

На правах рукописи

ДЕГТЕВ Сергей Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ
ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СВОЙСТВ ХОЛОДНОКАТАНЫХ ПОЛОС
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ

Специальность 05.16.05 – "Обработка металлов давлением"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2010

Работа выполнена в ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Божков Александр Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Трайно Александр Иванович

кандидат технических наук
Чащин Валерий Васильевич

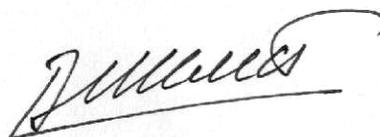
Ведущая организация: ООО «ВИЗ-Сталь», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится 15 декабря 2010 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.060.02 при Учреждении Российской академии наук Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, дом 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН.

Автореферат разослан «___»_____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.Е. Шелест

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Конкурентоспособность продукции листопрокатных цехов, производящих электротехническую изотропную сталь (ЭИС), определяется не только уровнем магнитных и механических свойств, но и их равномерностью по длине и ширине полос. Стабильность свойств ЭИС облегчает дальнейшую обработку стали у потребителя и гарантирует высокие рабочие характеристики готовых изделий. Более 70% потребителей предъявляют собственные требования к свойствам. В 90% случаев эти требования определяют диапазоны, намного более узкие, чем допускаются действующими стандартами, а в отдельных случаях регламентируют характеристики свойств, не указанные в стандартах. Как показывает практика производства ЭИС, проблема неравномерности распределения свойств существует. Об этом свидетельствуют претензии потребителей к качеству готовой продукции, связанные с тем, что свойства на отдельных участках по длине рулонов не соответствуют требованиям заказа. Неравномерность уровня магнитных и механических свойств по длине и ширине полос достигает 20%. Традиционные методы контроля не позволяют выявить участки рулона с несоответствующими свойствами, так как его аттестационные испытания производятся на одной пробе, отбираемой от концевой части. Вследствие этого не исключено попадание брака по свойствам в товарную продукцию. Поэтому существует необходимость уточнения совокупности причин неравномерности свойств и разработки эффективных мероприятий, направленных на ее снижение. Это определило актуальность данной работы.

Цель работы заключается в стабилизации магнитных и механических свойств на заданном уровне по длине и ширине полос ЭИС с помощью коррекции технологических режимов обработки на основных агрегатах цеха холодной прокатки.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

- проведен обзор научно – технической литературы и патентный поиск, посвященный вопросам возникновения неравномерности распределения магнитных и механических свойств по длине и ширине полос ЭИС;
- на основе литературного обзора выделен ряд основных технологических факторов, под действием которых формируются свойства ЭИС;
- разработана методика, в соответствии с которой проведены

экспериментальные исследования изменения магнитных и механических свойств и содержания основных химических элементов по длине и ширине полос ЭИС;

- выполнен анализ степени изменения по длине полос технологических факторов горячей прокатки и режимов обработки на агрегатах Производства динамной стали (ПДС) ОАО «НЛМК»;

- разработаны модели формирования магнитных и механических свойств по длине и ширине полос ЭИС в зависимости от технологических факторов горячей прокатки и обработки на агрегатах ПДС;

- разработана и реализована методика контроля распределения магнитных и механических свойств в потоке производства;

- разработаны технологические режимы обработки ЭИС, обеспечивающие с максимальной вероятностью получение заданного уровня магнитных и механических свойств и снижение неравномерности их распределения в полосах.

Научная новизна.

1. На основе результатов исследований установлены закономерности распределения магнитных и механических свойств по длине и ширине готовых полос ЭИС. Лучшие магнитные свойства (минимальные удельные магнитные потери) получены для средней по длине части полосы. Данному участку соответствуют меньшие значения предела текучести и временного сопротивления и большие значения относительного удлинения.

2. В результате комплексных исследований изменения технологических факторов горячей прокатки и обработки на агрегатах цеха холодной прокатки определены факторы, приводящие к неравномерности распределения свойств по длине полос готовой ЭИС: температура конца горячей прокатки, температура смотки, разность температур конца горячей прокатки и смотки, скорость транспортировки полосы в агрегате нормализации, суммарное обжатие на стане холодной прокатки, скорость транспортировки полосы и температура нагрева в агрегате непрерывного отжига. Установлена закономерность в изменении суммарного обжатия по длине полос при холодной прокатке, получена количественная оценка его влияния на распределение свойств по длине готовых полос ЭИС. Изменение суммарного обжатия (при заданном уровне 75% для ЭИС 4-й группы легирования и 77% для ЭИС 2,3 групп легирования) по длине полос при холодной прокатке на величину до 7% приводит к неравномерности удельных магнитных потерь, предела текучести и временного сопротивления до 8%, а относительного

удлинения до 16% по длине готовых полос в зависимости от группы легирования ЭИС. Установлена и количественно оценена временная задержка влияния температуры нагрева в агрегате непрерывного отжига на изменение свойств по длине полос, составляющая 15-30 с при температуре нагрева в диапазоне 800 – 900 °С. Построены модели формирования магнитных и механических свойств в полосах ЭИС, учитывающие не только технологические факторы обработки в цехах горячей и холодной прокатки, но и инерционность влияния температурного режима обработки в агрегате непрерывного отжига.

3. Предложен подход к прогнозированию распределения магнитных и механических свойств по ширине готовых полос ЭИС на основе данных о поперечном профиле горячекатаного проката и эпюры удельных натяжений в холоднокатаных полосах.

4. Разработан комбинированный метод и реализующая его методика контроля свойств и аттестации готовой продукции ЭИС на основе моделей, учитывающих взаимосвязь магнитных и механических свойств с технологическими факторами.

Научная и практическая ценность.

На основании выполненного комплекса теоретических и экспериментальных исследований разработана и реализована методика автоматизированного контроля магнитных и механических свойств в потоке производства, которая применяется для оценки степени изменения свойств по длине и ширине полос ЭИС, что, в свою очередь, позволило оптимизировать процесс аттестации и окончательного назначения заданной порции определенного вида продукции на конкретный заказ.

Разработаны принципы коррекции в режиме реального времени технологии обработки ЭИС на стане холодной прокатки, в агрегатах нормализации и непрерывного отжига, позволяющие снизить неравномерность распределения магнитных и механических свойств в полосах при сохранении их заданного уровня.

Реализация результатов работы.

