

*На правах рукописи*



ШИШОВ Алексей Юрьевич

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ  
СНИЖЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ АНИЗОТРОПНОЙ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ БЕЗ  
РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и  
физико-технической обработки

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2018 г.

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет).

Научный руководитель: **Александр Григорьевич Григорьянц**  
доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой «Лазерные технологии в машиностроении»  
национального исследовательского университета  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Николай Николаевич Евтихийев**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой лазерной физики института  
лазерных и плазменных технологий национального  
исследовательского ядерного университета  
«МИФИ»

**Татьяна Васильевна Тарасова**  
кандидат технических наук, начальник отдела  
научного и академического сотрудничества ФГБОУ  
ВПО МГТУ "СТАНКИН"

Ведущая организация: ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина»

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г. на заседании  
диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном техническом  
университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул.,  
д. 5., стр. 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского  
государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте  
[www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru). Телефон для справок 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., доцент



Михайлов В.П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Интенсивное развитие энергетических систем в электроэнергетике с повышенными требованиями по энергосбережению, влечёт за собой потребность производства энергосберегающих трансформаторов.

Обострение конкуренции на рынке трансформаторной стали диктует необходимость производства стали с низкими удельными потерями  $P_{1,7/50} \leq 1,0$  Вт/кг, высоким уровнем магнитной индукции  $B_{800} \geq 1,91$  Тл, высоким уровнем качества поверхности и электросопротивления электроизоляционного покрытия.

Данный вид стали является одним из наиболее высокотехнологичных и дорогостоящих, поскольку требует значительных производственных затрат. Отношение этих затрат на переработку к стоимости исходного сырья, энергетических и вспомогательных материалов для трансформаторной стали с гарантированными потерями в пределах 1,00-1,2 Вт/кг составляет 65-80%, в то время как для автолиста и высокопрочных сварных труб этот показатель составляет 20-40%, для плоского проката из нержавеющей и мартенситостареющих сталей - 35-50%. Повышение магнитной проницаемости и снижение удельных магнитных потерь связано с материальными затратами на создание чистых ферросплавов, прецизионного легирования, обеспечение режимов горячей и холодной прокатки листа, термической обработки, нанесения вспомогательного и окончательного покрытий, а также внедрение новых технологических переделов.

Существуют альтернативные методы улучшения магнитных характеристик электротехнических сталей, таких как локальная обработка давлением и воздействие концентрированными источниками энергии. Однако до настоящего времени не предложено комплекса современного оборудования и не проводились глубокие исследования технологии снижения удельных магнитных потерь анизотропной электротехнической стали локальной лазерной обработкой без разрушения электроизоляционного покрытия. Такая технология позволяет производить обработку на уже готовом материале до его обрезки. На основании этого тема работы является весьма актуальной.

**Целью работы** является разработка технологии и оборудования на основе современных лазеров для снижения удельных магнитных потерь анизотропной электротехнической стали локальной лазерной обработкой без разрушения электроизоляционного покрытия.

**Основными задачами** исследования являются следующие:

1. Разработать оборудование и методики для исследования влияния лазерного излучения на листовую трансформаторную сталь.

2. Исследовать взаимодействие лазерного излучения с материалом электроизоляционного покрытия.

3. Разработать и исследовать приёмы для снижения удельных магнитных потерь трансформаторной стали путём дробления доменов воздействием лазерного излучения.

4. Исследовать влияние параметров режимов лазерного излучения на магнитные свойства готовой трансформаторной стали.

5. Разработать технологию обработки поверхности трансформаторной стали лазерным излучением без разрушения электроизоляционного покрытия.

6. Разработать проект и изготовить опытно-промышленный комплекс для обработки трансформаторной стали.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Экспериментально и теоретически установлено, что применение технологии локального воздействия излучения твердотельных лазеров с длиной волны 900 - 1070 нм и погонной энергии развёртки от 0,018 до 0,022 Дж/см<sup>2</sup> позволяет создавать линии дробления доменов на поверхности трансформаторной стали с сохранением целостности электроизоляционного покрытия. При этом снижение удельных магнитных потерь  $\Delta P_{1,7/50}$  достигается в диапазоне от 8,0 до 15,0%.

2. Теоретически и экспериментально доказано, что эти линии возникают при нагреве тонколистовой анизотропной электротехнической стали лазерным излучением до температур от 250 до 300°C, что не приводит к изменению микроструктуры стали. При этом возникают внутренние остаточные напряжения в местах лазерного воздействия, которые и являются причиной дробления магнитных доменов, что приводит к снижению удельных магнитных потерь.

3. Показано, что создание в стальной полосе, за счёт её натяжения в процессе лазерной обработки, растягивающих напряжений на уровне от 6,0 до 18,0 Н/мм<sup>2</sup>, способствует дополнительному снижению удельных магнитных потерь  $\Delta P_{1,7/50}$  от 40 до 60 %.

