



МИСИС

УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СТАЛЬ 2024

30-31 мая 2024

СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

МОСКВА, 2024

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский технологический университет
«МИСИС»**

при поддержке:

**Научного совета по металлургии и металловедению РАН
МИНПРОМТОРГА России**

**Научно-техническая конференция
«ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СТАЛЬ 2024»
30-31 мая 2024**

Сборник тезисов докладов

**2024г.
Москва**

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕРМОДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА МЕТАЛЛ-АЛМАЗ ПРИ ТЕКСТУРООБРАЗОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРНЫМ ТЕРМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ Купо А.Н., Шершнев Е.Б.	6
ИСТОРИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ НА «НЛМК» Бахтин С.В., Бабушко Ю.Ю., Удовенко Н.П.	7
МАГНИТНЫЕ ДОМЕНЫ И СВОЙСТВА Fe-Si СПЛАВОВ Драгошанский Ю.Н.*, Пудов В.И., Губернаторов В.В.	8
ПРИМЕНЕНИЕ БЕСКОНТАКТНОГО МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ РАЗМЕРА ЗЕРНА ГОТОВОГО ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗОТРОПНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА АГРЕГАТАХ НЕПРЕРЫВНОГО ОТЖИГА Бабушко Ю.Ю., Караваев Д.В., Мощенко М.Г.	9
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗДЕЛКИ ПРОБ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ Антонов С.В., Бабушко Ю.Ю., Караваев Д.В., Мощенко М.Г.	10
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ Караваев Д.В. ^{1,2} , Дагман А.И. ¹ , Котельников Г.И. ² , Титов А.В. ¹	11
АДАПТАЦИЯ МЕТОДИКИ КЛАСТЕРИЗАЦИИ БАЗ ДАННЫХ СОСТАВОВ И РАЗМЕРОВ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗОТРОПНЫХ СТАЛЕЙ Паршина А.С. ^а , Житенев А.И. ^а	12
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПО ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕКСТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЯХ Парий И. ^а , Данилов С.В. ^а , Ролдугина А.С. ^а , Паршина А.С. ^а	13
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ЭНЕРГОЕМКОГО АГРЕГАТА Орлов А.А. ¹ , Крылова Е.В. ¹ , Щербаков В.М. ¹ , Будадин О.Н. ² , Калашников Е.А. ³	14
ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА МАКРОСТРУКТУРУ СЛЯБОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ Кононыхин Г.Н., Бурков Д.В., Бахтин С.В.	15
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ МАРКИ М400-50А ПО EN 10106 С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ ПО ОСНОВНЫМ	

ПОТРЕБИТЕЛЬСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ	Удовенко Н.П., Уваркин А.А., Бахтин С.В., Барыбин Д.В.	16
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ	Исаенкова М.Г. ¹ , Крымская О.А. ¹ , Мишушкин Р.А. ¹ , Романова Ю.А. ¹ , Данилов С.В. ²	17
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СТАЛИ. ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИМЕТ РАН	Григорович К.В.	18
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ СТАЛИ В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШАХ С МОДИФИКАТОРАМИ ПОТОКА НА СЛЯБОВЫХ МНЛЗ	Глебов В.П., Шипельников А.Н., Кононыхин Г.Н., Шестаков М.Е.	19
АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ КОВШЕВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ	Жемков А.А., ^a Морозов А.О., ^a Ем А.Ю., ^a Румянцева С.Б., Демин К.Ю., Комолова О.А., ^a Дагман А.И. ^b , Григорович К.В. ^a	20
СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ	Еремин Г.Н., Парахин В.И.	21
УЛУЧШЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СТАЛИ ЗА СЧЕТ СВЕРХБЫСТРОГО НАГРЕВА ПЕРЕД ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАЮЩИМ ОТЖИГОМ	Редикульцев А.А. ^{a,b} , Каренина Л.С. ^a	22
ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАГНИТНО-МЯГКОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Fe-Co	Соснин В.В., Магдиев К.Д., Зимичев А.М.	23
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ТЕРМООБРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ 11895	Давыдов Д.И., Василенко О.Н.	24
ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРНОЙ РЕЛАКСАЦИИ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АМОРФНОЙ ФАЗЫ НА ИНДУКЦИЮ НАСЫЩЕНИЯ ЛЕНТ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Fe-Co-Si-B	Колотовкин Н.Ю., Могильников П.С., Соснин В.В.	25
УПРАВЛЕНИЕ КОНЕЧНЫМИ СВОЙСТВАМИ ПРОДУКТА С ПОМОЩЬЮ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ	Цыганов И.А., Юров В.В.	26
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КРЕМНИЯ В ОБРАЗЦАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ	Лепилина М.Ю., Якубенко Е.В., Ильясов Р.Р., Орехова Ю.Н.	27

СТРУКТУРНО-ТЕКСТУРНАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ Лобанов М.Л. ^{а, б} , Редикульцев А.А. ^{а, б} , Сацкий Д.Д. ^{а, б}	В 28
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ И ДРУГИХ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ В ИФМ УРО РАН Милютин В.А.*, Гervasьева И.В., Драгошанский Ю.Н.	29
ПРОГРЕССИВНЫЕ СПОСОБЫ И ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ХОЛОДНОКАТАНОГО ПРОКАТА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ Парахин В.И., Еремин Г.Н.	30
ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПЕЧЕЙ ОТЖИГА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ХОЛОДНОКАТАНЫХ ПОЛОС ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ Сафронов А.А., Каренина Л.С., Удовенко Н.П., Уваркин А.А., Курдюкова Н.И., Клименко Е.С.	32
ИССЛЕДОВАНИЕ И КОРРЕКТИРОВКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ОСОБОНИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ КРЕМНИСТОЙ СТАЛИ Тимохин А.С. ¹ , Долгих Ю.Н. ¹ , Дагман А.И. ¹ , Комолова О.А. ² , Григорович К.В. ²	33
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В РУЧЬЕ ПРИ РАЗЛИВКЕ СЛЯБОВ НА МНЛЗ Кононыхин Г.Н., Дагман А.И., Калистратов Д.А., Глебов В.П.	34
МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ И СТРУКТУРЫ ВТОРИЧНОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВЫСОКОПРОНИЦАЕМОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ Ролдугина А. С. ¹ , Рязанов М.В. ¹ , Парахин В.И. ²	35
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В RH-ВАКУУМАТОРЕ Комолова О.А., Григорович К.В.	36
ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАИМЕНЬШИХ УДЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ ВЫСОКОПРОНИЦАЕМОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СТАЛИ Шопин И.И.	37
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНДУСТРИИ 4.0 В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ Шаталов Д.И., Юров В.В., Цыганов И.А.	37
АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗОТРОПНЫХ СТАЛЕЙ С СОДЕРЖАНИЕМ SI+AL БОЛЕЕ 4,8% Юров В.В., Цыганов И.А.	39
АДАПТАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ИЗНОСА ВАЛКОВ К УСЛОВИЯМ ПРОИЗВОДСТВА ПОДКАТА ЭТС НА СТАНЕ 2000 Дагман М.А. ¹ , Пименов В.А. ¹	40

ТЕРМОДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА МЕТАЛЛ-АЛМАЗ ПРИ ТЕКСТУРООБРАЗОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРНЫМ ТЕРМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Купо А.Н., Шершнев Е.Б.

ГГУ имени Ф. Скорины, Гомель, Республика Беларусь

E-mail: kupo@gsu.by

В ряде технологических процессов микро- и наноэлектроники текстурообразование поверхности природных и синтетических алмазов целесообразно осуществлять термохимическим способом с использованием в качестве активирующего теплового источника лазерное излучение. Такой метод базируется на химических свойствах границы раздела металл-алмаза, при котором металл выступает в качестве катализатора. При этом на поверхность алмаза предварительно посредством наносят покрытие металла, способного растворять в себе углерод, например, лазерным диспергированием в вакууме. В таком процессе металл выступает в качестве катализатора термодиффузионного канала, посредством которого углерод может образовывать соединения с водородом в атмосфере которого проводится такой процесс.

Для оптимизации режимов использования лазерного излучения в указанном способ поверхностного формообразования исследованы физико-химические механизмы процессов диффузионного массообмена, активируемые тепловым воздействием, согласно уравнению Аррениуса. Для формирования управляемого теплового источника на границе раздела металл-алмаз используется лазерное излучение.

Лазерное излучение формирует осесимметричный поверхностный тепловой источник, что позволяет решать дифференциальную задачу теплопроводности в цилиндрической системе координат. Нами получено численное решение нестационарной нелинейной задачи тепломассопереноса в трехслойной теплоизолированной системе «водород – металл – алмаз». В общем случае решение задачи тепломассопереноса в описанной гетерофазной термодинамической системе сводится к решению связанных смешанными граничными условиями дифференциальных уравнений, включающих уравнения теплопроводности (1) для и уравнения диффузии (2) для каждой из трех сред.

$$c(T) \cdot \rho(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(T) \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2)$$

где c – удельная теплоёмкость, зависящая от температуры T , ρ – плотность, λ – теплопроводность, C – массовая концентрация углерода каждой из трех рассматриваемых фаз, при этом коэффициенты диффузии D принимаются зависящими от температуры по экспоненциальному закону.

Разработанная математическая модель позволяет определять осесимметричное распределение температуры и концентрации в указанной системе в любой момент времени в широком диапазоне интенсивностей лазерного излучения для произвольных зависимостей теплофизических параметров от температуры, а так же для различных металлических покрытий.

ИСТОРИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ НА «НЛМК»

Бахтин С.В., Бабушко Ю.Ю., Удовенко Н.П.
E-mail: bahtin_sv@nlmk.com

Группа «НЛМК» является одним из крупнейших в России и мире производителем электротехнических сталей и имеет более чем 60-летний опыт производства электротехнической анизотропной стали (ЭАС) и почти 40-летний опыт производства электротехнических изотропных сталей (ЭИС).

На НовOLIпецком металлургическом заводе производство ЭАС начато в 1960 г. на основе отечественной технологии, разработанной ЦНИИЧерМет и специалистами завода. Впервые в мире освоена разливка стали на установках непрерывной разливки стали. В период с 1960 до 1968 г. производство стали осуществлялось в виде листов. С 1968 г. после ввода в эксплуатацию агрегатов электроизоляционного покрытия освоен выпуск стали в рулонах.

В 1980-х гг. работники комбината совместно с учеными ЦНИИЧермет создали уникальную технологию комплексного легирования, что позволило снизить уровень удельных ваттных потерь на 20-25 %, освоить производство продукции нового класса и полностью отказаться от импорта холоднокатаного проката. Также, кроме производства традиционной стали, освоена технология изготовления специальных видов стали толщиной 0,15 мм и 0,20 мм.

В связи с постоянным ростом требований к расширению сортамента и качеству в 2003 г. разработана и внедрена новая технология с выплавкой в конвертерах и использованием в цикле производства современных установок внепечной обработки, разливки, непрерывного широкополосного стана горячей прокатки. Переход на конвертерную выплавку обеспечил получение комплекса магнитных и потребительских свойств, соответствующих требованиям рынка. Также освоено производство стали толщиной 0,23 мм и стали с лазерной обработкой.

На настоящий момент ведутся работы по освоению производства нового класса ЭАС – стали с высокой проницаемостью и особонизким уровнем удельных магнитных потерь.

В 1986 г. с целью исключения зависимости от импорта в Липецке введено в строй крупнейшее в Европе специализированное производство ЭИС мощностью до 480 тыс. т./год. «НЛМК» производит полный спектр динамных сталей – всех групп легирования, готовых и полуготовых, без покрытий и с электроизоляционными покрытиями классов С3, С5, С6. За истекший период с 1986 г. л разработано большое количество новых марок динамной стали, из которых можно отметить следующие:

- стали для высокоскоростной штамповки с дополнительными требованиями по магнитным и механическим свойствам;
- высокопроницаемые стали с принципиально новым соотношением между удельными магнитными потерями и проницаемостью;
- высоколегированные стали с содержанием Si до ~3,3 % и Al до ~1 %.

В «НЛМК» ведутся работы по освоению производства ЭИС класса NO особо тонких толщин $\leq 0,35$ мм по EN 10303 для двигателей электромобилей и сталей с особонизким уровнем потерь для энергоэффективного оборудования («зеленая» энергетика, генерация и т.п.).

Разработки «НЛМК» в производстве электротехнических сталей нашли свое отражение в новых стандартах. При непосредственном участии специалистов

«НЛМК» разработаны и внедрены ГОСТ 32482, ГОСТ 33212, ГОСТ Р 59727, отражающие актуальные требования к продукции.