Материалы диссертации использованы при разработке «Программного модуля оценки и контроля распределения магнитных и механических свойств по длине и ширине полос», внедренного в состав действующей автоматизированной системы управления качеством продукции (АСУК) ПДС ОАО «НЛМК».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях "Теория и практика производства листового проката" (Липецк, 2005г. и 2008г.), на III научно-технической конференции "Современная металлургия начала нового тысячелетия" (Липецк, 2006г.), на III и VI международных научно-практических конференциях "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности" (Санкт - Петербург, 2007г. и 2008г.), на III международной конференции молодых специалистов "Металлургия XXI века" (Москва, 2007г.), на II международной научно-технической конференции "Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов" (Санкт-Петербург, 2007г.), на международных научно-технических конференциях молодых специалистов (Магнитогорск, 2007г. и 2009г.), на международной конференции "Технологии и оборудование для прокатного производства" (Москва, 2009г.), на конференции VI Липецкого областного конкурса «Инженер года» и конкурса «Инженер года ОАО «НЛМК» (Липецк, 2008г., лауреат конкурсов по направлению «Чёрная металлургия»).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 23 печатные работы, из них девять в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертации.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений, изложена на 124 страницах машинописного текста и содержит 28 рисунков, 20 таблиц, 2 приложения, библиографический список из 98 наименований.

Автор выражает благодарность за научное руководство и помощь в выполнении работы к.т.н., доценту А.И. Божкову, а также за консультации и полезные замечания д.т.н., профессору А.Е. Чеглову и к.т.н. В.И. Парахину.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и научная новизна диссертации, отмечена научная и практическая ценность результатов исследований.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ представлены результаты анализа научно-технической литературы, посвященной проблемам формирования магнитных и механических свойств в полосах ЭИС.

На основе литературных данных изучено влияние основных

технологических факторов (химический состав, режимы обработки в цехах горячей и холодной прокатки) на уровень магнитных и механических свойств ЭИС. Определены пределы их изменения, в рамках которых с высокой долей вероятности возможно получение ЭИС с заданным уровнем свойств. Однако информация об изменении большинства технологических факторов по длине и ширине полос ЭИС в проанализированных научно-технических работах отсутствует. Исключением является массовая доля углерода: отмечается его меньшее содержание в средней части по длине и ширине полос готовой ЭИС вследствие обезуглероживания на стадии горячей прокатки за счет кислорода окалины. Имеются данные об изменении температурно-скоростных факторов по длине полос при горячей прокатке: температура конца прокатки колеблется на величину от 20 до 60 °С, температура смотки на концевых участках выше, чем в средней части по длине полосы, на 35-40 °С. Установлено, что при изучении причин возникновения неравномерности распределения свойств в полосах готовой ЭИС не учитывается влияние совокупности технологических факторов горячей прокатки, обработки на агрегатах цеха холодной прокатки и химического состава (их влияние рассматривается отдельно друг от друга). В большинстве работ констатируется сам факт наличия неравномерности свойств в полосах ЭИС, но не указаны причины, приводящие к ее возникновению. Публикации не дают однозначного понимания и объяснения причин возникновения неравномерности распределения магнитных и механических свойств ЭИС. Выводы, сделанные исследователями на основании результатов испытаний отдельных образцов из огромных объемов производимой стали, зачастую противоречат друг другу.

Выполненный анализ научно-технической литературы позволил изучить влияние основных технологических факторов на уровень магнитных и механических свойств ЭИС, а также установить направления исследований, необходимые для выявления закономерностей в изменении свойств и определения причин возникновения их неравномерности.

Во ВТОРОЙ ГЛАВЕ приведена методика и результаты исследований распределения магнитных, механических свойств, содержания основных химических элементов в полосах ЭИС и соответствующих изменений во времени (по длине полос) технологических режимов обработки на стане горячей прокатки и агрегатах ПДС.

Исследования проводили в лабораторных и промышленных условиях ПДС

ОАО «НЛМК» на 110 партиях ЭИС 2-4-й групп легирования одного типоразмера (ширина 1025-1030 мм, толщина 0,48-0,50 мм), прошедших полный технологический цикл обработки по режимам, установленным нормативно-технической документацией. При обработке экспериментальных партий фиксировали (использовали стандартные приборы, применяемые в промышленности) с привязкой к координатам по длине полос измерения режимов горячей прокатки, нормализации, обработки на стане холодной прокатки и термообработки холоднокатаных полос. Дополнительно в цехах горячей и холодной прокатки измеряли поперечный профиль горячекатаного проката (определяли с помощью системы измерения геометрических и температурных параметров проката RM-312) и распределение удельных натяжений в холоднокатаных полосах (использовали стрессометрический ролик). Для исследованных плавков при разливке в конвертерном цехе с целью определения содержания химических элементов (C, Si и Al) по «высоте» плавки производили отбор проб жидкой и литой стали: пробы жидкой стали отбирали из промежуточного ковша для всех анализируемых плавков на участках разливки, соответствующих каждой мерной длине сляба, то есть через каждые 10м; пробы литой стали отбирали от каждого сляба. От готовых полос на агрегатах резки ПДС отбирали пробы в 5-7 поперечных сечениях по длине, которые разделявали на образцы размером 20×210 мм, 30×305 мм. Образцы для измерения магнитных и механических свойств по ширине полосы отбирали в 30-ти равноудаленных участках, а для определения величины зерна и содержания химических элементов в 5-ти равноудаленных участках по ширине полосы. Лабораторные испытания образцов для определения регламентированных характеристик магнитных и механических свойств ЭИС проводили по ГОСТ 12119-98 и ГОСТ 11701-84 соответственно. Величину зерна определяли на оптическом микроскопе Neophot по ГОСТ 5639 методом подсчета пересечения границ зерен. Для изучения химического состава стали (C, Si, Mn, S, P, Al, Cu, Ti, Ni, Cr) применяли стандартные методы: кулонометрический, фотометрический, атомно-адсорбционный, гравиметрический. Из результатов измерений и испытаний после предварительной обработки сформировали массив данных.

Исследования по длине полос

Изменение каждой характеристики свойств во времени (по длине полосы) в рамках отдельной группы (2,3,4 группа легирования) рассматривали как

случайные процессы, а изменение по длине полосы – как их реализации. Проверка показала, что данные процессы нестационарны, а их анализ, проведенный с помощью непараметрических методов (критерии серий и инверсий), позволил установить, что в каждом процессе присутствуют закономерные составляющие-тренды. Для выделения тренда использовали метод наименьших квадратов (МНК). Лучшие магнитные свойства (минимальные магнитные потери) получены для средней части полосы $\sim \frac{3}{4}$ длины. Данному участку соответствуют меньшие значения предела текучести, временного сопротивления и большие значения относительного удлинения. В табл. 1, 2 приведены требования стандартов и потребителей к магнитным и механическим свойствам ЭИС 2-й группы легирования, а также их фактический уровень.

