

На правах рукописи



ЯЧИКОВ МАТВЕЙ ИГОРЕВИЧ

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫХ ПЕЧЕЙ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

05.02.13 - Машины, агрегаты и процессы (металлургия).

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск
2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На металлургических предприятиях существует проблема повышения эффективности переработки и вторичного использования стального лома. В частности, в прокатном производстве разновидностью легированного лома являются отходы, образующиеся из отработанных ножей для резки металла, причем значительную долю составляют вышедшие из строя дисковые ножи. При изготовлении ножей и при обработке роликов МНЛЗ в большом количестве образуется металлическая стружка из легированного металла.

Обозначенные разновидности металлического лома содержат дорогостоящие легирующие элементы, такие как ванадий, хром, молибден и вольфрам. Традиционный процесс переработки таких отходов включает их плавление в индукционной или дуговой печи и рафинирование полученных слитков в электрошлаковой печи. Это приводит к большим потерям легирующих элементов и высоким энергозатратам в процессе плавления и рафинирования.

Наиболее эффективное решение рециклинга отмеченных отходов – использование электрошлакового переплава (ЭШП). Решение вопросов модернизации конструкций электрошлаковых печей, в частности, разработка оригинальных конструкций электродов и развитие технологии ЭШП позволит обеспечить эффективную утилизацию отходов дорогостоящего металлического лома, повысить производительность установок ЭШП за счет эффективного проведения самого процесса, а также благодаря вовлечению в производство значительного количества дорогостоящего лома. Все это является весьма важным и актуальным на данный момент.

Степень разработанности темы.

Общие вопросы и подходы к пониманию процессов электрошлакового переплава рассматривались в работах: Б.Е. Патона, К.Н. Вдовина, Р.К. Мысик, И.В. Чуманова и многих других признанных в РФ и мире исследователей. Непосредственно проблемами создания и совершенствования оборудования печей ЭШП занимались А.С. Бердников, Л.Б. Медовар, А.А. Подосян, В.А. Шаповалова и др.

На текущий момент изготовление дисковых прокатных ножей производится путем получения переплавляемого электрода с использованием дуговой или индукционной печи с разливкой металла в изложницы и его вторичной переработки посредством электрошлакового переплава с выплавкой слитка сплошного сечения и его дальнейшей механической обработкой (прошивка, расточка).

Некомпактную шихту в виде металлической стружки переплавляют россыпью в электрошлаковой печи с нерасходуемым графитированным электродом, но при этом возникают трудности, касающиеся регулирования скорости подачи шихты.

Более производительным может быть применение одностадийной технологии процесса переработки, что позволит минимизировать производственные затраты и время в дополнение к минимизации потерь дорогих легирующих элементов. Для внедрения такой технологии необходимо решить проблему, связанную с получением из металлоотходов расходуемых электродов, и далее, с помощью электрошлаковой печи, высококачественных слитков.

Усовершенствованным способом переработки легированных отходов может быть формирование электрода из прессованной стружки или из отработанных дисковых ножей и его переплав в электрошлаковой печи с внутренним кристаллизатором – дорном, предназначенным для формирования полости в выплавляемой заготовке. Преимущество данного способа заключается в минимизации количества и трудоемкости операций, в том числе по механической обработке полученного слитка.

Но для того, чтобы использовать данный способ ресурсосберегающей утилизации высоколегированного лома, необходимо обосновать предлагаемые технологии и конструкции для формирования переплавляемого электрода из высоколегированных отходов, технологические режимы ЭШП и конструктивные параметры внутреннего кристаллизатора электрошлаковой печи для получения полых заготовок.

Целью работы является развитие методик конструирования электродов и совершенствование моделей технологических процессов электрошлакового переплава для повышения производительности процесса изготовления литых заготовок.

Для достижения цели были поставлены **следующие задачи**.

1. Развитие положений конструирования унифицированных электродов из прессованной легированной стружки и из отработанных дисковых ножей. Модернизация электрошлаковой печи с разработанными электродами для реализации одностадийной технологии получения литых изделий.

2. Усовершенствование моделей процесса электрошлакового переплава, методик расчета и программ для определения электрических характеристик и теплового состояния переплавляемых электродов и шлаковой ванны установки ЭШП с учетом специфики построения модернизированных электродов.

3. Совершенствование конструкции печей ЭШП и технологии производства полых заготовок дисковых отрезных ножей.

Объектом исследования являются современные конструкции электрошлаковых печей и способы изготовления литых заготовок для роликов МНЛЗ и отрезных дисковых ножей.

Предметом исследования являются конструктивные особенности электрошлаковых печей и отдельные операции технологического процесса изготовления литых заготовок на основе их математического моделирования и теоретических исследований.

Научная новизна работы.

1. На основе созданного аналитического метода расчета геометрических и теплофизических свойств переплавляемых электродов, а также благодаря адаптированным математическим моделям тепловых характеристик процесса ЭШП, разработана новая, научно-обоснованная конструкция расходомера электрода, сваренного из отработанных дисковых ножей, обеспечивающая сокращение длительности производственного цикла получения литой заготовки за счет уменьшения числа технологических операций.

2. Определены принципы построения конструкций внутреннего кристаллизатора электрошлаковой печи, позволяющего получать полые заготовки для изготовления дисковых ножей различного диаметра. На основе созданных оригинальных математических моделей и компьютерного моделирования гидравлических параметров охлаждающей системы и теплового состояния дорна выбраны рациональные режимы работы и конструкции системы его охлаждения. Выявлено, что температура внешней поверхности внутреннего кристаллизатора при рабочих тепловых потоках находится в пределах 200°C , что не превышает температуру разупрочнения меди.

3. Разработаны математические модели и методики расчета электрических характеристик процесса ЭШП, а также параметров теплового состояния шлаковой ванны и переплавляемого составного электрода, изготовленного из брикетов прессованной стружки, что позволило установить технологические режимы переплава для обеспечения максимальной производительности на 20-25% выше, чем при использовании традиционных технологий.

