

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 621.787.6:621.83.05

ДОВГАЛЁВ
Александр Михайлович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ СОВМЕЩЕННОЙ
МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ
НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 05.02.07 – технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Минск, 2024

Работа выполнена в межгосударственном образовательном учреждении высшего образования «Белорусско-Российский университет».

Научный
консультант

ШЕЛЕГ Валерий Константинович,
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, лауреат Государственной премии БССР, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета

Официальные
оппоненты:

АКУЛОВИЧ Леонид Михайлович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология металлов» УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»;

МИХАЙЛОВ Михаил Иванович,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Робототехнические системы» УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»;

ПОБОЛЬ Игорь Леонидович,
доктор технических наук, профессор, начальник отдела электронно-лучевых технологий и физики плазмы ГНУ «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая
организация

ГНУ «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 14 февраля 2025 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, телефон ученого секретаря +375 (17) 293-93-58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « » января 2025 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.03,
кандидат технических наук



О. К. Яцкевич

© Довгалёв А. М., 2024

© Белорусский национальный
технический университет, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Мировой и отечественный опыт свидетельствует о том, что большинство современных машин и механизмов (по разным данным от 70 до 90 %) выходят из строя по причине износа поверхностей их ответственных деталей. В развитых странах потеря средств, ежегодно направляемых на борьбу с износом и восстановлением работоспособности машин различного технологического назначения, составляет около 4–5 % национального дохода. В связи с этим увеличение долговечности машин на основе повышения износостойкости поверхностей входящих в них ответственных деталей является важной народно-хозяйственной проблемой. Решение указанной проблемы усугубляется непрерывным развитием науки, техники и технологий, определяющим возрастание режимов эксплуатации машин, существенный рост действующих нагрузок, температур и вибраций в узлах трения. Кроме того, современные тенденции в конструировании машин, направленные на снижение их материалоемкости, уменьшение габаритов и удельных массовых характеристик узлов трения, привели к тому, что большинство входящих в их состав деталей являются нежесткими. Доля таких деталей в машиностроении непрерывно растет и составляет сегодня более 40 % от общего объема выпуска. Для повышения износостойкости поверхностей нежестких деталей из ферромагнитных материалов (далее – ферромагнитных деталей) создано достаточно большое количество методов поверхностного упрочнения, каждый из которых имеет свои особенности и область технологического применения. К наиболее эффективным относятся динамические методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностей нежестких ферромагнитных деталей (вибронакатывание, обработка дробью, центробежно-ротационная, ультразвуковая, центробежно-ударная, пневмоцентробежная, пневмовибродинамическая обработки и др.), осуществляемые на финишных операциях технологического процесса, экологически безопасные, позволяющие получить благоприятный микрорельеф, обеспечить упрочнение поверхностного слоя, сформировать остаточные напряжения сжатия, повысить усталостную прочность, контактную выносливость и износостойкость упрочненных поверхностей. Вместе с тем динамические методы отделочно-упрочняющей обработки, наряду с преимуществами, имеют и ряд существенных недостатков: требуют для реализации достаточно сложного дорогостоящего оборудования и инструментов, предварительной подготовки поверхности по снижению исходной шероховатости (как правило, введения в технологический процесс дополнительных операций механической обработки); формируют (вследствие ударной обработки) на поверхности детали новый микрорельеф, высота которого превышает исходный; не предусматривают комплексного энергетического воздействия на поверхность ферромагнитных детали для получения упрочненного поверхностного слоя с высокими характеристиками качества и эксплуатационными свойствами. Таким образом, до настоящего времени не существует общего решения указанной проблемы, поиск эффективных технологических методов повышения характеристик качества и эксплуатационных свойств поверхностей нежестких ферромагнитных деталей продолжается. В связи с этим разработка инновационных методов упрочняющей обработки, к которым относится метод отделочно-упрочняющей совмещенной магнитно-динамической обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием, предусматривающий комплексное магнитно-силовое воздействие и позволяющий с небольшой добавленной стоимостью (3–4 % от себестоимости изго-

товления) повышать износостойкость поверхностей нежестких ферромагнитных деталей в 3,8–4,9 раза, направлена на решение важной народно-хозяйственной проблемы, связанной с увеличением долговечности создаваемых современных технических систем. В то же время на предприятиях машиностроительного комплекса Республики Беларусь изготавливается множество нежестких ферромагнитных деталей, основу которых составляют гильзы пневмо- и гидроцилиндров, гильзы цилиндров двигателя, кольца и втулки подшипников скольжения, трубы цилиндров, обоймы, полые валы, штоки, скребки, ножи и др., с ежегодным объемом промышленного производства на сумму более 580 млн бел. руб. Однако при изготовлении указанных нежестких ферромагнитных деталей почти не используются динамические методы отделочно-упрочняющей обработки их рабочих поверхностей, а применяемые (в отдельных случаях) статические методы упрочнения, характеризующиеся большими силами деформирования, вызывают остаточные деформации нежестких деталей, снижающие геометрическую точность обработки. Внедрение на предприятиях машиностроения Республики Беларусь инновационных технологий отделочно-упрочняющей обработки поверхностей нежестких ферромагнитных деталей машин (большинство из которых являются деталями пар трения) позволит существенно повысить их износостойкость, а следовательно, надежность и долговечность узлов трения изготавливаемых современных машин и механизмов и получить при этом годовой экономический эффект за счет снижения трудоемкости механической обработки нежестких деталей (вследствие исключения операций абразивной обработки), использования для изготовления деталей пар трения менее дорогостоящих материалов, экономии цветных металлов и сплавов (детали пар трения изготавливают из низкоуглеродистых сталей, а их рабочий слой формируют одним из методов нанесения антифрикционного покрытия), импортозамещения дорогостоящих хонингованных труб на общую сумму более 80 млн бел. руб.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Диссертационная работа подготовлена на основе исследований, выполненных автором в ходе реализации программ НАН Беларуси по решению важнейших проблем в области естественных и прикладных наук, по заданиям «Повышение эксплуатационных свойств деталей путем наноструктурирования поверхностного слоя совмещенной обработкой концентрированным потоком энергии вращающегося магнитного поля и динамическим поверхностным пластическим деформированием» (2014–2015 гг. № ГР 2014991) и «Исследование и разработка технологии комбинированной модификации поверхностного слоя деталей машин комплексным воздействием вращающимся магнитным полем, импульсно-ударным деформированием и активной технологической средой (2016–2018 гг. № ГР 20161742), а также в рамках научно-исследовательских работ, выполненных на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» Белорусско-Российского университета: ГБ № 0616 «Новые технологии повышения производственного ресурса инструментов и узлов металлорежущих станков для условий автоматизированного производства» (2006–2010 гг. № ГР 206560); ГБ № 1118 «Повышение параметров качества поверхностного слоя инструментов, технологической оснастки, деталей технических систем с оптимизацией их конструктивных, технологических и эксплуатационных

характеристик воздействием тлеющего разряда и ППД» (2011–2015 гг. № ГР 20111335); ГБ № 1601 «Улучшение характеристик передаточных механизмов, деталей машин, режущего инструмента на основе прогрессивных схем контактного взаимодействия, современных методов обработки поверхностного слоя при воздействии магнитного поля» (2016–2020 гг. № ГР 20161937).

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг. «Высокоэнергетические процессы в технологической среде и на границе раздела фаз при формообразовании, упрочнении, обработке и испытании материалов, формировании покрытий», научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг. «Многofункциональные материалы и технологии» (постановления Совета Министров Республики Беларусь № 585 от 19.04.2010 г., № 190 от 12.03.2015 г.), а также приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг. «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: машиностроение и машиноведение» (Указ Президента Республики Беларусь № 156 от 07.05.2020 г.).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель работы – разработка теоретических и технологических основ отделочно-упрочняющей совмещенной магнитно-динамической обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием, позволяющей повысить характеристики качества поверхности и эксплуатационные свойства нежестких ферромагнитных деталей.

Для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи**:

- разработать математические модели процесса совмещенной магнитно-динамической обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием внутренних и наружных цилиндрических поверхностей нежестких ферромагнитных деталей;
- разработать динамическую модель комбинированного инструмента для совмещенной магнитно-динамической обработки поверхности отверстия;
- разработать математическую модель процесса упругопластической деформации микронеровностей поверхности ферромагнитной детали деформирующим шаром при совмещенной магнитно-динамической обработке;
- разработать математическую модель процесса формирования шероховатости поверхности при совмещенной магнитно-динамической обработке;
- разработать методы и инструменты для совмещенной магнитно-динамической обработки;
- разработать рекомендации по расчету параметров инструмента и режимов процесса совмещенной магнитно-динамической обработки;
- исследовать основные характеристики качества совмещенной магнитно-динамической обработки, характеристики качества поверхности и эксплуатационные свойства упрочненных ферромагнитных деталей;
- разработать и внедрить технологии (операции) совмещенной магнитно-динамической обработки в производство.

Объект исследования – процесс отделочно-упрочняющей совмещенной магнитно-динамической обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием поверхностей нежестких ферромагнитных деталей.

Предмет исследования – характеристики качества поверхности и эксплуатационные свойства упрочненных деталей.

Научная новизна

1. Установлено, что комплексное магнитно-силовое воздействие на поверхность нежестких ферромагнитных деталей, осуществляемое вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием, обеспечивает получение наноструктурированного поверхностного слоя толщиной 1,5–4,5 мкм с мелкодисперсной субзернистой структурой наноразмерного диапазона (15–100 нм), характеризующегося увеличением плотности дислокаций и остаточных напряжений сжатия, определяющего кратное повышение износостойкости упрочненных поверхностей.

2. Разработаны математические модели процесса совмещенной магнитно-динамической обработки внутренних и наружных цилиндрических поверхностей нежестких ферромагнитных деталей и получены соответствующие системы дифференциальных уравнений для расчета кинематических характеристик движения деформирующих шаров в магнитном поле (угловой скорости вращения, скорости взаимодействия с упрочняемой поверхностью), *установлено* влияние параметров комбинированного инструмента и режимов процесса совмещенного упрочнения на кинематические характеристики движения деформирующих шаров.

3. Разработана динамическая модель комбинированного инструмента для совмещенной магнитно-динамической обработки поверхности отверстия нежестких ферромагнитных деталей и получено дифференциальное уравнение для расчета величины жесткости магнитной связи деформирующих шаров с магнитной системой комбинированного инструмента, учитывающее действующую на деформирующие шары магнитную силу, создаваемую источниками магнитного поля инструмента и намагниченным поверхностным слоем ферромагнитной детали, количество и угловое расположение источников магнитного поля.

4. Разработана математическая модель процесса упругопластической деформации микронеровностей поверхности нежесткой ферромагнитной детали деформирующим шаром при совмещенной магнитно-динамической обработке и получены математические зависимости для расчета глубины внедрения деформирующего шара в поверхность нежесткой ферромагнитной детали и глубины упрочненного поверхностного слоя, *установлена* взаимосвязь глубины внедрения деформирующего шара с параметрами комбинированного инструмента и режимами процесса совмещенного упрочнения.

5. Разработана математическая модель процесса формирования шероховатости поверхности нежесткой ферромагнитной детали при совмещенной магнитно-динамической обработке и получена математическая зависимость для расчета величины шероховатости упрочненной поверхности, *установлена* ее взаимосвязь с высотой исходной шероховатости поверхности, массой деформирующего шара, скоростью взаимодействия деформирующего шара с поверхностью детали, подачей комбинированного инструмента.

Положения, выносимые на защиту

1. Математические модели процесса совмещенной магнитно-динамической обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием внутренних и наружных цилиндрических поверхностей нежестких ферромагнитных деталей, *отличающиеся* рассмотрением движения деформирующих шаров в постоянном и переменном магнитном поле, создаваемом магнитной системой инструмента

и намагниченным поверхностным слоем ферромагнитной детали, *позволяющие рассчитать* скорость взаимодействия деформирующих шаров до и после взаимодействия с упрочняемой поверхностью ферромагнитной детали, угловую скорость вращения деформирующих шаров, траекторию движения геометрического центра деформирующего шара, силу магнитного взаимодействия деформирующих шаров с источниками магнитного поля комбинированного инструмента и намагниченной поверхностью упрочняемой ферромагнитной детали, величину ударной силы деформирования, *установить* взаимосвязь кинематических характеристик движения деформирующих шаров с основными конструктивными параметрами комбинированного инструмента и технологическими режимами процесса совмещенного упрочнения и, как следствие, определить необходимые режимы процесса совмещенной обработки для обеспечения заданных характеристик качества поверхности детали.

2. Динамическая модель комбинированного инструмента для совмещенной магнитно-динамической обработки поверхности отверстия нежестких ферромагнитных деталей вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием, *отличающаяся* учетом деформирующих шаров, расположенных в кольцевой камере, с магнитной системой инструмента, количества и углового расположения источников магнитного поля, дополнительного магнитного воздействия на поверхностный слой ферромагнитной детали, *позволяющая рассчитать* величину жесткости магнитной связи деформирующих шаров с магнитной системой комбинированного инструмента, *установить* взаимосвязь указанного параметра с величиной действующей на деформирующие шары магнитной силы, создаваемой источниками магнитного поля комбинированного инструмента и намагниченным поверхностным слоем ферромагнитной детали, с количеством и угловым расположением источников магнитного поля и, как следствие, установить параметры комбинированного инструмента с учетом требуемых характеристик качества поверхности упрочняемой нежесткой ферромагнитной детали.

3. Математическая модель процесса упругопластической деформации микронеровностей поверхности ферромагнитной детали деформирующим шаром при совмещенной магнитно-динамической обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием, *отличающаяся* учетом комплексного магнитно-силового воздействия на материал упрочняемой ферромагнитной детали, *позволяющая рассчитать* глубину внедрения деформирующего шара в упрочняемую поверхность нежесткой ферромагнитной детали и глубину упрочненного поверхностного слоя, *установить* взаимосвязь глубины внедрения деформирующего шара с параметрами комбинированного инструмента и режимами процесса совмещенного упрочнения и, как следствие, установить режимы совмещенного упрочнения с учетом требуемых характеристик качества поверхностного слоя ферромагнитной детали.

4. Математическая модель процесса формирования шероховатости поверхности нежесткой ферромагнитной детали при совмещенной магнитно-динамической обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием, *отличающаяся* учетом комплексного магнитно-силового воздействия, *позволяющая рассчитать* величину шероховатости упрочненной поверхности, *установить* ее взаимосвязь с высотой исходной шероховатости упрочняемой поверхности, массой деформирующего шара, скоростью взаимодействия деформирующего шара

с поверхностью детали, диаметральными размерами деформирующего шара и упрочняемой поверхности, подачей комбинированного инструмента и тем самым обеспечить прогнозирование параметров качества упрочняемой поверхности.

5. Результаты экспериментальных исследований влияния параметров и режимов процесса совмещенной магнитно-динамической обработки на качество поверхностного слоя упрочняемых нежестких ферромагнитных деталей, *позволившие* установить, что совмещенное энергетическое воздействие на поверхность нежестких ферромагнитных деталей вращающегося магнитного поля и импульсно-ударного деформирования *обеспечивает* снижение исходной шероховатости поверхности ферромагнитных деталей, повышение точности обработки и удельной маслостойкости поверхности, упрочнение поверхности ферромагнитных деталей, формирование наноструктурированного поверхностного слоя с мелкодисперсной субзернистой структурой наноразмерного диапазона, характеризующегося увеличением плотности дислокаций и остаточных напряжений сжатия, обеспечивающих в совокупности кратное повышение износостойкости упрочненных поверхностей нежестких ферромагнитных деталей.

Личный вклад соискателя ученой степени

Концептуальная проработка направлений исследований и обсуждение их результатов проводились совместно с научным консультантом членом-корреспондентом НАН Беларуси, заслуженным деятелем науки Республики Беларусь, лауреатом Государственной премии БССР, доктором технических наук, профессором В. К. Шелегом. Соискателем лично выполнены постановка цели и задач исследований, выбор методологии их решения и получены все научные результаты, вошедшие в диссертацию. Основные теоретические и экспериментальные исследования, приведенные в диссертации, выполнены соискателем лично или под его научным руководством. Опубликованные по теме диссертации работы написаны соискателем после анализа и обсуждения полученных результатов исследований с соавторами работ.

