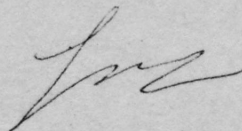


ПАСЕЧНИК Николай Васильевич

**РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ, СОЗДАНИЕ НОВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОКАТКИ ЛЕНТ И
ПОЛОС ИЗ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

Специальность 05.03.05 - «Процессы и машины обработки давлением»

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**



МОСКВА 2000

Работа выполнена в ОАО АХК "Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения имени академика А.И. Целикова".

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор, заслуженный деятель науки РФ

Гарбер Э.А.

доктор технических наук,
профессор

Кобелев А.Г.

доктор технических наук,
профессор

Сафонов А.В.

Ведущее предприятие -

Московский металлургический завод
"Серп и молот"

Защита состоится "18" октября 2000г. в 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д.053.15.05. при **Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана** по адресу: 107005, г. Москва, 2-я Бауманская улица, 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

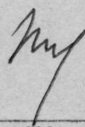
Телефон для справок

267-09-63

Автореферат разослан

" " _____ 2000г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



В.И. Семенов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Отечественная металлургия нуждается в коренном техническом перевооружении, которое, на наш взгляд, должно осуществляться по двум направлениям: реконструкция и реструктуризация действующего производства на базе новых разработок в области совершенствования существующих машин и технологий и создание новых производств на базе принципиально новых технологий и машин.

Высокие технологии, все шире вторгающиеся в различные области современной жизни, требуют использования материалов, обладающих особыми физико-механическими свойствами. Применение высокопрочных, жаростойких и жаропрочных, коррозионно-стойких и тугоплавких металлов, а также широкого класса композиционных материалов, в виде прецизионных изделий, становится все более актуальным в промышленности. Большинство этих материалов являются труднодеформируемыми, что определяет сложность изготовления изделий, создает проблемы обеспечения их хорошего качества.

Одним из возможных способов воздействия на прокатываемый металл является электроконтактный нагрев (ЭКН). Он обеспечивает высокую скорость нагрева, с высокой точностью поддерживает требуемую температуру деформации, уменьшает трудоемкость производства и снижает расход энергии. Однако, его применение при прокатке еще не получило широкого использования, что связано с трудностями создания универсального оборудования и новых технологических приемов. Это актуально, как в практическом, так и в научном отношении.

Целью работы является создание теории и разработка новых технологических процессов и высокоэффективного оборудования для прокатки труднодеформируемых и композиционных материалов с применением электроконтактного нагрева.

Для достижения указанной цели требуется решить **следующие задачи**:

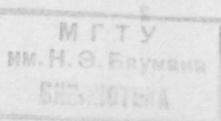
- на основании имеющихся научно-технических достижений выбрать направление исследований и разработок для создания технологии и прокатного оборудования применительно к конкретным материалам;
- разработать теоретические основы и инженерные методики расчета процессов прокатки труднодеформируемых и композиционных материалов с применением электроконтактного нагрева заготовки перед рабочей клетью и в очаге деформации;
- разработать новые технологические режимы прокатки лент и полос из труднодеформируемых и композиционных материалов и сформулировать требования к прокатному оборудованию;
- разработать специальное оборудование, в том числе универсальное, обеспечивающее электронгрев и прокатку лент и полос в широком диапазоне толщин из труднодеформируемых и композиционных материалов;

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1568598

Пасечник Н.В. Разработка т



- провести реконструкцию действующего и изготовление нового оборудования по разработанным проектам;
- осуществить промышленное освоение оборудования, исследовать его работу в производственных условиях;
- разработать предложения по широкому внедрению разработанных процессов в промышленности.

Научная новизна. На основании анализа тепловых потоков в пространстве, занимаемом полосой, разработана для наиболее общего случая трехмерная математическая модель совмещенного процесса электроконтактного нагрева и прокатки движущейся заготовки с возможностью подведения разности электрических потенциалов, как между токоподводящими клетями, так и между валками прокатной клетки.

Модель, полученная путем решения нелинейной системы уравнений, позволяет описать процесс изменения в широких пределах (от 20 до 1000 °C) температуры в зависимости от времени и координат в пространственной области, ограниченной некоторой поверхностью. При этом учитываются изменения, зависящих от температуры, величин удельной электрической проводимости, теплоемкости, коэффициента теплопроводности, сопротивления деформации, а также квадратов частных производных потенциала электрического поля по координатам.

Установлено, что увеличение скорости прокатки при электроконтактном нагреве заготовки в очаге деформации приводит к уменьшению влияния теплопроводности на распределение температуры по сечению заготовки. Теплопроводность материала необходимо учитывать при скоростях до 5 м/с.

Математическая модель позволяет определить распределение тока, электрического потенциала и температурное поле в прокатываемой полосе.

Разработаны модели, оригинальные алгоритмы и программы расчета, позволяющие выполнить теоретические исследования процесса совмещенного нагрева и деформации заготовок, а также выбрать рациональную компоновку и параметры механического и электрического оборудования.

Установлено, что наибольшая равномерность электроконтактного нагрева широкой полосы при высоком электрическом сопротивлении материала валков достигается при двухстороннем расположении токоподводов на каждом валке. Для применяемых материалов валков при реальных скоростях прокатки и протяженности участка нагрева это влияние не существенно.

Выполнен анализ влияния скорости прокатки, сопротивления деформации, расстояния между клетями и других технологических и конструктивных параметров на температуру нагрева узких полос.

Впервые разработаны методики расчета нагрева компонентов многослойной ленты с одним и двумя источниками технологического нагрева, позволяющие разработать технологию и конструкцию станков для прокатки биметаллов.

Математическая модель нагрева полосы в условиях прокатного стана

с электронагревом достаточно точно описывает температурное поле, возникающее в движущейся деформируемой полосе. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных значений величин тока и напряжения источника технологического нагрева не превышает 10%. Разработанную методику можно рекомендовать при проектировании прокатных станов с ЭКН.

Практическая ценность. Научные разработки и технические решения диссертации направлены на создание и развитие технологии и оборудования для прокатки лент и полос, в том числе многослойных, из труднодеформируемых сталей и сплавов с электроконтактным нагревом заготовки перед рабочей клетью и в очаге деформации.

Разработаны основные принципы технологической схемы и состава оборудования для прокатки полос с управляемым электроконтактным нагревом, новые технические и конструктивные решения механизмов, узлов и систем оборудования уникального прокатного стана 200 ЭКН.

Определены технологическая схема и состав механического оборудования стана для прокатки узких полос из труднодеформируемых материалов с электроконтактным нагревом заготовки в очаге деформации, модернизирован опытно-промышленный стан МАМП с нагревом заготовки пропусканием электрического тока перед рабочей клетью и через очаг деформации.

Для промышленного производства труднодеформируемых сталей и сплавов разработаны уникальные, не имеющие аналогов в отечественной и мировой практике, специализированный стан 300 и универсальный стан 70 для прокатки лент и полос из труднодеформируемых материалов.

Разработаны рекомендации по конструкции токоподводящих устройств, обеспечивающих высокую надежность в эксплуатации при относительной простоте конструкции.

В результате экспериментальных исследований и опыта эксплуатации даны рекомендации по выбору материала рабочих валков, обеспечивающие высокую стойкость при прокатке полос с электроконтактным нагревом перед клетью и в очаге деформации.

Разработан технический проект стана 400/1000x500 для плакирования с электроконтактным нагревом полос из материалов типа томпак – сталь – томпак, нержавеющей – сталь – нержавеющая, титан – сталь – титан и др.

Предложены новые технические и конструкторские решения универсальной рабочей клетки 400 с различными валковыми системами и широким диапазоном прокатываемой продукции. Решения могут быть использованы как при проектировании новых универсальных клеток разных типоразмеров, так и при модернизации действующего оборудования.

Разработаны оригинальные технологические методы обработки валков, использующие комбинированное воздействие энергии электрического и магнитного полей. Установлены технологические режимы обработки валков для стана 160. Разработаны технические предложения по конструкции экспериментальных установок для проведения процессов магнитоэлектрической

контактной резки, магнитоэлектрического шлифования и полирования.

Реализация результатов работы в промышленности. Теоретические и экспериментальные исследования совмещенного процесса электроконтактного нагрева и прокатки труднодеформируемых сталей и сплавов позволили разработать и внедрить на заводах оборонной промышленности АО "Ижсталь", АО "Тула-Чермет", Нытвенский металлургический завод и др., а также на заводах-изготовителях металлургического оборудования, в научно-исследовательских и проектных институтах высокопроизводительное и надежное прокатное оборудование, а также ряд малоотходных технологических процессов для производства прецизионных лент и полос высокого качества.

На заводе Ижсталь внедрен уникальный, не имеющий аналогов в отечественной и мировой практике, прокатный стан 200 ЭКН и осуществлен большой комплекс мероприятий по освоению новых процессов производства прецизионных полос из инструментальных сталей. Промышленное внедрение рациональных режимов деформирования с электроконтактным нагревом инструментальных сталей позволило существенно увеличить выход годной продукции, повысить качество полос и сократить расход металла на 8...12%.

Разработанная технология получения микропрофильного проката из вольфрама и молибдена с пропусканием электрического тока высокой плотности через очаг деформации прошла опытно-промышленные испытания на заводах электронной промышленности, а ее промышленное использование обеспечило выход годного на 10...15% при одновременном повышении качественных показателей плюшевой ленты.

Разработанные кинематические схемы универсальных рабочих клеток, построенные на базе валковых систем дуо, кварто, 6-валковой и многовалковых каскад, использованы при создании станок: 150/500х400, 270/750х500, 125/380х320, 150/500х400, 250/750х900 и 630.

Разработанный электроконтактный способ поверхностной закалки изделий внедрен на промышленных предприятиях ОАО Коломенский завод и ОАО Карачаровский завод; экспериментальная стойкость изделий, закаленных путем использования СВАН-процесса повысилась в 1,3...1,8 раза.

Результаты исследований, изложенные в монографии "Производство прецизионной ленты из труднодеформируемых материалов электропластической деформацией" (М.: Металлургия, 1997, 256 с), используются в качестве учебного пособия в ВУЗах, а также в виде алгоритмов и программ при проектировании прокатных станок в научно-исследовательских и проектных институтах и на машиностроительных заводах.

Апробация работы. Материалы работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и конгрессах:

1. Всероссийская научная конференция "Технология и оборудование сталеплавильного и прокатного производства" г. Череповец, 1996г.

2. Научно-техническая конференция "Теория и технология процессов пластической деформации", МИСиС, г. Москва, 1996г.

3. Научно-практическая конференция "Черные и цветные металлы. Производство и потребление сегодня и завтра", г. Москва, 1997г.
4. Научно-техническая конференция "Теория и технология процессов пластической деформации", г. Москва, МИСиС, 1997г.
5. II конгресс прокатчиков, г. Череповец, 1997г.
6. Всероссийская научно-практическая конференция "Машиностроительные технологии", г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1998г.
7. Научно-техническая конференция "50 лет кафедре "Оборудование и технологии прокатки", г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999г.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в монографии, 20 статьях, 16 авторских свидетельствах и патентах.