Таблица.1. Требования к магнитным свойствам ЭИС 2-й группы легирования

Характеристика свойств	Марка	Значение	Фактические значения
ЭИС 2-й группы легирования			
P _{1,5/50} , Вт/кг	2211	≤ 5,5	Концевые участки 4,3- 5,6 Средние участки 4,0-4,8
	M530-50A	≤ 5,3	
	2212	≤ 5,0	
	2213	≤ 5,0	
	2214	≤ 4,8	
	2215	≤ 4,5	
	M470-50	≤ 4,7	

Таблица.2. Требования к механическим свойствам ЭИС 2-й группы легирования

Характеристика свойств	Марка	Требования НТД		Требования фирм		Фактические значения
		ГОСТ 21427.2	EN 10106	А (Финляндия)	Б (Франция)	
σ _т , МПа	M600-50A (2112, 2211)	Не оговаривается	Не оговаривается	290-350	Не оговаривается	Концевые участки 320-370 МПа Средние участки 295-335 МПа
σ _в , МПа	M530-50A (2211-2213)	300-450	Не оговаривается	430-470	415-475	Концевые участки 450-495 МПа Средние участки 430-465 МПа
δ ₄ , %	M530-50A (2211-2213)	20-35	Не оговаривается	Не оговаривается	27-33	Концевые участки 22-31 %, Средние участки 28-33 %

Для большинства исследованных полос ЭИС 2-4-й групп легирования концевые участки по магнитным свойствам соответствует низшим маркам, а по механическим выходят за диапазоны, оговариваемые заказчиками.

Установлено, что ярко выраженная, схожая по конфигурации с трендом свойств, составляющая (тренд) выделена в кривых изменения содержания углерода по длине полос. Данные измерений остальных исследуемых химических элементов в большинстве своем представляют стационарные процессы, изменяясь в диапазонах, не превышающих погрешности измерений. Содержание углерода в среднем на 0,002-0,003% больше на концевых участках по сравнению со средней частью по длине полосы. Результаты анализа изменения содержания углерода в пределах плавки на пробах жидкой и литой ЭИС 2-4-й групп легирования показали, что разница в массовой доле углерода в пробах из промежуточного ковша и от сляба не превышает погрешности, и, следовательно, изменение содержания углерода по длине полос произошло на технологических переделах цехов горячей и холодной прокатки.

Результаты анализа изменения во времени факторов горячей прокатки показали, что ярко выраженная, схожая по конфигурации с трендами свойств и содержания углерода составляющая (тренд) выделена только в кривых изменения температуры смотки и обратная по конфигурации составляющая выделена в кривых изменения разности температур конца прокатки и смотки ($\Delta T = T_{\text{кп}} - T_{\text{см}}$). Установлено, что температура конца прокатки ($T_{\text{кп}}$) изменяется по длине полос на 30-50 °С. Для 80% исследованных полос температура конца прокатки ниже на концевых участках, чем в средней части полосы. Температура смотки ($T_{\text{см}}$) на концевых участках горячекатаной полосы длиной 20-40 м выше на 25-50 °С, чем в центральной части. Ее изменения связаны с тем, что для обеспечения качественной смотки концевые участки полосы не душируют. На остальной части по длине полосы температура смотки меняется в пределах 10-20 °С. Вследствие изменения температур конца прокатки и смотки меняется разность данных температур (ΔT) по длине полос. Разница величины ΔT концевых участков и средней части полосы составляет 30-80 °С.

Установлено, что участкам полос с большей температурой смотки, меньшей температурой конца прокатки и меньшей разностью температур соответствуют большие значения содержания углерода, удельных магнитных потерь, предела текучести, временного сопротивления и меньшие значения относительного удлинения. Таким образом, можно утверждать, что изменение

по длине полос температур горячей прокатки, может быть причиной неравномерного распределения содержания углерода и, как следствие, характеристик магнитных и механических свойств по длине полос ЭИС. Влияние температуры конца прокатки на свойства также проявляется через изменение параметров структуры: на концевых по длине участках полосы получены меньшие значения среднего размера зерна. При построении математических моделей прогноза уровня свойств наряду с температурой конца прокатки в качестве независимой переменной целесообразно включать разность температур ΔT , которая косвенно отражает степень обезуглероживания горячекатаной полосы и эффективность работы системы регулирования охлаждения на отводящем рольганге стана 2000.

На рис.1 в качестве примера представлены кривые изменения температуры конца прокатки, температуры скотки и разности температур горячей прокатки по длине полос ЭИС 4-й группы легирования.