МАГНИТНЫЕ ДОМЕНЫ И СВОЙСТВА Fe-Si СПЛАВОВ

Драгошанский Ю.Н.*, Пудов В.И., Губернаторов В.В.
Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург,
Россия
***E-mail: dom736@outlook.com**

При различных технологических или эксплуатационных воздействиях на ленты магнитомягких сплавов уровень и изменения их магнитных свойств в значительной степени определяются видом и динамикой магнитной доменной структуры. Создано магнито-оптическое устройство, позволяющее изучать объёмный вид и поведение магнитных домены одновременно с двух противоположных сторон лент магнитомягких сплавов. Устройство состоит из системы двух одинаковых оптических микроскопов, расположенных на общей станине с объективами, ориентированными навстречу друг другу. Станина микроскопов находится между двух намагничивающих катушек Гельмгольца [1].

С помощью данного устройства определена двухфазная структура замыкающих доменов сплавов Fe-Si типа (110)[001], состоящая из каплевидных 180° доменов на поверхностях ленты и связывающих их внутриобъёмных 90° областей. Данная структура отвергает однофазную модель, ранее предложенную проф. Дж. Гудинафом и позволяет объяснить поведение доменов при растяжении ленты сплава и при её локальной лазерной обработке (ЛЛО). Экспериментальное устройство способствовало выявлению ранее не установленных источников обратных скачков намагниченности (скачков Баркгаузена), наличие которых неожиданно обнаружено при намагничивании лент сплавов наряду с прямыми скачками. Установка позволяет выявлять пространственное распределение различного типа дефектов кристаллической решётки, в частности немагнитных примесей в сплаве, а также объёмные изменения доменной структуры в процессах намагничивания, перемагничивания, растяжения ленты сплава и других воздействиях на неё. Устройство полезно в лабораторных и заводских условиях для магнитооптического мониторинга структуры твёрдых тел.

Определена эффективность разработанной ранее локальной лазерной обработки анизотропной электротехнической стали состава Fe-3%Si с различной степенью совершенства ребровой кристаллографической текстуры (снижение потерь энергии до 20%) и испытан способ сохранения эффекта ЛЛО при нагреве материала [2]. Известно, что механические напряжения релаксируют в зонах тепловых лазерных деформаций и магнитные поля рассеяния над ними практически полностью исчезают уже при 700°C . Способ сохранения эффекта ЛЛО заключается в нанесении мелких (размером ≈ 10 мкм) частиц порошка немагнитных элементов (например, Cu, Al) на поверхность ленты перед её ЛЛО. ЛЛО впечатывает массу нанесённых на поверхность ленты этих частиц в зонах тепловой деформации лазерного облучения. Поэтому локальные магнитные поля рассеяния сохраняются и после тепловой релаксации лазерных напряжений.

Раскрыт механизм изотропности эффекта термомагнитной обработки магнито-мягких сплавов в переменных магнитных полях (разрушение нанокластеров Si-Si) [3].

Список литературы

1. Драгошанский Ю.Н., Пудов В.И. Устройство для оптического мониторинга структуры твёрдых тел. Полезная модель № 174673. Заяв.13.04.2017. Оpubл. 25.10.2017. Бюлл. 30.
2. Драгошанский Ю.Н., Пудов В.И. Перспективы поверхностного и объёмного модифицирования электротехнических сталей. Сборник монографий «Актуальные проблемы прочности». Глава 29. С. 369–379. Под ред. Рубаника В.В. Беларусь. Витебск. УО ВГТУ. 2022. 540 с.
3. Губернаторов В.В., Драгошанский Ю.Н. Атомное упорядочение и эффект ТМО в магнитомягких сплавах Fe-Si. ФММ. 2019. Т.120. №8. С.787–792

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСКОНТАКТНОГО МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ РАЗМЕРА ЗЕРНА ГОТОВОГО ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗОТРОПНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА АГРЕГАТАХ НЕПРЕРЫВНОГО ОТЖИГА

Бабушко Ю.Ю., Караваев Д.В., Мощенко М.Г.

ПАО НЛМК, г. Липецк, Россия

E-mail: babushko_yy@nlmk.com

Ключевыми эксплуатационными свойствами электротехнической изотропной стали (ЭИС) являются удельные магнитные потери и магнитная индукция. Отдельные потребители дополнительно предъявляют требования к механическим характеристикам стали. Одним из основных факторов, влияющим на свойства ЭИС наравне с химическим составом, является структура металла. Прежде всего, структура характеризуется средним размером зерна.

Зерно влияет на механические свойства согласно закону Холла-Петча, а также сложным образом влияет на удельные магнитные потери. По этой причине стабилизация размера зерна в целевом диапазоне по длине полосы и от рулона к рулону является важной задачей для обеспечения качества продукции.

Формирование зеренной структуры в готовом продукте происходит при термообработке на агрегате непрерывного отжига (АНО). На процесс рекристаллизации в АНО, помимо температурного профиля в печи, влияет химический состав металла, количество и размерное распределение неметаллических преципитатов, а также степень холодной деформации, накопленной на предыдущих переделах. Данные исходные параметры имеют естественную степень отклонения от среднего в рамках производственного процесса, что приводит к отклонению от целевого размера зерна после рекристаллизации. В случае экспериментальных кампаний при сравнении влияния прочих факторов структуры на свойства, таких, например, как текстура, также необходимо обеспечить равный размер зерна на сравниваемых участках полосы.

Оценка размера зерна ЭИС на НЛМК производится методами оптической микроскопии в соответствии с ГОСТ 5639-82. Данный метод не может обеспечить достаточную оперативность получения результатов из-за длительного цикла отбора проб и подготовки образцов для исследования, и не позволяет оперативно изменять температуру в печи для корректировки размера зерна in-situ.

Оценку среднего размера зерна также возможно проводить с использованием в качестве излучателя и приемника ультразвука (УЗ) электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП). Применение ЭМАП не требует контакта с объектом контроля и позволяет непрерывно в реальном времени получать оценку размера зерна проходящей через область контроля полосы.

Для проверки работоспособности оборудования с данным принципом измерений проведен ряд экспериментальных обработок ЭИС на АНО.

Испытания показали следующее: 1) установка УЗК оперативно реагирует на изменение размера зерна в потоке 2) сличение результатов с оптическим методом показало высокую сходимость (разница составляет не более 5-7 %). Данный уровень точности подходит для оперативной корректировки режима обработки на агрегате непрерывного отжига 3) подтверждена работоспособность установки на ЭИС в толщинах 0,25, 0,35 и 0,50 мм. Однако, каждый сортament требует отдельной калибровки прибора и построения тарировочной кривой.

По результатам промышленной обработки показана принципиальная возможность проведения измерений размера зерна с помощью УЗК в условиях АНО.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗДЕЛКИ ПРОБ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ

Антонов С.В., Бабушко Ю.Ю., Караваев Д.В., Мощенко М.Г.

ПАО НЛМК, г. Липецк, Россия

E-mail: antonov_sv @nlmk.com

В настоящее время в НЛМК ведется разработка технологии производства премиальных низкочастотных и среднечастотных марок электротехнической изотропной стали (ЭИС) требования к которым предъявляются стандартами EN 10106 и EN 10303 соответственно. Для данных марок, важной задачей является уменьшение разброса магнитных характеристик. Для решения данной задачи необходимо устранить фактор вариации на всех переделах, в том числе при разделке проб, которая является важным фактором с точки зрения оценки результативности удельных магнитных потерь при проведении опытных работ.

Разделка проб, как правило, производится с помощью гильотинных ножниц (ГН), данный процесс механической порезки образцов повышает уровень удельных магнитных потерь вследствие внесения остаточных напряжений и холодного наклепа в зоне реза. Влияние данного фактора на металл можно увидеть с помощью оптического микроскопа в области кромки в виде линий скольжения и деформированных зерен. Кроме того, механическая порезка формирует на кромке специфическую геометрию – со стороны удара ножниц формируется зона замятия, с противоположной стороны листа появляется заусенец, на торцевой стороне кромки выделяются зона реза и зона хрупкого излома.

Формирование наклепа в кромочных зонах зависит от следующих эксплуатационных характеристик ГН: зазор между ножами, степень износа ножей, скорость смыкания ножей, угол наклона плоскости ножа и т.д.

В работе исследовалось влияние зазора и степени износа ножей ГН на геометрию кромок при разделке проб. Порезка проводилась на двух партиях металла в толщинах 0,25 и 0,50 мм с одинаковыми параметрами производства. По результатам проведенного эксперимента определены оптимальные величины зазора, обеспечивающие лучший уровень удельных магнитных потерь. Установлено количество циклов эксплуатации, выше которого падает качество кромки и повышаются удельные магнитные потери в порезанных пробах.

Геометрия кромок экспериментальных образцов исследована с помощью оптической микроскопии. Установлен максимальный уровень положительной корреляции между величиной удельных магнитных потерь и размером зоны замятия, которая в свою очередь коррелирует с величиной наклепа в прикромочной области. Таким образом, установлено, что геометрия кромки может использоваться в качестве косвенной оценки качества кромки образцов после разделки на ГН.

На основе данной работы уточнены сроки перевалки лезвий ГН, и скорректированы рекомендации по величинам зазора при порезке ЭИС различных толщин. Введенные корректировки помогли стабилизировать разброс магнитных характеристик, в частности снизить долгосрочное среднее квадратичное отклонение удельных магнитных потерь на 50%.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

Караваяев Д.В.^{1,2}, Дагман А.И.¹, Котельников Г.И.², Титов А.В.¹

¹ПАО «НЛМК», Липецк, Россия; ²НИТУ МИСИС, Москва, Россия

**E-mail: karavaev_dv@nlmk.com; dagman_ai@nlmk.com;
gikotelnikov@yandex.ru**

Эксплуатационные характеристики электротехнической стали (ЭТС) определяются в том числе химическим составом, в частности, содержанием углерода. Для производства одного из видов ЭТС необходимо получить содержание углерода не более 0,033 % в литой стали.

С учетом увеличения массовой доли углерода из присаживаемых на внепечной обработке материалов, требуется получить содержание углерода на уровне 0,02 % на выпуске из конвертера. Обеспечить данные концентрации углерода возможно с использованием следующих маршрутов: Конвертер-УДМ-УНРС (Маршрут 1); Конвертер-УДМ-АЦВ-УНРС (Маршрут 2). Производство ЭТС по маршруту 1 имеет ряд технико-экономических преимуществ, поэтому его использование целесообразно. В данной работе рассмотрена возможность стабильного получения углерода менее 0,020 % в конвертерном процессе.

Окисление углерода в сталеплавильной ванне происходит за счет растворенного в металле кислорода и кислорода оксидов железа шлака. Степень окисленности металла в конвертерном процессе значительно выше равновесного, что подтверждается промышленными данными. Тем не менее, дополнительное

повышение окисленности системы позволит получить на выпуске более низкие содержания углерода.

Для обеспечения требуемой температуры выпуска был изменен тепловой баланс плавки. Больше теплоты окисления углерода, при достижении более низких концентраций, недостаточно для получения температуры. Поэтому был скорректирован состав металлошихты в пользу увеличения доли чугуна в завалке.

Присадка твердых окислителей в процессе продувки охлаждает плавку, а также увеличивает окислительный потенциал системы за счет увеличения содержания оксидов железа. Как следствие, введение твердых окислителей при прочих равных условиях обеспечивает более эффективную среду для удаления углерода.

Интенсифицирование процесса обезуглероживания также можно достичь изменением кинетики процесса. При снижении скорости обезуглероживания (~ 4 мин до конца продувки) скорость окисления углерода начинает зависеть от массопереноса углерода. Таким образом, увеличение площади реакционной поверхности позволяет увеличить скорость удаления углерода.

При использовании донной продувки нейтральными газами достигаются более низкие значения содержания углерода и меньшая степень переокисленности ванны. Как показатель эффективности обезуглероживания, произведение $[C] \cdot [O]$ в металле становится ниже и в среднем находится в диапазоне 0,0020 – 0,0025 %².

Использование описанных выше закономерностей в промышленных условиях позволило обеспечить стабильное содержание углерода в стальном полупродукте на уровне 0,02 %, что, в свою очередь, привело к использованию более эффективного маршрута производства ЭТС.

АДАПТАЦИЯ МЕТОДИКИ КЛАСТЕРИЗАЦИИ БАЗ ДАННЫХ СОСТАВОВ И РАЗМЕРОВ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗОТРОПНЫХ СТАЛЕЙ

Паршина А.С.^а, Житенев А.И.^а

**^аНоволипецкий металлургический комбинат, 398040, Липецк, площадь
Металлургов, 2
E-mail: zhitenev_ai@nlmk.com**

Для оценки неметаллических включений (НВ) в сталях применяются различные методы, одним из которых является автоматический анализ частиц методом СЭМ-ЭДС. Этот метод позволяет получать статистически значимую оценку НВ в сталях с помощью анализа баз данных составов и размеров большого числа включений. Ключевой проблемой этого метода является обработка получаемых баз данных, классификация включений и интерпретация результатов. Эта задача ранее была успешно решена для углеродистых и низколегированных сталей с помощью кластеризации методом К-средних и последующем термодинамическом моделировании. В настоящей работе показано, как можно адаптировать эту методику для электротехнических изотропных сталей.