Структура диссертации: диссертация состоит из введения, шести глав и выводов, включающих 322 страницы машинописного текста, в том числе 90 рисунков, 37 таблиц, библиографический список из 91 наименования источников отечественных и зарубежных авторов и приложения.

1.ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ПРОКАТКИ ЛЕНТ И ПОЛОС ИЗ ТРУДНО-ДЕФОРМИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ.

В данной работе исследования велись применительно к трем большим группам материалов: инструментальные стали; тугоплавкие металлы и сплавы, и композиционные материалы.

Низкая пластичность инструментальных сталей приводит к трудностям обработки их давлением, как в горячем, так и в холодном состоянии. В быстрорежущей стали значительное обезуглероживание является частой причиной образования трещин при закалке. При холодной прокатке труднодеформируемых материалов на кромках полос часто образуются трещины. Решение задачи эффективного пластического деформирования ряда инструментальных сталей в диапазоне толщин традиционного применения холодной прокатки может быть осуществлено применением теплой и горячей прокатки. Для предупреждения обезуглероживания и окисления инструментальных сталей при нагреве под прокатку в печах необходимо использовать защитную атмосферу, что приводит к существенному усложнению технологического оборудования и удорожанию продукции.

Рациональная температура деформирования быстрорежущих сталей, близкая к 800°С, и применение высокоскоростного электронагрева заготовок непосредственно перед очагом деформации позволяет избежать обезуглероживания стали и нафталинистого излома

Высокая температура плавления, значительная механическая прочность и твердость, высокая жаропрочность, жаростойкость и коррозионная стойкость являются уникальными свойствами тугоплавких металлов, определяющими широкое использование тугоплавких металлов и их сплавов.

В связи со спецификой свойств труднодеформируемых металлов и сплавов традиционные методы плющения проволоки из этих материалов во

многих случаях оказываются неприемлемыми. Так, применение станов с роликовыми волоками не обеспечивает получение ленты (например, из молибдена) требуемого качества.

Следовательно, для получения прецизионной ленты из тугоплавких материалов следует использовать высокотемпературную пластическую деформацию. Но при нагреве этих металлов до температуры свыше 500°C они интенсивно взаимодействуют с активными газами воздуха, что резко снижает их пластичность, жаропрочность, теплопроводность и другие физико-механические свойства. Поэтому, важной проблемой является изыскание способа, обеспечивающего защиту этих металлов от окисления и газонасыщения в процессе их деформации. Одним из них является пластическое деформирование тугоплавких металлов при нагреве электрическим током.

Большее распространение в наукоемких технологиях нашли прецизионные плющенные ленты и тонкие полосы. Технология получения тонкой ленты в рулонах предусматривает нагрев заготовки до температуры порядка 800°C и прокатку при этой температуре. Причем скорость нагрева и стабильность температурного режима прокатки существенно влияет на качество готовой продукции. В связи с этим представляет интерес использования электронгрева при прокатке тонких лент из труднодеформируемых сталей.

Тенденция расширения применения технологических процессов, при которых производится непосредственный электронгрев металла перед его пластической деформацией, определяется следующими преимуществами этих процессов:

- высокая производительность процесса нагрева;
- высокая точность поддержания заданной температуры нагрева;
- значительное уменьшение угара нагреваемого металла;
- исключение обезуглероживания;
- существенное снижение общих энергетических затрат на деформацию;
- уменьшение затрат для защиты окружающей среды;

Существует два основных способа обеспечения электроконтактного нагрева заготовки при прокатке. В первом случае напряжение подводится к изолированным валкам, и ток проходит через заготовку только в очаге деформации. При втором способе заготовка нагревается на участке между двумя токоподводящими клетями. Более приемлемой является схема, когда нагрев металла до температуры прокатки производится непосредственно перед очагом деформации.

Таким образом, традиционные технологические процессы прокатки лент и полос из труднодеформируемых металлов и сплавов малоэффективны, отличаются значительной трудоемкостью и не позволяют получить продукцию высокого качества. Перспективным направлением работ по созданию новых процессов и оборудования для получения изделий из таких материалов является использование электроконтактного нагрева полосы.

Таким образом, разработка прокатного оборудования для получения

прецизионной плющеной ленты из тугоплавких металлов и их сплавов с использованием электроконтактного нагрева в очаге деформации и перед ним весьма актуальна, однако требует предварительной теоретической, технологической и конструкторской проработки.

Благодаря достижениям в области физики твердого тела, металловедения и обработки давлением, создан новый класс конструкционных материалов - многослойные (композиционные) ленточные материалы. При производстве и применении многослойных лент стремятся использовать лучшие качества отдельных составляющих для получения новых физико-механических свойств, которые не могут быть получены в однородном материале.

В качестве отдельных составляющих таких материалов используются высококачественная сталь, цветные металлы и сплавы, тугоплавкие металлы и сплавы и т.д. Большое число требуемых промышленностью комбинаций основного и плакирующего слоев и типоразмеров биметаллического проката, разнообразие областей и направлений его использования делает необходимой разработку новых процессов его производства.

Высокоскоростной электроконтактный нагрев перед очагом деформации позволит исключить окисление контактных поверхностей, обеспечить строгий температурный режим нагрева и освоить выпуск биметалла с компонентами, свариваемость которых в холодном состоянии не достигается.

В случае применения электроконтактного нагрева при производстве биметалла технологический процесс и состав механического оборудования остаются практически такими же, как и при традиционном холодном плакировании. Поэтому установка стана в цехе плакирования или реконструкция действующего плакировочного стана является весьма перспективной.

Весьма перспективным является также процесс прокатки длинномерных изделий из слоистых и волокнистых композиционных материалов с применением электроконтактного нагрева перед очагом деформации. Процесс отличается высокой скоростью нагрева компонентов, возможностью выбора оптимального диаметра рабочих валков и обеспечения постоянного температурного режима в очаге деформации, вне зависимости от скорости прокатки. Для промышленной реализации этого процесса необходимы теоретические и экспериментальные исследования, новые конструкторские разработки соответствующего оборудования.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ С ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ НАГРЕВОМ (ЭКН).

При разработке обобщенной математической модели электроконтактного нагрева заготовки в условиях прокатного стана рассматривалось распространение тепла и формирование поля электрического потенциала в заготовке и валках как в трехмерных объектах.

Расчетная схема приведена на рис. 1. Заготовка движется между токоподводящей и прокатной клетями. Электрические цепи нагрева включают в

себя источники напряжения И1 и И2, а также токоподводы, детали рабочей и токоподводящей клетей, нагреваемые участки заготовки.

$F_{30}(x,y,z)=0$, $F_{31}(x,y,z)=0$, $F_{31}(x,y,z)=0$ - уравнения, описывающие поверхность заготовки соответственно до очага деформации прокатной клетки, в очаге деформации и за клетью. Допускается, что поверхности шеек валков, на которых установлены токосъемы, являются эквипотенциальными.

По известному скалярному полю $U(x,y,z)$ электрического потенциала и удельной проводимости $\gamma(x,y,z)$ определяются составляющие $j_x(x,y,z)$, $j_y(x,y,z)$ и $j_z(x,y,z)$ векторного поля $j(x,y,z)$ плотности электрического тока

$$j_x = \frac{\partial U}{\partial x} \cdot \gamma(x,y,z); \quad j_y = \frac{\partial U}{\partial y} \cdot \gamma(x,y,z); \quad j_z = \frac{\partial U}{\partial z} \cdot \gamma(x,y,z). \quad (1)$$

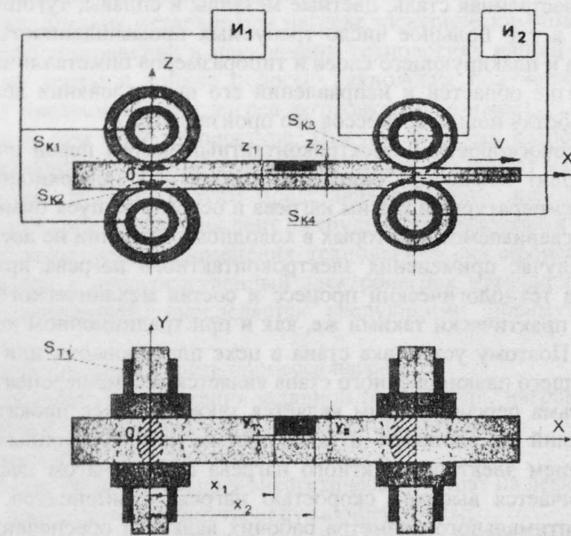


Рис. 1. Расчетная схема электроконтактного нагрева полосы.

На поверхности нагреваемой заготовки, а также на поверхностях валков (кроме шеек, на которых установлены токосъемы), составляющие вектора плотности тока, нормальной к этим поверхностям, равны нулю.

Поверхности контакта валков с заготовкой являются границами пространственных областей с различными электрическими свойствами. В точках, принадлежащих этим поверхностям, выполняется условие непрерывности потенциала U и нормальной к этим поверхностям составляющей вектора плотности тока, т.е.

$$U_B = U_3; \quad \frac{\partial U_B}{\partial n} \cdot \gamma_B(x,y,z) = \frac{\partial U_3}{\partial n} \cdot \gamma_3(x,y,z), \quad (2)$$

где $\frac{\partial U_B}{\partial n}$, $\frac{\partial U_3}{\partial n}$ - производные по нормали к поверхностям контакта.

Из решения уравнения в частных производных

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \cdot \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma \cdot \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

Компоненты скоростей должны удовлетворять дифференциальному условию несжимаемости тела при пластических деформациях, т.е. условию равенства нулю дивергенции векторного поля V

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

Граничные условия:

$$\begin{cases} U(S_{T1}) = U(S_{T2}) = \dots U(S_{Tn}) = U_1; \\ U(S_{Tn+1}) = U(S_{Tn+2}) = \dots U(S_{Tn+m}) = U_2; \\ U(S_{Tn+m+1}) = U(S_{Tn+m+2}) = \dots U(S_{Tk}) = 0; \\ \frac{\partial U}{\partial n} = 0 \text{ на остальных поверхностях.} \end{cases} \quad (4)$$

где $S_{T1}, S_{T2}, \dots, S_{Tk}$ - поверхности токоподводов;

U_1 и U_2 - напряжения источников питания.

Выражение для теплового потока dQ_T через сечение S_{x1} параллелепипеда за промежуток времени $(t, t+dt)$, определяемого теплопроводностью

$$dQ_T = - \left(\iint_{S_{x1}} k \frac{\partial T}{\partial X} dS_{x1} \right) dt, \quad (6)$$

где k - коэффициент теплопроводности нагреваемого металла, Вт/(м·°C).