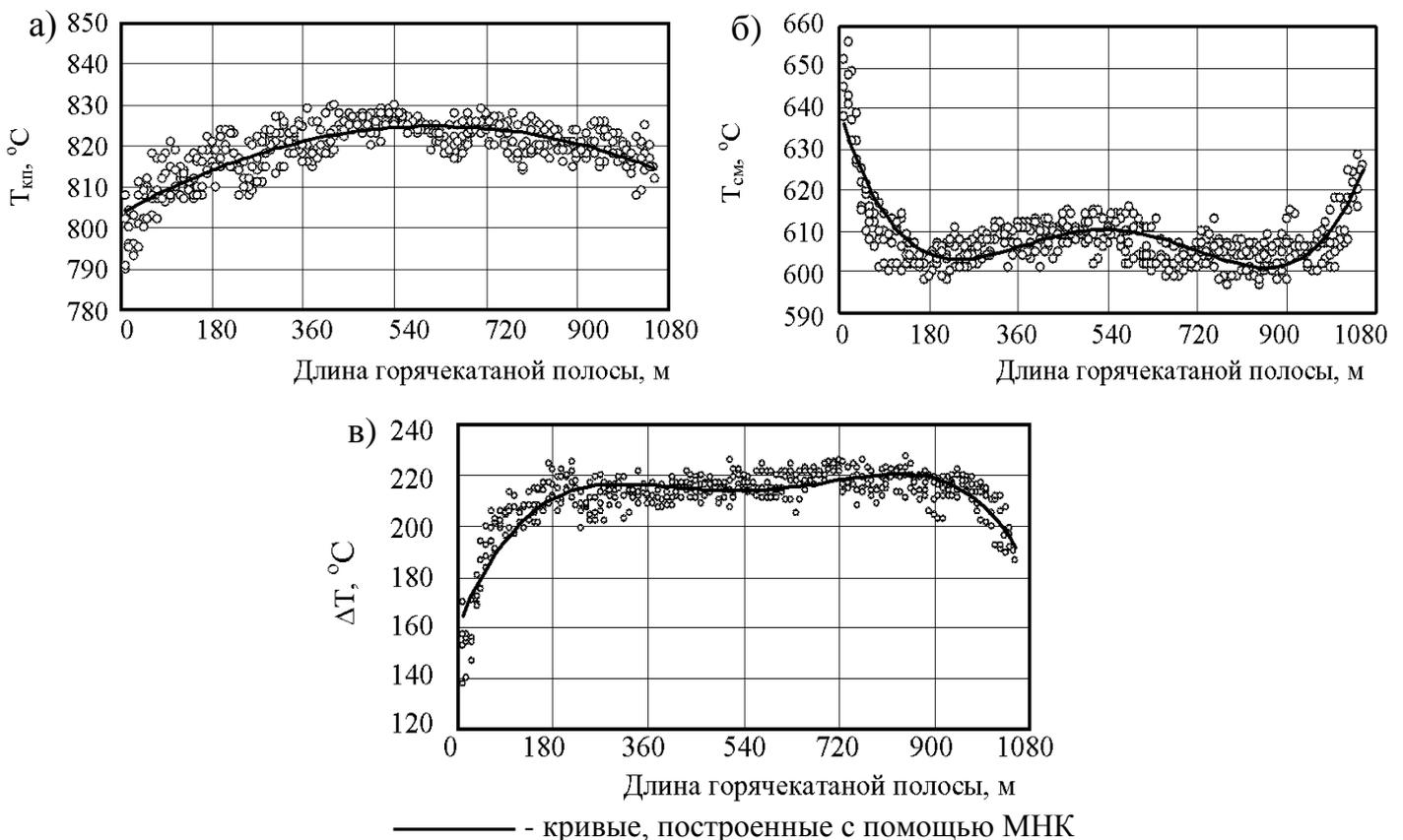


Рис.1. Изменение температуры конца прокатки (а), температуры скотки (б) и разности температур горячей прокатки (в) по длине полос ЭИС 4-й группы легирования

Закономерных составляющих в изменении технологических режимов обработки в агрегате нормализации (АН) выявить не удалось. Данные их измерений находились в пределах погрешности. В связи с этим оценить

влияние изменения технологических факторов нормализационного отжига по длине полосы на неравномерность магнитных и механических свойств ЭИС в рамках данных экспериментальных партий не представлялось возможным. Для решения этой задачи проведен активный эксперимент, заключающийся в целенаправленном изменении технологических режимов АН в процессе обработки единицы продукции. Результаты данного эксперимента представлены в главе 4.

Особое внимание уделяли исследованию изменения по длине и ширине полос необратимой (пластической) деформации на непрерывном четырехклетевом стане 1400, для оценки величины которой по длине полос использовали суммарное обжатие, рассчитываемое по формуле:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{H(x) - h(x)}{H(x)}, \quad (1)$$

где $x = 1 \dots L$ – координата по длине полосы, L – длина полосы, м; H – толщина горячекатаного проката, мм; h – толщина холоднокатаной полосы, мм.

Установлено, что продольная разнотолщинность горячекатаных полос, достигающая величины порядка 0,33 мм, приводит к изменению суммарного обжатия по длине полос на стане холодной прокатки до 7%.

Это связано с достаточно стабильной работой системы автоматического регулирования толщины (САРТ), результатом которой является поддержание конечной толщины на одном уровне в рамках длины полосы. Большая толщина горячекатаной полосы приводит к более высокому суммарному обжатию при холодной прокатке, что способствует увеличению степени деформации в холоднокатаной полосе и уменьшению размера зерна в отожженной. Учитывая наследственный характер формирования свойств в стали, который проявляется через изменение кинетики последующих рекристаллизационных процессов по длине полос при отжиге, можно с достаточной степенью достоверности утверждать о существенном влиянии на распределение свойств по длине полос готовой ЭИС изменения суммарного обжатия как результата достижения стабильной толщины холоднокатаной полосы при наличии продольной разнотолщинности горячекатаного проката.

На рис.2 в качестве примера представлены кривые изменения суммарного обжатия на стане 1400 и удельных магнитных потерь и по длине полосы ЭИС 4-й группы легирования.

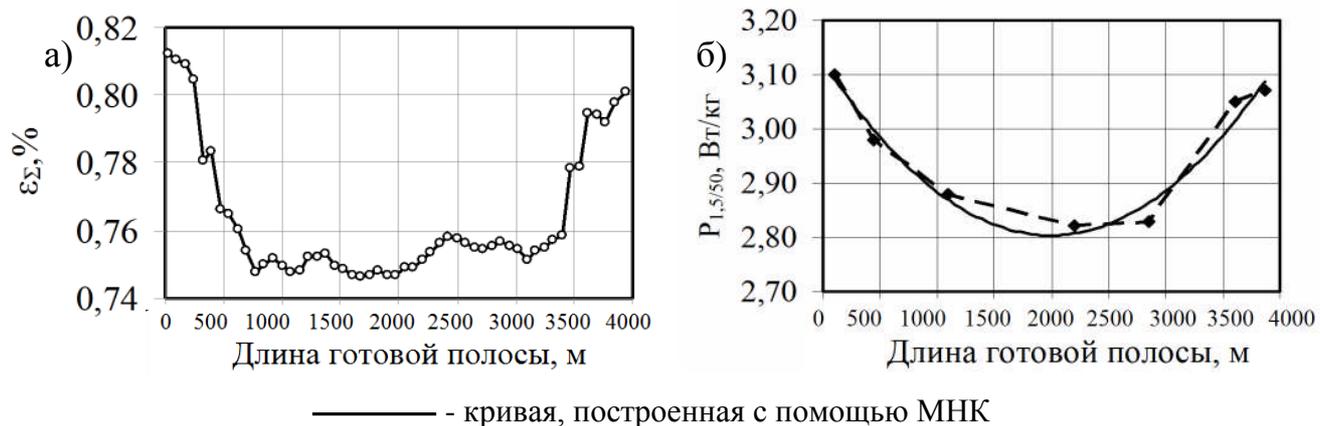


Рис.2. Изменение суммарного обжата на стане 1400 (а) и удельных магнитных потерь (б) и по длине полосы ЭИС 4-й группы легирования

Результаты анализа изменения во времени (по длине полос) технологических факторов обезуглероживающе-рекристаллизационного отжига показали, что данные их измерений находятся в пределах погрешности для всех экспериментальных партий ЭИС 2-4-й групп легирования. Однако специфика обработки в АНО заключается в том, что 10-15% полос в АНО обрабатываются с использованием заправочных рулонов. В случае задачи заправочного рулона происходит снижение скорости транспортировки полосы в линии АНО на 10-15 м/мин, которое сопровождается увеличением температуры нагрева на 30-60 °С. Это оказывает влияние на уровень магнитных и механических свойств. Участкам полосы, на которых происходило снижение скорости транспортировки в АНО, соответствует более низкий уровень удельных магнитных потерь, предела текучести и временного сопротивления.