На все совместно опубликованные с соавторами работы в диссертации и автореферате приведены ссылки. Математическое моделирование процессов совмещенной магнитно-динамической обработки поверхностей нежестких ферромагнитных деталей проводилось совместно с к. т. н. Н. А. Левановичем, проведение экспериментальных исследований шероховатости поверхности, размерной и геометрической точности, характеристик качества и эксплуатационных свойств упрочненного поверхностного слоя деталей – совместно с к. т. н. Д. М. Свирепой, к. т. н. С. А. Сухоцким, старшим преподавателем И. А. Тарадейко.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 42 международных научно-технических конференциях: на Международной научно-технической конференции «Современные направления развития производственных технологий и робототехника» (г. Могилев, 1999 г.); на Международной научно-технической конференции «Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов» (г. Могилев, 2001 г.); на Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование» (г. Могилев, 2003 г.); на Международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (г. Могилев, 2011 г.); на Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборострое-

нии» (г. Минск, 2012 г.); на международных научно-технических конференциях «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, 2004, 2005 гг., 2007–2021 гг., 2023, 2024 гг.); на Международной научно-технической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Минск, 2018, 2021 гг.); Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии и инновации» (г. Белгород, 2019 г.), на 1-й Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы науки и техники» (г. Сарапул, 2021 г.); на Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в машиностроении» (г. Новополюцк, 2023 г.).

Инструменты для совмещенной магнитно-динамической обработки поверхностей ферромагнитных деталей были представлены на Республиканской выставке «Инновации для машиностроения» (БелИСА, Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь, г. Минск, 13 декабря 2013 г.), технология комбинированной магнитно-динамической отделочно-упрочняющей обработки экспонировалась на Петербургской технической ярмарке (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 12–14 марта 2014 г.) (отмечена дипломом первой степени с вручением золотой медали в номинации «Лучший инновационный проект в области машиностроения и металлургии»), технология и инструменты для магнитно-динамической отделочно-упрочняющей обработки представлялись на 11-м Международном конкурсе энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий и оборудования (Белорусский промышленный форум, г. Минск, 21 мая 2014 г.), Белорусском промышленном форуме (г. Минск, 12–15 мая 2015 г.), Вьетнамской международной торговой ярмарке «Вьетнам ЭКСПО-2016» (г. Ханой, Вьетнам, 13–16 апреля 2016 г.), национальной экспозиции Республики Беларусь на Ганноверской международной промышленной ярмарке HANNOVER MESSE 2016 (г. Ганновер, ФРГ, 25–29 апреля 2016 г.), Харбинской международной торгово-экономической ярмарке (г. Харбин, Китай, 15–19 июня 2016 г.), технология совмещенной магнитно-динамической обработки в специальной технологической среде экспонировалась на Международной выставке «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции (Hi-Tech)» (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 12–14 марта 2019 г.), где отмечена специальным призом и дипломом в номинации «Лучший инновационный проект в области машиностроения и металлургии, металлообработки», а также представлялась на Международной выставке машиностроения, металлообработки, автоматизации, электроники, производственных материалов и новых технологий «TECH INDUSTRY 2019» (г. Рига, Латвийская Республика, 28–30 ноября 2019 г.), на выставке научно-технических разработок в рамках визита Главы государства (г. Каир, Египет, 19–29 февраля 2020 г.), на 18-й Международной выставке технологий, оборудования и материалов для обработки поверхности и нанесения покрытий «ExpoCoating Moscow 2020» (г. Москва, Российская Федерация 27–29 октября 2020 г.), на 20-й Международной специализированной выставке «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Казань» (г. Казань, Российская Федерация, 2–10 декабря 2020 г.), на 19-й Международной выставке технологий, оборудования и материалов для обработки поверхности, нанесения покрытий и гальванических производств «ExpoCoating Moscow 2021» (г. Москва, Российская Федерация, 26–28 октября 2021 г.), на 21-й Международной специализированной выставке «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Казань» (г. Казань, Российская Федерация, 1–3 декабря 2021 г.).

Разработанные технологические процессы совмещенной магнитно-динамической обработки и инструменты для их осуществления внедрены в производство ОАО «МЗКТ», УЧНП «Технолит», ЗАО «Могилевский инструментальный завод», УЧПП «Стройремавто», ОАО «БелХорс», ООО «СКБ ДалС», АО «Электромеханика» (РФ) для отделочно-упрочняющей обработки поверхностей нежестких ферромагнитных деталей с фактическим годовым экономическим эффектом 62 500 долл. США.

Результаты исследования диссертационной работы внедрены в учебный процесс Белорусско-Российского университета и используются в лабораторном практикуме по дисциплинам «Конструирование и расчет технологического оборудования», «Технология механической и физико-технической обработки» при подготовке инженеров по специальности 1–36 01 03 – Технологическое оборудование машиностроительного производства.

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 143 научные работы: монография (единолично, общий объем – 17 авторских листов); 35 статей в рецензированных журналах, рекомендованных ВАК для публикаций результатов диссертационных исследований (общий объем – 12,7 авторского листа); 42 тезиса докладов на международных научно-технических конференциях; 65 патентов на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, семи глав, заключения, списка использованных источников из 319 наименований, приложения (содержит 16 приложений), представленного в виде самостоятельного документа (отдельной книги). Работа изложена на 303 страницах машинописного текста, содержит 28 таблиц и 111 рисунков. Объем приложения составляет 165 страниц. Приложение содержит примеры параметров расчета параметров процесса совмещенной магнитно-динамической обработки, результаты исследований, расчеты технико-экономической эффективности, акты о практическом использовании результатов работы, дипломы республиканских и международных выставок, информационные листки разработанных технологий совмещенной обработки, основные патенты на изобретения, описания и чертежи комбинированных инструментов.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава посвящена комплексному анализу проблемы повышения характеристик качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств поверхностей нежестких ферромагнитных деталей и выявлению путей ее решения.

Приведен анализ существующих статических и динамических методов отделочно-упрочняющей обработки внутренних и наружных цилиндрических поверхностей нежестких ферромагнитных деталей, выявлены их преимущества и недостатки.

Установлено, что наиболее эффективными являются динамические методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностей нежестких ферромагнитных деталей (вибронакатывание, обработка дробью, безабразивная ультразвуковая финишная, центробежно-ударная, пневмоцентробежная, импульсно-ударная, пневмовибродинамическая обработки).

Автором предложен системный подход к классификации динамических методов, применяемых для отделочно-упрочняющей обработки поверхностей нежестких ферромагнитных деталей, учитывающий вид связи деформирующих элементов с корпусом инструмента, количество деформирующих элементов инструмента, способ сообщения

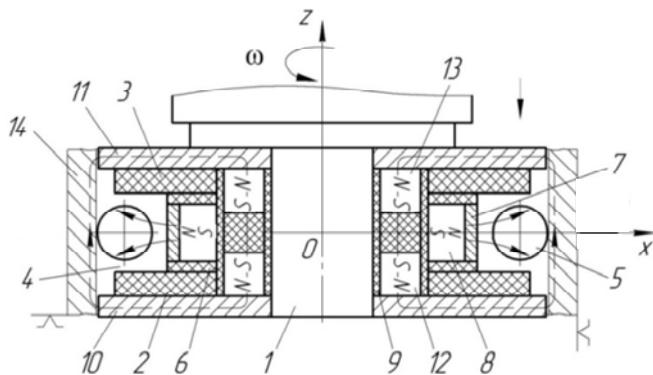
деформирующим шаром кинетической энергии, вид энергетического воздействия на упрочняемую поверхность. Разработанная классификационная схема и проведенный анализ технологических возможностей существующих динамических методов отделочно-упрочняющей обработки поверхностей нежестких ферромагнитных деталей позволил сделать следующие выводы: для реализации известных динамических методов отделочно-упрочняющей обработки необходимо применение специального дорогостоящего оборудования, инструментов, дополнительных высокоскоростных приводов вращения инструмента; известные методы динамического упрочнения не предусматривают комплексного энергетического воздействия на поверхность ферромагнитной детали с целью получения поверхностного слоя с высокими характеристиками качества и эксплуатационными свойствами.

В главе обоснована актуальность разработки инновационных методов отделочно-упрочняющей обработки, основанных на комплексном энергетическом воздействии на поверхностный слой нежестких ферромагнитных деталей вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием, сформулирована цель работы и определены необходимые для ее достижения задачи.

Во второй главе разработаны теоретические основы *процесса* совмещенной магнитно-динамической обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием.

Разработаны математические модели процесса совмещенной магнитно-динамической обработки (СМДО) для различных видов упрочняемых поверхностей и разновидностей действующего на поверхностный слой ферромагнитной детали вращающегося магнитного поля:

1. *Математическая модель процесса СМДО поверхности отверстия вращающимся постоянным магнитным полем и импульсно-ударным деформированием* (рисунок 1).



- 1 – оправка; 2, 3 – диски; 4 – кольцевая камера; 5 – ферромагнитные деформирующие шары; 6 – обойма; 7 – цилиндрические магнитопроводы; 8 – цилиндрические постоянные магниты; 9 – втулка; 10, 11 – кольцевые магнитопроводы; 12, 13 – цилиндрические постоянные магниты; 14 – упрочняемая нежесткая ферромагнитная деталь

Рисунок 1 – Схема совмещенной магнитно-динамической обработки внутренней поверхности отверстия нежесткой ферромагнитной детали вращающимся постоянным магнитным полем и импульсно-ударным деформированием

Дифференциальные уравнения, описывающие кинематику движения деформирующихся шаров в магнитном поле для рассматриваемой схемы совмещенной магнитно-динамической обработки, имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} m\ddot{x} = \varphi(r) \left(\frac{\rho \cdot \cos(\varphi_0 + \omega t) - x}{r} \right) + \varphi(\ell) \left(\frac{x - \rho \cdot \cos\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{2\pi}{n}\right)}{\ell} \right) + \\ + \varphi(R) \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} - f \cdot mg \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}; \\ m\ddot{y} = \varphi(r) \left(\frac{y - \rho \cdot \sin(\varphi_0 + \omega t)}{r} \right) + \varphi(\ell) \left(\frac{y - \rho \cdot \sin\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{2\pi}{n}\right)}{\ell} \right) + \\ + \varphi(R) \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} - f \cdot mg \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}; \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\varphi(r) = a_1 \cdot e^{b_1 r}; \quad \varphi(\ell) = a_2 \cdot e^{b_2 \ell}; \quad \varphi(R) = a_3 \cdot e^{b_3(R_D - R)},$$

где m – масса деформирующего шара, кг; $\varphi(r)$, $\varphi(\ell)$, $\varphi(R)$ – скалярные функции; r , R , ℓ , ρ – модули радиус-векторов, м; x , y – координаты геометрического центра деформирующегося шара, м; ω – угловая скорость вращения источников магнитного поля, рад/с; t – время движения деформирующего шара, с; φ_0 – начальное смещение системы источников магнитного поля относительно координатной оси Ox , определяющее начальное положение вектора ρ , град; n – число источников магнитного поля; \dot{x} , \dot{y} – проекции вектора скорости деформирующего шара, м/с; a_1 , b_1 , a_2 , b_2 , a_3 , b_3 – эмпирические коэффициенты; R_D – радиус обрабатываемой детали, м.

Для определения кинематических характеристик деформирующего шара в момент его взаимодействия с поверхностью нежесткой ферромагнитной детали (рисунки 2 и 3) получены следующие зависимости:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_x = -K\dot{x} \cdot (\cos(\alpha_1 + \alpha_2) + \sin(\alpha_1 + \alpha_2)); \\ u_y = -K\dot{y} \cdot (\sin(\alpha_1 + \alpha_2) + \cos(\alpha_1 + \alpha_2)). \end{array} \right. \quad (2)$$

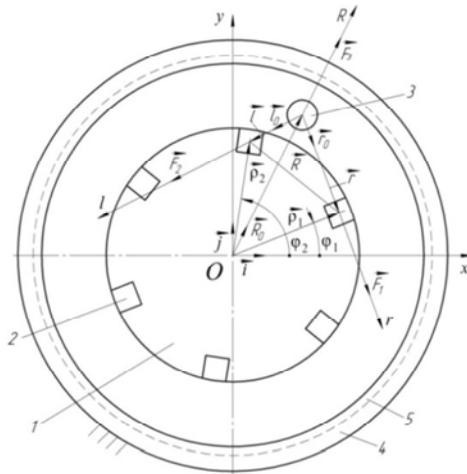
$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{1}{K} \operatorname{tg} \alpha_1;$$

$$\varphi_R = \operatorname{arctg} \frac{y}{x}; \quad \beta = \operatorname{arctg} \frac{\dot{y}}{\dot{x}};$$

$$\alpha_1 = \beta - \varphi_R; \quad \alpha_2 = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{K} \right),$$

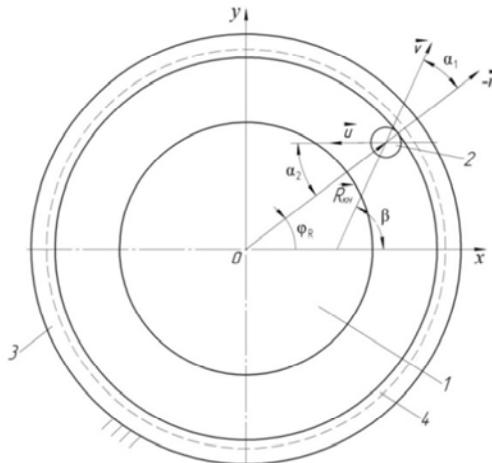
где u_x , u_y – проекции вектора скорости деформирующего шара на оси Ox и Oy , м/с; K – коэффициент восстановления при ударе; α_1 , α_2 – углы падения и отражения деформирующегося шара соответственно; φ_R – угол между положительным направлением оси Ox

и радиус-вектором R ($0 \leq \varphi_R < 2\pi$); β – угол между положительным направлением оси Ox и вектором скорости деформирующего шара ($0 \leq \beta \leq 2\pi$).



1 – обойма магнитной системы инструмента; 2 – источник магнитного поля;
3 – ферромагнитный деформирующий шар; 4 – жесткая ферромагнитная деталь;
5 – намагниченный поверхностный слой ферромагнитной детали

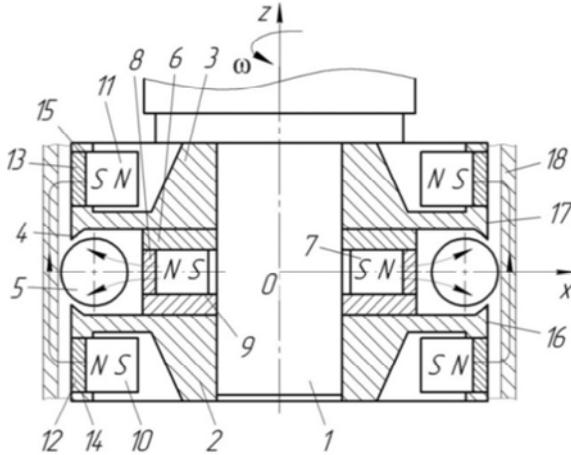
Рисунок 2 – Схема движения деформирующего шара от магнитной системы инструмента до намагниченной поверхности детали



1 – обойма магнитной системы инструмента; 2 – деформирующий шар;
3 – обрабатываемая деталь; 4 – намагниченный поверхностный слой детали;
 $\vec{R}_{кон}$ – радиус-вектор, определяющий положение деформирующего шара при ударе

Рисунок 3 – Схема ударного взаимодействия деформирующего шара с намагниченной поверхностью ферромагнитной детали

2. Математическая модель процесса СМДО поверхности отверстия вращающимся переменным магнитным полем и импульсно-ударным деформированием (рисунок 4).