Тепловой поток dQ_M , проходящий через сечение S_{x1} параллелепипеда за промежуток времени $(t, t+dt)$, вместе с перемещающимся металлом равен

$$dQ_M = \left(\iint_{S_{x1}} C \cdot \rho_m \cdot T \cdot V_x \cdot x \cdot dS_{x1} \right) \cdot dt, \quad (7)$$

где C - удельная истинная теплоемкость нагреваемого металла, Дж/(кг·°C);

ρ_m - плотность нагреваемого металла, (кг/м³).

Коэффициент теплопроводности k и удельная теплоемкость C в общем случае зависят от температуры.

Выражение для полного теплового потока, проходящего через сечение S_{x1} за интервал времени $t_1 \dots t_2$ можно получить, проинтегрировав сумму зависимостей (6) и (7) на этом интервале времени

$$Q_n(S_{x1}) = \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \int_{t_1}^{t_2} \left(C \cdot \rho_m \cdot T \cdot V_x - k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \quad (8)$$

$x = x_1$

Аналогично для тепловых потоков через сечения $S_{x2}, S_{y1}, S_{y2}, S_{z1}$ и S_{z2} . С использованием функции плотности тепловых источников q_n (Вт/м³)

выделение тепла в рассматриваемом параллелепипеде за промежуток времени $t_1 \dots t_2$ определяется интегральным соотношением

$$Q_{\text{и}} = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \int_{t_1}^{t_2} q_{\text{и}} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \quad (9)$$

Функция плотности тепловых источников

$$q_{\text{и}} = q_{\text{эл}} + q_{\text{деф}}, \quad (10)$$

где $q_{\text{эл}}$ -функция, описывающая нагрев полосы электрическим током:

$$q_{\text{эл}} = \gamma \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \gamma \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \gamma \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2. \quad (11)$$

$q_{\text{деф}}$ - функция нагрева от деформации металла:

$$q_{\text{деф}} = \sigma_s u_s \quad (12)$$

u_s -интенсивность скорости деформации;

σ_s -сопротивления деформации.

Интенсивность скорости деформации u_s определяется

$$u_s = \sqrt{\frac{2}{3} \left[(u_x - u_y)^2 + (u_y - u_z)^2 + (u_z - u_x)^2 \right] + (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}. \quad (13)$$

Тепловая энергия $Q_{\text{н}}$, поглощенная или выделенная в области пространства при изменении его температуры от T_1 до T_2 за время $(t_1 \dots t_2)$

$$Q_{\text{н}} = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \int_{t_1}^{t_2} \rho_m \cdot C \cdot \frac{dT}{dt} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \quad (14)$$

Баланс тепловой энергии

$$Q \cdot (S_{x_1}) - Q \cdot (S_{x_2}) + Q \cdot (S_{y_1}) - Q \cdot (S_{y_2}) + Q \cdot (S_{z_1}) - Q \cdot (S_{z_2}) + Q_{\text{и}} = Q_{\text{н}} \quad (15)$$

Используя теоремы о среднем для интегралов и о конечном приращении, получим дифференциальное уравнение, описывающее температурное поле в пространственной области, занимаемой полосой между клетями

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho_m \cdot V_x \cdot \frac{\partial}{\partial x} (C \cdot T) - \\ \rho_m \cdot V_y \cdot \frac{\partial}{\partial y} (C \cdot T) - \rho_m \cdot V_z \cdot \frac{\partial}{\partial z} (C \cdot T) + q_{\text{и}} = \rho_m \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t}. \end{aligned} \quad (16)$$

Граничные условия для уравнения (16) на свободных поверхностях заготовки и на поверхностях контакта заготовки с валками клетей

$$-k \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = P_{\text{окр}}(T, T_{\text{окр}}); \quad -k \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{\text{вал}}), \quad (17)$$

где α - коэффициент теплоотдачи от заготовки к валкам, Вт/(м²°C)

$T_{\text{вал}}$ - температура поверхности валков, °C.

Таким образом, получим систему двух дифференциальных уравнений в частных производных относительно поля электрического потенциала U в

валках и нагреваемой заготовке и температурного поля T в заготовке:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho_m \cdot v_x \cdot \frac{\partial}{\partial x} (C \cdot T) - \rho_m \cdot v_y \cdot \frac{\partial}{\partial y} (C \cdot T) - \\ - \rho_m \cdot v_z \cdot \frac{\partial}{\partial z} (C \cdot T) + \gamma \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_2 + \gamma \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \gamma \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \sigma_s \cdot u_s = \rho_m \cdot C \frac{\partial T}{\partial t} \end{cases} \quad (18)$$

Система уравнений (18) является нелинейной вследствие входящих в нее и зависящих от температуры T величин удельной электрической проводимости γ , теплоемкости C , коэффициента теплопроводности k , сопротивления деформации σ_s , а также квадратов частных производных потенциала электрического поля по координатам. Кроме того, нелинейная зависимость мощности теплоотдачи $\text{Рокр}(T, \text{Токр})$ с поверхности заготовки в окружающую среду входит в граничные условия (17) по температурному полю.

Поэтому разработка универсальных алгоритма и программы решения системы уравнений (18) практически невыполнима. Задачу расчета поля электрического потенциала и температурного поля в заготовке можно упростить за счет сведения ее к меньшей размерности, соответствующих формулировок граничных условий, функции плотности тепловых источников и т.д.

В процессе электроконтактного нагрева температура заготовки за короткое время изменяется в широких пределах (от 20 до 1000 °C) и некоторые физико-механические характеристики сплава, а также параметры, определяющие его взаимодействие с окружающей средой, значительно изменяются.

Плотность ρ_m прокатываемого материала от температуры практически не зависит ($\rho = 8100 \text{ кг/м}^3$ для стали Р9 и $\rho = 8700 \text{ кг/м}^3$ для стали Р18).

Анализ экспериментальных данных для стали Р18 позволил получить зависимости истинной теплоемкости от температуры

$$C = 400 + 80 \cdot \frac{T}{800} + 270 \left(\frac{T}{800} \right)^2, \quad \text{при } 0 \leq T < 800 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$C = 1650 - 1200 \cdot \frac{T}{800} - 300 \left(\frac{T}{800} \right)^2, \quad \text{при } 800 \leq T < 1000 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Относительная ошибка расчета по этой зависимости не превышает 5 %.

Исследования показывают, что удельное электрическое сопротивление металлов и сплавов зависит от температуры практически линейно

$$\rho_s = \rho_{s0} (1 + \alpha_T T),$$

где ρ_{s0} - удельное электрическое сопротивление при $T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$, Ом·м;

α_T - температурный коэффициент изменения сопротивления, $1/^\circ\text{C}$.

По данным эксперимента для Р18 $\rho_{s0} = 0,405 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$; $\alpha_T = 1,86 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C}$, а для стали Х6ВФ - $\rho_{s0} = 0,290 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$; $\alpha_T = 1,80 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C}$.

При расчетах температурных полей считаем коэффициент теплопро-

водности (k) постоянным, определяемым по средним значениям температуры (T_a) заготовки, удельного электрического сопротивления (ρ) и числа Лоренца

$$L = \frac{k \cdot \rho}{T_a}$$

Значение коэффициента теплоотдачи α от заготовки к валкам можно считать не зависящим от температуры и равным $\alpha = 2000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$.

Экспериментальная зависимость удельной мощности теплоотдачи от температуры для стали Р9 существенно не линейна:

$$P_{\text{ОКР}} = 25 (T - 20) + 0,18 (T - 20)^2, \quad (\text{Вт/м}^2).$$

В результате обработки экспериментальных данных получена зависимость временного сопротивления стали Р9 и вольфрама от температуры:

$$\sigma_s = 670 \exp\left(-\left(\frac{T}{630}\right)^2\right), \quad \sigma_s = 980 \exp\left(-\left(\frac{T}{1250}\right)^2\right), \quad (\text{МПа}).$$

Приведенные данные о физических параметрах, позволяют выполнить расчеты электроконтактного нагрева, необходимые для выбора конструктивных параметров стана и электротехнических параметров источника нагрева.

В отличие от трехмерной модели при нагреве широкой полосы скалярные поля (температурное поле и поле электрического потенциала) можно рассматривать плоскими, представив валки в виде плоской прямоугольной области (Рис. 2.) рассматриваемая область имеет одномерные границы.

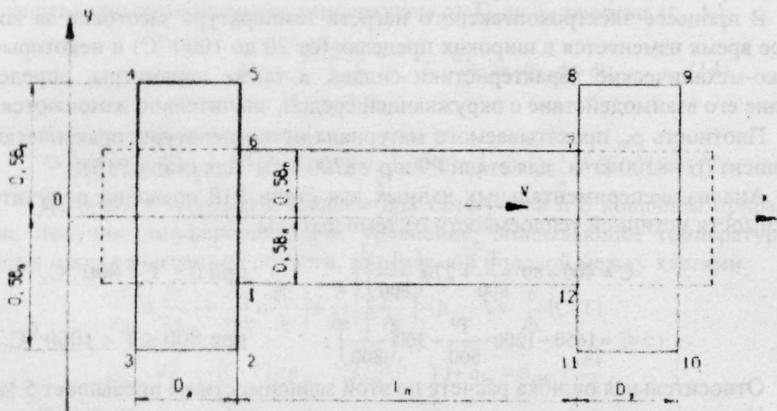


Рис. 2. Схема расчета распределения потенциала электрического поля.

Значение удельной проводимости γ для валков принято постоянным, не зависящим от координат x и y . В области, которую занимает движущаяся нагреваемая полоса, имеет место неравномерное распределение температуры T материала и соответственно его удельной проводимости γ . То есть как температура, так и удельная проводимость являются функциями координат x и y .

Крайевые условия для уравнения в соответствии со сформулированными

ми выше допущениями зависят от расположения токоподводов на валках:

1. При одностороннем расположении токоподводов

$$U = U_n \text{ на отрезке 2-3;}$$

$$U = 0 \text{ на отрезке 10-11;}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0 \text{ на отрезках 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12;} \quad (19)$$

$$\frac{\partial U}{\partial y} = 0 \text{ на отрезках 4-5, 6-7, 8-9, 12-1.}$$

2. При диагональном расположении токоподводов на отрезках

$$U = U_n \text{ на отрезке 2-3;}$$

$$U = 0 \text{ на отрезке 8-9;}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0 \text{ на отрезках 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12;} \quad (20)$$

$$\frac{\partial U}{\partial y} = 0 \text{ на отрезках 4-5, 6-7, 10-11, 12-1.}$$

3. При двухстороннем расположении токоподводов

$$U = U_n \text{ на отрезках 2-3, 4-5;}$$

$$U = 0 \text{ на отрезках 8-9, 10-11;}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0 \text{ на отрезках 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12;} \quad (21)$$

$$\frac{\partial U}{\partial y} = 0 \text{ на отрезках 6-7, 12-1.}$$

Для процесса прокатки широкой полосы

$$V_y = 0; \quad \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0. \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial}{\partial z}(C \cdot T) = 0 \quad (22)$$

Краевые условия по температуре для боковых кромок

$$T(x, y)|_{x=-\infty} = T(x, y)|_{x=+\infty} = T_{\text{окр}}. \quad (23)$$

Для установившегося процесса движения и нагрева полосы

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0.$$

При реальных скоростях прокатки и нагреве подката электрическим током до 700 °С разогревом полосы от деформирования можно пренебречь. При скоростях прокатки более 5 см/с нагрев подката происходит относительно быстро и можно пренебречь перераспределением температуры в полосе за счет теплопроводности. Тогда получим систему дифференциальных уравнений в частных производных относительно переменных U и T

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \cdot \frac{\partial U}{\partial y} \right) &= 0 \\ M \cdot \frac{\partial}{\partial x} (C \cdot T) &= h(x) \cdot B_n \cdot \gamma_n \left(\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 \right) - 2B_n P_{\text{окр}}(T, T_{\text{окр}}) \end{aligned} \quad (24)$$

На линии контакта полосы с первой клетью температура полосы равна температуре окружающей среды

$$T(x, y) \Big|_{x=x_1} = T_{\text{окр}}. \quad (25)$$

Полученное решение системы (24) должно удовлетворять условию постоянства полного тока в любом поперечном сечении нагреваемой полосы

$$\int_{y_1}^{y_2} j_x \cdot dy = \text{const}. \quad (26)$$

Ввиду нелинейности системы уравнений (24) ее численное решение может быть получено при помощи метода итераций. Разработан специальный комбинированный метод решения, основанный на последовательном нахождении скалярных полей электрического потенциала и температуры.