Практическая значимость работы:

– разработаны конструкции и способы изготовления переплавляемых унифицированных электродов, получаемых из брикетов стальной стружки или из отработанных дисковых ножей с использованием метода горячего прессования и плазменной сварки;

– разработана программа для ЭВМ «Тепловое состояние внутреннего кристаллизатора установки ЭШП», позволяющая определять рациональные конструкционные параметры внутреннего кристаллизатора печи ЭШП. Получено свидетельство о государственной регистрации программы №2017619260;

– создана новая конструкция системы водоохлаждения дорна для предприятия ООО «ОСК» на базе «ММК-Метиз», обеспечивающая требуемый уровень производительности процесса электрошлакового переплава, высокую надежность и безопасность эксплуатации. Разработан комплект рабочих чертежей;

– 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;

– 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.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методика расчета и программное обеспечение, позволяющие для заданной конструкции и существующих технологических параметров работы установки ЭШП определять максимальную производительность переплавляемого электрода и скорость вытягивания готового слитка.

2. Положения конструирования медного внутреннего кристаллизатора печи ЭШП с вертикальными водяными каналами, а также кристаллизатора в виде изложницы. Создан комплекс алгоритмов и программ для расчета тепловых и гидравлических параметров выбранного внутреннего кристаллизатора установки ЭШП. На основе компьютерного моделирования выбраны рациональные параметры конструкции кристаллизатора и режимы его охлаждения. Это позволило разработать комплект чертежей внутреннего кристаллизатора и плиты поддона кристаллизатора электрошлаковой печи для предприятия ООО «ОСК» на базе «ММК-Метиз».

3. Основные компоновочные решения по созданию унифицированных электродов из отработанных дисковых ножей стали марки 6XB2C и из брикетированной стружки из стали марки 25X1МФ.

Личный вклад автора заключается в разработке математической модели, проведении компьютерного моделирования, проведении экспериментальных исследований на промышленных установках, обработке и анализе полученных результатов. Все результаты исследований, приведенных в диссертации, получены автором лично или при его непосредственном участии.

Методы исследований и достоверность результатов работы. Теоретические исследования базируются на фундаментальных законах соответствующих разделов механики и тепломассообмена. Адекватность созданных методик расчета и математических моделей подтверждается непротиворечивостью созданных моделей устоявшимся представлениям и самим себе, а также соответствием всех утверждений, измерений и выводов закону достаточного основания. Достоверность и новизна

научных и технических решений подтверждена эффективностью результатов промышленных испытаний и адекватностью разработанных математических и компьютерных моделей.

Соответствие работы паспорту специальности. Диссертационная работа по своей цели, задачам, содержанию, методам исследования, научной новизне, практической значимости соответствует пункту 5 паспорта специальности 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы (металлургия)».

Апробация работы. 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 сталеплавильщиков (2012, г. Выкса).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 2 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК, зарегистрирована программа для ЭВМ. В совместных с научным руководителем работах научному руководителю принадлежит постановка задачи, в диссертацию вошли только результаты работы, полученные автором и не затрагивающие интересы соавторов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 90 наименований; изложена на 137 страницах, включая 66 рисунков, 12 таблиц и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность вторичной переработки с получением готовых изделий высоколегированного лома, образующегося при механической обработке изнашиваемого или восстанавливаемого оборудования на металлургическом предприятии. Сформулированы цель и задачи работы, представлены ее научная новизна и практическая ценность.

В первой главе приведен анализ проблемы утилизации металлосодержащего лома на металлургическом производстве, рассмотрено использование ЭШП в металлургии, классификация установок электрошлакового переплава по назначению и конструкциям. Приведен обзор существующих решений по изготовлению переплавляемого электрода ЭШП и рассмотрены особенности конструкции установки ЭШП для производства сплошных и полых заготовок.

Показано, что совершенствование технологии ЭШП идет в следующих направлениях:

- можно получать слитки практически любого поперечного сечения (прямоугольного, квадратного, круглого, многогранного), как сплошные, так и полые;
- ЭШП может являться агрегатом непрерывного или периодического действия;
- промышленные процессы могут быть реализованы с использованием электрического питания печей постоянным и переменным током, однофазным и трехфазным, промышленной, высокой или пониженной частоты;

Затраты на изготовление расходных электродов в существенной степени (порядка 70–80% от общей себестоимости) влияют на себестоимость слитков, вы-

плавляемых в печах ЭШП, и во многом определяются способом изготовления электродов (прокатка, литье или ковка). Переработка металлической стружки чаще всего подразумевает повторную ее переплавку в дуговой или индукционной печи. Однако из-за сгорания стружки и угара легирующих компонентов ее переплавка имеет малую эффективность, поэтому для более рациональной утилизации металлической стружки ее перед плавлением прессуют в плотные брикеты.

При анализе литературы установлено, что современным способом переработки стружки легированного металла является ее прессование в расходный электрод и дальнейший переплав такого электрода в электрошлаковой печи с получением качественного слитка. Одним из способов получения полых слитков в печах ЭШП заключается в том, что благодаря наличию дорна или прошивня металл расходного электрода стекает в кольцевой зазор, где формируется полый слиток. Самой большой проблемой здесь является система охлаждения внутри металлического дорна. В патентах предлагаются различные конструкции водяных каналов охлаждения, однако нет информации об их научной проработке и эффективности применения.

Проведенный анализ показал, что создание эффективной технологии и конструкций для получения переплавных электродов ЭШП из лома дисковых ножей далеко до завершения. Остается актуальной задача переплава высоколегированных металлических отходов в печах ЭШП с получением качественных заготовок близких по форме к готовому изделию для производства дисковых ножей или роликов, используемых в МНЛЗ. Отсутствуют простые и надежные инженерные методики расчета конструктивных параметров элементов установок ЭШП при процессе переплава электродов из прессованной стружки высоколегированного лома для получения полых заготовок или заготовок сплошного сечения. Это позволило определить цель и задачи исследования.

Самой изнашиваемой частью МНЛЗ являются стальные ролики. На ПАО «ММК» их восстановление обычно проводят либо на наплавочной установке У1416, либо переплавом отработанных роликов в индукционной печи, получая сначала электроды, затем методом ЭШП получают заготовки. При выгачивании ролика из заготовки образуется большое количество стальной стружки из стали марки 25Х1МФ.