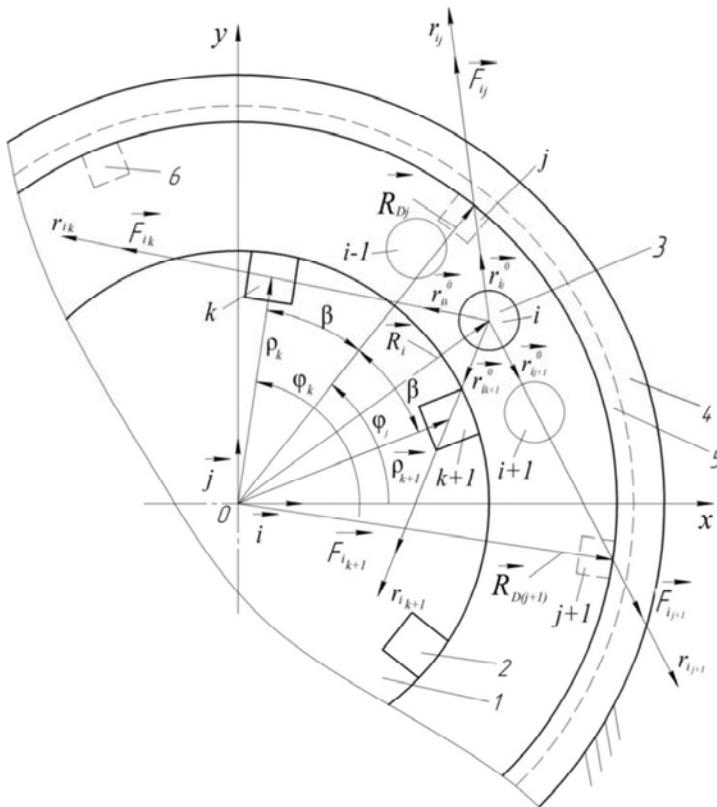


1 – оправка; 2, 3 – диски; 4 – кольцевая камера; 5 – ферромагнитные деформирующие шары; 6 – обойма магнитной системы инструмента; 7 – цилиндрические постоянные магниты; 8 – магнитопроводы; 9 – радиальные отверстия; 10, 11 – цилиндрические постоянные магниты; 12, 13 – магнитопроводы; 14, 15 – радиальные отверстия; 16, 17 – цилиндрические поверхности; 18 – упрочняемая нежесткая ферромагнитная деталь
 Рисунок 4 – Схема совмещенной магнитно-динамической обработки поверхности отверстия нежесткой ферромагнитной детали вращающимся переменным магнитным полем и импульсно-ударным деформированием

Получена система дифференциальных уравнений, описывающих кинематику движения деформирующих шаров для рассматриваемой схемы совмещенной обработки (в соответствии с расчетной схемой, представленной на рисунке 5):

$$\left\{ \begin{aligned} m\ddot{x}_i &= \varphi(R) \left(\frac{x_i - R_D \cos \varphi_j}{r_{ij}} + \frac{R_D \cos(\varphi_j - 2\beta) - x_i}{r_{i(j+1)}} \right) + \\ &+ \varphi(r) \left(\frac{x_i - \rho \cos \varphi_k}{r_{ik}} + \frac{x_i - \rho \cos(\varphi_k - 2\beta)}{r_{i(k+1)}} \right) - fmg \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}; \\ m\ddot{y}_i &= \varphi(R) \left(\frac{R_D \sin \varphi_j - y_i}{r_{ij}} + \frac{y_i - R_D \sin(\varphi_j - 2\beta)}{r_{i(j+1)}} \right) + \\ &+ \varphi(r) \left(\frac{\rho \sin \varphi_k - y_i}{r_{ik}} + \frac{y_i - \rho \sin(\varphi_k - 2\beta)}{r_{i(k+1)}} \right) - fmg \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где m – масса деформирующего шара, кг, $\varphi(r)$, $\Phi(R)$ – скалярные функции, определяющие модуль силы магнитного взаимодействия деформирующего шара с источниками магнитного поля, при их относительном расположении на расстояниях r_{ik} , $r_{i(k+1)}$, r_{ij} , $r_{i(j+1)}$; x_i , y_i – координаты геометрического центра соответствующего деформирующего шара, м; R_D – радиус обрабатываемой детали, м; φ_k , φ_j – углы, определяющие положение геометрических центров соседних источников магнитного поля инструмента, град; β – угол между соседними источниками магнитного поля инструмента, град; f – коэффициент трения скольжения; g – ускорение свободного падения, м/с²; \dot{x} , \dot{y} – проекции вектора скорости деформирующего шара, м/с.



1 – обойма; 2 – источники магнитного поля, сообщающие деформирующему шару рабочее движение; 3 – деформирующий шар; 4 – деталь; 5 – намагниченный поверхностный слой детали; 6 – источники магнитного поля, осуществляющие намагничивание детали

Рисунок 5 – Схема движения деформирующего шара от магнитной системы инструмента до поверхности детали

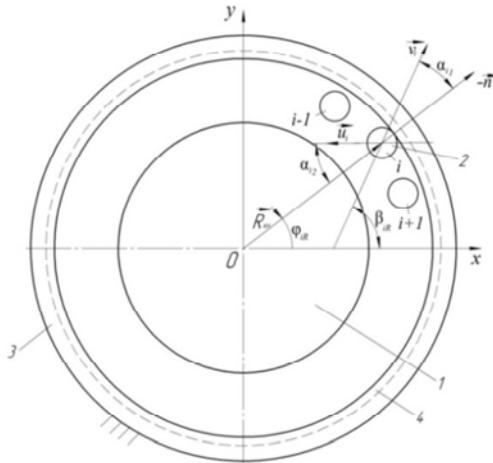
В соответствии с рисунком 6 получены зависимости проекции скорости деформирующего шара после удара о деталь:

$$\begin{cases} u_{ix} = -K\dot{x}_{iКН} \cdot (\cos(\alpha_{i1} + \alpha_{i2}) + \sin(\alpha_{i1} + \alpha_{i2})); \\ u_{iy} = -K\dot{y}_{iКН} \cdot (\sin(\alpha_{i1} + \alpha_{i2}) + \cos(\alpha_{i1} + \alpha_{i2})), \end{cases} \quad (4)$$

где u_{ix}, u_{iy} – проекции вектора скорости i -го деформирующего шара после удара о деталь на оси Ox и Oy , м/с; K – коэффициент восстановления при ударе; $\dot{x}_{iКН}, \dot{y}_{iКН}$ – проекции вектора скорости деформирующего шара на оси Ox и Oy в конечный момент фазы движения деформирующего шара от магнитной системы к детали, м/с; α_{i1} – угол падения i -го деформирующего шара, град; α_{i2} – угол отражения i -го деформирующего шара, град;

$$\begin{aligned} \alpha_{i1} &= \beta_{iR} - \varphi_{iR} ; & \beta_{iR} &= \arctg \frac{\dot{y}_{iКН}}{\dot{x}_{iКН}} ; \\ \varphi_{iR} &= \arctg \frac{y_{iКН}}{x_{iКН}} ; & \text{tg } \alpha_{i2} &= \frac{1}{K} \text{tg } \alpha_{i1} , \end{aligned}$$

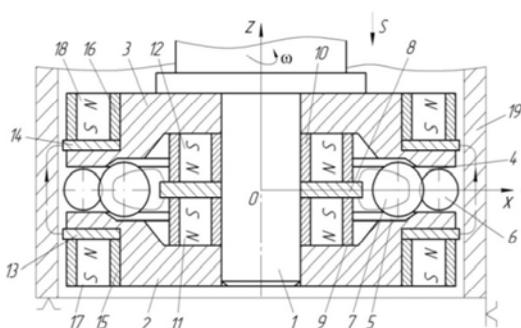
где β_{iR} – угол между положительным направлением оси Ox и вектором скорости деформирующего шара, град; φ_{iR} – угол между положительным направлением оси Ox и радиус-вектором $R_{iКН}$, град.



**1 – магнитная система комбинированного инструмента;
2 – ферромагнитный деформирующий шар; 3 – обрабатываемая жесткая ферромагнитная деталь; 4 – немагнитный поверхностный слой детали**

Рисунок 6 – Схема соударения деформирующего шара с обрабатываемой поверхностью

3. Математическая модель процесса СМДО поверхности отверстия вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием, осуществляемым за счет кинетической энергии приводных шаров комбинированного инструмента (рисунок 7).



1 – оправка; 2, 3 – шайбы;
4, 5 – кольцевые камеры;
6 – деформирующие шары;
7 – ферромагнитные приводные шары; 8 – магнитопроводный диск; 9, 10 – обоемы;
11, 12 – цилиндрические постоянные магниты;
13, 14 – кольцевые магнитопроводы; 15, 16 – втулки;
17, 18 – цилиндрические постоянные магниты; 19 – нежесткий ферромагнитный цилиндр

Рисунок 7 – Схема совмещенной магнитно-динамической обработки внутренней поверхности отверстия вращающимся постоянным магнитным полем и импульсно-ударным деформированием, осуществляемым за счет кинетической энергии приводных шаров инструмента

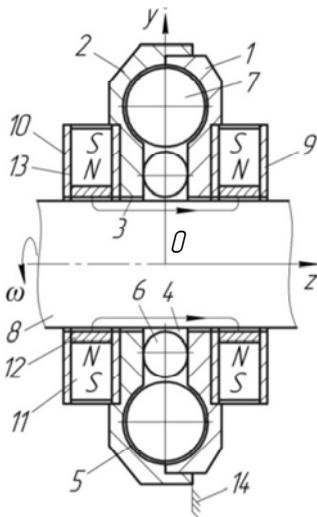
Получена система дифференциальных уравнений, описывающая кинематику движения приводного шара инструмента:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \omega^2 x + 2\omega \cdot \dot{y} - \frac{3\mu_0 p_{m1} p_{m2}}{2\pi \cdot m_1} F_M(x) - fg \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}; \\ \ddot{y} = -2\omega \cdot \dot{x} - fg \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}, \end{cases} \quad (5)$$

где ω – угловая скорость вращения магнитной системы, рад/с; x – координата геометрического центра приводного шара, м; \dot{x}, \dot{y} – проекции вектора скорости приводного шара, м/с; μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; p_{m1} – магнитный момент элементарного постоянного магнита, $A \cdot m^2$; p_{m2} – магнитный момент приводного шара, $A \cdot m^2$; $F_M(x)$ – сила магнитного притяжения приводного шара к магнитной системе, Н; m_1 – масса приводного шара, кг; f – коэффициент трения скольжения; g – ускорение свободного падения, m/c^2 .

Получены система уравнений для определения силы магнитного притяжения приводного шара к магнитной системе инструмента, выражение для вычисления проекций скорости приводного шара в момент взаимодействия с деформирующим шаром, зависимости для определения скорости приводного и деформирующих шаров после ударного взаимодействия.

4. Математическая модель процесса СМДО наружной цилиндрической поверхности вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием (рисунок 8).



- 1, 2 – диски;
- 3 – центральное отверстие;
- 4, 5 – кольцевые камеры;
- 6 – ферромагнитные деформирующие шары;
- 7 – шары-отражатели;
- 8 – нежесткий ферромагнитный вал;
- 9, 10 – кольца;
- 11 – цилиндрические постоянные магниты;
- 12 – цилиндрические магнитопроводы;
- 13 – радиальные отверстия;
- 14 – держатель

Рисунок 8 – Схема совмещенной магнитно-динамической обработки наружной цилиндрической поверхности нежесткого ферромагнитного вала вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием

Получены уравнения для определения проекции скорости деформирующего шара на оси Ox и Oy в момент его ударного взаимодействия с поверхностью нежесткого ферромагнитного вала:

$$\dot{y}_k = v_{1y} + 2\omega(r_H - OC); \quad (6)$$

$$\dot{x}_k = \sqrt{v_{1x}^2 + 5\omega^2(r_H^2 - OC^2) + 2B(r_H - OC)}, \quad (7)$$

где v_{1y} , v_{1x} – проекции скорости на оси Ox и Oy в момент окончания удара деформирующего шара о шар-отражатель, м/с; ω – угловая скорость вращения намагниченного ферромагнитного вала, рад/с; r_H – начальное расстояние между геометрическими центрами детали и деформирующего шара, м; OC – промежуточное (текущее значение) расстояние между геометрическими центрами детали и деформирующего шара, м,

$$OC = OC_0 - r_1 - r_3 + h,$$

где OC_0 – расстояние между геометрическими центрами детали и шара-отражателя, м; r_1 – радиус деформирующего шара, м; r_3 – радиус шара-отражателя, м;

h – натяг между деформирующим шаром и шаром-отражателем, м;

$$B = 2\omega_1 v_y - 4\omega^2 OC - \omega_1^2 r_H,$$

где ω_1 – угловая скорость вращения вала в момент отрыва деформирующего шара от намагниченной поверхности, рад/с.

Решение численными методами полученных дифференциальных уравнений, описывающих движение деформирующих шаров в магнитном поле, полученных в результате моделирования процесса совмещенной магнитно-динамической обработки (применительно к виду упрочняемой поверхности и разновидности действующего вращающегося магнитного поля), позволяет определить скорость деформирующих шаров в момент их взаимодействия с упрочняемой поверхностью детали во всем диапазоне устанавливаемых режимов (указанная скорость входит в математические выражения для расчета высоты шероховатости поверхности и глубины упрочненного поверхностного слоя, позволяющие прогнозировать характеристики качества упрочняемой ферромагнитной детали).

Разработана динамическая модель комбинированного инструмента для совмещенной магнитно-динамической обработки поверхности отверстия нежесткой ферромагнитной детали (в соответствии с расчетной схемой, изображенной на рисунке 9), где ω_1 – угловая скорость корпуса магнитной системы, рад/с; ω_K – угловая скорость качения деформирующего шара по упрочняемой поверхности отверстия детали, рад/с; F_{TP1}, F_{TP2} – силы трения скольжения, Н; N_2, N_D – нормальные реакции соответствующих опор, Н; V_C – скорость центра масс деформирующего шара, м/с; P_D – необходимая сила деформирования, Н; F_{Mx}, F_{My}, F_{Mz} – проекции магнитной силы, Н; M_{TP} – момент сопротивления качению, Н·м.

Получено уравнение, описывающее динамику элементов технологической системы, учитывающее жесткость связи деформирующих шаров с магнитной системой комбинированного инструмента:

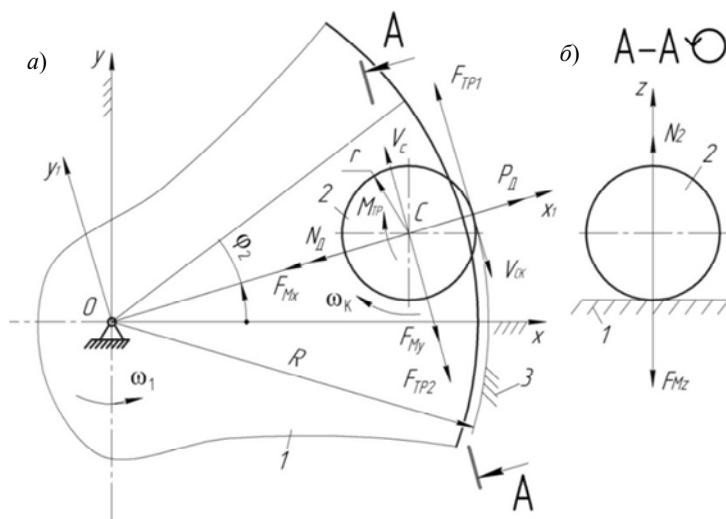
$$\begin{aligned} A_1 \ddot{\varphi}_2 + A_2 \dot{\varphi}_2 + A_3 \varphi_2^2 + C_M \sum_{i=0}^{k-1} \sin\left(\frac{z_M}{2} \varphi_2 + i \cdot \varphi_{III}\right) = \\ = -kb\dot{\varphi}_1 - F_{Mx} R \left(f_1 + \frac{\mu}{r}\right) - (F_{My} + f_2 F_{Mz}) OC; \end{aligned} \quad (8)$$

где φ_1, φ_2 – обобщенные координаты (углы поворота корпуса магнитной системы инструмента и геометрического центра деформирующего шара соответственно), рад;

$$A_1 = km_{III} \left(OC^2 + \frac{2R^2}{5} \right); \quad A_2 = kb; \quad A_3 = -k \cdot m_{III} \cdot OC \cdot K_{об} \cdot R \left(f_1 + \frac{\mu}{r} \right);$$

k – количество деформирующих шаров инструмента; m_{III} – масса деформирующего шара, кг; OC – расстояние между геометрическими центрами магнитной системы инструмента

и деформирующего шара, м; R – радиус обрабатываемой детали, м; b – коэффициент демпфирования, Н·с/м; $K_{об}$ – обобщенный коэффициент; f_1 – коэффициент трения скольжения деформирующего шара о поверхность детали; μ – коэффициент трения качения, м; r – радиус деформирующего шара, м; C_M – коэффициент жесткости связи деформирующего шара с магнитной системой инструмента, Н/м; z_M – количество цилиндрических постоянных магнитов инструмента; φ_{III} – центральный угол, определяющий взаимное положение деформирующих шаров, рад; f_2 – коэффициент трения скольжения деформирующего шара о корпус инструмента.