Точность решения оценивалась по значениям потенциалов и температуры в двух соседних приближениях. Итерационный процесс прекращался, если одновременно по потенциалу электрического поля отклонение делалось меньше 10^{-4} В, а по температуре - меньше 10^{-4} °С.

Результаты расчета скалярных полей в полосе и валках модуля плотности тока и температуры при одностороннем, диагональном и двухстороннем токоподводах показали, что наиболее равномерное распределение температуры в полосе обеспечивается при двухстороннем токоподводе. Для валков из стали Р18 (проводимость ≈ 2 МСм/м), равномерность нагрева полосы при тех же остальных исходных данных обеспечивается при реализации любого из трех вариантов токоподвода.

Задачу моделирования электроконтактного нагрева для узкой полосы можно упростить, сведя задачи расчета поля U электрического потенциала и температурного поля T к одномерным. При этом производная от потенциала U , составляющая j_y вектора плотности тока и производная от температуры T по координате y равны нулю. Тогда получим систему двух дифференциальных уравнений (второго порядка относительно потенциала электрического поля U и первого - относительно температуры T)

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} \left(\gamma_n \cdot \frac{dU}{dx} \right) = 0; \\ \frac{M}{B_n \cdot h(x)} \cdot \frac{d}{dx} (C \cdot T) = q_n. \end{cases} \quad (27)$$

Температура заготовки в точках контакта с валками первой токоподводящей клетки равна температуре окружающей среды

$$T(x) \Big|_{x=x_1} = T_{\text{окр}}. \quad (28)$$

Если в качестве известной величины взять плотность j_x тока нагрева заготовки, то распределение температуры вдоль полосы можно получить, решая только второе уравнение системы (27) с начальным условием (28)

$$\frac{M}{B_n \cdot h(x)} \cdot \left(T \cdot \frac{dC}{dT} + C \right) \cdot \frac{dT}{dx} = q_n. \quad (29)$$

Разность потенциалов на токоподводящих электродах примерно равна на-

пряжению источника технологического нагрева

$$U_n = \int_{x_1}^{x_2} \frac{j_x}{\gamma_n} \cdot dx$$

Расчеты показали, что, чем ниже температура полосы перед клетью, тем больше величина приращения температуры за счет энергии деформирования. При температуре нагрева выше 800 °С повышением температуры заготовки за счет пластической деформации металла можно пренебречь.

При пропускании электрического тока через очаг деформации происходит электроконтактный нагрев металла и изменение его пластических свойств вследствие электропластического эффекта. В связи с недостаточной изученностью физики процесса электропластического эффекта, проблематичностью его практического осуществления из-за сложности подвода к очагу деформации тока высокой плотности (падение напряжения должна составлять 10-100 в на 1 см толщины полосы) и необходимостью отвода большого количества выделяемого при этом тепла, в математической модели учитывался только электроконтактный нагрев полосы в очаге деформации.

Модель электроконтактного нагрева в очаге деформации учитывает теплопроводность материала заготовки в связи с низкой скоростью прокатки.

Принятые допущения:

- 1 - распределение температуры в заготовке переменено только по x ;
- 2 - поверхности контакта валков с заготовкой являются эквипотенциальными, разность потенциалов между ними равна U_n источника нагрева;
- 3 - вектор плотности тока параллелен оси z ;
- 4 - влияние изменения толщины заготовки в очаге деформации учитывается за счет коррекции удельной проводимости материала заготовки.

Тогда, для установившегося процесса прокатки

$$\frac{d}{dx} \left(k \cdot \frac{h(x)}{h_0} \cdot \frac{dT}{dx} \right) + q_n = \frac{M}{B_n \cdot h(x)} \cdot \frac{d}{dx} (C \cdot T). \quad (30)$$

$$\text{Граничные условия} \quad T(x) \Big|_{x=-\infty} = T(x) \Big|_{x=+\infty} = T_{\text{окр}}. \quad (31)$$

Решение этого уравнения может быть получено только численным методом, для чего разработаны алгоритмы и программы расчета, считая коэффициент теплопроводности материала заготовки k постоянным.

Перед очагом деформации ($-\infty < x \leq 0$)

$$k \cdot \frac{d^2 T}{dx^2} - \rho_m \cdot V_0 \cdot \left(T \cdot \frac{dC}{dT} + C \right) \frac{dT}{dx} - \frac{2P_{\text{окр}}(T, T_{\text{окр}})}{h_0} = 0. \quad (32)$$

В очаге деформации ($0 \leq x \leq l$)

$$k \left(1 - \varepsilon \frac{x}{l} \right) \frac{d^2 T}{dx^2} - \left[\rho_m \cdot V_0 \left(T \frac{dC}{dT} + C \right) + k \frac{\varepsilon}{l} \right] \frac{dT}{dx} + \left(\frac{U_n \cdot l}{h_0 \cdot l - h_0 \cdot \varepsilon \cdot x} \right)^2 \gamma_n + \sigma_s \frac{V_1 \cdot \varepsilon}{l} - \frac{2\alpha(T - T_{\text{окр}}) \cdot l}{h_0(1 - \varepsilon \cdot x)} = 0 \quad (33)$$

После очага деформации ($l \leq x < +\infty$)

$$k \cdot \frac{h_1}{h_0} \cdot \frac{dT}{dx^2} - \rho_m \cdot V_1 \left(T \cdot \frac{dC}{dT} + C \right) \frac{dT}{dx} - \frac{2P_{\text{окр}}(T, T_{\text{окр}})}{h_1} = 0. \quad (34)$$

Введя переменную $\tau = \frac{dT}{dx}$ и условия $T(x)|_{x=-\infty} = T_{\text{окр}}$; $T(x)|_{x=0} = T_0$, полу-

$$\text{чим для (32)} \quad \frac{k}{2} \cdot \frac{d(\tau^2)}{dT} - \rho_m \cdot V_0 \left(T \cdot \frac{dC}{dT} + C \right) \tau - \frac{2P_{\text{окр}}(T, T_{\text{окр}})}{h_0} = 0 \quad (35)$$

Начальные условия для уравнения (35) могут быть получены с учетом того, что $T \rightarrow T_{\text{окр}}$ и $\tau \rightarrow 0$ при $x \rightarrow -\infty$ и $T \geq T_{\text{окр}}$: $\tau_0(T)|_{T=T_{\text{окр}}} = 0$ (36)

Откуда с использованием стандартной программы метода Рунге-Кутты четвертого порядка.

$$\tau = \frac{dT}{dx} = \tau_0(T). \quad (37)$$

Граничные условия для участка после очага деформации ($1 \leq x < +\infty$)

$$T(x)|_{x=1} = T_1; \quad T(x)|_{x=+\infty} = T_{\text{окр}}, \quad (38)$$

Температура T_1 , как и T_0 в дальнейшем может быть определена на основе решения температурной задачи для всей заготовки.

Введя переменную τ ($\tau < 0$), получим

$$\frac{k}{2} \cdot \frac{h_1}{h_0} \cdot \frac{d(\tau^2)}{dT} + \rho_m \cdot V_0 \cdot \frac{h_0}{h_1} \left(T \cdot \frac{dC}{dT} + C \right) \tau - \frac{2P_{\text{окр}}(T, T_{\text{окр}})}{h_1} = 0. \quad (39)$$

$$\text{начальное условие} \quad \tau_1(T)|_{T=T_{\text{окр}}} = 0. \quad (40)$$

$$\text{Тогда} \quad \tau = \frac{dT}{dx} = \tau_1(T). \quad (41)$$

Используя полученные фазовые траектории, можно решать краевую задачу на участке очага деформации ($0 \leq x \leq 1$). В начале и конце участка должны быть выполнены условия равенства температур и тепловых потоков вдоль заготовки, что обеспечивается при равенстве производных температуры по x .

$$\text{Граничные условия} \quad \frac{dT}{dx}|_{x=0} = \tau_0(T_0); \quad \frac{dT}{dx}|_{x=1} = \tau_1(T_1) \quad (42)$$

Уравнение (33) нелинейное, как и полученные численным методом функции (42), определяющие граничные условия для этого уравнения.

Таким образом, методика численного решения задачи определения температуры в заготовке при электроконтактном нагреве заготовки в очаге деформации, основанная на решении краевой задачи (уравнение (30) с граничными условиями (31)) для движущейся деформируемой заготовки большой длины, может быть представлена следующими этапами:

1. Нахождение фазовых траекторий для уравнений (32) и (34), описывающих распределение температуры на участках, находящихся вне очага.

Искомые фазовые траектории проходят через точку $T=0$ и $\tau = \frac{dT}{dx} = 0$.

2. Формулирование с учетом найденных траекторий граничных условий для уравнения (33) распределения температуры в очаге деформации.

3. Численное решение краевой задачи для уравнения (33) и определе-

ние распределения температуры по заготовке в очаге деформации и, соответственно, температур T_0 и T_1 в начале и конце очага деформации.

4. Определение закона изменения температурного поля на участках вне очага деформации на основе решения дифференциальных уравнений (31) и (41) фазовых траекторий с начальными условиями $T(0)=T_0$ и $T(l)=T_1$.

Разработанная методика позволяет исключить необходимость решения нелинейной краевой задачи на бесконечном промежутке и возникающие в связи с этим проблемы обеспечения устойчивости численного метода.

При увеличении скорости прокатки значительно снижается температура заготовки перед очагом деформации, так как разогрев до очага деформации происходит только за счет теплопроводности металла. А плотность тока в очаге деформации возрастает, причем существенно возрастает и неравномерность распределения плотности тока по очагу деформации. При относительно больших скоростях прокатки максимальное значение плотности тока приходится на начальный участок очага деформации, что связано с увеличением электрической проводимости при уменьшении температуры металла.