Для эффективной утилизации стальной стружки, связанной с изготовлением переплавляемого электрода для печи ЭШП из прессованных цилиндрических брикетов. Эффективная плотность получаемых брикетов зависит от давления прессования. Выбран пресс марки YG560/500-600, обеспечивающий максимальное давление 31 МПа, при этом плотность получаемого брикета около $\gamma_{эфф} \approx 5000 \text{ кг/м}^3$, что составляет 64% от плотности получаемой заготовки.

Изготовление переплавляемого электрода производится путем сварки прессованных цилиндрических брикетов диаметром 180 мм и высотой 120 мм полосками металла толщиной 5 мм. Металл 25Х1МФ не поддается обычной дуговой электросварке, поэтому точечное соединение брикетов между собой производят с помощью приваривания брикетов к полосе посредством аргоновой или плазменной сварки. При этом эффективный поперечный размер электрода увеличивается до $d=190 \text{ мм}$.

Зная d , размеры получаемой заготовки D_p , H и плотность металла заготовки $\gamma_m = 7800 \text{ кг/м}^3$ можно определить необходимую суммарную длину переплавляемого

электрода как $h_s = 1,01 \frac{\pi D^2}{\gamma_{эфф} d^2} \frac{H}{4} \gamma_m$. Далее было проанализировано, как от

эффективной плотности $\gamma_{эфф}$ зависят теплофизические и электрические свойства переплавляемого электрода. Известно, что теплопроводность пористого материала можно представить как среднее геометрическое теплопроводностей, зависящих от температуры литого металла λ_m и воздуха λ_g : $\lambda_{эфф} = \lambda_m^{1-P} \lambda_g^P$, где $P = 1 - \gamma_{эфф} / \gamma_m \approx 0,36$ – пористость стружки. Среднеинтегральное значение коэффициента теплопроводности получаемого переплавляемого электрода в диапазоне температур от 30⁰С до 1000⁰С составило $\bar{\lambda}_{эфф} = 2,77$ Вт/(м·К).

На основе модели Стоянова А. А. по определению проводимости контактирующих между собой металлических частиц в виде шаров, получено выражение для определения эффективной электрической проводимости прессованной стружки $\sigma_{эф}$. С учетом того, что средняя проводимость высоколегированной стали в диапазоне температур 20⁰С до 1000⁰С $\sigma_m \approx 10^6$ (Ом м)⁻¹, то $\sigma_{эф} \approx 3 \cdot 10^5$ (Ом м)⁻¹. Установлено, что удельное сопротивление при выбранной плотности брикетов стружки $\rho = 1 / \sigma_{эф}$ получаемых переплавных электродов возрастает примерно в 3 раза по сравнению с удельным сопротивлением изотропного металла.

Для получения переплавляемого электрода из отработанных дисковых ножей предлагается использовать отработанные дисковые ножи одного типоразмера. Они практически полностью сохраняют стандартные типоразмеры D^*d^*B с тем отличием, что за счет износа внешний диаметр ножей D уменьшается на $\Delta_{изн} = 3-5$ мм.

Для лучшего теплового и электрического контакта ножи прижимают друг к другу с давлением не менее 1 МПа и приваривают друг к другу с помощью аргоновой или плазменной сварки. В зависимости от размера отработанных дисковых ножей делается 3–5 сварных швов вдоль образующей цилиндра электрода, либо проводится точечная сварка в зависимости от диаметра в 3–5 точках по внешней окружности контакта дисковых ножей.

Зная размеры получаемой заготовки, ее внешний, внутренний диаметр и высоту D_3, d_3, H_3 , можно определить суммарную длину h_3 переплавляемого электрода при переплаве m отработанных ножей заданных размеров

$$h_3 = 1,01 \cdot m \cdot B \frac{(D_3^2 - d_3^2)}{((D - \Delta_{изн})^2 - d^2)}.$$

Было проанализировано влияние давления прижатия дисков друг к другу p и качества обработки их поверхности на теплофизические и электрические свойства получаемого переплавляемого электрода в осевом направлении. По методике Попова В. М. был определен эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эф}$ с учетом передачи тепла через зону контакта двух металлических дисков. Получены среднеинтегральные эффективные коэффициенты теплопроводности при $p=1$ МПа в диапазоне температур от 0 до 800⁰С при разной сумме средних высот выступов микронеровностей контактирующих поверхностей h_Σ : при $h_\Sigma = 40$ мкм $\bar{\lambda}_{эф} = 7,8$ Вт/(м град); при $h_\Sigma = 5$ мкм $\bar{\lambda}_{эф} = 10,96$ Вт/(м град).

При соприкосновении двух металлических дисков возникает дополнительное контактное электрическое сопротивление. Происходит относительное увеличение удельного сопротивления $K_{эф} = \frac{\rho_{эф}}{\rho} = \left(1 + \frac{0,12 \cdot E \cdot h_{cp}}{B \cdot p(1-\mu)}\right)$, где ρ и $\rho_{эф}$ – удельное

сопротивление литого металла и электрода; p – давление в месте контакта; $\mu=0,28-0,33$ – коэффициент Пуассона стали; E – модуль упругости; h_{cp} – средняя высота микронеровностей контактирующих поверхностей. При $E = 10^5$ МПа, $p = 1$ МПа, $\mu = 0,3$, $B = 20$ мм получим: при $h_{cp} = 20$ мкм $K_{эф} = 18$; при $h_{cp} = 10$ мкм $K_{эф} = 9,6$; при $h_{cp} = 5$ мкм $K_{эф} = 5,3$.

Далее приведены оценки джоулева объемного тепловыделения в полученном электроде из прессованной стружки и отработанных ножей. Установлено, что оно возрастает в 3-18 раз, однако его ролью на тепловое состояние электрода при ЭШП можно пренебречь.

В работе рассмотрено определение параметров элементов конструкции и технологических режимов процесса ЭШП высоколегированного лома для получения заготовок сплошного сечения. Приведены результаты экспериментальных исследований переплава электродов из прессованной стружки и отработанных ножей и проведена проверка адекватности разработанных и усовершенствованных методик расчета конструкционных и технологических параметров.