Исследовали неметаллические включения в образцах электротехнической стали, содержащей 3%Si и 1%Al. В ходе анализа проводили очистку данных от артефактов анализа с помощью разработанных фильтров, и вычитали фон, учитывая особенности легирования рассматриваемой стали. Для расчета фазового состава

каждого включений разработали алгоритм, основанный на представлении о сродстве элементов к кислороду, сере и азоту, позволяющий оценить количество алюминия в каждом включении, относящееся к нитриду алюминия и корунду, рассчитать массовую долю оксида магния, оксида и сульфида кальция, а также сульфида марганца. Для дальнейшего анализа провели кластерный анализ фазовых составляющих и с помощью двойных и тройных фазовых диаграмм определили конкретные химические соединения, входящие в найденные НВ.

В рассмотренном образце ЭИС найдено три группы НВ. Первая группа включений – это алюминаты кальция $n\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{CaO}$ с высоким содержанием СаО, а также включения СаS, формирующимися на этапе ковшевой обработки при модифицировании кальцием. Вторая группа – включения магнезиальной шпинели и чистого оксида магния, природа образования которых связана с активным взаимодействием расплава и футеровки. Третья группа – это включения на основе нитрида алюминия, формирующиеся при затвердевании из-за ликвации азота.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПО ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕКСТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЯХ

Парий И.^а, Данилов С.В.^а, Ролдугина А.С.^а, Паршина А.С.^а

^аНоволипецкий металлургический комбинат, 398005, Липецк, пл.

Металлургов 2

E-mail: pariy_i@nlmk.com

Электротехническая сталь — магнитомягкий материал, который обычно используется в трансформаторах, двигателях, генераторах, генераторах переменного тока и т. д. и для уменьшения потерь на вихревые токи в дополнение к увеличению проницаемости необходимо получать материал с заданными характеристиками. Например, магнитные свойства электротехнической стали зависят от многих факторов, включая содержание примесей, размер зерна, толщину листа, остаточное напряжение, а также кристаллографическую текстуру. Наиболее распространенными методами получения данных о текстуре является дифракция рентгеновских лучей (XRD) и дифракция обратного рассеяния электронов (EBSD). При этом для обработки полученных данных чаще всего используется программное обеспечение, поставляемое в комплекте с конкретным оборудованием. Исходный код такого ПО, как правило, закрыт, и у пользователей нет возможности менять параметры расчета или автоматизировать рутинные вычисления. Все это приводит к усложнению анализа данных, особенно если они были получены на разном оборудовании и обработаны в разном ПО, что не позволяет полноценно сравнивать полученные результаты.

В связи с этим актуальность представляет задача разработки ПО, которое сможет обрабатывать данные с различного оборудования, будет иметь возможность тонкой настройки под конкретные цели пользователя и позволит автоматизировать повторяющиеся вычисления для экономии времени. Для этого можно использовать пакет Mtex, работающий на базе Matlab, который является бесплатным, работает с исходными файлами разных расширений и позволяет настраивать расчеты под конкретные запросы пользователя.

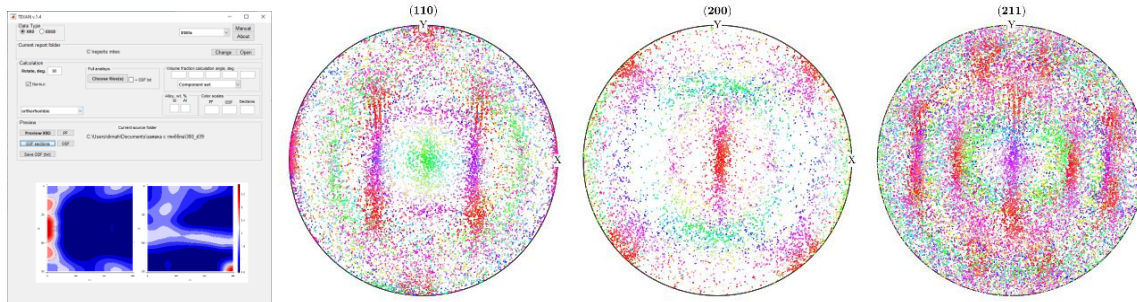


Рисунок 1 – Интерфейс ПО TEXAN и пример точечной ПП

По итогам работы специалистами R&D центра ПАО НЛМК разработано ПО на базе Mtex и Python, позволяющее обрабатывать исходные файлы XRD и EBSD от различного расширения, генерировать прямые полюсные фигуры, ФРО в графическом и текстовом виде, рассчитывать объемные доли волокон и компонент, объединять карты EBSD, вырезать из них части произвольной формы или отдельные зерна.

ПО TEXAN постоянно дополняется новыми функциями и найдет широкое применение среди исследователей текстуры сталей.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ЭНЕРГОЕМКОГО АГРЕГАТА

Орлов А.А.¹, Крылова Е.В.¹, Щербаков В.М.¹, Будадин О.Н.², Калашников Е.А.³

**¹ФГБОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»», г. Москва, РФ**

²АО «ЦНИИ специального машиностроения», г. Хотьково, РФ

³НИТУ МИСИС, г. Москва, РФ

Аннотация. В докладе представлены результаты синтеза интеллектуальной системы автоматического управления технологическими режимами работы энергоемкого агрегата.

Annotation. The report presents the results of the synthesis of an intelligent automatic control system for technological modes of operation of an energy-intensive unit.

Ключевые слова: интеллектуальная система, автоматическое управление, технологические режимы, энергоемкий агрегат, интеллектуальный датчик, агрегатное состояние.

Keywords: intelligent system, automatic control, technological modes, energy-intensive unit, intelligent sensor, aggregate state.

Изобретение [1] относится к электрометаллургии и решает задачу управления режимом работы печного агрегата, содержащего два источника нагрева: сопротивлением и дугой постоянного тока.

Технический результат - улучшение качества регулирования при нагреве материала в печи.

Система автоматического управления электрическим режимом плавильного агрегата, имеющего источник дугового нагрева и нагреватели сопротивления, содержит контур управления источником дугового нагрева, включающий источник электропитания, выполненный с возможностью подачи напряжения на сводовый и подовый электроды через регулятор тока и токопроводы.

Система также содержит контур управления нагревателями сопротивления, включающий тиристорный регулятор напряжения, подключенный к нагревателям сопротивления, устройство видеофиксации изображения поверхности расплавляемого металла с датчиком контроля его агрегатного состояния.

Система включает микропроцессорный блок, выполненный с возможностью отключения контура управления источником дугового нагрева в момент полного расплавления шихты по сигналу с упомянутого датчика контроля и подключения контура управления нагревателями сопротивления.

Использованная литература:

1. Бекаревич А.А., Калашников Е.А., Будадин О.Н. и др. Система автоматического управления электрическим режимом плавильного агрегата с двумя источниками электронагрева с использованием интеллектуального датчика контроля агрегатного состояния расплавляемого металла. Патент на изобретение RU2630160C2.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА МАКРОСТРУКТУРУ СЛЯБОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ

Кононыхин Г.Н., Бурков Д.В., Бахтин С.В.

E-mail: kononyhin_gn@nlmk.com

В связи с повышением требований к энергоэффективности в мировой экономике непрерывно растут требования к качеству электротехнических сталей, в частности, к обеспечению высокого комплекса магнитных свойств, из которых наиболее важными являются магнитная индукция и удельные магнитные потери.

Одним из факторов, оказывающих значимое влияние на магнитные свойства, является макроструктура сляба. Типовая структура непрерывнолитого сляба, а именно соотношение размеров структурных зон, зависит от химического состава стали, технологических параметров разливки и условий формирования слитка (дополнительное внешнее воздействие на процесс кристаллизации). Зона слитка, характеризующаяся глобулярным типом дендритов изотропна по своим свойствам и при этом, обладает минимальной плотностью и более высокой пластичностью.

Одним из способов воздействия на литую структуру является электромагнитное перемешивание (ЭМП). Ниже приведены результаты использования двухступенчатой системы ЭМП роликового типа с установкой катушек на обоих ручьях в первых сегментах зоны вторичного охлаждения МНЛЗ.

В качестве объекта исследования была выбрана электротехническая сталь как металл, склонный к формированию ярко выраженной дендритной структуры слябов и соответственно, на нем эффект электромагнитного перемешивания на макроструктуру сляба будет наиболее заметен. Произведена разливка ~150 плавов электротехнического сортамента с содержанием кремния с $Si \approx 2,0-3,2 \%$.

Определение оптимальной модели перемешивания осуществлено методом задания определенного направления перемешивания каждой пары внутрироликового ЭМП (левосторонняя или правосторонняя с непрерывным или попеременным перемешиванием, при определенных величинах частоты и силы тока) с последующей оценкой структуры кристаллизации слэбов.

При анализе полученных результатов установлено, что протяженность зоны равноосных кристаллов на увеличилась в среднем в 2,5 раза при одновременном повышении симметрии кристаллической структуры слэбов. Типовая структура затвердевания является довольно асимметричной, поскольку равноосные кристаллы накапливаются в большей части в основном на стороне малого радиуса, в то время как столбчатая кристаллизация при затвердевании вновь начинается с внутренней части слитка. Симметрия структуры затвердевания слитка обеспечивается преимущественно за счет повторного перемешивания на участке расположения нижней пары роликов с ЭМП: равноосные кристаллы перемещаются из нижней части слитка в его верхнюю часть, способствуя оптимизации охлаждения и снижению перегрева, благодаря чему происходит раннее прекращение роста столбчатой структуры и образование обширной зоны равноосных кристаллов.

Установлена тенденция линейного влияния на отклик таких факторов как перегрев над температурой ликвидус, сила тока и частота ЭМП. Оптимальным, с точки формирования структуры, являются условия разливки с минимальным перегревом до 20°C и максимальной мощностью тока. При этом перегрев и сила тока значимо влияют на величину центральной зоны. Полученные результаты свидетельствуют о значительном положительном влиянии системы на протяженность зоны равноосных кристаллов и симметрию структуры слэбов электротехнических марок стали.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ МАРКИ М400-50А ПО EN 10106 С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ ПО ОСНОВНЫМ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Удовенко Н.П., Уваркин А.А., Бахтин С.В., Барыбин Д.В.
E-mail: udovenko_np@nlmk.com

Электротехническая изотропная сталь (ЭИС или динамная сталь) – это сплав технического железа с кремнием и алюминием с суммарным содержанием (Si + Al) до 6 %. ЭИС является магнитномягким материалом, применяемым для изготовления магнитопроводов электрических машин, работающих во вращающемся переменном магнитном поле. Со стороны потребителей к ЭИС кроме требований к магнитным и свойствам предъявляются жесткие требования к механическим свойствам и качеству электроизоляционного покрытия, причем они могут выходить за рамки действующих стандартов.

Данная работа посвящена разработке технологии производства электротехнической изотропной стали марки М400-50А по EN 10106 с дополнительными требованиями к качеству – удельным магнитным потерям $P_{1,5/50}$, твердости HV5 и адгезии электроизоляционного покрытия (Таблица 1).

Таблица 1 – Требования к качеству стали марки М400-50А

Требования	Характеристики		
	$P_{1,5/50}$, Вт/кг, не более	HV ₅	Адгезия по EN 13523-6, не более
Стандартные по EN 10106	4,0	Не регламентирована	-
Дополнительные	3,5	135-165	0

Стандартная технология производства ЭИС марки М400-50А предусматривает применение подката с содержанием углерода до 0,06 % (обезуглероживание происходит на стадии термической обработки в конечной толщине проката) и высоким содержанием кремния до 2,5 % и не позволяет достичь требуемого уровня магнитных и механических свойств.

Применение металла с вакуумным обезуглероживанием (содержание углерода до 0,005 %), а также корректировки по химическому составу (в частности по содержанию кремния, алюминия, фосфора и микролегирование оловом) и режиму термической обработки позволили обеспечить требуемый уровень свойств – удельные магнитные потери $P_{1,5/50} = 3,15-3,50$ Вт/кг, твердость HV₅ = 142-150.

На начальном этапе отработки технологии при достижении требуемого уровня магнитных и механических свойств при проведении рекристаллизационного отжига отжиге в сухой атмосфере были отмечены случаи получения неудовлетворительной адгезии по EN 13523-6 – балл по решетчатому надрезу достигал 2. В связи с этим, был разработан режим термической обработки, предусматривающий подачу увлажненной защитной азотоводородной атмосферы на части цикла отжига. Внесенные изменения позволили устранить проблемы с адгезией электроизоляционного покрытия (балл 0 по EN 13523-6).