1 – корпус магнитной системы инструмента; 2 – ферромагнитный деформирующий шар; 3 – упрочняемая ферромагнитная деталь
Рисунок 9 – Схема механической системы с изображением действующих на нее непотенциальных сил: а – общий вид схемы; б – сечение А–А

Решение уравнения (8) численными методами позволяет определить требуемую величину коэффициента жесткости связи C_M деформирующего шара с магнитной системой инструмента для их асинхронного или согласованного движения, а затем выбрать параметры источников магнитного поля (цилиндрических постоянных магнитов) для его обеспечения.

Разработана математическая модель процесса упругопластической деформации микронеровностей поверхности детали деформирующим шаром при совмещенной магнитно-динамической обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием. Получена математическая зависимость для расчета глубины внедрения гладкого деформирующего шара в упрочняемую поверхность нежесткой ферромагнитной детали:

$$h_{\text{вн}} = \frac{8}{3} \cdot \frac{\rho \cdot R_{\text{ш}}^2 (U_n - V_n) \cdot 100 \%}{q \cdot T_n \cdot t_{pk}} \cdot k_M, \quad (9)$$

где ρ – плотность материала деформирующего шара, кг/м^3 ; $R_{\text{ш}}$ – радиус деформирующего шара, м; V_n , U_n – нормальная скорость деформирующего шара до и после удара соответственно (до и после взаимодействия с упрочняемой поверхностью нежесткой детали), м/с; q – среднее давление в контакте, МПа; T_n – время нормального удара деформирующего шара о поверхность детали, с; t_{pk} – относительная опорная длина профиля исходной шероховатости поверхности детали, %; k_M – коэффициент пропорциональности, учитывающий величину индукции действующего на поверхность ферромагнитной детали вращающегося магнитного поля, $k_M = 1, 10-1, 30$.

Разработана математическая модель процесса формирования шероховатости поверхности при совмещенной магнитно-динамической обработке, получена математическая зависимость для расчета величины шероховатости поверхности, позволяющая прогнозировать характеристики качества упрочняемой детали:

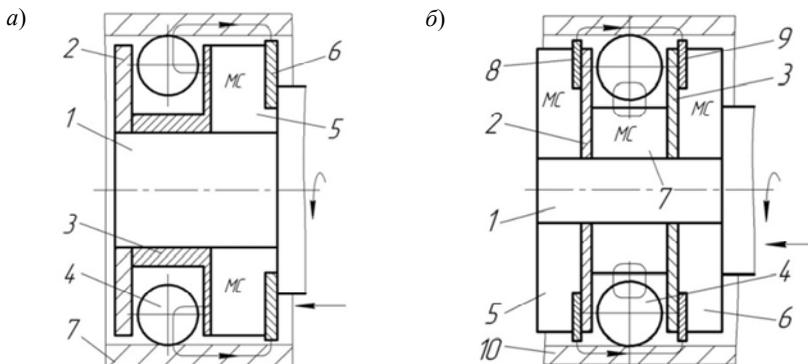
$$Rz_{\text{тр}} = Rz_{\text{исх}} - \frac{4}{3} \left(\frac{5}{4} \cdot \frac{mV_n^2}{K} \right)^{\frac{2}{5}} + \frac{S^2}{8R_{\text{ш}}}, \quad (10)$$

где $Rz_{\text{тр}}$, $Rz_{\text{исх}}$ – требуемая (полученная) и исходная шероховатость поверхности упрочняемой детали соответственно, м; m – масса деформирующего шара, кг; V_n – нормальная скорость шара при взаимодействии с упрочняемой поверхностью детали, м/с; S – подача комбинированного инструмента, м/об; $R_{\text{ш}}$ – радиус деформирующего шара, м; K – коэффициент пропорциональности.

Получено математическое выражение для определения глубины упрочненного поверхностного слоя, необходимое для прогнозирования параметров качества совмещенной обработки.

В третьей главе разработаны методы совмещенной магнитно-динамической обработки поверхностей нежестких ферромагнитных деталей вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием (методы СМДО).

Метод совмещенной магнитно-динамической обработки. Согласно разработанному методу, в отверстии обрабатываемой ферромагнитной детали размещают деформирующие шары, свободно установленные в кольцевой камере инструмента, перемещаемого вдоль упрочняемой поверхности, деформирующим шаром сообщают вращение вокруг продольной оси отверстия нежесткой ферромагнитной детали и радиальные колебательные движения от вращающегося периодически действующего магнитного поля инструмента, одновременно на поверхностный слой ферромагнитной детали воздействуют вращающимся постоянным (патент RU 2068770) или переменным (патент RU 2089373) магнитным полем инструмента с индукцией 0,05–1,2 Тл, направление силовых линий которого периодически изменяют на 180° с частотой 4–1650 с^{-1} (рисунок 10).



- 1 – оправка; 2 – диск; 3 – стакан;
 4 – деформирующие шары;
 5 – магнитная система (МС);
 6 – кольцевой магнитопровод;
 7 – ферромагнитная деталь

- 1 – оправка; 2, 3 – диски;
 4 – деформирующие шары;
 5–7 – магнитные системы (МС);
 8, 9 – кольцевые магнитопроводы;
 10 – ферромагнитная деталь

Рисунок 10 – Схема реализации метода СМДО поверхности цилиндрического отверстия: а – с подводом магнитного поля к ферромагнитной детали через кольцевой магнитопровод и деформирующие шары; б – с подводом магнитного поля к ферромагнитной детали через кольцевые магнитопроводы от отдельной магнитной системы инструмента

Разработанный метод совмещенной магнитно-динамической обработки позволяет осуществить комплексное магнитно-силовое воздействие на поверхностный слой нежестких ферромагнитных деталей, обеспечить интенсивное снижение шероховатости поверхности, повышение характеристик качества поверхности и эксплуатационных свойств нежестких ферромагнитных деталей.

Метод совмещенной магнитно-динамической обработки в специальной технологической среде, схема реализации которого изображена на рисунке 11. Согласно методу, в зону

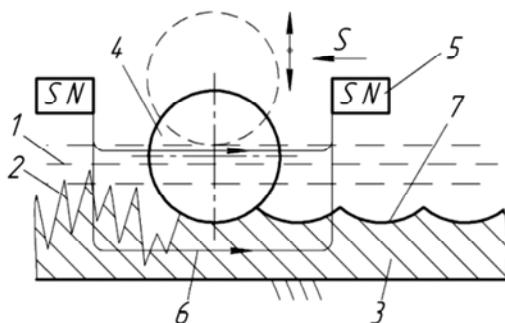


Рисунок 11 – Схема осуществления СМДО в специальной технологической среде

обработки поддают специальную технологическую среду 1 и воздействуют на обрабатываемую поверхность 2 нежесткой ферромагнитной детали 3 (далее – детали) деформирующими шарами 4, получающими энергию для импульсно-ударного деформирования от периодически действующего магнитного поля инструмента. Одновременно на деталь 3 воздействуют вращающимся магнитным полем с индукцией 0,05–1,2 Тл от источников магнитного поля 5, линии

индукции 6 которого располагают вдоль обрабатываемой поверхности 2. В качестве специальной технологической среды используют смесь, состоящую из соединений мягких металлов (окислы, оксиды, соли и т. п.) или их ультра- и мелкодисперсных порошков, а также веществ, восстанавливающих металлы и активизирующих процесс растворения химически стойких окислов металлов (глицерин + спирт C_2H_5OH + + 10 % раствор соляной кислоты). В процессе совмещенной магнитно-динамической обработки имеет место комплексное химико-магнитно-силовое воздействие на поверхность 2 обрабатываемой ферромагнитной детали 3, вызывающее интенсивное восстановление мягкого металла из его соединения, содержащегося в специальной технологической среде, и образование на детали 3 антифрикционного металлического покрытия (патент ВУ 22193).

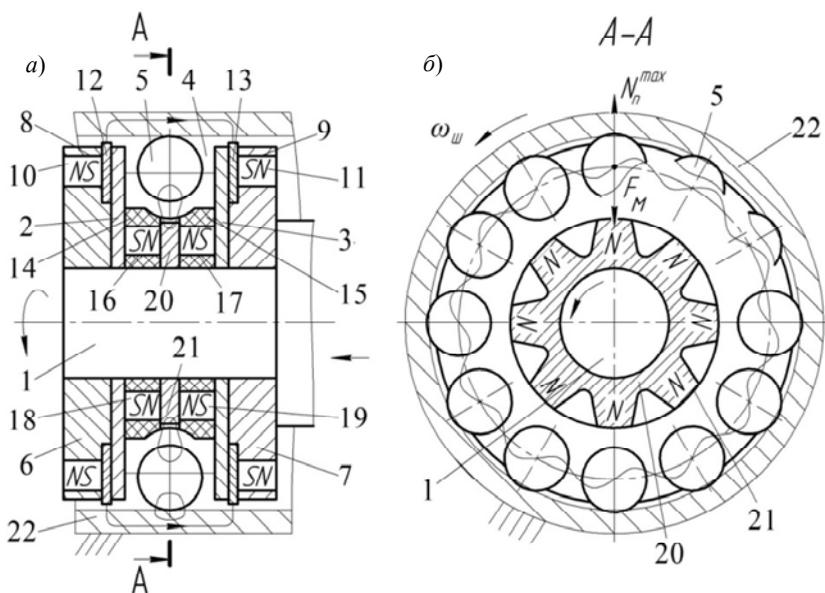
Отличительной особенностью СМДО в специальной технологической среде является то, что получаемое на поверхности детали антифрикционное металлическое покрытие формируется и упрочняется одновременно. Толщина антифрикционного металлического покрытия регулируется числом рабочих ходов инструмента, что открывает хорошие перспективы для применения метода в ремонтном производстве при восстановлении изношенных поверхностей деталей машин.

Для реализации методов СМДО внутренних, наружных цилиндрических и плоских поверхностей нежестких ферромагнитных деталей разработаны комбинированные инструменты, отличительной особенностью которых является наличие магнитных систем, проектируемых по модульному принципу с применением плоских, кольцевых и цилиндрических постоянных магнитов из редкоземельных материалов NdFeB (патенты ВУ 22193, 18302, 15263, RU 1801732).

На рисунке 12 изображен комбинированный инструмент для СМДО внутренней цилиндрической поверхности. В состав комбинированного инструмента входят следующие элементы: оправка 1; шайбы 2, 3; кольцевая камера 4; ферромагнитные деформирующие шары 5; две независимые магнитные системы. Магнитная система, обеспечивающая упрочняющее воздействие на поверхностный слой ферромагнитной детали вращающимся магнитным полем, включает диски 6, 7 с аксиальными отверстиями 8, 9, цилиндрические постоянные магниты 10, 11 и магнитопроводы 12, 13.

Магнитная система, предназначенная для сообщения деформирующим шарам 5 радиальных колебательных движений, осуществляющих многократное импульсно-ударное деформирование, содержит обоймы 14, 15 с аксиальными отверстиями 16, 17, цилиндрические постоянные магниты 18, 19, магнитопроводный диск 20 с периодической поверхностью 21 в виде синусоиды, выступов или зубьев. Оправка 1, шайбы 2, 3, диски 6, 7, обоймы 14 и 15 изготовлены из немагнитопроводных материалов.

Инструмент вводят в отверстие упрочняемой нежесткой ферромагнитной детали 22, вращают с угловой скоростью и перемещают с осевой подачей. Ферромагнитные деформирующие шары 5 под действием магнитного поля соответствующей магнитной системы получают окружное вращение относительно продольной оси отверстия упрочняемой детали 22 и радиальные колебания (за счет периодического действия магнитного поля, сфокусированного на зубьях магнитопроводного диска 20) с частотой 230–850 Гц и осуществляют многократное импульсно-ударное воздействие. Одновременно на поверхностный слой нежесткой ферромагнитной детали 22 действует вращающееся магнитное поле, обеспечивая совмещенное магнитно-динамическое упрочнение.



**Рисунок 12 – Комбинированный инструмент для СМДО внутренней цилиндрической поверхности нежестких ферромагнитных деталей:
а – общий вид; б – поперечное сечение**

В главе представлены рекомендации по расчету основных параметров инструмента. В частности, получены математические зависимости для расчета количества деформирующих шаров и числа зубьев магнитопровода комбинированного инструмента. Предложен алгоритм расчета режимов процесса СМДО с использованием дифференциальных уравнений, описывающих кинематику движения деформирующих шаров в магнитном поле, полученных в результате математического моделирования процесса совмещенной обработки.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям основных характеристик процесса СМДО.

Выполнены исследования характеристик магнитной системы и определены значения параметров магнитного поля, действующего на деформирующие шары комбинированного инструмента и упрочняемую поверхность ферромагнитной детали в зависимости от расстояния до источников магнитного поля.

Проведены исследования жесткости технологической системы при СМДО поверхности нежестких ферромагнитных деталей. Выявлено повышение жесткости технологической системы в 1,2–1,5 раза (вследствие действия радиально направленных и равномерно распределенных по периметру нежесткой детали магнитных сил, препятствующих возникновению упругих деформаций).

Выполнены исследования точности при совмещенной магнитно-динамической обработке. Получены экспериментальные зависимости изменения диаметрального размера внутренней поверхности нежестких втулок от частоты вращения инструмента. Диапазон изменения диаметрального размера внутренней поверхности нежестких втулок для деталей из стали 45 (190–200 HB) составил 17–26 мкм, из стали 45 (30–35 HRC) – 8–22 мкм при частоте вращения комбинированного инструмента в диапазоне 1600–4000 мин⁻¹.

Приведены результаты статистических исследований точности геометрической формы поперечного сечения тонкостенных ферромагнитных цилиндров, внутренняя поверхность которых получена растачиванием, а затем упрочнена алмазным выглаживанием или совмещенной магнитно-динамической обработкой. Установлено, что совмещенная магнитно-динамическая обработка обеспечивает повышение точности геометрической формы поперечного сечения тонкостенных стальных цилиндров по отношению к растачиванию и алмазному выглаживанию соответственно на 12 и 27 %.

Проведенные исследования стойкости деформирующих шаров усовершенствованного комбинированного инструмента (патент ВУ 19423), снабженного демпфирующим кольцом и накопителем смазочного материала, позволили установить, что период стойкости деформирующих шаров (определяемый допустимым значением увеличения исходной шероховатости сферической поверхности шаров) зависит от твердости упрочняемого материала и составляет при обработке деталей из стали 45 (180–200 HB) – 72,2 ч, а из стали 45 (30–35 HRC) – 57,4 ч. Установлено, что усовершенствованный комбинированный инструмент (по отношению к традиционным инструментам для импульсно-ударного деформирования) обеспечивает повышение стойкости деформирующих шаров в 9,5–11,1 раза и позволяет снизить уровень звука на 4–12 дБА.

