекания ЭШП на постоянном токе, проведено моделирование с использованием программного комплекса Ansys Fluent. Моделирование показало, что под действием внешнего магнитного поля капли жидкой стали двигаются по определенной траектории, которая повторяется каждой следующей каплей с некоторым отклонением. Раскадровка процесса моделирования представлена на рисунке 9.

Моделирование позволило определить направление движения капель электродного металла и показатель необходимой внешней силы для стабилизации ванны жидкого металла при протекании процесса ЭШП на постоянном токе, равный 0,067 Н.

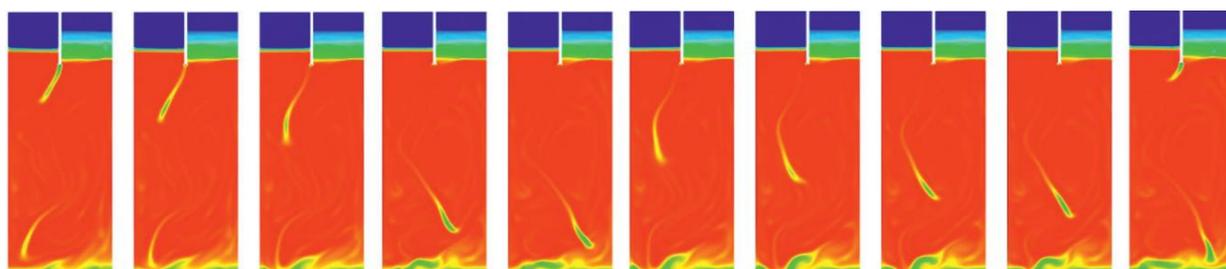


Рисунок 9 – Результаты раскадровки моделирования движения капли (слева направо с шагом 0,2 с)

Для экспериментальной проверки математической модели проведён расчет необходимой скорости вращения для компенсации электромагнитного воздействия, которая составила 110 об/мин для электрода диаметром 60 мм.

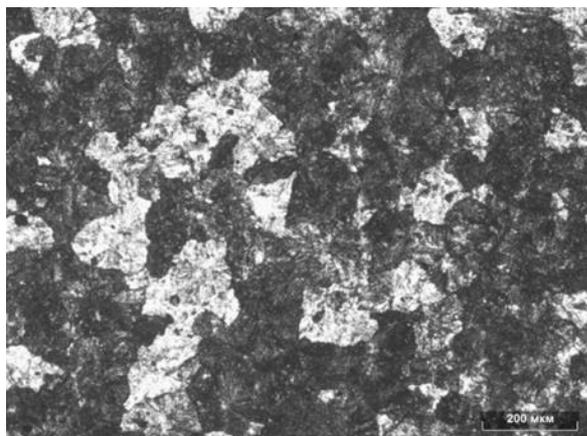
Апробация также осуществлялась на модернизированной установке А-550 с предустановленным выпрямителем для работы на постоянном токе. Для переплава применялись электроды стали марки 9ХВ. В ходе наработки получены экспериментальные слитки полого (слиток 2.1) и сплошного (слиток 2.2) сечения.

Образцы для микроанализа вырезались в осевом направлении. Микроструктура выявлялась травлением 5 %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. При изучении микроструктуры не выявлено крупных шлаковых включений, усадочных раковин, пор. Чтобы установить, каким

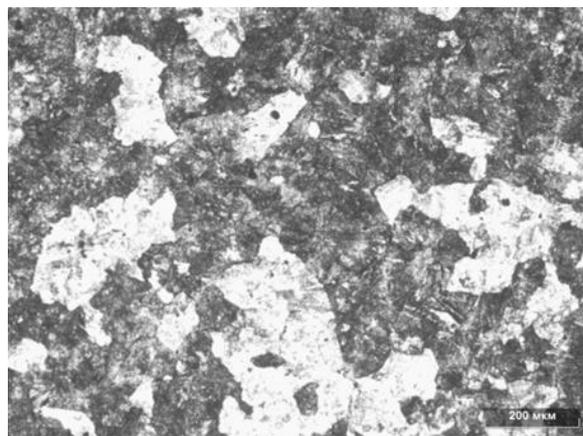
образом формирование поллой заготовки влияет на размер структурных составляющих, проведён анализ в соответствии с ГОСТ 5639–82 методом сравнения с эталонными шкалами и определён размер зерна отливок:

- микроструктура образца 2.1 – соответствует баллу зерна 2,5;
- микроструктура образца 2.2 – соответствует баллу зерна 1.

В соответствии с определенным баллом зерна можно сделать вывод: в случае формирования поллой заготовки размер структурных составляющих отливки измельчается (рисунок 10).



а)



б)

Рисунок 10 – Микроструктура слитков: а) – образец 2.1;  
б) – образец 2.2;  $\times 100$

Результаты проведенной работы позволяют рассматривать ведение ЭШП на постоянном токе с вращением расходуемого электрода как перспективное направление развития электрошлакового процесса.