**Практическая значимость** работы состоит в следующем:

1. Разработана технология обработки трансформаторной стали излучением волоконного и диодного лазеров без разрушения электроизоляционного покрытия.

2. Разработаны оптимальные режимы лазерной обработки трансформаторной стали излучением твердотельного лазера с модулированной добротностью, а также волоконного и диодного лазеров, позволяющие снизить удельные потери  $\Delta P_{1,7/50}$  в трансформаторной стали до 15,0%.

3. Создан опытно-промышленный технологический комплекс для обработки трансформаторной стали излучением волоконного лазера, встроенный в линию непрерывного агрегата на действующем производстве.

**Методы исследования.** Поставленные задачи решались с использованием теоретических и экспериментальных методов исследований. Расчеты тепловых полей проводили с использованием программы ANSYS. Для измерения магнитных характеристик стали после лазерной обработки разработана методика с применением прибора MPG 100D фирмы BROCKHAUS MESSTECHNIK, Германия. Создана методика экспресс-оценки изменения магнитных характеристик в процессе лазерной обработки с использованием порошкового способа визуализации картины доменной структуры на приборе «Domen Viewer». Для оценки оптических характеристик электроизоляционного покрытия применяли спектрофотометр LAMBDA 950 (Perker Elmer (США)).

**Достоверность** работы обеспечена корректным использованием общих положений фундаментальных наук (теорий намагничивания материалов, теории доменных структур и др.), проверена по известным критериям изучаемых процессов и подтверждена экспериментальными данными.

**Апробация работы.** Результаты работы доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры Лазерные технологии в машиностроении, Москва, 2014, 2015, 2016, 16 международной конференции «Лазерные и лучевые технологии», Санкт-Петербург, 2016; Отраслевой конференция «Лазерные технологии и методики в промышленности». Санкт - Петербург, 2016; Научно-практической конференции «Лазерные технологии обработки материалов в промышленности», Москва, 2017.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 7 научных работах, 3 из которых входят в перечень ВАК РФ общим объемом 1,9 п.л. и в 1 патенте на изобретение №2405841.

**Диссертационная работа состоит из** введения, пяти глав, общих выводов по работе и списка литературы из 79 наименований. Диссертация изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков и 20 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность темы, указаны цель работы, научная новизна, практическая ценность работы, сведения об апробации работы и публикациях.

**В первой главе** проведен литературный обзор, посвященный описанию характеристик анизотропных электротехнических сталей для производства трансформаторов.

Рассмотрены методы снижения удельных магнитных потерь в электротехнических сталях путём создания искусственных линии дробления доменов различными методами. Этими вопросам занимались зарубежные учёные

Д. Снелл, А. Филдлер, Э. Ньюпорт, Г. Гвент, а также отечественные учёные Г.С. Корзухин, Ю.Н. Драгошанский, С.В. Каюков, В.Э. Журавель и др. Показано, что наиболее эффективным и производительным методом создания искусственных линии дробления доменов является, лазерная обработка поверхности стали. В первых работах по использованию лазерного излучения для снижения удельных магнитных потерь измельчение доменов осуществлялось за счет получения в стали кристаллитов определённых форм и размеров. Области термического воздействия имели форму узких полос поперёк направлению прокатки, отстоящих друг от друга на расстоянии 2-3 мм. В них протекала первичная рекристаллизация и при последующей обработке создавались структурные барьеры, препятствующие свободному росту зерен при вторичной рекристаллизации. На месте областей термического воздействия лазерного излучения формировались границы крупных зерен вторичной рекристаллизации. Метод позволял снижать удельные магнитные потери на 6-8%. В более поздних работах указывается на возможность лазерной обработки на заключительном этапе изготовления, уже после нанесения электроизоляционного покрытия. В зонах термического воздействия создавали упругие напряжения, за счёт чего обеспечивали измельчение основных магнитных доменов.

В большинстве работ для обработки использовали газовые или импульсные твердотельные лазеры. Применение таких лазеров не даёт возможности получать высокую производительность обработки и может приводить к разрушению покрытия. Также, при импульсной обработке возникают высокие локальные напряжения в зоне обработки, что приводит к значительному снижению магнитной индукции.

На основании литературных источников показано, что для обработки могут быть использованы и другие типы технологических лазеров, среди которых в наибольшей степени, как показывают сравнительные характеристики, пригодны твердотельные. На современном этапе развития лазерной техники самыми перспективными, надёжными и эффективными являются два типа твердотельных лазеров – это волоконные и диодные. Эти лазеры получили уже достаточно широкое распространение в промышленности, доступны для закупки и сравнительно легко встраиваются в технологические комплексы.