Пятая глава посвящена исследованию шероховатости поверхности нежестких ферромагнитных деталей, упрочненных СМДО.

Выполнены экспериментальные исследования влияния параметров процесса СМДО (n , S , $d_{ш}$, высоты исходного микрорельефа, количества рабочих ходов комбинированного инструмента) на шероховатость поверхности упрочненных нежестких ферромагнитных деталей.

Определены значения частот вращения комбинированного инструмента, обеспечивающие минимальную шероховатость поверхности для деталей из сталей и серого чугуна с различной исходной шероховатостью при подаче инструмента 20 мм/мин, $d_{ш} = 12$ мм, $B = 0,130$ Тл (рисунок 13).

Диапазон исследуемых частот вращения комбинированного инструмента определяли на основе решения дифференциальных уравнений (1), полученных в результате моделирования процесса СМДО.

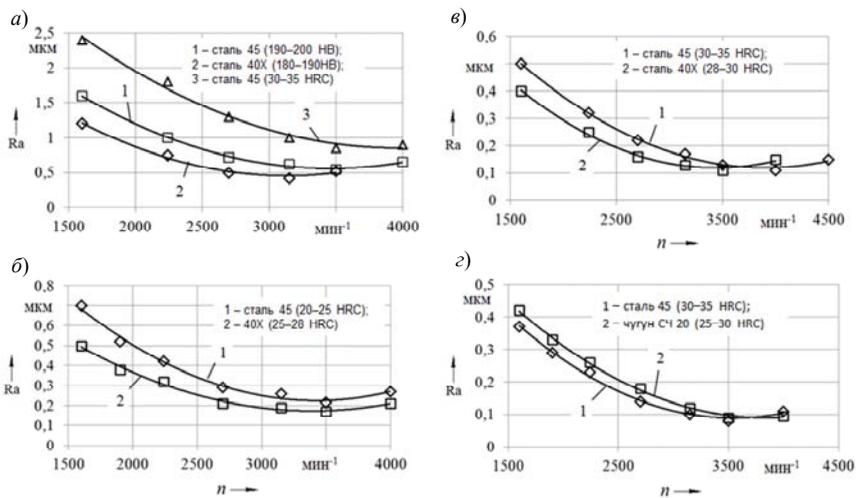


Рисунок 13 – Зависимость шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента при исходной шероховатости поверхности по параметру Ra :
a – 5,8–6,0 мкм; *б* – 1,0–1,2 мкм; *в* – 0,60–0,63 мкм; *г* – 0,35–0,40 мкм

Выявлено, что на шероховатость формируемой поверхности при СМДО влияет величина подачи комбинированного инструмента (рисунок 14).

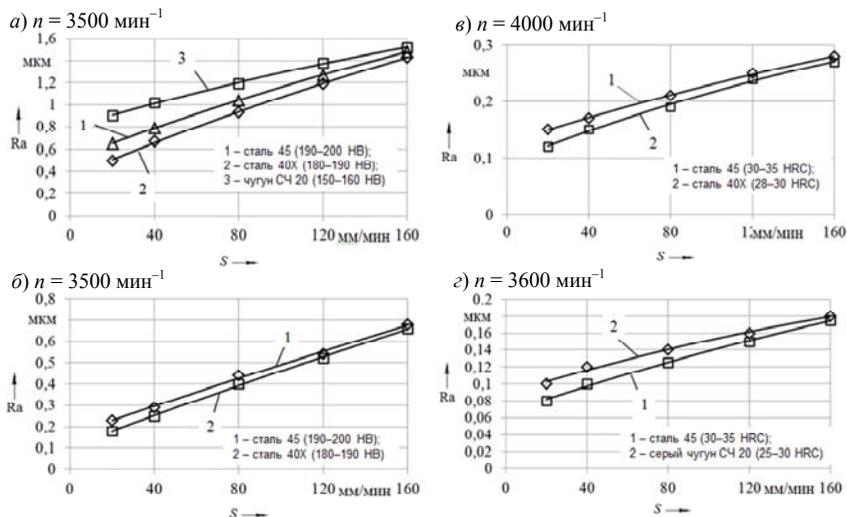


Рисунок 14 – Зависимость шероховатости поверхности от подачи комбинированного инструмента ($d_{ш} = 12$ мм; $B = 0,130$ Тл) при исходной шероховатости поверхности по параметру Ra :
a – 5,38–6,0 мкм; *б* – 1,0–1,2 мкм; *в* – 0,60–0,63 мкм; *г* – 0,35–0,40 мкм

Установлено, что при упрочнении поверхности деталей в диапазоне подач комбинированного инструмента от 20 до 160 мм/мин метод СМДО обеспечивает следующее снижение шероховатости поверхности: сталь 45 (190–200 НВ) – с $Ra_{исх}$ 5,8–6,2 до Ra 1,42–0,60 мкм; сталь 45 (20–25 HRC) – с $Ra_{исх}$ 1,0–1,2 до Ra 0,68–0,23 мкм; сталь 45 (30–35 HRC) – с $Ra_{исх}$ 0,60–0,63 до Ra 0,27–0,20 мкм; сталь 45 (30–35 HRC) – с $Ra_{исх}$ 0,35–0,40 до Ra 0,17–0,08 мкм; серый чугун СЧ20 (150–160 НВ) – с $Ra_{исх}$ 2,0–2,2 до Ra 1,1–0,4 мкм.

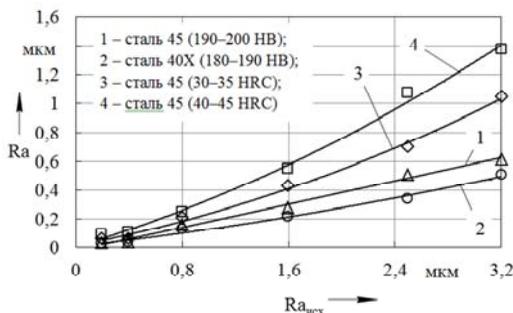


Рисунок 15 – Влияние исходной шероховатости деталей на шероховатость упрочненной поверхности: $S = 20$ мм/мин; $d_{ш} = 12$ мм; $n = 3150$ мин⁻¹; $B_{дет} = 0,130$ Тл

Проведена оптимизация параметров процесса СМДО. Получена зависимость шероховатости поверхности отверстия от основных параметров процесса СМДО (частоты вращения комбинированного инструмента, индукции действующего на поверхность детали вращающегося магнитного поля B , диаметра деформирующих шаров комбинированного инструмента $d_{ш}$):

$$\begin{aligned}
 Ra = & 16,07 - 5,97 \cdot 10^{-3} \cdot n - 0,324 \cdot d_{ш} - 4,14 \cdot 10^{-2} \cdot B - \\
 & - 1,08 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot d_{ш} - 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot B + 4,67 \cdot 10^{-4} \cdot d_{ш} \cdot B + \\
 & + 0,79 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 1,41 \cdot 10^{-2} \cdot d_{ш}^2 + 1,98 \cdot 10^{-4} \cdot B^2.
 \end{aligned} \quad (11)$$

Определены оптимальные значения параметров процесса СМДО при упрочнении деталей из стали 45 (30–35 HRC): $n = 4050$ мин⁻¹ ($V = 1399$ м/мин); $B = 100$ – 105 мТл; $d_{ш} = 11,5$ мм.

Исследовано влияние числа рабочих ходов комбинированного инструмента на шероховатость упрочненной поверхности (рисунок 16).

Полученные экспериментальные зависимости и диаграммы снижения высоты исходного микрорельефа поверхности указывают на перспективность применения метода СМДО для снижения шероховатости поверхности нежестких ферромагнитных деталей (как альтернатива абразивным методам обработки).

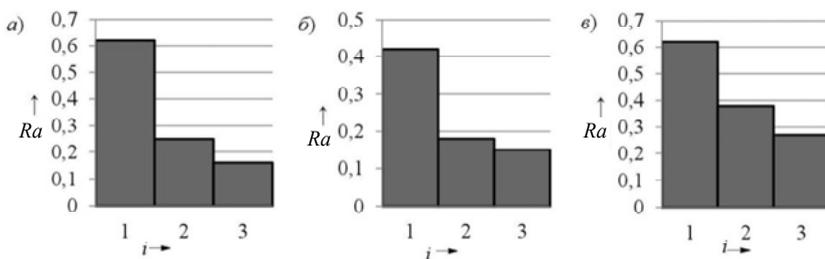


Рисунок 16 – Диаграмма изменения величины шероховатости поверхности детали от количества рабочих ходов комбинированного инструмента: а – сталь 45 (190–200 НВ), $Ra_{исх}$ 5,2–5,7 мкм; $d_{ш} = 12$ мм; $B_{дет} = 0,130$ Тл; $n = 3150$ мин⁻¹; $S = 20$ мм/мин; б – сталь 40X (180–190 НВ), $Ra_{исх}$ 5,5–6,0 мкм; $d_{ш} = 12$ мм; $B_{дет} = 0,130$ Тл; $n = 3150$ мин⁻¹; $S = 20$ мм/мин; в – серый чугун СЧ 20 (150–160 НВ), $Ra_{исх}$ 5,8–6,0 мкм; $d_{ш} = 12$ мм; $B_{дет} = 0,130$ Тл; $n = 2240$ мин⁻¹; $S = 20$ мм/мин

Выявлено, что при совмещенной магнитно-динамической обработке нежестких ферромагнитных деталей обеспечивается снижение исходной шероховатости поверхности за первый, второй и третий рабочие ходы комбинированного инструмента: из стали 45 (190–200 НВ) – в 9,2; 22,8 и 35,5 раза; из стали 40X (28–30 HRC) – в 13,9; 33,3 и 40 раз; из чугуна СЧ20 (150–160 НВ) – в 9,5; 15,1 и 20,7 раза.

Установлено, что совмещенная магнитно-динамическая обработка поверхности цилиндрического отверстия нежестких деталей из стали 45 (30–35 HRC) по отношению к обработке шлифованием обеспечивает повышение удельной маслоемкости поверхности в 1,4–2,8 раза.

Шестая глава посвящена исследованию физико-механических характеристик и триботехнических свойств поверхностей нежестких ферромагнитных деталей, упрочненных СМДО.

Упрочнение внутренней поверхности нежестких ферромагнитных деталей осуществляли на установке, в состав которой входил вертикально-фрезерный станок, комбинированный инструмент и технологическое приспособление, обеспечивающее приложение сил закрепления в торец детали.

В главе представлены результаты проведенных рентгеноструктурных исследований, выполненных на автоматизированном рентгеновском комплексе на базе дифрактометра ДРОН–3М. Исследование дефектов кристаллической решетки проводилось по уширению дифракционных линий на рентгенограммах. Плотность дислокаций, размер субзерен, величину напряжений сжатия в поверхностном слое упрочненных деталей определяли расчетом по известным методикам.

Установлено, что СМДО позволяет обеспечить в упрочненном поверхностном слое повышение плотности дислокаций для образцов из стали и серого чугуна, создать в поверхностном слое деталей остаточные напряжения сжатия в пределах от минус 868 до минус 1162 МПа для стальных образцов и от минус 846 до 942 МПа для чугунных образцов.

Представлены результаты исследований микроструктуры ферромагнитных деталей, упрочненных СМДО. Исследования микроструктуры упрочненного поверхност-

ного слоя нежестких ферромагнитных деталей проводили на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «MIRA» фирмы «Tescan» (Чехия) с рентгеноспектральным микроанализом EDX «INCA 350X-Max» фирмы «Oxford Analytical Instrument» (Великобритания).

Рентгеноструктурные исследования и анализ микроструктуры упрочненных деталей позволили установить, что технология совмещенной магнитно-динамической обработки относится к нанотехнологиям поверхностной модификации и позволяет сформировать в поверхностном слое нежестких ферромагнитных деталей наноразмерную субзеренную структуру на глубину 1,5–4,5 мкм и размерами блоков 25–100 нм на стальных образцах и на глубину 1,8–3 мкм и размерами блоков 18–100 нм на чугунных образцах.

Выявлено, что СМДО увеличивает глубину модифицированного поверхностного слоя упрочненных ферромагнитных деталей (по отношению к динамической обработке, при которой магнитное упрочняющее воздействие на поверхность ферромагнитной детали отсутствует) в 1,6–2,7 раза. Исследования микроструктуры и результаты рентгеноспектрального микроанализа ферромагнитных деталей, упрочненных СМДО в специальной технологической среде, позволили установить, что на поверхности упрочненных деталей из сталей 45 (30–35 HRC) и 40X (25–28 HRC) формируется модифицированный поверхностный слой, состоящий из металлического покрытия (состав покрытия зависит от компонентов технологической среды) толщиной 1,7–3,6 мкм и расположенного ниже в основном материале наноструктурированного субзеренного слоя высотой 3,0–4,5 мкм с размерами блоков до 100 нм (рисунок 17).

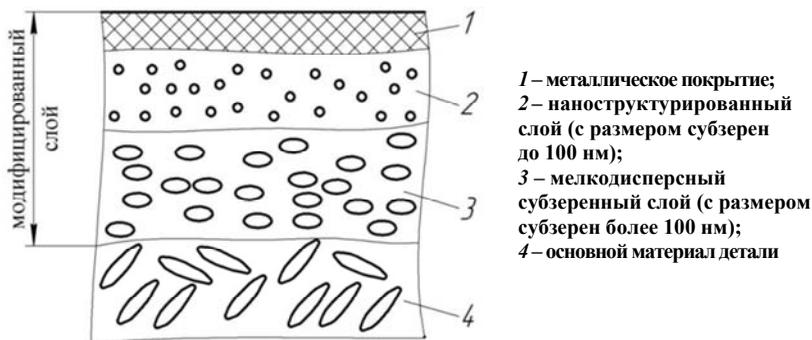


Рисунок 17 – Схема поверхностного слоя нежесткой ферромагнитной детали, упрочненной СМДО в специальной технологической среде

При исследовании процесса СМДО применяли следующие составы специальной технологической среды: мелкодисперсный порошок меди (48 %) + глицерин (15 %) + 10 % раствор соляной кислоты (25 %) + спирт C_2H_5OH (12 %); $CuSO_4$ (60 %) + глицерин (15 %) + 10 % раствор соляной кислоты (20 %) + спирт C_2H_5OH (5 %);

CuSO_4 (20 %) + NiSO_4 (40 %) + глицерин (10 %) + 10 % раствор соляной кислоты (25 %) + спирт $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (5 %).

Триботехнические исследования позволили установить, что совмещенная магнитно-динамическая обработка обеспечивает (по отношению к обработке шлифованием) снижение коэффициента трения скольжения упрочненной поверхности образцов из стали 45 (30–35 HRC) в 1,4–1,5 раза и повышение износостойкости поверхности ферромагнитных деталей в 3,8–4,9 раза.

Седьмая глава посвящена разработке перспективных конструкций комбинированных инструментов, устройств, методов и технологий для совмещенной магнитно-динамической обработки поверхностей нежестких ферромагнитных деталей вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием на фрезерных, сверлильных, расточных, токарных станках в условиях среднесерийного и крупносерийного производства (патенты BY 18083, 19154, 15021, 15091).

Разработаны комбинированные инструменты для СМДО внутренней цилиндрической поверхности нежестких ферромагнитных труб с использованием специальной технологической установки (патенты RU 1801732, 2003455, 2047470, 2077417, BY10188, 20238, 18153).

Разработаны методы СМДО внутренней поверхности цилиндра с автономным приводом подачи комбинированного инструмента (патент BY 18191) и электромагнитным приводом деформирующих шаров (патент BY 18300).

Предложен метод адаптивного управления качеством при СМДО, *отличающийся* тем, что в процессе обработки регулируют величину действующего на деформирующие шары магнитного поля, *позволяющий* осуществить стабилизацию процесса импульсно-ударного деформирования и уменьшить поле рассеивания значений характеристик упрочнения поверхностного слоя нежестких ферромагнитных деталей (патенты RU 1815190, 2052331).