Таким образом, установлены основные причины неравномерности магнитных и механических свойств по длине полос. Однако для разработки эффективных способов их стабилизации необходимо установить наличие и величину временной задержки во влиянии вышеуказанных технологических факторов. Для ее определения рассчитывали оценки взаимно-корреляционных функций.

Результаты анализа показали, что задержка во влиянии технологических факторов (за исключением температуры нагрева в АНО) на свойства отсутствует. Установлено, что взаимно-корреляционные функции изменения температуры нагрева в АНО и свойств ЭИС, имеют максимальное значение при $\tau_0 = 15-30$ с (рис.3б), то есть влияние изменения температурного режима отжига в АНО на свойства проявляется через 15-30 с. В качестве примера на рис. 3 приведены нормированные взаимно-корреляционные функции \tilde{r} (ε_Σ , $P_{1,5/50}$)

изменения суммарного обжатия на стане 1400 и удельных магнитных потерь и $\tilde{r}(\epsilon_{\Sigma}, P_{1,5/50})$ изменения температуры нагрева в АНО и удельных магнитных потерь от времени.

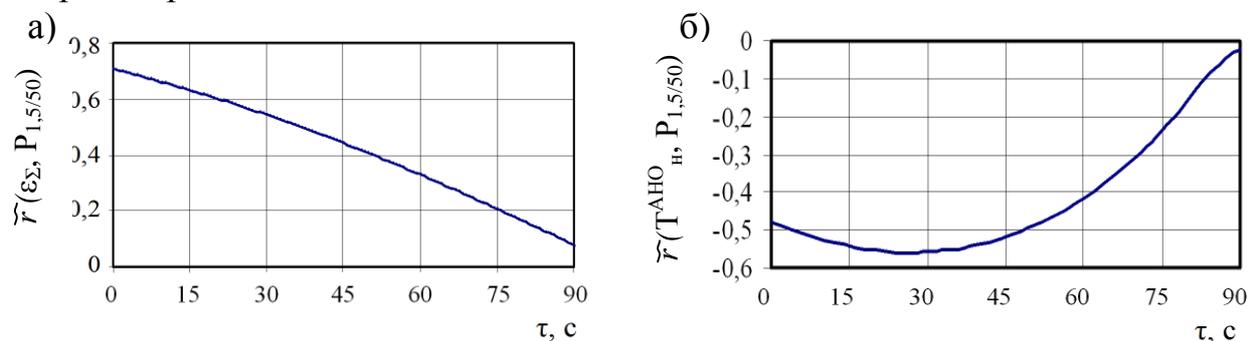


Рис. 3. Нормированные взаимно-корреляционные функции $\tilde{r}(\epsilon_{\Sigma}, P_{1,5/50})$ изменения суммарного обжатия и удельных магнитных потерь (а) и $\tilde{r}(T_{\text{АНО}}, P_{1,5/50})$ изменения температуры нагрева в АНО и удельных магнитных потерь (б) от времени

Таким образом, установлено наличие и диапазон изменения временной задержки во влиянии температуры нагрева в АНО на магнитные и механические свойства.

Исследования по ширине полос

В ходе экспериментальных исследований установлено, что в изменении магнитных и механических свойств по ширине полос присутствуют закономерные составляющие, а изменения массовой доли химических элементов по ширине полос в различных сечениях по длине носят случайный характер и незначительны по величине. Таким образом, можно утверждать, что неравномерность свойств по ширине полос не связана с изменением химического состава.

Поскольку регистрация изменения технологических факторов по ширине полос - задача трудновыполнимая, зачастую требующая дополнительных затрат и реконструкции агрегатов ввиду отсутствия необходимых измерительных приборов, для определения причин возникновения неравномерности свойств по ширине полос в данной работе использовали косвенные характеристики, позволяющие оценить изменение деформационных и температурных условий при горячей прокатке и обработке на агрегатах ПДС.

Для оценки изменения температурных и деформационных условий по ширине полос при горячей прокатке использовали толщину горячекатаного проката. Установлено, что участкам полос с меньшей толщиной соответствуют более низкие удельные магнитные потери, предел текучести и временное

сопротивление. Меньшие удельные магнитные потери, предел текучести и временное сопротивление наблюдаются на прикромочных участках готовых полос, имеющих выпуклый профиль. Изменение пластической деформации при холодной прокатке по ширине полос косвенно оценивали с помощью эпюры удельных натяжений.

В ходе исследований установлено, что эпюра удельных натяжений на участках разгона, торможения стана (процесс прокатки с ускорением и замедлением) отличается от эпюры при установившемся процессе прокатки, что говорит о нестабильности условий пластической деформации по ширине полосы на данных участках из-за влияния скоростного эффекта (динамический процесс). Это также приводит к неравномерному распределению свойств в полосах готовой ЭИС. Подтверждено, что с помощью оценки эпюры удельных натяжений в холоднокатаных полосах можно достаточно точно прогнозировать распределение магнитных и механических свойств по ширине готовых полос ЭИС. В качестве примера на рис.4 приведена эпюра удельных натяжений в холоднокатаной полосе, изменение удельных магнитных потерь и временного сопротивления по ширине готовой полосы ЭИС 2-й группы легирования.