Рассмотрены различные математические модели электроконтактного нагрева компонентов при прокатке биметалла.

Для схем, в которых контакт компонентов биметалла осуществляется только в очаге деформации прокатной клетки, использованы математические модели электроконтактного нагрева однослойного материала

Для схемы электроконтактного нагрева двумя источниками перед очагом деформации примем допущение, что на участке между клетями не учитывается теплообмен между нагреваемыми компонентами биметалла.

Влиянием теплопроводности на распределение температур в компонентах при реальных скоростях прокатки можно пренебречь. Тогда получим два дифференциальных уравнения, описывающих распределение температур T_1 и T_2 вдоль основы и плакирующих слоев и соответствующие зависимости электрических проводимостей $\gamma_{1п}$, $\gamma_{2п}$ от координат x_1 и x_2

$$\begin{cases} \rho_{m1} \cdot V_0 \cdot \frac{d}{dx_1} (C_1 \cdot T_1) = \frac{j_1^2}{\gamma_{1п}} - \frac{P_{окр}(T_1)}{h_1}, \\ \rho_{m2} \cdot V_0 \cdot \frac{d}{dx_2} (C_2 \cdot T_2) = \frac{j_2^2}{\gamma_{2п}} - \frac{P_{окр}(T_2)}{h_2}. \end{cases} \quad (43)$$

Начальные условия: температура лент основы и плакирующего слоя в точках контакта с вальками токоподводящих клетей равна температуре окружающей среды $T_1(x_1)|_{x_1=0} = T_{окр}$; $T_2(x_2)|_{x_2=0} = T_{окр}$. (44)

Граничные условия для электрических потенциалов запишем по аналогии с граничными условиями для узкой полосы

$$\begin{aligned} U_1(x_1)|_{x_1=0} &= U_{1с}; & U_1(x_1)|_{x_1=l_1} &= 0; \\ U_2(x_2)|_{x_2=0} &= U_{2с}; & U_2(x_2)|_{x_2=l_2} &= 0; \end{aligned} \quad (45)$$

Разности потенциалов на источниках нагрева, обеспечивающие задан-

ные плотности токов j_1 и j_2 , определим интегрированием проводимостей на участках от токоподводящих клеток до прокатной клетки

$$U_{1и} = \int_0^{L_1} \frac{dx_1}{\gamma_{1и}}; \quad U_{2и} = \int_0^{L_2} \frac{dx_2}{\gamma_{2и}}. \quad (46)$$

Расчеты показали, что, подбирая величины токов и скорости прокатки, можно обеспечить любую требуемую температуру компонентов.

Схема с одним источником отличается от вышеприведенной тем, что электрический потенциал U_p на участках лент в очаге деформации является неизвестной величиной и проекции плотностей токов, протекающих по лентам основы и плакирующего слоя, должны удовлетворять соотношению

$$B_{1и} \cdot h_1 \cdot j_1 = -2 B_{2и} \cdot h_2 \cdot j_2 \quad (47)$$

Граничные условия для электрического потенциала

$$U_1(x_1) \big|_{x_1=0} = U_c; \quad U_1(x_1) \big|_{x_1=L_1} = U_p; \quad (48)$$

$$U_2(x_2) \big|_{x_2=0} = 0; \quad U_2(x_2) \big|_{x_2=L_2} = U_p; \quad (49)$$

Для температурного поля в компонентах биметалла граничные условия сохраняются. Следует отметить, что в случае с одним источником, изменить температуру нагрева биметалла можно за счет взаимного изменения расстояний между токоподводящими разматывателями и рабочей клетью.

Результаты выполненных теоретических исследований использованы при разработке технологического процесса и проектировании оборудования для прокатки биметаллических полос с электроконтактным нагревом.

3. РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОКАТКИ ПОЛОС С ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ НАГРЕВОМ

Определяющим для выбора основных параметров стана, является источник питания, включающий трансформатор, выпрямитель, шины и токоподводы к вращающимся валкам. Источник питания спроектирован из существующих элементов сварочных машин МВШ-120.01, наиболее близких по характеристикам создаваемому стану. Это позволило применить не только апробированные трансформаторы и блоки вентиляей, но и элементы токоподводов. Максимальная суммарная длительная сила тока 100 кА, что с запасом, примерно 15% по току, обеспечивает расчетную силу тока $I_{расч} = 85$ кА.

Расчетное усилие и момент для изотермического процесса составили $F = 300$ кН и $M = 10$ кНм, а для прокатки с электроконтактным нагревом заготовки в очаге деформации - соответственно $F = 700$ кН и $M = 3$ кНм.

Изотермическую прокатку рекомендуется проводить при скорости 0,05-0,2 м/мин. Учитывая прокатку широких лент, $V_{из} = 0,03 - 0,3$ м/мин. Скорость при плющении лент с электроконтактным нагревом заготовки в очаге деформации принята $V_{эн} = 0,2 - 2,0$ м/мин.

В соответствии с анализом распределения температурного поля по ширине полосы, выполненным по разработанной математической модели, принят токоподвод одностороннего типа, достоинством которого является более простое конструктивное исполнение и более короткие электрические цепи.

По результатам эксплуатации оборудования можно отметить, что спроектированные узлы изоляции деталей и токоподводы достаточно надежны.

Из условий энергетики и производительности стана, для получения плюшевой вольфрамовой и молибденовой ленты, применяют валки, диаметр которых превышает диаметр проволоки в 100 и более раз. Расчеты показывают, что плотность тока в очаге деформации для наиболее распространенного на практике диапазона диаметров проволоки 0,3...0,7 мм и диаметров валков плющильных станов 30...100 мм примерно равна 350...450 А/мм².

Эксперименты показали, что для обработки труднодеформируемых металлов и сплавов с использованием электроконтактного нагрева в очаге деформации, наибольшей термостойкостью обладают валки из сплава ВК15С. Сплав имеет меньшее электросопротивление при повышенных температурах.

Для прокатки труднодеформируемых инструментальных сталей с электроконтактным нагревом перед очагом деформации разработан стан 200 ЭКН. Его параметры, мощность и напряжение источника нагрева прокатываемой полосы были определены в соответствии с результатами теоретических и экспериментальных исследований, приведенными выше.

Техническая характеристика стана

толщина/ширина исходной заготовки	3...5/30...100мм,
материал	сталь Р9, Х6ВФ, Р6М5,
диаметр рулона внутренний/наружный	650/1100 мм,
масса рулона	500 кг,
минимальная толщина прокатанной ленты	0,5 мм ± 50 мкм,
макс. температура электроконтактного нагрева	1000 °С,
мощность трансформатора	500 кВт,
напряжение/рабочий ток	48 В/15 кА,
диаметр/длина бочки валков токоподводящей клетки	300/200мм,
макс. усилие сжатия валков	200 кН,
мощность электродвигателя/номинальный момент	10 кВт/185 Нм,
частота вращения	500/1500 об/мин,
Тип рабочей клетки	кварто с опорными роликами,
диаметр валков рабочих/опорных /длина бочки	130/300/200 мм,
нажимное устройство	гидравлическое,
макс. усилие прокатки	1000 кН,
натяжение ленты	1,5...10,0 кН,
мощность электродвигателя/номинальный момент	100 кВт/927 Нм,
частота вращения	1000/2000 об/мин,
диаметр барабана моталки	400 мм,
мощность/момент электродвигателя	26,5 кВт/350 Нм,
частота вращения	600/1800 об/мин,

Токоподводящая клеть располагается на расстоянии 1100 мм от рабочей и служит для подвода тока к ленте и создания натяжения ее в процессе прокатки. Рабочая клеть кварто с дополнительными опорными роликами.

Фиксация валка в осевом направлении осуществляется одним двухрядным коническим, радиально-упорным подшипником со стороны перевалки.

Разработаны высокоэффективные, оригинальные устройства для надежной задачи и смотки полосы в моталке, а также намоточное устройство для качественного формирования узкого рулона без телескопичности.

Осуществлен большой комплекс мероприятий по освоению новых процессов производства прецизионных лент из инструментальных сталей.

С целью проверки теоретических разработок по применению электроконтактного нагрева заготовки в очаге деформации при плющении проволоки проведены экспериментальные исследования и **модернизация двухвалкового плющильного стана "МАМП"**. Это позволило расширить технологические возможности стана, осуществить различные схемы пропускания электрического тока через обрабатываемый материал и измерить силовые и кинематические параметры процесса прокатки.

Конструктивно стан выполнен в виде двух модулей: блока питания и управления, и прокатно-измерительного. Натяжение проволоки создается с помощью электродвигателя, работающего в режиме торможения. Натяжение ленты создается электроприводом механизма намотки. Изменение раствора валков осуществляется с точностью - 0,001 мм путем перемещения верхнего рабочего валка через прецизионные винтовую и червячную передачи.

В ходе модернизации разработана конструкция валков со съёмным бандажом, выполненным из различных материалов (BK-20; X12Φ1; 5X2B2C). Для повышения электроэрозионной стойкости на поверхность валков нанесены ионно-плазменным напылением упрочняющие покрытия.

Разработан и установлен лазерный измеритель размеров прецизионных профилей и плющенных лент, что позволило создать автоматическую систему управления и обеспечить производство продукции требуемого качества.

Модернизация стана позволила совместить в одном агрегате процессы изотермической прокатки и прокатки с электроконтактным нагревом заготовки в очаге деформации, расширить сортамент и повысить точность плющенной ленты, повысить стабильность процесса прокатки.

Опыт эксплуатации модернизированного стана "МАМП" использован при проектировании специализированных промышленных станов 300 и 70 с электроконтактным нагревом заготовки в очаге деформации, где в одной установке совмещены два технологических процесса: изотермический и электроконтактный нагрев заготовки в очаге деформации.

Исследования показали, что для изотермического процесса прокатки возможно применение составных валков диаметром 300 мм для любой клетки (дуо, кварто и др.). Для прокатки с электронагревом в очаге деформации рациональный диаметр 150 мм, и обеспечить прочность составного валка клетки-дуо, весьма затруднительно. Поэтому применили клеть кварто.

Подвод к шейке валка тока силой до 50 кА выполнен контактными щетками, шейка валка покрыта слоем серебра. Токоподвод погружен в кас-

торовое масло с добавлением чешуйчатого графита. Токоведущие детали изолированы от корпуса подушки и охлаждаются водой.

Подшипники рабочих валков расположены в кассете, т.к. при небольшой длине бочки нет ощутимого прогиба оси, влияющего на работоспособность подшипников. Такая конструкция позволяет выполнить перевалку вдоль оси прокатки, как в четырехроликовых головках. Перешлифовка валков может производиться в кассете, что обеспечивает минимальное биение.

Спроектирован специализированный стан для прокатки узких лент и полос с диаметром валков 300 мм и длиной бочки 50 мм. Сила тока 25-30 кА.