Разработанная технология производства обеспечивает получение ЭИС марки М400-50А на уровне ведущих зарубежных производителей с выполнением полного комплекса дополнительных требований, соответствующих ожиданиям потребителей.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Исаенкова М.Г.¹, Крымская О.А.¹, Минушкин Р.А.¹, Романова Ю.А.¹,
Данилов С.В.²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Россия

²R&D ПАО НЛМК, Липецк, Россия

E-mail: MGIsaenkova@mephi.ru, OAKrymskaya@mephi.ru

Оптимизация кристаллографической текстуры, т.е. преимущественной ориентации зерен в листах ЭТС, является одним из способов снизить потери на перемагничивание. Т.к. кристаллографическим направлением легкого

намагничивания в сплавах на основе Fe является $\langle 001 \rangle$, наиболее благоприятной компонентой текстуры для изотропных в плоскости прокатки сталей является аксиальная компонента $\langle 001 \rangle \parallel \text{HN}$ – т.н. λ -волокно $\{001\} \langle 100-110 \rangle$.

Несмотря на то, что механизмы образования и эволюции текстуры в процессе как пластической деформации, так и отжига довольно хорошо изучены для ОЦК-металлов, добиться требуемых значений в рамках наиболее распространенной технологии прокатки довольно сложная задача, в том числе в силу влияния на технологический процесс большого количества факторов. В этой связи моделирование эволюции текстуры ЭТС в процессе прокатки с целью получения ее оптимальных параметров является актуальной задачей.

В данной работе модель эволюции текстуры Тейлора адаптирована применительно к ЭТС с учетом различного характера упрочнения систем скольжения разного типа. Исходными данными для расчета являются начальная текстура нормализованного листа, компоненты тензора пластических деформаций, а также направление прокатки (непрерывная или реверс). На первом этапе с помощью метода конечных элементов проведены расчеты тензоров пластических деформаций для различных вариантов прокатки, которые затем используются для расчета эволюции текстуры. Критические сдвиговые напряжения и характер упрочнения по различным системам скольжения получены из литературных источников, а также по результатам анализа неоднородности распределения наклепа на основе обобщенных прямых полюсных фигур (ОППФ), снятых на различных этапах прокатки.

Продемонстрированы результаты моделирования эволюции кристаллографической текстуры при холодной прокатке и одноосном растяжении листов из сплава Fe3Si1Al (мас.%) толщиной 2 мм. Проведено сравнение расчетных данных с результатами, полученными экспериментально.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СТАЛИ. ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИМЕТ РАН

Григорович К.В.

**Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН,
119334, Москва, Ленинский проспект 49**

E-mail: grigorov@imet.ac.ru

Увеличение производства и потребления энергии является важнейшим условием развития современной цивилизации. Мировое производство электроэнергии за последние тридцать лет выросло более, чем в два с половиной раза. По существующим оценкам, в магнитопроводах энергетического оборудования теряется до 7% от вырабатываемой в мире энергии, что представляет огромную величину - 15, - 1,7 млн. ГВт/год. Разработка и применение современных малозатратных магнитомягких материалов с пониженными удельными потерями является важнейшим направлением экономии энергии. Технологии производства электротехнических сталей являются одними из самых наукоемких. Несмотря на то, что составы кремнистых электротехнических сталей известны уже более ста лет, уровень магнитных потерь за последние полвека, уменьшился, например, в анизотропных сталях более чем в 5 раз. В докладе приведены перспективные направления совершенствования технологий производства электротехнических

сталей, представлены результаты работ, выполненных в лаборатории Диагностики материалов ИМЕТ РАН, посвященных данным проблемам.

В расплавах Fe-Si прямыми измерениями и термодинамическим расчетом определена растворимость кислорода в равновесии с SiO₂ в интервале концентраций от 0,1 до 100 масс. % кремния при 1873 К. Получены новые термодинамические данные, показано, что изотерма растворимости кислорода имеет как минимум, так и максимум при 20 и 85 масс.% Si, соответственно. Разработана методика фракционного газового анализа (ФГА) позволяющая с высокой точностью проводить количественный анализ и идентификацию оксидных включений в образцах электротехнических сталей.

Представлены результаты исследований окисленного слоя образцов анизотропной электротехнической стали, легированной кремнием, в различной атмосфере в температурном интервале 740 – 880 °С при различной выдержке. Рассмотрен фазовый состав сформированных оксидов на стали в исследуемом температурном интервале. Установлено, что в приповерхностной зоне формируются силикаты марганца, наличие которых контролирует процесс окисления стали. Разработана методика определения оксидных фаз в поверхностном слое стали.

Был проведен анализ технологии ковшевой обработки изотропной электротехнической стали с целью снижения общей загрязненности металла неметаллическими включениями. Были получены тройные диаграммы включений (нитрид-оксид-сульфид), и тройные диаграммы окислов, микрофотографии включений. Определены основные типы НВ и механизмы их образования и удаления.

Разработана математическая модель РН-вакууматора состоящая из нескольких подмоделей, моделирующих различные зоны взаимодействия. Было показано, что разработанное программное обеспечение корректно описывает процесс обезуглероживания металла в промышленном РН вакууматоре и позволяет прогнозировать эффективность использования технологических режимов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ СТАЛИ В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШАХ С МОДИФИКАТОРАМИ ПОТОКА НА СЛЯБОВЫХ МНЛЗ

Глебов В.П., Шипельников А.Н., Кононыхин Г.Н., Шестаков М.Е.

E-mail: glebov_vp@nlmk.com

Промежуточный ковш машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) принимает сталь из сталеразливочного ковша, обеспечивая её усреднение, рафинирование и дозирование в кристаллизаторы. Для оптимального выполнения основных функций промежуточный ковш должен иметь рациональную конструкцию внутреннего пространства, предусматривающую наличие модификаторов потока жидкой стали. Основная задача модификаторов потока заключается в создании условий, обеспечивающих всплытие неметаллических включений в шлаковый покров промежуточного ковша.

Многосложность влияния производственных параметров на конечное качество непрерывнолитых слэбов ограничивает применение «горячих экспериментов» и делает их малорентабельными. Для оптимизации этого процесса применили методы вычислительного эксперимента по моделированию процесса разлива с помощью

современных систем инженерного анализа, в частности, программного обеспечения «ANSYS Fluent».

Проведены исследования, направленные на дальнейшую оптимизацию конструкции модификаторов потока, оказывающих определяющее влияние на параметры движения потоков расплава в рабочем пространстве 50-тонного промежуточного ковша, для повышения качества слябов, отливаемых на МНЛЗ-4 и 6 Конверторного цеха №1 ПАО «НЛМК».

Исследовалось течение расплава и межфазного взаимодействия в промежуточном ковше, оборудованном модификаторами потока, как квазистационарное, была разработана трехмерная дискретная фазовая модель, учитывающая объемы жидких и газовых сред.

По результатам первого цикла моделирования движения стали в промежуточном ковше было сделано заключение, что применение различных модификаторов потока оказывает совершенно разное воздействие на гидродинамику ванны, которая характеризуется массопереносом от центрального потока к объему стали в разливочной камере, количеством и расположением «застойных зон», направлением и скоростью движения преимущественных потоков стали.

Промежуточный ковш с турбостопом и порогами высотой 300 мм, расположенными от оси стопоров на расстоянии 1,0 м, по изменениям концентрации «трейсеров», наличию «застойных зон», распределению скоростей и характеру потоков оказался одним из лучших вариантов компоновки.

В 2023-2024 гг. проведено опытное испытание предложенной схемы модификаторов потока в промежуточных ковшах МНЛЗ-4, 6 при разливке различных марок стали, в том числе для производства холоднокатаного проката.

В результате применения предложенной схемы получено улучшение качества холоднокатаного проката со снижением выхода несоответствующей продукции по дефекту сталеплавильного происхождения - «плена, раскатанное загрязнение».

Наряду с этим остаётся открытым вопрос по использованию другого перспективного модификатора - «продувочных балок», применение которых, в том числе при производстве электротехнической стали, потребует дополнительных исследований и подбора теплоизолирующих смесей.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ КОВШЕВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ

**Жемков А.А.^а Морозов А.О.^а Ем А.Ю.^а Румянцева С.Б., Демин К.Ю.,
Комолова О.А.^а Дагман А.И.^б, Григорович К.В.^а**

**^аИнститут металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН,
119334, Москва, Ленинский проспект 49**

**^бПАО «НЛМК», 398040, Россия, г. Липецк, пл. Металлургов, д.2
E-mail: zhemkov96@mail.ru**

В работе был проведен анализ технологии ковшевой обработки изотропной электротехнической стали. Целью данной работы являлось снижение общей загрязненности металла неметаллическими включениями (НВ).

Методом фракционного газового анализа (ФГА) определяли количество оксидных неметаллических включений содержащихся в пробах металла, отобранных на основных этапах ковшевой обработки изотропной стали- на

циркуляционном вакууматоре (АЦВ), установке доводки металла (УДМ), из промежуточного ковша, от непрерывно литая заготовка (НЛЗ) и горячекатаного листа. Для электронно-микронного исследования и определения химического состава неметаллических включений были изготовлены металлографические шлифы. Исследования выполняли на электронно-зондовом микроанализаторе Jeol JXA-iSP100, оснащенного детекторами вторичных (SED), и обратно-рассеянных (BED-C), а так же детекторами характеристического рентгеновского излучения энерго-дисперсионным (ЭДС) и волно-дисперсионными спектрометрами (ВДС).

В качестве результатов исследований были получены тройные диаграммы природы включений (нитрид-оксид-сульфид), тройные диаграммы окислов с вершинами Al_2O_3 -($CaO+MgO$)- SiO_2 , микрофотографии включений при различном увеличении, карты интенсивностей распределения элементов в характеристическом рентгеновском излучении. Было показано, что на этапе АЦВ основным типом неметаллических включений являются оксиды на основе алюминия, на этапе УДМ, после ввода кальция происходит активное образование сульфидов кальция и модифицирование оксидных включений из алюминатов в алюминаты кальция. Основными типами неметаллических включений на этапах сляб и лист являются оксинитриды алюминия по типу $(AlN)_x(Al_2O_3)_{1-x}$, с незначительным количеством сульфидов, причем доля сульфидов в центральной части сляба оказалась значительно выше, по отношению к периферийным частям сляба.

Результаты исследований методом ФГА показали, что кислород содержится в чейрех основных типах НВ: в силикатах, оксинитридах, алюминатах и шпинелях. В пробах металла, отобранных с этапов ковшевой обработки, методом электронной микроскопии были обнаружены крупные оксидные неметаллические включения и плёны.

После проведения опытных плавов с учетом корректировки технологии был проведен анализ металла аналогично отобранных проб. Методом электронной микроскопии в отобранных пробах были обнаружены неметаллических включений аналогичные тем, что были в пробах плавов до введения корректирующих действий. Метод ФГА показал снижение загрязненности оксидными НВ в пробах, отобранных от НЛЗ.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Еремин Г.Н., Парахин В.И.

ГНЦ ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина», Москва, Россия

E-mail: Eremin_gn@chermet.net, viparahin@chermet.net

Экспертные оценки предполагают в течение ближайших лет многократный рост электроэнергетического рынка в связи с развитием производства электрического пассажирского и грузового автотранспорта, беспилотных летающих аппаратов, накопителей электроэнергии для регулирования нагрузок в электросетях при генерировании и распределении электроэнергии и т.д.

Это, в свою очередь, предполагает рост производства и применения высокоэффективных марок электротехнических сталей и сплавов при изготовлении трансформаторов и электрических двигателей различного назначения.

Система достигнутых в нашей стране знаний и уровень научных разработок позволяет традиционно производить электротехническую сталь без использования зарубежных лицензий и обеспечивать технологический суверенитет в этой области.

В производстве высококачественных электротехнических анизотропных сталей (с высокой магнитной индукцией и низкими удельными магнитными потерями) хорошо зарекомендовала себя технология производства таких сталей с применением метода приобретенного ингибитора, включая химико-термическую обработку готового проката.

В производстве электротехнической изотропной стали прогрессивным направлением является переход от производства не текстурированного холоднокатаного проката к производству проката с регламентированной кристаллографической текстурой (кубическая плоскостная и двунаправленная текстура), что кардинально улучшает магнитные характеристик изотропных сталей.

Среди перспективных направлений производства электротехнических сталей и сплавов необходимо отметить развитие производства аморфных и нанокристаллических лент для высокоэффективных силовых трансформаторов и электрических машин, с еще более низким уровнем магнитных потерь.

Для развития нормативно – технической базы современного производства электротехнических сталей разработаны межгосударственные и национальные государственные стандарты, гармонизированные с международными стандартами на холоднокатаный прокат из электротехнической анизотропной и изотропной стали обычного качества, с высокой магнитной индукцией, а также – для этих сталей с их использованием в средних частотах для высокоэффективных магнитных сердечников.

УЛУЧШЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СТАЛИ ЗА СЧЕТ СВЕРХБЫСТРОГО НАГРЕВА ПЕРЕД ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАЮЩИМ ОТЖИГОМ

Редикульцев А.А.^{а,б}, Каренина Л.С.^а

**^аНоволипецкий металлургический комбинат, 398040, Липецк, площадь
Металлургов, 2**

E-mail: redikultsev_aa@nlmk.com

**^бУрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002, г.
Екатеринбург, ул. Мира 19**

Для электротехнической анизотропной стали (ЭАС) нитридно-медного варианта производства проведены исследования влияния сверхбыстрого (индукционного) нагрева полосы (скорость более 100 °C/c) после первой холодной прокатки перед рекристаллизационно-обезуглероживающим отжигом на магнитные свойства готового продукта.

Показано [1], что относительно образцов сравнения, сверхбыстрый нагрев до температур 760-900°C приводит после рекристаллизационно-обезуглероживающего отжига к увеличению среднего размера ферритного зерна. Для всех температур

сверхбыстрого нагрева на опытном металле получен идентичный набор текстурных компонент с рядом характерных особенностей (рис. 1) по отношению к металлу сравнения: 1) повышенная доля совершенной компоненты $\{110\}\langle 001 \rangle$ (значения ФРО увеличиваются с 1.3 до 2.3); 2) пониженная доля компоненты $\{111\}\langle 112 \rangle$ (значения ФРО уменьшаются с 2.7 до 1.9).

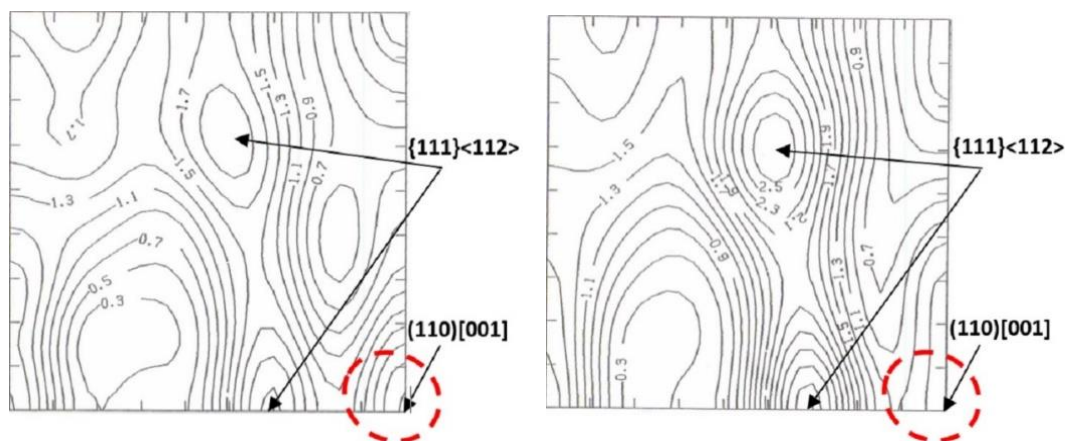


Рис. 1 Изменение текстуры стали после обезуглероживающего отжига при толщине полосы 0,65 мм (ФРО по Роэ, сечение $\Phi=45^\circ$, $1/8$ толщины полосы) [1]
а – сверхбыстрый нагрев до 840°C ; б – металл сравнения

В готовом продукте, прошедшем вторичную рекристаллизацию, наблюдается уменьшение среднего размера макрозерна в 1,5 раза ($s \sim 9$ до ~ 6 мм) и уменьшение среднего угла отклонения осей легкого намагничивания $\langle 001 \rangle$ от направления прокатки с $\sim 7^\circ$ до $\sim 6^\circ$. Магнитные свойства исследованного материала во всех случаях превосходят уровень свойств металла сравнения. Влияние сверхбыстрого нагрева на текстурные преобразования в сплаве объяснены различными местами зарождения зерен разных ориентировок при первичной рекристаллизации. Результаты работы внедрены в промышленное производство ЭАС группы НЛМК.

1. Редикульцев А.А., Акулов С.В., Каренина Л.С., Первушина О.В., Минеев Ф.В. Влияние сверхбыстрого нагрева перед обезуглероживающим отжигом на структурные превращения и свойства технического сплава Fe-3%Si // Физика металлов и металловедение, 2020. Т. 121. № 10. С. 1101-1108.

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАГНИТНО-МЯГКОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Fe-Co

Соснин В.В., Магдиев К.Д., Зимичев А.М.
ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», Москва, Россия
E-mail: kamilx@mail.ru

Сплавы системы Fe-Co эквиатомного состава имеют наивысшие значения индукции насыщения среди других магнитно-мягких сплавов. Применение этих сплавов даст возможность изготовления электрогенераторов и двигателей с высокой

удельной мощностью. Для изготовления электромашин был разработан сплав 49К2Ф, имеющий значения индукции магнитного насыщения до 2,4Тл и низкий уровень удельных потерь на перемагничивание.

Однако применение сплава 49К2Ф с пределом текучести $\sigma_{0,2}$ не более 350 МПа имеет ограничение по возможности увеличения скорости вращения ротора.

Повышение прочности конструкционных сплавов обычно достигается за счет твердорастворного, дислокационного, дисперсионного, зернограницного и субструктурного механизма упрочнения. В данном случае возможности упрочнения ограничивается требованием необходимости сохранения высокого уровня магнитных свойств.

С целью повышения механических свойств при сохранении однофазного состояния базового сплава Co-Fe-V опробовано легирование элементами, способствующими образованию упрочняющей дисперсных фаз. Также исследовали возможность улучшения прочностных характеристик сплава за счет получения более мелкозернистой структуры при снижении температуры рекристаллизационного отжига на образцах тройного Fe-Co-V и легированных сплавов.

Исследование свойств образцов показало, что снижение температуры отжига менее 780°C ведет к уменьшению размера зерна и снижению значений магнитной индукции в малых и средних полях и значительному возрастанию коэрцитивной силы.

Легирование тройного сплава элементами, способствующими образованию дисперсных фаз, приводит к значительному измельчению среднего размера зерна, а коэрцитивная сила образцов возрастает более 1000А/м.

На основе данных измерения магнитных свойств из всех опытных сплавов была определена группа сплавов, сочетающая достаточно высокий уровень магнитной индукции и значения предела текучести $\sigma_{0,2}$ до 750-850 МПа, которые вызывают практический интерес в части применения для изготовления магнитопроводов электромашин.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ТЕРМООБРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ 11895

Давыдов Д.И., Василенко О.Н.

**Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения
Российской академии наук, г. Екатеринбург, РФ
E-mail: davidov@imp.uran.ru**

Электротехническая сталь по своим магнитным свойствам относится к магнитомягким материалам и представляет собой сплав железа с углеродом. Основным свойством данной стали является способность легко намагничиваться до насыщения в слабых магнитных полях, благодаря чему сталь обладает высокими значениями начальной и максимальной магнитной проницаемости, низким значением коэрцитивной силы и, как следствие, имеет узкую петлю гистерезиса с малыми потерями на перемагничивание.

Широкое применение магнитомягких материалов в электромашиностроении и радиоприборостроении ставит перед промышленностью ряд задач, главной из

которых является повышение качества и надежности устройств, изготовленных на их основе.

Значения магнитных характеристик изделий, изготовленных из электротехнической стали, достигаются на конечной стадии производства деталей путем соответствующей вакуумной термообработки. На завершающей стадии производства деталей для магнитных цепей подвергаются процессу отжига в вакууме. Отжиг устраняет изменения в структуре стали, вызванные механической обработкой и снимает внутренние механические напряжения, что приводит к изменению магнитных свойств, в частности, к уменьшению коэрцитивной силы H_c до требуемых значений (60 – 95 А/м).

В ГОСТ 11036-75 даны только общие требования к процессу отжига всей номенклатуры марок электротехнических сталей, но химический состав каждой из марок стали является индивидуальным. Каждая марка стали должна проходить процесс вакуумной термообработки по индивидуальному режиму.

Сталь 11895 является электротехнической нелегированной сталью, широко применяется для изготовления деталей магнитных цепей электрических аппаратов и других изделий.

Проведено исследование с целью подбора оптимального режима термообработки, а именно, отжига в вакууме, с целью получения магнитных характеристик изделий из стали 11895 в соответствии с ГОСТ 11036-75. Магнитные свойства контрольных образцов определены при измерении как в открытой (магнитометрическая установка), так и в замкнутой магнитной цепи на кольцевых контрольных образцах (установка Remagraph C-500).

В результате проведенных исследований удалось подобрать оптимальный режим ступенчатой термообработки (температура отжига, время выдержки, необходимая скорость нагрева и охлаждения), обеспечивающий необходимые магнитные свойства изделий из стали 11895. В соответствии с ГОСТ 11036-75 значения коэрцитивной силы контрольных образцов, измеренные в замкнутой магнитной цепи (свойства вещества), не превышают 95 А/м.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Аддитивность», № 121102900049-1).

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРНОЙ РЕЛАКСАЦИИ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АМОРФНОЙ ФАЗЫ НА ИНДУКЦИЮ НАСЫЩЕНИЯ ЛЕНТ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Fe-Co-Si-B

**Колотовкин Н.Ю., Могильников П.С., Соснин В.В.
НИТУ МИСИС, ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва,
Россия
E-mail: njkolotovkin@gmail.com**

В работе рассматривается влияние температуры и длительности отжига на индукцию насыщения B_s образцов лент сплавов $(FeCo)_{82}SiB$ и $(FeCo)_{82}SiBP$. Показано, что после закалки из расплава образцы имеют аморфную структуру, что подтверждено данными дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеновской дифрактометрии. Методами ДСК были определены характерные температуры

кристаллизации аморфной фазы, составившие для сплава $(\text{FeCo})_{82}\text{SiB}$ $T_{x1} = 390^\circ\text{C}$ и $T_{x2} = 520^\circ\text{C}$; для сплава $(\text{FeCo})_{82}\text{SiBP}$ $T_{x1} = 410^\circ\text{C}$ и $T_{x2} = 540^\circ\text{C}$ соответственно, при которых проводилась серия отжигов длительностью 1, 10 и 100 минут.

Методом рентгеновской дифрактометрии установлено структурное состояние после каждого отжига. Дифракционные спектры отожженных образцов соответствуют теоретической картине двухстадийной кристаллизации. При температурах отжига ниже T_{x1} показано образование ферромагнитной фазы FeCo (ср2/1), наличие которой может обуславливать рост магнитных свойств. Методом просвечивающей электронной микроскопии показана закономерность процессов кристаллизации аморфной фазы при отжигах. Установлено, что минутный отжиг приводит к образованию аморфной и нанокристаллической фазы. Средний размер нанокристаллов составил 95 нм и 79 нм для сплавов $(\text{FeCo})_{82}\text{SiB}$ и $(\text{FeCo})_{82}\text{SiBP}$, соответственно.

Показано, что отжиги при T_{x2} приводят к увеличению индукции насыщения B_s изученных образцов в сравнении с исходным состоянием. Величина B_s после минутного отжига при температуре T_{x2} составила 2,1 и 1,9 Тл для сплавов $(\text{FeCo})_{82}\text{SiB}$ и $(\text{FeCo})_{82}\text{SiBP}$, соответственно.

УПРАВЛЕНИЕ КОНЕЧНЫМИ СВОЙСТВАМИ ПРОДУКТА С ПОМОЩЬЮ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ

Цыганов И.А., Юров В.В.

**ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»,
Липецк, Россия**

E-mail: zyganov.igor@gmail.com, vladyuroff@yandex.ru

Электротехническая изотропная (динамная) сталь (ЭИС) – магнитомягкий материал, из которого в зависимости от содержания кремния производятся магнитопроводы генераторов, электромашин, небольших трансформаторов, реле, дросселей. В общем мировом производстве электротехнических сталей ЭИС занимает около 80%. ЭИС – это металлургический продукт с высокой добавленной стоимостью, производство которого состоит из многих технологических операций, главными из которых являются выплавка, горячая и холодная прокатка, а также различные виды термической обработки, такие как нормализация, обезуглероживающе-рекристаллизационный отжиг и др.

Основные требования к ЭИС можно сформулировать следующим образом: минимальные потери энергии на перемагничивание; магнитомягкость (высокая магнитная проницаемость и малые потери на гистерезис); высокий уровень индукции насыщения; низкая анизотропия магнитных свойств вдоль и поперёк направления прокатки.