Проведённый анализ литературных источников показал, что метод лазерной обработки поверхности трансформаторной стали, является вполне эффективным для повышения магнитной индукции и снижения удельных магнитных потерь анизотропной электротехнической стали без разрушения электроизоляционного покрытия. Однако, лазеры, с помощью которых может быть осуществлён этот процесс, весьма разнообразны, и необходимо учитывать многие их особенности,

преимущества и недостатки, прежде чем создавать оборудование, которое может быть эффективно использовано в производственных условиях.

На основании проведённого литературного обзора были сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** приведено описание материалов, методик исследования и использованного оборудования. Из многообразия анизотропных электротехнических сталей для исследования были выбраны высшие марки производства Новолипецкого металлургического комбината NV27S-110 и NV30S-120. Эти стали имеют крупнозернистое строение и покрыты электроизоляционным покрытием. На них наблюдается наибольший эффект снижения удельных магнитных потерь при обработке. Сталь изготавливают холодной прокаткой в два этапа. После первой прокатки для рекристаллизации нагартованной структуры рулоны обезуглероживаются в защитной безкислородной атмосфере. Затем проводится вторая холодная прокатка в конечную толщину – 0,15- 0,23-0,27-0,30 мм. Требуемая магнитная текстура стали и крупное зерно формируется в течение длительного отжига, который может длиться до 24 суток, после которого осуществляют выпрямляющий отжиг в проходных печах агрегатов непрерывного отжига. На готовую сталь наносится электроизоляционное покрытие.

Для проведения исследований по воздействию лазерного излучения твердотельных лазеров на поверхность исследуемых сталей был спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд. На созданном стенде можно получать нагрев лазерным излучением в виде линии, с использованием специального развёртывающего устройства. В качестве лазерных источников были использованы: а) волоконный лазер ЛС-4-К мощностью до 4 кВт и длиной волны 1070 нм; б) диодный лазер FL002084-3 мощностью 300 Вт с непрерывным режимом генерации и длиной волны 940 нм.

Для оценки оптических характеристик электроизоляционного покрытия и грунтового слоя, на предмет получения порога их разрушения и прозрачности для длины волны технологического лазера, была разработана методика с применением спектрофотометра LAMBDA 950 (Perker Elmer (США)). Измерение электроизоляционных свойств покрытий после лазерной обработки осуществляли по специально разработанной методике замеров электросопротивления.

Замеры магнитных характеристик проводили в соответствии с соответствующими ГОСТами по стандартным методикам определения магнитных и электрических свойств трансформаторных сталей. Магнитные измерения образцов до и после лазерной обработки осуществляли в автоматическом режиме на установке измерения магнитных характеристик MPG 100D фирмы BROCKHAUS

MESSTECHNIK (Германия) с использованием измерительного датчика для образцов шириной 30 мм по ГОСТ 12119.4-98 и ГОСТ 12119.5-98.

Для оперативности проведения измерений в процессе экспериментов по созданию линий дробления доменов лазерным излучением была разработана экспресс - методика оценки изменения магнитных характеристик без изготовления специальных образцов и проведения магнитных измерений. Линии дробления доменов формируются из возникающих замыкающих 90 градусных доменов и их границ, разделяющих основные 180 градусные домены. Методика основана на внешней оценке картины доменной структуры по изменению типов границ доменов. Визуализация доменной структуры достигается изменением распределения и концентрации на границах доменов взвеси магнитоактивных частиц в растворе под действием магнитного поля. Для наблюдения за изменением доменной структуры применяли визуализатор доменной структуры «Domen Viewer». Прибор представляет собой тороид диаметром 250 мм, в корпусе которого размещена магнитная катушка. Тороид с одной стороны закрыт прозрачным окном, а с другой стороны гибкой мембраной. В полость между мембраной, стеклом и образующей тороида через отверстие залит раствор магнитоактивных частиц. Питание к прибору подаётся по кабелю, прикреплённому к корпусу тороида. Поскольку трансформаторная сталь имеет остаточную намагниченность, при наведении магнитного поля посредством пропускания постоянного тока через обмотку катушки, частицы порошка концентрируются по границам доменной структуры. Этот эффект позволяет визуально наблюдать картину доменной структуры, что позволяет ее анализировать.

**В третьей главе** исследованы физические особенности формирования линии дробления доменов на поверхности трансформаторной стали лазерным излучением. При производстве современных анизотропных электротехнических сталей на основе Fe-Si путем прокаток и термообработок повышается степень совершенства ребровой кристаллографической текстуры (110) [001], увеличивая вдоль оси [001] ленты магнитную проницаемость и индукцию. Однако при этом вырастают крупные кристаллы и уменьшаются магнитные поля рассеяния над ними. В результате формируются магнитные полосовые 180 градусные домены большой толщины. При перемагничивании материала в трансформаторе это приводит к увеличению скорости смещения доменных границ и, следовательно, к возрастанию магнитных потерь за счет роста их вихретоковой составляющей  $P_{ce}$  до 80% от полных магнитных потерь. В связи с этим необходимо разработать эффективные методы снижения ширины основных полосовых магнитных доменов в анизотропных электротехнических сталях, приводящие к снижению магнитных потерь.



