

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
Южно-Уральского государственного
университета (национального
исследовательского университета)
д-р техн. наук Коржов А.В.



«11» июня 2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертационной работе **Ячикова Матвея Игоревича**,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (металлургия)» на
тему: *«Модернизация конструкции электрошлаковых печей для повышения
производительности процесса изготовления литых заготовок»*,

Актуальность темы диссертации

В отличие от пластмасс и другого вторичного сырья металл можно перерабатывать много раз, при этом он не теряет своих свойств. Для вторичной переработки металла определяющей является экономическая составляющая. Как в России, так и за рубежом объем его переработки ежегодно увеличивается, при этом совершенствуются технологические процессы, появляются новые области применения полученной продукции.

На современном металлургическом предприятии в процессе производства образуется большое количество металлических отходов, в том числе и легированных. Так, при производстве стального проката в качестве расходных материалов в большом количестве используют металлорежущие дисковые ножи, которые после их использования идут на переплавку. При обработке роликов МНЛЗ образуется большое количество стружки, общая масса которой может составлять до 10% от массы обрабатываемых деталей. Это достаточное количество отходов, которое можно успешно использовать в процессе повторной переработки с целью получения металлических заготовок для получения новых роликов.

Тенденцией современного подхода к вторичной переработке отходов является рециклинг как процесс переработки отходов, ставящий результатом их возвращение в производственный цикл. При этом вторсырье используется в дальнейшем производстве по своему прямому назначению.

В диссертации рассматривается рециклинг стального легированного лома с применением установки электрошлакового переплава (ЭШП). Предлагается использовать одностадийный процесс переплава, при этом металл получается более высокого качества, поскольку при прохождении сквозь шлаки производится его очистка от вредных включений, в частности, серы. В отличие от дуговых или индукционных печей установки ЭШП могут рабо-



тать в непрерывном режиме, а потому обеспечивать более высокую производительность процесса выплавки.

Для получения полых фасонных заготовок для дисковых ножей предлагается метод электрошлакового литья (ЭШЛ). При этом способе их получения конфигурацию внутренней полости медного охлаждаемого кристаллизатора, в котором переплавляют расходуемый электрод, максимально приближают к форме заготовки.

Диссертация М.И. Ячикова посвящена решению вопросов модернизации конструкций электрошлаковых печей для переработки легированных металлических отходов, в частности, разработке оригинальных конструкций переплавных электродов, повышению производительности установок ЭШП за счет сокращения длительности производственного цикла получения литой заготовки и уменьшения числа технологических операций. Это позволяет сделать вывод о том, что работа является весьма важной и актуальной.

Перечень поставленных в работе задач и полученных результатов соответствует шифру выбранной научной специальности 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы (металлургия)» по пунктам 1, 5, 6 паспорта специальности.

Содержание работы

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, список использованных источников из 90 наименований; изложена на 137 страницах, включая 66 рисунков, 12 таблиц и 3 приложения.

Во **введении** представлена общая характеристика диссертационной работы.

В первой главе «Анализ современных способов и устройств для получения высококачественных литых заготовок» рассмотрены проблемы утилизации легированного лома на современном металлургическом производстве, особенности существующих технологических процессов его переработки в металлургической промышленности, в том числе с использованием ЭШП. Показано, что высокая себестоимость металла, получаемого в результате электрошлакового переплава, обусловлена значительными затратами при получении расходуемых электродов, которые составляют 65–85% от общей себестоимости выплавляемого слитка, а затраты на производство электродов определяются способом их изготовления. Приведен обзор существующих конструкций установок ЭШП для получения сплошных и полых слитков.

На основе анализа существующего уровня науки и техники в области исследования способов изготовления переплавляемого электрода, а также конструкций электрошлаковой печи для получения сплошных и полых заготовок показано, что можно предложить новые рациональные технологические и конструкционные решения для эффективной утилизации отходов металлургического производства. На основе этого сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы.

Вторая глава «Реконструкция электрошлаковых печей для реализации новой технологии производства заготовок для роликов МНЛЗ» посвящена модернизации установки ЭШП посредством разработки новой конструкции переплавляемого электрода пористой структуры, полученного из стальной легированной стружки. Показано, что наиболее эффективным методом переработки стружки является ее горячее брикетирование и изготовление переплавляемого электрода путем аргоновой или плазменной сварки прессованных цилиндрических брикетов.