Для определения электрических характеристик и скорости переплава электрода с заданными свойствами на установке ЭШП была создана математическая модель. Были использованы те же допущения, как и в задаче про ЭШП с нерасходным электродом и добавлено дополнительное условие [2]. Считаем, что, ток, идущий через боковую стенку кристаллизатора, ограничивается долей $\eta_{бп}$, благодаря прохождению через корочку твердого шлака толщиной δ_r имеющего низкую электрическую проводимость.

Распределение электрического потенциала $U(r, z)$ в жидком шлаке описывается уравнением (1). Оно дополнялось граничными условиями, определяющими характер протекания тока от электрода до нижнего основания и боковых стенок. Используя осевую симметрию, для половины рабочего пространства печи, то есть для области $ABCDEA$ (рисунок 1), запишем граничные условия.

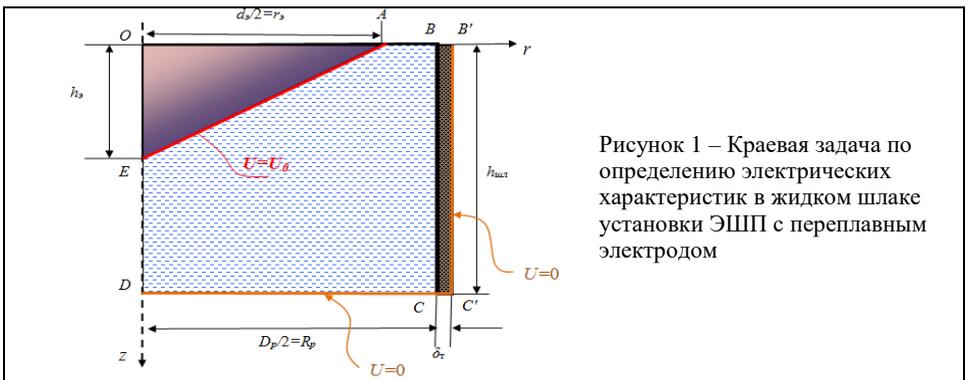


Рисунок 1 – Краевая задача по определению электрических характеристик в жидком шлаке установки ЭШП с переплавным электродом

На поверхности шлакового расплава AB и на оси ванны ED принималось условие непротекания тока в направлении \vec{n} (условие Неймана) $\partial U / \partial n|_n = 0$. Условие Дирихле принималось на границах электрода AE $U = U_0$; на поддоне DC и границе кристаллизатора $B'C'$ задавалось $U = 0$, на границе жидкого и твердого шлака BC имеем условие неразрывности $\sigma_{\text{шл}} \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{BC} = \frac{\sigma_T}{\delta_T} U|_{BC}$. Полный ток через установку ЭШП определялся как интеграл по поверхности переплавляемого электрода, контактирующего со шлаком, получено выражение

$$I_{\text{эшп}} = -2 \cdot \pi \frac{h_3}{r_3} \int_0^{r_3} r \cdot J(r, z(r)) dr, \quad (1)$$

где $J(r, z)$ - модуль вектора плотности тока, при этом сам вектор направлен по нормали к площадке EA , $z(r) = h_3(1 - r/r_3)$. Ток через боковую стенку кристаллизатора определялся как $I_6 = 2\pi R_p \int_0^{h_{\text{шл}}} J_r(R_p, z) dz$. В алгоритме численного расчета методом последовательных приближений менялась проводимость корочки шлака σ_T при заданной ее толщине $\delta_{\text{шл}}$ и уточнялась заданная доля тока $\eta_{\text{бок}} = I_6 / I_{\text{эшп}}$, протекающего через боковые стенки кристаллизатора.

Проведено компьютерное моделирование электрических параметров ЭШП при $\delta_{\text{шл}}=2$ мм, $U_0=30$ В. В качестве шлака использовался АНФ-32. На рисунке 2 дана диаграмма распределения электрических потенциалов в шлаковой ванне. Видно, что наибольший градиент потенциала наблюдается вдоль оси z , на боковых стенках кристаллизатора имеет место радиальная плотность тока. Для установки ЭШП при $\eta_{\sigma} = \sigma_T / \sigma_{\text{шл}} = 1\%$ получена зависимость тока от диаметра переплавляемого электрода при разных напряжениях между электродом и корпусом печи (рис. 3). Видно, что ток тем больше, чем больше диаметр электрода и приложенное к печи напряжение.

Рассмотрена задача определения поля температур в переплавляемом электроде длиной H_3 . Считаем, что в начальный момент времени его нижний торец касается расплавленного шлака с температурой $t_{\text{шл}}$, при этом температура всего остального электрода равна T_0 . Коэффициент теплоотдачи от шлака к электроду $a_{\text{шл}}$. Электрод начинает прогреваться, при этом с его боковой стенки происходит теплоотдача в окружающую среду с коэффициентом теплоотдачи a . Как только температура поверхности торца становится равной температуре солидуса t_c , начинается процесс плавления электрода.

С учетом принятых допущений температурное поле по высоте электрода в выбранной системе координат можно описать уравнением (при $\tau > 0, 0 < x < H_3$)

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) - \frac{\alpha}{c_T \cdot \gamma_T \cdot h} (T - T_0), \quad (2)$$

где $a = \lambda_T / (c_T \cdot \gamma_T)$ - коэффициент температуропроводности материала электрода; h - отношение площади сечения торца электрода к периметру.