Перспективным решением этого вопроса является уменьшение ширины магнитных доменов и их изменения в узких зонах, путём создания лазерным излучением линии дробления доменов на поверхности стали. Под линиями дробления доменов в данном случае понимают закономерно расположенные протяжённые участки, отличающиеся от основного материала по химическому составу, структуре, текстуре, характеру упруго-напряжённого состояния, плотности структурных дефектов, выделениям второй фазы. В магнитном отношении на структурных барьерах сосредотачиваются магнитные заряды, приводящие к появлению замыкающих доменов и ограничивающие размеры основных доменов.

На основе исследования отражения лазерного излучения от поверхности стали и электроизоляционного покрытия, установлено, что для формирования линии дробления доменов наиболее эффективным является использование лазерного излучения с длиной волны от 900 до 1070 нм. На этих длинах волн лазерное излучение имеет минимальные значения отражения от стальной поверхности (не более 2,0%). Исследование отражающей способности листов с электроизоляционным покрытием показало, что на этих длинах волн оно максимально пропускает излучение и, соответственно, не будет нагреваться и разрушаться при создании линии дробления доменов на поверхности трансформаторной стали.

Наиболее эффективными современными технологическими лазерами, в этом диапазоне длин волн, являются волоконные и диодные лазеры. На основании проведённых исследований именно эти лазеры были использованы в дальнейших экспериментах.

Для определения уровня температур, при которых могут быть образованы линии дробления доменов без разрушения электроизоляционного покрытия, были проведены тепловые расчеты. Используются расчётные методики, учитывающие температурное распределение по формуле как сумма линейной функции времени и корректирующего фактора, который является функцией времени и положения. Расчёт проводили в программе ANSYS. Были определены температуры поверхности в зависимости от режимов обработки. На Рис. 1 представлен результат расчета в графическом виде.

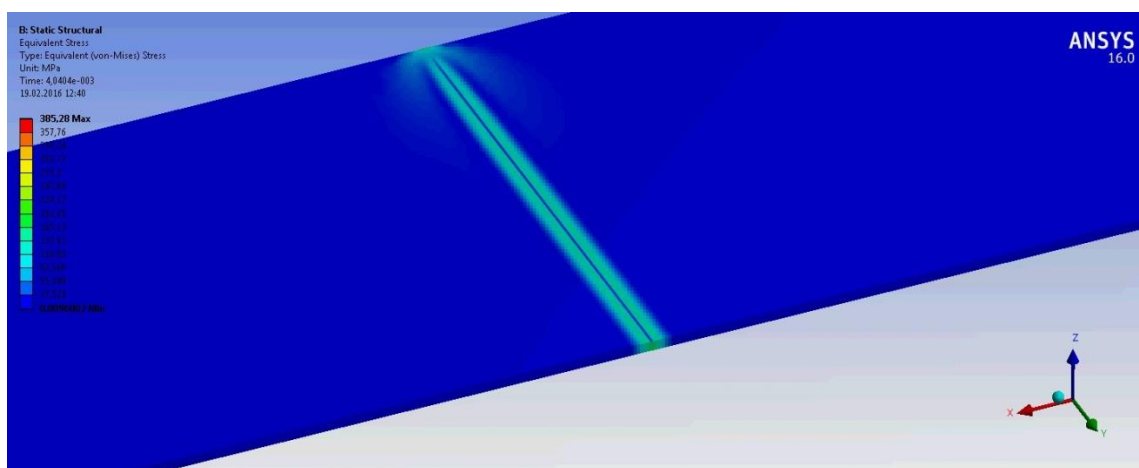


Рис. 1.

Отображение расчёта температуры поверхности в программе ANSYS для оптимального режима нанесения линии дробления доменов излучением волоконного лазера.

Установлено, что режимы локальной лазерной обработки, обеспечивающие образование линий дробления доменов и не разрушающие электроизоляционного покрытия, должны обеспечивать нагрев поверхности стали не выше  $300^{\circ}\text{C}$ .

Были проведены исследования, направленные на определение картины доменных структур, получаемых на стали при лазерной обработке, которые вызывают или не вызывают изменение магнитных свойств за счёт возникновения внутренних напряжений. Для оценки влияния внутренних напряжений, создаваемых линиями дробления доменов на магнитные свойства, был применён порошковый метод наблюдения изменения доменной структуры. Лазерную обработку осуществляли излучением диодного лазера. Полосы наносили поперёк пластины с шагом  $5,0$  мм по всей её длине. Затем пластины помещали под прибор визуализатора доменной структуры «Domen Viewer» и наблюдали картину изменения распределения доменов. В результате проведённых исследований были выявлены виды доменных структур в зависимости от режимов лазерной обработки.