Общие магнитные потери $P_{\text{общ}}$ при перемагничивании складываются из потерь на гистерезис P_H , потерь на вихревые токи P_E и аномальных потерь P_A :

$$P_{\text{общ}} = P_H + P_E + P_A$$

В соответствии с диаграммой Курнакова (состав-структура-свойства) на конечные магнитные свойства ЭИС основное воздействие оказывает ее микроструктура, которую можно регулировать с помощью химического состава и большого числа производственных параметров. При этом химический состав ЭИС влияет на каждую из трех составляющих общих потерь и требует строгой регламентации.

Основными структурными факторами, которые влияют на уровень удельных магнитных потерь, величину магнитной индукции и изотропность готовой ЭИС, и формируются в процессе технологической обработки, являются: характеристика доменов, текстура, величина зерна и разнотекстурность, наличие неметаллических включений и внутренних напряжений в матрице, а также состояние поверхности полосы.

В настоящее время в мире ведется интенсивная разработка промышленной технологии воспроизводства идеальной текстуры ЭИС, характеризующейся максимальной долей зерен с разнотекстурными ребровыми (110) и кубическими (100) ориентировками. Важную роль играет подбор режима рекристаллизационного отжига ЭИС, при котором создаются условия для роста зерен кубической ориентировки {100} и ограничения роста неблагоприятно ориентированных зерен в процессе вторичной рекристаллизации. Микролегирование стали сегрегирующими по границам зерен элементами, такими как сурьма, олово и фосфор также способствует формированию благоприятной кубической текстуры при заключительном отжиге.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КРЕМНИЯ В ОБРАЗЦАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

Лепилина М.Ю., Якубенко Е.В., Ильясов Р.Р., Орехова Ю.Н.

ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», г. Липецк, Россия

E-mail: lepilina_my@nlmk.com

Электротехнические стали (ЭТС) используют при изготовлении электрооборудования - генераторов и электродвигателей. Магнитные свойства ЭТС как правило обеспечиваются за счет легирования комплексом элементов, основным из которых является кремний (0,8 - 4,5 %), концентрация которого влияет на формирование электроизоляционного покрытия. Традиционно для оценки качества проката ЭТС с покрытием применяют оптическую или электронную микроскопию. Снизить продолжительность проведения исследований (за счет исключения трудоемких стадий приготовления металлографических шлифов) без потери точности определения концентрации элементов в покрытии и стальном прокате позволяет метод атомно-эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда (АЭС ТР).

В работе использовали атомно-эмиссионный спектрометр тлеющего разряда GD Profiler-2 (Horiba Scientific, Франция) и сканирующий электронный микроскоп серии MIRA3 («TESCAN», Чехия) с ЭДС детектором для рентгеноспектрального микроанализа модели ULTIM MAX («OXFORD Instruments», Англия). Оценку равномерности катодного распыления стандартных образцов проводили с применением профилометра (HOMMEL ETAMIC T8000, Германия).

Разработка способа АЭС ТР анализа ЭТС, в том числе с нанесенным грунтовым слоем и ЭИП фосфатного типа состояла из трех основных этапов: выбора рабочих параметров плазмы, построения градуировочного графика, статистической оценки правильности определения концентрации.

На первом этапе установлена равномерность распыления образца при давлении 850 Па, мощности 100 Вт с частотой 400 Гц низкотемпературной аргонной плазмы. На втором этапе с применением монолитных стандартных образцов (СО) стали осуществлять построение градуировочных графиков зависимости интенсивности излучения от концентрации кремния с учетом относительной скорости распыления. Показано улучшение прецизионности анализа за счет применения взвешенного метода наименьших квадратов (МНК). Подтверждена целесообразность устранения мешающего влияния Рb путем внесения свободного члена коррекции в уравнение градуировки в ПО. Установлено, что для определения концентрации кремния свыше 3% методом экстраполяции необходимо применять полиномиальное уравнение второго порядка градуировочного графика.

Проверку правильности определения концентрации кремния проводили на третьем этапе. Тестовой статистикой Стьюдента подтверждено отсутствие систематической погрешности АЭС ТР анализа и правильность результатов.

Показана возможность оценки концентрации ($\text{г/м}^2/\text{с}$) оксида кремния (IV), образующегося в поверхностном слое стали после обезуглероживающего отжига производственных образцов ЭТС на основе разработанного способа АЭС ТР анализа. Установлена хорошая согласованность результатов определения концентрации оксида кремния (IV) методом АЭС ТР и сканирующей электронной микроскопии с коэффициентом детерминации $R^2=0,8645$.

СТРУКТУРНО-ТЕКСТУРНАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ

Лобанов М.Л.^{а, б}, Редикульцев А.А.^{а, б}, Сацкий Д.Д.^{а, б}

**^аНоволипецкий металлургический комбинат, 398040, Липецк, площадь
Металлургов, 2**

E-mail: lobanov_ml@nlmk.com

**^бУрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002, г.
Екатеринбург, ул. Мира 19**

E-mail: m.l.lobanov@urfu.ru

Преобразование структуры металлических материалов при деформационных и термических воздействиях в процессе производства полуфабрикатов и изделий происходит в соответствии с законами структурно-текстурной наследственности (СТН). В работе на основе гипотезы о высокой подвижности специальных границ, включая границы решетки совпадающих узлов, предложен механизм СТН в электротехнической анизотропной стали (ЭАС).

Проанализировано как на этапах промышленного производства ЭАС от горячей прокатки до высокотемпературного отжига при процессах деформаций и рекристаллизаций происходит эволюция основных кристаллографических ориентировок (рис. 1). Специальные разориентации-специальные границы возникают между основными ориентировками и эволюционируют вместе с ними.

Сформулирована гипотеза о роли ингибиторной фазы в процессе ВР для различных вариантов производства ЭАС [1, 2].

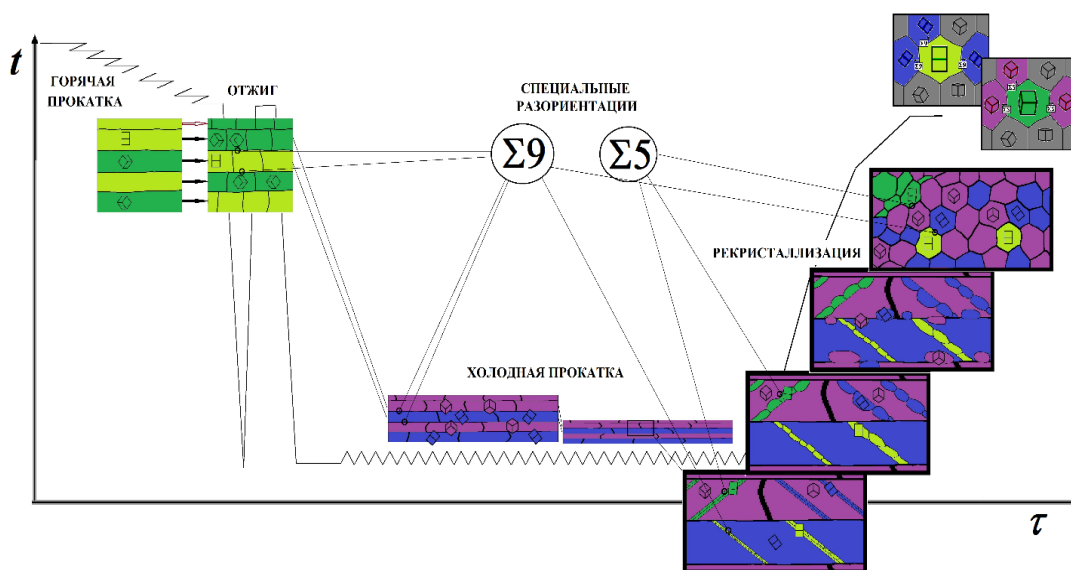


Рис. 1 Схема формирования ориентировок вторичной рекристаллизации в ЭАС от горячей прокатки до высокотемпературного отжига

1. Лобанов М.Л., Русаков Г.М., Редикульцев А.А. Электротехническая анизотропная сталь. Часть I. История развития // Металловедение и термическая обработка металлов. 2011. №7. С. 18-25.

2. Лобанов М. Л., Редикульцев А. А., Зорина М. А. Металлофизика материалов для электромашиностроения: учебное пособие / Мин-во науки и высшего образования РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 144 с.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ И ДРУГИХ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ В ИФМ УРО РАН

Милютин В.А.*, Гервасьева И.В., Драгошанский Ю.Н.
Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург,
Россия

*E-mail: milyutin@imp.uran.ru

Магнитомягкие материалы играют ключевую роль в преобразовании энергии. По мере общемирового и внутрироссийского роста энергопотребления спрос на такие материалы растёт. Кроме того, развитие новых направлений их использования (электрический транспорт, носимая электроника и интернет вещей), а также стремление к миниатюризации и энергосбережению стимулирует разработку и исследование новых магнитомягких материалов и способов их обработки для обеспечения требуемого уровня функциональных характеристик.

Уже много десятилетий лидером по объему производства и использования среди магнитомягких материалов является электротехническая за счёт сочетания хороших функциональных свойств, низкой стоимости и возможности производства тонких листов из неё в промышленных масштабах. Большой вклад в развитие понимания процессов формирования структуры и свойств в Fe-Si внесли учёные из ИФМ УрО РАН, где в 60-х годах прошлого века была создана группа трансформаторной стали под руководством Б.К. Соколова. Позднее, в 1986 году группа стала основой созданной лаборатории магнитомягких материалов, которая в дальнейшем (2001 г.) получила свою текущее название - лаборатория микромагнетизма. Группой, а в дальнейшем и лабораторией, в которую помимо Б.К. Соколова входили В.В. Губернаторов, И.В. Гервасьева, Ю.Н. Драгошанский, Т.С. Сычева, В.Ф. Тиунов, Б.Н. Филиппов и другие был получен ряд важных научных и прикладных результатов в области электротехнической стали, которые представлены в виде научных статей, патентов и авторских свидетельств. В частности, подробно исследованы особенности формирования доменной структуры при различных внешних воздействиях и её влияние на магнитные свойства анизотропной электротехнической стали [1]. Существенный вклад был внесён в развитие понимания процессов эволюции кристаллографической текстуры и в разработку способов её улучшения [2]. Например, впервые в стране и в мире в группе научились регулировать размер и форму зерна в анизотропной электротехнической стали.

В последние годы, помимо электротехнической стали, в лаборатории ведется деятельность по разработке и исследованию других магнитомягких материалов, в частности сплавов типа фанмет с модифицированным химическим составом, магнитострикционных сплавов Fe-Ga, Fe-Al, Fe-Ge, магнитомягких композитов и других.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства Науки и Высшего Образования Российской Федерации (Шифр “Магнит”, номер 122021000034-9).

Список литературы

1. Драгошанский Ю.Н., Соколов Б.К., Управление доменной структурой как средство оптимизации магнитных свойств анизотропной электротехнической стали, Известия академии наук СССР. Серия физическая, Т. 53, 1989, С. 610-613.
2. Губернаторов В.В., Соколов Б.К., Гервасьева И.В., Владимиров Л.Р. О формировании полосовых структур в структурно-однородных материалах при деформации // Физическая мезомеханика. 1999. Т.2, № 1-2. С.157-162.

ПРОГРЕССИВНЫЕ СПОСОБЫ И ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ХОЛОДНОКАТАНОГО ПРОКАТА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ

Парахин В.И., Еремин Г.Н.

ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», Москва, Россия

E-mail: viparahin@chermet.net, Eremin_gn@chermet.net

Высокопроницаемая (с высокой магнитной индукцией) электротехническая анизотропная сталь (ЭАС) является одним из наиболее важных функциональных

материалов в электроэнергетике и широко используется для сердечника трансформаторов.

По сложившимся представлениям, нашедшим широкое практическое применение, основным путем получения совершенной кристаллографической текстуры (110) [001] и, как следствие, - исключительно высоких магнитных характеристик ЭАС, является использование процесса вторичной рекристаллизации при термической обработке холоднокатаного проката при наличии неметаллических включений (ингибиторов).

В настоящее время основной технологией производства такой стали стало использование низкотемпературного нагрева сляба при горячей прокатке (менее 1250°C) и метода «приобретенного ингибирования».

Технология с «приобретенным» образованием ингибитора, признанная в мире как прогрессивная, предполагает формирование двух типов ингибитора роста зерна, когда первичная («врожденная») фаза формируется в горячекатаном прокате за счет нитридов на основе азота и части кислоторастворимого алюминия, а вторичная («приобретенная») фаза формируется за счет азотирования во время химико-термической обработки (ХТО) холоднокатаного проката.

Исследования процесса азотирования для формирования «приобретенного» при химико-термической обработке (ХТО) холоднокатаного проката показывают, что обезуглероживание и нанесение термостойкого покрытия MgO является очень сложной технологией, которая ограничивается конструкцией технологического агрегата для ХТО, влияет на достигаемый уровень и стабильность магнитных характеристик готового проката ЭАС, является одним из критических моментов в производстве высокопроницаемой ЭАС.