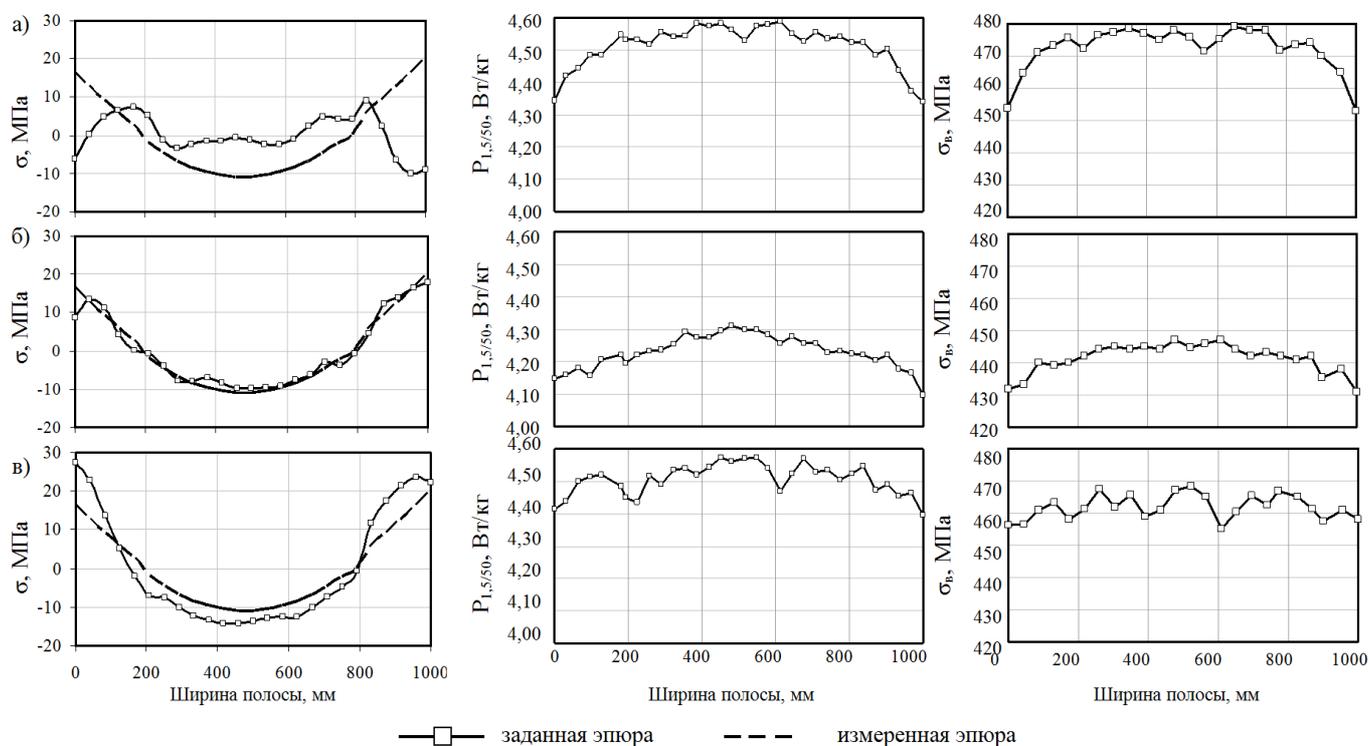


Рис. 4. Эпюра удельных натяжений в холоднокатаной полосе, изменение удельных магнитных потерь и временного сопротивления по ширине готовой полосы ЭИС 2-й группы легирования (а - участок разгона стана; б - установившийся процесс прокатки; в - участок торможения стана)

Поскольку измерение температур по ширине полос при термообработке в агрегатах нормализации и непрерывного отжига затруднительно, и их изменение незначительно ввиду высоких значений (800 °С и более), при оценке неравномерности свойств, процесс изменения температур по ширине полос можно считать второстепенным и учитывать как зашумленность с помощью специальных методов статистического анализа.

Таким образом, установлено, что неравномерность магнитных и механических свойств по ширине полос обусловлена технологическими факторами, вызывающими изменение деформационных и температурных условий при горячей и холодной прокатке.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА посвящена разработке математических моделей формирования магнитных и механических свойств в полосах ЭИС и методики их контроля в потоке производства.

Результаты исследований (глава 2) позволили выявить совокупность факторов, оказывающих решающее влияние на изменение свойств по длине и ширине полос ЭИС, и определить структуру математических моделей.

В структуру моделей формирования свойств не включено содержание химических элементов, поскольку не выявлено строго детерминированных составляющих в их изменении (за исключением содержания углерода) и вероятность правильного контроля и количественной оценки этих измерений в потоке производства достаточно мала. Их влияние на свойства ЭИС компенсируется тем, что модели построены в рамках узких групп типоразмеров, выделенных по маркам выплавки и назначения.

Для каждой группы типоразмеров с однородным химическим составом и диапазоном изменения свойств металла и технологических факторов формировали массивы исходных данных (базу данных), достаточных для статистического анализа. Алгоритм обработки и анализа измерений включает предварительную обработку и построение многопараметрической (многофакторной) модели с использованием метода регрессионного анализа, в основе которого лежит широко распространенный метод наименьших квадратов (МНК).

Общий вид зависимостей представлен ниже:

$$MS(x) = F(T_{кп}(x), \Delta T(x), V^{AH}(x), T_{пв}^{AH}(x), \varepsilon_{\Sigma}(x), T_{н}^{AHO}(x + \zeta), V^{AHO}(x)), \quad (2)$$

$$\Delta MS(y) = F(\Delta H(y), \Delta \sigma_x(y)), \quad (3)$$

где MS – магнитные (механические) свойства; $x = 1 \dots L$ - координата по

длине, L - длина полосы, м; $y = 1...B$ – координата по ширине полосы, B – ширина полосы, мм; $T_{\text{кп}}$ – температура конца горячей прокатки, °С; ΔT – разность температур конца горячей прокатки и смотки, °С; $T_{\text{пв}}^{\text{АН}}$ – температура полосы на выходе из камеры выдержки АН, °С; ε_{Σ} – суммарное обжатие полосы на стане 1400, %; $T_{\text{н}}^{\text{АНО}}$ – температура нагрева в АНО, °С; $\zeta = \tau \cdot V^{\text{АНО}}$, τ – временная задержка во влиянии изменения температурного режима отжига в АНО на магнитные (механические) свойства, (см. глава 2); $V^{\text{АН}}$, $V^{\text{АНО}}$, – скорости транспортировки полосы в АН и АНО соответственно, м/мин; ΔH – отклонение от среднего значения толщины горячекатаной полосы, мм; $\Delta\sigma_x$ – эпюра удельных натяжений в холоднокатаной полосе, МПа.

В качестве примера на ниже приведены математические модели и их статистические оценки, для удельных магнитных потерь ($P_{1,5/50}$) ЭИС 4-й группы легирования ($0,5 \times 1000$ мм):

$$P_{1,5/50}(x) = 3,00 + 0,0325V^{\text{АНО}}(x) + 0,03\varepsilon_{\Sigma}(x) + 0,011V^{\text{АН}}(x) - 0,0006\Delta T(x) - 0,00245T_{\text{н}}^{\text{АНО}}(x + \zeta) - 0,0007T_{\text{кп}}(x) - 0,0008T_{\text{пв}}^{\text{АН}}(x), \quad (4)$$

$$S_{\text{ост}}^2 = 0,0025, F = 16,73 > F^T = 1 \text{ (количество наблюдений } n = 1230).$$

и расчета удельных магнитных потерь по ширине полос ЭИС 4-й группы легирования ($0,5 \times 1000$ мм):

$$\Delta P_{1,5/50}(y) = 0,18 - 0,9\Delta H(y) + 0,0035\Delta\sigma_x(y), \quad (5)$$

$$S_{\text{ост}}^2 = 0,009, F = 3,45 > F^T = 1 \text{ (количество наблюдений } n = 900).$$

Построенные математические модели прогноза свойств по длине и ширине полос (4, 5) имеют высокие оценки адекватности. Подобные модели с высокими оценками адекватности построены для прогноза магнитных и механических свойств ЭИС 2 - 4-й групп легирования. Предусмотрена структурная и параметрическая адаптация моделей на основе оценки и учета вновь поступающих данных о режимах обработки ЭИС на стане горячей прокатки, агрегатах ПДС и характеристиках свойств готовой продукции. Критерием выбора структуры и параметров является минимум остаточной дисперсии. С помощью математических моделей вида (2,3) можно прогнозировать не только общий (средний) уровень, но и изменение (распределение) свойств по длине и ширине полосы с различной степенью

дискретности. Разработанные модели положены в основу методики контроля распределения свойств в потоке производства

Суть методики изложена ниже.

По мере прохождения каждой полосы определенной (K -й) группы типоразмеров через агрегаты цеха на одних и тех же j -х ($j=1, \dots, J$) поперечных сечениях по длине рулона регистрируются значения технологических факторов, включенных в качестве независимых переменных в модели прогноза (2). Для каждого j -ого сечения вычисляются значения характеристик магнитных (механических) свойств (\overline{MS}_j).

После лабораторных испытаний образцов, отобранных из данной партии металла (рулона) от J -ого сечения (обычно начало рулона) производится корректировка вычисленных по (2) показателей следующим образом.

Рассчитывается величина невязки:

$$\Delta MS_j = \overline{MS}_j - MS_j, \quad (6)$$

где \overline{MS}_j – вычисленные значения магнитных (механических) свойств в J -м сечении по длине полосы; MS_j – значения магнитных (механических) свойств в J -м сечении по длине полосы, полученные в результате лабораторных испытаний;

Далее прогнозируются значения магнитных (механических) в каждом j -ом сечении полосы по формуле и формируется картина изменения магнитных (механических) свойств по длине.

$$\overline{\overline{MS}}_j = \overline{MS}_j - \Delta MS_j. \quad (7)$$

Экспериментально определяются коэффициенты зависимости отклонения магнитных (механических) свойств от среднего значения в j -ом сечении по длине полосы и i -ом сечении по ширине от удельных натяжений в холоднокатаной полосе и профиля горячекатаного проката:

$$\Delta MS^{\sigma H}_{ji} = a^{MS}_0 + a^{MS}_1 \Delta \sigma_{ji} + a^{MS}_2 \Delta H_{ji}, \quad (8)$$

где $\Delta MS^{\sigma H}_{ji}$ – отклонения магнитных (механических) свойств от среднего значения в j -ом сечении по длине и i -ом сечении по ширине полосы, a^{MS}_0 , a^{MS}_1 , a^{MS}_2 – коэффициенты для каждой характеристики магнитных (механических) свойств, учитывающие марку стали, $\Delta \sigma_{ji}$ – изменение удельных натяжений по длине и ширине холоднокатаной полосы, ΔH_{ji} – отклонение толщины горячекатаной полосы по длине и ширине полосы от среднего значения.

Далее определяются магнитные (механические) свойства полосы по ее

длине и ширине по формуле:

$$MS_{ji} = \overline{MS}_j - \Delta MS_{ji}^{\sigma H}. \quad (9)$$

Адекватность разработанной методики подтверждена результатами дополнительных экспериментальных исследований, проведенных в ПДС при производстве ЭИС 2-4-й групп легирования (максимальная ошибка не превышает 5%). Данная методика реализована в программном модуле контроля распределения свойств в полосах ЭИС.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ приведены технические решения, с помощью которых можно контролировать и стабилизировать распределение магнитных и механических свойств по длине и ширине полос ЭИС.

1. Представлено информационное, математическое и программное обеспечение программного модуля контроля распределения магнитных и механических свойств в полосах ЭИС (МКРММС). Приведены результаты опытно-промышленной эксплуатации и приемочных испытаний МКРММС, которые подтвердили высокую эффективность работы модуля, что позволило внедрить его в состав действующей АСУК ПДС ОАО «НЛМК».

2. Для выравнивания уровня магнитных и механических свойств по длине полос ЭИС, одной из причин возникновения неравномерного распределения которых является изменение температур горячей прокатки, разработан технологический режим обработки ЭИС, заключающийся в следующем: скорость транспортировки полосы в линии АН на каждом её участке по длине устанавливается в зависимости от разности температур горячей прокатки (ΔT). Такое регулирование скорости транспортировки полос в линии АН позволяет существенно снизить неравномерность магнитных и механических свойств по длине полос готовой ЭИС при сохранении их заданного уровня.

3. Разработано и реализовано технологическое решение, обеспечивающее снижение нестабильности эпюры удельных натяжений по длине полос и, как следствие, неравномерности магнитных и механических свойств за счет того, что заданную эпюру удельных натяжений изменяют в зависимости от скорости прокатки.

4. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработан технологический режим обработки ЭИС, заключающийся в регулировании скорости транспортировки полосы в линии АНО на каждом её участке в зависимости от суммарного обжатия данного участка при холодной прокатке.

5. Для снижения неравномерности свойств по ширине полос разработан технологический режим обработки ЭИС, обеспечивающий регулирование удельных натяжений по ширине полосы при холодной прокатке в зависимости от поперечного профиля горячекатаного проката.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе анализа научно-технической литературы изучены технологические факторы, оказывающие влияние на магнитные и механические свойства готовой ЭИС, определены оптимальные диапазоны изменения концентрации химических элементов и технологических факторов, в рамках которых с высокой долей вероятности возможно получение ЭИС с заданным уровнем свойств.