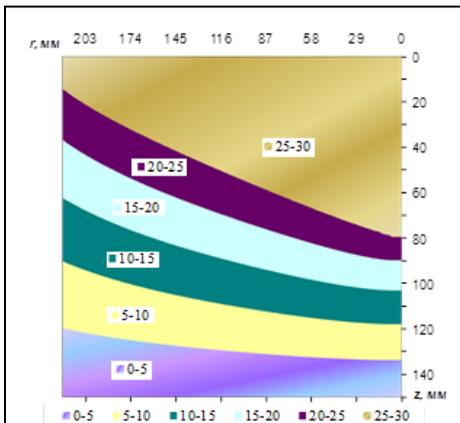


Рисунок 2 – Поле электрических потенциалов в шлаковой ванне ЭШП при $\eta_{\text{бок}} = I_{\text{б}} / I_{\text{эшт}} = 0,3$

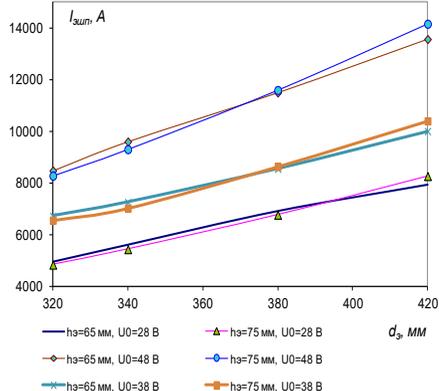


Рисунок 3 – Зависимость тока через печь от диаметра переплавляемого электрода при разных действующих напряжениях

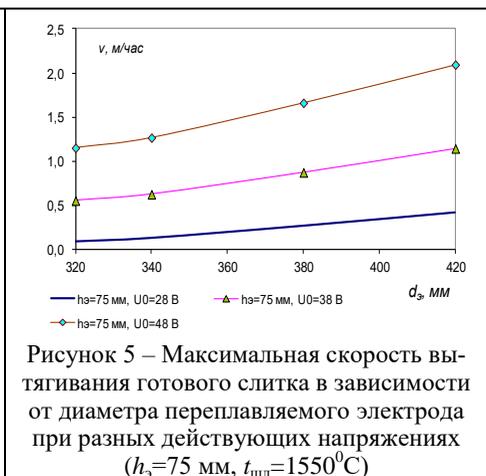
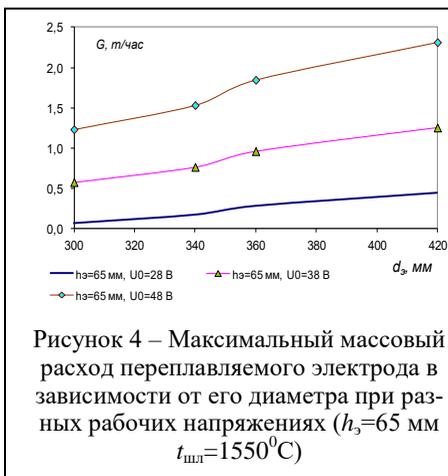
Задавалось начальное условие $T(x, 0) = T_0$ и граничные условия: при $x = H_s$, $\lambda_T \cdot \partial T / \partial x = \alpha_{\text{штл}}(t_{\text{штл}} - T(H_s, \tau))$; при $x = 0$, $\partial T / \partial x = 0$. Данная задача была решена с использованием аналитической зависимости, полученной Лыковым А.В.

Проведены расчеты теплового состояния переплавляемого электрода из литой инструментальной стали 6ХВ2С, сварного электрода из отработанных дисковых ножей и электрода из прессованной стружки 25Х1МФ. Были приняты следующие исходные данные: $\alpha_{\text{штл}} = 3000$ Вт/(м²град); $\alpha = 50$ Вт/(м²град); $T_0 = 350^\circ\text{C}$; $t_{\text{штл}} = 1550^\circ\text{C}$, $T_l = 1500^\circ\text{C}$, $T_s = 1450^\circ\text{C}$.

Получено распределение температуры по длине электрода для разных моментов времени, зависимость средней температуры электрода и теплового потока на нижнем торце электрода от времени при разной конструкции электродов. Установлено изменение температуры от времени в разных точках близких к нижнему торцу электрода. Поверхность литого электрода достигает температуры солидуса примерно через 400 с, электрода из отработанных дисковых ножей через 200 с, а электрода из прессованной стружки за 100 с. С этого момента времени начинается процесс ЭШП.

Проведено компьютерное моделирование теплового состояния шлаковой ванны при ЭШП электродов с различным диаметром для получения заготовок сплошного сечения. В качестве исходных данных были выбраны: $\delta_{\text{штл}} = 4$ мм; $U_0 = 28-48$ В; $h_s = 65-75$ мм. Использовался шлак АНФ-32, его рабочая температура задавалась равной $t_{\text{штл}} = 1550^\circ\text{C}$.

На рисунках 4 и 5 показаны зависимости изменения массового расхода переплавляемого слитка и максимально возможной теоретической скорости вытягивания готового слитка от диаметра переплавляемого электрода. В любом случае, увеличение диаметра переплавляемого электрода или напряжения приводит к увеличению силы тока через установку ЭШП, повышая ее производительность (скорость вытягивания слитка) и увеличивая скорость плавления электрода.



На установке ЭШП ООО «ОСК» были проведены эксперименты по выплавке заготовки из инструментальной стали длиной 1300 мм. В качестве переплавляемого электрода был взят сварной электрод из отработанных ножей размером 300*150*20 из стали марки 6ХВ2С. Длина электрода рассчитывалась по приведенной методике.

После получения слитка определялись механические свойства металла на расстоянии 300 мм, 800 мм и 1300 мм от верхней части слитка. Результаты механических испытаний приведены в таблице 1 (в сравнении с металлом, получаемым в дуговой сталеплавильной печи).

Пластические свойства металла (δ , ψ) у поверхности слитка оказались немного выше, чем в зоне оси, прочностные (σ_T , σ_B) и ударная вязкость примерно одинаковы по всему сечению слитка.

Химический анализ металла ЭШП также показал, что в нем несколько снизилось содержание кремния (с 0,32% до 0,28%) и в 2 раза уменьшилось содержание серы (с 0,025% до 0,011%). Содержание остальных элементов сохранилось практически без изменения, что соответствует стали марки 6ХВ2С, при этом металл слитка имеет высокие механические свойства.

Для выплавки заготовки для роликов МНЛЗ собрали электрод из брикетов прессованной стружки цилиндрической формы: длина брикета составляла 120–140 мм, диаметр 120 мм, масса примерно 13 кг. Брикеты в количестве 40 штук были сварены четырьмя стальными полосками (накладками) металла толщиной 5 мм. Был произведен электрошлаковый переплав по существующей технологии, на флюсе АНФ-32. Длительность переплава составила 130 минут. Был получен слиток диаметром 150 мм, длиной 2500 мм, имеющий удовлетворительное качество по химическому составу, по макро- и микроструктуре.