Основной недостаток технологии – формирование неоднородности магнитных свойств по длине полосы, снижение эффективности ингибитора роста зерна перед вторичной рекристаллизацией в процессе окончательного отжига из-за нарушения оптимальных условий образования «приобретенного» ингибитора.

Направление развития исключительно высоких магнитных характеристик холоднокатаного проката электротехнической стали для магнитных сердечников электродвигателей с высоким КПД, в том числе для спроектированных форм сердечника двигателя (спллит - сердечников, линейных сердечников и т.п.), для которых неориентированные электротехнические стали (NOES) не подходят, сосредоточено в создании технологии производства «толстого» холоднокатаного проката с контролем ориентации кристаллов кристаллографической текстуры для кубической компоненты (100) [001]: изотропная плоскостная текстура (100) [OVW] и двунаправленная кубическая текстура (100) [001] для кардинального улучшения магнитных характеристик стали.

К основным факторам, которые используются при разработке научных принципов и промышленной технологии, способствующие возникновению кубической текстуры, относятся: высокая чистота стали по неметаллическим включения регламентированного химического состава, частичная замена кремния алюминием, дополнительные легирующие добавки, особенности текстурного и структурного состояния горячекатаного проката, высокая степень деформации полосы при однократной холодной прокатке, режим термической обработки холоднокатаного проката, при котором создаются условия для роста зерен кубической ориентировки {100}.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПЕЧЕЙ ОТЖИГА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ХОЛОДНОКАТАНЫХ ПОЛОС ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ

**Сафронов А.А., Каренина Л.С., Удовенко Н.П., Уваркин А.А., Курдюкова Н.И.,
Клименко Е.С.**

**ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», Липецк, Россия
E-mail: safronov_aa2@nlmk.com**

Электротехнические стали, представляющие собой сплав железа с кремнием (до 6,5% Si), получили широкое распространение как материалы для изготовления вращающихся магнитопроводов, низковольтной и высоковольтной аппаратуры, трансформаторов, электродвигателей, роторов, статоров и т.д. Одно из важнейших мест в этой группе по объему производства (~80%) занимает изотропная (динамная) электротехническая сталь (ЭИС).

В свете роста потребления динамной стали встает вопрос увеличения объемов производства. Одним из перспективных решений является реконструкция входного участка печей непрерывного отжига с установкой блоков индукционного нагрева, которые выполняют роль камеры нагрева и способны обеспечить увеличение температуры полосы до температур ~900°C за несколько секунд. Кинетика рекристаллизации при сверх-быстром нагреве в настоящее время исследуется многими авторами.

В данной работе проведено исследование на промышленных агрегатах непрерывного отжига (АНО) возможности применения индукционного нагрева для повышения производительности печей за счет увеличения скорости обработки на 2-4 м/мин. Скорость нагрева ~200°C/сек. Нагрев производили до температур 700, 750, 800, 850 и 900 °С. Дальнейшую термическую обработку проводили сразу в АНО в азото-водородной среде с применением обезуглероживания для невакуумированной ЭИС 2-ой группы легирования и без обезуглероживания - для вакуумированной ЭИС 4-ой группы легирования.

Для опытной стали 2-ой группы легирования средний размер зерна ниже, чем для стали сравнения на 27-38 мкм. Вероятно, снижение среднего размера зерна связано с повышенным содержанием углерода ~0,02-0,04%, что позволяет сдерживать нормальный рост зерна, а применение сверх быстрого нагрева позволяет интенсифицировать рекристаллизацию. При этом удельные магнитные потери ухудшились на 5% относительно стандартного металла.

Опытная вакуумированная ЭИС 4-ой группы легирования и сталь, произведенная по стандартной технологии, имеют сравнимый уровень средних удельных магнитных потерь и магнитной индукции до температур 750°C в толщине 0,35 мм (далее происходит ухудшение анизотропии удельных магнитных потерь) и на всем опытном промежутке 700-900°C в толщине 0,27 мм, что говорит о возможности применения индукционного нагрева без значимого ухудшения свойств.

По результатам анализа текстуры ЭИС после обезуглероживающе-рекристаллизационного отжига установлена закономерность повышения плотности благоприятной компоненты Госсса, а также снижения неблагоприятных ориентировок α^* - волокна вследствие увеличения температуры нагрева. Это говорит о влиянии индукционной обработки на текстурное состояние стали через установленный в работе механизм, суть которого заключается в интенсификации и повышении доли острой текстурной компоненты $\{110\}\langle 001 \rangle$, а также в снижении негативной компоненты α^* - волокна.

ИССЛЕДОВАНИЕ И КОРРЕКТИРОВКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ОСОБОНИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ КРЕМНИСТОЙ СТАЛИ

Тимохин А.С.¹, Долгих Ю.Н.¹, Дагман А.И.¹, Комолова О.А.², Григорович К.В.²

**¹ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», 398040, г. Липецк, пл.
Металлургов, д.2,**

**²ФГБУН ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, 119334, г. Москва, Ленинский
проспект, 49**

Технология производство особонизкоуглеродистой кремнистой стали является одной из наиболее сложных, требующая использования всех агрегатов внепечной обработки, для одновременного достижения низких значений массовых долей углерода и серы за ограниченный промежуток времени.

В промышленных условиях реализована технология, позволяющая достигать целевых значений массовых долей углерода и серы. Процесс включает в себя десульфурацию чугуна, продувку металла кислородом в конвертере, выпуск полупродукта в сталеразливочный ковш с отдачей твердой шлаковой смеси и ферросплавов, внепечную обработку на агрегатах печь-ковш, циркуляционном вакууматоре, установке доводки металла с конечным модифицированием неметаллических включением кальциевыми материалами и дальнейшую передачу металла на установку непрерывной разливки стали.

На каждом этапе производства особо-низкоуглеродистой кремнистой стали имеются ключевые параметры, влияющие на достижение массовых долей углерода и серы, а также на образование неметаллических включений. Важной задачей является выявление «точек» коренным образом влияющих: на достижение минимальных значений массовой доли углерода в процессе обезуглероживания, прирост массовой доли углерода после обезуглероживания, степень десульфурации, образование неметаллических включений и возможности их перевода в рафинирующий шлак для обеспечения качества литых заготовок.

В работе был проведен статистический анализ массива данных промышленных плавок особо низкоуглеродистой кремнистой стали. Основным агрегатом, от которого зависит вся дальнейшая обработка металла, является конвертер. Достижимый уровень массовой доли углерода после продувки металла в конвертере позволяет проводить обезуглероживание на АЦВ по рациональному режиму, с достижением требуемых значений углерода в готовой стали. Стратегия обеспечения низкого уровня массовой доли серы в готовой стали нацелена на достижение требуемого значения по результатам процессов десульфурации чугуна и десульфурации стали на участке внепечной обработки стали. Параллельно анализу технологических параметров производился анализ проб отобранного металла на этих плавках. Методом фракционного газового анализа определяли количество оксидных неметаллических включений, содержащихся в пробах металла. Для электронно-микронного исследования и определения химического состава неметаллических включений были изготовлены металлографические шлифы. Исследования выполняли на электронно-зондовом микроанализаторе, оснащенного детекторами вторичных, и обратно-рассеянных, а также детекторами характеристического рентгеновского излучения энерго-дисперсионным и волно-дисперсионными спектрометрами.

Проведен анализ по исследованию: оптимального соотношения начальных массовых долей кислорода и углерода для обеспечения минимального значения массовой доли углерода после процесса обезуглероживания, влиянию времени и

режима продувки на УДМ на прирост массовой доли углерода за время обработки, изменению состава шлака за счет отдачи новых видов шлакообразующих материалов с целью улучшения его свойств по воздействию на футеровку и рафинирования металла, операций технологического процесса во время которых происходит образование неметаллических включений, определен их тип и количество.

По результатам работы определены мероприятия по дальнейшему совершенствованию производства особонизкоуглеродистой кремнистой стали в промышленных условиях.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В РУЧЬЕ ПРИ РАЗЛИВКЕ СЛЯБОВ НА МНЛЗ

Кононыхин Г.Н., Дагман А.И., Калистратов Д.А., Глебов В.П.
E-mail: Kononyhin_gn@nlmk.com

Электромагнитное перемешивание SEMS (strand electromagnetic stirring) широко применяется при непрерывной разливке сортовых заготовок и тонких слябов, при этом продолжают различные исследования с целью понимания механизмов его влияния на потоки жидкой стали для конечного контроля структуры литого металла.

На Новолипецком металлургическом комбинате реализован проект по оснащению слябовой МНЛЗ, которая специализируется на разливке электротехнических марок стали, системой электромагнитного перемешивания в зоне вторичного охлаждения непрерывнолитого слитка. Основной техникой эффект в литом металле от применения системы заключается в формировании целевой структуры в процессе разливки с меньшей протяженностью столбчатых кристаллов, а также перераспределении неметаллических включений равномерно по объему слитка.

Для описания процесса перемешивания и его особенностей были разработаны геометрическая и конечно-элементная физико-математическая модель воздействия SEMS на жидкую фазу при разливке слябов сечением 250 x 1850 мм.

Результаты показали, что под действием одностороннего движущегося магнитного поля, индуцированного SEMS, возникают три области рециркуляционного потока, размеры и скорость которых зависят от параметров перемешивания.

Варианты с разнонаправленными электромагнитными силами обеспечивают стабильный вращательный контур, который не требует реверсирования, в отличие от однонаправленных режимов, которые вызывают более протяженный, но асимметричный характер потоков (требуется чередование направления для предотвращения образования асимметричной структуры сляба).

Скорость металла в зоне SEMS достигает до 0,6 м/с, что способствует увеличению области равноосных кристаллов с 20 до 50 % без образования явления обратной ликвации.

Анализ рассчитанных параметров SEMS показывает, что повышение фазного тока с 250 А до 400 А приводит к увеличению горизонтальных сил на 30% и увеличению потребляемой мощности более чем в два раза.

Рекомендуется альтернативное расположение роликов SEMS, при котором электромагнитные силы в слэбе возрастают примерно на 40%, при этом ширина зоны интенсивного перемешивания увеличивается примерно более чем в 2 раза, что должно приводить к более интенсивному перемешиванию.

Авторами продолжено исследование влияния SEMS на качество литой заготовки, в частности выполняется исследование характера распределения неметаллических включений по сечению слитка на различном марочном сорimente.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ И СТРУКТУРЫ ВТОРИЧНОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВЫСОКОПРОНИЦАЕМОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ

Ролдугина А. С.¹, Рязанов М.В.¹, Парахин В.И.²

¹ПАО НЛМК,

² ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

E-mail: rolduginaas@gmail.com

Известно, что на магнитные свойства электротехнической анизотропной стали (ЭАС) решающее влияние оказывают структура и кристаллографическая текстура материала, полученные на этапе окончательного высокотемпературного отжига при вторичной рекристаллизации, когда происходит аномальный рост зерен определенных текстурных компонент. Для получения ЭАС высокого качества (высокая магнитная индукция и особо низкие магнитные потери) необходимо, чтобы преимущество в аномальном росте имели зерна текстуры Госсса $\{110\}<001>$. Отклонения кристаллографической решетки от идеального положения текстуры Госсса, отвечающие за высокую индукцию и минимизацию потерь на перемагничивание в высокопроницаемой стали, определяются углами α , β , γ , которые описывают соответственно отклонение направления $<001>$ от направления прокатки в плоскости прокатки (α), отклонение направления $<001>$ от плоскости прокатки (β) и вращение плоскости $\{110\}$ вокруг направления прокатки (γ) [1].

Вместе с тем известно, что оценка углов α , β , γ является сложной методической задачей, поскольку требует очень высокой точности измерения углов отклонения кристаллографической решетки: в случае высокопроницаемой ЭАС отклонение по углам α , β , γ не должно превышать 3° , а это означает, что точность оценки данных углов должна находиться на уровне десятых долей градуса.

В настоящем исследовании разработана методика измерения «остроты» текстуры ЭАС методом EBSD после вторичной рекристаллизации, отличная от предлагаемой в работах, известных на эту тему [1, 2]. Разработанная методика позволяет с высокой точностью оценивать углы α , β , γ , и вместе с тем наблюдать и регистрировать структуру и текстуру ЭАС после вторичной рекристаллизации. Особенностью данной методики является минимизация систематических отклонений, вносимых в измеряемые углы на этапах пробоподготовки и съемки EBSD.

С использованием данной методики проведены измерения «остроты» текстуры образцов холоднокатаного проката ЭАС с различной толщиной после лабораторного моделирования высокотемпературного отжига.

1. Bernier N., Leunis E., Furtado C., Putte T., Ban G.. EBSD study of angular deviations from the Goss component in grain-oriented electrical steels //Micron. 2013.
2. Lee S., Kim S. Statistical analysis of misorientation to goss orientation of highly grain-oriented silicon steel // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2022. V. 560.