Дан расчет геометрии переплавляемого электрода, полученного из стальной стружки стали 25Х1МФ для выплавки заготовки заданных размеров. Показана методика расчета эффективной теплопроводности, теплоемкости и удельного сопротивления материала полученного электрода в зависимости от его пористости и свойств легированного металла.

Приведена общая схема установки ЭШП, служащей для получения слитка путем переплава сварного электрода из отработанных дисковых ножей или изготовленного из брикетов прессованной металлической стружки. Для выбранной конструкции приведены математические модели для определения:

- электрических характеристик установки ЭШП с учетом тока, протекающего через его боковые стенки, показаны основные допущения и ограничения, основные уравнения и алгоритм численного расчета;
- поля температур в переплавляемом электроде, его среднюю температуру и тепловые потери через его боковую поверхность, и тепловой поток от жидкого шлака;
- мощности тепловыделения в шлаковой ванне, максимальной скорости переплава слитка и максимальной скорости его вытягивания на основе квазистационарной модели теплового состояния установки ЭШП.

С использованием созданных компьютерных программ проведено компьютерное исследование электрических характеристик ЭШП в зависимости от диаметра переплавляемого электрода при разных напряжениях между электродом и корпусом печи. Для литого и пористого электрода ЭШП показана динамика теплового состояния и теплового потока, падающего на нижний торец электрода от момента погружения электрода в жидкий шлак.

Показаны теоретические результаты, позволяющие определить максимальный массовый расход переплавляемого слитка и максимальную скорость вытягивания готового слитка в зависимости от его диаметра, глубины погружения электрода в шлак и рабочего напряжения установки ЭШП. Эти расчеты позволяют выбрать технологические параметры с максимальной производительностью установки с заданными характеристиками переплавляемого электрода и готового слитка.

Полученные теоретические результаты для предлагаемого способа утилизации стружки успешно практически опробованы в ЦРМО-3, ООО «Механоремонтный комплекс», что позволило не передавать стружку на переплав в электродуговую печь. Ролики, изготовленные из заготовок, полученных путем ЭШП пористых электродов, показали хорошую стойкость при эксплуатации на МНЛЗ.

В третьей главе «*Разработка технологии и оборудования для производства литых заготовок из отработанных дисковых ножей*» рассмотрено получение переплавляемого электрода из отработанных дисковых ножей, которые применяют на дисковых ножницах при продольной резке и обрезке кромки листов и рулонной полосы металла на определенную ширину. Предлагается переплавляемые электроды изготавливать из отработанных дисковых ножей одного типоразмера. Для получения переплавного цилиндрического электрода диски прижимают друг к другу с давлением не менее 1 МПа и приваривают друг к другу с помощью аргоновой или плазменной сварки путем нанесения сварных швов вдоль образующей цилиндра электрода или точечной сварки по внешней окружности контакта.

Дан расчет геометрии переплавляемого электрода, полученного из отработанных дисковых ножей, в которых используют сталь 6ХВ2С. Показана анизотропия свойств полученного сварного электрода. Показана методика расчета эффективного коэффициент теплопроводности удельного электрического сопротивления с учетом передачи тепла и электрического тока через зону контакта двух металлических дисков с учетом давления их прижатия и класса чистоты поверхности. С учетом полученных свойств для сварного и литого электрода ЭШП показана динамика их теплового состояния и теплового потока, падающего на нижний торец электрода от момента погружения электрода в шлак.

Приведены результаты экспериментальных опытно-промышленных исследований переплава отработанных ножей из стали марки 6ХВ2С на установке ЭШП ООО «ОСК». Исследования выявили, что химический состав слитков соответствует стали марки 6ХВ2С и полученный металл слитка имеет высокие механические свойства. Промышленные эксперименты показали, что предлагаемая технология с использованием сборного переплавляемого электрода из отработанных дисковых ножей имеет ряд преимуществ по производительности, суммарным энергетическим затратам и по качеству получаемого слитка по сравнению с имеющимися на металлургических предприятиях двухстадийными технологиями переплава. В частности показано, что при любой производительности дуговой (или индукционной) печи итоговая производительность одностадийного процесса всегда больше производительности двухстадийного процесса ДСП+ЭШП.

Четвертая глава «*Совершенствование конструкции ЭШП для получения полых заготовок дисковых ножей*» посвящена разработке конструкции

внутреннего кристаллизатора установки ЭШП для получения полых литых заготовок. Разработаны математические модели и компьютерные программы для определения теплового состояния дорна заданной конструкции, имеющего водяное охлаждение с несколькими вертикальными каналами. Показаны основные допущения и ограничения, основные уравнения и алгоритм численного расчета.