Предлагаемые технологии с использованием сборных переплавляемых электродов имеют явное преимущество по производительности и суммарным энергозатратам, а также по качеству получаемого слитка из-за снижения угара легирующих добавок по сравнению с имеющимися на металлургических предприятиях двухстадийными технологиями переплава.

Таблица 1. Механические свойства металла ЭШП и ДСП

Механические свойства	σ_T , 10^7 Па	σ_B , 10^7 Па	δ , %	ψ , %	α_H , 10^5 Дж/м ²
Металл ДСП	60,0-65,0	50,0-55,0	15,0	45,0	8,0-10,0
Металл ЭШП	62,2-62,4	73,2-73,3	19,0-19,3	66,3-69,7	15,4-15,5

* Обозначения: σ_T – предел текучести, σ_B – предел прочности, δ – относительное удлинение, ψ – относительное сужение, α_H – ударная вязкость.

В ходе исследования разработана математическая модель теплового состояния и гидравлических параметров внутреннего кристаллизатора печи ЭШП при разных конструкциях системы его водяного охлаждения. С помощью созданной программы, а также посредством программного комплекса ANSYS проведено компьютерное моделирование для выбора рациональных конструкционных параметров внутреннего кристаллизатора.

В условиях ПАО «ММК-Метиз» (г. Магнитогорск) решено модернизировать существующую печь ЭШП, позволяющую выплавлять слитки сплошного сечения, добавив в нее водоохлаждаемый внутренний кристаллизатор (дорн) для формирования полости в выплавляемой заготовке. Конструкцию поддона предложено изменить, дополнив ее отверстием, в которое вставляется дорн, имеющий форму усеченного конуса, причем ось дорна совпадает с осью наружного кристаллизатора (рисунок 6). В простейшем случае водяное охлаждение дорна может представлять собой n вертикальных каналов. С помощью горизонтальных перемычек в верхней части кристаллизатора может быть организовано последовательное, параллельное или параллельно-последовательное соединение каналов. Оси n водяных каналов расположены на расстоянии r_k , причем центральный угол $\varphi_0 = 2\pi/n$ между соседними каналами одинаковый и диаметры всех каналов одинаковые $d_0 = 2r_0$ (рисунок 7).

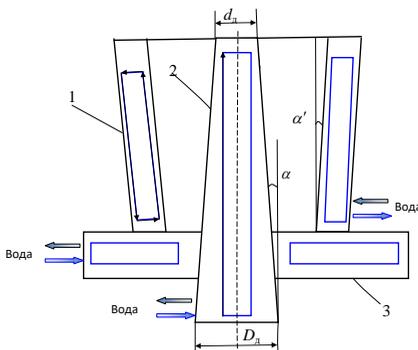


Рисунок 6 – Схема разъемного кристаллизатора для получения полых слитков: 1 – наружный кристаллизатор ЭШП; 2 – внутренний кристаллизатор ЭШП; 3 – поддон

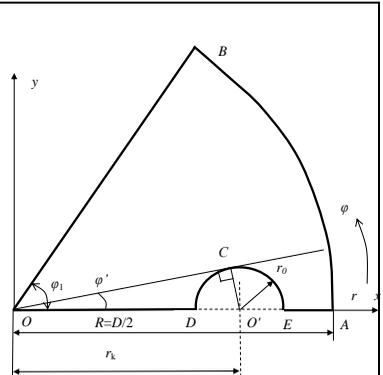


Рисунок 7 – Рабочая расчетная область и ее основные размеры

Создана математическая модель теплового состояния дорна, имеющего n вертикальных водяных каналов. С учетом сформулированных допущений и ограничений на рисунке 7 показана рабочая расчетная область в виде сектора с углом $\varphi_1 = \varphi_0 / 2$. Температурное поле в рабочей области описывается уравнением теплопроводности (при $\tau > 0, 0 < r < R, 0 < \varphi < \varphi_1$)

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right), \quad (3)$$

где T – температура; τ – время; λ, c, ρ – теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность материала дорна соответственно; $a = \lambda / (c \cdot \rho)$.

Для решения дифференциального уравнения (11) его необходимо дополнить краевыми условиями. Начальное условие: $T(r, \varphi, 0) = T_0$. Граничные условия на осях симметрии OB и O : $\partial T / \partial \varphi = 0$; на границе кристаллизатора с затвердевающим металлом $\varphi = [0, \varphi_1], r=R$: $-\lambda \frac{\partial T(r, \varphi)}{\partial r} = q$, где q – тепловой поток на поверхность кристаллизатора со стороны затвердевающего металла. По данным Патона Б. Е. он может составлять 0,5–0,7 МВт/м². На поверхностях водяного канала имеем граничное условие 3 рода: $-\lambda \frac{\partial T(r, \varphi)}{\partial n} = \alpha_{жс} (t_{жс} - T_c(r, \varphi))$. Коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности канала $\alpha_{жс}$ определялся по формуле Михеева.

По рассмотренной математической модели и разработанным алгоритмам в среде *Matlab* создана и зарегистрирована компьютерная программа. С ее помощью проведено моделирование теплового состояния медного дорна диаметром 200 мм с четырьмя или шестью вертикальными каналами диаметром 40 мм и 32,6 мм соответственно, причем суммарная площадь поперечного сечения каналов для обоих случаев одинакова. Расстояние от оси дорна до осей каналов $r_k = 60$ мм. Расчет проводили при $q = 0,5$ МВт/м² и скорости воды в каналах $W_e = 5$ м/с. При этих условиях охлаждения $\alpha_{жс} = 15000 - 17000$ Вт/(м²град). Установлено, что от начала нагрева внутреннего кристаллизатора стационарный процесс с точностью 0,03 °С/с наступает за время не более 5 минут. На рисунке 8 приведены температурные поля при $n=4$ и $n=6$. Видно, что максимальная температура дорна наблюдается на его поверхности в точке B , минимальная – на оси EA (см. рис. 7).