При исследовании порошковым методом линий дробления доменов, полученных излучением диодного лазера, на магнитные свойства установлено следующее. При недостаточном количестве введённой погонной энергии на изображении видны только следы лазерного воздействия в виде линии дробления доменов на отдельных участках образца. Ввиду недостаточности погонной энергии обработки, изменений магнитных свойств в данном случае не происходит. При оптимальных режимах обработки наблюдаются поперечные дорожки, являющиеся линиями дробления доменов, с наличием дробления доменов и образования их рафинированной структуры, приводящей к снижению удельных магнитных потерь. В случае превышения оптимальных значений погонной энергии обработки, происходит разрушение рафинированной доменной структуры, что приводит к

ухудшению магнитных характеристик и росту удельных магнитных потерь. При этом также разрушается электроизоляционное покрытие.

Пример картины доменной структуры, полученной на оптимальном режиме, показан на Рис. 2.

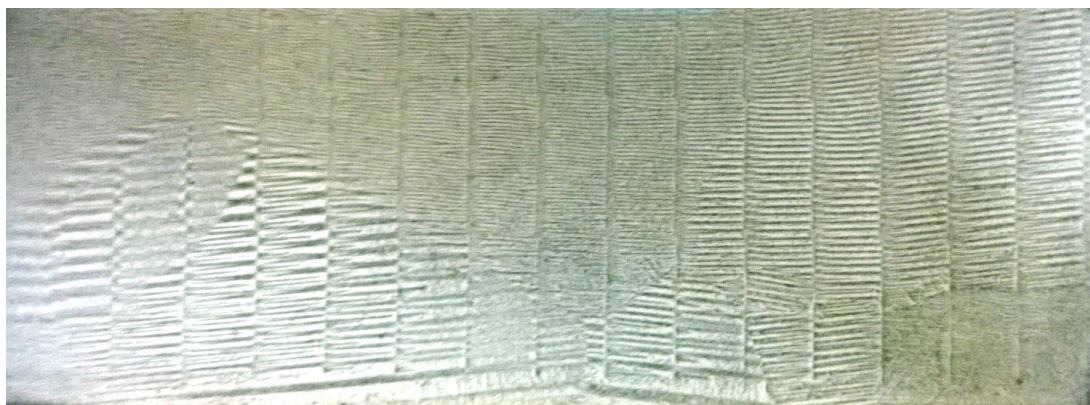


Рис. 2.

Пример доменной картины, полученной на оптимальном режиме ЛЛО

На Рис. 2 наблюдаются следы от воздействия лазерного излучения в виде поперечных линий. Эти линии являются границами дробления доменов и создаются за счёт появления внутренних напряжений от нагрева лазерным излучением и последующем охлаждении. За счет искусственного дробления 180 – градусных магнитных доменов и их рафинирования путём создания замыкающих 90 – градусных клиновидных, каплевидных и призматических доменов, являющихся динамическими зародышами перемагничивания, сокращается путь магнитного потока, меняющего свое направление на противоположное, с частотой 50 Гц. Образование 90 – градусных доменов непосредственно в зоне облучения снижает магнитные потери  $\Delta P_{1,7/50}$  за счет уменьшения вихретоковой составляющей.

Относительные изменения магнитных характеристик, то есть эффект от лазерной обработки, рассчитывали по следующим выражениям:

$$\Delta P_{1,7/50} = (P_{1,7/50 \text{исх.}} - P_{1,7/50 \text{ло}}) / P_{1,7/50 \text{исх.}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\Delta B_{100} = (B_{100 \text{исх.}} - B_{100 \text{ло}}) / B_{100 \text{исх.}} \times 100\% \quad (2)$$

Измерения магнитных характеристик обработанных образцов показали, что при образовании линии дробления доменов удельные магнитные потери ( $P_{1,7/50}$ ) снижаются на величину около 15 %, относительно уровня исходных магнитных потерь до лазерной обработки, при этом магнитная индукция ( $B_{100}$ ) снижается на величину не более 2%.

Проведённые измерения электропроводности покрытия на этих участках, по методике, указанной в главе 2, показали, что отношения исходного электросопротивления  $R_0$  к электросопротивлению  $R_{\text{ЛО}}$  после лазерной обработки

составляет  $R_0/R_{\text{ЛЮ}} < 1,5$ , что по имеющейся классификации, говорит о том, что покрытие удовлетворительное. При оптимальных режимах обработки не происходит разрушения электроизоляционного покрытия.

**В четвертой главе** представлены исследования, направленные на выбор наиболее технологичных, экономичных и эффективных типов лазеров для обработки, а также приведена оптимизация их режимов. При обработке необходимо было получить следующие характеристики: среднее снижение удельных ваттных потерь по  $P_{1,7/50}$  не менее 10%; среднее снижение магнитной индукции  $B_{100}$  не более 1,5 %; сохранение исходного сопротивления электроизоляционного покрытия после лазерной обработки.

Из имеющихся современных конструкций твердотельных технологических лазеров для нашей технологии в наибольшей степени подходят следующие: лазер на АИГ:Nd с акустооптической модуляцией добротности, длина волны излучения 1060 нм; непрерывный волоконный иттербиевый лазер с длиной волны излучения 1070 нм; непрерывный диодный лазер с длиной волны излучения 940 нм. Было исследовано влияние на магнитные свойства анизотропной электротехнической стали параметров режимов обработки всех указанных типов лазеров.

Варьирование параметров обработки импульсного твердотельного лазера на АИГ: Nd с ламповой накачкой обеспечивает среднее снижение удельных ваттных потерь по  $P_{1,7/50}$  на уровне 10% при среднем снижении магнитной индукции  $B_{100}$  не более 1%. Однако, из-за импульсности воздействия луча, достаточно сложно обеспечить гарантированную плотность электроизоляционного покрытия. В целом ряде случаев в процессе подбора режимов покрытия разрушались. Кроме этого, такого типа лазера с ламповой накачкой связано с ограниченным временем работы ламп (около 1000 часов), что недопустимо в условиях непрерывного изготовления полосы трансформаторной стали, а частые остановки агрегата для замены ламп резко снижают его производительность.

При исследовании воздействия излучения волоконного лазера ЛС-4-к обработку осуществляли лучом, развёрнутым в длину на 250-300 мм и шириной 100-300 мкм. От геометрической формы и размеров пятна зависит время лазерного воздействия, температура разогрева поверхностного слоя и глубина проникновения тепла в металл. Развёртку осуществляли специальной оптической системой, представляющей собой набор цилиндрических линз, расположенных вдоль линии сканирования луча. Такая система фокусировки позволяет применять волоконные лазеры мощностью свыше 1,0 кВт при отношении  $P/V = 0,015-0,050$  Дж/мм для высокопроизводительной (до 70 м/мин) обработки полосы трансформаторной стали без оплавления металла или разрушения покрытия.

Проведёнными исследованиями установлено, что эффект снижения магнитных потерь  $\Delta P_{1,7/50}$  в результате лазерной обработки существенно зависит от исходного состояния металла и его магнитных характеристик. При одном и том же режиме обработки на разных партиях металла снижение потерь может отличаться. Результаты проведённых измерений возможности снижения потерь на различных партиях металла при обработке излучением волоконного лазера в зависимости от исходных значений  $P_{1,7/50}$  показаны на Рис. 3.

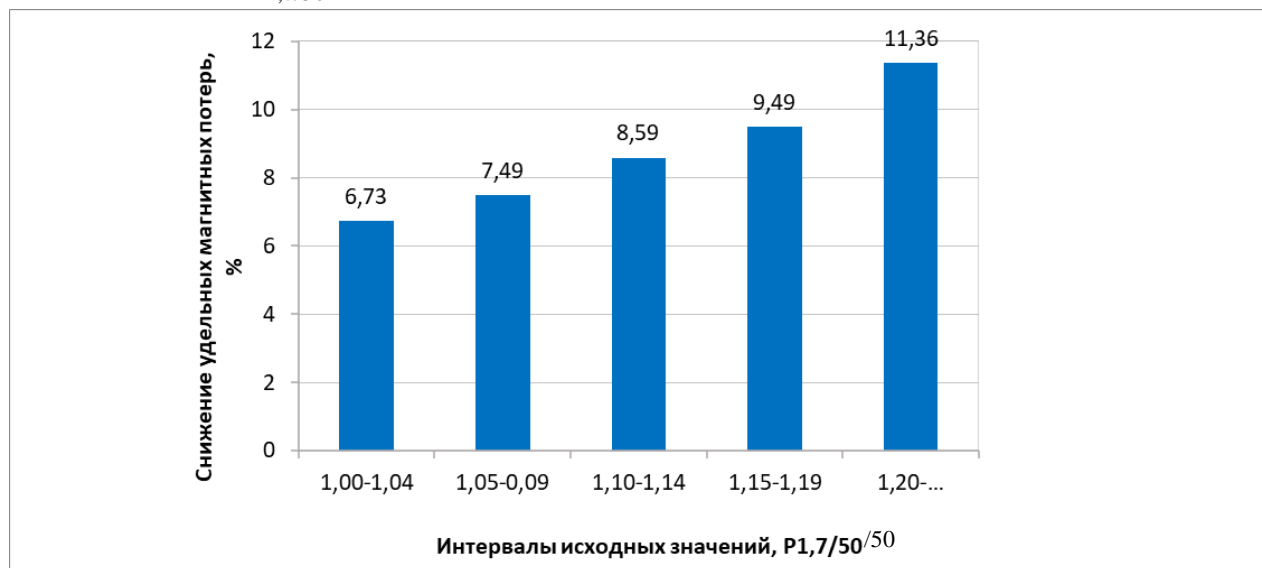


Рис. 3.

Снижение магнитных потерь при обработке излучением волокононого лазера в зависимости от исходных значений  $P_{1,7/50}$

Полученные результаты исследований показывают, что чем больше исходная величина магнитных потерь, тем больший эффект может быть достигнут при лазерной обработке стали.

Применение излучения непрерывного волоконного лазера с длиной волны 1070 нм и погонной энергией развёртки от 0,018 до 0,022 Дж/см<sup>2</sup> на оптимальных режимах позволяет создавать линии дробления доменов на поверхности трансформаторной стали без разрушения электроизоляционного покрытия, при этом снижение удельных потерь  $\Delta P_{1,7/50}$  достигается в диапазоне от 8,0 до 15,0%, при снижении магнитной индукции  $\Delta B_{100}$  не более чем на 2,0%.

Перспективным, для обработки трансформаторной стали, является применение диодных технологических лазеров большой мощности (до 4-5 кВт). В нашей работе был использован современный диодный лазер FL002084-3. Особенностью данного диодного лазера является форма пятна нагрева, которая представляет собой линию длиной 10,0 мм и шириной 0,05 мм.

Обработку проводили отдельными участками, равными длине пятна излучения, в импульсном режиме. Расстояние между полосами обработки составляло 5,0 мм.

Относительное изменение удельных магнитных потерь  $\Delta P_{1,7/50}$  от энергии импульса лазерного излучения диодного лазера показано на Рис. 4.

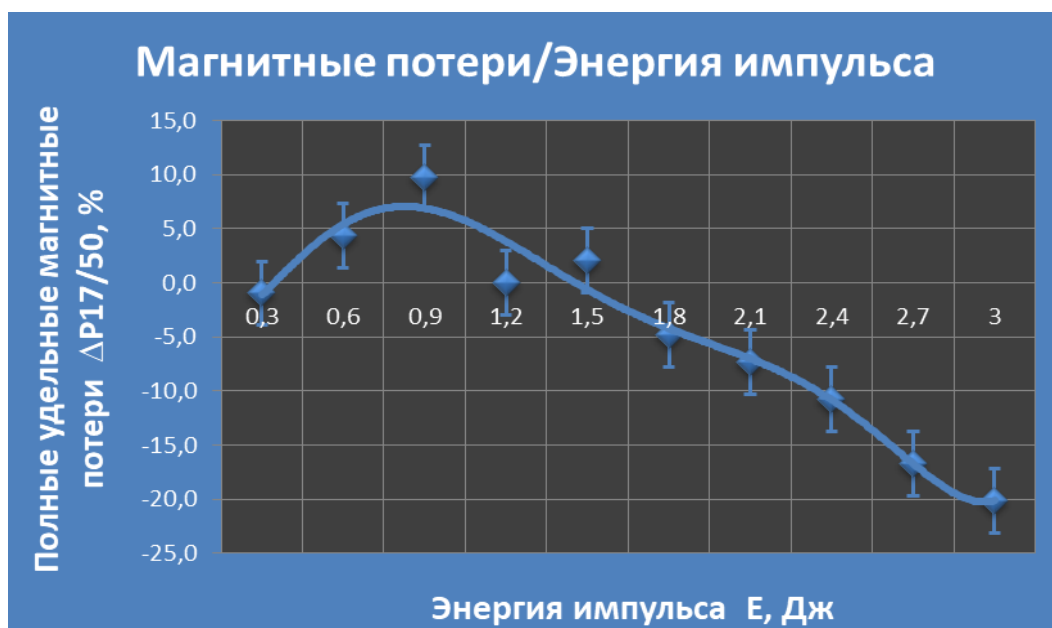


Рис. 4.

Зависимость относительного изменения удельных магнитных потерь  $\Delta P_{1,7/50}$  от энергии импульса лазерного излучения диодного лазера.

Результаты измерений магнитных характеристик после лазерной обработки излучением диодного лазера на оптимальном режиме показали, что снижение удельных магнитных потерь  $\Delta P_{1,7/50}$  достигает 10% при увеличении значения магнитной индукции  $\Delta B_{100}$  порядка 2%. Таким образом, очевидно, что применение диодного лазера даёт эффект снижения магнитных потерь, на трансформаторной стали, в такой же степени, что и применение волоконного лазера.

**В пятой главе** рассмотрены принципы разработки и создания опытно-промышленной установки для лазерной обработки анизотропной электротехнической стали. Для реализации разработанных в настоящей диссертации технологических процессов и методов лазерной обработки на предприятии Новолипецкий металлургический комбинат (НЛМК) при непосредственном участии автора был сконструирован, изготовлен и введён в эксплуатацию лазерный технологический комплекс для обработки готовой трансформаторной стали. Для формирования лазерного излучения использовали два волоконных лазера модели ЛС-3,5. Излучение от них по оптоволокну передаётся к охлаждаемому коллиматору. Коллиматор, формирует параллельный пучок диаметром 20 мм, который передаётся на два вращающихся зеркальных барабана, предназначенных для развёртки луча в линию. Барабан имеет диаметр 283 мм с закрепленными на нем 20-ю зеркалами размером 40x45 мм. Он приводится во вращение электромотором через редуктор. Непосредственно над стальной лентой расположена линейка цилиндрических линз.