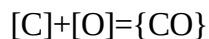
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В RH-ВАКУУМАТОРЕ

Комолова О.А., Григорович К.В.

**Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН,
119334, Москва, Ленинский проспект 49**

Современные требования к качеству готовой металлургической продукции определяют необходимость точного попадания в узкий диапазон заданного химического состава для конкретных марок стали. При этом необходимо контролировать и управлять процессом производства стали на каждом из этапов, начиная от расчета шихты до момента получения готовой продукции. Хорошими инструментами для анализа сквозной технологии производства стали являются современные программные комплексы для динамического моделирования металлургических процессов.

В процессе обработки металла на циркуляционном вакууматоре происходит интенсивное взаимодействие кислорода и углерода, растворенных в стали по реакции: (1



1

При понижении давления в вакуум-камере, равновесие реакции (1 смещается вправо. На скорость обезуглероживания оказывает существенное влияние величина площади реакционной поверхности металла в вакуум-камере. На реакционную поверхность металла оказывает влияние: разряжение в вакуум-камере, расход инертного газа, скорость окисления углерода, температура, химический состав и окисленность стали, геометрические размеры агрегата и т.д. Во время вакуумирования и продувки расплава аргонem, при больших концентрациях углерода и кислорода, происходит интенсивное образование пузырей CO. Наличие большого количества газовых пузырей в системе приводит к вспениванию металла, увеличению площади реакционной поверхности и, соответственно, увеличению скорости обезуглероживания.

Исходными данными для моделирования процесса обезуглероживания металла на циркуляционном вакууматоре являются: размеры вакуум-камеры и ковша, температура, масса и химический состав металла и шлака, окисленность металла, состав отходящих газов, расход кислорода, остаточное давление в вакуум-камере, расход лифт-газа, аргона на продувку.

Разработанная математическая модель RH-вакууматора состоит из нескольких подмоделей, моделирующих различные зоны взаимодействия. Математическая модель процесса обработки металла на циркуляционном вакууматоре характеризуется сложной системой взаимодействия фаз: жидкой, твердой и газовой.

На основании информации о процессе обезуглероживания промышленных плавок была проведена адаптация математической модели. Коэффициент корреляции расчетных и экспериментальных данных составляет 0,96.

Было показано, что разработанная математическая модель корректно описывает процесс обезуглероживания металла в промышленном РН вакууматоре в широком концентрационном диапазоне изменения содержания углерода в расплаве.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАИМЕНЬШИХ УДЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ ВЫСОКОПРОНИЦАЕМОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СТАЛИ

Шопин И.И.

ПАО НЛМК, г. Липецк, Россия

E-mail: Shopin_ii@nlmk.com

В настоящее время в НЛМК ведется разработка технологии производства премиальной электротехнической трансформаторной стали с высокой магнитной индукцией. Финальным этапом производства данной стали является рафинирование доменной структуры с помощью операции лазерного скрабирования.

Готовая трансформаторная сталь имеет крупнозернистую структуру (размер зерна ~100-102 мкм) и четко выраженную текстуру (текстура Госсса) ребра куба [001] (направление легкого намагничивания), совпадающее с направлением холодной прокатки, плоскость (110), совпадающую с плоскостью прокатки. Крупный размер зерна обеспечивает высокую индукцию готовой стали, но при этом увеличивается размер магнитного домена и увеличиваются удельные магнитные потери. Это техническое противоречие решается через нанесение лазером царапин на поверхности металла, которые разбивают доменную структуру на более мелкую.

Ключевыми параметрами обработки на данном этапе являются мощность лазера, шаг между лазерными царапинами и скорость обработки. В процессе проведения серии экспериментов на данном переделе, выяснилось, что важно подбирать режим лазерной обработки в зависимости от исходного уровня магнитных потерь. Это позволяет увеличить долю лучших марок в производимом сорimente электротехнической трансформаторной стали с высокой магнитной индукцией.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНДУСТРИИ 4.0 В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ

Шаталов Д.И., Юров В.В., Цыганов И.А.

ФГБОУ ВО «ЛГТУ», Липецк, Россия

E-mail: opt_den@bk.ru, vladuyuroff@yandex.ru, zyganov.igor@gmail.com

Электротехнические изотропные стали (ЭИС) являются важными материалами для современной энергетической отрасли. Они используются в сердечниках, роторах

и статорах электрических машин, работающих в динамических электромагнитных полях. Поэтому к ним предъявляются высокие требования по магнитным свойствам.

Для модернизации процесса производства высококачественной ЭИС необходимо внедрение передовых технологий, в качестве которых, помимо прочих, выступают технологии Индустрии 4.0. Они способствуют цифровой трансформации металлургической отрасли, повышению эффективности бизнес-процессов и улучшению экологической ситуации.

Одной из ключевых технологий Индустрии 4.0 является Интернет вещей (англ. Internet of Things, IoT). В контексте производства ЭИС он может использоваться для мониторинга и управления производственными процессами в режиме реального времени, что позволяет быстро реагировать на отклонения технологических параметров от нормы и принимать соответствующие меры для обеспечения высокого качества продукции.

Важной технологией Индустрии 4.0 выступает Искусственный интеллект (англ. Artificial Intelligence, AI). AI может использоваться для анализа больших объёмов данных, для предсказания возможных проблем и оптимизации процессов производства. Например, AI может анализировать данные о качестве сырья и процессе обработки, чтобы определить оптимальные параметры для производства высококачественной стали.

Связующим звеном между IoT и AI выступают технологии Big Data и облачных вычислений. Первые позволяют обрабатывать огромные объёмы данных и использовать их для принятия решений на основе фактов. Вторые предоставляют хранилище и вычислительные ресурсы для обработки больших объёмов данных и выполнения сложных задач. В конечном итоге это способствует улучшению качества продукции и снижению затрат на производство.

Не менее важными элементами Индустрии 4.0 являются автоматизация и роботизация. Они позволяют автоматизировать многие рутинные задачи, что повышает эффективность производства и снижает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором.

Технологии Индустрии 4.0 позволяют оптимизировать процессы производства, повысить эффективность и точность производственных операций, улучшить качество продукции и сократить издержки. Автоматизация процессов также позволяет сократить вмешательство человека в процессы производства, что уменьшает вероятность ошибок и повреждений оборудования.

Однако применение технологий Индустрии 4.0 в процессе производства ЭИС имеет некоторые недостатки: высокая стоимость внедрения, риск киберугроз, долгое обучение персонала, непредвиденные сбои, зависимость от сторонних поставщиков. Несмотря на эти недостатки, технологии Индустрии 4.0 могут значительно повысить эффективность производства и качество продукции. Поэтому их внедрение является одним из ключевых факторов успеха при модернизации металлургической отрасли.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗОТРОПНЫХ СТАЛЕЙ С СОДЕРЖАНИЕМ SI+AL БОЛЕЕ 4,8%

Юров В.В., Цыганов И.А.
ФГБОУ ВО «ЛГТУ», Липецк, Россия

E-mail: vladuyuroff@yandex.ru, zyganov.igor@gmail.com

Совершенствование технологии производства электротехнических сталей направлено на улучшение магнитных свойств. Основными подходами для снижения магнитных потерь считаются снижение толщины проката, формирование оптимальной микроструктуры, текстуры и повышение электросопротивления материала.

Решение последней задачей выглядит наиболее перспективной, и заключается в легировании твердого раствора железа кремнием и алюминием. Однако при увеличении их содержания сильно повышается прочность материала, что негативно сказывается на технологичность материала и требует внесения корректировок в процессы горячей и холодной прокатки. В связи с этим актуальным вопросом является разработка специальных технологий производства высоколегированной ЭИС.

Для решения проблем хрупкости могут применяться специальная термомеханическая обработка, двухвалковая разливка и химико-термическая обработка с диффузионным отжигом. Все они позволяют получить тонкие полосы из кремнистой стали с низкими магнитными потерями.

Применение термомеханической обработки выглядит перспективным способом производства высоколегированной ЭИС за счет внесения минимальных изменений в существующие производственные процессы. При этом решение проблемы повышенной хрупкости выполняется за счёт изменения технологических параметров прокатки и формирования благоприятной структуры. Также с помощью термомеханической обработки могут быть получены тонкие полосы высоколегированной ЭИС за счет уплотнения тонкодисперсных порошков. Данный способ легко устраняет проблему хрупкости, но с другой стороны магнитные потери у полосы остаются высокими. Такой негативный эффект достигается, по всей видимости, из-за загрязнения порошков и получения неоднородного состава.

Наиболее сложным вариантом технологии производства высоколегированной ЭИС является двухвалковая разливка с последующей механической обработкой и отжигом. Хотя данный способ и позволяет производить тончайшую полосу с высоким содержанием кремния и алюминия, но он также подразумевает жесткий контроль технологических параметров и получение лент ограниченных толщин и ширины. При этом дальнейшая прокатка также остаётся сложной задачей. Что в совокупности не позволяет применять метод в промышленности.

Наиболее применимым является химико-термическая обработка, заключающаяся в осаждении кремния на пластичную ЭИС. При этом могут быть применены различные методы: химическое осаждение из газовой фазы (CVD), горячее погружение, физическое осаждение из газовой фазы (PVD), ионная имплантация, диффузия из твердых сред и другие методы напыления. Они позволяют решить проблему хрупкости и при этом получить сталь с содержанием $Si+Al > 4,8\%$. Кроме того данные методы могут быть интегрированы в традиционный производственный процесс производства ЭИС. Основным недостатком выступает сложность формирования конечной структуры в процессе диффузионного отжига, что негативно сказывается на магнитных свойствах.

АДАПТАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ИЗНОСА ВАЛКОВ К УСЛОВИЯМ ПРОИЗВОДСТВА ПОДКАТА ЭТС НА СТАНЕ 2000

Дагман М.А.¹, Пименов В.А.¹

¹ПАО «НЛМК», Липецк, Россия

E-mail: dagman_ma@nlmk.com, pimenov_va@nlmk.com

Выполнение растущих требований к поперечной разнотолщинности полос готовой электротехнической изотропной стали (ЭИС) приводит к повышению издержек при ее производстве, так как преимущественно достигается за счет повышения ширины срезаемой кромки как после горячей, так и после холодной прокатки. Для моделирования и управления поперечной разнотолщиной и рядом некоторых других геометрических характеристик горячекатаного подката на ПАО «НЛМК» разработана математическая модель, учитывающая основные факторы, влияющие на формирование активной образующей валков: изгиб, упругое сплющивание валка в паре полоса-валок, термическое расширение, износ поверхности бочки.

Модель позволяет рассчитывать форму поперечного профиля полосы по заданным параметрам и используется для моделирования процессов как горячей, так и холодной прокатки полос ЭИС, разработки профилировок рабочих валков, расчета оптимальной величины подрезаемой кромки. На текущем этапе наибольший практический интерес представляет собой применение данной модели в режиме реального времени в качестве цифрового помощника оператору стана горячей прокатки. Однако область применения модели ограничивается высокой продолжительностью расчета, что в условиях действующего производства требует значительного сокращения расчетного времени и, как следствие, упрощения и адаптации ряда расчетных алгоритмов. Дополнительным ограничением является учет работы осевой сдвижкой рабочих валков, что значительно усложняет процесс расчета.

Настоящее исследование посвящено проблеме адаптации алгоритма расчета износа поверхности бочек рабочих валков к условиям НШПС 2000. Основными направлениями адаптации являются: во-первых, уточнение эмпирических коэффициентов, характеризующих материалы валков и полосы; во-вторых, обеспечение оперативного и безотказного поступления актуальных данных на вход расчетного алгоритма; в-третьих, корректный учет суммарной длины пробега рабочих валков и ее распределения по длине бочки.

Крайняя из перечисленных задач детально рассмотрена и решена путем корректировки базового уравнения расчета износа (уравнение Ойке): предложен упрощенный алгоритм расчета и прогнозирования распределения суммарной длины пробега валка, описываемой законом нормального распределения по факту прокатки первых N полос. Число N варьируется в зависимости от прокатываемого сортамента, и ряда параметров начальной настройки стана. В качестве базового значения в алгоритме принято N равным 3, что, как показано на экспериментальных данных, обеспечивает необходимую точность расчета. Далее, в целях повышения точности и ускорения расчета износа валка, также показана целесообразность применения трендовых значений (измерение характеристик полосы на каждых десяти метрах по ее длине) в сравнении с усредненными по каждой полосе.

Таким образом, в работе рассмотрены способы повышения точности, при одновременном снижении времени расчета износа рабочих валков. Данные способы позволяют применять алгоритм расчета износа рабочих валков в частности, а также

всю модель формирования поперечного профиля полосы ЭИС в целом в условиях действующего производства НШПС 2000 в режиме реального времени.