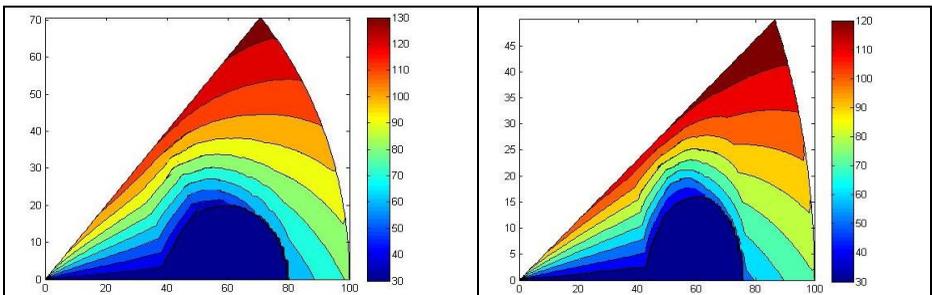


Рисунок 8 – Установившееся распределение температуры в водохлаждаемом дорне, имеющем $n=4$ (а) и $n=6$ (б) каналов

Для проверки адекватности созданных математической и компьютерной моделей проведен температурный анализ рассмотренной конструкции охлаждающих водяных каналов с использованием CAE-системы ANSYS 14.5. Проведенное моделирование подтвердило адекватность предложенных математической и компьютерной моделей. Установлено, что зависимость максимальной температуры от снимаемого теплового потока нелинейная, так при уменьшении теплового потока в 1,67 раза максимальная температура снижается в 1,43 раза.

В результате моделирования установлено, что дорн должен иметь минимум четыре вертикальных канала. Необходимо организовать соединение каналов и подвод воды с помощью горизонтальных полостей в верхней и нижней части кристаллизатора. Отвод воды может производиться как по каналам, так и через специальное центральное отверстие, площадь поперечного сечения которого равна сумме площадей сечения охлаждающих каналов. Разработаны чертежи внутреннего кристаллизатора, нижней и верхней плиты (поддона) с отверстием для внутреннего кристаллизатора.

Наиболее простой системой охлаждения дорна является кристаллизатор в виде изложницы, состоящий из внутреннего и наружного цилиндров, которые устанавливаются на плиту и между которыми подается вода. Разработан макет чертежа дорна, представляющего собой стальную трубу с наружным и внутренними диаметрами $D_{\text{ст.нар}} = 120$ мм, $d_{\text{ст.вн}} = 60$ мм соответственно и длиной $L_{\text{ст}} = 720$ мм. Медный дорн снаружи представляет собой трубу в виде усеченного конуса ($\alpha \approx 1^\circ$), а при - цилиндр диаметром $d_{\text{м.вн}} = 160$ мм и длиной $L_{\text{м}} = 690$ мм. Между внутренним и внешним цилиндрами дорна есть зазор $\delta = (d_{\text{м.вн}} - D_{\text{ст.нар}}) / 2 = 20$ мм, в который подается охлаждающая вода через трубы, расположенные в плите, диаметром 40 мм и имеющие длину 500 мм.

Для медного дорна в виде изложницы диаметром 450 мм было просчитано тепловое состояние и проведен гидравлический расчет системы охлаждения. Получена зависимость перепада давления на внутреннем кристаллизаторе от расхода воды при разном внешнем диаметре стальной трубы и перепады давления между характерными точками гидросистемы и давлением воды в выходном сечении внутреннего кристаллизатора.

При рассмотренных условиях охлаждения максимальная температура наблюдается на торцевой верхней поверхности дорна и составляет около 200°C . При изменении конструкции, т.е. замене охлаждающих каналов охлаждающей полостью, максимальная температура снижается примерно до 180°C . Таким образом, при выбранных схемах охлаждения температура дорна не превышает температуру разупрочнения меди ($\sim 300^\circ\text{C}$). Максимальная температура стенок водяных каналов оказалась на уровне 110°C , что выше точки кипения воды при нормальных условиях, поэтому в системе подачи воды избыточное давление воды должно быть не менее 0,3–0,4 МПа.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе проведенного литературного обзора установлено, что наиболее перспективным методом утилизации металлической стружки и отработанных дисковых ножей является их переработка в виде переплавного электрода в установке ЭШП с получением качественных литых заготовок.

1. Выполнена реконструкция печи ЭШП с применением электрода из прессованной легированной стружки для внедрения технологии производства заготовок для роликов МНЛЗ.

- Разработана новая конструкция переплавляемого электрода из брикетов стальной стружки стали 25Х1МФ, позволившая более эффективно утилизировать легированный лом и сократить число операций по его переделу.

- В связи со значительным изменением электрических и тепловых свойств такого электрода в сравнении с литым, разработаны математические модели процесса электрошлакового переплава, методики расчета и компьютерные программы для определения электрических характеристик и теплового состояния переплавляемого электрода и шлаковой ванны установки ЭШП.

- На основе теоретических исследований установлены режимы переплава для обеспечения максимальной производительности в пределах 1,5 т/час, что как минимум на 20-25% выше производительности традиционных технологий.

- Полученные теоретические результаты подтверждены опытно-промышленными испытаниями, наиболее эффективные режимы внедрены в промышленное производство в ООО «МРК»

2. Выполнена модернизация печи ЭШП с использованием электрода, сваренного из отработанных дисковых ножей для освоения технологии изготовления сплошных литых заготовок дисковых прокатных ножей.

- Разработана новая конструкция составного электрода, изготовленного из отработанных дисковых ножей из стали 6ХВ2С, позволившая эффективно их утилизировать путем переплава в электрошлаковой печи для повторного использования.

- Установлена анизотропия свойств сварного электрода, с учетом этого разработана математическая модель с использованием аналитического решения для определения нестационарного поля температуры по длине переплавляемого электрода.

- Посредством компьютерного моделирования выявлено, что нижний торец электрода достигает температуры солидуса примерно через 3-4 минуты. Полученные данные являются основой для определения момента начала плавления и включения механизмов перемещения электрода и кристаллизатора. Установленная динамика теплового состояния переплавляемого электрода в зависимости от его геометрии и свойств позволила определить рациональные скорости вытягивания слитка и перемещения электрода.

- Сравнение технологии переплава электрода, изготовленного из отработанных дисковых ножей с существующими двухстадийными технологиями, показало ее явное преимущество по производительности, суммарным энергозатратам и по качеству получаемого слитка.