Линзы обеспечивают нужную ширину пятна лазерного излучения на ленте. Перемещая ленту под лучом, получают линии на его поверхности. Частота нанесения линий регулируется скоростью перемещения полосы и скоростью вращения.

Для увеличения процента снижения магнитных потерь было предложено во время обработки лазерным излучением полосу стали в зоне обработки транспортировать под регулируемым натяжением, создающим внутреннее напряжение в металле в интервале от 5 до 80 Н/мм<sup>2</sup>. Приложение внешних растягивающих усилий приводит к деформационному искажению кристаллической решетки и увеличению плотности дислокаций в 1,5-3 раза по сравнению с режимом лазерной обработки без натяжения и к дополнительному снижению удельных магнитных потерь на 2-3%. Лазерная обработка полосы под натяжением также обеспечивает повышенную термоустойчивость эффекта снижения магнитных потерь.

Таким образом, в результате проведённой работы было создано специальное оборудование для лазерной обработки рулонированной тонколистовой анизотропной электротехнической стали, которое позволяет проводить лазерную обработку листа с дополнительным его натяжением. Также разработана технология нанесения линии дробления доменов излучением волоконного лазера, позволяющая снизить магнитные потери в стали и повысить эффективность работы трансформаторов, изготовленных из неё.

### **Основные выводы по работе**

1. Разработана промышленная технология, подобрано и изготовлено оборудование на основе современных лазеров для снижения удельных магнитных потерь анизотропной электротехнической стали локальной лазерной обработкой без разрушения электроизоляционного покрытия.
2. Спроектирован, изготовлен и опробован в эксплуатации лазерный технологический комплекс для обработки тонколистовой анизотропной электротехнической стали при перематке рулонов в линии агрегата на действующем производстве.
3. Установлено, что применение излучения непрерывного волоконного лазера с длиной волны 1070 нм и погонной энергией развёртки от 0,018 до 0,022 Дж/см<sup>2</sup> на оптимальных режимах позволяет получать линии дробления доменов на поверхности трансформаторной стали без разрушения электроизоляционного покрытия с созданием напряжений от 6,0 до 18,0 Н/мм<sup>2</sup>. При этом снижение удельных потерь  $\Delta P_{1,7/50}$  достигается в диапазоне от 8,0 до 15,0% при снижении магнитной индукции  $\Delta B_{100}$  не более чем на 2,0%. Одновременно с этим удельные магнитные потери снижаются на 40 до 60 %.

4. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что создание линий дробления доменов приводит к ограничению размеров основных магнитных доменов. Это достигается воздействием на поверхность трансформаторной стали излучением волоконного или диодного лазеров с длиной волны от 900 до 1070 нм.
5. На основании расчета температурных полей нагрева поверхности стали до образования линии дробления доменов показано, что максимальная температура нагрева должна лежать в диапазоне от 250 до 300°C.
6. Установлено, что основное влияние на изменение магнитных свойств стали оказывают различного рода напряжения, возникающие при неравномерном нагреве её поверхности. Эти напряжения формируют линии дробления 180 – градусных доменов с образованием замыкающих клиновидных 90-градусных доменов, сокращающими путь магнитного потока, что улучшает электротехнические свойства стали.
7. Экспериментально установлено, что при обработке излучением волоконного лазера пятно должно иметь линейную форму с длиной от 100 до 250 мм и шириной от 100 до 150 мкм.

**Материалы диссертации изложены в следующих основных работах:**

1. Производство новых видов электротехнических сталей в ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»/ А.Ю. Шишов [и др.] // Производство проката. 2010. №7. С. 19-23 (0,5 п.л. / 0,15 п.л.);
2. Комплексная лазерная обработка электротехнической стали / А.Ю. Шишов [и др.]// Технология машиностроения. 2015. №10. С. 12-16 (0,6 п.л. / 0,2 п.л.);
3. Технологии локальной лазерной обработки электротехнической анизотропной стали диодными лазерами прямого действия / А.Ю. Шишов [и др.] // Сварочное производство. 2017. №9. С. 47-53 (0,8 п.л. / 0,3);
4. Способ производства листовой анизотропной электротехнической стали/ Патент № RU 2405841 С1/Ю.И. Ларин, М.Ю. Поляков, В.Н. Поляков, А.Ю. Шишов, С. А. Крысанов; заявл. 08.03.2009; опубл. 10.12.2010.