Актуальность дальнейших исследований применения постоянного тока при ЭШП подтверждается поддержкой проекта РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90081 «Изучение процесса тепло- массопереноса при плавлении металла под действием Джоулева тепла на постоянном источнике тока в поле действия центробежных сил» и проекта РНФ № 22-29-20049 «Зависимость фронта кристаллизации металла от электротермических процессов».

В четвертой главе оценивался экономический эффект данной технологии, который имеет сквозной характер, начиная с экономии на переделах при получении расходуемого электрода, энергетической эффективности технологии вращения, заканчивая уменьшением стадий механической обработки и сопутствующим снижением отходов при производстве конечных изделий.

Данные по себестоимостям переделов представлены ОАО «ЗМЗ», г. Златоуст, на котором реализована многоэлектродная схема переплава. В независимости от передела и размера конечного сорта, все технологические цепочки объединяет стоимость выплавки, которая составляет 28 000 руб./т. Объем выпускаемого металла с ДСП ЭСПЦ №3 составляет 5,6 т.

Экономическая эффективность получения электрода большего сечения в первую очередь обосновывается отсутствием прокатного передела, цена которого составляет 9000 руб./т.

В данный момент для получения электродов малого сечения производят разливку слитков в кв. 570 с последующим переделом в кв. 160. Цена за тонну металла составляет 37 000 руб./т. Стоит отметить, что со слитка массой 2,8 т потери составляют 420 кг. Таким образом, с одной плавки имеется 4,7 т годного для последующего рафинирования металла.

В случае необходимости получения электродов большего сечения, в качестве альтернативы предлагается использование УПНРС с получением круглого электрода диаметром 300 мм. При данном переделе происходит обрез верха слитка и потери составляют всего 440 кг с плавки, за счёт чего происходит не только увеличение выхода годного, а именно до 5,2 т, но и из-за отсутствия затрат на УПНРС себестоимость одной тонны металла составит 28 000 руб./т.

Второй альтернативной технологией получения электрода большого сечения предложено рассмотреть возможность разливки стали в изложницу. Потери при данной технологии составляют 550 кг с плавки, что позволяет достигнуть выхода годного до 5,0 т. при сохранении стоимости получения тонны металла в 28 000 руб./т.

Экономическая эффективность конечного изделия представлена на примере изготовления детали «Вставка спайдера» предприятия ООО «ЮУрМК» из заготовки цельного сечения и полого. Себестоимость конечного изделия из полой заготовки составила 156,88 руб. против 263,19 руб. в случае использования цельного проката (в ценах на июнь 2022 г.).

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ**

1. Методом физического моделирования подтверждено, что в случае вращения расходуемого электрода тепловой центр представляет собой кольцо, у которого внутренний периметр располагается на некотором расстоянии от оси формируемого слитка, определяемом величиной центробежных сил.

2. Разработана математическая модель изменения гидродинамической картины в шлаковой и металлической ваннах при ЭШП с вращением расходуемого электрода вокруг собственной оси, показывающая, что траектория движения капель жидкого металла в шлаковой ванне зависит от пропорционального отношения квадрата скорости вращения расходуемого электрода к силе подводимого тока.

3. Выявлена зависимость влияния размеров прошивающего дорна, кристаллизатора и расходуемого электрода на скорость его вращения и место доставки электродного металла в жидкую металлическую ванну.

4. Создана компьютерная программа «Тепловая картина кристаллизующейся полый заготовки при ЭШП» с использованием среды разработки Matlab version R2017a, позволяющая определять необходимые технологические параметры (величину тока, скорость вращения) для каждого конкретного случая реализации предлагаемой технологии.

5. Разработана технология, позволяющая получать полые отливки, обладающие более высокими показателями механических свойств в сравнении со слитками сплошного сечения. Ударная вязкость повышается на 10–15 %, временное сопротивление, твердость и предел текучести – на 10 %.

6. Полые отливки, полученные с применением технологии вращения расходуемого электрода, имеют расстояние между осями дендритов второго порядка меньше, чем у слитков сплошного сечения на 23,6 %, что указывает на измельчение структуры отливки при реализации технологии получения полый заготовки.

7. Технология получения полый заготовки по одноэлектродной схеме с прошивающим дорном с применением технологии вращения расходуемого электрода позволяет изготавливать полые отливки на постоянном токе, с сопутствующим увеличением балла зерна с 1 до 2,5.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ  
и индексируемые в Scopus**

1. Чуманов, И.В. Разработка комплекса оборудования для получения полой заготовки методом ЭШП по одноэлектродной схеме / И.В. Чуманов, В.Н. Лутков, **Д.В. Сергеев** // *Металлургия машиностроения*. – № 5. – 2018. – С. 39–41.