2. Разработана методика и проведены экспериментальные исследования изменения магнитных, механических свойств и содержания основных химических элементов по длине и ширине полос ЭИС. Установлено, что изменения регламентированных характеристик свойств в полосах ЭИС носят закономерный характер. Лучшие магнитные свойства (минимальные магнитные потери) получены для средней части полосы $\sim \frac{3}{4}$ длины. Данному участку соответствуют меньшие значения предела текучести, временного сопротивления и большие значения относительного удлинения для ЭИС 2-4 групп легирования. Для ЭИС 2-й группы легирования удельные магнитные потери в среднем на 0,7 Вт/кг выше на концевых участках по сравнению со средней частью полосы, предел текучести выше на 27 МПа и временное сопротивление на 30 МПа, относительное удлинение ниже на 6,5%. Для ЭИС 3-й группы легирования удельные магнитные потери выше на 0,36 Вт/кг, предел текучести выше на 25 МПа и временное сопротивление на 31 МПа, относительное удлинение ниже на 6%. Для ЭИС 4-й группы легирования удельные магнитные потери выше на 0,26 Вт/кг, предел текучести выше на 24 МПа и временное сопротивление на 28 МПа, относительное удлинение ниже на 5,8%. Результаты анализа изменения массовой доли химических элементов по длине и ширине полос показали, что эти изменения носят случайный характер и незначительны по величине. Исключением является углерод - большее в среднем на 0,002- 0,003% содержание углерода получено на концевых участках по длине полос.

3. Выполнен анализ степени изменения во времени (по длине полос) технологических факторов горячей прокатки и обработки на агрегатах ПДС. Установлено, что возникновение неравномерности магнитных и механических

свойств по длине полос обусловлено изменением во времени (по длине полос) следующих технологических факторов *горячей прокатки*: температура конца прокатки, температура смотки, разность температур конца прокатки и смотки; *нормализационного отжига*: скорость транспортировки полосы; *холодной прокатки*: суммарное обжатие на стане 1400; *обезуглероживающе-рекристаллизационного отжига*: скорость транспортировки полосы и температура нагрева. Подтверждено наличие статистически значимой связи между данными технологическими факторами и магнитными, механическими свойствами. Установлено наличие временной задержки во влиянии температуры нагрева в АНО на уровень свойств и величина, которая составляет 15-30 с.

4. Установлено, что неравномерность магнитных и механических свойств возникает вследствие изменения деформационных и температурных условий по ширине полос, которые достаточно объективно характеризуются и отражаются поперечным профилем горячекатаного проката (результат неравномерности деформации, нагрева и охлаждения по ширине при горячей прокатке) и эпюрой удельных натяжений в холоднокатаных полосах (результат неравномерности деформации по ширине при холодной прокатке).

5. Разработаны модели, учитывающие временную задержку влияния изменения температурного режима отжига в АНО и позволяющие с высокой степенью точности, достоверности и надежности количественно оценить изменение магнитных и механических свойств по длине и ширине полос ЭИС. Особенностью моделей является то, что с их помощью можно прогнозировать как общий (средний) уровень, так и изменение (распределение) свойств по длине и ширине полосы с различной степенью дискретности. На основе моделей разработана методика контроля магнитных и механических свойств в потоке производства. Адекватность разработанной методики проверена результатами дополнительных экспериментальных исследований. Максимальная ошибка, не превышает 5%.

6. Разработан программный модуль контроля распределения магнитных и механических свойств в полосах ЭИС. Опытно-промышленная эксплуатация и приемочные испытания подтвердили высокую эффективность работы модуля, что позволило его внедрить в состав действующей АСУК ПДС ОАО «НЛМК».

7. Разработаны технологические режимы производства ЭИС, обеспечивающие с максимальной вероятностью снижение неравномерности распределения свойств в полосах при заданном их уровне.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В РАБОТАХ:

1. Настич, В.П. Закономерности распределения механических и электромагнитных свойств в холоднокатаных полосах. Сообщение 1 [Текст] / В.П. Настич, А.И. Божков, А.Е. Чеглов, Е.В. Титов, Н.Е. Попов, С.С. Дегтев // Производство проката. 2005. № 5. С. 12 – 18.
2. Настич, В.П. Закономерности распределения механических и электромагнитных свойств в холоднокатаных полосах. Сообщение 2 [Текст] / В.П. Настич, А.И. Божков, А.Е. Чеглов, Е.В. Титов, Н.Е. Попов, С.С. Дегтев // Производство проката. 2005. № 6. С. 2 – 10.
3. Настич, В.П. Автоматизированная система управления качеством продукции листопрокатного производства [Текст] / В.П. Настич, А.И. Божков, А.Е. Чеглов, С.С. Дегтев, И.И. Шопин // Производство проката. 2008. № 9. С. 8 – 13.
4. Чеглов, А.Е. Исследование распределения магнитных и механических свойств в полосах электротехнической изотропной стали. Сообщение 1 [Текст] / А.Е. Чеглов, А.И. Божков, С.С. Дегтев, Д.А. Кондратков // Производство проката. 2009. № 5. С. 9 – 17.
5. Божков, А.И. Исследование распределения магнитных и механических свойств в полосах электротехнической изотропной стали. Сообщение 2 [Текст] / А.И. Божков, А.Е. Чеглов, С.С. Дегтев, Д.А. Кондратков, И.И. Шопин // Производство проката. 2009. № 6. С. 11 – 17.
6. Чеглов, А.Е. Исследование распределения магнитных и механических свойств в полосах электротехнической изотропной стали. Сообщение 3 [Текст] / А.Е. Чеглов, А.И. Божков, С.С. Дегтев, Д.А. Кондратков, И.И. Шопин // Производство проката. 2009. № 7. С. 11 – 17.
7. Божков, А.И. Исследование распределения магнитных и механических свойств в полосах электротехнической изотропной стали. Сообщение 4 [Текст] / А.И. Божков, А.Е. Чеглов, С.С. Дегтев, Д.А. Кондратков, И.И. Шопин // Производство проката. 2009. № 9. С. 11 – 17.
8. Божков, А.И. Исследование распределения магнитных и механических свойств в полосах электротехнической изотропной стали. Сообщение 5 [Текст] / А.И. Божков, А.Е. Чеглов, С.С. Дегтев, Д.А. Кондратков, И.И. Шопин // Производство проката. 2009. № 10. С. 5 – 10.
9. Божков, А.И. Математические модели процессов формирования магнитных и механических свойств в полосах электротехнической изотропной стали [Текст] / А.И. Божков, А.Е. Чеглов, С.С. Дегтев // Производство проката. 2009. № 12. С. 8 – 13.