Разработан метод адаптивного управления точностью при комбинированной обработке поверхности отверстия нежестких ферромагнитных деталей абразивным резанием и СМДО, *позволяющий* выбирать методы механической обработки и последовательность их выполнения в зависимости от диаметрального размера отверстия, обеспечивать повышение точности формообразования и параметров качества упрочненного поверхностного слоя (патент BY 19415).

Определены направления совершенствования методов СМДО, *позволяющие* повысить эффективность совмещенной обработки поверхностей нежестких ферромагнитных деталей.

Разработанные технологии, операции, комбинированные инструменты СМДО внедрены на предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации (таблица 1, рисунок 18).

Фактический годовой экономический эффект составил 62 500 долл. США.

Таблица 1 – Внедрение технологий и операций СМДО в промышленность

Объект внедрения	Место внедрения	Упрочняемая деталь	Результат внедрения	Фактический годовой экономический эффект
1	2	3	4	5
Операция СМДО (СМДО-5531-2910021)	УЧПП «Стройрем-авто», РБ, г. Могилев (акт внедрения от 13.05.2011)	Труба оси (5531-2910021)	Упрочнение поверхности. Шероховатость поверхности Ra 0,65–0,68 мкм. Исключение операции шлифования	6 915 378 бел. руб. (1 390 долл. США)
Операция СМДО (СМДО-6515-8505302)	ОАО «МЗКТ», РБ, г. Минск (акт внедрения от 20.11.2012)	Цилиндр (6515-8505302)	Упрочнение поверхности. Шероховатость поверхности Ra 0,35–0,40 мкм. Исключение внутришлифовальной операции	Без расчета эффекта
Технология СМДО в специальной технологической среде (ТПСО-004)	ЗАО «МИЗ», РБ, г. Могилев (акт внедрения от 12.06.2018)	Втулка переходная направляющая	Получение антифрикционного покрытия. Шероховатость поверхности Ra 0,30–0,25 мкм. Глубина упрочнения 0,3 мм. Повышение износостойкости в 3,5–4,1 раза	1 451 бел. руб. (700 долл. США)
Технология СМДО (СМДО-70007.001.22.013)	АО «Электро-механика», РФ, г. Ржев (акт внедрения от 14.04.2023)	Втулка	Снижение трудоемкости. Упрочнение поверхностного слоя. Снижение шероховатости до Ra 0,25 мкм	1 368 000 рос. руб. (16 800 долл. США)
Инструмент и технология для СМДО (ИН 8012.00.00.000 СБ, ПП-06)	УЧНПП «Технолит», РБ, г. Могилев (акт внедрения от 04.06.2021)	Гильза цилиндра	Шероховатость поверхности $Ra < 0,6$ мкм. Глубина упрочнения 0,01–0,30 мм	28 560 бел. руб. (11 000 долл. США)
Операция СМДО (СМДО-009)	ОДО «БелХорс», РБ, г. Могилев (акт внедрения от 23.03.2021)	Накладные направляющие	Глубина упрочнения 0,75–0,80 мм. Повышение удельной маслосъемности. Повышение износостойкости в 2,3 раза	11 111 бел. руб. (4 200 долл. США)
Технология СМДО (СМДО-11815)	ЗАО «МИЗ», РБ, г. Могилев (акты внедрения от 18.09.2012, 19.11.2015)	Лезвие ножа вала дробилки (L11815)	Шероховатость поверхности Ra 0,05 мкм. Глубина упрочнения 0,1 мм. Увеличение микротвердости на 30–35 %. Повышение износостойкости в 3,1 раза	100 876 бел. руб. (5 800 долл. США)

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5
Операция СМДО (СМДО-3530)	ЗАО «МИЗ», РБ, г. Могилев (акт внедрения от 03.12.2020)	Блок зубчатых колес с нежесткой ступицей (3530-2810015)	Шероховатость поверхности Ra 0,58–0,60 мкм. Глубина упрочнения 0,2 мм. Повышение износостойкости поверхности в 3,2 раза	45 600 бел. руб. (18 000 долл. США)
Инструмент для СМДО (ИНП 6.00.00.000СБ, ПП-07)	ООО «СКБ ДалС», РБ, г. Могилев (акт внедрения от 25.03.2021)	Плоские листы для цилиндрических обечаек барабанного сита (3530-2810015)	Шероховатость поверхности Ra 0,70–0,72 мкм. Глубина упрочнения 0,6–0,8 мм. Повышение износостойкости в 3,1 раза	15 612 бел. руб. (6 000 долл. США)



Рисунок 18 – Примеры практического использования технологий совмещенной магнитно-динамической обработки

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс Белорусско-Российского университета при подготовке инженеров по специальности 1-36 01 03 – Технологическое оборудование машиностроительного производства.

В приложении представлены примеры расчета параметров процесса СМДО, результаты экспериментальных исследований, акты о практическом использовании результатов исследований, расчеты технико-экономической эффективности, описание и чертежи комбинированных инструментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе разработанных математических моделей процесса СМДО внутренних и наружных цилиндрических поверхностей нежестких ферромагнитных деталей, *включая* в себя взаимосвязанные модели взаимодействия деформирующего шара с магнитной системой инструмента, движения деформирующего шара от магнитной системы инструмента к упрочняемой поверхности, импульсно-ударного взаимодействия деформирующего шара с упрочняемой поверхностью, *учитывая* движение деформирующих и приводных шаров в постоянном или переменном магнитном поле, создаваемом магнитной системой инструмента и намагниченным поверхностным слоем ферромагнитной детали, *получены* соответствующие системы дифференциальных уравнений для расчета кинематических характеристик движения деформирующих шаров в магнитном поле, *установлено*, что в процессе совмещенной обработки деформирующие шары вращаются относительно продольной оси упрочняемой цилиндрической поверхности с угловой скоростью 140–430 рад/с, взаимодействуют с поверхностью детали со скоростью 0,5–10 м/с, осуществляют радиальные колебания с частотой 230–850 Гц и амплитудой 1–5 мм, динамически воздействуют на упрочняемую поверхность (сила удара 10–50 Н), а также *установлена* взаимосвязь кинематических характеристик движения деформирующих шаров с параметрами комбинированного инструмента и режимами процесса совмещенного упрочнения [1; 4; 6–9; 10–12; 14; 18; 19; 29].

2. На основе динамической модели комбинированного инструмента для СМДО поверхности отверстия нежестких ферромагнитных деталей, *отличающейся* учетом связи деформирующих шаров, расположенных в кольцевой камере, с магнитной системой инструмента, количества и углового расположения источников магнитного поля, дополнительного магнитного воздействия на поверхностный слой ферромагнитной детали, *получено* дифференциальное уравнение для расчета величины жесткости магнитной связи деформирующих шаров с магнитной системой комбинированного инструмента, *установлена* взаимосвязь указанного параметра с величиной действующей на деформирующие шары магнитной силы, создаваемой цилиндрическими постоянными магнитами из редкоземельных материалов NdFeB, обеспечивающими получение магнитного поля с индукцией 0,215–0,475 Тл [1–3; 5; 15; 16; 21; 23; 25; 32].

3. На основе математической модели процесса упругопластической деформации микронеровностей поверхности нежесткой ферромагнитной детали деформирующим шаром при СМДО, *учитывая* комплексное магнитно-силовое воздействие на поверхность ферромагнитной детали, *получены* математические зависимости для расчета

глубины внедрения деформирующего шара в упрочняемую поверхность нежесткой ферромагнитной детали и глубины упрочненного поверхностного слоя, *установлена* взаимосвязь глубины внедрения деформирующего шара с параметрами комбинированного инструмента (радиусом 3–10 мм, массой $0,887 \cdot 10^{-3}$ – $32,9 \cdot 10^{-3}$ кг и плотностью материала деформирующих шаров 7812 кг/м^3) и режимами процесса совмещенного упрочнения (скоростью взаимодействия деформирующих шаров с упрочняемой поверхностью 0,5–10 м/с, индукцией действующего на ферромагнитную деталь вращающегося магнитного поля 0,1–0,6 Тл, временем взаимодействия деформирующих шаров с поверхностью ферромагнитной детали 10^{-4} – 10^{-5} с, величиной среднего давления в контакте деформирующего шара с упрочняемой поверхностью 52–126 МПа) [20; 26; 28; 73].

4. На основе разработанной математической модели процесса формирования шероховатости поверхности нежесткой ферромагнитной детали при СМДО, *учитывающей* комплексное магнитно-силовое воздействие, *получена* математическая зависимость для расчета величины шероховатости упрочненной поверхности, *установлена* взаимосвязь величины шероховатости упрочненной поверхности с высотой исходной шероховатости поверхности Ra 6,3–0,40 мкм, массой деформирующего шара $0,887 \cdot 10^{-3}$ – $32,9 \cdot 10^{-3}$ кг, скоростью взаимодействия деформирующего шара с поверхностью детали 0,5–10 м/с, диаметрными размерами деформирующего шара 6–20 мм и упрочняемой поверхности 112 мм, подачей комбинированного инструмента 20–160 мм/мин [14; 19; 20; 22; 28].

5. На основе экспериментальных исследований влияния параметров и режимов процесса СМДО на качество поверхностного слоя упрочненных нежестких ферромагнитных деталей *установлено* снижение исходной шероховатости поверхности ферромагнитных деталей по параметру Ra с 6,3–0,40 до 0,6–0,08 мкм, повышение геометрической точности обработки на 10–27 % и удельной маслостойкости поверхности в 1,4–2,8 раза, упрочнение поверхностного слоя на глубину 10–25 мкм, увеличение глубины модифицированного поверхностного слоя в 1,6–3,1 раза, формирование наноструктурированного поверхностного слоя толщиной 1,5–4,5 мкм с мелкодисперсной субзернистой структурой наноразмерного диапазона (15–100 нм), характеризующегося увеличением плотности дислокаций и остаточных напряжений сжатия (до минус 1162 МПа), обеспечивающих в совокупности повышение износостойкости упрочненных поверхностей нежестких ферромагнитных деталей в 3,8–4,9 раза [1; 13; 17; 24; 27; 30; 31; 33–36; 68; 69; 77; 78].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные технологические процессы (операции) совмещенной магнитодинамической обработки внедрены в производство ОАО «МЗКТ» при отделочно-упрочняющей обработке внутренней поверхности цилиндров (СМДО–6515–8505302), УЧНП «Технолит» при отделочно-упрочняющей обработке внутренней поверхности гильз цилиндра (ТП–06), ЗАО «Могилевский инструментальный завод» при отделочно-упрочняющей обработке лезвия ножей дробильных машин (СМДО–11815), поверхности отверстия блока зубчатых колес с нежесткой ступицей (СМДО–3530), поверхности отверстия переходных втулок (ТПСО–04), УЧПП «Стройремавто» при упрочнении поверхности отверстия труб оси (СМДО–5531–2910021), ОДО «БелХорс» при упрочнении накладных направляющих (СМДО–09), ООО «СКБ ДалС» при упрочнении плоских листов для цилиндрических обечайек барабанного сита (ТП–07) с фактическим

годовым экономическим эффектом 203 210 бел. руб., а также в производстве АО «Электромеханика» (г. Ржев, РФ) при отделочно-упрочняющей обработке поверхности отверстия нежестких втулок (СМДО–70007.001.22.013) с фактическим годовым экономическим эффектом 1 368 000 росс. руб.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс Белорусско-Российского университета при подготовке инженеров по специальности 1-36 01 03 – Технологическое оборудование машиностроительного производства.

Технологии совмещенной магнитно-динамической обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием, разработанные в рамках диссертационной работы, экспонировались на республиканских выставках (отмечены дипломами), представлялись на международных выставках в Российской Федерации (в 2014 г. отмечена дипломом первой степени с вручением золотой медали в номинации «Лучший инновационный проект в области машиностроения и металлургии», в 2019 г. отмечена специальным призом и дипломом в номинации «Лучший инновационный проект в области машиностроения и металлургии, металлообработки»), а также во Вьетнаме, Германии, Китае, Египте, Латвийской Республике.

При назначении припусков на механическую обработку внутренней цилиндрической поверхности нежестких ферромагнитных деталей следует учитывать, что при СМДО происходит изменение диаметрального размера отверстия с исходной шероховатостью по параметру $Ra_{исх}$ 5,8–6,3 мкм в следующем диапазоне: сталь 45 (190–200 НВ) – 17–26 мкм; сталь 45 (30–35 HRC) – 8–22 мкм (при частоте вращения комбинированного инструмента в диапазоне 1600–4000 мин⁻¹).

Определены оптимальные параметры процесса СМДО внутренней цилиндрической поверхности детали из стали 45 (30–35 HRC): $n = 4050$ мин⁻¹; ($V = 1399$ м/мин); $B = 100–105$ мТл; $d_{ш} = 11,5$ мм.

При проектировании операций СМДО следует учитывать, что наибольшая деформация исходных микронеровностей поверхности ферромагнитных деталей осуществляется за первый рабочий ход комбинированного инструмента, а общее количество рабочих ходов комбинированного инструмента относительно обрабатываемой поверхности целесообразно принимать не более трех.

При эксплуатации комбинированных инструментов для СМДО необходимо учитывать период стойкости деформирующих шаров, который при упрочнении внутренней цилиндрической поверхности нежестких деталей из стали 45 твердостью 180–200 НВ и 30–35 HRC составляет 77,2 и 52,4 ч соответственно.

Разработана конструкторская документация на изготовление инструментов для совмещенной магнитно-динамической обработки (ИМДН 110.02.00.000 СБ, ИН 8015.00.00.000 СБ, ИН 8012.00.00.000 СБ, СМДНО 1.00.000 СБ, ИМДР 1.00.00.000 СБ, ИНП 96.00.00.000 СБ, ИНП 82.00.00.000 СБ).

Результаты исследований могут быть использованы на машиностроительных предприятиях для повышения характеристик качества и эксплуатационных свойств поверхностей нежестких ферромагнитных деталей.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Монографии

1. Довгалец, А. М. Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А. М. Довгалец. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в РБ

2. Довгалец, А. М. Классификация инструментов для магнитно-динамического упрочнения / А. М. Довгалец, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 2. – С. 30–38.

3. Довгалец, А. М. Двухрядные магнитно-динамические инструменты / А. М. Довгалец, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2009. – № 2. – С. 12–20.

4. Довгалец, А. М. Магнитно-динамические инструменты для упрочнения наружных поверхностей вращения / А. М. Довгалец, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Беларус. гос. с.-х. акад. – 2009. – № 4. – С. 174–178.

5. Довгалец, А. М. Инструменты для магнитно-динамического упрочнения поверхностей деталей машин / А. М. Довгалец, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 4. – С. 94–97.

6. Довгалец, А. М. Математическое моделирование процесса магнитно-динамического раскатывания / А. М. Довгалец, И. И. Маковецкий, Д. М. Свирепа // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2010. – № 4. – С. 26–30.

7. Довгалец, А. М. Математическое моделирование магнитно-динамического инструмента для упрочняющей обработки плоских поверхностей / А. М. Довгалец, Н. А. Леванович, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 55–65.

8. Довгалец, А. М. Магнитно-динамическое упрочнение внутренней поверхности пневматических и гидравлических цилиндров большой длины / А. М. Довгалец // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 39–43.

9. Шелег, В. К. Моделирование процессу позднаной обработки деталей магнитно-динамічним розкочуванням і обертовим змінним магнітним полем / В. К. Шелег, О. М. Довгальов, О. О. Жолобов, М. А. Леванович, В. А. Кирилович // Вісник ЖДТУ. Сер. Технічні науки. – 2013. – № 3. – С. 42–51.

10. Шелег, В. К. Математическое моделирование процесса совмещенной обработки деталей магнитно-динамическим раскатыванием и вращающимся магнитным полем / В. К. Шелег, А. М. Довгалец, А. А. Жолобов, Н. А. Леванович // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. – 2013. – № 3. – С. 152–160.