Станина клетки, выполненная из двух частей, стянутых четырьмя болтами, что значительно упростило изоляцию токоведущих элементов. Перевалка валков осуществляется вместе с токоведущими подушками, валки сборные. Смена бандажей производится на отдельном стенде, оснащенный мультипликатором. Разъемы в цепи вторичного контура, по одному на валок, устанавливаются на промежуточных траверсах со стороны привода. Это - небольшой гидравлический пресс с усилием до 200 кН, к подвижной и неподвижной траверсам которого подводится ток с помощью гибких шин. Шины подушек при перевалах входят в раствор разъема и зажимаются. Ток подводится с приводной стороны на верхнюю шейку валка, а со стороны обслуживания - на нижнюю (диагональный токоподвод).

Отличительная особенность стана 70 - его универсальность, т. е. применение в одном стане сборки-дуо с валками диаметром 300 мм и шестивалковой сборки с рабочими валками диаметром 150 мм. В стане двухстороннее расположение приводов: для валков 300мм с одной стороны и для валков 150 мм - с другой. Шпиндели подключаются специальными гидроцилиндрами.

Перевалка производится с помощью специального механизма вместе с токоведущими подушками в направлении оси прокатки, для чего стойки станины стана разнесены на всю длину валков. Разъем токоведущих шин выполнен на гидрогайках, а фиксация контактных деталей, связанных с вторичным контуром источника тока, производится с помощью пружин уравнивания, размещенных на подвижных траверсах.

Нажимное устройство приводится от двух электродвигателей, соединенных зубчатой муфтой. Валки установлены на подвижных траверсах. Верхняя траверса с гидравлическим уравниванием перемещается нажимным устройством, нижняя - опирается на предохранительные цилиндры.

4. РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕНТЫ ИЗ МНОГОСЛОЙНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Внедрение плакировочного стана с электроконтактным нагревом позволяет освоить выпуск биметалла высокого качества с компонентами, холодная сварка которых в большинстве случаев не достигается. При этом исключается окисление поверхностей, обезуглероживание, нежелательные химические взаимодействия поверхностей, обеспечивается строгий темпера-

турный режим нагрева заготовки.

Использованы две схемы процесса. Один источником тока на участке между токоподводящей и рабочей клетями нагревает только основную ленту, а на участке с прижимными роликами - три ленты. Ряды роликов изолированы друг от друга и свободно размещены в вертикальных пазах кожуха.

По второй схеме все компоненты подаются в валки токоподводящей клетки, и нагрев их происходит между рабочей и токоподводящей клетями.

Предложен способ прокатки многослойной ленты с электроконтактным нагревом их от источника тока, разность потенциалов которого приложена к компонентам ленты, а между компонентами ленты с заданным шагом размещают токопроводящие нити. Процесс обеспечивает надежное сваривание.

Анализ расчетных данных позволяет выбрать следующие параметры нагревательной установки: $J = 20 \text{ кА}$; $U = 30 \text{ В}$ и $P = 720 \text{ кВт}$.

На базе наиболее мощных новых машин МШВ 120.01 завода "Электрик" спроектирован стан 63 с электронагревом компонентов в очаге деформации. Машины рассчитаны на длительный ток 28 кА, что позволяет на рабочих валках диаметром 300 мм прокатывать ленты шириной до 45 мм.

Расчетное усилие прокатки 650 кН, что позволяет прокатывать плакированные полосы и волокнистые композиционные материалы из нержавеющей стали, титана, меди, алюминия, борволокна, редких металлов и других материалов со скоростью прокатки 0,02...0,10, м/с.

Отличительной особенностью рабочей клетки стана 63 является станина, выполненная из двух корпусов, стянутых четырьмя штангами через изоляционные шайбы и втулки. Бандажи валков выполнены из жаростойких материалов ВК-15, вольфрама и молибдена, в зависимости от вида прокатываемого материала и технологических режимов. Перевалку валков производится вместе с токоведущими подушками.

Разработанный в объеме эскизного проекта стан 100 в значительной мере унифицирован со станом 63 и отличается наличием намоточных и размоточных устройств. В зону деформации может подаваться инертный газ.

На базе опыта, накопленного при создании и исследовании станов 200 ЭКН ПО "Ижсталь" и плакировочного 500 Нытвенского метзавода, разработан эскизный проект неререверсивного стана 200 ЭКНБ для прокатки с электроконтактным нагревом лент из трудносвариваемых биметаллических и композиционных материалов типа: нержавейка - сталь - нержавейка, медь - нержавейка, медь - титан, алюминий - борволокно - алюминий и др.

Техническая характеристика стана 200 ЭКНБ.

Толщина/ширина исходной ленты, мм	8...2/150
Количество лент на входе, шт.	2 ... 3
Суммарное сопротивление на участке нагрева, мкОм	1...20
Толщина биметалла, мм	0,5...3,0
Единичное обжатие за проход, %	до 60
Диаметр рудона внутренний/наружный, мм	400/1000

Масса рулона, кг	500
Тип рабочей клетки	дуо-кварто
Диаметр валков (схема дуо), мм	300
(схема кварто) - рабочих/ опорных, мм	130/300
Длина бочки валков, мм	220
Усилие на валок, кН	1200
Скорость прокатки, м/мин	10-30
Нажимное устройство	гидравлическое
Диаметр валков токоподводящей клетки , мм	300
Усилие поджатия валков, кН	200
Обжатие ленты, %	до 5
Натяжение ленты на моталке, кН	1500-10000
на разматывателе (основа), кН	1500-10000
на разматывателе (плакировочная лента), кН	1000-5000
Длина участка электроконтактного нагрева , мм	1200
Температура нагрева, °С	600-1000
Мощность трансформатора, кВт/ток нагрева, кА	720/18
Напряжение, максимальное, В	36

Токоподводящая клеть установлена на упругих элементах измерителей натяжения на расстоянии 1200 мм от рабочей. В рабочей клетке (дуо-кварто) могут быть использованы валки разного диаметра (кварто Ø 130, дуо Ø 300). Температура лент перед входом в валки достигает 1000°, единичное обжатие за проход 60%. Нажимное устройство клетки - гидравлическое.

Разработан технический проект стана 400/1000x500 ЭКНБ, предназначенный для плакирования полос с электронагревом перед очагом деформации. На стане можно также осуществлять холодное плакирование полос.

Стан состоит из разматывателей полосы основы, верхней и нижней плакировочных полос, правильноподающей и зачистной машин, рабочей клетки кварто, ножниц для обрезки концов плакированной полосы и моталки.

Рабочая клеть - кварто, относительное обжатие до 70%. Привод осуществляется от электродвигателя через универсальные шпиндели, комбинированный и специальный редукторы. Нажимное устройство гидравлическое.

Настоящий технический проект может быть использован при строительстве новых, и при модернизации существующих плакировочных станов.

5. УНИВЕРСАЛЬНАЯ РАБОЧАЯ КЛЕТЬ ДЛЯ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТОНКИХ ЛЕНТ ИЗ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Определены требования к конструкции универсальной клетки:

- большой диапазон диаметров рабочих валков, обеспечивающий оптимальные условия прокатки широкого сортамента лент;
- простота перехода с одной валковой системы на другую;
- универсальность привода валков для различных валковых систем;
- высокая горизонтальная жесткость рабочих валков малого диаметра;

- оперативная установка нижнего рабочего вала на уровень прокатки;
- современные средства ГНУ и САРТ, высокая точность ленты;
- регулирование профиля валков, высокая планшетность ленты;
- надежность и простота конструкции, удобство эксплуатации;

Разработка основных технических решений по универсальной рабочей клетки выполнялась с учетом следующих предпосылок:

- в качестве базовой конструкции принята клеть кварто, оснащенная верхним гидронажимным устройством и нижним механизмом установки валков, что расширяет диапазон диаметров рабочих валков;
- возможность создания новых и проведения реконструкции работающих клетей с целью расширения сортамента и повышения качества ленты;
- проектирование выполнялось для широко используемого стана 400.

Разработан узел валков с многовалковой кассетой МВ6 для стана кварто. Конструкция кассеты позволяет работать при расположении всех шести основных валков на одной вертикали, а также со смещением рабочих валков в одну из сторон в зависимости от направления прокатки.

На базе 12-валковой схемы выполнен эскизный проект многовалковой кассеты МВ12, обеспечивающей удобство эксплуатации и уменьшение диаметра рабочего вала в два раза по сравнению с кассетой МВ6, что несколько снижает их нагрузочную способность, но позволяет уменьшить толщину прокатываемой ленты. Эта схема рекомендована для прокатки ленты из жести, цветных металлов и алюминиевых сплавов.

Разработанные конструкции охватывают весь диапазон кинематических схем кассет универсальной рабочей клетки и в сочетании с кварто 400 позволяют создать универсальную клеть с широким диапазоном продукции.

Параметры универсальной клетки 400:

	Схема ДУО	КВАРТО	КВАРТО с уменьш. $D_{\text{раб}}$
Толщина полосы	0,5...0,1 мм	4...0,2 мм	2...0,1 мм
дрессировка.			
Диаметр раб./оп. вала	400...500/-мм	150/500 мм	100/500 мм
Усилие прокатки	2,0 МН	2,0 МН	1,5 МН
Скорость прокатки	5 м/с	5 м/с	5 м/с

ВНИИМЕМАШем, под руководством автора, разработан и внедрен стан 1350 оригинальной конструкции с укороченными опорными роликами для прокатки ленты из алюминиевых сплавов. Стан оснащен уникальной шестивалковой предварительно-напряженной клетью, не имеющей аналогов в мировой практике. Опорная валковая система шестивалковой клетки формируется таким образом, чтобы упругая линия опорного вала была зеркальным отражением профиля образующей рабочего вала. Причем амплитуды этих кривых близки по значению и противоположны по знаку. Поскольку амплитуды кривых профиля пропорциональны усилию прокатки, то независимо от колебания усилия прокатки, имеет место практически полная компенсация поперечной разнотолщинности. Кроме того, уменьшение продольной разно-

толщинности при регулировании перемещением опорного ролика естественным путем уменьшает и поперечную.

Принципиальные особенности конструкции клетки позволили в 1,5 раза уменьшить диаметр рабочего вала, в 1,5...2 раза уменьшить продольную разнотолщинность и почти в 6 раз - поперечную и, соответственно, улучшить ее плоскостность, а также повысить выход годного проката.

Выпуск высококачественного проката зависит от точности, качества и износостойкости **рабочих валков**, к которым предъявляются весьма жесткие требования: параметр шероховатости $Ra = 0,04$ мкм, отклонение от округлости и цилиндричности не более 0,002 мм.

Для изготовления валков небольшого диаметра предложено использовать магнитоэлектрическую контактную резку, магнитоэлектрическое шлифование и магнитоабразивное полирование.