На основе компьютерного моделирования с использованием созданной программы установлено, что стационарное тепловое состояние дорна наступает в течение 5–7 минут; а увеличение количества каналов при одинаковой суммарной площади их поперечного сечения приводит к уменьшению максимальной температуры.

Рассмотрена математическая модель гидравлической системы охлаждения дорна, имеющего конструкцию в виде изложницы, состоящей из внутреннего и наружного цилиндров, которые устанавливаются на плиту и между которыми подают воду. Получена зависимость перепада давления на внутреннем кристаллизаторе от расхода воды и внешнего диаметра стальной трубы. Определен зазор между медной и стальной трубой и соответствующий ее расход, позволяющий обеспечить необходимую скорость воды в канале 4–5 м/с.

Далее с использованием САЕ-системы ANSYS подтверждена адекватность созданной математической модели теплового состояния дорна. С использованием ANSYS просчитано тепловое состояние дорна, выполненного в виде изложницы. Установлено, что при рассмотренных условиях охлаждения наибольшая температура наблюдается на торцевой верхней поверхности дорна. Для дорна с 4-мя каналами она составляет около 200°C. При замене охлаждающих каналов охлаждающей полостью (использование изложницы) максимальная температура снижается примерно до 180°C.

Новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые разработана и научно обоснована конструкция расходоуемого электрода, сваренного из отработанных дисковых ножей, обеспечивающая сокращение длительности производственного цикла получения литой заготовки в установке ЭШП за счет уменьшения числа технологических операций.
2. Предложен и научно проработан новый одностадийный способ переработки легированного лома в виде стружки с использованием установки ЭШП по переплаву электродов, полученных из стандартных брикетов прессованной стружки.
3. Разработана методика комплексного расчета конструктивных и технологических параметров установки ЭШП на основе моделирования теплового

состояния переплавного электрода с заданными свойствами и теплового баланса шлаковой ванны.

4. Разработана оригинальная математическая модель и алгоритм расчета, позволяющие анализировать тепловое состояние внутреннего кристаллизатора, имеющего несколько вертикальных водяных каналов охлаждения.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

Теоретические исследования базируются на фундаментальных законах соответствующих разделов механики и тепломассообмена. Обоснованность результатов подтверждается наблюдаемым соответствием, полученных с использованием разработанных автором математических моделей и алгоритмов, и результатов экспериментальных исследований, полученных в промышленных условиях производства. Достоверность и новизна научных и технических решений подтверждена эффективностью результатов промышленных испытаний и адекватностью разработанных математических и компьютерных моделей.

Значимость результатов, полученных автором диссертации, для практики

1. Разработанное на основе диссертационного исследования математическое, алгоритмическое и программное обеспечение может быть использовано в составе САПР при разработке и реконструкции установок ЭШП с внутренним кристаллизатором, позволяющих получать полые заготовки, в том числе и для изготовления дисковых ножей различного диаметра из высоколегированной стали.
2. Создана новая конструкция системы водоохлаждения дорна для предприятия ООО «ОСК» на базе «ММК-Метиз», обеспечивающая требуемый уровень производительности процесса ЭШП, высокую надежность и безопасность эксплуатации. Разработан комплект рабочих чертежей.
3. На предприятии ООО «ОСК» ПАО «ММК» модернизирована установка ЭШП с переплавляемым электродом из отработанных дисковых ножей. Получены результаты ее опытно-промышленных испытаний, подтвердившие эффективность предлагаемой технологии;
4. В ООО «Механоремонтный комплекс» ЦРМО-3 внедрен разработанный метод переработки высоколегированной стружки в заготовки роликов МНЛЗ, заключающийся в использовании ЭШП электродов, полученных из брикетированной стружки. Проведенная работа подтверждена актом внедрения.

Публикации и апробация работы

По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 2 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК, зарегистрирована программа для

ЭВМ. В диссертацию вошли только результаты работы, полученные автором и не затрагивающие интересы соавторов.

Основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на Пятой Международной научной конференции "Информационные технологии и системы" (2016, г. Челябинск), Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (2015, г. Екатеринбург), международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (2019 г., Магнитогорск), Международной научно-практической конференции «Наука и образование в жизни современного общества» (2015, г. Тамбов), XII конгрессе сталеплавателей (2012, г. Выкса).