- Экспериментальная выплавка заготовки на установке ЭШП ООО «ОСК» из электрода, сваренного из отработанных ножей, показала, что химический состав слитков соответствует стали марки 6ХВ2С и полученный металл слитка имеет высокие механические свойства.

3. Разработаны новые конструкции печи ЭШП с дополнительным внутренним кристаллизатором для получения специальных полых заготовок дисковых ножей близких по форме к готовым изделиям.

- Предложены разные варианты конструкций системы охлаждения внутреннего кристаллизатора (дорна) ЭШП. Разработаны математические модели и компьютерные программы для определения гидравлических параметров охлаждающей системы и теплового состояния дорна заданной конструкции.

- На основе теоретических исследований 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 градиентов температуры.

- Инженерное моделирование посредством программного комплекса ANSYS подтвердило адекватность разработанных моделей и позволило рассчитать тепловое состояние дорна, выполненного в виде изложницы. При этом температура внутреннего кристаллизатора при рабочих тепловых потоках не превышает 1800С, что является лучшим результатом среди рассмотренных вариантов конструкций охлаждения дорна.

- Созданы рабочие чертежи дорна в виде изложницы и модернизированного поддона кристаллизатора ЭШП и переданы на предприятие ООО «ОСК».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

1. Вдовин, К.Н. Определение характеристик установки ЭШП электрода из прессованной стружки легированной стали / К.Н. Вдовин, М.И. Ячиков, И.М. Ячиков, Д.А. Дерябин // Сталь. – 2019. – №9. – С. 23-28.
2. Вдовин, К.Н. Оценка производительности установки ЭШП стали 25Х1МФ с нерасходуемым электродом / К.Н. Вдовин, М.И. Ячиков, А.А. Нефедьев // Сталь. – 2017. – №3. – С. 26-29.

Регистрация программы для ЭВМ:

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017619260 Тепловое состояние внутреннего кристаллизатора установки ЭШП / М.И. Ячиков, И.М. Ячиков, К.Н. Вдовин // Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 18.08.2017г.

Публикации в других изданиях:

4. Анцупов, В.П. Переработка в электрошлаковой печи переплавляемого электрода из отработанных дисковых ножей и определение его свойств / В.П. Анцупов, М.И. Ячиков, И.М. Ячиков // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2020. – №2. – С. 3-10.
5. Ячиков, И.М. Моделирование теплового состояния переплавляемого электрода из прессованной стружки при ЭШП / И.М. Ячиков, М.И. Ячиков, С.С. Приданников // Актуальные проблемы современной науки и образования. – 2020. – С. 355.
6. Вдовин, К.Н. Расчет конструкционных характеристик установки ЭШП при выплавке заготовки роликов МНЛЗ / К.Н. Вдовин, М.И. Ячиков // Актуальные проблемы современной науки и образования. – 2019. – Т.10., №1. – С. 63-67.
7. Ячиков, И.М. Моделирование теплового состояния электрода из прессованной металлической стружки при ее переработке в установки ЭШП / И.М. Ячиков, М.И. Ячиков, С.С. Приданников // Современные достижения университетских научных школ. Сборник докладов национальной научной школы-конференции. МГТУ им. Г.И. Носова. – 2019. – С. 142–147.

8. Ячиков, И.М. Гидравлический расчет внутреннего кристаллизатора, используемого для получения полых слитков в установке ЭШП / И.М. Ячиков, М.И. Ячиков // Современные достижения университетских научных школ. Сборник докладов национальной научной школы-конференции. МГТУ им. Г.И. Носова. – 2018. – С. 86–91.
9. Вдовин, К.Н. Переплавы ножевых марок сталей методом ЭШП / К.Н. Вдовин, М.И. Ячиков, А.Н. Юсин, А.Е. Позин, Е.А. Русин // Теория и технология металлургического производства. – 2017. – №1 (20). – С. 23-26.
10. Вдовин, К.Н. Производство стальных валков методом электрошлакового перепада / К.Н. Вдовин, М.И. Ячиков // Литейщик России, 2016, №4 – С. 15-16.
11. Ячиков, М.И. Моделирование теплового состояния внутреннего кристаллизатора электрошлаковой печи / М.И. Ячиков, И.М. Ячиков, М.А. Сичная // Труды Пятой Международной научной конференции «Информационные технологии и системы». Челябинский государственный университет. – 2016. – С. 304–309.
12. Ячиков, М.И. Модель теплового состояния внутреннего кристаллизатора электрошлаковой печи / М.И. Ячиков, К.Н. Вдовин, И.М. Ячиков, М.А. Сичная // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2016. – Т.4, №1. – С. 13-18.
13. Вдовин, К.Н. Производство валков методом электрошлакового перепада / К.Н. Вдовин, Л.Г. Егорова, М.И. Ячиков // Межрегиональный сборник научных трудов «Литейные процессы». – 2016. – №15. – С. 124-128.
14. Сичная, М.А. Математическая модель теплового состояния внутреннего кристаллизатора ЭШП / М.А. Сичная, М.И. Ячиков, И.М. Ячиков, К.Н. Вдовин // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. трудов IV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ'2015). УрФУ. – 2015. – С. 105-109.
15. Сичная, М.А. Существующие конструкторские решения установок ЭШП для получения полых слитков из нержавеющей стали / М.А. Сичная, М.И. Ячиков // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 12 частях. Тамбов: ООО "Консалтинговая компания Юком". – 2015. – С. 93–94.
16. Ячиков, И.М. Математическая модель тепловой работы элементов установки ЭШП для получения полых слитков / И.М. Ячиков, М.И. Ячиков, М.А. Сичная // Информатика, управління та штучний інтелект: Тезиси науково-технічної конференції студентів, магістрів та аспірантів, Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – С. 96.
17. Ячиков, И.М. Моделирование гидравлической работы медных кристаллизаторов / И.М. Ячиков, Т.П. Ларина, М.И. Ячиков // Труды XII конгресса сталеплавильщиков. Металлургиздат. – 2013. - С. 316-318.
18. Ячиков, И.М. Математическое моделирование гидравлической работы медных кристаллизаторов / И.М. Ячиков, Т.П. Ларина, М.И. Ячиков // Труды VIII Международной научно-технической конференции: Информационные технологии в науке, технике и образовании. – 2013. - С. 215-221.