В процессе резания с помощью внешней магнитной системы в зоне контакта, создается поперечное магнитное поле, вектор которого перпендикулярен вектору электрического тока и параллелен осям заготовки. Шлифование производится токопроводящим абразивным инструментом при одновременном пропускании через зону контакта инструмента с деталью постоянного тока силой до 30...40 А при напряжении 18...30 В и наведения в этой зоне магнитного поля с индукцией 0,15...0,6 Тл. Производительность процесса 25...30 мм³/мм·с. Комбинированное воздействие электрического и магнитного полей позволяет получить благоприятную структуру поверхностного слоя, отсутствие прижогов, трещин и других дефектов, а также некоторое повышение микротвердости. Процесс характеризуется значительным снижением усилий резания, что важно для обработки валков малого диаметра.

Магнитоабразивное полирование производится ферромагнитным абразивом - керметом, который удерживается магнитным полем и играет роль пластичной связки. Усилие резания распределяется пропорционально величине каждого зерна режущего инструмента, что исключает перегрузку зерен, резкие колебания температуры и напряжений в зоне обработки. Относительно высокая производительность метода сочетается с отсутствием прижогов, уменьшением остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое, повышением его микротвердости и снижением требований к жесткости и точности системы станок - приспособление - инструмент - деталь. Разработанные технологии успешно использованы для обработки заготовок валков стана 160.

6. ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ.

Стан 200 ЭКН конструкции ВНИИМЕТМАШ с управляемым электроконтактным нагревом движущейся деформируемой полосы внедрен в промышленную эксплуатацию в ПО Ижсталь. Годовая производительность стана составляет 500 т, что полностью удовлетворяет существующие потребности в прецизионной ленте из инструментальных марок стали.

Выбранные параметры, конструктивные и технические решения стана и источника нагрева полосы обеспечивают прокатку проектного сортамента полос из инструментальных сталей в запроектированных режимах. В настоящее время надежно работает весь комплекс оборудования стана.

Широкие экспериментальные исследования подтвердили, что при высоких показателях пластичности сопротивление деформации металла зависит, в основном, от скорости деформации и практически не зависит от степени деформации, т.е. деформационное упрочнение стали можно не учитывать и прокатку осуществлять с большими единичными обжатиями. За один проход можно осуществить обжатие полосы до 80%. Устойчивый процесс прокатки обеспечивается при обжатиях до 60%.

Разработана и внедрена технология прокатки тонкой ленты из труднодеформируемых инструментальных марок сталей, которая позволяет существенно снизить трудоемкость производства и обеспечить высокое качество продукции. Прокатка полосы с 3,5 мм до 1,0 мм из инструментальных сталей Р9 и Х6ВФ при температуре 790...800⁰С и токах нагрева от 3 до 15 кА обеспечивается при скорости 0,4...0,8 м/с за три прохода вместо семи проходов и пяти промежуточных отжигов по традиционной технологии.

Структура полос из сталей Р9 и Х6ВФ прокатанных при температуре 790...800⁰С представляет собой мелкозернистый перлит, размер зерна вторичного цементита до 0,6 мкм. Имеются равномерно распределенные выделения первичного цементита (1 балл). Обезуглероженный слой и нафталинистый излом не обнаружены. Это свидетельствует о достаточной скорости электроконтактного нагрева.

Практика эксплуатации свидетельствует о серьезных перспективах применения электронного нагрева при прокатке труднодеформируемых сталей.

Модернизация опытно-промышленного стана МАМР с осуществлением электроконтактного нагрева перед входом заготовки в рабочие валки и в очаге деформации обеспечила устойчивую работу стана, повысила производительность на 15% и улучшила качество готовой продукции. Разработки рекомендованы для промышленного использования на аналогичных плющильных станах предприятий электронной промышленности (НИИМЭТ, завод "Аметист", ОКБ "Луч" и др.). Экспериментальные исследования позволили разработать уникальные, не имеющие аналогов в отечественной и мировой практике, универсальный стан 70 и специализированный 300. В одном агрегате совмещаются процессы изотермической прокатки и электроконтактного нагрева полосы в очаге деформации.

Прокатка молибденовой плющеной ленты при силе тока 500 А с единичным обжатием до 50 % позволяет получить плющеную ленту с временным сопротивлением разрыву равным исходному. Процесс деформации идет без окисления поверхности плющеной ленты до значений силы тока 900 А, что позволяет получать ленту высокой точности и качества поверхности.

Для производства вольфрамовой плющеной ленты предложено исполь-

зовать сочетание электронагрева полосы между валками с предварительным электронагревом заготовки, что позволяет увеличить скорость прокатки, повысить пластичность вольфрама и улучшить условия заправки заготовки.

Плющение вольфрамовой проволоки комбинированным способом проводили при плотности тока в очаге деформации $500\ldots 600 \text{ А/мм}^2$, плотности тока предварительного нагрева $30\ldots 40 \text{ А/мм}^2$, скорости прокатки 1 м/мин и относительном обжатии 14% .

Плющенная лента выдержала испытания на спирализуемость при плотности тока $j = 600 \text{ А/мм}^2$ при комнатной температуре; при $j = 550 \text{ А/мм}^2$ - только при нагреве до $500\ldots 600^\circ\text{C}$; при $j = 500 \text{ А/мм}^2$ результаты нестабильные. Повышение прочностных и пластических свойств ленты из вольфрама марки ВА объясняется дисперсионным твердением из-за выделения на дислокациях дисперсных частиц фаз, образованных примесями и присадками.

Разработаны технологии получения плющенной ленты из нержавеющей стали 08Х18Н10, применяемой для соединений электродов в кинескопе, размерами $0,08 \times 1,0$ - $0,08 \times 1,65$ - $0,13 \times 2,0$ - $0,33 \times 1,80 \text{ мм}$ с предельными отклонениями по толщине $\pm 0,01 \text{ мм}$ и по ширине $\pm 0,07 \text{ мм}$, временным сопротивлением разрыву $590\ldots 680 \text{ МПа}$ и относительным удлинением $57\ldots 70\%$. Введение в технологический процесс отжига в проходной водородной печи обеспечивает требуемую магнитную проницаемость и структуру ленты, позволяющую изготавливать из нее детали гибкой без трещин и разрывов.

Повышенная жесткость клетки плющильного стана позволяет получать прецизионную ленту из электротехнической меди размерами $0,090 \times 0,58$ и $0,055 \times 0,46 \text{ мм}$ с минимальными предельными отклонениями по толщине от $+0,003 \text{ мм}$ до $-0,0006 \text{ мм}$ и по ширине $\pm 0,02 \text{ мм}$.

С учетом опыта работы стана 200 ЭКН разработаны схемы **станов для прокатки биметаллов** с использованием скоростного электроконтактного нагрева перед клетью и в очаге деформации. Разработано техническое задание на проектирование станов, выполнены эскизные разработки оборудования и предложение на поставку оборудования. Предложены новые конструктивные и технологические решения по токоподводам и изоляции узлов стана.

Материалы разработок использованы при выполнении технического проекта станов для прокатки биметалла с электроконтактным нагревом.

Исследована технология получения биметаллической проволоки из материала "молибден - медь" с размерами $0,3 \times 0,8 \text{ мм}$ и толщиной меди 30 мкм . В качестве заготовки использовали биметаллическую проволоку диаметром $0,56 \text{ мм}$ с толщиной меди $30\ldots 35 \text{ мкм}$. Проволоку обжигали в проходной печи при $980 \pm 20^\circ\text{C}$ и прокатывали в четырехвалковой головке при скорости $8\ldots 10 \text{ м/с}$. Плющенная лента имеет равномерный по сечению слой меди толщиной $30 \pm 3 \text{ мкм}$. Испытания ленты на спирализуемость показали хорошую прочность сцепления медного покрытия с молибденовой основой.

Для промышленного производства холоднокатаных прецизионных лент и полос разработаны конструкции универсальных рабочих клетей,

строенные на базе валковых систем дуо, кварто, 6-валковой и многовалковых кассет, которые использованы при создании **промышленных станов: 150/500x400, 270/750x500, 125/380x320, 150/500x400, 250/750x900 и 630.**

Предложены новые технические и конструкторские решения по универсальной рабочей клетке кварто 400 с различными валковыми системами и широким диапазоном продукции. Они использованы при проектировании универсальных клеток разных типоразмеров и модернизации оборудования.

Разработана конструкция многовалковой кассеты на базе 6-валковой схемы для стана кварто 250/750x500 Нытвенского металлургического завода, изготовление и внедрение которой осуществляется в настоящее время.

На заводе ДОЗАКЛ успешно работает шестивалковый прокатный стан 1350, не имеющей аналогов в мировой практике. Стан производит тонкие полосы и фольгу. За создание и освоение 6-валкового стана новой конструкции для прокатки тонких листов из алюминия и его сплавов, обеспечивающего получение листов повышенной точности и планшетности, коллективу под руководством автора присуждена премия Правительства Российской Федерации 1997 года в области науки и техники.

Принцип электроконтактного нагрева был применен при разработке способа и оборудования для **поверхностной закалки деталей металлургических машин**, работающих в области повышенного износа и температуры.

Разработан способ, в котором между обрабатываемой поверхностью изделия и электродом размещают вставку в виде пластины из пластичного графита со сжимаемостью 1...1000% и восстанавливаемостью формы 1...95%, что позволяет снизить энергоемкость процесса, стабилизировать его параметры и создать условия для местного введения в поверхность высокой тепловой мощности. При этом, как и при лазерной обработке поверхности металлов, закалка нагретого поверхностного слоя изделия происходит за счет интенсивного теплоотвода внутрь изделия от нагретой поверхности.

Указанный способ прошел промышленные испытания на ОАО "Коломенский завод" и ОАО "Карачаровский завод".

Электроконтактной поверхностной закалке подвергались маслосъемные и компрессионные кольца из серого чугуна диаметром 280 мм и шириной 8 мм при различных свойствах пластины пластичного графита и при переменном ее легировании. Напряжение изменялось в пределах 2...10 В, сила тока в контакте - 300...1000 А, а скорость обработки - 80...140 мм/с.

Процесс опробован на червяках (сталь 38ХГН) и проволоке (сталь 12Х18Н10Т) в ОАО "Карачаровский завод". Стойкость изделий, закаленных путем использования СВАН-процесса, повысилась в 1,3...1,8 раза.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана трехмерная математическая модель, алгоритм и программы расчета процесса прокатки с применением высокоскоростного электроконтактного нагрева полосы перед очагом деформации. Модель, основан-

ная на решении дифференциального уравнения теплопроводности с переменными теплофизическими коэффициентами, учитывает нагрев прокатываемого металла электрическим током между токоподводящей и рабочей клетями и в очаге деформации, а также потери тепла при контакте полосы с рабочими валками и за счет теплоотдачи в окружающую среду.

2. Разработана математическая модель процесса прокатки ленты с пропуском электрического тока между валками. С увеличением плотности электрического тока сопротивление деформации уменьшается по линейному закону. Установлено, что для вольфрама и молибдена при плотности тока $j \geq 50 \text{ А/мм}^2$ при расчете температурных полей можно пренебречь удельной мощностью работы пластической деформации и работы сил трения.