По содержанию работы имеются следующие вопросы и **замечания**:

1. В задаче теплового состояния переплавляемого электрода принималось, что торец электрода является плоским (рис. 2.11, стр. 57). Однако экспериментальные, литературные данные и рис. 2.5 (стр. 46) говорят о том, что он при работе имеет форму, близкую к конической. Насколько предложенное допущение влияет на полученные результаты теплового состояния электрода.
2. На рис. 4.2 (стр. 95) показаны возможные схемы соединения вертикальных водяных каналов в конструкции внутреннего кристаллизатора. Однако не приведено анализа, какое из этих соединений лучше и почему с точки зрения эффективности охлаждения и расхода воды.
3. Предложен способ переработки **легированного** лома в виде стружки с использованием установки ЭШП по переплаву электродов, полученных из брикетов прессованной стружки. Однако осталось неясным, можно ли этот способ рекомендовать для переработки стружки из рядовых сталей и почему.
4. На стр. 69–70 представлена конструкция и технология подготовки электрода из брикетов цилиндрической формы длиной 120–140 мм и диаметром 120 мм. Отмечено, что около 40 таких брикетов были сварены четырьмя стальными полосками (накладками) металла толщиной 5 мм (рис. 2.23). Считаем, что для установки, выставки и удержания отмеченного электрода использование накладок может быть недостаточно. Необходимо использовать в конструкции нового электрода в качестве накладок и продольные элементы, обладающие продольной жесткостью, например, штрипс (лента) или уголок. В работе не отмечено, как сохраняется целостность формы электрода в процессе его переплава.

Все рассмотренные замечания носят частный характер и не снижают общие положительные оценки диссертации М.И. Ячикова.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Заключение

Диссертация Ячикова Матвея Игоревича является самостоятельной законченной научно-квалифицированной работой. В ней на основании выполненных автором исследований изложены новые научно-обоснованные технические решения, заключающиеся в разработке методики расчета и программного обеспечения, позволяющего для заданной конструкции и существующих технологических параметров работы установки ЭШП определять максимальную производительность переплавляемого электрода и скорость вытягивания готового слитка. Автором предложен новый одностадийный способ переработки легированного лома в виде стружки с использованием установки ЭШП по переплаву электродов, полученных из стандартных брикетов прессованной стружки. Показана новая конструкция расходуемого электрода, сваренного из отработанных дисковых ножей, обеспечивающая сокращение длительности производственного цикла получения литой заготовки в установке ЭШП за счет уменьшения числа технологических операций.

Полученные автором результаты могут быть использованы в составе САПР при разработке и реконструкции установок ЭШП с внутренним кристаллизатором, позволяющих получать полые заготовки, в том числе и для изготовления дисковых ножей различного диаметра из высоколегированной стали.

Полученные автором научные выводы и результаты вносят существенный вклад в развитие технологии повышения эффективности переработки и вторичного использования стального лома, повышения производительности установок ЭШП за счет эффективного проведения самого процесса.

Диссертационная работа Ячикова Матвея Игоревича и автореферат в полной мере отвечают требованиям п. 9–14 Положения ВАК РФ, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (металлургия)».

Диссертационная работа и отзыв обсуждены на заседании кафедры «Пиromеталлургических процессов» Южно Уральского Государственного Университета (Научно Исследовательского Университета) (Протокол №5 от 13 мая 2021 года).

Отзыв подготовили:

– доктор технических наук, профессор кафедры «Пирометаллургических процессов» Южно Уральского Государственного Университета (Научно Исследовательского Университета), Роцин Василий Ефимович. Докторская диссертация защищена по специальности: 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов;

– доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техника и технологии производства материалов» Южно Уральского Государственного Университета (Научно Исследовательского Университета), почётный работник высшей школы РФ Чуманов Илья Валерьевич. Докторская диссертация защищена по специальности: 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Доктор технических наук,

Роцин Василий Ефимович

Тел.: 8(351) 267-91-61

E-mail: roshchinve@susu.ru

Доктор технических наук,

Чуманов Илья Валерьевич

Тел.: 89507215955,

E-mail: chumanoviv@susu.ru

Сведения о ведущей организации

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»
Сокращенное наименование организации	ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» Южно-Уральский государственный университет
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Почтовый индекс, адрес организации	Россия, 454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 76,
Телефон	+7 (351) 267-99-00
Адрес электронной почты	info@susu.ru
Сайт организации	www.susu.ru