11. Довгалец, А. М. Математическое моделирование процесса магнитно-динамического упрочнения наружной поверхности вращения / А. М. Довгалец, Н. А. Леванович, С. А. Сухоцкий, И. А. Тарадейко // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 4. – С. 25–34.

12. Шелег, В. К. Моделирование процесса совмещенной упрочняющей обработки импульсно-ударным раскатыванием и вращающимся магнитным полем / В. К. Шелег,

А. М. Довгалева, А. А. Жолобов, Н. А. Леванович, И. А. Тарадейко // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 73–84.

13. Довгалева, А. М. Влияние технологических и конструктивных параметров процесса магнитно-динамического раскатывания на шероховатость поверхности / А. М. Довгалева, Д. М. Свирипа // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2014. – № 4. – С. 21–25.

14. Dovgalev, A. Combined magnetic dynamic rolling as process module for quality assurance / A. Dovgalev // Technologia i automatyzacja montazu. – 2015. – № 3. – С. 54–57.

15. Довгалева, А. М. Инструменты для магнитно-центробежного и комбинированного накатывания поверхностей деталей машин / А. М. Довгалева // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 3. – С. 15–24.

16. Довгалева, А. М. Комбинированное магнитно-вибродинамическое накатывание поверхности отверстий жестких деталей машин / А. М. Довгалева // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 4. – С. 14–21.

17. Довгалева, А. М. Повышение эксплуатационных свойств плоских поверхностей деталей магнитно-динамическим упрочнением / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 3. – С. 19–27.

18. Довгалева, А. М. Совмещенная отделочно-упрочняющая обработка деталей машин вибродинамическим накатыванием и вращающимся магнитным полем / А. М. Довгалева // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 4. – С. 15–23.

19. Довгалева, А. М. Совмещенное магнитно-динамическое упрочнение внутренней поверхности жестких гидроцилиндров горно-шахтного оборудования / А. М. Довгалева, И. А. Тарадейко // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 3. – С. 45–55.

20. Довгалева, А. М. Адаптивное управление качеством обработки при совмещенном магнитно-вибродинамическом упрочнении / А. М. Довгалева // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 2. – С. 15–23.

21. Довгалева, А. М. Динамическая модель процесса совмещенного магнитно-центробежного накатывания / А. М. Довгалева, Н. А. Леванович, И. А. Тарадейко // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 1. – С. 37–48.

22. Довгалева, А. М. Совмещенное магнитно-динамическое накатывание цилиндрических поверхностей деталей на станках токарной группы / А. М. Довгалева, И. А. Тарадейко // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 4. – С. 29–40.

23. Довгалева, А. М. Прогрессивные конструкции инструментов для совмещенного магнитно-динамического накатывания цилиндрических поверхностей / А. М. Довгалева, И. А. Тарадейко, Н. А. Леванович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2018. – № 3. – С. 47–53.

24. Довгалева, А. М. Повышение эффективности упрочнения поверхностей ферромагнитных деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / А. М. Довгалева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 18–35.

25. Довгалева, А. М. Разработка магнитных систем комбинированных инструментов для совмещенного магнитно-динамического накатывания / А. М. Довгалева // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 1. – С. 15–26.

26. Шелег, В. К. Магнитно-динамическое, совмещенное и комбинированное нака-
тывание плоских поверхностей / В. К. Шелег, А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М.
Свирипа // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 3. – С. 35–42.

27. Шелег, В. К. Исследование триботехнических свойств поверхностей деталей,
упрочненных совмещенным магнитно-динамическим накатыванием /
В. К. Шелег, А. М. Довгалева // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. –
2018. – Т. 7. – С. 330–334.

28. Довгалева, А. М. Моделирование процесса деформирования поверхности детали
гладким шаром при совмещенном магнитно-динамическом накатывании /
А. М. Довгалева // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 1. – С. 5–12.

29. Довгалева, А. М. Определение параметров процесса совмещенного магнитно-
динамического накатывания / А. М. Довгалева // Горная механика и машиностроение. –
2021. – № 2. – С. 34–39.

30. Шелег, В. К. Влияние параметров процесса совмещенного магнитно-
динамического накатывания на шероховатость поверхности / В. К. Шелег,
А. М. Довгалева, И. А. Тарадейко // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 1. – С. 71–80.

31. Шелег, В. К. Повышение точности обработки нежестких ферромагнитных дета-
лей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / В. К. Шелег, А. М. Довгалева,
И. А. Тарадейко // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 2. – С. 31–41.

32. Довгалева, А. М. Прогрессивные конструкции инструмента для совмещенного
магнитно-динамического накатывания / А. М. Довгалева, И. А. Тарадейко // Вестн. Бе-
лорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 2. – С. 4–11.

33. Шелег, В. К. Повышение эффективности процесса совмещенного магнитно-
динамического накатывания / В. К. Шелег, А. М. Довгалева, И. А. Тарадейко // Горная
механика и машиностроение. – 2021. – № 3. – С. 17–24.

34. Шелег, В. К. Исследование основных характеристик процесса совмещенного
магнитно-динамического накатывания / В. К. Шелег, А. М. Довгалева, И. А. Тарадейко //
Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 3. – С. 81–89.

35. Шелег, В. К. Получение на поверхности ферромагнитных деталей антифрикци-
онных твердосмазочных покрытий совмещенным магнитно-динамическим накатыва-
нием / В. К. Шелег, А. М. Довгалева // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч.
тр. – 2021. – Т. 10. – С. 231–237.

36. Шелег, В. К. Оптимизация параметров процесса совмещенного магнитно-
динамического накатывания / В. К. Шелег, А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий // Вестн.
Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 4. – С. 48–56.

Материалы конференций

37. Довгалева, А. М. Основы ППД в магнитном поле магнитоуправляемыми дефор-
мирующими элементами / А. М. Довгалева // Создание ресурсосберегающих машин
и технологий : сб. докл. Респ. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 окт. 1996 г. : в 2 ч. – Мо-
гилев : Могилев. машиностроит. ин-т, 1996. – Ч. 1. – С. 19.

38. Довгалева, А. М. Динамика упрочняющего инструмента с магнитоуправляемыми
деформирующими элементами / А. М. Довгалева // Междунар. науч.-техн. конф., Моги-
лев, 22–23 апр. 1999 г. : сб. докл. – Могилев : Могилев. машиностроит. ин-т,
1999. – С. 112.

39. Довгалев, А. М. Основы классификации способов и инструментов для ППД в магнитном поле / А. М. Довгалев // Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 1999 г. : сб. докл. – Могилев : Могилев. машиностроит. ин-т, 1999. – С. 113.

40. Довгалев, А. М. Расчет инструментов с магнитоуправляемыми деформирующими элементами / А. М. Довгалев // Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 18–19 мая 2000 г. – Могилев : Могилев. гос. техн. ун-т, 2000. – С. 66.

41. Довгалев, А. М. Технологические основы упрочнения магнитоуправляемыми деформирующими элементами / А. М. Довгалев, Д. М. Рыжанков // Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Могилев. гос. техн. ун-т, 2001. – С. 34.

42. Довгалев, А. М. Эффективное упрочнение деталей магнитоуправляемыми деформирующими элементами / А. М. Довгалев, Д. М. Рыжанков // Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 15–16 мая 2003 г. / Могилев. гос. техн. ун-т [и др.]; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2003. – С. 37.

43. Довгалев, А. М. Динамическая модель инструмента с магнитоуправляемыми деформирующими элементами / А. М. Довгалев, Д. М. Рыжанков, Д. М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2004 г. : в 3 ч. / Беларус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2004. – Ч. 2. – С. 39.

44. Довгалев, А. М. Оптимизация параметров инструментов с магнитоуправляемыми деформирующими элементами / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Могилев, 21–22 апр. 2005 г. : в 2 ч. / Беларус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2005. – Ч. 1. – С. 42.

45. Довгалев, А. М. Магнитно-динамическое упрочнение плоских поверхностей / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2007 г. : в 3 ч. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2007. – Ч. 1. – С. 55.

46. Рыжанков, Д. М. Эффект магнитно-динамического упрочнения / Д. М. Рыжанков, А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2007 г. : в 3 ч. / Беларус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2007. – Ч. 1. – С. 93.

47. Свирепа, Д. М. Магнитно-динамическое упрочнение валов / Д. М. Свирепа, А. М. Довгалев, Д. М. Рыжанков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2007 г. : в 3 ч. / Беларус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2007. – Ч. 1. – С. 95.

48. Рыжанков, Д. М. Повышение эффективности раскатывания втулок методом магнитно-динамического упрочнения / Д. М. Рыжанков, Д. М. Свирепа, А. М. Довгалев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар.

науч.-техн. конф., Могилев, 17–18 апр. 2008 г. : в 3 ч. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2008. – Ч. 1. – С. 61.

49. Ходырев, В. И. Повышение эффективности магнитно-динамического упрочнения плоских поверхностей / В. И. Ходырев, А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 17–18 апр. 2008 г. : в 3 ч. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2008. – Ч. 1. – С. 66.

50. Довгалев, А. М. Конструктивные особенности прогрессивных двухрядных магнитно-динамических инструментов / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апр. 2009 г. : в 3 ч. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2009. – Ч. 1. – С. 58–59.

51. Свирепа, Д. М. Исследование шумовых характеристик процесса магнитно-динамического упрочнения / Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков, А. М. Довгалев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апр. 2009 г. : в 3 ч. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2009. – Ч. 1. – С. 102.

52. Довгалев, А. М. Моделирование магнитно-динамического инструмента для упрочняющей обработки плоских поверхностей / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2010 г. : в 3 ч. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2010. – Ч. 1. – С. 42.

53. Свирепа, Д. М. Инструменты для магнитно-динамического упрочнения / Д. М. Свирепа, А. М. Довгалев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых / Белорус.-Рос. ун-т; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2011. – С. 43.

54. Свирепа, Д. М. Метод магнитно-динамического раскатывания деталей технических систем / Д. М. Свирепа, А. М. Довгалев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых / Белорус.-Рос. ун-т; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2011. – С. 3–7.

55. Сухоцкий, С. А. Магнитные системы инструментов для магнитно-динамического упрочнения плоских поверхностей / С. А. Сухоцкий, А. М. Довгалев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых / Белорус.-Рос. ун-т; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2011. – С. 44.

56. Довгалев, А. М. Модифицирование поверхностного слоя детали комбинированным упрочнением с формированием покрытия / А. М. Довгалев, Н. В. Тулуевский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2012 г. : в 2 ч. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2012. – Ч. 1. – С. 35.

57. Довгалев, А. М. Взаимодействие деформирующего шара с источником магнитного поля динамического раскатника / А. М. Довгалев, В. В. Глушенко, Д. М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2012 г. : в 2 ч. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2012. – Ч. 1. – С. 33–34.

58. Свирепа, Д. М. Магнитно-динамическое раскатывание / Д. М. Свирепа, А. М. Довгалев // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : Б. М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2012. – С. 155–156.

59. Довгалев, А. М. Упрочняющая обработка плоских деталей магнитно-динамическими инструментами / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : Б. М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2012. – С. 87–88.

60. Довгалев, А. М. Влияние режимов магнитно-динамического накатывания на шероховатость поверхностей / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 18–19 апр. 2013 г. : в 2 ч. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2013. – Ч. 1. – С. 35.

61. Довгалев, А. М. ПИД деталей в магнитном поле, совмещенное с формированием антифрикционных покрытий / А. М. Довгалев, Н. В. Тулевский, Л. В. Жолобова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 18–19 апр. 2013 г. : в 2 ч. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2013. – Ч. 1. – С. 36.

62. Довгалев, А. М. Технология магнитно-динамического раскатывания и ее реализация в машиностроении / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 апр. 2014 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2014. – С. 10–15.

63. Довгалев, А. М. Повышение микротвердости плоской поверхности детали магнитно-динамическим накатыванием / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апр. 2015 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2015. – С. 28.

64. Довгалев, А. М. Технология комбинированного магнитно-динамического накатывания поверхностей деталей машин / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апр. 2015 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2015. – С. 27.

65. Довгалев, А. М. Комбинированное магнитно-динамическое накатывание поверхности валов / А. М. Довгалев, И. А. Тарадейко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апр. 2015 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2015. – С. 71.

66. Высокопроизводительное магнитно-динамическое упрочнение внутренней поверхности цилиндров / Д. М. Свирепа, А. М. Довгалев, А. С. Семенова, О. Н. Юхновец // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апр. 2015 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2015. – С. 51.

67. Довгалев, А. М. Формирование антифрикционных покрытий комбинированным магнитно-динамическим накатыванием / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа,

Л. В. Жолобова // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 14–15 апр. 2016 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]*. – Могилев, 2016. – С. 83–84.

68. Довгалев, А. М. Основы совмещенного магнитно-динамического накатывания поверхностей нежестких деталей / А. М. Довгалев // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 26–27 апр. 2018 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]*. – Могилев, 2018. – С. 4–6.

69. Довгалев, А. М. Повышение эффективности совмещенного магнитно-динамического накатывания поверхностей ферромагнитных деталей / А. М. Довгалев // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 26–27 апр. 2018 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]*. – Могилев, 2018. – С. 28.

70. Довгалев, А. М. Технология совмещенного магнитно-динамического накатывания плоских поверхностей / А. М. Довгалев, С. А. Сухощкий, Д. М. Свирепа // *Наукоемкие технологии и инновации : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию БГТУ им. В. Г. Шухова*. – Белгород, 2019. – С. 22–25.

71. Довгалев, А. М. Технология совмещенного магнитно-динамического накатывания в активной технологической среде / А. М. Довгалев // *Наукоемкие технологии и инновации : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию БГТУ им. В. Г. Шухова*. – Белгород, 2019. – С. 19–21.

72. Довгалев, А. М. Совмещенное магнитно-динамическое накатывание поверхностей нежестких деталей / А. М. Довгалев // *Машиностроение и металлообработка : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Ин-т технологии металлов Нац. акад. наук Беларуси, Администрация свобод. экон. зоны «Могилев», Белорус.- Рос. ун-т; редкол. : М. Е. Лустенков [и др.]*. – Могилев, 2019. – С. 33–35.

73. Довгалев, А. М. Прогнозирование параметров качества детали при совмещенном магнитно-динамическом накатывании / А. М. Довгалев // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 23–24 апр. 2020 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : М. Е. Лустенков [и др.]*. – Могилев, 2020. – С. 41.

74. Шелег, В. К. Совмещенное магнитно-динамическое накатывание в активной технологической среде / В. К. Шелег, А. М. Довгалев // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2021 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол. : М. Е. Лустенков [и др.]*. – Могилев, 2021. – С. 78–79.

75. Довгалев, А. М. Повышение удельной маслосъемности поверхностей деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / А. М. Довгалев, И. А. Тарадейко // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2021 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : М. Е. Лустенков [и др.]*. – Могилев, 2021. – С. 46.

76. Довгалев, А. М. Получение регулярного микрорельефа на поверхности деталей при совмещенном магнитно-динамическом накатывании / А. М. Довгалев, И. А. Тарадейко, М. В. Тарадейко / *Актуальные проблемы науки и техники : материалы I Междунар. науч.-техн. конф., Сарапул, 20–22 мая 2021 г.* – Сарапул : Ижевский гос. техн. ун-т им. М. Т. Калашникова, 2021. – С. 147–151.

77. Шелег, В. К. Получение поверхностных наноструктур и антифрикционных металлических покрытий совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / В. К. Шелег, А. М. Довгалев // Инновационные технологии в машиностроении: сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию Полоц. гос. ун-та им. Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, 18–19 апр. 2023 г. / Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой; редкол.: Н. Н. Попок [и др.]. – Новополоцк, 2023. – С. 150–152.

78. Шелег В. К. Наноструктурирование поверхностного слоя деталей машин совмещенной магнитно-динамической обработкой / В. К. Шелег, А. М. Довгалев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25–26 апр. 2024 г. / Беларус.-Рос. ун-т ; редкол. : М. Е. Лустенков [и др.]. – Могилев, 2024. – С. 28–31.