3. Положения математической модели процесса прокатки с электроконтактным нагревом были экспериментально подтверждены путем модернизации и исследования опытно-промышленного стана 6/130, разработаны технологические схемы и состав оборудования для осуществления процесса.

4. Разработан уникальный, не имеющий аналогов в отечественной и мировой практике, прокатный стан 200 с электроконтактным нагревом полосы. Стан введен в промышленную эксплуатацию в АО Ижсталь, освоены новые технологические процессы производства прецизионных лент и полос из инструментальных сталей. При существующей в настоящее время потребности, годовая производительность стана составляет 500 т. Внедрение рациональных режимов прокатки с электроконтактным нагревом инструментальных сталей позволило существенно увеличить выход продукции, повысить качество полос и сократить расход металла на 8...12%.

5. Для промышленного производства труднодеформируемых сталей и сплавов разработаны уникальные, не имеющие аналогов в отечественной и мировой практике, универсальный стан 70 и специализированный стан 300 для производства лент и полос из труднодеформируемых материалов.

6. Разработан процесс плакирования лент с применением высокоскоростного электроконтактного нагрева заготовок перед рабочей клетью или в очаге деформации. Установлено, что высокоскоростной нагрев с большой плотностью тока в очаге деформации обеспечивает при деформации ленточных компонентов сварку слоев при меньших суммарных деформациях и значительно более высокой пластичности трудноформируемых компонентов.

7. Разработаны основные технические требования, кинематические схемы валковых узлов универсальной рабочей клетки на базе клетки кварто. Предложены технические решения многовалковых касет с различными валковыми системами, от схемы дуо до 12-валковой. Это позволяет использовать для производства тонких лент из труднодеформируемых материалов станы с универсальными рабочими клетями, допускающими установку в одной клетке валковых систем дуо, кварто, шестивалковой, а также многовалковых касет с уменьшенным диаметром рабочих валков.

8. На основе разработок, технических и конструкторских решений, вы-

полненных на уровне изобретений, предложен комплекс технологических схем и состава оборудования для промышленного производства из труднодеформируемых металлов и сплавов плюшенной ленты, узких полос, многослойных и композиционных материалов с электроконтактным нагревом перед клетью и в очаге деформации, а также для холодной прокатки на многовалковых универсальных станах.

9. Разработана технология получения микропрофильного проката из вольфрама и молибдена с пропусканием электрического тока высокой плотности через очаг деформации. Ее опытно-промышленные испытания и промышленное использование на заводах электронной промышленности обеспечило увеличение выхода годного на 10...15% при одновременном повышении качественных показателей плюшенной ленты.

10. На промышленных предприятиях ОАО Коломенский завод и ОАО Карачаровский завод испытан способ поверхностной закалки изделий электроконтактным нагревом, что повышает стойкость изделий, закаленных с использованием СВАН-процесса, в 1,3...1,8 раза.

11. Результаты работы использованы при разработке оборудования, технологических режимов прокатки прецизионных лент и полос из труднодеформируемых металлов и сплавов на заводах-изготовителях металлургического оборудования и в научно-исследовательских и проектных институтах. На заводах АО Ижсталь, АО Тула-Чермет, Нытвенский металлургический завод, ДОЗАКЛ и др. внедрено высокопроизводительное и надежное прокатное оборудование, а также ряд малоотходных технологических процессов для производства прецизионных лент и полос высокого качества.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Пасечник Н.В., Зарапин Ю.Л., Чиченев Н.А. Производство прецизионной ленты из труднодеформируемых материалов электропластической деформацией. - М.: Металлургия, 1997. - 256 с.

2. Пасечник Н.В. Прерванный процесс // Металлы Евразии. - 1997. - № 1. - С. 94-97.

3. Пасечник Н.В. Приоритетные направления деятельности АХК ВНИИМЕТМАШ // Тяжелое машиностроение. - 1996. - № 5. - С. 2-4.

4. Пасечник Н.В. Современное состояние проектирования и изготовления прокатного оборудования и систем автоматизации производственных процессов // Сталь. - 1996. - № 2. - С. 39.

5. Пасечник Н.В. О некоторых приоритетных направлениях деятельности ГНЦ ВНИИМЕТМАШ // Россия и мир. - 1996. - № 4. - С. 4-5.

6. Пасечник Н.В., Целиков Н.А. Металлургические минизаводы – прогрессивный путь ресурсосбережения и получения рациональных заготовок // Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции: Машиностроительные технологии. - М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. - С. 32-34.

7. Зарапин Ю.Л., Пасечник Н.В., Чиченев О.Н. Перспективы применения управляемого электроконтактного нагрева в процессах ОМД // Сборник докладов научно-технической конференции: Теория и технология процессов пластической деформации. - М.: МИСиС, 1997. - С. 11-15.

8. Пасечник Н.В. Прокатка инструментальных сталей на станах с электроконтактным нагревом // Черметинформация. - 1996. - Вып. 2. - С. 55-58.

9. Пасечник Н.В. Расчет электроконтактного нагрева широкой полосы при ее движении через токопроводящие клетки // Тяжелое машиностроение. - 1998. - № 5-6. - С. 16-21.

10. Пасечник Н.В., Смакулов В.И. Методика расчета прокатных станов с электроконтактным нагревом металла // Сталь. - 2000. - № 4. - С. 62-64.

11. Зарапин Ю.Л., Пасечник Н.В., Чиченев Н.В. Теория и технология процессов пластической деформации // Сборник трудов научно-технической конференции. М.: МИСиС, 1996. - С. 16-21.

12. Пасечник Н.В. Расчет нагрева заготовки при электропластической прокатке // Сборник докладов науч.-теорет. конф., посвящ. 50-летию кафедры "Оборудование и технологии прокатки" М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999 - С. 100-116.

13. Пасечник Н.В. Исследование процесса нагрева заготовки при электропластической прокатке // Сталь. - 1999. - № 11. - С. 69-71.

14. Пасечник Н.В., Чиченев Н.А., Зарапин Ю.Л. Проектирование токоподвода к валкам стана электропластической деформации // Сталь. - 1988. - № 9. - С. 49-52.

15. А.с. 1024130 (СССР) МКИ В21С 47/06. Валок с электроконтактным нагревом / А.М. Когос, Н.В. Пасечник и др. // Б.И. - 1983. - № 23.

16. А.с. 831232 (СССР) МКИ В21В 3/00. Клеть прокатного стана с электроконтактным нагревом / А.А. Маренников, Н.В. Пасечник и др. // Б.И. - 1981. - № 19.

17. А.с. 1014606 (СССР) МКИ, В21В 1/32. Прокатная клеть / А.А. Маренников, Н.В. Пасечник и др. // Б.И. - 1983. - № 16.

18. А.с. 986539 (СССР) МКИ В21С 47/34. Устройство для задачи полосы в моталку / А.А. Маренников, Н.В. Пасечник и др. // Б.И. - 1983. - № 1.

19. А.с. 1362528 (СССР) МКИ В21С 47/28. Барабан моталки стана для прокатки полосы / А.А. Маренников, Н.В. Пасечник и др. // Б.И. - 1987. - № 48.

20. А.с. 1209331 (СССР) В21С 47/06. Способ формирования рулона из ленты и устройство для его осуществления / А.А. Маренников, Н.В. Пасечник и др. // Б.И. - 1986. - № 5.

21. А.с. 865439 (СССР) МКИ В21В 1/26. Стан для прокатки металлов с электроконтактным нагревом / А.М. Когос, А.А. Маренников, Н.В. Пасечник и др. // Б.И. - 1981. - № 35.

22. А.с. 875695 (СССР) МКИ В21В 31/02. Узел валков калибровочной прокатной клетки / А.М. Когос, Б.А. Ласкин, Н.В. Пасечник и др. // Открытия.

Изобретения. - 1978. - № 6.

23. А.с. 576131 (СССР) МКИ В21В 39/16. Проводковое устройство многовалкового стана / А.А. Маренников, В.А. Виноградов, Н.В. Пасечник и др. // Б.И. - 1977. - № 38.

24. А.с. 544485 (СССР) МКИ В21В 31/10. Калибровочная прокатная клеть / А.М. Когос, В.Т. Стукалов, Н.В. Пасечник и др. // Б.И. - 1977. - № 4.

25. А.с. 867569 (СССР) МКИ В23К 20/04. Способ изготовления многослойной ленты и устройство для его осуществления / А.А. Маренников, Н.В. Пасечник и др. // Б.И. - 1981. - № 36.

26. Пат. 2093283 (РФ) В 21 В 13/14. Кассета многовалковой прокатной клетки / Н.В. Пасечник, Б.А. Сивак, А.Д. Елишевич и др. // Б.И. - 1997. - № 48.

27. Пат. 2090277 (РФ) В 21 В 13/4. Многовалковая прокатная клеть / Н.В. Пасечник, А.М. Волков, А.А. Маренников и др. // Б.И. - 1997. - № 45.

28. Пасечник Н.В., Федоров М.В., Герцев А.И. и др. Стан новой конструкции для производства тонких полос с повышенными точностью размеров и плоскостностью // Черметинформация. - 1997. - С. 157-160.

29. Пасечник Н.В., Федоров М.В., Герцев А.И. и др. Прокатный стан новой конструкции для производства тонких полос повышенной точности и плоскостности // М.: Производство проката. - 1998. - № 4. - С. 29-32.

30. Пат. 2134179 (РФ). Способ получения тонкой металлической полосы и прокатный стан для его осуществления / Н.В. Пасечник, А.И. Герцев, С.Х. Сиушев, Ю.В. Гесслер // Б.И. - 1999. - № 22.

31. Пасечник Н.В., Филатов А.А., Канев Н.Г. Уменьшение динамических нагрузок в подшипниковых опорах четырехроликовых клетей // Тяжелое машиностроение. - 1997. - № 5. - С. 23-25.

32. А.с. 576131 (СССР) МКИ В21В 39/16. Проводковое устройство многовалкового стана / А.А. Маренников, В.А. Виноградов, Н.В. Пасечник и др. // Б.И. - 1977. - № 38.

33. Пасечник Н.В. Особенности расчета прокатных станов с электроконтактным нагревом // Тяжелое машиностроение. - 1996. - № 5. - С. 6-9.

34. Пасечник Н.В., Зарапин Ю.Л., Чиченев Н.А. Прокатное оборудование нового поколения для производства прецизионных полос из труднодеформируемых материалов // Сталь. - 1999. - № 2. - С. 58-64.

35. Пасечник Н.В. Electro-contact heating for tool steel strip. // Steel Technology International. - 1998. - С. 117-118.

36. Пасечник Н.В., Чиченева О.Н. Исследование свойств ленты для прокатки на стане с электроконтактным нагревом // Черметинформация. - 1997. - Вып. 11-12. - С. 70-72.

37. Пат. 2122036 (РФ) С 21 D. Способ поверхностной закалки изделия электроконтактным нагревом / В.С. Крылов, С.В. Чернов, Н.В. Пасечник. и др. // Б.И. - 1998. - № 45.