2. Чуманов, И.В. О моделировании процесса электрошлакового переплава при получении полой заготовки по одноэлектродной схеме / И.В. Чуманов, В.Н. Лутков, **Д.В. Сергеев** // *Металлургия машиностроения*. – № 6. – 2019. – С. 36–40.

3. Чуманов, И.В. Разработка математической модели теплового состояния жидкометаллической ванны установки ЭШП для получения полого слитка / И.В. Чуманов, И.М. Ячиков, **Д.В. Сергеев** // *Электрометаллургия*. – № 4. – 2021. – С. 11–20.

*(Переводная версия)*

Chumanov, I.V. Mathematical model for the thermal state of the liquid metal bath in an esr plant for producing a hollow ingot / I.V. Chumanov, I.M. Yachikov, **D.V. Sergeev** // *Russian Metallurgy (Metally)*. – No. 6. – 2021. – С. 689–695.

4. Чуманов, И.В. Моделирование поведения электромагнитных сил постоянного тока, действующих на каплю жидкого металла в процессе электрошлакового переплава / И.В. Чуманов, И.А. Алексеев, **Д.В. Сергеев** // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – Т. 64. – № 7. – 2021. – С. 530–535.

*(Переводная версия)*

Chumanov, I.V. Simulation of direct-current electromagnetic forces acting on a droplet of liquid metal under electroslag remelting / I.V. Chumanov, I.A. Alekseev, **D.V. Sergeev** // *Steel in Translation*. – Т. 51. – 2021. – P. 456–460.

5. Чуманов И.В. Влияние центробежных сил на структуру слитка ЭШП, полученного переплавом на постоянном токе / И.В. Чуманов, М.А. Матвеева, **Д.В. Сергеев** // *Электрометаллургия*. – № 12. – 2022. – С. 15–20.

**Публикации в других изданиях**

1. Мамаев, Д.А. Разработка способа получения полой заготовки методом электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода / Д.А. Мамаев, **Д.В. Сергеев** // Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего: сб. материалов IV Международной науч.-практ. конф. – Западно-Сибирский научный центр. – 2016. – С. 198–200.

2. Чуманов, И.В. Разработка комплекса оборудования для ЭШП и апробация холодной модели / И.В. Чуманов, В.Н. Лутков, **Д.В. Сергеев** // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – № 17. – 2018. – С. 48–52.

3. **Сергеев, Д.В.** Моделирование процесса ЭШП с прошивающим дорном / Д.В. Сергеев // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2020. – № 19. – С. 142–145.

4. Алексеев И.А. Влияние электромагнитных сил при ЭШП на постоянном токе / И.А. Алексеев, **Д.В. Сергеев** // Наука ЮУрГУ: материалы 72-й науч. конф. Секция экономики, управления и права. –Че, Южно-Уральский государственный университет. – 2020. – С. 162–164.

5. **Сергеев Д.В.** Исследование поведения теплового поля при воздействии на шлаковую и металлическую ванну центробежных сил при электрошлаковом переплаве с целью разработки технологии получения полой заготовки по одноэлектродной схеме / Д.В. Сергеев, И.В. Чуманов // Физико-химические основы металлургических процессов имени академика А.М. Самарина: сб. тр. Международной науч. конф. – Выкса, 2022. – С. 540–543.

6. Чуманов, И.В. Влияние вращения расходуемого электрода при электрошлаковом переплаве на гидродинамику шлаковой ванны / И.В. Чуманов, И.М. Ячиков, М.И. Ячиков, М.А. Матвеева, Д.В. Сергеев // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – № 73. – 2021. – С. 121–134.

(Переводная версия)

Chumanov, I.V. Influence of the consumable electrode rotation during electroslag remelting on hydrodynamics of a slag bath / I.V. Chumanov, I.M. Yachikov, M.I. Yachikov, M.A. Matveeva, D.V. Sergeev // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Matematika i Mekhanika. – No. 73. – 2021. – P. 121–134.

## Патенты и свидетельства

1. Чуманов И.В. Способ получения полой заготовки методом электрошлакового переплава на твердом старте / И.В. Чуманов, **Д.В. Сергеев**, М.А. Мамаев // Патент № 2660495. – 03.07.2017.

2. Чуманов И.В. Электрошлаковая печь для получения полого слитка / И.В. Чуманов, **Д.В. Сергеев**, В.Н. Лутков, В.И. Чуманов // Патент на полезную модель. – Патент № 189750. – 03.06.2019.

3. Чуманов В.И. Программа для определения скорости потока токопроводящей жидкости в наведенном постоянном магнитном поле методом конечных элементов в двухмерном пространстве / В.И. Чуманов, И.В. Чуманов, **Д.В. Сергеев**, И.А. Алексеев // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – Свидетельство № 2021610820. – 05.02.2021.