Патенты

79. Инструмент для поверхностного пластического деформирования : пат. RU 1808672 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 15.04.1993.

80. Инструмент для поверхностного пластического деформирования : пат. RU 1815189 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 15.05.1993.

81. Инструмент для поверхностного пластического деформирования : пат. RU 1815190 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 15.05.1993.

82. Инструмент для поверхностного пластического деформирования : пат. RU 2000918 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 15.10.1993.

83. Инструмент для поверхностного пластического деформирования : пат. RU 2003454 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 30.11.1993.

84. Инструмент для поверхностного пластического деформирования : пат. RU 2003455 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 30.11.1993.

85. Инструмент для поверхностного пластического деформирования : пат. RU 2003456 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 30.11.1993.

86. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. RU 2003457 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 30.11.1993.

87. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. RU 2003458 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 30.11.1993.

88. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. RU 2003459 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 30.11.1993.

89. Инструмент для поверхностного пластического деформирования : пат. RU 2006360 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 30.01.1994.

90. Способ отделочно-упрочняющей обработки : пат. RU 2023578 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 30.11.1994.

91. Способ отделочно-упрочняющей обработки и инструмент для его осуществления : пат. RU 2029667 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 27.02.1995.

92. Инструмент для упрочняющей обработки : пат. RU 2047468 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 10.11.1995.

93. Инструмент для поверхностного пластического деформирования : пат. RU 2047470 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 10.11.1995.

94. Инструмент для поверхностного пластического деформирования : пат. RU 2047471 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 10.11.1995.

95. Способ поверхностного пластического деформирования поверхности вращения и инструмент для его осуществления : пат. RU 2052331 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 20.01.1996.

96. Инструмент для поверхностного пластического деформирования : пат. RU 2052332 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 20.01.1996.

97. Способ управления поверхностным пластическим деформированием и устройство для его осуществления : пат. RU 2068763 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 10.11.1996.

98. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. RU 2068764 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 10.11.1996.

99. Инструмент для поверхностного пластического деформирования : пат. RU 2068765 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 10.11.1996.

100. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. RU 2068766 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 10.11.1996.

101. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. RU 2068767 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 10.11.1996.

102. Инструмент для упрочняющей обработки : пат. RU 2068768 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 10.11.1996.

103. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. RU 2068769 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 10.11.1996.

104. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления : пат. RU 2068770 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 10.11.1996.

105. Инструмент для поверхностного пластического деформирования : пат. RU 2077416 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 20.04.1997.

106. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. RU 2077417 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 20.04.1997.

107. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. RU 2077418 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 20.04.1997.

108. Инструмент для поверхностной пластической деформации : пат. RU 2089371 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 10.09.1997.

109. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления : пат. RU 2089373 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 10.09.97.

110. Инструмент для упрочняющей обработки : пат. RU 2089372 / А. М. Довгалев (РБ). – Оpubл. 10.09.1997.

111. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. BY 10188 / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков. – Оpubл. 28.02.2007.

112. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки : пат. BY 10065 / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков. – Оpubл. 30.12.2007.

113. Раскатник с магнитоуправляемыми деформирующими элементами : пат. BY 11531 / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков. – Оpubл. 28.02.2008.

114. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. BY 11536 / А. М. Довгалев, Д. М. Рыжанков, Д. М. Свирепа. – Оpubл. 28.02.2008.

115. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей : пат. BY 14651 / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков. – Оpubл. 30.04.2010.

116. Инструмент для упрочняющей обработки плоских поверхностей : пат. ВУ 14014 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков. – Опувл. 30.12.2010.

117. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей : пат. ВУ 15262 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков. – Опувл. 30.04.2011.

118. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей : пат. ВУ 15263 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков. – Опувл. 30.06.2011.

119. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. ВУ 15022 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Рыжанков, Д. М. Свирепа. – Опувл. 30.08.2011.

120. Упрочняющий инструмент : пат. ВУ 15364 / А. М. Довгалева, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков, С. А. Сухоцкий. – Опувл. 30.08.2011.

121. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки : пат. ВУ 15021 / А. М. Довгалева, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков, С. А. Сухоцкий. – Опувл. 30.10.2011.

122. Устройство для поверхностного пластического деформирования : пат. ВУ 15091 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков, С. Н. Близнюк. – Опувл. 30.12.2011.

123. Способ и инструмент для магнитно-центробежного раскатывания внутренней поверхности круглого отверстия в металлической детали : пат. ВУ 18153 / А. М. Довгалева, Д. М. Рыжанков. – Опувл. 30.06.2013.

124. Инструмент для поверхностного пластического деформирования отверстия детали : пат. ВУ 18083 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Рыжанков, Д. М. Свирепа. – Опувл. 30.06.2013.

125. Инструмент и способ магнитно-динамического упрочнения плоской поверхности детали : пат. ВУ 17545 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий. – Опувл. 30.06.2013.

126. Способ магнитно-динамического упрочнения внутренней поверхности круглого отверстия в металлической детали : пат. ВУ 17976 / А. М. Довгалева, Д. М. Свирепа. – Опувл. 30.08.2013.

127. Устройство для поверхностного пластического деформирования внутренней поверхности цилиндра и способ поверхностного пластического деформирования внутренней поверхности цилиндра : пат. ВУ 18191 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Рыжанков, Д. М. Свирепа. – Опувл. 30.08.2013.

128. Способ поверхностного пластического деформирования отверстия цилиндрической детали и инструмент для его осуществления : пат. ВУ 18300 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Рыжанков, Д. М. Свирепа. – Опувл. 30.08.2013.

129. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки вала : пат. ВУ 18302 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, И. А. Тарадейко. – Опувл. 30.08.2013.

130. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки наружной поверхности втулки : пат. ВУ 18303 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, И. А. Тарадейко. – Опувл. 30.08.2013.

131. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрического отверстия детали : пат. ВУ 19423 / А. М. Довгалева, Д. М. Свирепа, С. А. Сухоцкий. – Опувл. 30.12.2013.

132. Устройство для поверхностного пластического деформирования внутренней поверхности нежесткой втулки : решение от 26.12.2013 о выдаче патента на изобре-

ние по заявке № а2011137 МПК В 24 В 39/02 / А. М. Довгалева, Д. М. Рыжанков, Д. М. Свирица, С. А. Сухоцкий ; заявитель Белорус.-Рос. ун-т ; заявл. 15.12.2011.

133. Способ обработки наружной поверхности стального вала на металлорежущем станке : пат. ВУ 19620 / А. М. Довгалева. – Оpubл. 30.06.2014.

134. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. ВУ 20238 / А. А. Жолобов, А. М. Довгалева. – Оpubл. 28.02.2015.

135. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрического отверстия детали : пат. ВУ 19139 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирица. – Оpubл. 30.04.2015.

136. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки детали : пат. ВУ 19154 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирица, И. А. Тарадейко. – Оpubл. 30.04.2015.

137. Устройство для магнитно-динамического упрочнения наружной поверхности цилиндрических деталей : пат. ВУ 20590 / В. К. Шелег, А. М. Довгалева, А. А. Жолобов, И. А. Тарадейко. – Оpubл. 30.06.2015.

138. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрического отверстия детали : пат. ВУ 19414 / А. М. Довгалева, Д. М. Свирица, С. А. Сухоцкий. – Оpubл. 30.08.2015.

139. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрического отверстия детали : пат. ВУ 19423 / А. М. Довгалева, Д. М. Свирица, С. А. Сухоцкий. – Оpubл. 30.08.2015.

140. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрического отверстия детали : пат. ВУ 19415 / А. М. Довгалева, Д. М. Свирица, С. А. Сухоцкий. – Оpubл. 30.12.2015.

141. Способ и устройство для отделочно-упрочняющей обработки внутренней поверхности отверстия в ферромагнитной детали : пат. ВУ 22193 / В. К. Шелег, А. М. Довгалева, А. А. Жолобов, Д. М. Свирица, С. А. Сухоцкий, М. В. Мовчан. – Оpubл. 30.10.2018.

142. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки наружной поверхности вращения : пат. ВУ 23127 / А. М. Довгалева, И. А. Тарадейко. – Оpubл. 30.08.2020.

143. Способ комбинированной отделочно-упрочняющей обработки наружной цилиндрической поверхности детали : пат. ВУ 23295 / А. М. Довгалева, И. А. Тарадейко. – Оpubл. 28.02.2021.



РЭЗІЮМЭ

Даўгалёў Аляксандр Міхайлавіч

Тэарэтычныя і тэхналагічныя асновы адзелачна-ўмацавальнай сумешчанай магнітна-дынамічнай апрацоўкі паверхняў падатлівых дэталаў з ферамагнітных матэрыялаў

Ключавыя словы: адзелачна-ўмацавальная апрацоўка, сумешчаная магнітна-дынамічная апрацоўка, імпульсна-ўдарнае дэфармаванне, магнітна-сілавое ўздзеянне, дэфармавальны шар, магнітная сістэма, камбінаваны інструмент, умацаваны паверхневы слой

Мэта працы: распрацоўка тэарэтычных і тэхналагічных асноў адзелачна-ўмацавальнай сумешчанай магнітна-дынамічнай апрацоўкі вярчальным магнітным полем і імпульсна-ўдарным дэфармаваннем, якая дазваляе павысіць характарыстыкі якасці паверхні і эксплуатацыйныя ўласцівасці падатлівых ферамагнітных дэталаў.

Метады даследавання і апаратура: тэарэтычныя даследаванні грунтаваліся на законах тэарэтычнай механікі, дыферынцыяльнага і інтэгральнага вылічэнняў, тэхналогіі машынабудавання і матэрыялазнаўства. Эксперыментальныя даследаванні ажыццяўляліся з выкарыстаннем сучаснай вымяральной і рэгістравальнай апаратуры, распрацаваных метадаў сумешчанай магнітна-дынамічнай апрацоўкі і камбінаваных інструментаў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: устаноўлена, што комплекснае магнітна-сілавое ўздзеянне на паверхню падатлівых ферамагнітных дэталаў, якое ажыццяўляецца вярчальным магнітным полем і імпульсна-ўдарным дэфармаваннем, забяспечвае атрыманне нанаструктурыраванага паверхневага слоя з дробнадысперснай субзёранай структурай нанаразмернага дыяпазона, які характэрны з'яўляецца павелічэннем шчыльнасці дыслакацый і астаткавых напружанняў сціску і вызначае кратнае павышэнне зносастойкасці ўмацаваных паверхняў. Распрацаваны матэматычныя мадэлі працэсу сумешчанай магнітна-дынамічнай апрацоўкі ўнутраных і вонкавых цыліндрычных паверхняў вярчэння, матэматычная мадэль пругкапластычнага дэфармавання зыходных мікраяроўнасцей паверхні дэфармавальным шарам, матэматычная мадэль працэсу фарміравання шурпатасці паверхні, якія дазваляюць разлічыць адпаведна кінематычныя характарыстыкі руху дэфармавальных шароў у магнітным полі, глыбіню ўмацаванага паверхневага слоя і велічыню шурпатасці ўмацаванай паверхні, устанавіць узаемазвязь названых характэрных з параметрамі і рэжымамі працэсу сумешчанай апрацоўкі.

Ступень выкарыстання: тэхналогіі сумешчанай адзелачна-ўмацавальнай апрацоўкі ўкаранены ў вытворчасць. Сумарны гадавы эканамічны эффект склаў 62 500 долараў ЗША.

Вобласць прымянення: галіны машынабудавання.

РЕЗЮМЕ

Довгалёв Александр Михайлович

Теоретические и технологические основы отделочно-упрочняющей совмещенной магнитно-динамической обработки поверхностей нежестких деталей из ферромагнитных материалов

Ключевые слова: отделочно-упрочняющая обработка, совмещенная магнитно-динамическая обработка, импульсно-ударное деформирование, магнитно-силовое воздействие, деформирующий шар, магнитная система, комбинированный инструмент, упрочненный поверхностный слой

Цель работы: разработка теоретических и технологических основ отделочно-упрочняющей совмещенной магнитно-динамической обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием, позволяющей повысить характеристики качества поверхности и эксплуатационные свойства нежестких ферромагнитных деталей.

Методы исследования и аппаратура: теоретические исследования базировались на законах теоретической механики, дифференциального и интегрального исчисления, технологии машиностроения и материаловедения. Экспериментальные исследования осуществлялись с использованием современной измерительной и регистрирующей аппаратуры, разработанных методов совмещенной магнитно-динамической обработки и комбинированных инструментов.

Полученные результаты и их новизна: установлено, что комплексное магнитно-силовое воздействие на поверхность нежестких ферромагнитных деталей, осуществляемое вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием, обеспечивает получение наноструктурированного поверхностного слоя с мелкодисперсной субзеренной структурой наноразмерного диапазона, характеризующегося увеличением плотности дислокаций и остаточных напряжений сжатия, определяющего кратное повышение износостойкости упрочненных поверхностей. Разработаны математические модели процесса совмещенной магнитно-динамической обработки внутренних и наружных цилиндрических поверхностей вращения, математическая модель упругопластической деформации исходных микронеровностей поверхности деформирующим шаром, математическая модель процесса формирования шероховатости поверхности, позволяющие рассчитать соответственно кинематические характеристики движения деформирующих шаров в магнитном поле, глубину упрочненного поверхностного слоя и величину шероховатости упрочненной поверхности, установить взаимосвязь указанных характеристик с параметрами и режимами процесса совмещенной обработки.

Степень использования: технологии совмещенной магнитно-динамической обработки внедрены в производство. Суммарный годовой экономический эффект составил 62 500 долларов США.

Область применения: отрасли машиностроения.

SUMMARY

Dovgalev Aleksandr Mikhailovich

Theoretical and technological framework of finishing and strengthening combined magnetic and dynamic treatment of surfaces of non-rigid ferromagnetic parts

Key words: finishing and strengthening treatment, combined magnetic and dynamic treatment, pulse impact deformation, magnetic force action, deforming ball, magnetic system, combined tool, strengthened surface layer

Aim: to develop theoretical and technological framework of finishing and strengthening combined magnetic and dynamic treatment by rotating magnetic field and pulse impact deformation, which helps improve surface quality characteristics and operational properties of non-rigid ferromagnetic parts.

Research methods and facilities: theoretical studies were based on the laws of theoretical mechanics, differential and integral calculus, mechanical engineering technology and materials science. Experimental research was carried out using modern measuring and recording devices, as well as developed methods of combined magnetic and dynamic treatment and combined tools.

Obtained results and their novelty: it was established that complex magnetic force impact on the surface of non-rigid ferromagnetic parts, exerted by rotating magnetic field and pulse impact deformation, helped obtain a nanostructured surface layer with a fine subgrain structure of nanoscale range, characterized by an increase in the density of dislocations and residual compression stresses, which determined a multiple increase in the wear resistance of strengthened surfaces. The research led to the development of mathematical models of the process of combined magnetic and dynamic treatment of internal and external cylindrical surfaces of rotation, the mathematical model of elastic and plastic deformation of initial surface microroughnesses by a deforming ball, the mathematical model of the process of surface roughness formation, which helped to calculate kinematic characteristics of deforming balls motion in the magnetic field, the depth of the strengthened surface layer and the roughness value of the hardened surface, respectively; to determine the relationship between the above characteristics and the parameters and modes of the combined treatment process.

Research utilization: technologies of combined magnetic and dynamic treatment have been implemented in manufacturing. The total annual economic effect amounted to 62 500 USD.

Scope of application: mechanical engineering industries.

Научное издание

ДОВГАЛЁВ
Александр Михайлович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ СОВМЕЩЕННОЙ
МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ
НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 05.02.07 – технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

В авторской редакции

Подписано в печать 26.12.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.

Усл. печ. л. 3,21. Уч.-изд. л. 2,79. Тираж 80. Заказ 822.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск.