

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

**КОЧУБЕЙ Анатолий Анатольевич**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ**

05.02.08 – Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат технических наук  
профессор  
Лебедев Валерий Александрович

Ростов-на-Дону – 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....		5
Глава 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....		9
1.1 Использование вращающегося электромагнитного поля в технологических целях.....		9
1.2 Закономерности движения ферромагнитных частиц во вращающемся электромагнитном поле.....		15
1.3 Обзор методов упрочняющей обработки ППД.....		22
1.3.1 Использование потоков движущихся частиц в технологии упрочняющей обработки.....		22
1.3.2 Использование магнитного поля для отделочно-упрочняющей обработки поверхности деталей.....		34
Глава 2 КИНЕТИКА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ СВОБОДНОДВИЖУЩИХСЯ ИНДЕНТОРОВ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ.....		42
2.1 Движение ферромагнитных инденторов во вращающемся электромагнитном поле.....		42
2.1.1 Характеристика вращающегося электромагнитного поля.....		42
2.1.2 Кинетическое состояние ферромагнитных инденторов в магнитоожиженном вращающемся слое.....		44
2.2 Термодинамическая модель магнитоожиженного слоя во вращающемся электромагнитном поле.....		48
2.2.1 Энергетический баланс ферромагнитного индентора магнитоожиженного вращающегося слоя.....		48
2.2.2 Оценка энергетического состояния МОВ слоя при фазовых переходах.....		52
2.3 Ударно-импульсные взаимодействия ферромагнитных инденторов в МОВ слое и обоснование их эффективной загрузки.....		53
2.4 Оценка производительности упрочняющей обработки во вращающемся электромагнитном поле.....		58
2.5 Моделирование качества поверхностного слоя, формируемого в процессе обработки МОВ слоем.....		62
2.5.1 Технологическое назначение применения МОВ слоя в технологии изготовления деталей машин.....		62

2.5.2	Расчетно-аналитическая оценка параметров качества поверхностного слоя при ППД конвективными потоками свободнодвижущихся инденторов.....	63
Глава 3	МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ СВОБОДНODВИЖУЩИМИСЯ ИНДЕНТОРАМИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	72
3.1	Методика экспериментальных исследований.....	72
3.1.1	Технологическое оборудование.....	72
3.1.2	Контрольно-измерительные приборы и приспособления.....	77
3.1.3	Экспериментальные образцы.....	80
3.1.4	Обрабатывающие среды.....	82
3.2	Методика проведения экспериментальных исследований.....	83
3.2.1	Методика обоснования эффективных условий магнитодинамической обработки.....	84
3.2.2	Методика исследований влияния магнитодинамической обработки на качество поверхностного слоя.....	88
Глава 4	ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ.....	96
4.1	Исследования производительности процесса обработки во вращающемся электромагнитном поле.....	96
4.1.1	Обоснование эффективной массы загрузки ферромагнитных инденторов в рабочую зону устройства.....	96
4.1.2	Влияние индукции вращающегося электромагнитного поля на интенсивность обработки.....	99
4.1.3	Влияние размерных соотношений ферромагнитных инденторов на интенсивность обработки.....	100
4.2	Исследования изменения качества поверхности в процессе магнитодинамической обработки.....	101
4.2.1	Исследование микропрофиля обработанной поверхности.....	102
4.2.2	Исследование физико-механических характеристик поверхностного слоя.....	111

<b>Глава 5 РАСЧЁТ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.....</b>	<b>117</b>
5.1 Расчёт технологических характеристик магнитодинамической обработки.....	117
5.2 Расчёт параметров качества поверхностного слоя, формируемого в процессе магнитодинамической обработки.....	121
5.3 Обоснование конструктивных и технических характеристик устройств для магнитодинамической обработки.....	124
5.4 Формализация проектирования операций упрочняющей обработки магнитодинамическим методом.....	128
5.5 Практическое применение и технико-экономическое обоснование магнитодинамической обработки .....	131
<b>ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....</b>	<b>135</b>
<b>ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>137</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>138</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>	

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность диссертационного исследования обусловлена поиском способов и методов упрочняющей обработки длинномерных тонкостенных деталей, а также обработки внутренних поверхностей полых деталей.

Анализ литературы показал, что, несмотря на многообразие динамических методов поверхностного пластического деформирования (ППД) свободнодвижущимися инденторами, на сегодняшний день нет эффективного решения этой проблемы. В качестве одного из путей её разрешения предлагается метод обработки, основанный на создании конвективных потоков ферромагнитных частиц во вращающемся электромагнитном поле (ВЭМП). Результаты предварительных исследований показали, что предлагаемый метод вполне обоснованно расширяет теоретические возможности динамических методов ППД и имеет своё целевое технологическое назначение, связанное с применением его на операциях упрочнения деталей, обладающих выраженными парамагнитными свойствами. К числу таких деталей относятся тонкостенные трубы, стрингеры, пояса, лонжероны, которые широко применяются для изготовления летательных аппаратов. Кроме того, этот метод обработки может быть использован на операциях, обеспечивающих подготовку поверхностей для сварки в среде инертных газов, нанесения антикоррозионных и других функциональных покрытий, а также улучшения качества уже сформированных на поверхности покрытий.

Обладая такими же достоинствами, как и у известных методов упрочняющей обработки ППД свободнодвижущимися телами, а именно возможность интенсивного локального воздействия на обрабатываемую поверхность, метод упрочняющей обработки свободнодвижущимися инденторами во ВЭМП значительно проще и дешевле позволяет производить обработку длинномерных деталей со сравнительно малой площадью сечения, тонкостенных и внутренних поверхностей полых деталей. Сравнительный анализ методов упрочняющей обработки динамическим поверхностно-пластическим деформированием показывает, что устройства с ВЭМП наиболее применимы для упрочняющей обработки деталей данного типа конструкций, что обусловлено низкой стоимостью, конструктивной простотой и достаточно высокой производительностью. Вместе с тем, следует подчеркнуть, что предлагаемый метод в силу его физической (магнитной) природы, имеет свои специфические особенности, которые требуют проведения целенаправленных научных исследований с целью обоснования его практического применения в технологии обработки деталей и являются объектом предлагаемого диссертационного исследования.

**Степень разработанности темы.** Диссертационная работа обобщает результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса обработки во ВЭМП, изложенных в трудах Логвиненко Д.Д., Вернигорова Ю.М., Барона Ю.М., Болдырева А.И., Марта И.Ф.,

Сакулевича Ф.Ю., Коновалова Е.Г., а также проведённых автором на ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева», и является логическим продолжением исследований в области разработки и совершенствования методов упрочняющей обработки деталей динамическими методами ППД, физико-технологические основы которых заложены в трудах учёных Саверина М.М., Кудрявцева И.В., Бабичева А.П., Дрозда М.С., Рыжова Э.Д., Матлина А.А, Петросова В.В., Копылова Ю.Р., Тамаркина М.А., Рыковского Б.П., Лебедева В.А., Соловьева Д.Л., Киричека А.В., и многих других.

**Цель работы** – разработка технологии упрочнения деталей магнитодинамическим методом на основе раскрытия физической сущности обработки во вращающемся электромагнитном поле, обоснования его технологических возможностей по обеспечению качества поверхности и производительности процесса.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующий комплекс **задач**:

1. Установить закономерности движения ферромагнитных инденторов во вращающемся электромагнитном поле.
2. Разработать термодинамическую модель, определяющую энергетическое состояние ферромагнитных инденторов во вращающемся электромагнитном поле.
3. Обоснован характер ударно-импульсного взаимодействия ферромагнитных инденторов с обрабатываемой поверхностью и их эффективная загрузка.
4. Установить расчётные зависимости, обеспечивающие объективную оценку параметров качества обработанной поверхности и производительности процесса.
5. Разработать методики проектирования технологических процессов операций упрочняющей обработки деталей во вращающемся электромагнитном поле.
6. Разработать рекомендации по проектированию устройств с ВЭМП, а также их технологического оснащения, обеспечивающих их эффективное использование на операциях упрочняющей обработки деталей.

**Научная новизна.** Получены математические модели, описывающие закономерности движения ферромагнитных инденторов во вращающемся электромагнитном поле и характер их ударно-импульсного воздействия на обрабатываемую поверхность. С позиций энергетического подхода установлены соотношения, позволяющие определить энергетическое состояние ферромагнитных инденторов в процессе обработки, а также условия обеспечения устойчивого процесса магнитоожижения вращающегося слоя ферромагнитных инденторов, перехода магнитоожженного вращающегося (МОВ) слоя из магнитоожженного состояния в «твёрдую» фазу. Разработана теоретико-вероятностная модель расчета производительности и уточнены расчетные зависимости по определению параметров качества поверхностного слоя,

сформированного ферромагнитными инденторами под воздействием вращающегося электромагнитного поля.

**Теоретическая значимость работы** заключается в создании комплекса теоретических моделей, раскрывающих закономерности процесса и их влияния на качество упрочненного поверхностного слоя и производительность магнитодинамической обработки.

**Практическая значимость работы.** Разработана методика проектирования технологических операций упрочняющей обработки деталей во ВЭМП. Разработаны рекомендации по проектированию устройств с ВЭМП, обеспечивающих их эффективное использование на операциях упрочняющей обработки длинномерных деталей из парамагнитных материалов.

**Методологической базой исследований** являлись основные положения: технологии машиностроения, теории электромагнитного поля, теории статистики и вероятности, физико-технологические основы методов упрочнения.

Технологические рекомендации, разработанные на основании исследований, прошли промышленные испытания на заводе ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева» в г. Таганроге.

**Положения, выносимые на защиту:** Модели, описывающие закономерности движения ферромагнитных инденторов во вращающемся электромагнитном поле, определяющие энергетическое состояние ферромагнитных инденторов во ВЭМП, устанавливающие характер ударно-импульсного воздействия ферромагнитных инденторов на обрабатываемую поверхность и оценивающие производительность процесса магнитодинамической обработки.

**Степень достоверности:** Достоверность диссертационного исследования подтверждена результатами экспериментальных исследований и аprobацией промышленных испытаний метода магнитодинамической упрочняющей обработки деталей на ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева»

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, конференциях с международным участием и международных симпозиумах:

1. Аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности, г. Таганрог, 2012-2016 гг.
2. Юбилейная конференция студентов и молодых ученых, посвященная 85-летию ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, 2015 г.
3. Интегрированные и виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и др. отраслях, г. Ростов-на-Дону, 2015 г.
4. Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2015, г. Пермь, 2015 г.
5. Динамика технических систем, г. Ростов-на-Дону, 2015 г.

6. Жизненный цикл конструкционных материалов, г. Иркутск, 2016 г.
7. Наукоёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения (ТМ-2016), г. Москва, 2016 г.
8. Аграрный потенциал в системе продовольственного обеспечения: теория и практика, г. Ульяновск, 2016 г.
9. Современные проблемы формообразования сложных поверхностей деталей и сборки машин, г. Тула, 2016 г.
10. Перспективные направления развития финишных методов обработки прецизионных поверхностей деталей научноемких изделий; виброволновые технологии, г. Ростов-на-Дону, 2016 г.
11. Научная конференция по амфибийной и безаэродромной авиации, г. Геленджик, 2016 г.

Технологические рекомендации, разработанные на основании исследований, прошли промышленные испытания на заводе ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева» в г. Таганроге.

**Публикации результатов работы.** По материалам диссертационной работы опубликовано 23 научные работы, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ и 1 статья в системе «Scopus».

## 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1 Использование вращающегося электромагнитного поля в технологических целях

В работах [24, 67] показано, что если ферромагнитные неравноосные инденторы поместить во вращающееся электромагнитное поле достаточной напряженности, то они приходят в сложное, хаотичное движение, создавая своеобразный магнитоожиженный вращающийся (МОВ) слой. Для практического использования МОВ слоя ферромагнитных свободнодвижущихся инденторов последние помещают в рабочую камеру, вокруг которой располагают устройство, создающее в рабочей зоне этой камеры вращающееся электромагнитное поле.

Основой данных устройств (рис. 1) является индуктор 2, помещенный в корпус 1. Индуктор представляет собой видоизмененный статор асинхронного электродвигателя, в расточку которого вставлена труба из немагнитного материала. Труба служит рабочей зоной 3. Для предохранения трубы от разрушения в нее вставляют сменную вставку 5, которую заменяют по мере износа. Устройства могут быть выполнены с водяным и воздушным охлаждением.

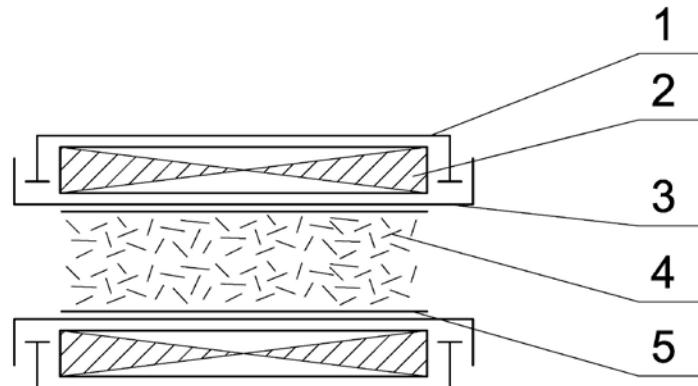


Рис.1. Схема устройства с вращающимся электромагнитным полем: 1 – корпус; 2 – индуктор; 3 – рабочее пространство; 4 – иголки; 5 – сменная вставка.

Основные параметры индуктора – ток, индуктивное сопротивление, число витков на фазу и диаметр его расточки. Однородность магнитного поля в сечении индуктора является важным условием эффективности его работы. В однородном магнитном поле свободнодвижущиеся инденторы равномерно распределяются по всему объему рабочей камеры, тем самым обеспечивая качественное проведение технологического процесса. Диаметр

и длина расточки индуктора обуславливают производительность устройств с вращающимся электромагнитным полем.

Благодаря своей относительно несложной конструкции устройства с вращающимся электромагнитным полем получили достаточно широкое применение в технологических процессах.

Некоторые из технологий представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Области применения аппаратов с вращающимся электромагнитным полем

№	Технология	Технологические показатели	Отрасль, в которой используется
1	Окисление фенола, спиртов в сточных водах	Снижение содержания до ПДК	Химические и мебельные комбинаты
2	Очистка сточных (в т.ч. гальван.) вод от тяжелых металлов	Снижение содержания до ПДК	Наиболее широкое использование
3	Получение дисперсий из латекса	Значительно улучшаются мех. свойства изделий	Заводы резинотехнических изделий
4	Приготовление эмульсий вода-масло и СОЖей	Не расслаиваются в течение 5-15 суток	Механические заводы
5	Приготовление порошков для резисторов	Тонина помола в 10 раз выше	Радиозаводы; электронная промышленность
6	Ликвидация илов из отстойников городов	Улавливаются все металлы, содержащиеся в иле; ниже ПДК	Процесс близок к п. 2
7	Обеззараживание навоза и производство гранул органо-минеральных удобрений	Уничтожаются микроорганизмы, глисты, их яйца и сорняки	Отрасль переработки отходов АПК
8	Производство комбикормов из местного сырья	Получены гранулы. Себестоимость ниже	АПК, пищевое производство
9	Производство этилового спирта из соломы, стеблей кукурузы, подсолнечника и др.; для малых предприятий	Производительность 0,5-5 т/сутки может быть увеличена	АПК

№	Технология	Технологические показатели	Отрасль, в которой используется
10	Получение высокопитательных кормов из соломы, стеблей кукурузы, подсолнечника и др. с добавкой водяной суспензии ряски	В АВС идет гидролиз сырья до получения глюкозы и лигнина, затем смешиваются с размолотой в АВС ряской	АПК, пищевое производство
11	Предпосевная обработка семян	После обработки в АВС с добавкой протравителя, минерал. удобр., активаторов энергия роста увеличивается в 3 раза. Всходесть 99 %	АПК
12	Утилизация отходов от производства подсолнечного, оливкового и др. масел	Из жмыха в АВС доизвлекаются масла до 93-99 % от содержания после прессования	Отрасль переработки отходов АПК
13	Экстракция эфирных масел и др. из полевых растений	Экстракция идет при комнатной температуре, и масла не повреждаются	АПК
14	Активация нефти перед крекингом	Выход свежих нефтепродуктов на 5 – 7 % больше	Нефтеперерабатывающее производство
15	Обработка дизельного топлива с водой	Введено до 10 % воды. Расслой не наблюдается через 3-5 месяцев. Не затвердевает при 18-25 °C	Нефтеперерабатывающее производство
16	Обработка топливного мазута, в т.ч. обводненного	Введено до 15 % воды. Расслой не наблюдается. Горение идет активнее. Нет черного дыма	Нефтеперерабатывающее производство, утилизация отходов НПЗ
17	Обработка отработанных масел	Масла разжижаются, преобразуется их структура, идет очистка от твердой фазы	Лакокрасочные заводы, Нефтеперерабатывающее производство

№	Технология	Технологические показатели	Отрасль, в которой используется
18	Производство масляных и фасадных красок	Качество масляных красок соответствует ТУ, фасадных – выше, чем по ТУ	Лакокрасочные заводы
19	Производство минеральных пигментов для красок	Качество красок значительно выше	Лакокрасочные заводы
20	Про-во изолирующих от тепла и звука плиток из песка, опилок, золы и их смесей	Получение при 100-200 °C производство 1-10 млн штук/год одной установкой	Строительство
21	Переработка отработанных покрышек в тепло- и звукоизолирующую плитку, черепицу, резиновые изолирующие прокладки и т.д.	Вначале получают порошок резины, смешивают с песком (если нужно) и прессуют сразу готовые изделия при 100-120 °C	Строительство, энергетика, резинотехническое производство
22	Производство водонепроницаемого песка для гидроизоляции (гидрофобных материалов)	Песок обрабатывают в АВС с добавлением реагентов при нормальной температуре и давлении	Строительство
23	Производство газобетона	Уменьшается расход алюминия и др. реагентов, ускоряется газообразование, увеличивается прочность бетона	Строительство
24	Переработка отвалов фосфоргипса и его смесей	Отделяются фосфор и редкоземельные металлы, что полностью окупает расходы. Прочность деталей значительно выше	Производство фосфорных удобрений
25	Переработка отвалов с целью извлечения ценных примесей, например золота, меди, вольфрама, никеля и др.	Выход годного в 5-10 раз выше. Капитальные затраты в 20-100 раз ниже	Горнодобывающая промышленность; горная химия

## Продолжение таблицы 1.1

№	Технология	Технологические показатели	Отрасль, в которой используется
26	Выработка ценных компонентов из месторождений с малыми запасами, например, W, Mo, Au и др.	К месту разработки подают мобильную линию АВС и по окончании убирают обратно	Горнодобывающая промышленность; горная химия
27	Горная химия	Заменяются громоздкие колонны и чаны компактными АВС и гидроциклонами	–
28	Порошковая металлургия: а) размол б) смещивание в) спекание г) получение металлопластов	Скорости помола резко растут, порошок активируется. Очень высокое качество смещивания $t^0$ спекания снижена на 50-150 $^0\text{C}$ Спекание без защиты при $t^0 = 100-140 \text{ }^0\text{C}$	Электротехнические заводы
29	Подготовка глинистых растворов для бурения	Частицы меньше на порядок, сокращается расход ПАВ, улучшаются кроющие свойства	Нефтедобывающая промышленность
30	Разжижение нефти и мазута для перевозки при низких температурах	–	Нефтедобывающая промышленность
31	Переработка гудрона в битум	Расплавленный гудрон обрабатывают в рабочей зоне АВС воздухом	Нефтеперерабатывающая промышленность
32	Получение смазок с твердыми добавками ( $\text{MoS}_2$ , $\text{WS}_2$ и др.)	Получают смазки высокого качества	Нефтеперерабатывающая промышленность

№	Технология	Технологические показатели	Отрасль, в которой используется
33	Нейтрализация пластовых вод при добыче нефти или газа. Извлечение из них ценных компонентов	Извлечение йода практически на 100 %	Нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая промышленность
34	Химическая промышленность а) гомогенные процессы б) гетерогенные процессы	Процессы идут при низких температурах и давлениях, что позволяет упростить оборудование. Скорости реакций увеличены, это приводит к уменьшению объемов и размеров оборудования	–
35	Производство соков и паст из ягод и овощей при комнатной температуре	–	АПК, пищевое производство

Перечисленные примеры, безусловно, не являются исчерпывающими в смысле определения области применения устройств с ВЭМП, а дают лишь некоторое представление о возможностях МОВ слоя. Сложные физические, химические и механохимические явления, имеющие место в МОВ слое, недостаточно изучены, хотя устройства с ВЭМП уже нашли применение в различных отраслях промышленности.

Потенциал устройств с ВЭМП далеко не исчерпан на их сегодняшнем состоянии. Изучая теоретические предпосылки работы устройств с ВЭМП, удалось выявить новые возможности устройств.

Как следует из представленных методов, устройства, использующие принцип МОВ слоя, позволяют интенсифицировать целый ряд технологических процессов за счет комплексного воздействия на обрабатываемые вещества: интенсивного перемешивания и диспергирования, акустической и электромагнитной обработки, трения, высоких локальных давлений, электролиза и ударных взаимодействий.

Воздействие на поверхность металла в условиях обработки с применением ВЭМП способствует интенсификации процесса и расширению его технологических возможностей. Кроме того, разработка таких научёмких технологий направлена на решение основных технологических задач, таких как:

- повышение производительности технологий упрочняющей обработки деталей;
- обеспечение обрабатываемости деталей с целью получения поверхности с требуемыми качеством и эксплуатационными свойствами;
- сокращение материо- и энергоемкости технологий упрочняющей обработки деталей.

В этой связи представляет интерес использование устройств с ВЭМП для интенсификации процессов обработки в условиях вращающегося электромагнитного поля, которые как свидетельствуют результаты предварительных исследований, проведённых в этом направлении [49], могут использоваться для повышения эффективности технологических переделов изготовления деталей.

На основе проведённых предварительных экспериментальных исследований [59] установлено, что хаотичное движение инденторов во вращающемся электромагнитном поле приводит к большому количеству столкновений между инденторами, инденторов с обрабатываемыми изделиями, сопровождающихся как прямыми, так и скользящими ударами. Число таких соударений достигает на каждый индентор  $10^3$ – $10^4$  в секунду. В результате ударно-импульсного соударения происходит локальная упруго-пластическая деформация поверхности инденторов и изделий, находящихся в рабочей зоне устройства.

Таким образом, можно сделать вывод: устройства с ВЭМП можно вполне успешно применять для очистки и упрочнения поверхностного слоя деталей.

С целью исследования и обоснования технологических возможностей обработки деталей в условиях ВЭМП проведём анализ основных закономерностей и их влияния на качество и производительность процесса.

## **1.2 Закономерности движения ферромагнитных частиц во вращающемся электромагнитном поле**

Энергетическое состояние обрабатывающей среды, помещённой во вращающееся магнитное поле, определяется динамическими характеристиками частиц. Под воздействием вращательного магнитного поля ферромагнитные частицы совершают сложное движение – поступательное с частым и резким изменением скорости и направления и вращательное с переменной угловой скоростью. В результате этого в зоне действия вращательного электромагнитного поля частицы формируют магнитоожиженный вращающийся (МОВ) слой, который обеспечивает реализацию ряда технологических процессов, отмеченных в разделе 1.1.

Экспериментально определено [53, 76], что ферромагнитные частицы начинают движение при достижении магнитной индукции в рабочей зоне устройства начиная от величины 0,08 Тл. На характер движения частиц влияет множество факторов, таких как: масса,

форма, размеры и магнитные свойства частиц, скорость вращения и напряженность магнитного поля, создаваемая индуктором, вязкость среды и др. Намагничиваясь, мелкие частицы притягиваются друг к другу, образуя цепочки, которые вытягиваются по направлению вектора напряженности магнитного поля и вращаются за полем вокруг общей оси. Поскольку слой неуравновешен, цепочки существуют доли секунды, разрушаясь при соударении друг с другом и группируясь вновь (рис. 1.2а). Сравнительно крупные цилиндрические частицы, как правило, цепочек не образуют, каждая из них движется автономно (рис. 1.2б).



Рис. 1.2. Характер движения ферромагнитных частиц в слое:  
а – образование цепочек; б – вращательное движение отдельных частиц.

На рис. 1.3 показана траектория движения центра тяжести одной частицы за 0,5 с, определенная путем скоростной киносъемки.

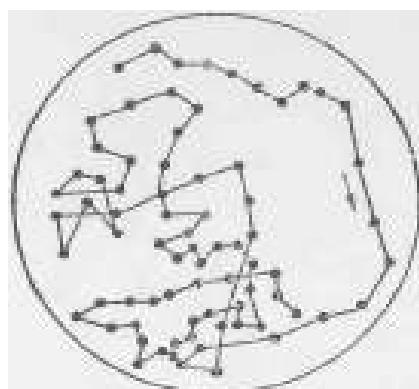


Рис. 1.3. Траектория движения сферической стальной частицы во вращающемся электромагнитном поле за 0,5 с.

В результате статистической обработки большого массива экспериментальных данных установлено, что тангенциальная и радиальная составляющие скорости движения ферромагнитной частицы подчинены нормальному закону распределения. Направление вектора радиальной составляющей скорости частицы равновероятно, тангенциальная составляющая скорости в большей степени направлена в сторону вращения поля, т. е. имеет место вращение всего слоя в целом.

Исходная система уравнений движения намагниченной частицы во вращающемся магнитном поле имеет вид [114]:

$$I \frac{d\vec{\omega}}{dt} = [\vec{p}_m, \vec{H}]; \frac{d\vec{p}}{dt} = [\vec{\omega}, \vec{p}_m]; \vec{\omega}(0) = \vec{\omega}_0; \vec{p}_m(0) = \vec{p}_{m0}, \quad (1.1)$$

где  $I$  – момент инерции частицы относительно главной оси,  $\omega$  – угловая скорость частицы,  $\vec{p}_m$  – ее магнитный момент,  $H$  – напряженность магнитного поля,  $\vec{\omega}_0$  и  $p_{m0}$  – начальные скорость и ориентация магнитного момента частицы,  $t$  – время.

Траектория частицы, помещённой в переменное поле

$$H_x = H_0 \cos \Omega t, \quad H_y = H_0 \sin \Omega t, \quad H_z = 0.$$

$\Omega$  - частота вращения частицы  $\langle \omega \rangle = \Omega$ , (где  $\Omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота переменного поля); определяется решением уравнения (1.1). В работе [38] предложено решение линеаризированного уравнения вращательного движения для малых углов поворота магнитомягкой частицы во вращающемся магнитном поле. Для его решения использован подход, основанный на следующих допущениях [62]:

- из рассмотрения исключаются диссипативные силы;
- магнитное взаимодействие между частицами отсутствует, и столкновение их является абсолютно упругим;
- на основании положения об изотропном распределении магнитных моментов частиц пренебрегается силовым моментом со стороны окружающих частиц; в уравнении вращательного движения учитывается только силовой момент внешнего поля и момент диссипативных сил;
- считается, что угол поворота магнитного момента частицы за время между двумя последовательными столкновениями мал;
- рассматриваются только концентрированные системы, в которых две и более частиц.

Для решения уравнения (1.1) с учетом инерциального члена в работе [74] рассмотрено уравнение вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной точки. Кинематические уравнения Эйлера составляющих вектора угловой скорости в координатной форме имеют вид [96]:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin\xi & \cos\varphi & 0 \\ \sin\theta & \cos\xi & -\sin\varphi & 0 \\ \cos\theta & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta \\ \theta \\ \xi \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

где  $\zeta, \theta, \xi$  – углы Эйлера.

Принимая, что  $\zeta = \zeta_0 + \zeta'$ ,  $\theta = \theta_0 + \theta'$ ,  $\xi = \xi_0 + \xi'$ , разложив тригонометрические функции по малым значениям  $\zeta, \theta, \xi$  и отбросив члены второго и более высоких порядков малости, с учетом (1.2) была получена линеаризированная система уравнений движения в проекциях в виде [46]:

$$\begin{aligned} \zeta'' \sin\theta_0 \cos\varphi_0 - \theta'' \sin\varphi_0 &= \beta \cos\Omega t (\cos\theta_0 - \theta \sin\theta_0) \\ \zeta'' \cos\theta_0 + \xi'' &= \beta \theta (\cos\theta_0 \cos\xi_0 \sin\Omega t - \cos\theta_0 \sin\xi_0 \cos\Omega t) - \\ &\quad - \beta \xi (\sin\theta_0 \sin\xi_0 \sin\Omega t - \sin\theta_0 \cos\xi_0 \cos\Omega t) + \\ &\quad + \beta (\sin\theta_0 \cos\xi_0 \sin\Omega t - \sin\theta_0 \sin\xi_0 \cos\Omega t), \end{aligned} \quad (1.3)$$

где индекс «0» означает начальные значения угла;  $\beta = p_m H/I$ .

С помощью ввода безразмерного времени  $x = \Omega t$  из двух первых уравнений системы (1.3) было получено выражение для  $\theta(x)$ :

$$\theta(x) = C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3 + \dots, \quad (1.4)$$

где  $C_0 = \theta_0$ ,  $C_1 = \theta'_0$ ,  $C_2 = 1/2(\theta_0 A_2 - A_4)$ ,  $C_3 = 1/6(\theta_0 A_1 + \theta'_0 A_2 - A_3)$ ,

$$C_4 = 1/12[\theta_0 A_1 - 1/2\theta_0 A_2 + 1/2A_2(\theta_0 A_2 - A_4) + 1/2A_4],$$

где  $A_1 = \beta\Omega^{-2} \sin\theta_0 \cos\xi_0$ ,  $A_2 = \beta\Omega^{-2} \sin\theta_0 \sin\xi_0$ ,

$$A_3 = \beta\Omega^{-2} \cos\theta_0 \cos\xi_0$$

$$A_4 = \beta\Omega^{-2} \cos\theta_0 \sin\xi_0$$

С учетом (1.4) после интегрирования второго уравнения системы (1.3) получено выражение для  $\zeta(x)''$ :

$$\begin{aligned} \zeta(x)'' &= \zeta_0 + \Omega^{-2} \sin\xi_0 (2C_2 x + 3C_3 x^2 + 3C_4 x^3 + \dots) + \beta\Omega^{-2} \cos\theta_0 \sin x - \\ &\quad - \beta\Omega^{-2} \sin\theta_0 \{\theta_0 \sin x + \theta_0[(\cos x - 1) + x \sin x] + C_2[2x \cos x + \\ &\quad + (x^2 - 2) \sin x] + C_3[(x^3 - 6x) \sin x + 3x^2 \cos x + 6(\cos x - 1)]\}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Из последнего уравнения системы (1.3) с учетом (1.4) и (1.5) для  $\xi(x)$  получено решение:

$$\varphi_x = p_{m_0} + p_{m_1} x + p_{m_2} x^2 + p_{m_3} x^3 + \dots, \quad (1.6)$$

где  $p_{m_0} = \xi_0$ ,  $p_{m_1} = \xi'_0$ ,  $p_{m_2} = 1/2[-\xi_0 A_1 - 2A_5 C_2 + A_6 - \theta_0(A_4 + A_7) - A_2]$ ,

$$p_{m_3} = 1/6[-\xi_0 A_2 - \xi'_0 A_1 - 6A_3 C_5 \theta'_0 (A_4 + A_7) + \theta_0 A_3 + A_1]$$

$$A_5 = \operatorname{tg}\xi_0 \operatorname{ctg}\theta_0, A_6 = \beta\Omega^{-2} \cos\theta_0 \operatorname{ctg}\theta_0,$$

$$A_7 = \beta\Omega^{-2} \cos\theta_0 \sec\xi_0.$$

На основании полученных решений (1.4), (1.5) и (1.6) в работе [58] определена энергия, подкачиваемая полем одной частице за промежуток времени между двумя последовательными столкновениями:

$$\begin{aligned}
& \frac{N I}{t_c} \frac{1}{2} \left\{ \frac{9E_{cp}}{I} + \left( \frac{\beta}{\Omega^2} \right)^2 \left[ \frac{1}{3} A_8 (\Omega t_c)^2 + \frac{1}{5} A_9 (\Omega t_c)^4 + \frac{1}{7} A_{10} (\Omega t_c)^6 + \right. \right. \\
& \left. \left. + 2(\Omega t_c)^3 \right] + \frac{\beta \pi^2}{\Omega} \frac{8}{8} - \left( \frac{6E_{cp}}{I} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ 1 + \frac{1}{4} (\Omega t_c) + (\Omega t_c)^2 \right] \frac{1}{2} \Omega t_c \right\} = \\
& = 6E_{cp} \left[ N \left( \frac{f_n}{m} + \frac{f_v}{I} \right) \right] + \frac{E_{cp}(1 - k_{upr})}{t_c} N,
\end{aligned} \tag{1.7}$$

где  $N$  – числовая концентрация частиц,  $A_8 \dots A_{10}$  – численные коэффициенты, значения которых  $A_8 = 86,27$ ;  $A_9 = -0,604 + 0,225\omega_0 + 0,708\omega_0^2$ ;  $A_{10} = 0,290 + 0,037\omega_0^2$ ;  $I\omega_0^2/6 = E_{cp}$  – средняя энергия на одну степень свободы вращательного движения;  $f_n$  и  $f_v$  – коэффициенты трения поступательного и вращательного движений, зависящие от вязкости непрерывной фазы, формы частиц и их концентрации;  $k_{upr}$  – эффективный коэффициент упругости, характеризующий неидеальность столкновений частиц.

Выражение (1.7) получено из предположения, что МОВ слой находится в состоянии динамического равновесия с непрерывной фазой, а также равенства диссипативной энергии в единице объема МОВ слоя за единицу времени и энергии, передаваемой полем.

В процессе столкновений частицы взаимодействуют друг с другом, обмениваясь энергиями как поступательного, так и вращательного движения. Однако в силу того, что магнитное поле возбуждает только вращательные степени свободы частиц, а поступательное движение приобретается в результате соударений и взаимного диполь-дипольного взаимодействия и является основным параметром, приводящим к интенсификации процессов переноса в МОВ слое, вопрос об эффективности превращения энергии вращательного движения частиц в поступательное имеет важное значение в раскрытии сущности динамики движения частиц в МОВ слое. В конечном счете, рассматриваемый вопрос сводится к анализу эффективности превращения энергии электромагнитного поля в энергию движения частиц.

Обмен между поступательными и вращательными движениями частиц в МОВ слое определяется на основе решения задачи о соударении двух намагниченных вращающихся шаров и определения сумматорных инвариантов соударения, что представляется достаточно сложным. В работе [20] установлено, что «вращательная температура» значительно выше «поступательной», и введен коэффициент  $k_s$ , определяющий эффективность превращения кинетической энергии вращательного движения частиц в поступательное и определяется как их отношение. В работах [16, 74] проведен численный анализ и экспериментальная проверка уравнения для оценки средней скорости поступательного движения частиц в МОВ слое в зависимости от физических параметров непрерывной и дисперской фаз, индукции и частоты поля, концентрации частиц и их размеров в МОВ слое. Установлено, что для всех значений исследуемых частот скорость резко падает после достижения максимального значения.

Индукция магнитного поля, соответствующая максимальному значению скорости, с увеличением частоты смещается в область больших значений. Отсюда следует, что для системы с фиксированными физическими параметрами фаз присутствует набор значений магнитной индукций и частот поля, при котором возможен процесс передачи энергии от поля к частицам ( $E_{cp}>0$ ).

Средняя скорость частиц МОВ слоя во вращающемся магнитном поле сравнительно выше, чем в однородном переменном поле, что может быть объяснено зависимостью функции Лагранжа от трёх углов и их производных по времени во вращающемся поле. В однородном переменном поле по причине его аксиальной симметрии функция Лагранжа зависит только от одного угла и его производной. Отсюда следует, что подкачка энергии происходит только на одну степень свободы [23].

Состояние системы намагниченных частиц определяется их концентрацией и физическими параметрами, индукцией и частотой поля. Процесс магнитоожижения происходит послойно, начиная с верхних слоев. Полное оживление, аналогичное уравновешенному состоянию газа, определяется максвелловским распределением частиц по скоростям поступательного движения и формируется при достижении определенного критического значения индукции магнитного поля. Переход из развитого магнитоожженного состояния в плотноупакованное («кристаллическая структура») достигается уменьшением поля до критического значения, меньшего, чем при прямом процессе. Различие между значениями индукции магнитного поля реализующими процесс магнитоожижения в системе намагниченных частиц и при их «кристаллизации» представляет собой интересное явление. В области гистерезиса магнитоожженное состояние определяется хаотическим движением отдельных частиц и кластеров, которые в зависимости от вида магнитного упорядочения дипольных магнитных моментов могут быть абсолютно локально устойчивыми. Абсолютно устойчивыми являются антиферромагнитные агрегаты [11]. Обладая нулевой намагниченностью, они не взаимодействуют с полем, но совершают хаотическое движение в результате соударений. В результате воздействия поля локально устойчивые агрегаты-ферромагниты быстрее разрушаются. Представляет интерес тот факт, что с ростом концентрации частиц при магнитоожижении в переменном поле гистерезис практически вырождается, в то время как во вращающемся поле он сохраняется вплоть до объемной концентрации  $K_{kp} \approx 0,4$  для частиц диаметром 2,8...4,7 мм, но имеет тенденцию к сужению. Отсюда следует, что диаграмма фазового состояния МОВ слоя характеризуется наличием гистерезиса, который имеет место и при переменном, и при вращающемся, и при пульсирующем магнитных полях [16].

При больших концентрациях ( $K_{kp} > 0,18$ ) в отличие от переменного поля, где частицы совершают хаотическое движение, во вращающемся поле на них налагается и ротационное движение в целом: они вращаются как квазиверное тело. Так как линейная скорость ротационного движения приблизительно пропорциональна радиусу, то частицы, находящиеся вблизи оси МОВ слоя, имеют меньшие скорости, чем те, которые движутся на периферии. Вследствие этого следует отметить, что распределение частиц по скоростям перестает быть максвелловским [17].

В работе [36, 97], на основе экспериментальных исследований, также показано, что движение ферромагнитных частиц в МОВ слое наблюдается только до определенной степени заполнения рабочей зоны камеры данными частицами, при этом все частицы одновременно прекращают движение, образуя ряд параллельно расположенных дисков. Вид таких дисков показан на рис. 1.4.

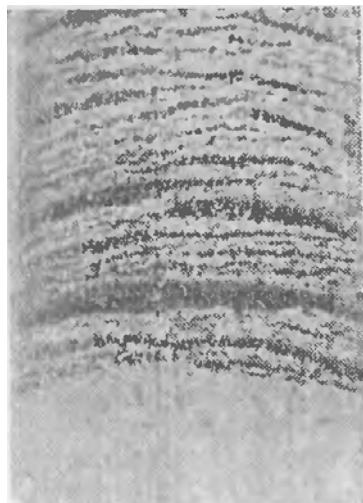


Рис. 1.4. Диски, образованные ферромагнитными частицами при критическом заполнении камеры этими частицами.

Отмечается, что критерием оценки условий прекращения движения ферромагнитных частиц может служить параметр  $K_{kp}$ , оценивающий степень заполнения рабочего объема зоны влияния вращающегося электромагнитного поля этими частицами в функции от характеристик процесса:

$$K_{kp} = f(\chi, l/d, V, \omega, \eta, \rho, H, \rho_q, I_z \dots),$$

где  $\chi$  – магнитная восприимчивость материала частиц;  $l/d$  – параметрический критерий подобия (здесь  $l$  – длина,  $d$  – диаметр частицы);  $V$  – объем отдельной частицы;  $\omega$  – угловая скорость вращения магнитного поля;  $H$  – напряженность магнитного поля;  $\eta$  – вязкость среды;  $\rho$  – плотность среды,  $\rho_q$  – плотность материала частиц;  $I$  – момент инерции частицы.

Найти аналитическое выражение такой зависимости весьма затруднительно, так как большинство перечисленных характеристик взаимно связаны и обусловлены друг с другом. Поэтому его обоснование необходимо находить на основе экспериментальных исследований.

### **1.3 Обзор методов упрочняющей обработки ППД**

#### **1.3.1 Использование потоков движущихся частиц в технологии упрочняющей обработки**

Эффект ударно-деформационного воздействия металлических частиц (в виде дроби, стальных шариков и др.) на поверхностный слой изделий известен давно [4, 22, 34, 39, 63, 64, 75, 77, 80, 81, 87, 89, 94, 110]. Он использовался в основном для поверхностного упрочнения, за счет наклёпа, с целью повышения предела выносливости и износостойкости деталей. Повышение эксплуатационных свойств деталей достигалось путём изменения параметров качества и свойств материала поверхности, так как в процессе воздействия: формируется качественно новая макро- и микрогеометрия поверхности; возникают остаточные напряжения, вследствие искажения кристаллической решётки материала; структура пластически деформированного слоя приобретает моногенно структурированный характер, обуславливающий изменение его микротвёрдости.

Несмотря на появление в последние десятилетия множества новых физических методов поверхностного упрочнения (термических, лазерных и т.д.), технологические методы, использующие в качестве инструмента металлические частицы, имеют достаточно большой удельный вес в машиностроении и металлообработке. Кратко рассмотрим особенности этих методов, получивших применение в технологических процессах изготовления деталей машин и конструкций.

В соответствие с классификацией, предложенной в работе [64], методы ППД свободнодвижущимися частицами по состоянию обрабатывающей среды в процессе обработки разделены на 3 группы.

***Группа методов обработки направленным потоком частиц***, включающая в себя дробеструйную обработку [34, 89], гидродробеструйную [81] и пневмодинамическую обработку [87]. Сущность методов заключается в формировании направленной на поверхность детали потока (факела) частиц, которые разгоняются со скоростью порядка десятков м/с. Большое количество ударов частиц о поверхность приводит к упрочнению поверхностного слоя за счет пластической деформации. При движении от форсунки (сопла) до упрочняемой поверхности частицы ведут себя подобно газу, т.е. практически не взаимодействуют друг с

другом. После отскока от детали частицы непрерывно собираются специальным устройством, очищаются и подаются на вход для формирования потока.

*Дробеструйная обработка* наиболее широко распространена. Упрочнение осуществляется на пневмодробеструйных установках, которые просты по конструкции. В них концентрированный поток дроби (диаметром 0,8...2 мм) под давлением сжатого воздуха приобретает скорость 3...5 м/с и через неподвижное или качающееся сопло направляется на неподвижно закрепленную или вращающуюся на шпинделе деталь. На рис. 1.5 представлена промышленная установка типа БДУ-Э2М, используемая для местного упрочнения, а также формообразования деталей из листов и плит. Установка состоит из системы сбора 1, подачи 2 и очистки 5 дроби, рабочей камеры 10, соединенной с основными системами установки посредством двух рукавов: подачи дробевоздушной смеси 7 и отсоса дроби 6. Рабочая камера состоит из штуцера 8, сопла 9, подающего дробь на поверхность заготовки 12, и полости разрежения 13, через штуцер 4 которой дробь отводится из камеры. Во избежание вылета дроби из камеры предусмотрено щеточное уплотнение 11. Установка смонтирована на тележке 3 и может транспортироваться. Масса загружаемой дроби – до 100 кг.

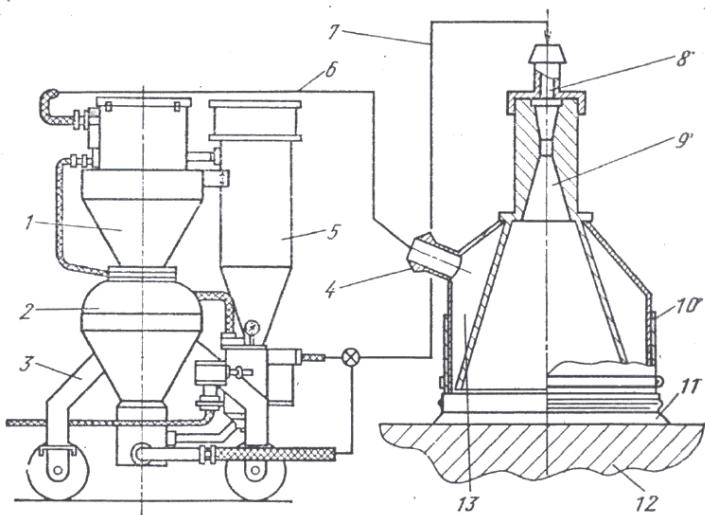


Рис. 1.5. Дробеструйная установка БДУ-Э2М.

*Гидродробеструйное упрочнение* осуществляется шариками, эжектируемыми смазывающе-охлаждающей жидкостью. На рис. 1.6 представлена принципиальная схема гидродробеструйной эжекторной установки (ГДЭУ). При обработке деталь 1 базируют на шпинделе в рабочей камере 2, разделенной сеткой 3 на две зоны – «А» и «Б». В сетке 3 находится дробь (шарики), в зоне «Б» – СОЖ. В зоне «А» установлено сопло-эжектор 4. Затем в него насосом 5 направляется струя СОЖ, которая захватывает дробь и направляет на обрабатываемую поверхность детали, производя ее обработку. Сеткой 3 жидкость отделяется от дроби и сливается через патрубок 6 в бак 7. В баке расположен фильтр 8, отделяющий частицы

материала детали, возникающие при «шелушении» поверхностного слоя, и изношенную дробь, просеянную через сетку 3. После этого насос 5 вновь засасывает рабочую жидкость, и процесс обработки детали продолжается.

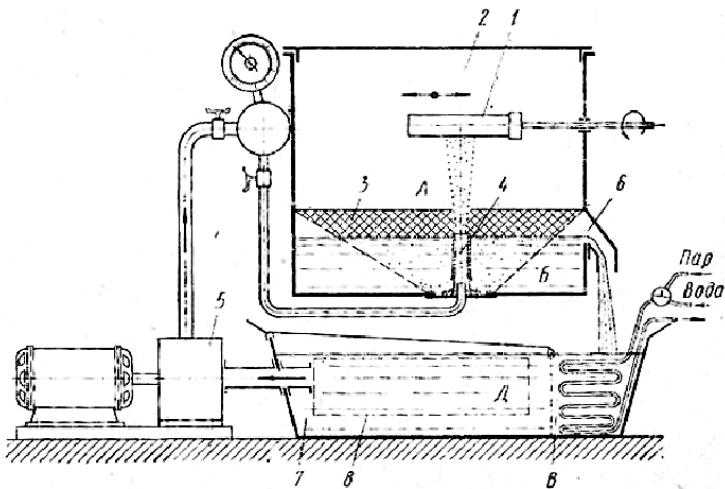


Рис. 1.6. Принципиальная схема ГДЭУ.

Распыление дроби вместе с жидкостью позволяет производить отделочный эффект за счет значительного сокращения сил трения при соударении дроби с поверхностью, а также улучшения ее шероховатости.

*Пневмодинамическая обработка* является разновидностью пневмодробеструйной обработки. Сущность ее основывается на том, что в изолированном объеме (камере) расположено определенное число шариков, которые под действием струи сжатого воздуха находятся в состоянии постоянного движения: в центральной части рабочей камеры они разгоняются, достигая скорости 12-15 м/с, упрочняют поверхность и затем скатываются назад, в нижнюю часть камеры, где снова захватываются струей воздуха. Камера связана с кареткой и перемещается вдоль поверхности обрабатываемой детали, последовательно проходя все ее участки. Изменяя воздушное давление (от 0,3 до 0,7 МПа), продольную подачу рабочего органа (от 10 до 100 мм/мин), диаметр шариков (от 1 до 3 мм) и массу загружаемых шариков, можно создавать заданный режим упрочнения. Устройства такого типа используют для обработки гладких поверхностей большой длины.

В отличие от вышерассмотренных способов упрочнения дробью этот способ не требует дробепроводящих узлов и деталей, подвергающихся быстрому износу при эксплуатации (сопла, лопасти роторов), и не имеет потерь рабочих частиц.

Возможность широкого регулирования режимов ведения процесса упрочнения (давление воздуха, диаметр и общая масса находящихся в камере шариков и т.д.) позволяет получать различные значения кинетической энергии движущихся шариков и времени удара об обрабатываемую поверхность.

Пневмодинамическая обработка может осуществляться устройствами двух типов – разгонного и хаотического. В устройствах разгонного типа движение деформирующих тел характеризуется определенной направленностью, совпадающей с направленностью воздушного потока. В устройствах хаотического типа (рис. 1.7) отсутствует определенная направленность движения деформирующих тел.

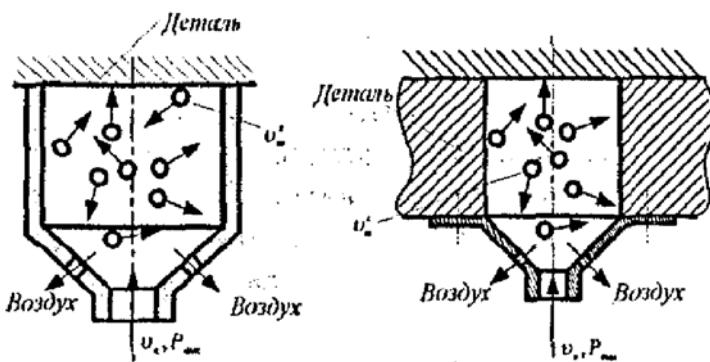


Рис.1.7 Пневмодинамическое устройство хаотического типа

*Группа методов обработки порционными массами частиц* включает дробемётную обработку [89], гравитационную, ударно-барабанную и ударно-импульсную обработку [63]. Сущность этой группы методов заключается в том, что частицы метаются на поверхность детали предварительно сконцентрированными порциями со скоростью и частотой, сообщаемой им рабочим органом устройства. В результате соударения частиц с поверхностью происходит пластическое деформирование и, как следствие, её упрочнение. Аналогично дробеструйной обработке в процессе движения от рабочего органа до обрабатываемой поверхности частицы обрабатывающей среды движутся подобно газу, то есть практически не соударяются друг с другом. После отскока от изделия частицы непрерывно собираются специальным устройством, очищаются и подаются на рабочий орган.

*Дробеметная обработка* – распространенный и эффективный технологический метод повышения выносливости и ресурса деталей ППД. Сущность метода заключается в том, что рабочая среда (дробь) поступает на лопатки быстро врачающегося ротора и выбрасывается на обрабатываемую поверхность деталей с высокой скоростью (50...80 м/с). Дробеметные установки выделяются среди других методов ППД высокой производительностью (1300 Н/мин), применяются, как правило, при массовом производстве для упрочняющей обработки рессор, зубчатых колес и других деталей машин.

Существует целый ряд типов установок дробеметного упрочнения. Как показал опыт, более производительными, а также удобными для перемещения деталей при обработке и

автоматизации процесса являются установки с горизонтальным расположением оси вращения ротора, выбрасывающего дробь в вертикальном положении (рис. 1.8).

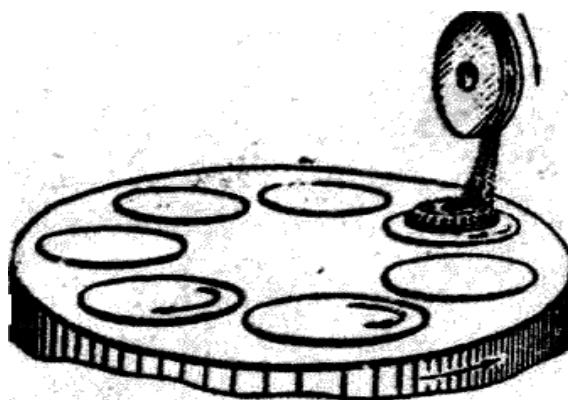


Рис. 1.8. Схема обработки конических зубчатых колес на дробеметной установке с вращающимся столом.

*В процессе ударно-барабанной обработки* в полости барабана находятся сыпучие рабочие частицы (например, дробь). Барабану сообщается такая скорость вращения вокруг его аксиальной или наклонной оси, которая обеспечивает отделение частиц обрабатывающей среды от поверхности обечайки барабана под действием силы тяжести частиц рабочей среды и дальнейшее их перемещение в полости барабана по баллистической траектории до взаимодействия с обрабатываемой поверхностью изделий, закрепленных на стенках барабана (рис. 1.9). Энергию единичного соударения можно изменять в широких диапазонах за счет изменения массы частиц и скорости их ударного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью.

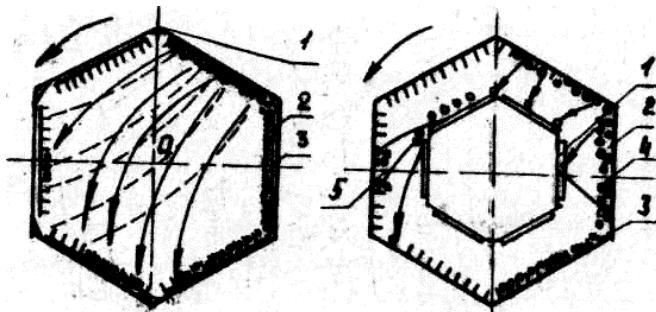


Рис. 1.9. Схемы ударно-барабанной обработки: 1 – барабан; 2 – частицы рабочей среды; 3 – обрабатываемые детали; 4, 5 – рикошетирующие потоки частиц.

*Ударно-импульсная обработка* осуществляется путём периодических ударно-импульсных воздействий на обрабатываемую поверхность всего объема частиц обрабатывающей среды, загружаемой в устройство (рис. 1.10). В качестве обрабатывающей среды применяют алюминиевые или стальные шарики. Обрабатывающая среда 1 загружается в рабочую камеру 2 и размещается на жесткой платформе 3, соединенной шарнирно или

посредством эластичного элемента 4 с механизмом 5, движущимся в возвратно-поступательном направлении.

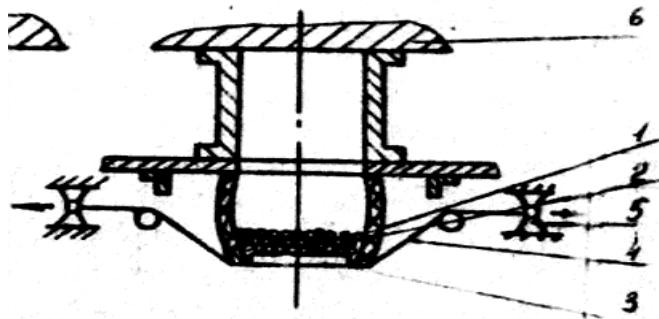


Рис. 1.10. Устройство для ударно-импульсной обработки.

Над жесткой платформой располагается обрабатываемое изделие 6. При движении платформы вверх вместе с ней начинает перемещаться обрабатывающая среда. В момент достижения платформой максимальной мгновенной скорости частицы обрабатывающей среды отрываются от нее и движутся к изделию. После взаимодействия с поверхностью изделия они возвращаются на платформу, которая на данный момент времени уже заняла свое начальное положение, и процесс повторяется заново. Уровень кинетической энергии характеризуется скоростью перемещения платформы, которая, в свою очередь, зависит от кинематики механизма возвратно-поступательного действия и может достигать порядка 10-15 м/с.

В отличие от известных динамических методов ППД свободнодвижущимися частицами УИО характеризуется: большей плотностью соударения частиц обрабатывающей среды с поверхностью; более высоким коэффициентом передачи кинетической энергии от частиц к обрабатываемой детали; применением устройств со сравнительно меньшими габаритными размерами, их малой материало- и энергоемкостью; широким уровнем регулирования скоростей; удовлетворительными условиями труда.

Указанные преимущества можно достичь за счет того, что метод УИО позволяет: выполнять обработку всего изделия незначительной по объему массой частиц обрабатывающей среды за счет повторного ее использования; обеспечить высокую компактность взаимодействия всей массы обрабатывающей среды с поверхностью обрабатываемого изделия; предотвратить наличие встречного демпферного слоя между изделием и движущейся к нему массой частиц обрабатывающей среды за счет синхронизации циклов движения платформы и обрабатывающей среды; исключить из конструкции установок вспомогательные устройства, которые обеспечивают сбор и подачу в рабочую зону обрабатывающей среды; сравнительно проще и надежнее герметизировать рабочую зону обработки.

**Группа методов обработки с соударением частиц.** Этую группу технологических методов составляют объёмная вибрационная обработка [4], центробежно-ротационная [94] и ультразвуковая обработка [73]. Объединение этих методов в группу обусловлено тем, что инструментом, воздействующим на поверхность детали, являются интенсивные конвективные потоки частиц обрабатывающей среды, инициируемые различными источниками энергии.

*При виброударной обработке* процесс характеризуется последовательным нанесением большого количества микроударов на поверхность обрабатываемых изделий частицами обрабатывающей среды при их взаимном соударении и скольжении. Соударения вызваны воздействием направленных вибраций, передающимися рабочей камере, в которой размещены обрабатываемые изделия и рабочая среда (рис. 1.11).

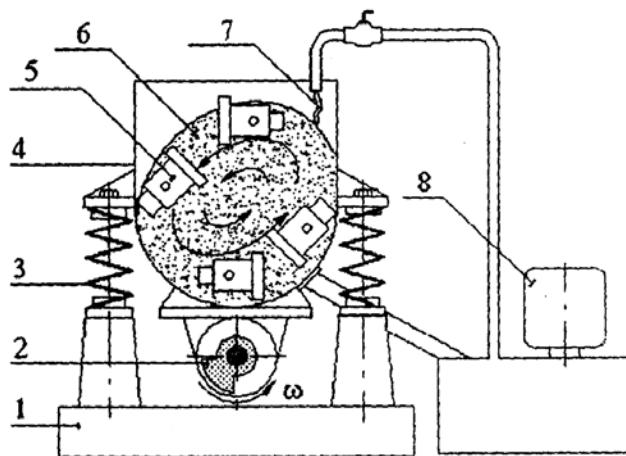


Рис.1.11. Схема вибрационной установки: 1 – основание; 2 – вибратор дебалансный; 3 – элементы упругие; 4 – камера рабочая; 5 – обрабатываемое изделие; 6 – рабочая среда; 7 – рабочая жидкость; 8 – помпа.

Рабочая камера подвергается вибрации посредством инерционного вибратора. При вибрировании детали и обрабатывающая среда непрерывно подвергаются переменным по знаку ускорениям. Обрабатываемые детали и обрабатывающая среда относительно перемещаются, совершая два типа движений: колебание и циркуляционное вращение всей массы. Вибрация через стенки рабочей камеры передается прилегающим слоям обрабатывающей среды, которые в свою очередь передают ее последующим слоям, и так далее.

В основе вибрационного ударного упрочнения лежит характер динамического протекания процесса, который сопровождается множественными микроударами частиц обрабатывающей среды об поверхность обрабатываемых изделий и обеспечивающий пластическое деформирование поверхностного слоя, в следствие этого повышается микротвердость, образуются остаточные напряжения сжатия первого рода и уменьшается шероховатость поверхности.

Вибрационное ударное упрочнение является универсальным способом упрочняющей обработки ППД. Наиболее наглядно его преимущества проявляются при обработке изделий сложной формы, и при упрочняющей обработке большой партии изделий сравнительно небольших размеров. Интенсивность вибрационной ударной обработки определяется режимами и продолжительностью обработки, объемом рабочей камеры и степенью ее заполнения, характеристиками и размерами частиц обрабатывающей среды, механическими свойствами обрабатываемых изделий.

*Способ объемной центробежно-ротационной обработки* заключается в том, что обрабатывающая среда и детали приводятся во вращательное движение вокруг вертикальной оси таким образом, что приобретают форму тора, в котором частицы движутся по спиральным траекториям. Тороидально-винтовой поток обеспечивается конструкцией рабочей камеры станка (рис. 1.12), состоящей из неподвижной обечайки и примыкающего к ней вращающегося ротора, имеющего в наиболее распространенном варианте форму тарелки.

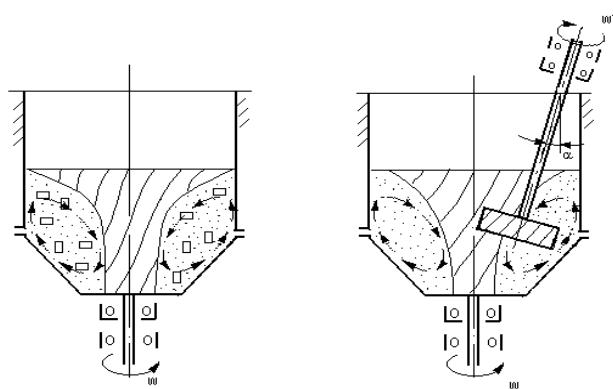


Рис. 1.12. Схема процесса центробежно-ротационной обработки.

Обрабатываемые детали загружаются в рабочую камеру «вnavал» и перемещаются вместе с рабочей средой. Пластическая деформация поверхности осуществляется за счет относительного перемещения и взаимодействия частиц и деталей. ЦРО достигается высокая интенсивность обработки при более высоких скоростях перемещения элементов тороидально-винтового потока. Свободное движение и циркуляция изделий в тороидально-винтовом потоке способствуют равномерной их обработке. На интенсивность ЦРО влияет скорость вращения ротора, продолжительность обработки, объем рабочей камеры, массо-размерные характеристики частиц обрабатывающей среды, физико-механические свойства материала обрабатываемых изделий и т.п.

Все вышерассмотренные методы обработки потоками движущихся частиц на сегодняшний день достаточно фундаментально научно исследованы и получили реальную практическую апробацию в технологиях изготовления деталей различного функционального

назначения на отделочных и упрочняющих операциях. Накопленный к настоящему времени опыт практического использования этих методов позволяет в комплексе представить их технологические возможности, область рационального применения и выявить их недостатки (табл. 1.2).

Таблица 1.2

## Технологические возможности динамических методов ППД

<b>Метод обработки</b>	<b>Технологические возможности</b>		<b>Технико-экономические недостатки</b>
	<b>Рабочая среда/ Энергетические показатели</b>	<b>Обрабатываемые изделия</b>	
<b>1. Дробеструйная</b>	Сухая дробь Ø0,8...2 мм / Скорость 3...5 м/с, масса загружаемой дроби 100 кг; стальные шарики из материала ШХ15 твердостью от HRC 62 до HRC 64, диаметром 2,5 мм / давление воздуха 0,4-0,6 МПа, масса шариков 4-6 кг	плоские детали, а также детали сложной конфигурации (зубчатые колеса, пружины, рессоры и др.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- быстрый износ направляющих сопел;</li> <li>- необходимость поддержания заданного давления воздуха, для обеспечения стабильности процесса упрочнения;</li> <li>- наличие системы сбора, очистки, подвода в зону обработки и отвода из нее деформирующих частиц;</li> <li>- малые энергетические возможности;</li> <li>- низкая производительность односопловых установок и значительное усложнение конструкции при изготовлении и эксплуатации многосопловых установок</li> </ul>
<b>2. Дробеметная</b>	Сухая дробь Ø0,8...2 мм / Скорость 50...80 м/с	упрочнение зубчатых колес, рессор и других деталей машин	<ul style="list-style-type: none"> <li>- нагрев деформируемой поверхности;</li> <li>- невысокая плотность потока дроби, что отражается на однородности и сплошности наклела.</li> <li>- громоздкость и сложность конструкций;</li> </ul>

<b>Метод обработки</b>	<b>Технологические возможности</b>		<b>Технико-экономические недостатки</b>
	<b>Рабочая среда/ Энергетические показатели</b>	<b>Обрабатываемые изделия</b>	
	Микрошарики Ø 0,1...0,2 мм / Скорость 40...100 м/с		<ul style="list-style-type: none"> <li>- высокая материало - и энергоемкость, вызванная наличием большого запаса дроби;</li> <li>- неблагоприятные условия работы из-за наличия металлической пыли, находящейся во взвешенном состоянии;</li> <li>- быстрый изгиб лопаток ротора</li> </ul>
<b>3. Гидро-дробеструйная</b>	Шарики подшипников / Ra=1,25...0,16 мм	лопатки компрессоров из титановых и алюминиевых сплавов, стальные шестерни, трубопроводы, пружины, режущие инструменты и др.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- требуется промывка деталей;</li> <li>- повышается степень пожарной опасности из-за образования паров во время работы ГДЭУ при применении в качестве рабочей жидкости масла</li> </ul>
<b>4. Пневмо-динамическая</b>	Стальные шарики Ø1...3 мм / Длина разгона до 100 мм, скорость соударения 20...25 м/с	упрочняют отдельные наиболее нагруженные участки деталей: радиусные сопряжения поверхностей; галтельные переходы поверхностей тел вращения плоские участки поверхности;	<ul style="list-style-type: none"> <li>- небольшая производительность и ограниченное применение</li> </ul>

<b>Метод обработки</b>	<b>Технологические возможности</b>		<b>Технико-экономические недостатки</b>
	<b>Рабочая среда/ Энергетические показатели</b>	<b>Обрабатываемые изделия</b>	
		поверхности отверстий произвольной формы размером 14-350 мм при длине не более 100 мм	
<b>5. Ударно-барабанная</b>	Металлические шарики или дробь сферической, округленной или граненой формы, диаметр барабана 2...5 м, длина 3...12 м, число оборотов барабана 10...25 в мин, скорость соударения частиц рабочей среды с обрабатываемой поверхностью 2...10 м/с	Крупногабаритные детали типа панелей, поясов лонжеронов, балок, а также крупногабаритные наружные и внутренние поверхности вращения	- большая единовременная потребность в рабочей среде; - низкие энергетические возможности частиц рабочей среды; - высокая материало- и энергоемкость оборудования; - невозможность обработки малых внутренних полостей
<b>6. Ударно-импульсная</b>	Стальные или алюминиевые шарики / скорость перемещения	Упрочнение плоских или имеющих большой радиус кривизны	- ограниченный ресурс рабочих элементов устройств, вызванный быстрым изнашиванием трущихся пар

<b>Метод обработки</b>	<b>Технологические возможности</b>		<b>Технико-экономические недостатки</b>
	<b>Рабочая среда/ Энергетические показатели</b>	<b>Обрабатываемые изделия</b>	
	площадки может достигать 10...15 м/с	деталей, упрочнение крупногабарит -ных длинномерных деталей (5 м и более)	
<b>7. Виброударная</b>	Стальная и чугунная дробь, литые звездочки, рубленая проволока, стальные полированные шарики и др.	Обработка деталей сложной формы, а также при упрочнении большой партии деталей небольших размеров	<ul style="list-style-type: none"> <li>- при обработке крупных деталей большая единовременная потребность в рабочей среде;</li> <li>- малый ресурс установок;</li> <li>- потребность во вспомогательных устройствах для сортировки и промывки рабочей среды;</li> <li>- необходимость отдельного помещения для размещения оборудования из-за повышенного уровня шума</li> </ul>
<b>8. Центробежно-ротационная</b>	Стальная дробь, ролики	Обработка деталей сложной формы, а также при упрочнении большой партии деталей небольших размеров	<ul style="list-style-type: none"> <li>- при обработке крупных деталей большая единовременная потребность в рабочей среде;</li> <li>- малый ресурс установок;</li> <li>- потребность во вспомогательных устройствах для сортировки и промывки рабочей среды;</li> </ul>

Из таблицы 1.2 следует, что, несмотря на многообразие динамических методов ППД, на сегодняшний день нет эффективного решения проблемы, связанной с упрочнением внутренних поверхностей тонкостенных деталей, упрочнением тонкостенных длинномерных деталей малого сечения.

Обзор исследований, проведённый в разделах 1.1 и 1.2, позволяет для решения этой проблемы предложить метод обработки, основанный на создании конвективных потоков ферромагнитных частиц во вращающемся электромагнитном поле. Результаты предварительных исследований показали, что предлагаемый метод вполне обоснованно расширяет технологические возможности динамических методов ППД и имеет своё целевое технологическое назначение, связанное с применением его на операциях упрочнения деталей, обладающих выраженными парамагнитными свойствами. К числу таких деталей относятся тонкостенные трубы, стрингеры, пояса, лонжероны, которые широко применяются для изготовления летательных аппаратов. Кроме того, этот метод обработки может быть использован на операциях, обеспечивающих подготовку поверхностей для сварки в среде инертных газов, нанесения антикоррозионных и других функциональных покрытий, а также улучшения качества уже сформированных на поверхности покрытий.

Вместе с тем, следует подчеркнуть, что предлагаемый метод в силу его физической (магнитной) природы имеет свои специфические особенности, которые требуют проведения целенаправленных научных исследований с целью обоснования его практического применения в технологии обработки деталей и являются объектом предлагаемого диссертационного исследования.

### **1.3.2. Использование магнитного поля для отделочно-упрочняющей обработки поверхности деталей**

#### ***Методы упрочнения ППД с наложением магнитного поля***

Существуют методы обработки ППД инструментом с наложением электромагнитных полей в процессе обработки. Одним из примеров данной обработки может служить метод обкатывания цилиндрических деталей с наложением переменного магнитного поля [95].

В основе метода ППД в переменном магнитном поле лежит использование деформации поверхностного слоя металла при одновременном воздействии ПМП высокой напряженности. При совмещении в пространстве и во времени двух технологических факторов обеспечивается модификация структуры фазового состава упрочненного поверхностного слоя и поля напряжений в объеме изделия. Схема метода упрочнения ППД в ПМП показана на рис. 1.13.

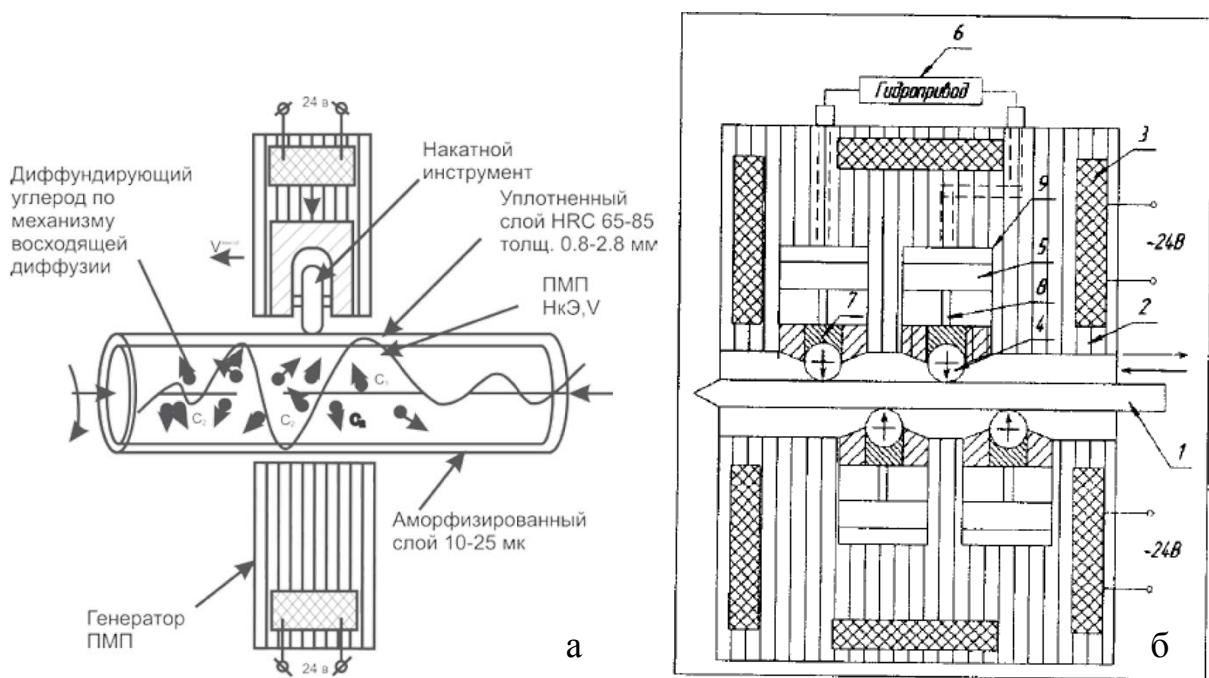


Рис. 1.13. Схема метода упрочнения деталей ППД в ПМП:  
а – обкатка валов; б – накатка шариками плоских деталей

Под воздействием переменного магнитного поля в зоне контакта индентора и обрабатываемого изделия при упрочнении ее ППД происходит модификация поверхностного слоя изделия, в результате которой достигается требуемое оптимальное структурно-напряженное состояние, заданные твердость поверхности и шероховатость при существенно меньших затратах энергии, по сравнению другими методами упрочнения. При этом также существует количественно-качественная связь параметров структурно-напряженного состояния поверхностного слоя изделия с параметрами нагружения (скорости и усилия деформирования) и характеристиками ПМП (напряженностью и частотой).

Отсюда следует, что упрочнение и увеличение эксплуатационного ресурса металла основывается на модификации структуры дислокаций в процессе упрочнения поверхностного слоя металла, повышающейся диффузией атомов углерода, а также других включений и их распределении в поверхностном слое с последующими фазовыми превращениями, а также формировании однородного поля напряжений в объеме детали.

#### *Методы обработки с использованием магнитного поля как источника энергии, придающей движение обрабатывающей среде или инструменту*

##### *Отделочная магнитно-абразивная обработка*

Магнитно-абразивная обработка (МАО) – процесс абразивной обработки, осуществляемый при относительном движении изделия и абразивных зерен в магнитном поле.

Классификация процессов МАО основывается на многообразии форм и размеров обрабатываемых изделий и их свойств, а также производственных условий. За счет этого

появилось множество разнообразных способов, а также устройств, осуществляющих процесс МАО, которые отличаются кинематикой, особенностями используемого магнитного поля конструкцией магнитного индуктора, и технологическими возможностями.

Термин «магнитно-абразивная обработка» обобщает в себе совокупность большого количества способов абразивной обработки, в которых используется магнитное поле непосредственно в зоне резания. Магнитно-абразивная обработка позволяет механизировать ряд операций, например как удаление окалины и тонких оксидных пленок, удаление заусенцев и скругление острых кромок, получение на поверхностях рельефных изображений, сверление хрупких материалов, измельчение материалов, полирование поверхностей, упрочнение металлорежущих инструментов [8].

После магнитных и механических воздействий поверхностный слой детали после МАО отличается от начального измененной структурой, химическим и фазовым составом, а также кристаллическим строением [7, 43, 44, 66]. Для инструментальных и углеродистых термообработанных сталей отмечены следующие изменения: распад остаточного аустенита, сформировавшегося во время шлифования или термообработки; частичный переход углерода из кристаллической решетки мартенсита в предкарбидную и карбидную фазы; насыщение поверхностного слоя карбидообразующими химическими элементами, наличие которых после шлифования понижается.

Данные изменения благоприятно влияют на эксплуатационные свойства деталей после МАО: увеличивается твердость их поверхностного слоя, в тонком (< 5 мкм) поверхностном слое действуют сжимающие остаточные напряжения, которые достигают значений порядка 1000-1400 МПа на глубине 0,5 - 1 мкм. Данные поверхности отличаются более повышенными износостойкостью, контактной долговечностью, коррозионной стойкостью, а деталь и ее материал – повышенными ударной вязкостью и циклической долговечностью [8, 35, 40, 78, 88, 90].

#### *Ударная магнитно-импульсная обработка*

Существует метод обработки шариками [91] (рис. 1.14), в котором движение обрабатывающей среде придается энергией импульсного магнитного поля. По своей сущности метод является разновидностью ударно-импульсной обработки, с той разницей, что при традиционной ударно-импульсной обработке движение рабочей среды придается за счет импульса, возбуждаемого платформой, а ударно-импульсное воздействие осуществляется за счет гравитационных сил обрабатывающей среды. В данном способе движение среде придает воздействие магнитного поля. Обработка осуществляется при вертикальных осцилляциях рабочих тел под действием попеременно включаемых верхних и нижних электромагнитов при движении листового материала.

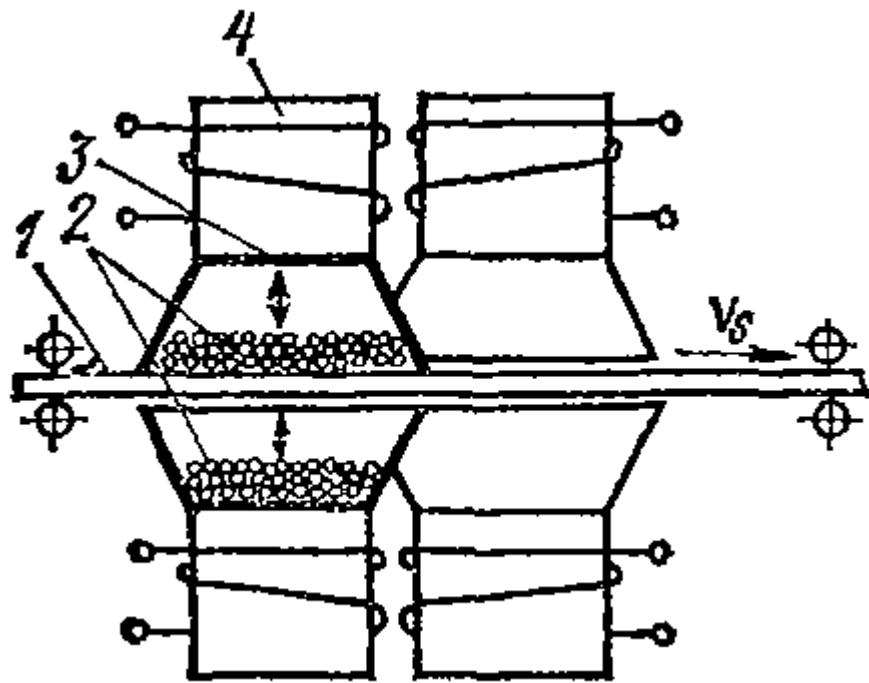


Рис. 1.14. Схема ударной магнитно-импульсной обработки  
1 – деталь; 2 – обрабатывающая среда; 4 – катушка.

#### *Обработка магнитно-динамическим инструментом*

Существует метод, предложенный Довгалевым А.М. [33], при котором силовое взаимодействие деформирующих шаров с поверхностью детали осуществляется за счет энергии магнитного поля, введенного в зону обработки.

Упрочнение поверхностного слоя деформирующими элементами (инденторами) обеспечивается за счет энергии магнитного поля. Деформирование производят свободно размещенными в кольцевой камере инденторами, которые не имеют механической связи с корпусом инструмента (рис. 1.15). Согласно методу, на инденторы воздействуют вращающимся (переменным или постоянным) магнитным полем при этом перемещая их вдоль обрабатываемой поверхности. В инструменте установлены постоянные магниты, которые задают деформирующим элементам (шарам), дополнительные осциллирующие колебания.

Практически инструмент для магнитно-динамического упрочнения может быть выполнен в различной форме исполнения, как для обработки внутренних и наружных поверхностей цилиндрических изделий, отверстий, так и для обработки плоских поверхностей изделий. Конструкция данных изделий и способ применения хорошо описаны в работе [33].

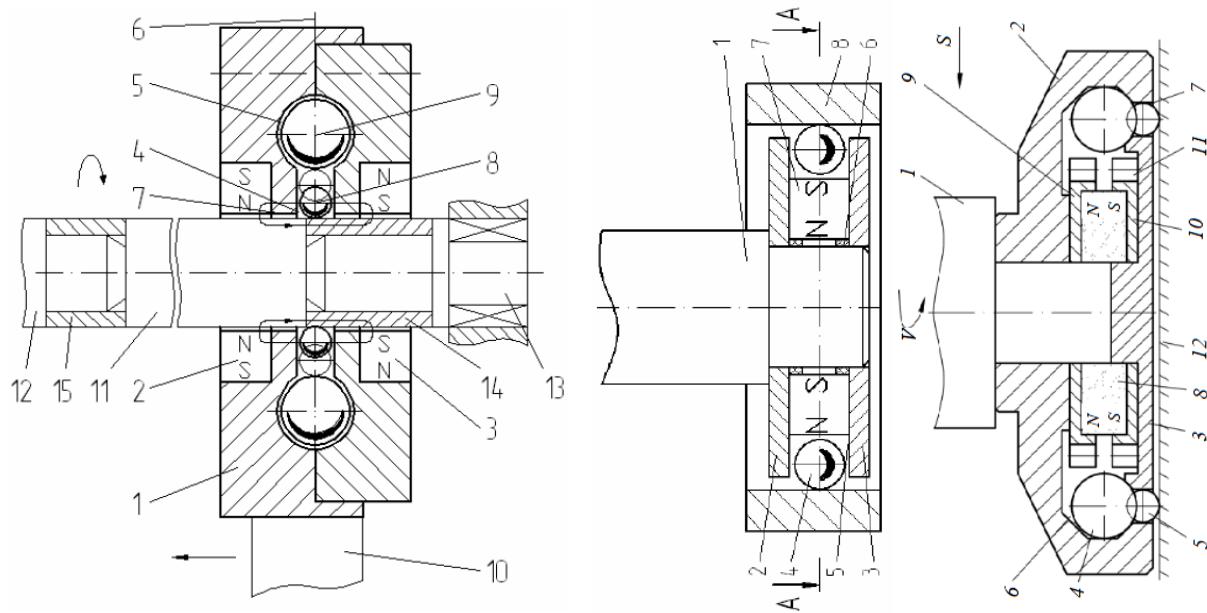


Рис. 1.15. Инструмент для обработки: а – наружных цилиндрических поверхностей; б – внутренних цилиндрических поверхностей; в – плоских поверхностей.

Накопленный опыт в области проектирования инструментов для МДУ позволяет классифицировать существующие разновидности их конструкций по ряду признаков:

- по виду упрочняемых поверхностей: для отверстий, для наружных поверхностей вращения, для плоских поверхностей, для фасонных поверхностей;
- по типу магнитной системы: с постоянными магнитами (феррит бария, редкоземельные, металлокерамические), с электромагнитами, комбинированные;
- по месту расположения магнитной системы: в зоне кольцевой камеры, за пределами кольцевой камеры, за пределами инструмента;
- по принципу создания крутящего момента для разгона деформирующих элементов: гистерезисные, реактивные, активные;
- по типу регулирования магнитного поля: бесступенчатое, ступенчатое, нерегулируемое;
- по методу разгона деформирующих элементов: вращением источника магнитного поля, вращением намагниченной детали, «бегущей волной» магнитного поля;
- по принципу взаимодействия деформирующих элементов с деталью: непрерывное (с изменением исходного размера, без изменения исходного размера), периодическое (низкочастотное, высокочастотное);
- по месту приложения магнитного поля: на деформирующие элементы, на деталь, совмещенное воздействие на деталь и деформирующие элементы;
- по виду магнитного поля: непрерывное, дискретное;
- по методу управления: без управления, с адаптивным управлением;

- по форме источников магнитного поля: в виде «звездочки», кольцевые, цилиндрические, пластинчатые;
- по числу и расположению кольцевых камер: однорядные, многорядные;
- по технологическому назначению: для упрочняющей обработки, для размерно-упрочняющей обработки, для формирования регулярного рельефа, для получения триботехнических покрытий;
- по виду достигаемого упрочняющего эффекта: за счет поверхностного пластического деформирования, за счет перемагничивания поверхностного слоя детали, за счет комбинированного упрочнения ППД в магнитном поле и перемагничивания поверхностного слоя детали.

На основании экспериментальных исследований было установлено, что магнитно-динамическая упрочняющая обработка внутренних поверхностей цилиндрических втулок позволяет достичнуть следующих характеристик:

- уменьшение исходной высоты микропрофиля поверхности с Ra 12,5 - 6,3 мкм до Ra 1,25 - 0,1 мкм;
- упрочнение поверхностного слоя изделия на глубину порядка 0,1–2 мм;
- при обработке цилиндрических втулок из пластичных материалов. повышение диаметрального размера на 10–60 мкм

### ***Упрочнение методами воздействия магнитным полем***

Магнитной обработкой (МО) объектов машиностроения занимались многие авторы [6, 10, 18, 25, 27, 28, 41, 70, 72]. Работы проводились по обработке различных инструментальных и конструкционных материалов, с применением самых разнообразных инструментов для обработки деталей различных форм и размеров. Изучалось влияние импульсного и статического магнитного поля на материал. Время воздействия и напряженность магнитного поля варьировались в широких пределах.

Магнитно-импульсную и магнитную обработку применяют для упрочняющей обработки различных деталей и их соединений, например: сварных, заклепочных, резьбовых; пружин и рессор, зубчатых и червячных колес; муфт и опорных устройств; стальных тросов и канатов грузоподъемных машин; пильчатой гарнитуры чесальных машин, режущего инструмента, медицинских инструментов и т.д. [72, 82 - 85].

Известные способы магнитной обработки различаются по технологии производства и своим физическим особенностям.

Способы магнитной обработки [92]:

- однократным импульсом постоянного магнитного поля с напряженностью от 100 до 1000 кА/М при различной продолжительности воздействия от 10 до 300 секунд и более;
- импульсным магнитным полем с напряженностью от 50 до 2000 кА/М при продолжительности импульсного воздействия от 0,1 до 10 секунд и с различным числом импульсов.

Способы обработки постоянным магнитным полем:

- обработка однократным импульсом при последующем размагничивании через 824 ч.;
- локальная обработка направленной на деталь концентрацией магнитного потока;
- обработка без применения последующего размагничивания;
- динамическая обработка, при вращении детали с некоторым ускорением частоты вращения (150 сек.) в поле с постоянной напряженностью при продолжительности 15 сек.;
- обработка детали при свободном ее перемещении в расточке индуктора;
- обработка при свободном перемещении детали от непосредственной близости к расточке индуктора.

Способы импульсной магнитной обработки:

- обработка без проведения последующего размагничивания;
- многократная обработка (210 циклов) с выдерживанием времени между циклами порядка 120 мин.;
- обработка локальными концентраторами магнитного поля и ферромагнитными сердечниками;
- обработка в камерах или металлических контейнерах при использовании ферромагнитного порошка или ферромагнитной жидкости;
- методы комбинированной обработки.

Перспективные способы импульсной магнитной обработки:

- обработка с повышающейся амплитудой импульса. Используют для снятия внутренних остаточных напряжений в деталях, эксплуатируемых при ударных воздействиях. Режим: напряженность от 100 до 800 кА/М, продолжительность цикла обработки от 0,1 до 1,0 секунд, количество циклов 210, продолжительность выдержки между циклами 120 мин.
- обработка при вращении изделий в соленоидах. Используют для снятия внутренних остаточных напряжений в местах после сварки разнородных материалов. Режим: напряженность от 100 до 800 кА/М, количество циклов от 2 до 10, продолжительность выдержки между циклами 120 минут, частота вращения изделия в соленоиде от 1000 до 10000 об/мин при продолжительности от 1 до 5 мин;

- обработка вращающимся магнитным полем. Используют для повышения долговечности готовых изделий. Режимы: напряженность от 100 до 800 кА/М, продолжительность цикла от 0,1 до 1,0 секунд, количество циклов 210;
- импульсной магнитной обработкой и обработка холодом. Используют для упрочняющей обработки ответственных деталей, эксплуатируемых в условиях низких температур. Режим: напряженность от 400 до 2000 кА/М, обработка производится в контейнерах при температуре от -100 до 200 °C, время цикла 0,32 секунд, количество циклов 110, продолжительность времени между импульсами от 30 до 3000 секунд. Размагничивание;
- вакуумная импульсная магнитная обработка с использованием защитных покрытий. Используют для упрочняющей обработки изделий, эксплуатируемых в вакууме. Режим: напряженность от 400 до 2000 кА/М, продолжительность цикла от 0,3 до 2,0 секунд, количество циклов 110, продолжительность времени между импульсами от 30 до 3000 секунд;
- термообработка металлов в магнитном поле.

Процесс упрочнения магнитным полем состоит из нескольких этапов (рис. 1.16).



Рис. 1.16. Схема процесса упрочнения магнитным полем.

К основным недостаткам существующих способов МИО, препятствующих широкому промышленному использованию, относятся: недостаточная эффективность упрочнения, длительность обработки (при полилинейческой МИО), применение дополнительных сред (ферроэмульсии) и другие [41].

## 2. КИНЕТИКА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ СВОБОДНОДВИЖУЩИХСЯ ИНДЕНТОРОВ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

### 2.1 Движение ферромагнитных инденторов во вращающемся электромагнитном поле

#### 2.1.1 Характеристика вращающегося электромагнитного поля

Покажем, что симметричная трехфазная система катушек (Рис. 2.1а) также позволяет получить круговое вращающееся магнитное поле [1, 37, 98].

Каждая из катушек А, В и С при пропускании по ним гармонических токов создает пульсирующее магнитное поле. Векторная диаграмма в пространстве для этих полей представлена на рис. 2.1,б. Для проекций результирующего вектора магнитной индукции  $B$  на

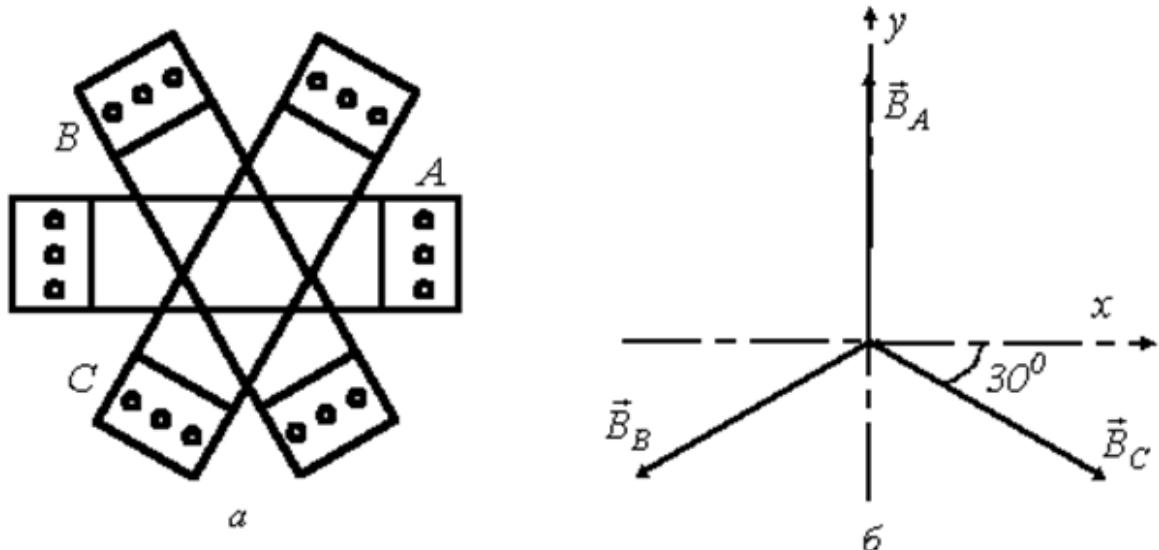


Рис. 2.1

оси декартовой системы координат, ось у которой совмещена с магнитной осью фазы А, можно записать:

$$B_x = B_C \cos 30^\circ - B_B \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} (B_C - B_B); \quad (2.1)$$

$$B_y = B_A - B_B \sin 30^\circ - B_C \sin 30^\circ = B_A - \frac{1}{2} (B_B - B_C). \quad (2.2)$$

Приведенные соотношения учитывают пространственное расположение катушек, но они также питаются трехфазной системой токов с временным сдвигом по фазе на  $120^\circ$ . Поэтому для мгновенных значений индукций катушек имеют место соотношения:

$$B_A = B_m \sin \omega t; B_B = B_m \sin(\omega t - 120^\circ);$$

$$B_C = B_m \sin(\omega t + 120^\circ),$$

где  $B_m$  – амплитуда индукции на оси каждой из катушек.

Подставив эти выражения в (2.1) и (2.2), получим:

$$B_x = \frac{\sqrt{3}}{2} B_m [\sin(\omega t + 120^\circ) - \sin(\omega t - 120^\circ)] = \frac{\sqrt{3}}{2} B_m 2 \cos \omega t \sin \frac{2\pi}{3} = \frac{3}{2} B_m \cos \omega t \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} B_y &= B_m \sin \omega t - \frac{1}{2} B_m [\sin(\omega t - 120^\circ) + \sin(\omega t + 120^\circ)] = \\ &= B_m \sin \omega t - \frac{1}{2} B_m 2 \sin \omega t \cos \frac{2\pi}{3} = \frac{3}{2} B_m \sin \omega t \end{aligned} \quad (2.4)$$

В соответствии с (2.3) и (2.4) и рис. 2.2

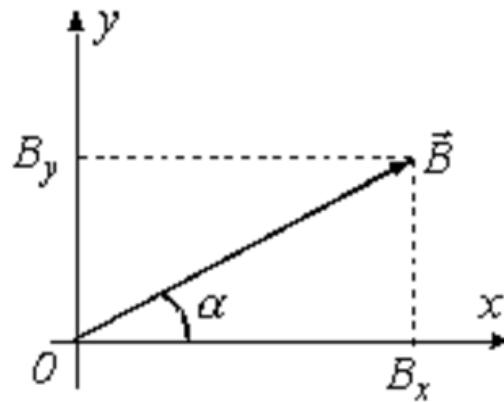


Рис. 2.2

для модуля вектора магнитной индукции результирующего поля трех катушек с током можно записать:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \frac{3}{2} B_m = \text{const},$$

а сам вектор  $\vec{B}$  составляет с осью  $x$  угол  $\alpha$ , для которого

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_y}{B_x} = \frac{1,5 B_m \sin \omega t}{1,5 B_m \cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t,$$

откуда

$$\alpha = \omega t.$$

Таким образом, и в данном случае имеет место неизменный по модулю вектор магнитной индукции, врачающийся в пространстве с постоянной угловой частотой  $\omega$ , что соответствует круговому полю.

## 2.1.2 Кинетическое состояние ферромагнитных инденторов в магнитоожиженном вращающемся слое

Известно, что силы, действию которых подвергаются тела в электромагнитном поле, сводятся к силам, приложенными к электрическим зарядам этих тел. Если ферромагнитные неравноосные инденторы, помещённые в электромагнитное поле, намагниченены до насыщения, то их можно рассматривать как элементарные магнитные диполи. Определим кинематические характеристики магнитного индентора, имеющего массу  $m$  и магнитный момент  $p_m$ , движущегося в магнитном поле, образованном суперпозицией однородного постоянного и неоднородного переменного магнитных полей (рис. 2.3). Силовые линии однородного поля направлены вдоль оси OX, а неоднородного – вдоль OY.

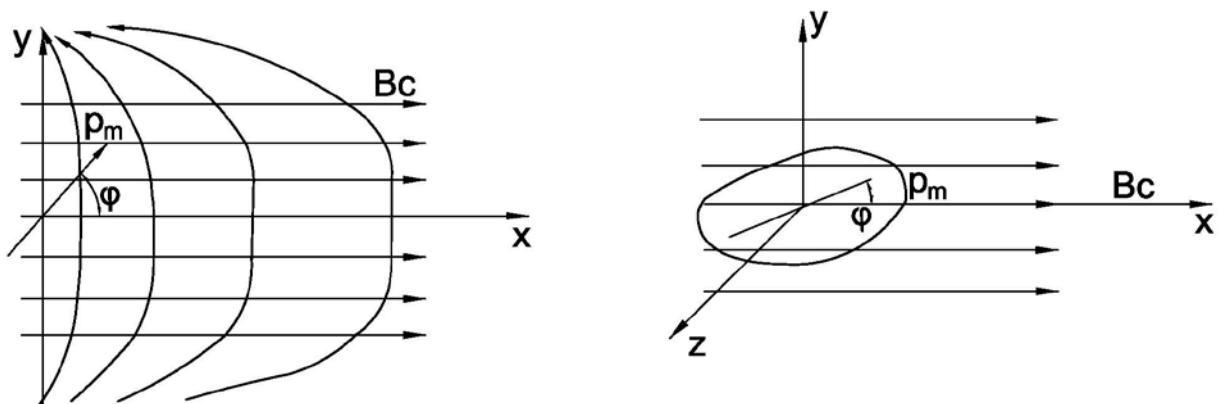


Рис. 2.3. Ориентация магнитного диполя в электромагнитном поле.

На ферромагнитный индентор, помещённый во вращающееся с угловой скоростью  $\omega$  и электромагнитной индукцией  $\vec{B} = \vec{B}_c + \vec{B}_v \cos \omega t$  поле, действует пара сил, стремящаяся повернуть его в направлении внешнего переменного электромагнитного поля. Величину этого момента можно оценить из выражения:

$$M_{\text{вр}} = p_m B \sin \varphi, \quad (2.5)$$

где  $\varphi$  – угол между вектором магнитного момента индентора и вектором электромагнитной индукции.

Кроме того, в неоднородном поле на магнитный индентор действует смещающая (переносная) сила

$$F_{\text{см}} = \chi V B \frac{dB}{dy}, \quad (2.6)$$

где  $\chi$  – магнитная восприимчивость материала индентора;  $V$  – объём индентора;  $V = \pi d^2 l / 4$ , где  $d$  и  $l$  – соответственно, диаметр и длина индентора;  $\frac{dB}{dy}$  – градиент поля.

Рассмотрим вращение индентора относительно оси перпендикулярной плоскости  $(\vec{B}, \vec{p}_m)$ . Пусть угол между  $\vec{B}$  и  $\vec{p}_m$  равен  $\varphi = \varphi_0 + \varphi_1$ , где  $\varphi_0$  – угол при  $t = t_0$  непосредственно после столкновения частиц.

Пренебрегая сопротивлением вращательному движению непрерывной фазы, движение индентора относительно неподвижного вектора магнитной индукции может быть описано следующим уравнением вращения

$$I \cdot \varphi_1'' = p_m \cdot |\vec{B}| \sin \varphi_0, \quad (2.7)$$

где  $I$  – момент инерции индентора.

Предполагая, что постоянная и переменная составляющие индукции поля взаимно перпендикулярны, можно записать:

$$|\vec{B}| = \sqrt{B_c^2 + B_v^2 \cos^2 \omega t} \quad (2.8)$$

Уравнение (2.7) перепишем в виде

$$I \cdot \varphi_1'' \approx p_m \sqrt{B_c^2 + B_v^2 \cos^2 \omega t} \sin \varphi_0 \quad (2.9)$$

Интегрируя (2.9), имеем

$$\varphi_1' = \frac{p_m \sin \varphi_0}{I} \int \sqrt{B_c^2 + B_v^2 \cos^2 \omega t} \sin \varphi_0 dt \quad (2.10)$$

Подкоренное выражение в (6-2.10) может быть преобразовано к виду:

$$B_c^2 + B_v^2 \cos^2 \omega t = (B_c^2 + B_v^2) \left( 1 - \frac{B_v^2}{B_c^2 + B_v^2} \sin^2 \omega t \right) \quad (2.11)$$

Введем следующие обозначения:

$$z^2 = \frac{B_v^2}{B_c^2 + B_v^2}; \quad \omega t = x; \quad dt = \frac{1}{\omega} dx.$$

Тогда (2.10) принимает следующий вид:

$$\varphi_1' = \frac{p_m}{I \omega} \sqrt{B_c^2 + B_v^2} \sin \varphi_0 \int \sqrt{1 - z^2 \sin^2 x} dx \quad (2.12)$$

Используя общепринятое обозначение

$$\int \sqrt{1 - z^2 \sin^2 x} dx = E(x, z)$$

для эллиптического интеграла второго рода [101], запишем (2.12) в следующем виде:

$$\varphi_1' = \frac{p_m \sin \varphi_0}{I \omega} \sqrt{B_c^2 + B_v^2} E \left( \omega t; \frac{B_v}{\sqrt{B_c^2 + B_v^2}} \right) \quad (2.13)$$

Режим магнитоожижения возможен при условии  $B_c \ll B_v$ , так как в противном случае дисперсная система переходит в структурированное состояние. С учетом этого соотношения между постоянной и переменной составляющими индукции соотношение (2.13) принимает вид:

$$\varphi_1' \cong \frac{p_m B_v}{I \omega} \sin \varphi_0 E(\omega t; 1) \cong \frac{p_m B_v}{I \omega} \sin \varphi_0 \sin \omega t \quad (2.14)$$

Магнитный момент цилиндрического индентора из изотропного ферромагнитного

материала может быть выражен через вектор намагниченности  $\vec{p}'_m$ :

$$\vec{p}_m = \vec{p}'_m V,$$

где  $V$  – объем индентора;  $p'_m$  – магнитный момент единицы объема при насыщении.

Вектор напряженности магнитного поля  $\vec{H}_1$  внутри цилиндра, в случае когда цилиндр намагничивается внешним полем  $\vec{H}$ , имеет вид:

$$\vec{H}_1 = \vec{H} - J \vec{p}'_m, \quad (2.15)$$

где  $J$  – размагничивающий фактор.

В работе [99], в предположении, что форма цилиндра близка к овоиду, предложена следующая зависимость для определения размагничивающего фактора:

$$J = \frac{\frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2-1}} \ln(\lambda + \sqrt{\lambda^2-1} - 1)}{\lambda^2 - 1}, \quad (2.16)$$

где  $\lambda = l/d$  – соотношение длины цилиндра к его диаметру.

Из равенства  $\vec{p}'_m = \vec{H}_1(\mu - 1)$ , учитывая уравнение (2.15), получаем:

$$\vec{p}'_m = (\mu - 1) \vec{H} \frac{1}{1 + (\mu - 1)J}$$

здесь  $\mu$  – магнитная проницаемость материала индентора.

Отсюда магнитный момент цилиндрического индентора выражается равенством:

$$\vec{p}_m = \frac{\mu - 1}{1 + (\mu - 1)J} \vec{H} \frac{\pi d^2}{4} l$$

где  $p_m$  – Дж/Тл;  $H$  – А/м;  $l$  – м.

или с учетом выражения (12-2.16) и соотношения, устанавливающего связь индукции с напряжённостью электромагнитного вращающегося поля  $\vec{B} = \mu \vec{H}$ , может быть записан в виде:

$$\vec{p}_m = \frac{0,785 d^2 l \vec{B} \frac{\mu-1}{\mu}}{1 + (\mu-1) \frac{\frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2-1}} \ln(\lambda + \sqrt{\lambda^2-1} - 1)}{\lambda^2-1}} \quad (2.17)$$

Под действием вращающегося момента ферромагнитный индентор вращается в магнитном поле с абсолютной угловой скоростью  $\psi_{\text{абс}}$ , которая в неподвижной системе координат равна сумме относительной и переносной скоростей, т.е.

$$\psi_{\text{абс}} = \psi_{\text{отн}} + \psi_{\text{пер}}. \quad (2.18)$$

На основе многочисленных экспериментальных исследований в работе [47] показано, что с большой степенью корреляции переносная скорость вращения магнитной частицы практически равна скорости вращения внешнего магнитного поля. Это позволяет записать  $\psi_{\text{пер}} = \omega$ .

Подставляя в уравнение (2.14) выражение (2.17), получаем в окончательном виде формулу для расчёта относительной угловой скорости вращения ферромагнитных инденторов

во вращающемся электромагнитном поле:

$$\psi_{\text{отн}} = \varphi'_1 = \frac{d^2 l \vec{B} \vec{B}_v}{I \omega K_\mu} \sin \varphi_0 \sin \omega t, \quad (2.19)$$

где  $K_\mu = \mu \left( 1 + (\mu - 1) \frac{\frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} \ln(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} - 1)}{0,785(\lambda^2 - 1)(\mu - 1)} \right)$ .

На основе (2.18) и (2.19) уравнение абсолютной скорости вращения ферромагнитных инденторов в МОВ слое будет иметь вид:

$$\psi_{\text{абс}} = \omega + \frac{d^2 l \vec{B} \vec{B}_v}{I \omega K_\mu} \sin \varphi_0 \sin \omega t. \quad (2.20)$$

Поскольку в МОВ слое ферромагнитные инденторы намагничиваются до полного насыщения, то упрощённо их магнитный момент можно рассчитать, используя зависимость  $p_m = p'_m V$ , а уравнение абсолютной скорости вращения ферромагнитных инденторов в МОВ слое с учётом (2.14) можно записать в виде

$$\psi_{\text{абс}} = \omega + \frac{\pi d^2 l \vec{B} \vec{B}_v (\mu - 1)}{4 I \omega \mu} \sin \varphi_0 \sin \omega t. \quad (2.21)$$

Из последних двух уравнений следует, что неравноосный ферромагнитный индентор во вращающемся с постоянной угловой скоростью электромагнитном поле движется с переменной угловой скоростью, совершая колебания относительно вектора индукции магнитного поля с частотой, зависящей от величины момента инерции индентора, его магнитного момента, индукции внешнего магнитного поля и угла между вектором магнитного момента индентора и вектором индукции магнитного поля.

В заключение следует отметить, что движение большого количества ферромагнитных неравноосных инденторов, помещённых в электромагнитное вращающееся поле приводит к формированию магнитоожиженного вращающегося слоя, являющегося результатом воздействия на каждый индентор целого комплекса сил и моментов, таких как:

- вращающий момент, вызванный воздействием на индентор равномерного вращающегося магнитного поля;
- сумма сил и сумма моментов, обусловленных воздействием на индентор магнитных полей других ферромагнитных инденторов;
- сила и момент, действующие на индентор со стороны другого индентора во время их соударения;
- сила и момент трения между инденторами;
- сила сопротивления и демпфирующий момент, вызванные воздействием внешней среды на движущийся индентор;
- сила тяжести индентора;
- центробежная сила инерции;

- сила Кориолиса.

Под действием рассмотренных ранее сил и моментов ферромагнитные инденторы в МОВ слое совершают сложное движение – поступательное с частым и резким изменением скорости и направления и вращательное с переменной угловой скоростью. Учесть все факторы, обуславливающие движения инденторов в МОВ слое, и получить при этом приемлемые для практики аналитические зависимости – задача весьма сложная с математической точки зрения. Поэтому используем наиболее универсальный термодинамический подход к описанию подобного типа процессов и оценки энергетического состояния ферромагнитных инденторов в МОВ слое.

## 2.2 Термодинамическая модель магнитоожженного слоя во вращающемся электромагнитном поле

### 2.2.1 Энергетический баланс ферромагнитного индентора магнитоожженного вращающегося слоя

Предлагаемая модель основывается на следующих положениях:

- в установившемся состоянии развитого магнитоожжения подкачка энергии к инденторам от внешнего поля компенсируется диссипацией энергии за счет взаимодействия инденторов с обрабатываемой средой (материалом детали) и в результате неупругих столкновений [21];
- изменение ориентации магнитных моментов инденторов за время между последовательными столкновениями относительно мало, что дает возможность линеаризовать уравнение движения ферромагнитного индентора во внешнем поле;
- подкачка энергии от поля осуществляется как через поступательное, так и через вращательные степени свободы;
- межинденторные взаимодействия приводят к установлению эффективного равновесия между поступательными и вращательными степенями свободы взвешенных инденторов;
- инденторы цилиндрической формы обладают вмороженными магнитными моментами.

Для определения энергии, сообщаемой внешним переменным полем с магнитной индукцией  $\vec{B} = \vec{B}_c + \vec{B}_v \cos \omega t$  вращательным степеням свободы инденторам, обладающим постоянным по модулю магнитным моментом  $\vec{p}_m$ , рассмотрим полученное в разделе 2.1 уравнение (2.14) вращения индентора относительно оси, перпендикулярной плоскости  $(\vec{B}, \vec{p}_m)$ :

$$\varphi'_1 \cong \frac{p_m B_v}{I\omega} \sin \varphi_0 E(\omega t; 1) \cong \frac{p_m B_v}{I\omega} \sin \varphi_0 \sin \omega t.$$

Будем считать справедливым равенство

$$\varphi' = \varphi'_0 + \varphi'_1(t) - \varphi'_1(t_0). \quad (2.22)$$

Среднее количество энергии, передаваемое внешним полем вращательным степеням свободы одного индентора за время  $\frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega}$ , получится после усреднения  $\frac{1}{2}I(\varphi'^2 - \varphi'^2_0)^2$  при  $t = t_0 + \frac{T}{2}$  по начальным значениям  $\varphi_0$  и  $t_0$ . Величина  $T/2$  выбрана как время между столкновениями в предположении, что столкновительные процессы реализуются в крайних точках траектории возвратно-поступательного движения.

Дальнейшие преобразования будем проводить с учетом равенства (2.22), следующего соотношения  $\langle \sin^2 \varphi_0 \rangle = \langle \sin^2 \omega t_0 \rangle = 1/2$ .

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{1}{2}I(\varphi'^2 - \varphi'^2_0) \right\rangle &= \left\langle \frac{1}{2}I[\varphi'^2_0 + \varphi'^2_1(t) + \varphi'^2_1(t_0) + 2\varphi'_0\varphi'_1(t) - 2\varphi'_0\varphi'_1(t_0) - \right. \\ &\quad \left. - 2\varphi'_1(t)\varphi'_1(t_0) - \varphi'^2_0] \right\rangle \cong \frac{1}{4} \frac{(p_m B_v)^2}{I\omega^2} \langle [\sin \omega \left( t_0 + \frac{T}{2} \right) - \sin \omega t_0]^2 \rangle \end{aligned} \quad (2.23)$$

Преобразуем в (2.21) выражение в квадратных скобках:

$$\sin \omega \left( t_0 + \frac{T}{2} \right) - \sin \omega t_0 = \sin \omega t_0 \cos \omega \frac{T}{2} + \cos \omega t_0 \sin \omega \frac{T}{2} - \sin \omega t_0 = -2 \sin \omega t_0$$

откуда

$$\langle [\sin \omega \left( t_0 + \frac{T}{2} \right) - \sin \omega t_0]^2 \rangle = 2 \quad (2.24)$$

С учетом (2.24) запишем (2.23) в виде:

$$\left\langle \frac{1}{2}I(\varphi'^2 - \varphi'^2_0) \right\rangle \cong \frac{1}{2} \frac{(p_m B_v)^2}{I\omega^2}. \quad (2.25)$$

Таким образом, энергия, передаваемая внешним полем ферромагнитным инденторам в единицу времени при вращательно-колебательном движении, запишется следующим выражением:

$$E_b = \frac{1}{T} \left\langle \frac{1}{2}I(\varphi'^2 - \varphi'^2_0) \right\rangle = \frac{(p_m B_v)^2}{2\pi I\omega^2}, \quad (2.26)$$

Определим энергию, сообщаемую внешним неоднородным полем с градиентом индукции  $\partial B_v / \partial y$  поступательным степеням свободы инденторов. Не учитывая сопротивления поступательно-колебательному движению, запишем уравнение движения.

$$my''_1 = p_m \frac{\partial B_v}{\partial y} \sin \varphi_0 \cos \omega t. \quad (2.27)$$

Интегрируя это уравнение, получаем:

$$y'_1 = \frac{p_m}{m\omega} \frac{\partial B_v}{\partial y} \sin \varphi_0 \sin \omega t. \quad (2.28)$$

По аналогии с (18-2.22) запишем условия:

$$y' = y'_0 + y'_1; \quad y' = y'_0 + y'_1(t) - y'_1(t_0). \quad (2.29)$$

Среднее количество энергии, передаваемое полем при возвратно-поступательном движении одного индентора за время  $T/2$ , получим, усредняя  $\frac{1}{2}m(y'^2 - y'^2_0)$  при  $t = t_0 + T/2$

по начальным значениям  $y_0$  и  $t_0$ . Проводя преобразования, аналогичные (2.23) – (2.25), получим:

$$\left\langle \frac{1}{2}m(y'^2 - y_0'^2) \right\rangle \simeq \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{m\omega^2} \left[ \frac{\partial B_v}{\partial y} \right]^2 \quad (2.30)$$

Как и в (2.26) энергия, передаваемая полем инденторам в единицу времени при поступательно-колебательном движении, запишется в виде:

$$E_n = \frac{p_m^2}{2\pi m\omega^2} \left[ \frac{\partial B_v}{\partial y} \right]^2 \quad (2.31)$$

Полная энергия, передаваемая внешним полем инденторам в единицу времени, равна

$$E_b + E_n = \frac{p_m^2}{2\pi m\omega^2} \left[ \frac{B_v^2}{I} + \frac{1}{m} \left[ \frac{\partial B_v}{\partial y} \right]^2 \right]. \quad (2.32)$$

где  $E_b, E_n$  – Дж;  $p_m$  – Дж/Тл;  $B_v$  – Тл;  $\omega$  – с<sup>-2</sup>;  $I$  – кг · м<sup>2</sup>;  $m$  – кг;  $\frac{\partial B_v}{\partial y}$  – Тл/м.

Рассмотрим диссиацию энергии инденторов, обусловленную сопротивлением обрабатываемой среды деформированию в процессе ударно-импульсного взаимодействия. Для упрощения предполагается рассматриваемое сопротивление линейным по соответствующим скоростям, что справедливо при пренебрежении эффектами присоединенной массы.

На основании исследований [65] выражение для энергии, диссирируемой индентором в магнитоожженном вращающемся слое за единицу времени, представим в виде:

$$E_{\text{д.о.с.}} \simeq 6E_{\text{ср}} \left( \frac{f_{\text{п}}}{m} + \frac{f_{\text{в}}}{I} \right), \quad (2.33)$$

где  $E_{\text{ср}}$  – средняя энергия одной степени свободы, а усреднение проводится по распределению для соответствующей линейной или угловой скорости;  $f_{\text{п}}$  и  $f_{\text{в}}$  – соответственно, коэффициенты трения при поступательном и вращательном движении.

В общем случае  $f_{\text{п}}$  и  $f_{\text{в}}$  зависят от внутреннего трения  $\eta$  обрабатываемого материала, размера и формы инденторов, чисел Рейнольдса для поступательного и вращательного движения, а также от количества инденторов в рабочей зоне, охватываемой электромагнитным вращающимся полем и оцениваемой параметром  $N$ . В работе [23] показано, что для сферических частиц радиуса  $r$ , взаимодействующих с непрерывной фазой, при числах Рейнольдса меньше или порядка единицы коэффициенты  $f_{\text{п}}$  и  $f_{\text{в}}$  можно определить из соотношений:

$$f_{\text{п}} = 6\pi\eta r f(N), \quad f_{\text{в}} = 8\pi\eta r^3 f(N), \quad f(0) = 1, \quad (2.34)$$

где  $f(N)$  – функция, учитывающая влияние стесненности движения инденторов на испытываемое ими сопротивление, сущность которой будет раскрыта в следующем разделе.

Для цилиндрических инденторов, имеющих  $l/d > 1$  ( $l$  – длина,  $d$  – диаметр) с учетом (30-2.34) запишем

$$\frac{f_{\Pi}}{m} + \frac{f_{\text{B}}}{I} = \frac{9}{2} \frac{\eta f}{\rho r_{\text{пр}}^2} + 15 \frac{\eta f}{\rho r_{\text{пр}}^2} = \frac{39\eta f}{2\rho r_{\text{пр}}^2},$$

где  $\rho$  – плотность материала индентора;  $r_{\text{пр}}$  – приведённый радиус индентора (при условии равенства масс цилиндра и сферы), равный

$$r_{\text{пр}} = \sqrt[3]{\frac{3}{16} d^2 l}.$$

Отсюда видно, что вязкая диссипация энергии вращательного движения более чем в три раза превышает диссипацию поступательного движения.

Для учета диссипации за счет неупругих столкновений необходимо решить задачу о единичном столкновении двух произвольно вращающихся инденторов с учетом поверхностного трения, пластического деформирования и изменения скоростей инденторов при их сближении за счет дипольного взаимодействия. Далее результаты следует усреднить по скоростям поступательного движения частиц и по ориентации их дипольных магнитных моментов [31]. Задача очень трудная даже без учета дипольного взаимодействия. Однако возможно ограничиться полуэмпирическим подходом, введя эффективный коэффициент упругости столкновений  $\gamma$ , характеризующий сохранение кинетической энергии сталкивающихся инденторов в единичном акте, а выражение для диссипации энергии, обусловленной столкновениями, в расчете на единицу объема и единицу времени [69] представить в виде:

$$E_{\text{д.и.}} \simeq 6(1 - \gamma)E_{\text{ср}} \quad (2.35)$$

Таким образом, диссипация энергии инденторов в МОВ слое будет равна

$$E_{\text{д.о.с.}} + E_{\text{д.и.}} \simeq 6E_{\text{ср}} \left( 1 + \frac{f_{\Pi}}{m} + \frac{f_{\text{B}}}{I} - \gamma \right). \quad (2.36)$$

Для устойчивого процесса магнитоожижения вращающегося слоя диссирируемая и проводимая энергии должны быть равны. Следовательно:

$$\frac{p_m^2}{2\pi\omega^2} \left[ \frac{B_v^2}{I} + \frac{1}{m} \left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 \right] = 6E_{\text{ср}} \left( 1 + \frac{f_{\Pi}}{m} + \frac{f_{\text{B}}}{I} - \gamma \right). \quad (2.37)$$

Равенство (2.35) справедливо в предположении доминирования вязкого механизма диссипации и позволяет для этого случая определить пороговое значение градиента индукции поля, обеспечивающее устойчивый режим магнитоожижения вращающегося слоя:

$$\left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 = \frac{12\pi\omega m}{p_m^2} E_{\text{ср}} \left( 1 + \frac{f_{\Pi}}{m} + \frac{f_{\text{B}}}{I} - \gamma \right) - \frac{m}{I} B_v^2 \quad (2.38)$$

Как следует из (2.37), режим устойчивого магнитоожижения вращающегося слоя зависит от индукции электромагнитного вращающегося поля, магнитного момента индентора, его массы и момента инерции, частоты переменного магнитного поля, а также коэффициентов сопротивления поступательному и вращательному движению.

## 2.2.2 Оценка энергетического состояния МОВ слоя при фазовых переходах

Ферромагнитный индентор МОВ слоя обладает запасом кинетической энергии, определяемой выражением (2.32), а также потенциальной, связанной с наличием постоянной составляющей индукции  $B_c$  внешнего поля. Таким образом, полная энергия единицы объема МОВ слоя, отнесенная к единице времени, может быть записана в виде:

$$E = \frac{p_m}{2\pi\omega^2} \left[ \frac{p_m}{I} B_v^2 + \frac{p_m}{m} \left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 - \omega^2 B_c \cos \alpha \right], \quad (2.39)$$

где  $\alpha$  – среднее за период значение угла между  $p_m$  и  $B_c$ ,  $E$  – Дж;  $p_m$  – Дж/Тл;  $B_v, B_c$  – Тл;  $\omega$  – с<sup>-2</sup>;  $I$  – кг · м<sup>2</sup>;  $m$  – кг;  $\frac{\partial B_v}{\partial y}$  – Тл/м.

Согласно [65] переход МОВ слоя из магнитоожиженного состояния в «твёрдую» fazу произойдет при условии, что ферромагнитные инденторы прекратят возвратно-поступательное (вращательное) движение. Такой процесс реализуется при повышении индукции постоянного поля до значений, удовлетворяющих следующему соотношению:

$$\frac{1}{2\pi} p_m B_c \cos \alpha \geq \frac{1}{2\pi} \frac{p_m^2}{m\omega^2} \left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2. \quad (2.40)$$

Из последнего неравенства можно получить выражение для индукции постоянного поля, соответствующей переходу беспорядок – порядок:

$$B_c \geq \frac{p_m}{m\omega^2} \left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 \quad (2.41)$$

В неравенстве (2.41) принят  $\cos \alpha = 1$ , что можно оправдать предположением о коллинеарной ориентации векторов  $\vec{p}_m$  и  $\vec{B}_c$  при переходе ферромагнитного индентора из магнитоожиженного состояния в «твёрдую» fazу.

Приведенный в предыдущем разделе анализ позволяет рассчитать эквивалентную температуру МОВ слоя, для чего кинетическую энергию одного индентора, приобретаемую за время, равное полупериоду, приравняем тепловой энергии  $\frac{i}{2}RT_m$ , где  $T_m$  – температура МОВ слоя.

$$\frac{1}{2} \frac{p_m^2}{I\omega^2} B_v^2 + \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{m\omega^2} \left[ \frac{\partial B_v}{\partial y} \right]^2 = \frac{6}{2} RT_m, \quad (2.42)$$

где  $i = 6$  складывается из 3 поступательных и 3 вращательных степеней свободы;  $R = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

$$T_m = \frac{1}{6R\omega^2} \left[ \frac{p_m^2 B_v^2}{I} + \frac{p_m^2 (\partial B_v / \partial y)^2}{m} \right] = \frac{1}{6R\omega^2} (I\beta^2 + m\alpha^2) \quad (2.43)$$

В последнем равенстве приняты обозначения:  $\beta$  и  $\alpha$  – угловое и линейное ускорения ферромагнитного индентора, равные

$$\beta = \frac{p_m B_v}{I}; \quad \alpha = \frac{p_m (\partial B_v / \partial y)}{m}.$$

Можно определить индукцию постоянного поля, при которой прекращается механическое движение инденторов в структуре «твёрдой» фазы, для чего энергию вращательного движения индентора приравняем к энергии межинденторного взаимодействия. В приближении ближайших соседей и коллинеарной ориентации магнитных диполей запишем :

$$\frac{1}{2} \frac{p_m^2 B_v^2}{I\omega^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p_m^2}{r_{np}^3} + p_m B_c \quad (2.44)$$

и для искомого значения индукции получим

$$B_c = \frac{1}{2} \frac{p_m B_v^2}{I\omega^2} - \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p_m}{r_{np}^3} \quad (2.45)$$

### 2.3 Ударно-импульсные взаимодействия ферромагнитных инденторов в МОВ слое и обоснование их эффективной загрузки

Установленные ранее закономерности движения ферромагнитных инденторов в МОВ слое позволяют обосновать характер их ударных взаимодействий, как между собой, так и с поверхностью деталей, находящихся в зоне влияния электромагнитного поля. С этой целью смоделируем условия, в которых находится индентор массой  $m$  в МОВ слое в момент соударения. Эти условия можно охарактеризовать как стеснённые, то есть вращение неравноосного индентора цилиндрической формы с  $l/d > 1$  ограничивается двумя условными плоскостями, расстояние между которыми  $h < l$  (рис. 2.4). Одна из плоскостей имитирует поверхность обрабатываемой детали, другая – слой нижележащих инденторов.

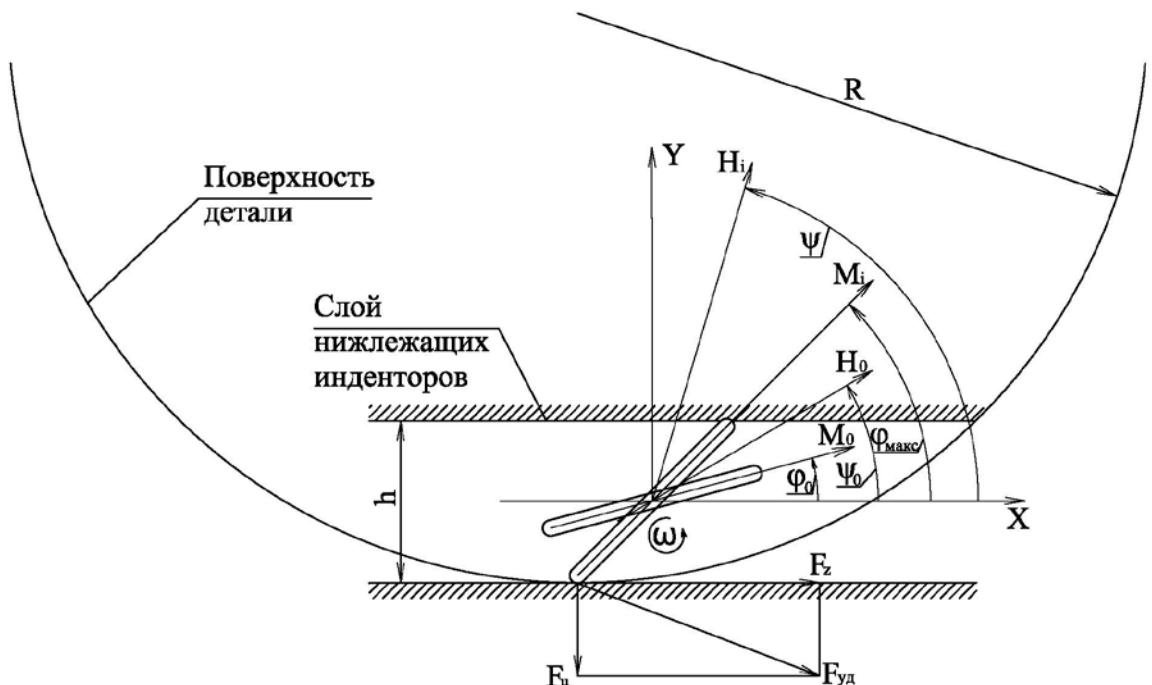


Рис. 2.4. Схема движения ферромагнитного индентора в МОВ слое.

Как было показано в разделе 2.1, ферромагнитный индентор в МОВ слое вращается с постоянной абсолютной угловой скоростью  $\psi_{abc}$ , описываемой зависимостью (2.21), и обладает кинетической энергией  $E$ , вычисляемой по формуле (2.39).

В момент соударения линия действия силы образует с нормалью к поверхности угол  $\beta$ . Таким образом, количество энергии, вызывающей упруго-пластическую деформацию поверхности, можно оценить в виде:

$$E_{уд} = E \sin \beta. \quad (2.46)$$

Выразив  $\sin \beta$  через отношение  $h/l$  получим

$$E_{уд} = E h/l. \quad (2.47)$$

Из полученного выражения следует, что характер силового воздействия ферромагнитных инденторов зависит от степени стесненности их в МОВ слое. При  $h \geq l$  процесс будет характеризоваться ударно-импульсным воздействием инденторов в направлении нормали к обрабатываемой поверхности с определённой частотой, зависящей от разности  $(l - h)$ . При  $h < l$  повышается степень стеснённости МОВ слоя с преобладанием тангенциальной составляющей силы воздействия и, таким образом, процесс будет носить выглаживающий характер обработки поверхности.

Следовательно, варьируя состоянием МОВ слоя можно обеспечить как «жёсткий», так и «мягкий» режимы силового воздействия на обрабатываемую поверхность, добиваясь требуемых параметров качества поверхностного слоя. Энергонапряжённость МОВ слоя полностью определяется размером, материалом и массой ферромагнитных инденторов, загружаемых в рабочую зону устройства при установленной напряжённости электромагнитного вращающегося поля.

В главе 1 показано, что движение ферромагнитных инденторов возможно только до определённой степени заполнения ими рабочей зоны влияния вращающегося электромагнитного поля, при которой обеспечивается требуемый технологический эффект устройства. Критерием заполнения рабочей зоны ферромагнитными инденторами может служить некий параметр  $K$ , зависящий от многих факторов процесса:

$$K = f_1(\mu, l/d, V, \omega, B, p_m, I).$$

Найти аналитическое решение выражения для оценки  $K$  очень сложно, так как вышеперечисленные факторы взаимобуславливают друг друга. В этой связи наиболее рационально представить его в виде соотношения:

$$K = V_\Sigma / V_{p.z},$$

где  $V_\Sigma$  – суммарный объём ферромагнитных инденторов, при котором обеспечивается требуемый технологический эффект устройства,

$$V_{\Sigma} = f_2(\mu, l/d, V, \omega, B, p_m, I);$$

$V_{p,3}$  – внутренний объём рабочей зоны, находящийся под воздействием вращающегося электромагнитного поля.

Из всех вышеперечисленных факторов, определяющих параметр загрузки  $K$ , особо следует выделить влияние на него геометрического критерия подобия инденторов  $l/d$  и их объём  $V$ . Что касается других факторов, таких как материал инденторов, магнитная индукция поля, то они принимаются, как правило, определёнными исходя из конструктивных характеристик устройства.

Для установления зависимости  $K = f_3(l/d, V)$  смоделируем процесс движения ферромагнитных инденторов в МОВ слое. Для построения такой модели примем следующие допущения:

- положение в рабочей зоне ферромагнитных инденторов одного размера, материала и формы равновероятно;
- характер движения ферромагнитных инденторов идентичен;
- аксиальное движение ферромагнитных инденторов вдоль нормали к вектору магнитной индукции магнитного поля отсутствует; это допущение позволяет упростить процесс моделирования и свести его к решению плоской задачи, несмотря на то, что за счёт случайных столкновений инденторов возможны аксиальные движения.

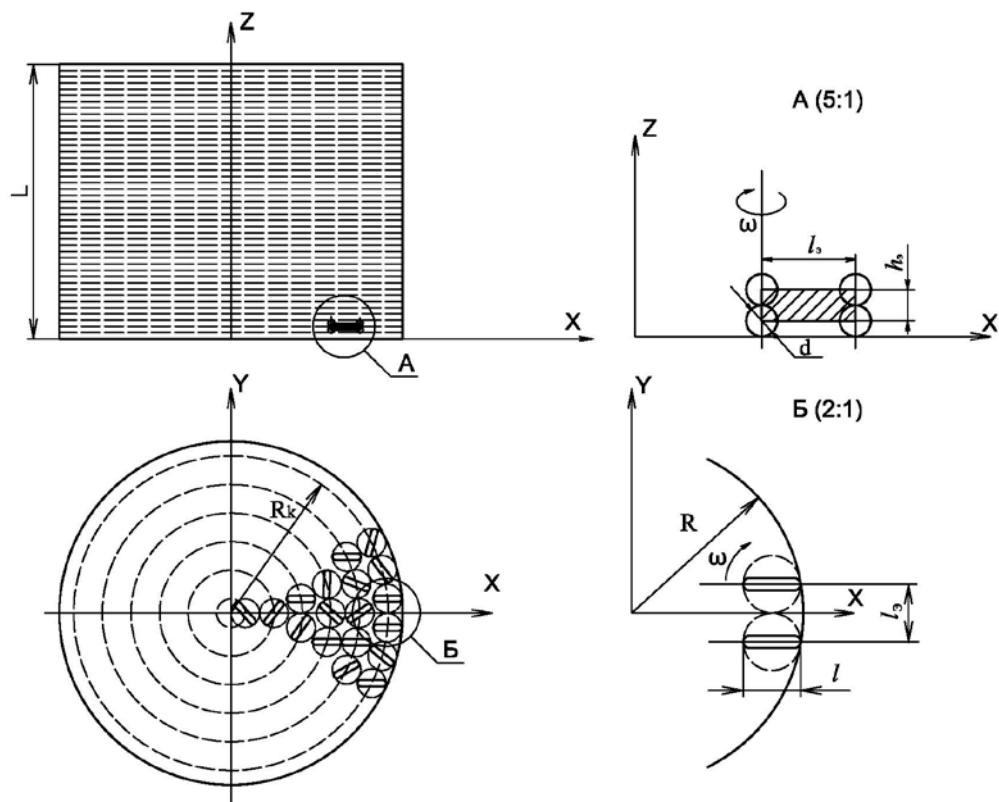


Рис. 2.5. Формализованная модель процесса перемешивания в вихревом слое.

Основываясь на физической сущности явлений, установленных в гл. 1, которые наблюдаются в МОВ слое и связаны с образованием из ферромагнитных инденторов отдельных элементарных слоёв, расположенных на определённом расстоянии друг от друга, представим формализованную модель движения ферромагнитных инденторов в МОВ слое в виде, показанном на рис. 2.5, из которого следует, что по длине рабочей зоны инденторы расположены параллельными элементарными слоями.

Найдём зависимость величины параметра заполнения рабочей зоны устройства ферромагнитными инденторами  $K$  от плотности их расположения в элементарном слое.

Рассмотрим случай, наиболее эффективный с точки зрения энергетического взаимодействия инденторов в МОВ слое – когда оси вращения цилиндрических инденторов в плоскости поперечного сечения рабочей зоны радиусом  $R$  располагаются по концентрическим окружностям с радиусом  $R_k$  со степенью стеснённости  $h/l = 1$ . В этом случае зону, охватываемую вращающимися ферромагнитными инденторами можно определить по формуле:

$$S_{\text{вр}} = \frac{\pi^2 li}{2} \left[ R - \frac{l(i+1)}{4} \right], \quad (2.48)$$

где  $i$  – количество концентрированных окружностей расположения центров вращения ферромагнитных инденторов, определяется из соотношения:

$$i = \frac{R}{l} - 0,5. \quad (2.49)$$

На основе (44-2.48) зависимость для оценки предельно-допустимой степени заполняемости рабочей зоны устройства ферромагнитными инденторами будет иметь вид:

$$K_{\text{кр}} = \frac{S_{\text{вр}}}{S_{\text{р.з}}} = \frac{li}{2R^2} \left[ R - \frac{l(i+1)}{4} \right], \quad (2.50)$$

где  $S_{\text{р.з}}$  – площадь сечения рабочей зоны,

а соответствующее ей количество инденторов, необходимое для загрузки в рабочую зону устройства, будет равно:

$$N = \frac{2\pi i L}{ld} \left[ R - \frac{l(i+1)}{4} \right], \quad (2.51)$$

где  $L$  – длина рабочей зоны устройства с ВЭМП, м;  $d$  – диаметр индентора, м.  $R$  – м;  $l$  – м;

Обработка деталей свободнодвижущимися инденторами в условиях вращающегося электромагнитного поля является одной из разновидностей ударно-импульсных технологических систем. Особенностью ударно-импульсных систем (УИС) является наличие не обязательно одного, а возможно, нескольких стационарных режимов разной кратности. В результате исследований Я.Г. Пановко [79] установил, что период устойчивых стационарных колебаний системы мало зависит от характера соударения элементов, так как имеющиеся силы трения стабилизируют их движение. Результатом описания движения элементов УИС является

фазовое уравнение, которое практически всегда при гармоническом возбуждении приводится к виду:

$$w_1 \sin\phi + w_2 \sin\phi = w_2, \quad (2.52)$$

где  $w_1, w_2, w_3$  – функции параметров системы и возбуждения, а  $\phi$  – фаза колебаний возбуждающего элемента, при которой происходит его соударение с соседним звеном.

Из исследованных в настоящее время трех десятков моделей ударно-импульсных систем, рассмотрим модель «столбика шариков» (рис. 2.6).

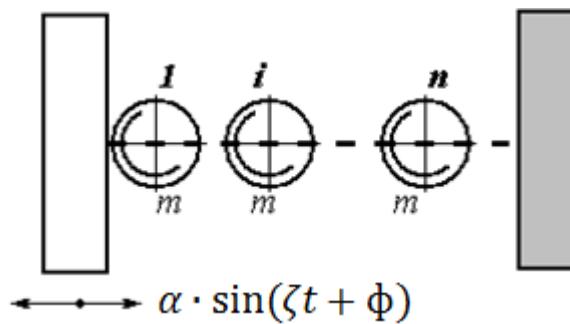


Рис. 2.6. Модель ударно-импульсной системы «столбик шариков».

Эта модель обстоятельно исследована [54, 55]; ее особенности описывают следующие соотношения:

- уравнения движения инденторов в промежутках между соударениями:

$$m\ddot{x}_i = 0; 1 \leq i \leq n \quad (2.53)$$

- коэффициенты фазового уравнения:

$$w_1 = 1; w_1 = \frac{2}{3}\pi\iota \left( \frac{1+K_B+K_B^2}{1-K_B} - \frac{1-K_B}{1+K_B} n^2 \right); w_3 = \frac{s}{a}, \quad (2.54)$$

где  $K_B$  – коэффициент восстановления, одинаковый для всех ударных пар,  $\iota$  – кратность режима,  $n$  – число инденторов в столбике,  $s$  – суммарный зазор в системе;  $a$  – амплитуда колебаний ударника;

- ударный импульс, передаваемый препадре:

$$G = \frac{m\zeta a}{n} \cdot \frac{1+K_B}{1-K_B} \cos\phi, \quad (2.55)$$

где  $\zeta$  – частота колебаний системы.

Стационарные виброударные колебания могут существовать при выполнении условия, представляющего собой критерий эффективной загрузки обрабатывающей среды в рабочую камеру:

$$n < \frac{1}{1-K_B}. \quad (2.56)$$

Из (2.55) видно затухание ударного импульса по мере его прохождения вдоль цепочки инденторов. Для стальных сферических инденторов среднее значение коэффициента восстановления составляет около 0,7. Таким образом, при условии оптимальности момента соударения ( $\cos\phi = 1$ ) ударный импульс затухает обратно пропорционально числу слоев инденторов. Рост ударного импульса наблюдается с увеличением амплитуды виброскорости (равной  $\zeta\alpha$ ) и массы инденторов  $m$ .

Ударные колебания полностью затухают при нарушении условия (2.56), то есть при  $n \geq 1/(1 - 0,7) \approx 3,3$ . Это не означает, что в такой системе энергия вообще не будет передаваться препятствию. Однако процесс при этом будет носить нестационарный, хаотический характер, и большая часть приходящих ударов будет передавать импульс, существенно меньший, чем в (2.55).

На основе вышеприведённых исследований можно сделать вывод, что наиболее эффективная загрузка ферромагнитных инденторов в рабочую зону должна находиться на уровне  $i=3-4$  слоёв. Таким образом, зависимость для оценки эффективной степени заполнения рабочей зоны ферромагнитными инденторами цилиндрической формы при  $i=4$  согласно (2.50) можем записать:

$$K_{\text{ЭФ}} = \frac{4R-5l}{2R^2}, \quad (2.57)$$

а соответствующее ей необходимое для загрузки количество ферромагнитных инденторов цилиндрической формы рассчитать, используя выражение [57]:

$$N_{\text{ЭФ}} = \frac{8\pi L}{ld} \left[ R - \frac{5l}{4} \right] \quad (2.58)$$

## 2.4 Оценка производительности упрочняющей обработки во вращающемся электромагнитном поле

Процесс интенсивности упруго-пластической деформации обрабатываемой поверхности свободнодвижущимися в МОВ слое ферромагнитными инденторами из-за отсутствия жесткой связи с источником энергии каковым является электромагнитное вращающееся поле, носит случайный характер. Поэтому он может быть описан на основе теоретико-вероятностных представлений их контактного взаимодействия с поверхностью [3].

В общем виде модель интенсивности упруго-пластической деформации поверхности ферромагнитными инденторами можно представить следующим образом:

$$P = P_g \cdot P_e, \quad (2.59)$$

где  $P$  – вероятность того, что любая точка обрабатываемой поверхности подвергается упруго-пластической деформации за один период колебания МОВ слоя в электромагнитном вращающемся поле;

$P_3$  – энергетическая вероятность того, что за один период колебания МОВ слоя обработки происходит процесс упруго-пластической деформации поверхности;

$P_e$  – геометрическая вероятность того, что любая точка обрабатываемой поверхности подвергается микропластической деформации.

В качестве эффекта микропластической деформации условно примем пластически деформированное круговое пятно диаметром  $d_k$ , где  $k$  – количество ударов инденторов в рассматриваемое пятно, с площадью  $S_k$ , формируемое на поверхности при ударно-импульсном воздействии на неё ферромагнитного индентора цилиндрической формы с  $l/d > 1$  и сферическими торцами радиусом  $d/2$ . При этом считаем, что контактное взаимодействие ферромагнитного индентора с поверхностью в процессе соударения реализуется сферическими торцами.

В работах [50-52] получено следующее аналитическое выражение для определения диаметра пластического отпечатка  $d_k$  в функции от технологических факторов контакта :

$$d_k = \sqrt[4]{\frac{6 \cdot E \cdot d}{HV}} \quad (2.60)$$

где  $d_k$  – м;  $E$  – Дж;  $d$  – м;  $HV$  – Па.

Учитывая результаты, полученные в работе [64], геометрическую вероятность того, что любая точка обрабатываемой поверхности подвергается микродеформации, можно определить как произведение:

$$P_e = P_{e_1} \cdot P_{e_2} \quad (2.61)$$

где  $P_{e_1}$  – геометрическая вероятность того, что любая точка внутри локально выделенного геометрического элемента обрабатываемой поверхности покрывается пятном контакта;

$P_{e_2}$  – геометрическая вероятность того, что любой локально выделенный геометрический элемент обрабатываемой поверхности покрывается пятном контакта;

Под локально выделенным геометрическим элементом обрабатываемой поверхности понимается геометрическая фигура, образованная на поверхности центрами контакта близко расположенных друг к другу ферромагнитных инденторов.

На основе модельных представлений ударно-импульсного взаимодействия ферромагнитных инденторов в МОВ слое, рассмотренных в разделе 2.3, в качестве локального геометрического элемента поверхности выделим прямоугольник (рис. 2.5) со сторонами, равными:

$h_3$  – расстоянию между отдельными элементарными слоями, расположенными на определённом расстоянии друг от друга по длине рабочей зоны;

$l_3$  – расстоянию между центрами контакта ферромагнитных инденторов, по окружности обрабатываемой поверхности,  $l_3 = \frac{2Rl}{3R-l}$ .

Для практических расчетов  $P_{r_1}$  примем отношение площади пятна контакта  $S_k$  к площади локального геометрического элемента поверхности  $S_3$ :

$$P_{r_1} = S_k/S_3, \quad (2.62)$$

здесь  $S_k = \pi d_k^2 / 4$ ;  $S_3 = \frac{2Rh_3l}{2R-l}$ , где  $S_k, S_3$  – м<sup>2</sup>;  $d_k$  – м;  $R$  – м;  $h_3$  – м;  $l$  – м.

В результате исследования в работе [42] установлено, что при обработке деталей в замкнутых объемах геометрическая вероятность  $P_{r_2}$  того, что любой локально выделенный геометрический элемент обрабатываемой поверхности покрывается пятном контакта в зависимости от степени загрузки рабочей камеры, находится в пределах 0,7...0,95.

В устройствах с МОВ слоем степень загрузки рабочей зоны может приводить к увеличению расстояния между элементарными слоями по длине рабочей зоны из-за наличия аксиальной составляющей смещения ферромагнитных инденторов. Установить величину этого смещения, обуславливающего расстояние между слоями, возможно только экспериментально. Поэтому примем  $P_{r_2}$  в пределах, рекомендованных для замкнутых объемов.

Вероятность того, что за один период колебания МОВ слоя в любой точке обрабатываемой поверхности происходит процесс упруго-пластической деформации поверхности и появляется пятно микроконтакта, зависит от энергетического состояния ферромагнитных инденторов МОВ слоя в момент соударения. Стохастический характер взаимодействия ферромагнитных инденторов МОВ слоя, как между собой, так и с обрабатываемой поверхностью, позволяет рассматривать этот процесс как случайную величину, параметры распределения которой определяются видом и энергосиловыми характеристиками ферромагнитных инденторов и состоянием МОВ слоя в процессе обработки.

Для оценки энергетической вероятности  $P_3$  следует знать функции распределения случайной величины энергии удара  $F(E)$ . Поэтому используем косвенный путь, установив закон распределения на поверхности следов соударения, являющихся следствием энергосиловых характеристик ферромагнитных инденторов, используя методику, предложенную в работе [42]. Проанализируем вероятность появления пятна микроконтакта при нормальном законе распределения случайной величины следов ударов.

Если изменение случайной величины  $d$  – следов микроударов подчинено закону нормального распределения, то  $P_3$  того, что  $d$  может принимать любые значения в пределах от  $d_1$  до  $d_2$ , равна:

$$P_3 = P(d_{k1} < d < d_{k2}) = \frac{1}{\tau_{d_k} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{d_{k1}}^{d_{k2}} e^{\frac{(x-M_{d_k})^2}{2\tau_{d_k}^2}} dx, \quad (2.63)$$

где  $M_{d_k}$  – математическое ожидание рассматриваемой случайной величины,  $\tau_{d_k}$  – среднее квадратическое отклонение этой случайной величины.

Данная формула с помощью подстановки  $t = \frac{x-M}{\tau}$  может быть приведена к следующему виду:

$$P(d_{k1} < d < d_{k2}) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = \Phi\left(\frac{d_{k2}-M_{d_k}}{\tau_{d_k}}\right) - \Phi\left(\frac{d_{k1}-M_{d_k}}{\tau_{d_k}}\right), \quad (2.64)$$

где  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – нормированная функция Лапласа, значения которой находят по соответствующим таблицам.

Многочисленные исследования показали, что практическая зона рассеяния случайной величины  $x$ , подчиняющейся закону нормального распределения, лежит в пределах  $M_x \pm 3\tau_x$  и диапазон ее значений составляет  $6\tau_x$ . Тогда минимальный размер следа удара, формируемый на поверхности ферромагнитным индентором, равен  $d_{k_{min}} = M_{d_k} - 3\tau_{d_k}$ ; максимальный размер составляет  $d_{k_{max}} = M_{d_k} + 3\tau_{d_k}$ .

Определим значения аргументов функции Лапласа для (2.64):

$$t_1 = \frac{(d_{k_{min}} - M_{d_k})}{\tau_{d_k}} = \frac{(M_{d_k} - 3\tau_{d_k} - M_{d_k})}{\tau_{d_k}} = -3, t_2 = \frac{(d_{k_{max}} - M_{d_k})}{\tau_{d_k}} = \frac{(M_{d_k} + 3\tau_{d_k} - M_{d_k})}{\tau_{d_k}} = 3.$$

Учитывая нечетность функции Лапласа, из (2.64) и последних равенств получаем для рассматриваемой случайной величины:

$$P_3(M_{d_k} - 3\tau_{d_k} < d_k < M_{d_k} + 3\tau_{d_k}) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = \Phi(3) - \Phi(-3) = 2\Phi(3).$$

Согласно таблицам, содержащим значения функций Лапласа  $2\Phi(3) = 0,9973$ , это означает, что вероятность нахождения случайной величины  $d_k$  внутри обозначенного интеграла  $(d_{k_{min}}; d_{k_{max}})$  очень высока.

Экспериментальные исследования, проведенные по оценке появления отпечатка на обрабатываемой поверхности, подтвердили правомерность предложенного подхода к оценке  $P_3$ , в работе [42] определено  $P_3 = 0,95$ .

Предполагаем, что при всех циклах вращения МОВ слоя в процессе обработки следы пятен контакта, формируемые на обрабатываемой поверхности за один период колебания МОВ слоя, не перекрываются. Используя формулу Бернулли, можно определить вероятность того, что каждая точка обрабатываемой поверхности покроется отпечатками  $k$  раз за  $j$  циклов вращения МОВ слоя в электромагнитном вращающемся поле:

$$P_n^k = \frac{j!}{(j-k)! \cdot k!} \cdot P^k \cdot (1-P)^{j-k}; \quad k = (0, 1, 2, 3 \dots j). \quad (2.65)$$

Последняя зависимость позволяет вычислить количество циклов вращения МОВ слоя, обеспечивающих  $k$ -кратное покрытие поверхности следами ударов.

На основе теоретических и экспериментальных исследований предложена [5] упрощенная зависимость для расчета количества энергетических циклов в виде

$$n(k) = \frac{k}{P}. \quad (2.66)$$

Чтобы оценить производительность процесса обработки поверхности детали ферромагнитными инденторами в условиях электромагнитного вращающегося поля, необходимо знать продолжительность обработки, которую можно определить по следующей формуле:

$$t_k = T_u \cdot n(x), \quad (2.67)$$

где  $T_u$  – период одного цикла вращения МОВ слоя во вращающемся электромагнитном поле,  $T_u = \omega / 2\pi$ ;

$\omega$  – угловая скорость электромагнитного вращающегося поля.

Тогда с учётом (2.67) продолжительность упрочняющей обработки ферромагнитными инденторами в условиях электромагнитного вращающегося поля будет равна [61]:

$$t_k = \frac{2\pi k}{P \cdot \omega}, \quad (2.68)$$

здесь  $k$  – количество актов силового воздействия ферромагнитных инденторов МОВ слоя; согласно исследованиям, представленным в работах [64 50], установлено, что максимальное количество актов силового воздействия, при котором обеспечивается эффективное упрочнение поверхности, находится в пределах  $k = 12$  до  $14$ ;  $\omega$  –  $\text{с}^{-1}$ .

## 2.5 Моделирование качества поверхностного слоя, формируемого в процессе обработки МОВ слоем

### 2.5.1 Технологическое назначение применения МОВ слоя в технологии изготовления деталей машин

В настоящее время для упрочнения металлических кристаллических материалов используются различные методы ППД [64], однако всех их объединяет одна цель – стремление создать в идеальном кристалле нестабильности или нарушения структуры. Упрочнение путем повышения плотности дислокаций в процессе ППД связано с взаимодействием упругих полей искажений вокруг ядра дислокаций. В результате такого взаимодействия движение дислокаций затрудняется, что приводит к упрочнению кристаллических тел. К упрочнению приводят также отклонения от идеальной кристаллической структуры металлов. Кроме собственно дислокаций,

это дефекты типа трещин, атомы внедрения, границы зерен и субзерен (блоков). Чем больше таких дефектов, тем прочнее материал.

Особое место среди методов ППД занимают методы упрочнения конвективными потоками свободнодвижущихся инденторов, к которым относятся виброударная обработка, пневмодинамическая, центробежно-ротационная обработка. Являющийся предметом диссертационного исследования способ обработки ферромагнитными инденторами в электромагнитном вращающемся поле по своей динамической и технологической сущности, как было показано в гл. 1, ничем не отличается от вышеназванных методов, а является лишь их разновидностью по используемому источнику энергии. Эта общность предопределяет развитие на его основе **магнитодинамической** обработки деталей. Кроме того наличие общих закономерностей ударно-импульсного взаимодействия инденторов с обрабатываемой средой, присущих этой группе методов, позволяет положить в основу аналитической оценки характеристик качества поверхностного слоя, формируемого при магнитодинамической обработке, зависимости, полученные в результате теоретических и экспериментальных исследований методов этой группы, получивших практическое применение в технологии изготовления деталей машин.

## **2.5.2 Расчетно-аналитическая оценка параметров качества поверхностного слоя при ППД конвективными потоками свободнодвижущихся инденторов**

В настоящее время теоретически и экспериментально установлено, что динамические методы ППД свободнодвижущимися инденторами позволяют эффективно влиять на повышение усталостной прочности деталей, работающих в условиях циклических нагрузок. Основными причинами увеличения усталостной прочности деталей после ППД являются создание на поверхности сглаженного микрорельефа, повышение механических свойств металла в поверхностном слое, микротвёрдость, степень наклёпа, величины сжимающих остаточных напряжений.

На современном этапе в качестве основополагающих подходов к описанию процессов упрочнения этими методами поверхностного пластического деформирования (ППД) используют механический и металловедческий. Металлофизический подход активно применяют для качественного объяснения и предсказания сущности явлений, наблюдавшихся при ППД реальных материалов, и не используют в расчетной практике. Механические модели дают возможность приблизенно количественно оценивать механическое поведение твердых тел в определенных условиях их нагружения, но не являются надежными для разработки расчетно-аналитических методов прогнозирования механических характеристик реальных твердых тел

после ППД в широком диапазоне их применения. В этой связи в последние годы многие исследователи для описания процессов пластической деформации и разрушения твердых тел все чаще обращаются к энергетическим параметрам, в качестве которых выступают основные термодинамические характеристики материала поверхностного слоя: энергия, энтропия, температура и т. д., а расчетные зависимости строят на основе уравнения баланса энергии (энтропии).

Процесс упрочняющей обработки конвективными потоками свободнодвижущихся инденторов и достигаемый при этом технологический эффект достаточно подробно изучены и представлены в научных трудах А.П. Бабичева, Э.П. Субача С.Н. Шевцова, Ю.Р. Копылова, М.А. Тамаркина, В.А. Лебедева, Рыковского Б.П. и других [4, 45, 64, 89, 87, 93, 100]. Поэтому рассмотрим основные научные достижения в этой области и возможности их применения в условиях магнитодинамической обработки

В числе первых основополагающих работ по раскрытию физической сущности технологических процессов упрочняющей обработки свободнодвижущимися инденторами следует выделить работы А.П. Бабичева [4]. Проведённые им исследования механики взаимодействия металлических тел и детали при вибрационном воздействии позволили ему сформулировать механо-физико-химические основы процессов деформирования поверхности детали в среде вибрирующих тел, обуславливающие получение упомянутого технологического эффекта и которые явились исходной предпосылкой для дальнейших исследований в этой области. Обобщая результаты этих исследований, он показал, что под действием колебаний рабочей камеры обрабатывающая среда динамически сопрягается с поверхностью обрабатываемой детали и, периодически соударяясь с ней, образует на поверхности множество следов обработки, которые с течением времени в результате многократного наложения и перекрытия формируют новую поверхность. Возможность управления процессом упрочняющей обработки свободнодвижущимися инденторами определяется их состоянием и параметрами. В числе последних особое значение имеют: значение эквивалентной массы обрабатывающей среды, коэффициент восстановления, параметры силовых связей, динамический зазор между инденторами, диссипативные и квазиупругие связи. В формировании параметров качества поверхностного слоя важным является значение энергии соударения инденторов с обрабатываемой поверхностью.

На основе исследований динамики процессов и технологии виброударного упрочнения деталей сложной формы с закреплением в работе [45] предложены аналитические зависимости, устанавливающие связь параметров качества упрочнённого ППД поверхностного слоя с энергией, подводимой к поверхности в момент ударно-импульсного воздействия на неё свободнодвижущихся сферических твёрдых тел, характеристиками качества исходной

поверхности и условиями обработки. Так, для оценки изменения высоты микронеровностей микропрофиля упрочнённой поверхности зависимость имеет вид:

$$R_a = \left[ R_{a \text{ исх}} - \sqrt{\frac{2E}{\pi d H V}} \right] R_a(n); \quad (1-2.69)$$

для прогнозирования физико-механических параметров поверхностного слоя получены следующие зависимости, позволяющие установить:

- изменение твердости упрочнённой поверхности

$$H V = \left[ \sqrt{\frac{32 E}{\pi d^3}} \cdot H V \right] H V(n); \quad (2-2.70)$$

$$h_{H_k} = \left[ 1.5 \cdot \sqrt[4]{\frac{32 E d}{\pi H M} (1.54 - 10^{-3})} \right] \quad (3-2.71)$$

- изменение средних значений нормальных остаточных напряжений в упрочнённом слое

$$\sigma_o = \left[ 0.481 \left( \frac{E}{(r_{\text{пп}})^3} \right)^{0.2} \right] k_\mu^{0.8} \sigma_o(n), \quad (4-2.72)$$

где  $k_\mu = \frac{(1-\mu_d^2)}{E_d^2} + \frac{(1-\mu_i^2)}{E_i^2}$ ,  $d$  – диаметр индентора;  $H V$  – твёрдость материала по Викерсу;

$R_a(n)$ ,  $H V(n)$ ,  $\sigma_o(n)$  – функционалы потактового изменения соответствующих параметров за счёт многократности повторно совмещённых пластических отпечатков;  $r_{\text{пп}}$  – приведённый радиус контактирующих поверхностей  $r_{\text{пп}}' = r_d \cdot r_i / r_d + r_i$ ;  $\mu_{d,i}$ ,  $E_{d,i}$  – соответственно, коэффициент Пуассона и модуль Юнга для детали и обрабатывающей среды;  $R_{a \text{ исх}}$  – исходная шероховатость поверхности.

Из предложенных зависимостей следует, что основной вклад в формирование параметров качества упрочнённого слоя вносит первоначальное сплошное покрытие обрабатываемой поверхности пластическими отпечатками со средним диаметром  $d_k$ , при условии, что они не перекрывают друг друга. В равенствах (2.69-2.72) параметры упрочнённого слоя после первоначального однократного покрытия следами ударов описываются первым сомножителем.

При последующих ударно-импульсных воздействиях инденторов параметры качества упрочнённого слоя изменяются. Эти изменения корректируются вторым сомножителем, представляющим собой функционал изменения параметра качества в зависимости от количества совмещённых ударов в одной и той же локальной области обрабатываемой поверхности. Получить аналитическую зависимость, объективно отражающую тенденцию изменения параметра качества от количества покрытий поверхности следами ударов, задача достаточно сложная. Сложность её решения обусловлена тем, что при каждом последующем ударно-импульсном воздействии на поверхность инденторы, обладая неизменной энергией, взаимодействуют с модифицированной поверхностью, имеющей более повышенные физико-

механические характеристики. В связи с этим следует отметить экспериментально подтверждённый факт, который заключается в следующем. При достижении физико-механических характеристик поверхностного слоя предельных значений, ударно-импульсные воздействия будут приводить к её разрушению.

Поэтому для установления функциональной зависимости изменения параметров качества в процессе упрочняющей обработки поверхностного слоя рассмотрим результаты экспериментальных исследований, приведённых в научно-технической литературе, посвящённой исследованию формирования технологических параметров поверхности динамическими методами ППД, реализующих процесс обработки конвективными потоками свободнодвижущихся инденторов, т.к. виброударная, пневмодинамическая, центробежно-ротационная, представленных на рис. 1.7, 1.11, 1.12.

Как показал анализ, большинство полученных в результате исследований зависимостей изменения технологических параметров упрочнённого поверхностного слоя установлены в функции от продолжительности обработки. Эти зависимости в общем виде можно охарактеризовать следующим образом:

$$Y = f(X(t)), \quad (2.73)$$

где  $Y$  – значение технологического параметра поверхностного слоя, упрочнённого за промежуток времени  $t$ , при котором обеспечивается – *кратное покрытие* поверхности пластическими отпечатками;

Взаимосвязь продолжительности обработки с кратностью покрытия обрабатываемой поверхности пластическими отпечатками  $d_k$  определяется соотношением (41-2.68).

Представим экспериментальные зависимости в виде:

$$Y = f(X(k)) \quad (2.74)$$

С целью установления функционала  $X(k)$ , характеризующего изменение технологического параметра в зависимости от кратности покрытия обрабатываемой поверхности пластическими отпечатками при упрочняющей обработке, проводилась аппроксимация наблюдений, полученных по результатам экспериментальных исследований, с использованием метода наименьших квадратов. В качестве обобщённой аппроксимирующей функции была принята логарифмическая функция вида

$$X(k) = a \cdot \ln k + b, \quad (2.75)$$

где  $a, b$  – коэффициенты аппроксимации. Рассмотрим полученные аппроксимирующие зависимости для технологических параметров качества упрочнённого поверхностного слоя.

### Среднеарифметическая высота профиля микронеровностей

На рис. 2.7 представлены экспериментальные зависимости изменения среднеарифметической высоты профиля микронеровностей, из которых следует, что с увеличением продолжительности обработки высота профиля микронеровностей уменьшается до достижения определённой величины, соответствующей, согласно [4], величине установившейся шероховатости.

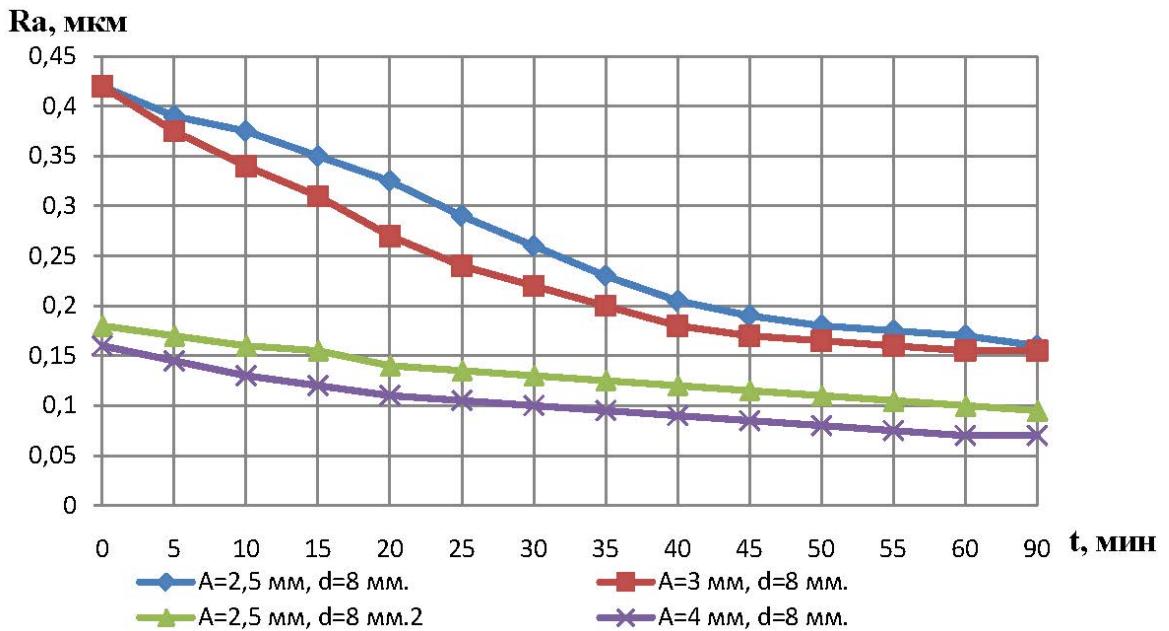


Рис. 2.7 Влияние времени обработки  $t$ , амплитуды вибрации  $a$ , диаметра индентора  $d$  на изменение шероховатости  $R_a$  для сталей X12M, Р6К5 и Р18 при виброударной обработке [2].

Для нахождения коэффициентов аппроксимации сведем задачу (2.73) к линейной зависимости, обозначая  $x = \ln k$ ,  $y = y(x) = R_{a_k}$ . Тогда искомый функционал принимает следующий вид:

$$y = ax + b. \quad (2.76)$$

Задача заключается в нахождении коэффициентов линейной зависимости, при которых функция двух переменных  $F(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2$  принимает наименьшее значение, здесь  $n$  — количество фиксированных точек на экспериментальной кривой рассматриваемой зависимости. То есть необходимо определить значения коэффициентов  $a$  и  $b$ , при которых сумма квадратов отклонений экспериментальных данных от прямой  $y = ax + b$  будет наименьшей. Таким образом, решение сводится к нахождению экстремума функции двух переменных, которое является решением системы алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i + bn = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (2.77)$$

Решение системы (8-2.77) может быть найдено по следующим формулам:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}, \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.78)$$

Проводя расчеты над экспериментальными значениями, получаем численные значения коэффициентов аппроксимации и функционал, характеризующий зависимость изменения параметра шероховатости от кратности покрытия обрабатываемой поверхности пластическими отпечатками:

$$R_a = a \cdot \ln k + b, \text{ или } R_{a_k} = b(1 + \frac{a}{b} \cdot \ln k).$$

Сравнительный анализ величины аппроксимирующего коэффициента  $b$  с величиной расчетного значения шероховатости по формуле (2.69) показал, что

$$b \approx R_{a \text{ исх}} - \sqrt{\frac{2E}{\pi d H V}}.$$

Представим коэффициент перед логарифмической функцией в виде:

$$\frac{a}{b} = K_{R_a} \frac{d_k}{d}, \quad (2.79)$$

где  $d_k$  – диаметр пластического отпечатка, определяемый по формуле (2.60), предложенной в работе [50];  $K_{R_a}$  – коэффициент корректировки изменения микропрофиля в процессе ППД.

Аппроксимации кривых, полученных по результатам экспериментальных исследований и представленных в приложении 1, позволили установить величину коэффициента корректировки  $K_{R_a} = 0,25-0,3$  (корреляция – 0,9) и получить выражение для аналитической оценки среднеарифметической высоты профиля микронеровностей поверхности упрочняемой магнитодинамической обработкой:

$$R_{a_k} = \left[ R_{a \text{ исх}} - \sqrt{\frac{2E}{\pi d H V}} \right] \left( 1 - K_{R_a} \frac{d_k}{d} \ln k \right), \quad (2.80)$$

где  $R_a$  – м;  $E$  – Дж;  $d$  – м;  $H V$  – Па;  $d_k$  – м.

Таким образом, изменения среднеарифметической высоты профиля микронеровностей могут быть представлены в следующем виде:

$$R_{a_k} = R_{a_1} \cdot R_a(k), \quad (2.81)$$

где  $R_{a_1}$  – значение среднеарифметической высоты профиля микронеровностей, формируемой на поверхности при первичном однократном покрытии её пластическими отпечатками,

$$R_{a_1} = \left[ R_{a \text{ исх}} - \sqrt{\frac{2E}{\pi d H V}} \right].$$

## Физико-механические параметры упрочнённого поверхностного слоя

Анализ экспериментальных зависимостей изменения физико-механических характеристик упрочнённого поверхностного слоя т.к. микротвёрдость, глубина упрочнённого слоя, величина остаточных напряжений первого рода, в функции от продолжительности обработки, представленных на рис. 2.8, показал, что с увеличением времени обработки наблюдается рост этих характеристик до какой-то предельной величины. Дальнейшая обработка приводит к их снижению в результате перенаклёпа, приводящего к разрушению поверхностного слоя.

Для описания зависимостей во временном интервале, при котором достигается максимальный эффект упрочнения поверхностного слоя, используем схему, аналогичную предыдущему случаю.

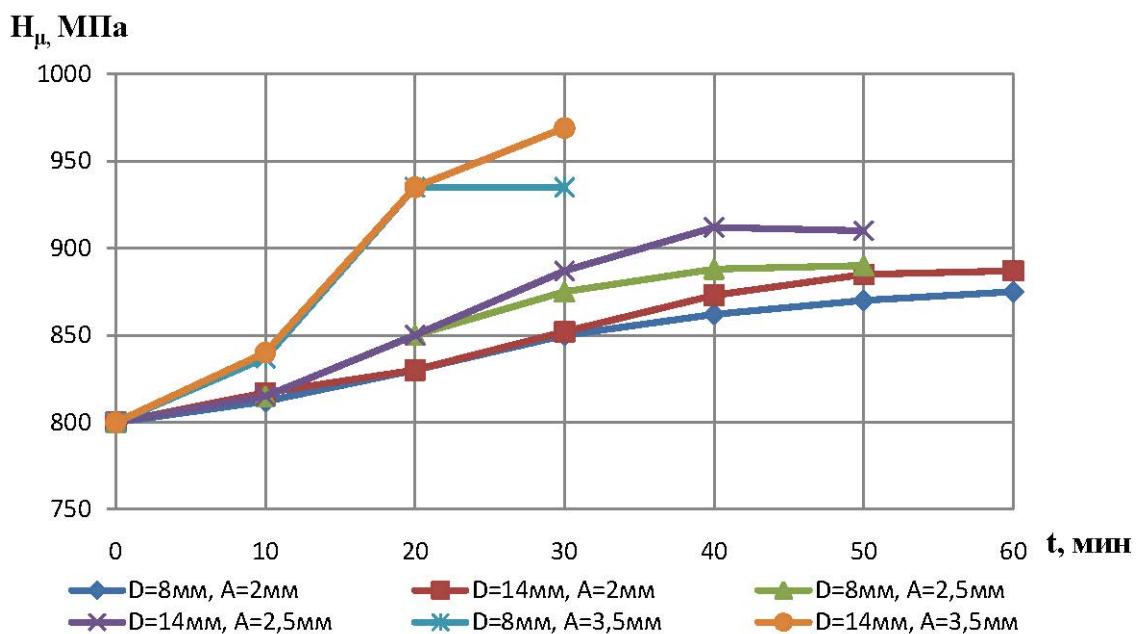


Рис. 2.8. Изменение микротвердости поверхности в зависимости от продолжительности виброударной обработки ( $a$  – амплитуда вибрации,  $d$  – диаметр индентора) [71].

На основании (2.73) искомые функциональные зависимости представим следующим образом:

$$\begin{aligned}
 HV(k) &= a_1 \cdot \ln k + b_1 \\
 h(k) &= a_2 \cdot \ln k + b_2 \\
 \sigma_o(k) &= a_3 \cdot \ln k + b_3
 \end{aligned} \tag{2.82}$$

По аналогии с (7-2.76) сведем задачу к линейной зависимости, обозначая  $x_j = \ln k$ ,  $j = 1, 2, 3$ ;  $y_1 = y_1(k) = HV(k)$ ,  $y_2 = y_2(k) = h(k)$ ,  $y_3 = y_3(k) = \sigma_o(k)$  сведем рассматриваемые задачи к линейной зависимости.

Значения коэффициентов аппроксимации находим из соответствующих систем уравнений:

$$\begin{cases} a_j \sum_{i=1}^n x_{ji}^2 + b_j \sum_{i=1}^n x_{ji} = \sum_{i=1}^n x_{ji} y_{ji} \\ a_j \sum_{i=1}^n x_{ji} + b_j n = \sum_{i=1}^n y_{ji} \end{cases} \quad j = 1, 2, 3, \quad (2.83)$$

Аналогично (8) решения находим по формулам:

$$a_j = \frac{n \sum_{i=1}^n x_{ji} y_{ji} - \sum_{i=1}^n x_{ji} \sum_{i=1}^n y_{ji}}{n \sum_{i=1}^n x_{ji}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{ji})^2}, \quad b_j = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ji} - a_j \sum_{i=1}^n x_{ji}}{n}, \quad (2.84)$$

здесь  $j = 1, 2, 3$ .

Проводя расчеты над экспериментальными значениями, получаем численные значения коэффициентов аппроксимации и функционалы, характеризующие зависимость изменения исследуемых параметров от количества покрывающих слоев:

$$HV_k = b_1(1 + \frac{a_1}{b_1} \cdot \ln k)$$

$$h_{H_k} = b_2(1 + \frac{a_2}{b_2} \cdot \ln k)$$

$$\sigma_{o_k} = b_3(1 + \frac{a_3}{b_3} \cdot \ln k)$$

Экспериментальные исследования показали, что справедливы оценки:

$$b_1 \approx \sqrt{\frac{32 E}{\pi d^3} \cdot HV}, \quad (2.85)$$

$$b_2 \approx 1.5 \cdot \sqrt[4]{\frac{32 Ed}{\pi HV} (1.54 - 10^{-3})}, \quad (2.86)$$

$$b_3 \approx \left[ 0.481 \left( \frac{E}{(r_{np})^3} \right)^{0.2} \right] k_\mu^{0.8} \quad (2.87)$$

Аналогично (2.78), для учёта влияния на изменение рассматриваемых параметров энергосиловых условий деформирования и характеристик исходного микропрофиля, коэффициенты перед логарифмической функцией могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} \frac{a_1}{b_1} &= K_{HV} \frac{d_k}{d}, \\ \frac{a_2}{b_2} &= K_h \frac{d_k}{d}, \\ \frac{a_3}{b_3} &= K_{\sigma_o} \frac{d_k}{d}, \end{aligned} \quad (2.89)$$

где  $K_{HV}$ ,  $K_h$ ,  $K_{\sigma_o}$  – коэффициенты корректировки изменения микротвёрдости, глубины упрочнённого слоя, величины остаточных напряжений первого рода.

Аппроксимация методом наименьших квадратов многочисленных зависимостей, полученных в результате экспериментальных исследований оценки влияния методов ППД свободнодвижущимися инденторами на качество упрочнённого поверхностного слоя и представленных в приложении 2, позволила установить величину коэффициентов корректировки  $K_{HV}$ ,  $K_h$ ,  $K_{\sigma_0}$  и показала, что они с достаточно высокой степенью корреляции – 0,85 находятся в пределах **0,15-0,18**.

С учётом (2.82, 2.85-2.89) получим формулы для аналитической оценки физико-механических параметров поверхностного слоя, упрочнённого в процессе магнитодинамической обработки [60]:

$$HV_k = \left[ \sqrt{\frac{32 E}{\pi d^3} \cdot HV} \right] \left( 1 + K_{HV} \frac{d_k}{d} \ln k \right), \quad (2.90)$$

$$h_{H_k} = \left[ 1.5 \cdot \sqrt[4]{\frac{32 Ed}{\pi HV} (1.54 - 10^{-3})} \right] \left( 1 + K_h \frac{d_k}{d} \ln k \right), \quad (2.91)$$

$$\sigma_{o_k} = \left[ 0.481 \left( \frac{E}{(r_{np})^3} \right)^{0.2} \right] k_{\mu}^{0.8} \left( 1 + K_{\sigma_0} \frac{d_k}{d} \ln k \right). \quad (2.92)$$

где  $HV$  – Па;  $E$  – Дж;  $d$  – м;  $d_k$  – м;  $h_H$  – м;  $\sigma_0$  – Па;  $r_{np}$  – м.

### 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ СВОБОДНОДВИЖУЩИМИСЯ ИНДЕНТОРАМИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

#### 3.1 Методика экспериментальных исследований

##### 3.1.1 Технологическое оборудование

###### *Опытно-экспериментальная установка для магнитодинамической обработки*

В качестве основного технологического оборудования для проведения экспериментальных исследований обработки деталей в условиях вращающегося электромагнитного поля использовалась специально разработанная для этой цели опытно-экспериментальная установка, представленная на рисунке 3.1.

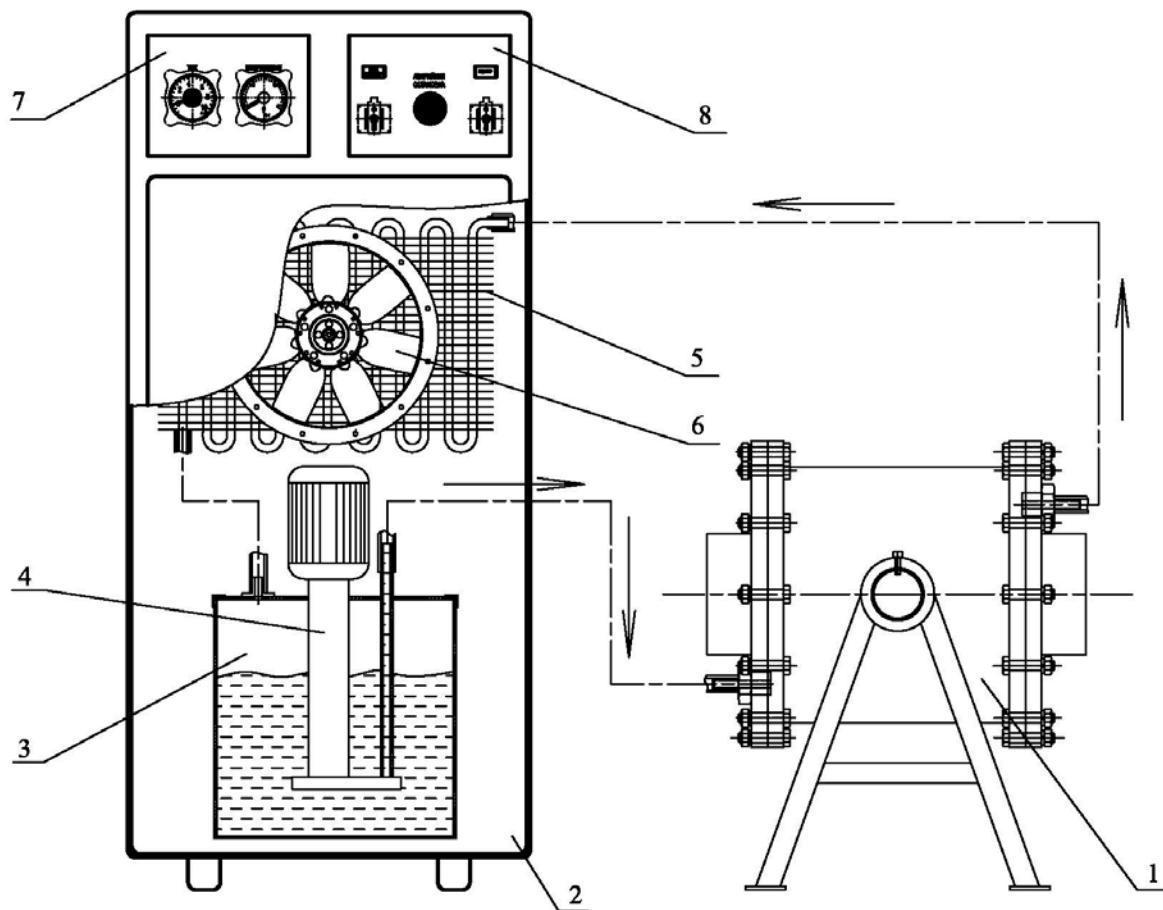


Рис. 3.1. Опытно-экспериментальная установка для магнитодинамической обработки.

Экспериментальная установка (рис. 3.1) состоит из рабочего блока 1 и шкафа управления 2, в котором размещены маслобак 3 с помпой 4 для перекачки охлаждающей жидкости,

теплообменника 5, охлаждаемого вентилятором 6, панели приборов-индикаторов рабочего тока и напряжения 7, и панели управления устройством 8. На панели управления установлены два тумблера для включения и отключения питания индуктора и помпы вместе с вентилятором.

Рабочий блок экспериментальной установки (рис. 3.2) имеет корпус 1, выполненный из стали, для экранирования излучения магнитного поля, представляющий из себя корпус, выполненный из трубы, скатанной из листа, к которой приварены два фланца 2. В каждом из фланцев имеются 12 аксиальных отверстий, выполненных на радиусе 89 мм от оси рабочей камеры с шагом  $30^0$ , предназначенных для крепления крышек к корпусу.

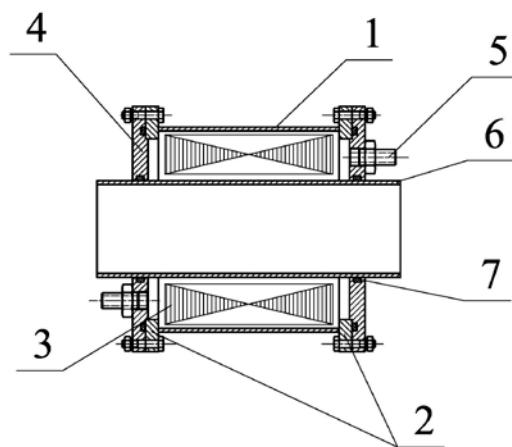


Рис. 3.2. Рабочий блок опытно-экспериментальной установки для магнитодинамической обработки.

Внутри корпуса расположен индуктор 3, который отцентрован по внутреннему диаметру корпуса 1 относительно наружного контура (диаметра) магнитопровода при помощи фторопластовых прокладок. Индуктор закрывается с двух сторон крышками 4 с выполненными канавками, в которые устанавливаются уплотнения для герметизации конструкции корпуса. Крышки корпуса крепятся к корпусу 12-ю болтами M5 каждая и затягиваются гайками. Крышки имеют резьбовые отверстия, в которые ввинчиваются штуцера 5 для соединения корпуса, посредством шлангов, с системой охлаждения. В расточке индуктора установлена труба 6, выполненная из немагнитного материала марки 12Х18Н10Т, которая наружным диаметром через уплотнения 7 соединена с крышками корпуса. Труба служит рабочей камерой. Рабочее пространство камеры ограничено краями обмоток индуктора и внутренним диаметром трубы.

Основным элементом рабочего блока, создающим вращающееся электромагнитное поле, является индуктор (рис. 3.3). В качестве индуктора был взят статор 1,5 кВт трехфазного асинхронного электродвигателя неевнополюсного исполнения, обеспечивающего 1600 об/мин,

представленного на рисунке 3. Индуктор состоит из 12 катушек 1, уложенных в пазах магнитопровода 2.



Рис. 3.3. Общий вид индуктора вращающегося электромагнитного поля.

Магнитопровод состоит из пластин выштампованного листового трансформаторного железа. Для обмоток катушек использовался провод марки ПЭЛ-0,7 с сечением  $0,4 \text{ мм}^2$ . В катушке было намотано 150 витков, с количеством пар полюсов – 2. Таким образом, общее число витков на фазу составляло 300. Катушки соединены по схеме «звезда». Питание катушек индуктора осуществлялось через трехфазный лабораторный автотрансформатор 9 марки TSGC2-15 мощностью 15 кВА, обеспечивающий регулировку напряжения 0-250 В на фазу.

Система охлаждения индуктора – жидкостная. Охлаждающей жидкостью служит сухое трансформаторное масло, непрерывно циркулирующее в системе индуктор-теплообменник-маслобак-индуктор. Охлаждающая жидкость перекачивается при помощи помпы марки ПА-22.

Маслобак изготовлен из листов алюминиевого сплава АМГ2, сваренных между собой аргонодуговой сваркой. Размеры емкости маслобака 300x300x300 мм. Сверху установлена крышка, в которой выполнено отверстие в виде седла для установки в нее помпы.

Теплообменник состоит из змеевика, выполненного из медной трубы, с припаянными алюминиевыми сотовыми пластинами. Диаметр внутреннего сечения змеевика составляет 7 мм. Теплообменник охлаждается потоком воздуха, возбуждаемым вентилятором.

Помпа посредством маслостойких шлангов соединяется с рабочим блоком, затем с теплообменником. Из теплообменника, посредством шлангов, охлаждающая жидкость выводится в маслобак.

Технические характеристики опытно-экспериментальной установки для магнитодинамической обработки указаны в таблице 3.1.

Таблица 3.1

## Технические характеристики устройства с ВЭМП

<b>Характеристика</b>	<b>Обозна- чение</b>	<b>Ед. изм.</b>	<b>Величина</b>
Магнитная индукция в рабочей зоне	B	Тл	0,1
Число индукторов	-	шт.	1
Объем рабочей камеры	V	дм <sup>3</sup>	
Внутренний диаметр рабочей зоны	D	мм	
Количество пар полюсов	P	шт.	2
Скорость вращения электромагнитного поля		об/мин	1600
Потребляемая мощность		кВт	2
Коэффициент мощности	cosφ	-	0,2
Напряжение на фазу	U	В	70
Ток	I	А	7
Частота питающей сети	f	Гц	50
Количество фаз	L	шт.	3
Габариты:		м	
– рабочий блок			0,25x0,25x0,4
– блок управления			1,5x0,6x0,4
Масса		кг	55
Тип охлаждения			Масляный
Насос (тип):			ПА-22
– мощность насоса		кВт	0,125
– производительность насоса		л/мин	22
– номинальное давление на выходе		МПа	0,04
– вес		кг	5,9
– габариты		мм	400x180

Контроль параметров потребляемого тока осуществлялся при помощи амперметра с диапазоном измерения 0-25 А, ГОСТ 8711-93. Подающееся напряжение регулировалось при

помощи трехфазного лабораторного автотрансформатора (рис. 3.4) модели ТSGC2-15, мощностью 15 кВА, обеспечивающего регулировку напряжения 0-250 В на фазу.



Рис. 3.4. ЛАТР.

Индукция, создаваемая ВЭМП, в рабочей зоне контролировалась при помощи миллитесламетра портативного универсального ТПУ-02 (рис. 3.5), диапазон измерений 0.01-1999 мТл.



Рис 3.5. Миллитесламетр ТПУ-02.

Основная допускаемая относительная погрешность  $\delta_0$  в процентах при измерении средневыпрямленных значений магнитной индукции переменного магнитного поля не превышает значений, рассчитанных по формуле:

$$\delta_0 = \pm[2,5 + 0,2 \cdot (B_n/B_u - 1)]$$

Дополнительная допускаемая относительная погрешность  $\delta_{don}$  в процентах при измерении магнитной индукции переменного магнитного поля в рабочей области частот не превышает значений, рассчитанных по формуле:

$$\delta_{don} = \pm[5,0 \cdot (f - 1)],$$

где  $f$  – частота измеряемой магнитной индукции, кГц.

### ***Оборудование для подготовки образцов к исследованиям параметров качества поверхности***

Разрезку образцов, с целью замеров остаточных напряжений и микротвердости в поверхностном слое материала, производили на пятикоординатном вырезном электроэрэозионном станке модели DIPOL 600Ф03 с компьютеризированной системой числового программного управления (КЧПУ) и формирования импульсов технологического тока модели DIPOL211H-5, а также диэлектрическим агрегатом модели DA25M.

Обработка на станке выполняется электродом-проводкой. В качестве рабочей жидкости используется дистиллированная вода, подаваемая под давлением в зону обработки, что обеспечивает высокую эффективность обработки.

Конструкция станка включает главный рабочий стол (называемый X-Y столом), на котором закрепляется обрабатываемая деталь-заготовка, и вспомогательный стол, называемый суппортом U-V, а также механизм транспортировки проволоки.

#### **3.1.2 Контрольно-измерительные приборы и приспособления**

Для измерения шероховатости поверхности образцов использовался портативный профилометр Surftest SJ-201P, разработанный компанией Mitutoyo (рис. 3.6).

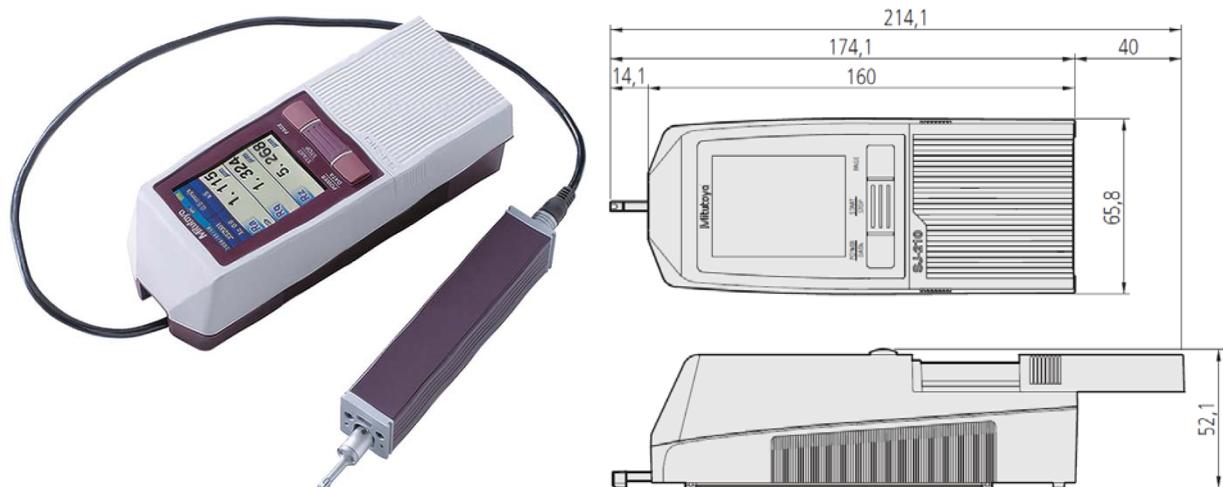


Рис. 3.6. Портативный профилометр Surftest SJ-201P.

Визуальные наблюдения качества обрабатываемой поверхности образцов и обрабатывающих сред, а также оценки размеров формируемых на поверхности пластически деформируемых зон осуществлялись на микроскопе металлографическом, оснащенном тринокулярной визуальной насадкой с видимым увеличением от 40 до 400 раз (рис. 3.7).



Рис. 3.7. Инвертируемый металлографический микроскоп.

Исследования физико-механических свойств, морфологии поверхности образцов проводились на оборудовании Межкафедрального ресурсного центра коллективного пользования (МРЦКП) ДГТУ.

На установке Nanotest 600 (рис. 3.8), которая позволяет проводить исследования по физике твердого тела, трибологии, материаловедению и другим прикладным наукам,

определяли твердость структурных единиц материала на наноуровне, используя индентирование по "маятниковому" методу.

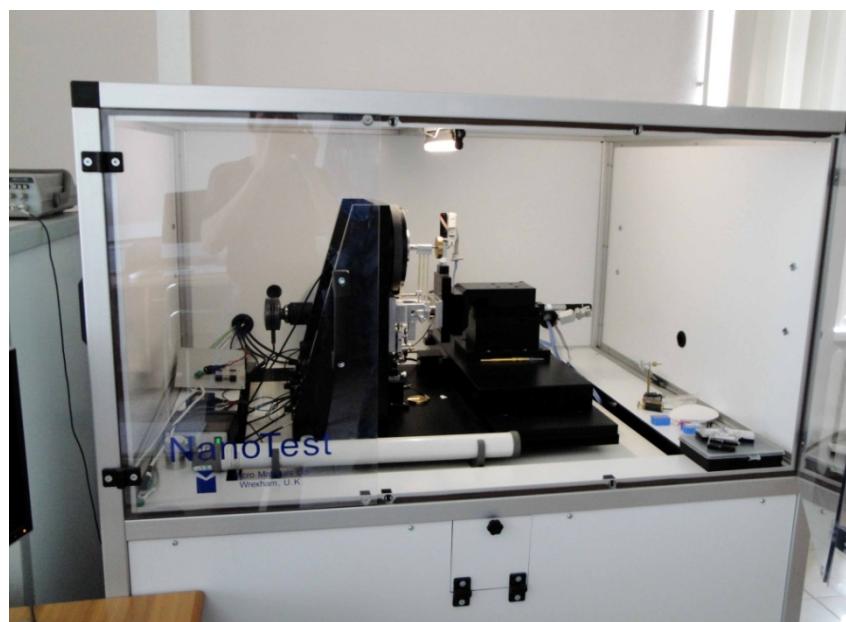


Рис. 3.8. Nanotest 600.

Для индентирования использовался индентор Виккерса (Vickers) – индентор в виде конуса с радиусом вершины 10 и 25 nm. Анализ индентирования производился по методу Oliver and Pharr. Максимальная и минимальная нагрузка для "наномаятника" составляет 0,1 и 500 mN соответственно, для "микромаятника" – 0,1 mN и 20 N.

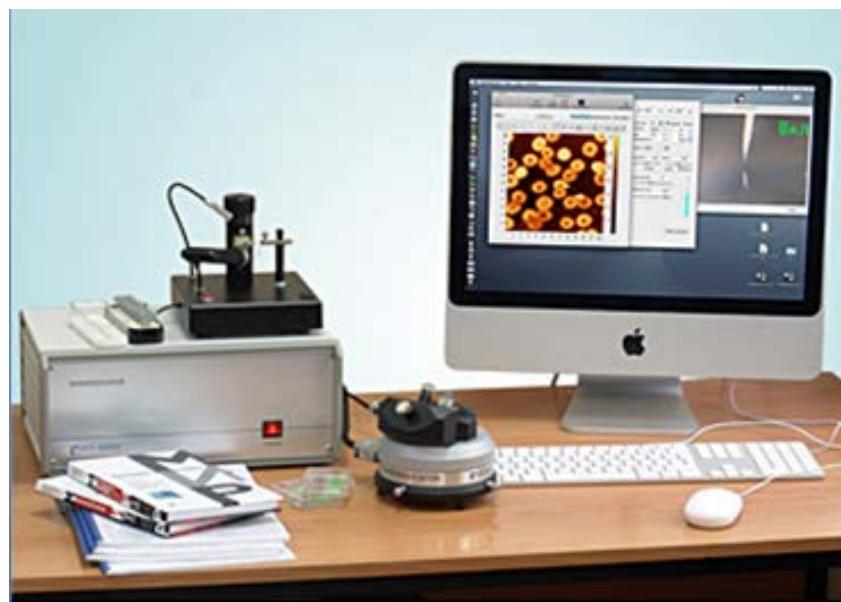


Рис.3.9. Сканирующий зондовый микроскоп «Nanoeducator»

Морфологические особенности формируемой в процессе обработки поверхности исследовались в лаборатории «Сканирующий зондовый микроскоп Nanoeducator (NT-MDT)», возможности которой позволяют реализовать различные методы измерений туннельной и «полуконтактной» атомно-силовой микроскопии и которая может использоваться не только в учебных, но и в научных целях при исследованиях в области физики и технологии микро- и наноструктур, материаловедения, катализа, физики и химии полимеров, трибологии, цитологии и т.п. (рис. 3.9).

Условия исследований предусматривали: съемку на воздухе; температуру съемки –  $20 \pm 5$  °C; максимальное поле сканирования: 100 x 100 мкм.

### 3.1.3 Экспериментальные образцы

Предпочтительная область магнитодинамической обработки охватывает обработку деталей из немагнитных материалов. Наиболее широкое применение эти материалы находят в авиации для изготовления деталей летательных аппаратов типа стрингеров, лонжеронов, труб, колец, втулок, цилиндров гидроагрегатов, которые по условиям эксплуатации требуют упрочнения с целью повышения их циклической прочности. В этой связи применение этого метода для упрочнения таких деталей, обладающих выраженным парамагнитными свойствами, характеризующихся сложной конструктивной формой с труднодоступными для обработки поверхностями и имеющих большую длину при малом сечении, позволяет расширить технологические возможности динамических методов ППД.

Исходя из вышеизложенных предпосылок, для проведения экспериментальных исследований по установлению технологических возможностей магнитодинамической обработки в качестве материала образцов были приняты алюминиевые сплавы, характеристика которых представлена в табл. 3.2-3.4.

Таблица 3.2

Химический состав материалов в %

	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Примесей	-
<b>Д16Т</b>	До 0,5	До 0,5	0,3 – 0,9	До 0,1	До 0,15	90,9 – 94,7	3,8 – 4,9	1,2 – 1,8	До 0,25	Прочие, каждая 0,05, всего 0,15	Ti + Zr < 0,2
<b>В95пчТ2</b>	До 0,5	До 0,5	0,2 – 0,6	0,1 – 0,25	До 0,05	86,2 – 91,5	1,4 – 2	1,8 – 2,8	5 – 7	прочие, каждая 0.05; всего 0.1	

Таблица 3.3

Механические свойства материалов при Т=20 °С

Материал	Сортамент	Размер, мм	Напр.	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_m$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	KСU, кДж/м <sup>2</sup>	Термообр.
Д16Т	Трубы, ГОСТ 18482-79			390 - 420	255 - 275	10 - 20		250	
B95пчT2				500- 520	380- 410	5-7			

Таблица 3.4

Физические свойства материалов

Материал	T, град	E 10 <sup>-5</sup> , МПа	$\alpha 10^6$ , 1/град	$\lambda$ , Вт/(м*град)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	C, Дж/(кг*град)	R 10 <sup>3</sup> , Ом*м
Д16Т	20	0,72			2770		
	100		22,9	130		0,922	
B95пчT2	20	0,74			2850		
	100		23,2				
Марка		Твердость НВ		Электропроводность в % по отношению к меди		Теплопроводность в кал/°C	
Д16Т		105		30		0,28	
B95ПчT2		150		30		0,28	

По форме образцы (рис. 3.10, 3.11) изготавливались в виде колец размером 65x2 h=10 мм с разной исходной шероховатостью внутренней поверхности, что позволяло имитировать обработку внутренних цилиндрических поверхностей деталей, упрочнение которых существующими методами на сегодняшний день эффективно не решено.

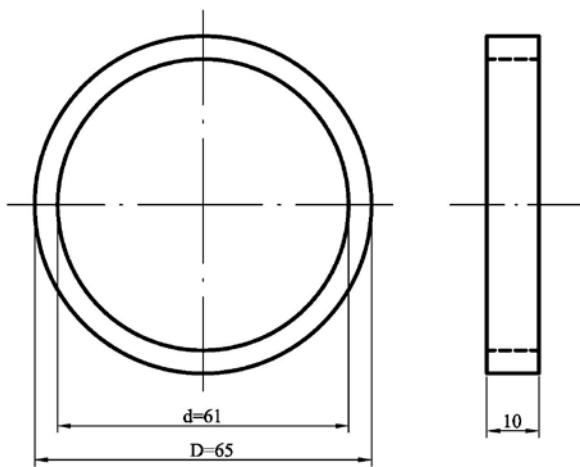


Рис. 3.10. Эскиз образцов, применяемых для исследований.



Рис. 3.11. Общий вид образцов, принятых для исследований.

Образцы растачивались на токарном программном обрабатывающем центре СТХ-500 alpha на режимах, указанных в таблице 3.5.

Таблица 3.5

#### Режимы обработки образцов

Режимы обработки	Д16Т	Д16Т	Д16Т	B95пчT2	B95пчT2	B95пчT2
Подача, мм/об	0,02	0,08	0,16	0,02	0,08	0,16
Обороты, об/мин	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Скорость резания, м/мин	225	225	225	225	225	225
Шероховатость поверхности, мкм	0,214	0,45	1,6	0,177	0,399	1,66

#### 3.1.4 Обрабатывающие среды

Для исследования процесса обработки в условиях ВЭМП использовалась обрабатывающая среда, состоящая из стальных цилиндрических инденторов, изготовленных из стали ШХ15 (рис. 3.12а) и 50ХФА (рис. 3.12б), характеристика которых представлена в табл. 3.6. Торцы инденторов имели сферическую форму с радиусом, равным половине диаметра цилиндрической поверхности.

Перед проведением экспериментальных исследований ферромагнитные инденторы предварительно обглотовывались в течение 4 часов в устройстве с ВЭМП, а затем тщательно промывались для удаления продуктов износа и загрязнений.

Таблица 3.6

## Характеристики обрабатывающих сред

Материал	Диаметр, мм	Длина, мм	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Термообработка	Твердость, HRC
ШХ15	3	20	7812	Закалка 830 °C, масло. Отпуск 160 °C.	62
50ХФА	1	10	7800	Закалка 850 °C, масло. Отпуск 640 °C.	58



а

б

Рис. 3.12. Обрабатывающая среда – стальные цилиндры: материал а – ШХ15 ГОСТ 801-78, б – 50ХФА ГОСТ 14959-79.

### 3.2 Методика проведения экспериментальных исследований

В связи с тем, что работа ориентирована на раскрытие физической сущности и технологических возможностей упрочняющей обработки деталей в условиях вращающегося электромагнитного поля, методическое обеспечение экспериментальных исследований включало в себя обоснование основных закономерностей процесса и их влияния на качество поверхности и производительность обработки, которые теоретически были рассмотрены в 2 главе.

В качестве основных задач, требующих своего экспериментального подтверждения, были выдвинуты следующие:

1. Научно обосновать эффективные условия процесса обработки деталей свободнодвижущимися во вращающемся электромагнитном поле ферромагнитными инденторами.
2. Установить влияние технологических условий обработки на параметры качества поверхностного слоя, формируемого в процессе магнитодинамической обработки, а также приемлемость для их определения предложенных уточнённых расчетных моделей.

### **3.2.1 Методика обоснования эффективных условий магнитодинамической обработки**

При проведении этих исследований решался следующий комплекс вопросов, связанный с установлением закономерностей влияния на процесс магнитодинамической обработки:

- массы загрузки, обусловленной количеством слоёв ферромагнитных инденторов, в рабочую зону устройства, обеспечивающего их вращательное магнитоожиженное движение под воздействием электромагнитного поля;
- параметров вращающегося электромагнитного поля, т.к. индукция, напряжённость и угловая скорость вращения магнитоожиженного слоя инденторов, определяющих энергетическое состояние ферромагнитных инденторов;
- геометрических размеров (соотношения длины и диаметра) ферромагнитных инденторов,

А также с обоснованием приемлемости аналитических зависимостей для оценки энергетического состояния инденторов и выбора условий магнитодинамической обработки.

Исследования энергосиловых возможностей магнитодинамической обработки проводились на опытно-экспериментальной установке, представленной на рис. 3.1.

В качестве критерия для установления закономерностей влияния вышеуказанных факторов на процесс магнитодинамической обработки была принята степень покрытия поверхности следами пластических отпечатков в установленный промежуток времени. За параметр степени покрытия поверхности следами пластических отпечатков принималось отношение площади пятен контакта  $S_{к.э.}$  сформированных за установленный промежуток времени внутри локально выделенного участка обрабатываемой поверхности площадью  $S_{э.э.}$ :

$$P_{эксп} = S_{к.э.} / S_{э.э.}$$

Для проведения исследований было подготовлено 10 образцов (рис. 3.10, 3.11) из алюминиевого сплава В95пчТ2 с исходной шероховатостью  $Ra=0,18$  мкм, которые обрабатывались по плану эксперимента, представленному в табл. 3.7.

## План проведения экспериментальных исследований

№ образца	Условия обработки образцов						Цель исследований
	Материал ферромагнитных инденторов	Диаметр инденторов, мм	Длина инденторов, мм	Время обработки, сек	Кол-во концентрических слоев	Индукция, Тл	
1	50ХФА	1	8	10	4	≈0,1	Оценка эффективной загрузки
2	50ХФА	1	8	10	3	≈0,1	
3	50ХФА	1	8	10	2	≈0,1	
4	50ХФА	1	8	10	1	≈0,1	
5	50ХФА	1	10	10	3	≈0,08	Оценка влияния индукции
6	50ХФА	1	10	10	3	≈0,1	
7	50ХФА	1	10	10	3	≈0,12	
8	50ХФА	0,8	10	10	3	≈0,1	Оценка влияния $l/d$
9	50ХФА	1	10	10	3	≈0,1	
10	50ХФА	1,2	10	10	3	≈0,1	

Выбор условий обработки проводился на основании модельных представлений процесса и энергетических возможностей опытно-экспериментальной установки. Так, в разделе 2.3 сделано предположение, что эффективная масса загрузки ферромагнитных инденторов находится в пределах 2-4 слоёв. Поэтому для его подтверждения при проведении исследований число слоёв изменялось от 1 до 5, а количество ферромагнитных инденторов при этом рассчитывалось по формуле (2.51), представленной в разделе 2.3.

Время обработки образцов при проведении исследований принималось постоянным для всех вариантов обработки и устанавливалось исходя из соображений, что продолжительность обработки должна быть такова, чтобы после обработки суммарная площадь пластических отпечатков, в пределах площади локально выделенного на поверхности участка, не превышала 50-60 %. Таким образом, было сделано предположение, что экспериментальное время обработки должно быть равно  $t_3 \approx 0,5 \div 0,6 t_1$ , где  $t_1$  – продолжительность обработки, при которой обеспечивается однократное сплошное покрытие локального элемента пластическими отпечатками. Методика расчёта  $t_1$  представлена в табл. 3.8.

Методика расчета времени однократного сплошного покрытия локального элемента  
пластическими отпечатками

№ п/п	Порядок расчёта	Расчётная зависимость	Формулы
1	Определение площади локального геометрического элемента поверхности, м <sup>2</sup>	$S_{\text{э.п.}} = \frac{2Rdl}{3R - l}$	
2	Определение энергетического состояния ферромагнитного индентора, Дж	$E = \frac{p_m}{2\pi\omega^2} \left[ \frac{p_m}{I} B_v^2 + \frac{p_m}{m} \left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 \right]$	2.32
3	Определение диаметра пластического отпечатка $d_k$ , формируемого на поверхности, м	$d_k = \sqrt[4]{\frac{6 \cdot E \cdot D}{HV}}$	2.60
4	Определение площади пятна контакта пластического отпечатка, м <sup>2</sup>	$S_{\text{к.п.}} = \pi d_k^2 / 4$	
5	Определение расчетной степени покрытия поверхности следами пластических отпечатков за один цикл вращения МОВ слоя	$P_{\text{расч}} = 0,8 \cdot S_{\text{к.п.}} / S_{\text{э.п.}}$	
6	Расчёт времени, в течение которого локально выделенный участок поверхности однократно покроется сплошными пластическими отпечатками, с	$t_1 = \frac{2\pi}{P_{\text{расч}} \cdot \omega}$	

Проведенные по вышеизложенной методике расчёты и предварительные эксперименты позволили установить время обработки для проведения исследований в пределах 10-12 с.

В качестве обрабатывающей среды были выбраны цилиндрические ферромагнитные инденторы из стали 50ХФА с соотношением  $l/d=8 \div 12,5$ . Индукция вращающегося электромагнитного поля  $B$  варьировалась в пределах 0,08÷0,12 Тл.

Для определения суммарной площади отпечатков  $S_{\text{к.з}}$  перед обработкой образец с внутренней стороны покрывался спиртовым разметочным лаком, приготовленным по следующей рецептуре:

- шеллак – 50 масс. ч.;
- нигрозин спирторастворимый – 8 масс. ч.

- спирт этиловый – 800 масс. ч.
- диотилфталат – 15,7 масс. ч.
- бутилацетат – 66 масс. ч.

Перед обработкой образец помещался в рабочую камеру устройства и внутрь него загружалась обрабатывающая среда, в соответствии с условиями эксперимента. Для предотвращения выскакивания обрабатывающей среды из зоны обработки образец с двух сторон закрывался заглушками.

Обработку образцов проводили в условиях в соответствии с планом (табл. 3.7). По окончании обработки снимались заглушки, вынимался обработанный образец и устанавливался следующий образец для проведения дальнейших экспериментальных исследований.

После обработки из кольца на электроэррозионном станке модели DIPOL 600Ф03 вырезались 3-5 секторов размером 10x10 мм (угол 20°) (рис. 3.14), которые представляли собой локально выделенные участки обрабатываемой поверхности и являлись объектом исследований степени покрытия поверхности пластическими отпечатками.

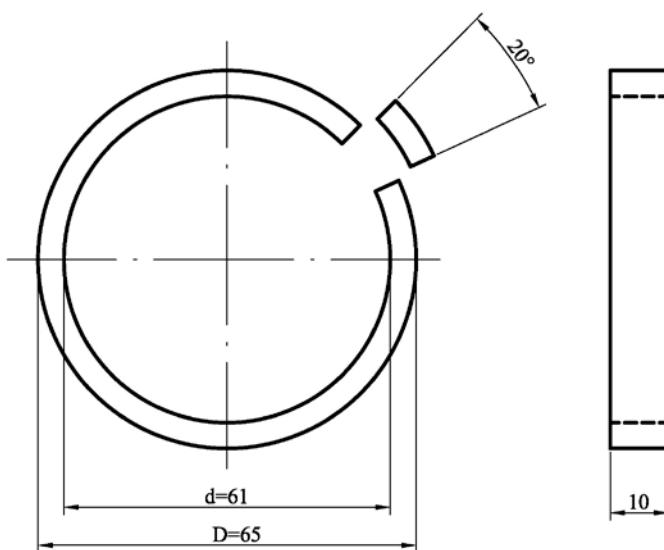


Рис. 3.13 Образец с вырезанным сектором.

Процесс электроэррозионного вырезания электродом-проводокой производился при относительном перемещении постоянно перематывающейся электрода-проводоки и обрабатываемой заготовки по заданной траектории. Процесс осуществляется в рабочей технологической жидкости, в качестве которой используется дистиллированная вода. Режимы вырезки указаны в табл. 3.9.

## Режимы вырезки образцов на электроэрозионном станке DIPOL 600Ф03

Параметр	Частота модуляции	Напряжение импульса	Ток импульса	Скорость подачи	Скорость перемотки проволоки
Обозначение	$F_p$ , кГц	$U_i$ , В	$I_i$ , А	$F$ , мм/мин	$V$ , м/мин
Величина	40	50	180	4	4

Вырезанные из кольца секторы изучались на микроскопе металлографическом (рис. 3.7), при этом устанавливалось количество сформированных на поверхности данного участка образца пластических отпечатков  $m_o$ , определялся их средний диаметр  $d_{cp}$  и рассчитывалась фактическая площадь пластиически деформированной зоны по формуле  $S_{к.э.} = d_{cp} \cdot m_o$ . Полученные по 3-5 секторам результаты заносились в таблицу. Принимая  $S_{з.з.}=100$  мм<sup>2</sup>, по соотношению  $S_{к.э.}/S_{з.з.}$  устанавливалась степень покрытия поверхности следами пластических отпечатков  $P_{эксп}$  для конкретных условий обработки согласно табл. 3.7.

Используя полученные экспериментальные данные, строились зависимости степени покрытия поверхности следами пластических отпечатков  $P_{эксп}$  от технологических факторов процесса, характеризующих условия магнитодинамической обработки таких, как: массо-размерные соотношения обрабатывающей среды и рабочей зоны устройства, электромагнитные характеристики вращающегося магнитного поля. На основании построенных зависимостей обосновывалась приемлемость применения аналитических моделей для выбора технологических условий обработки поверхностей магнитодинамическим методом.

### 3.2.2 Методика исследований влияния магнитодинамической обработки на качество поверхностного слоя

Методически эти исследования проводились в следующей последовательности.

**1 этап – подготовка образцов и выбор условий обработки.** Изготовленные для обработки образцы были разделены на группы в зависимости от материала и исходной шероховатости (табл. 3.10)

На основании теоретических исследований и энергетических возможностей опытно-экспериментальной установки было выбрано 8 вариантов условий обработки, представленных в табл. 3.11.

## Группы образцов

№ группы	Материал образцов	Исходная шероховатость поверхности, мкм	Кол-во подгрупп	Кол-во образцов в подгруппе	Общее кол-во исследуемых образцов
1	Д16Т	0,214	4	7	28
2	Д16Т	0,45	4	7	28
3	Д16Т	1,6	4	7	28
4	В95пчТ2	0,177	4	7	28
5	В95пчТ2	0,399	4	7	28
6	В95пчТ2	1,66	4	7	28

Таблица 3.11

## Условия обработки образцов

№ варианта обработки	Материал ферромагнитных инденторов	Диаметр инденторов, мм	Длина индентаторов, мм	Время обработки, мин	Σ масса загрузки обр. средой, гр	Индукция, Тл
1	Исходные образцы обработке не подвергаются					
2	50ХФА	1	10	1	22,391	≈0,1
3	50ХФА	1	10	3	22,391	≈0,1
4	50ХФА	1	10	5	22,391	≈0,1
5	50ХФА	1	10	8	22,391	≈0,1
6	ШХ15	3	20	1	25,135	≈0,1
7	ШХ15	3	20	2	25,135	≈0,1
8	ШХ15	3	20	3	25,135	≈0,1

**2 этап – обработка образцов.** Перед обработкой образцы комплектовались в пакеты. В состав одного пакета включалось по одному представителю каждой группы (табл. 3.10). Таким образом, для проведения исследований было скомплектовано 8 основных пакетов. Для получения достоверных результатов их количество было доведено до 24, чтобы обеспечить повторяемость каждого эксперимента не менее 3 раз.

Пакет образцов устанавливался во фторопластовую обечайку и вместе с ней помещался в рабочий блок установки (рис. 3.13). Посредством обечайки ось пакета образцов центрировалась с осью рабочей камеры. Внутрь пакета образцов загружалась обрабатывающая среда в соответствии с условиями обработки. Для предотвращения выскакивания обрабатывающей среды из зоны обработки пакет с двух сторон закрывался заглушками.

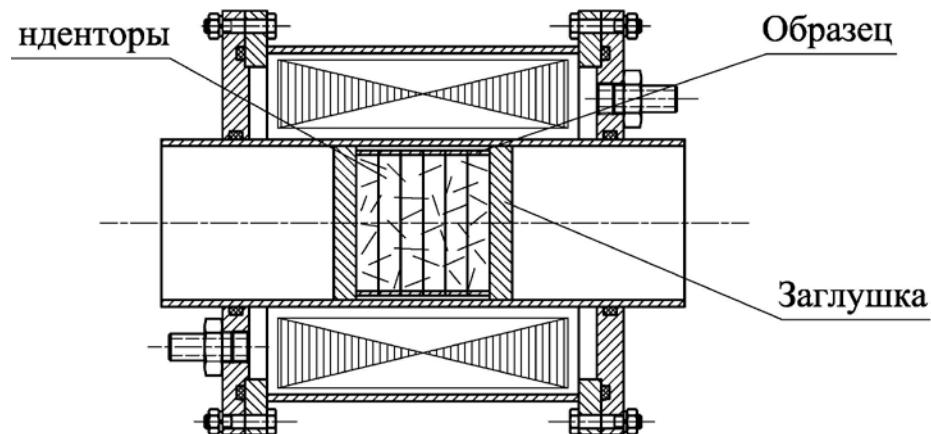


Рис. 3.13. Схема установки образцов в рабочий блок.

Обработку скомплектованных пакетов образцов проводили по вариантам условий обработки, установленных в табл. 3.11, с 3-х кратным их повторением. После обработки каждого пакета снимались заглушки, вынимались обработанные образцы и устанавливался следующий пакет образцов для обработки.

**3 этап – определение параметров качества поверхности.** После обработки проводился контроль параметров качества упрочнённой поверхности по методикам, представленным в табл. 3.12.

Таблица 3.12

Методика определение параметров качества поверхности

№	Контролируемый параметр	Методика контроля
1	<b>Шероховатость поверхности</b>	Шероховатость поверхности определялась с помощью профилометра SJ-210 (рис. 3.6). Образец устанавливали таким образом, чтобы щуп детектора касался внутренней поверхности образца. Датчик (щуп), прикрепленный к блоку детектора прибора SJ-210 отслеживает мельчайшие неровности поверхности изделия. Вертикальное смещение щупа во время отслеживания обрабатывается и отображается в цифровой форме на жидкокристаллическом дисплее прибора. Алмазная игла прижимается и перемещается параллельно исследуемой поверхности.

Продолжение таблицы 3.12

<b>№</b>	<b>Контролируемый параметр</b>	<b>Методика контроля</b>
		<p>В местах возникновения микронеровностей (выступов и впадин) возникают механические колебания измерительной головки иглы. Эти колебания передаются в датчик, преобразующий механическую энергию колебания в электрический сигнал, который усиливается преобразователем и измеряется. Записанные параметры этого сигнала в точности повторяют неровности на шероховатой поверхности детали. Анализ параметров шероховатости поверхности образцов проводился по следующим параметрам:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) среднеарифметическое отклонение профиля – <math>R_a</math></li> <li>2) опорная поверхность микропрофиля – <math>t_p</math></li> </ol> <p>По результатам измерений записывали 5 профилограмм длиной 2-3 мм по предварительно намеченным траекториям</p>
2	<b>Микротвёрдость поверхности</b>	<p>Для определения механических свойств в наномасштабах указанным в разд. 3.1 методом, применяется измерительное динамическое индентирование в основе которого лежит определение и анализ зависимостей прикладываемой нагрузки от глубины внедрения индентора.</p> <p>Твердость <math>HV</math> определялась как отношение максимальной приложенной нагрузки к площади проекции невосстановленного отпечатка (рис. 3.14):</p> <p>Рис. 3.14. Схема взаимодействия материала в процессе индентирования.</p>

Продолжение таблицы 3.12

№	Контролируемый параметр	Методика контроля
		$HV = \frac{P_{max}}{A},$ <p>где <math>P_{max}</math> – максимальная приложенная нагрузка; <math>A</math> – площадь проекции невосстановленного отпечатка.</p> <p>Площадь проекции отпечатка определялась по известной геометрии наконечника и контактной глубине индентирования, вычисленной по кривой нагружения-разгрузки (рис. 3.15).</p> <p>Твердость определялась в момент максимального внедрения наконечника, т.е. до начала упругого восстановления материала.</p> <p>Нагрузка, Р</p> <p>Глубина внедрения индентора, <math>h</math></p> <p>НАГРУЖЕНИЕ</p> <p>РАЗГРУЖЕНИЕ</p> <p><math>h_c</math> для <math>\varepsilon=1</math></p> <p><math>h_c</math> для <math>\varepsilon=0.72</math></p> <p><math>h_{max}</math></p> <p>вероятный диапазон значений параметра <math>h_c</math></p> <p>S</p>

Рис. 3.15. Схема диаграммы автоматического нагружения.

Глубина контакта находилась следующим образом:

При известной максимальной нагрузке площадь проекции отпечатка определялась по следующей формуле:

$$A = F(h_c),$$

где  $h_c$  – вертикальное расстояние, вдоль которого происходил контакт индентора с материалом образца (глубина контакта).

$$h_c = h_{max} - h_s,$$

где  $h_{max}$  – глубина внедрения индентора;  $h_s$  – смещение поверхности по периметру контакта.

Продолжение таблицы 3.12

<b>№</b>	<b>Контролируемый параметр</b>	<b>Методика контроля</b>
		<p>Величина <math>h_s</math> рассчитывалась по формуле:</p> $h_s = \varepsilon \frac{P_{max}}{S},$ <p>где <math>\varepsilon</math> – коэффициент, определяемый формой индентора; <math>S</math> – показатель, характеризующий упругое восстановление материала образца, определяющийся углом наклона касательной к кривой нагрузке в точке <math>P_{max}</math></p>
3	<p><b>Остаточные напряжения</b></p>	<p>Определение остаточных напряжений основано на методе разрезки колец предложенном Н.Н. Давиденковым [12, 32]. Он заключается в разрезке кольца вдоль образующей и замере изменения диаметра в результате вырезки. Исходя из того, что изменение диаметра соответствует изменению ширины паза после разрезки кольца, формула для определения остаточных напряжений имеет вид:</p> $ \sigma_0  = 2 \frac{E \cdot \delta_p}{(1 - \mu^2) \cdot D_{cp}^2} \left( \frac{h}{2} \right),$ <p>где <math>E</math> – модуль упругости;</p> <p><math>\delta_p</math> – изменение ширины паза после разрезки;</p> <p><math>\mu</math> – коэффициент динамической вязкости (коэффициент Пуассона);</p> <p><math>D_{cp}</math> – средний диаметр кольца;</p> <p><math>h</math> – толщина кольца.</p> <p>Ширина паза определялась с учетом ширины электрода и ширины формируемого при выгорании межэлектродного зазора, в результате электротехнической эрозии при разрезке образца, из выражения:</p> <p><math>\delta_p = \delta_2 - \delta_1 - 2 * \delta_0</math>, где:</p> <p><math>\delta_0</math> – ширина межэлектродного зазора, формируемого электрической эрозией в зоне обработки в процессе разрезки образца;</p> <p><math>\delta_1</math> – ширина (диаметр) отрезного электрода при разрезке;</p> <p><math>\delta_2</math> – ширина паза после разрезки через сутки</p>

**4 этап – обработка экспериментальных данных.** Для анализа экспериментальных данных использовались статистические методы обработки результатов наблюдений [19, 30], так как любое значение исследуемого параметра, вычисленное на основании ограниченного числа опытов, всегда содержит элемент случайности. В качестве оценки математического ожидания случайной величины (исследуемого параметра) использовалось среднее арифметическое наблюдаемых значений. Затем оценивалась статистическая дисперсия случайной величины, на основании которой в предположении нормальности распределения результатов наблюдений строился доверительный интервал [30], по каждому исследуемому в работе параметру качества поверхности.

На основании полученных результатов контроля строились экспериментальные зависимости параметров качества поверхности от продолжительности и условий магнитодинамической обработки исследуемых материалов.

**5 этап – сравнительный анализ расчётных и экспериментальных значений параметров качества упрочнённой поверхности.** Для установленных условий обработки (табл. 3.11), используя формулы, предложенные в разделе 2.5 и представленные в табл. 3.13, определялись расчётные значения параметров качества упрочнённой поверхности.

Таблица 3.13

## Аналитические модели оценки параметров качества поверхности

№	Параметр качества поверхности	Расчётные зависимости	Формула
1	<i>Среднеарифметическая высота профиля микронеровностей</i>	$R_{a_k} = \left[ R_a \text{ исх} - \sqrt{\frac{2E}{\pi d H V}} \right] \left( 1 - K_{R_a} \frac{d_k}{d} \ln k \right)$	2.80
2	<i>Микротвёрдость</i>	$HV_k = \left[ \sqrt{\frac{32 E}{\pi d^3}} \cdot HV \right] \left( 1 + K_{HV} \frac{d_k}{d} \ln k \right)$	2.90
3	<i>Остаточные напряжения</i>	$\sigma_{o_k} = \left[ 0.481 \left( \frac{E}{(r_{np})^3} \right)^{0.2} \right] k_\mu^{0.8} \left( 1 + K_{\sigma_o} \frac{d_k}{d} \ln k \right)$	2.92

Расчётные значения параметров качества упрочнённой поверхности сравнивались с экспериментальными значениями. При этом определялась погрешность их расхождения  $\delta$  из соотношения

$$\delta = \frac{\Pi_p - \Pi_e}{\Pi_p} \cdot 100\%,$$

где  $\Pi_p$  и  $\Pi_e$ - расчётное и экспериментальное значение исследуемого параметра, на основании которого устанавливалась приемлемость расчётно-аналитических зависимостей для определения параметров качества поверхности при упрочнении магнитодинамическим методом.

## **4. ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

### **4.1 Исследования производительности процесса обработки во вращающемся электромагнитном поле**

Целью настоящих исследований предусматривалось экспериментальное обоснование влияния основных технологических факторов процесса на производительность обработки деталей свободнодвижущимися ферромагнитными инденторами во вращающемся электромагнитном поле. Ранее в разделе 2.3 было установлено, что технологическое время ударно-импульсного воздействия инденторов на обрабатываемую поверхность, определяющее производительность процесса магнитодинамической обработки, а также эффект упрочнения поверхностного слоя зависит от интенсивности и кратности покрытия обрабатываемой поверхности пластическими отпечатками. Основными технологическими факторами, определяющими интенсивность покрытия обрабатываемой поверхности пластическими отпечатками и, как следствие, производительность процесса, как показали теоретические исследования, являются массо-размерные соотношения инденторов обрабатывающей среды, обрабатывающей среды и рабочей зоны устройства, характеристики вращательного электромагнитного поля, от которых зависят энергосиловые возможности ферромагнитных инденторов.

#### **4.1.1 Обоснование эффективной массы загрузки ферромагнитных инденторов, в рабочую зону устройства**

В соответствии с модельными представлениями масса загрузки ферромагнитных инденторов в рабочую зону устройства определяется из условия, что каждый индентор под воздействием вращающегося электромагнитного поля имеет возможность совершать круговое движение в плоскости сечения рабочей зоны по окружности, расположенной на расстоянии, соответствующем расстоянию от центра рабочей зоны до центра массы индентора и одновременного вращения вокруг собственного центра масс. Расстояние между инденторами по длине рабочей зоны находится в пределах не более половины диаметра индентора. Кроме того, делалось предположение, что сформированные таким образом из ферромагнитных инденторов «слои» не перекрываются. То есть масса инденторов, загружаемых в рабочую зону, представляет собой совокупность условно выделенных по сечению слоёв. В процессе

воздействия электромагнитного поля происходят хаотичные контактные взаимодействия между инденторами соприкасающихся слоёв, а также их перемещение из одного слоя в другой. С обрабатываемой поверхностью взаимодействуют в основном инденторы прилегающего к ней слоя. Учитывая стохастический характер поведения инденторов в рабочей зоне, очень важно было экспериментально обосновать адекватность модельных расчётов эффективной массы загрузки ферромагнитных инденторов в рабочую зону устройства по формуле (2.51) и её связь с условно выделенными по сечению рабочей зоны «слоями».

Суммарная площадь пластических отпечатков, сформированных в пределах локально выделенного участка поверхности через установленный, в соответствии с планом эксперимента, промежуток времени обработки, оценивалась путем наблюдения его под микроскопом (рис.4.1).

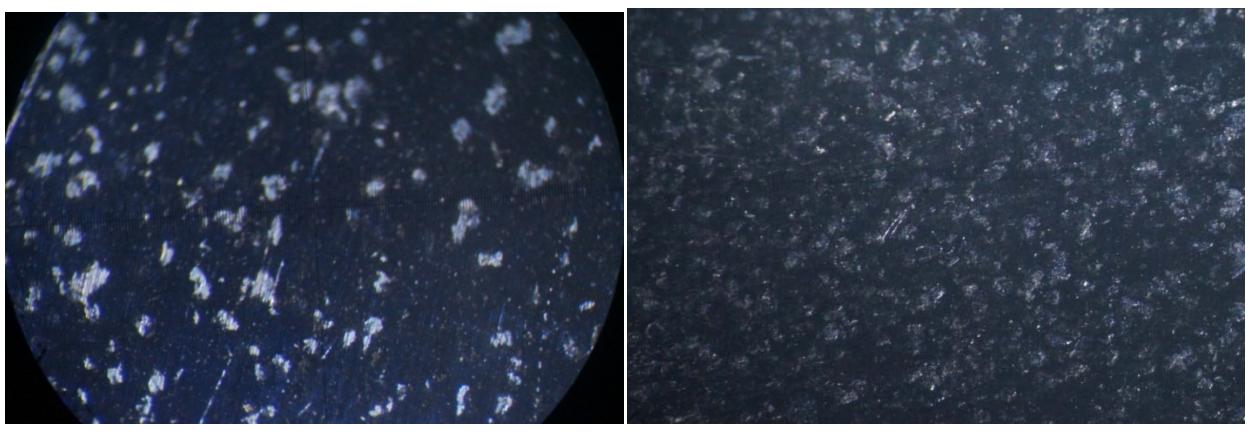


Рис. 4.1. Локально выделенный участок обрабатываемой поверхности, покрытый следами пластических отпечатков с увеличением:  
а – 487 крат, б – 250 крат.

Результаты исследований изменения степени покрытия пластическими отпечатками локального участка обрабатываемой поверхности за одинаковый промежуток времени в зависимости от массы загрузки ферромагнитных инденторов, обусловленной количеством концентрических слоев ферромагнитных инденторов с различными геометрическими соотношениями ( $l/d$ ) и различными значениями индукции магнитного поля  $B$ , представлены в табл. 4.1, 4.2 и проиллюстрированы на рис.4.2, 4.3.

Таблица 4.1

Экспериментальные данные влияния количества слоёв загрузки инденторов в рабочую зону устройства с ВЭМП на степень покрытия поверхности пластическими отпечатками

$l/d$	8					10					12,5				
№ образца	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
Количество слоев $i$	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
$P_{\text{эксп}}$	0,15	0,4	0,45	0,45	0,4	<b>0,3</b>	<b>0,55</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,55</b>	0,25	0,5	0,55	0,55	0,5

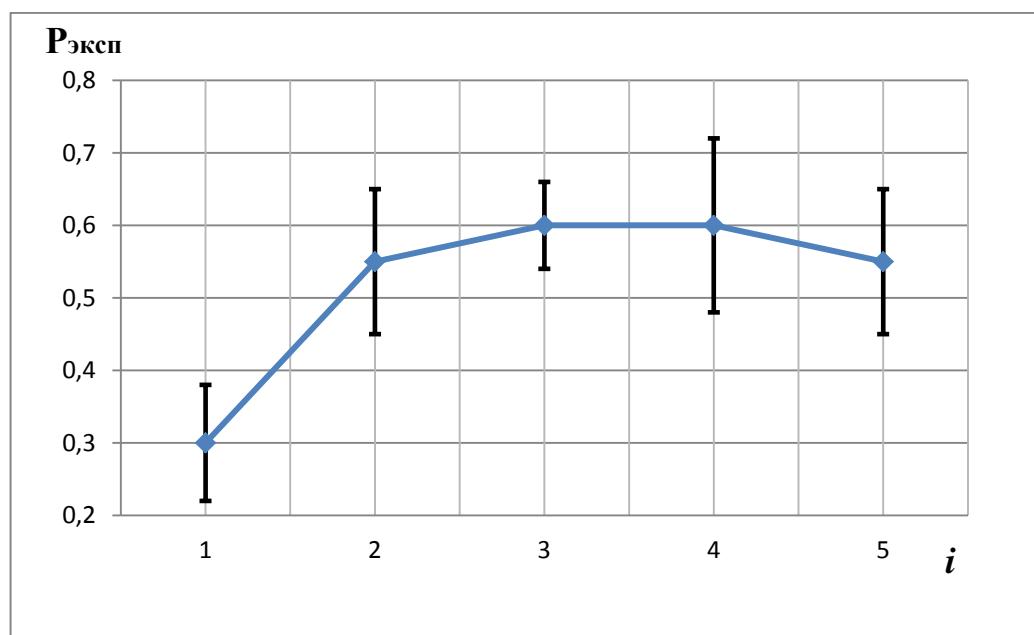


Рис. 4.2. Зависимость изменения степени покрытия поверхности пластическими отпечатками от количества слоёв загрузки инденторов с разной величиной соотношения  $l/d$ , при  $B=0,1$  Тл,  $t=10$  с.

Таблица 4.2

Экспериментальные данные влияния количества слоёв загрузки инденторов в рабочую зону устройства с ВЭМП на степень покрытия поверхности пластическими отпечатками

$B, \text{Тл}$	0,08					0,1					0,12				
№ образца	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
Количество слоев $i$	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
$P_{\text{эксп}}$	0,15	0,4	0,45	0,45	0,4	0,3	0,55	0,6	0,6	0,55	<b>0,35</b>	<b>0,6</b>	<b>0,65</b>	<b>0,65</b>	<b>0,6</b>

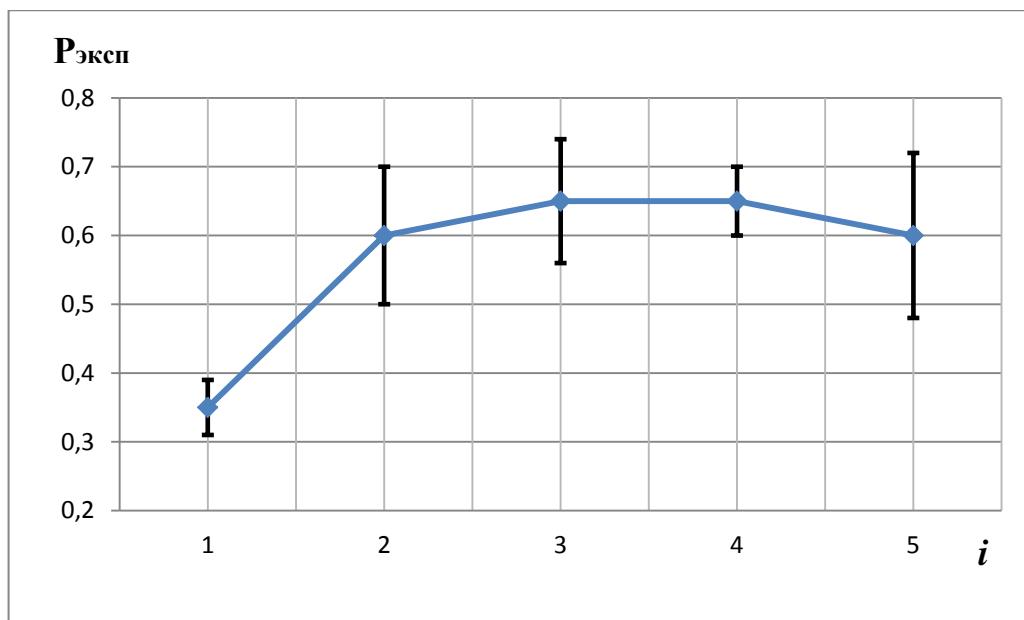


Рис. 4.3. Зависимость изменения степени покрытия поверхности пластическими отпечатками от количества слоёв загрузки инденторов с разной величиной соотношения  $B$ , при  $l/d=10$  Тл,  $t=10$  с.

#### 4.1.2 Влияние индукции вращающегося электромагнитного поля на интенсивность обработки

Результаты оценки влияния индукции магнитного поля в рабочем пространстве устройства ВЭМП на степень покрытия поверхности пластическими отпечатками приведены в табл. 4.3, а характерная для них закономерность показана на рис. 4.4.

Таблица 4.3

Экспериментальные данные влияния индукции магнитного поля устройства с ВЭМП на степень покрытия поверхности пластическими отпечатками

<i>i</i>	1			2			3			4			5		
№ образца	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3	5-1	5-2	5-3
Индукция В, Тл	0,08	0,1	0,12	0,08	0,1	0,12	<b>0,08</b>	<b>0,1</b>	<b>0,12</b>	0,08	0,1	0,12	0,08	0,1	0,12
P <sub>эксп</sub>	0,15	0,3	0,35	0,4	0,55	0,6	<b>0,45</b>	<b>0,6</b>	<b>0,65</b>	0,45	0,6	0,65	0,4	0,55	0,6

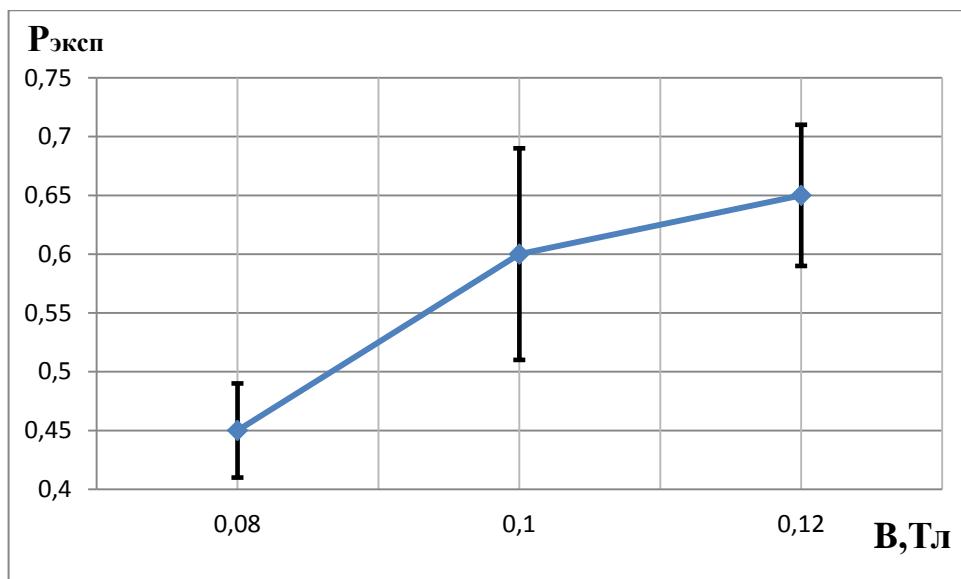


Рис. 4.4 Зависимость изменения степени покрытия поверхности пластическими отпечатками от индукции магнитного поля  $B$  при  $i=3$ ,  $l/d=10$ ,  $t=10$  с.

#### 4.1.3 Влияние размерных соотношений ферромагнитных инденторов на интенсивность обработки

Результаты оценки влияния значений соотношения ферромагнитных инденторов  $l/d$  на степень покрытия поверхности пластическими отпечатками приведены в табл. 4.4, и показана на рис. 4.5.

Таблица 4.4

Экспериментальные данные влияния соотношения ферромагнитных инденторов  $l/d$  на степень покрытия поверхности пластическими отпечатками

$i$	1			2			3			4			5		
№ образца	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3	5-1	5-2	5-3
$l/d$	8	10	12,5	8	10	12,5	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12,5</b>	8	10	12,5	8	10	12,5
$P_{\text{эксп}}$	0,15	0,3	0,25	0,4	0,55	0,5	<b>0,45</b>	<b>0,6</b>	<b>0,55</b>	0,45	0,6	0,55	0,4	0,55	0,5

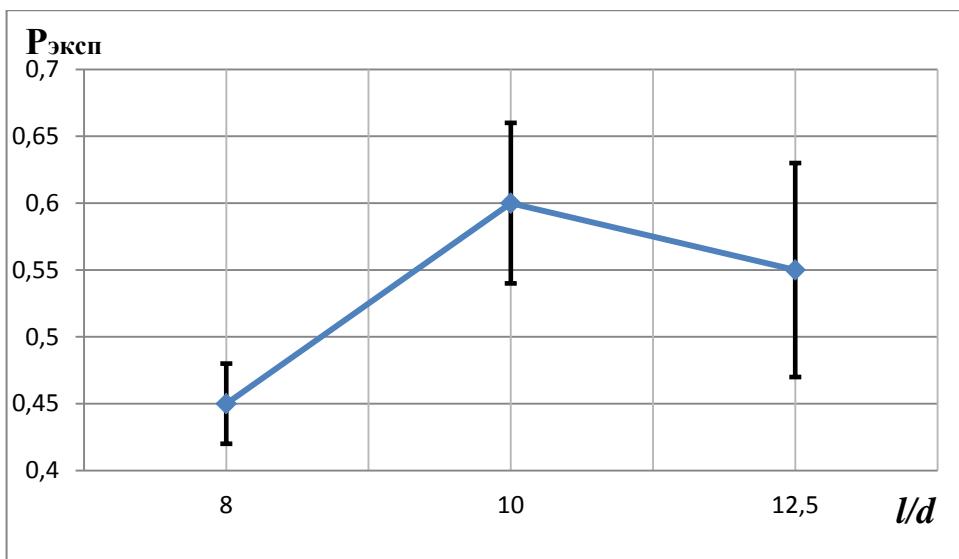


Рис. 4.5. Зависимость изменения степени покрытия поверхности пластическими отпечатками от соотношения ферромагнитных инденторов  $l/d$  при  $i=3$ ,  $B=0,1$  Тл,  $t=10$  с.

Вышепредставленные результаты исследований позволили установить следующее:

- масса загрузки в рабочую зону устройства инденторов, образующих МОВ слой, не должна превышать 3-х радиально расположенных кольцевых слоёв, соизмеримых с длиной индентора;
- увеличение индукции магнитного поля свыше критической, ниже которой обрабатывающая среда находится в «твёрдой» фазе, приводит к повышению интенсивности процесса и, как следствие, к росту производительности обработки;
- оптимальная величина соотношения геометрических размеров ферромагнитных инденторов (отношение длины к диаметру), при котором достигается наилучший эффект обработки, находится на уровне  $l/d = 10$ .

#### 4.2 Исследования изменения качества поверхности в процессе магнитодинамической обработки

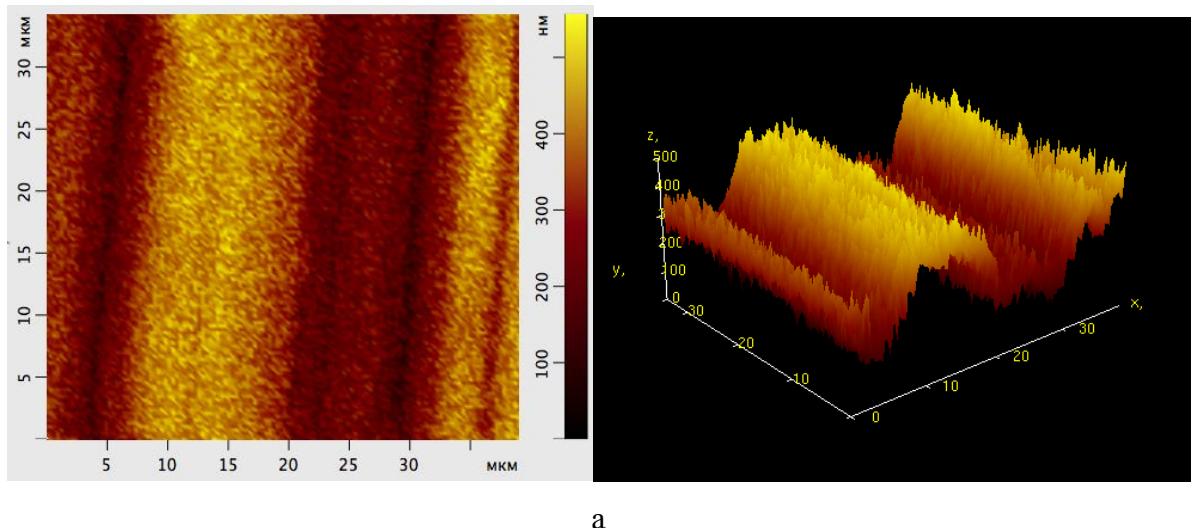
Как было отмечено ранее, обработка ферромагнитными инденторами в вращающемся электромагнитном поле по своей динамической и технологической сущности ничем не отличается от широкоизвестных и получивших практическое применение методов обработки свободнодвижущимися инденторами, т.к. виброударная, пневмодинамическая, центробежно-ротационная, а является лишь их разновидностью по используемому источнику энергии. Присущие этим методам общие закономерности модифицирования поверхностного слоя в

процессе обработки обусловили разработку обобщённых аналитических моделей для определения и прогнозирования его параметров качества.

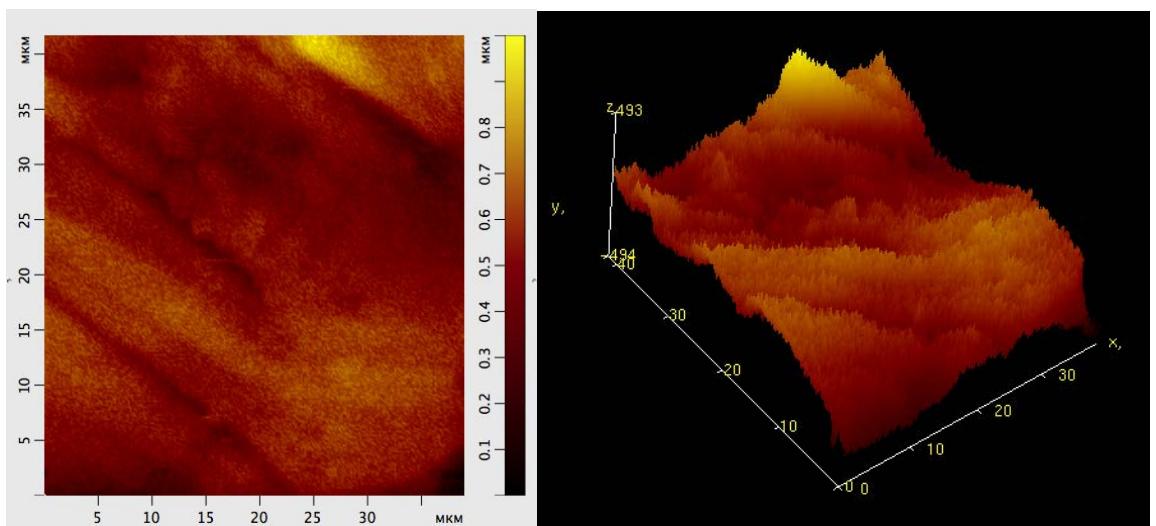
Для проверки адекватности полученных моделей в процессе магнитодинамической обработки проведены комплексные исследования влияния технологических параметров и свойств материала детали на параметры качества обработанной поверхности.

#### 4.2.1 Исследование микропрофиля обработанной поверхности

Морфологические исследования обработанной поверхности (рис. 4.6) показали, что в процессе магнитодинамической обработки, как и при обработке другими методами обработки свободнодвижущимися инденторами, формируется качественно новый микрорельеф, характеризующийся более сглаженными выступами и впадинами микронеровностей.



а



б

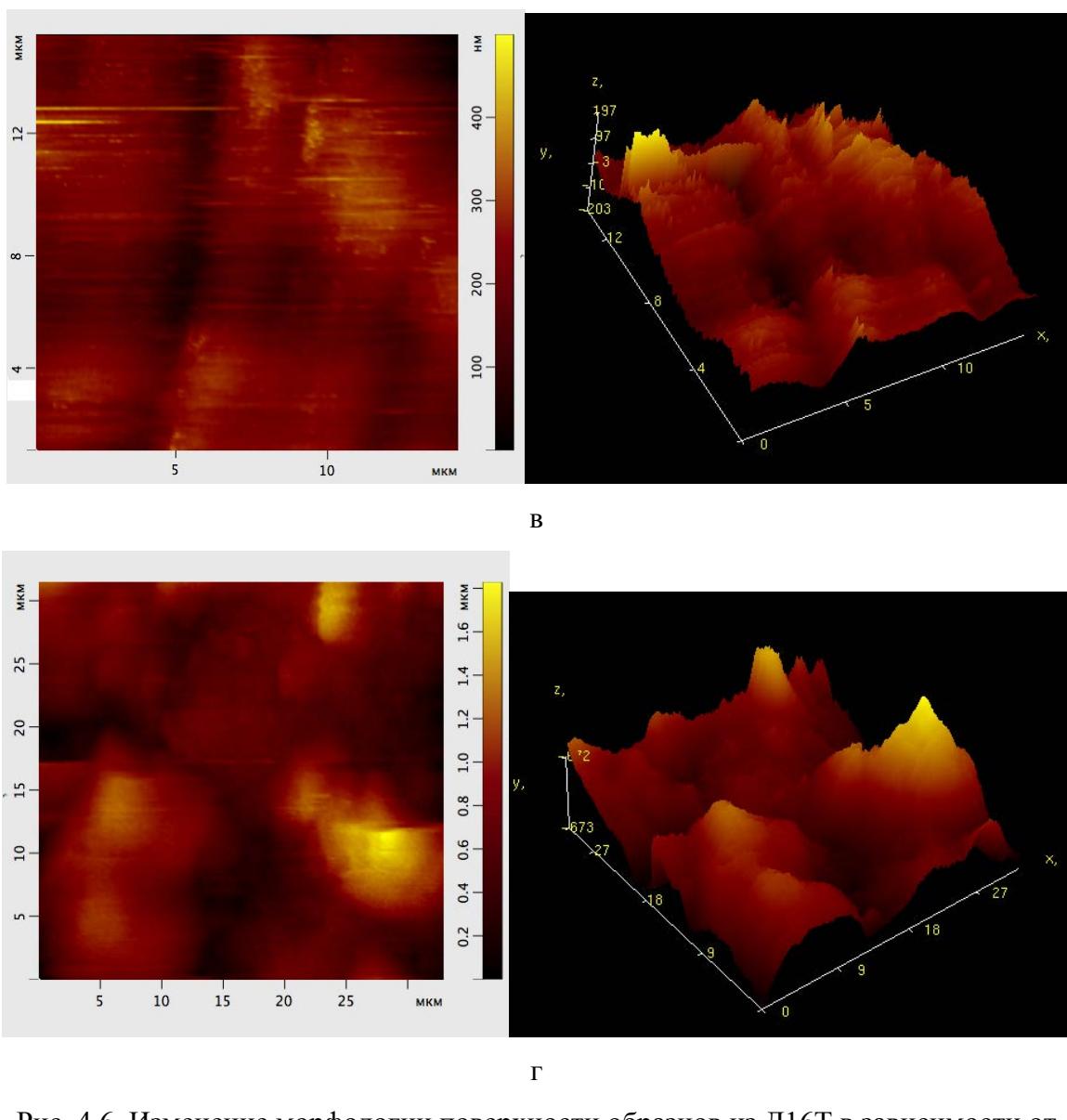


Рис. 4.6. Изменение морфологии поверхности образцов из Д16Т в зависимости от продолжительности магнитодинамической обработки (обрабатывающая среда – ферромагнитные инденторы с  $l/d = 10$ ; масса загрузки – 3 слоя инденторов,  $Ra_{исх} = 1,6 \text{ мкм}$ ).  
Режимы обработки:  $B = 0,1 \text{ Тл}$ ,

а – исх.; б –  $t = 1\text{мин}$ ; в –  $t = 3\text{мин}$ ; г –  $t = 5\text{мин}$ .

Основными факторами, определяющими изменение среднего арифметического отклонения микропрофиля обработанной поверхности, согласно предложенной в разделе 2.5 аналитической модели, являются: энергия соударения ферромагнитных инденторов с обрабатываемой поверхностью, механические свойства обрабатываемого материала, исходная высота микропрофиля, продолжительность обработки, зависящая от кратности покрытия поверхности пластическими отпечатками. Подтверждением этого являются результаты экспериментальных исследований изменения высоты микропрофиля в функции от времени обработки, представленные на рис.4.7–4.10.

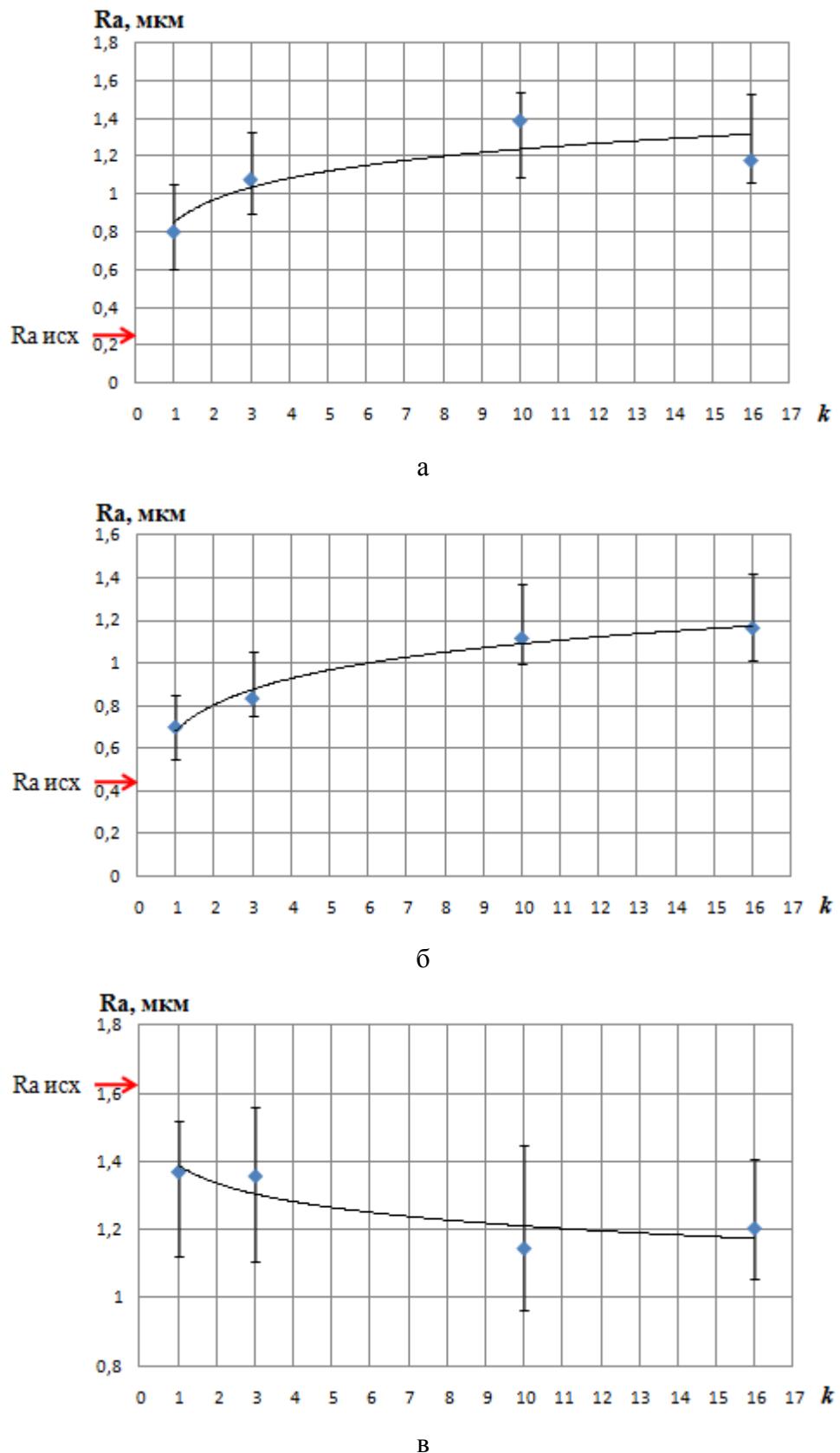


Рис. 4.7. Изменение высоты микропрофиля поверхности образцов из Д16Т в зависимости от времени магнитодинамической обработки (обрабатывающая среда – ферромагнитные инденторы с  $l/d = 10$ ; масса загрузки – 3 слоя инденторов). Режимы обработки:  $B=0,1$  Тл.

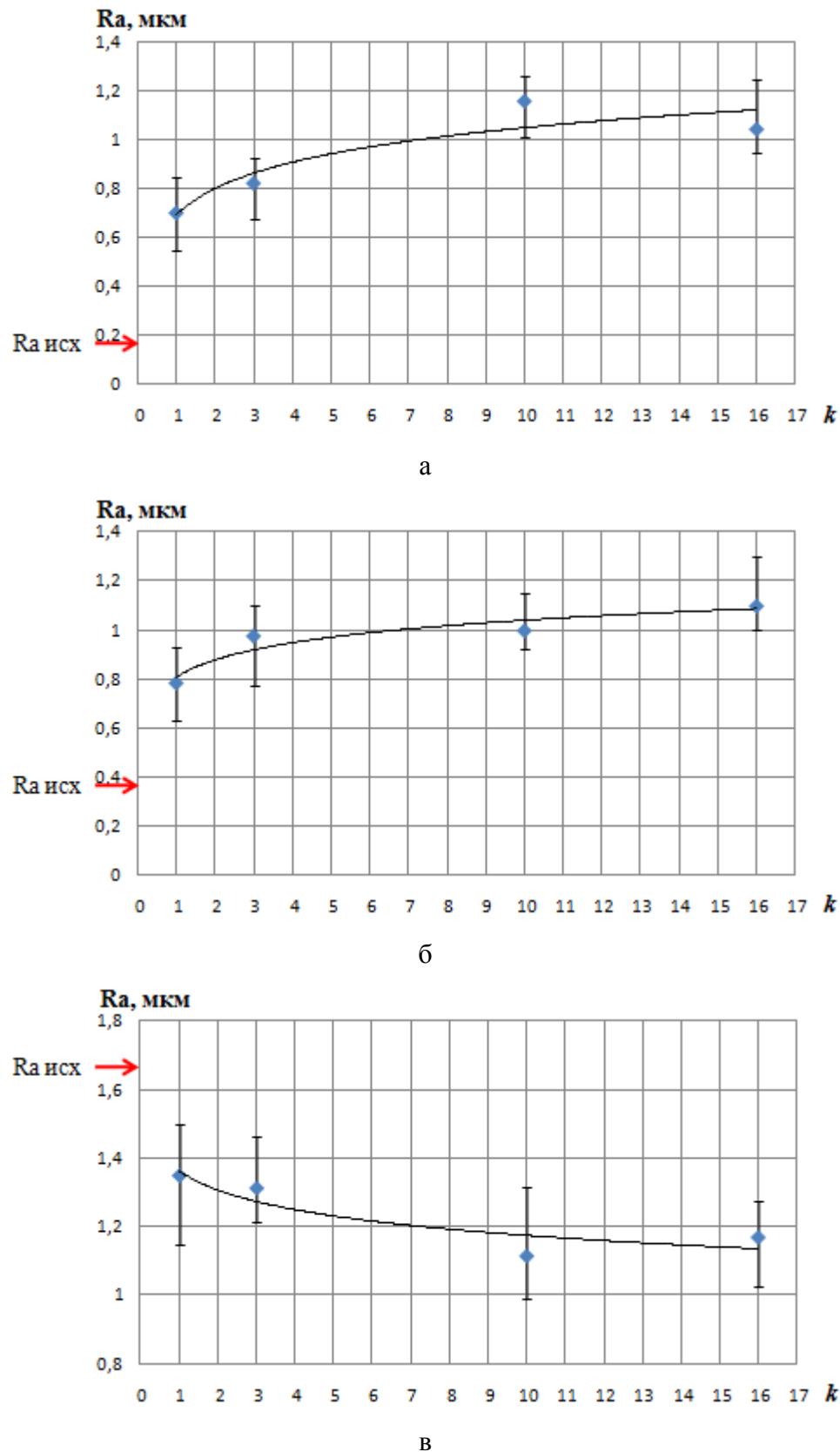


Рис. 4.8. Изменение высоты микропрофиля поверхности образцов из В95пчТ2 в зависимости от времени магнитодинамической обработки (обрабатывающая среда – ферромагнитные инденторы с  $l/d=10$  мм; масса загрузки – 3 слоя инденторов). Режимы обработки:  $B=0,1$  Тл.

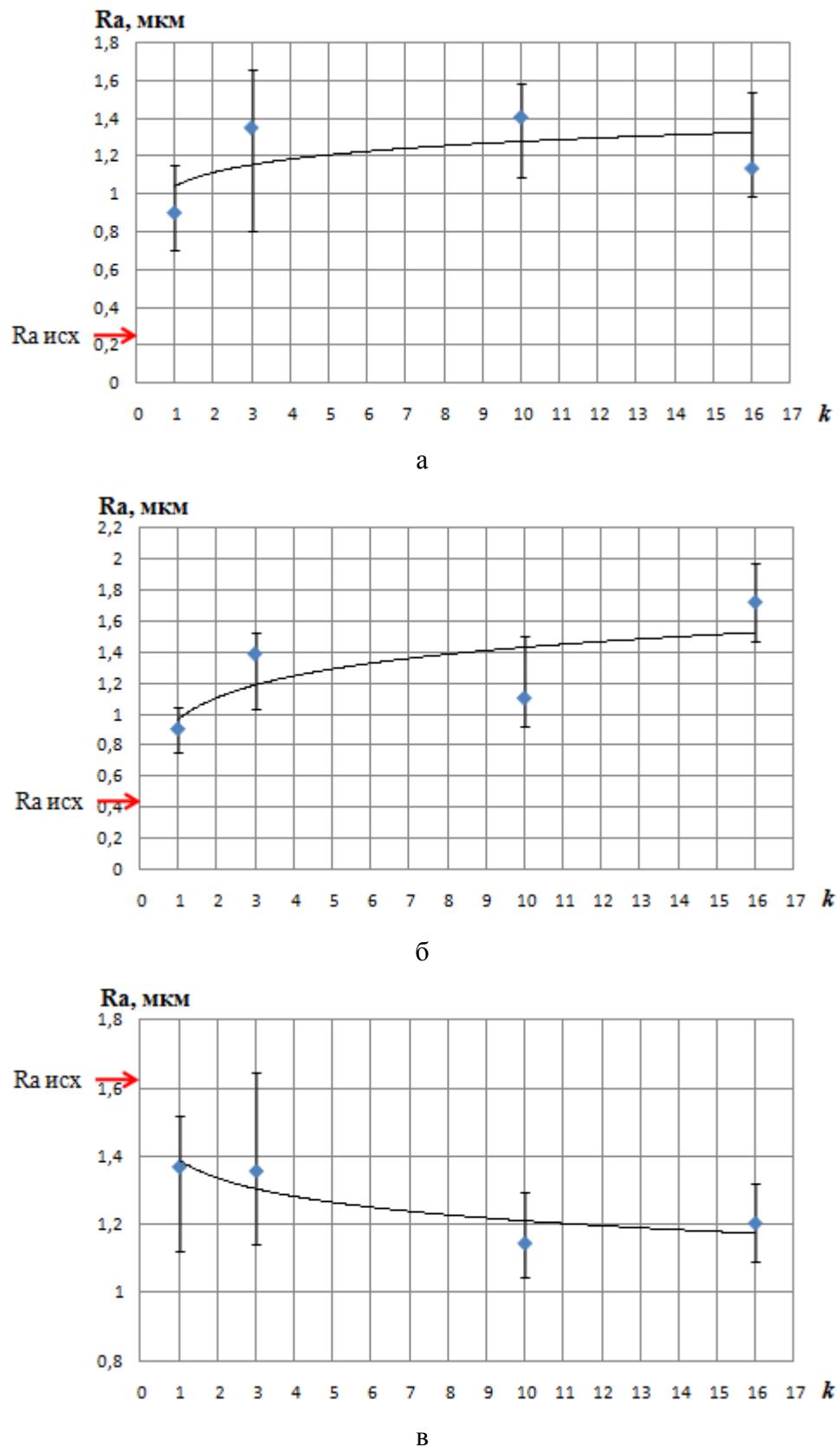


Рис.4.9. Изменение высоты микропрофиля поверхности образцов из Д16Т в зависимости от времени магнитодинамической обработки (обрабатывающая среда – ферромагнитные инденторы с  $l/d=7$ ; масса загрузки – 1 слой инденторов). Режимы обработки:  $B=0,1$  Тл.

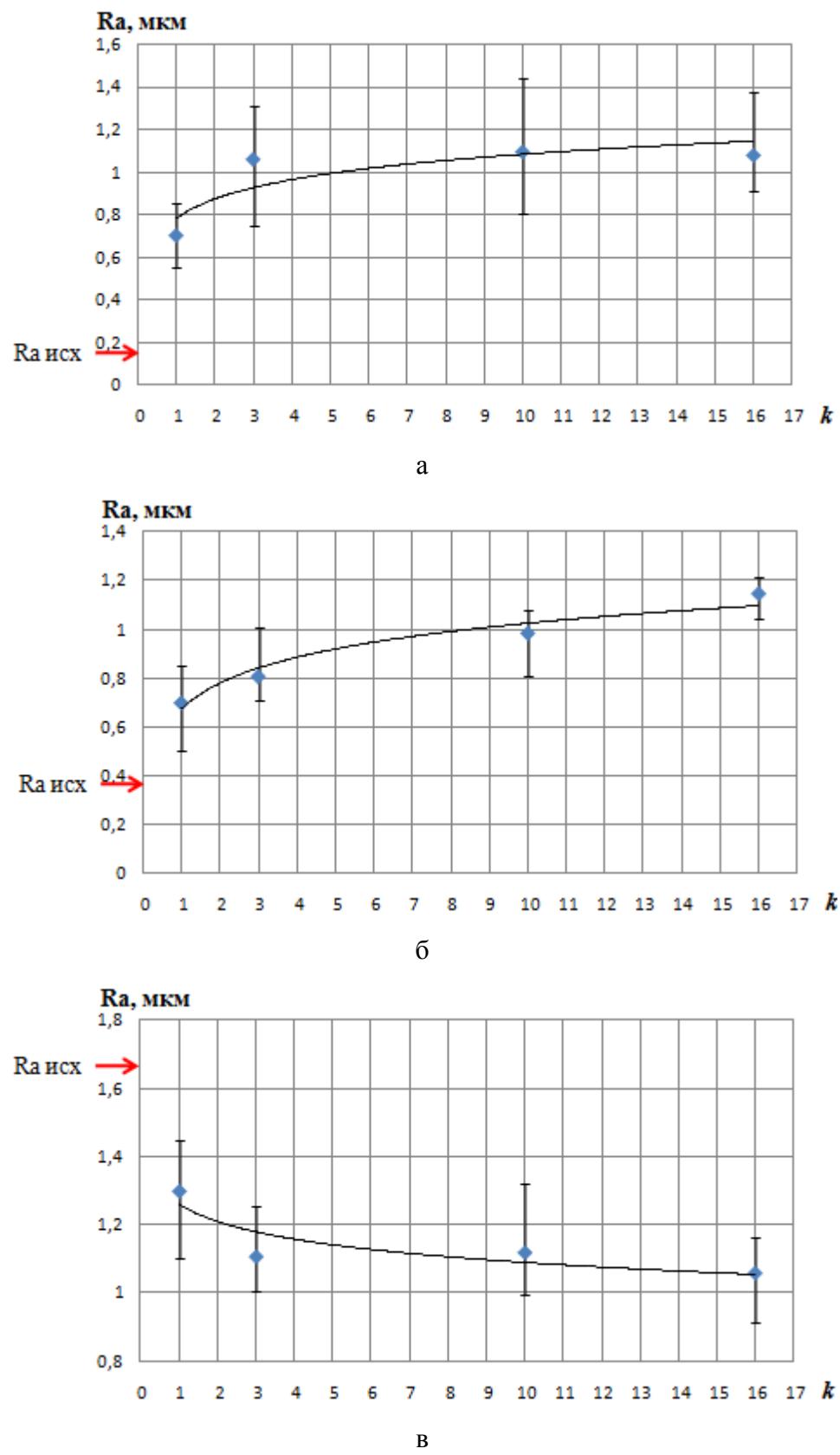


Рис. 4.10. Изменение высоты микропрофиля поверхности образцов из B95pcT2 в зависимости от времени магнитодинамической обработки (обрабатывающая среда – ферромагнитные инденторы с  $l/d=7$ ; масса загрузки – 1 слой инденторов). Режимы обработки:  $B=0,1$  Тл.

Результаты исследований, приведённые на рис. 4.7–4.10 свидетельствуют о нижеследующем. Характер изменения высоты микропрофиля обработанной поверхности зависит от высоты микропрофиля исходной поверхности. Так, для образцов с исходной высотой  $R_a=1,6$  мкм наблюдается её снижение, а для образцов с  $R_a$  равной 0,2 мкм и 0,44 мкм – рост. При этом независимо от исходной высоты микропрофиля обработанной поверхности, для выбранных условий обработки, стабилизируется при продолжительности обработки в пределах 4 мин для образцов, обработанных ферромагнитными инденторами с  $l/d=10$ , и 3 мин для образцов, обработанных ферромагнитными инденторами с  $l/d=7$ .

В соответствии с соотношением (2.68), связывающим время обработки с кратностью сплошного покрытия поверхности пластическими отпечатками, установлено, что экспериментальное время, за которое достигается стабилизация высоты микропрофиля обрабатываемой поверхности, как показывают расчеты, представленные в табл. 4.5, обеспечивает кратность сплошного покрытия поверхности пластическими отпечатками в пределах 12-14 раз. Этот экспериментально установленный факт согласуется с выводами, представленными в исследованиях [11, 79, 87, 97] о количестве ударов единичного индентора, при котором достигается предельная деформация, обеспечивающая рост пластического отпечатка, формируемого на поверхности.

Таблица 4.5

Соответствие кратности сплошного покрытия поверхности  $k$  пластическими отпечатками продолжительности обработки  $t$

Условия обработки	Материал образцов	$k$	1	2	3	6	8	10	12	14	16
$l/d=10$ , $B=0,1$ Тл.	Д16Т	Время обработки, $t$ , сек.	17	34	51	102	136	170	204	238	272
	В95пчТ2		18	36	54	108	144	180	216	252	288
$l/d=7$ , $B=0,1$ Тл.	Д16Т	Время обработки, $t$ , сек.	10	20	40	60	80	100	120	140	160
	В95пчТ2		12	24	48	72	96	120	144	168	192

Превышение времени обработки, при котором достигается стабилизация высоты микропрофиля обрабатываемой поверхности как видно на рис. 4.7в-4.10в, приводит к росту высоты микронеровностей, что является проявлением начидающегося эффекта перенаклёпа, проявляющегося, как показали морфологические наблюдения обработанной поверхности, в виде появления на поверхности отслаивающихся от неё чешуек.

Экспериментальные исследования наглядно показали, что на характер изменения высоты микропрофиля поверхности в процессе обработки существенное влияние оказывает не только высота микронеровностей исходной поверхности, но и энергия соударения ферромагнитных инденторов с обрабатываемой поверхностью. Это позволило сделать

заключение, что между исходной высотой микропрофиля и энергией соударения инденторов существует соотношение, оказывающее влияние на характер изменения высоты микропрофиля поверхности в процессе обработки и определяющее величину предельной энергии соударения ферромагнитных инденторов с обрабатываемой поверхностью в зависимости от высоты микронеровностей исходной поверхности. Превышение предельной энергии будет приводить к росту высоты микропрофиля поверхности в процессе обработки, а уменьшение предельной энергии к снижению высоты микропрофиля поверхности в процессе обработки. На основании установленной в разделе 2.5 аналитической модели (2.80) в качестве зависимости, определяющей величину предельной энергии соударения ферромагнитных инденторов с обрабатываемой поверхностью в зависимости от высоты микронеровностей исходной поверхности, было принято соотношение:

$$E_{\text{пр}} \approx 0,5\pi D \cdot HV \cdot R_{a \text{ исх}}^2$$

С учётом предложенного соотношения и основываясь на результатах экспериментальных исследований, были внесены корректировки в аналитические модели по определению среднего арифметического отклонения микропрофиля обработанной поверхности:

- при энергосиловых параметрах ферромагнитных инденторов  $E_y > E_{\text{пр}}$  зависимость изменения высоты микропрофиля в функции от времени обработки будет иметь вид:

$$R_{a_k} = \left[ R_{a \text{ исх}} + \sqrt{\frac{2E}{\pi DHV}} \right] \left( 1 - K_{R_a} \frac{d_k}{d} \ln k \right);$$

- при энергосиловых параметрах ферромагнитных инденторов  $E_y < E_{\text{пр}}$ :

$$R_{a_k} = \left[ R_{a \text{ исх}} - \sqrt{\frac{2E}{\pi DHV}} \right] \left( 1 - K_{R_a} \frac{d_k}{d} \ln k \right).$$

Проведено сравнение расчётных и экспериментальных значений среднего арифметического отклонения микропрофиля поверхности, модифицированной в процессе магнитодинамической обработки образцов из алюминиевых сплавов (рис. 4.7а, 4.8в, 4.9б, 4.10в, табл. 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 соответственно).

Таблица 4.6

Экспериментальные и расчётные значения среднего арифметического отклонения микропрофиля поверхности образцов из Д16Т, с  $R_{a \text{ исх}} = 0,214$  мкм, обработанных в условиях при  $l/d=10$ ,  $B=0,1$  Тл

Время обработки $t$ , мин	0	0,3	1	3	5
$k$	-	1	3	7	10
$R_{a \text{расч}}$ , мкм	0,214	0,82	1,04	1,24	1,31
$R_{a \text{эксп}}$ , мкм	0,214	0,8	1,07	1,385	1,17
$\delta\%$	-	2,4	2,8	10,5	10,7

Таблица 4.7

Экспериментальные и расчётные значения среднего арифметического отклонения микропрофиля поверхности образцов из В95пчТ2, с  $R_{a_{исх}} = 1,61$  мкм, обработанных в условиях при  $l/d=10$ ,  $B=0,1$  Тл

Время обработки $t$ , мин	0	0,3	1	3	5
$k$	-	1	3	7	10
$R_{a_{расч}}$ , мкм	1,61	1,37	1,27	1,18	1,16
$R_{a_{эксп}}$ , мкм	1,61	1,36	1,358	1,147	1,206
$\delta\%$	-	1	6,5	2,8	3,8

Таблица 4.8

Экспериментальные и расчётные значения среднего арифметического отклонения микропрофиля поверхности образцов из Д16Т, с  $R_{a_{исх}} = 0,45$  мкм, обработанных в условиях при  $l/d = 7$ ,  $B=0,1$  Тл

Время обработки $t$ , мин	0	0,3	1	2	3
$k$	-	1	3	7	10
$R_{a_{расч}}$ , мкм	0,45	0,96	1,2	1,43	1,56
$R_{a_{эксп}}$ , мкм	0,45	1,2	1,387	1,1	1,72
$\delta\%$	-	20	13,5	23	9,3

Таблица 4.9

Экспериментальные и расчётные значения среднего арифметического отклонения микропрофиля поверхности образцов из В95пчТ2, с  $R_{a_{исх}} = 1,66$  мкм, обработанных в условиях при  $l/d = 7$ ,  $B=0,1$  Тл

Время обработки $t$ , мин	0	0,3	1	2	3
$k$	-	1	3	7	10
$R_{a_{расч}}$ , мкм	1,66	1,26	1,18	1,1	1,06
$R_{a_{эксп}}$ , мкм	1,66	1,3	1,107	1,119	1,058
$\delta\%$	-	3,1	6,2	1,7	0,2

Сравнительный анализ подтвердил предположение, что первый сомножитель в уточнённой по результатам экспериментальных исследований расчётно-аналитической модели вполне адекватно оценивает высоту микропрофиля обработанной поверхности за время,

обеспечивающее однократное её покрытие пластическими отпечатками [56]. Расчетно-аналитическая модель позволяет с достаточной точностью (в пределах экспериментальной ошибки) прогнозировать среднеарифметическое отклонение установившегося микропрофиля обработанной поверхности.

#### 4.2.2 Исследование физико-механических характеристик поверхностного слоя

Твердость является основным параметром, используемым для оценки состояния качества поверхностного слоя материалов после упрочняющих обработок, оказывающим наиболее существенное влияние на повышение эксплуатационных свойств деталей машин. В этой связи исследования изменения параметров деформационного состояния поверхностного слоя при магнитодинамической обработке в зависимости от механических свойств материала и технологических параметров обработки имеют важное значение.

Согласно изложенной в главе 3 методике проведены экспериментальные исследования микротвердости поверхностного слоя обработанных образцов и его напряжённого состояния, результаты которых представлены на рис. 4.11-4.13.

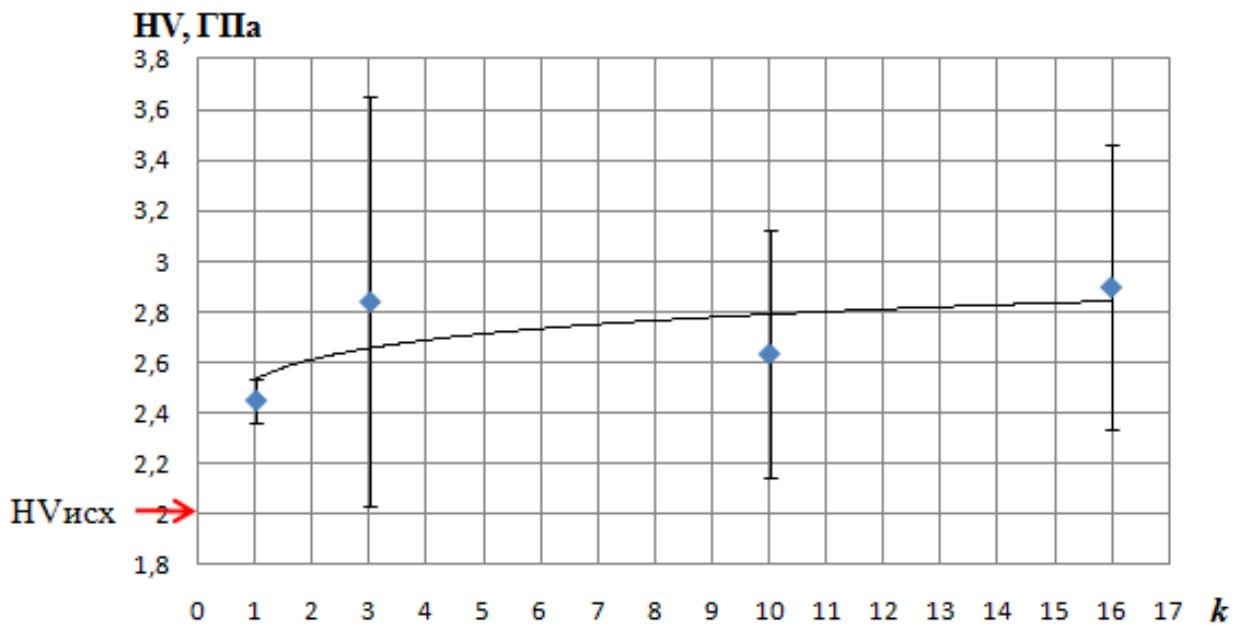


Рис. 4.11. Изменение микротвердости поверхности образцов из Д16Т в зависимости от времени магнитодинамической обработки (обрабатывающая среда – ферромагнитные инденторы с  $l/d=10$ ; масса загрузки – 3 слоя инденторов). Режимы обработки:  $B=0,1$  Тл.

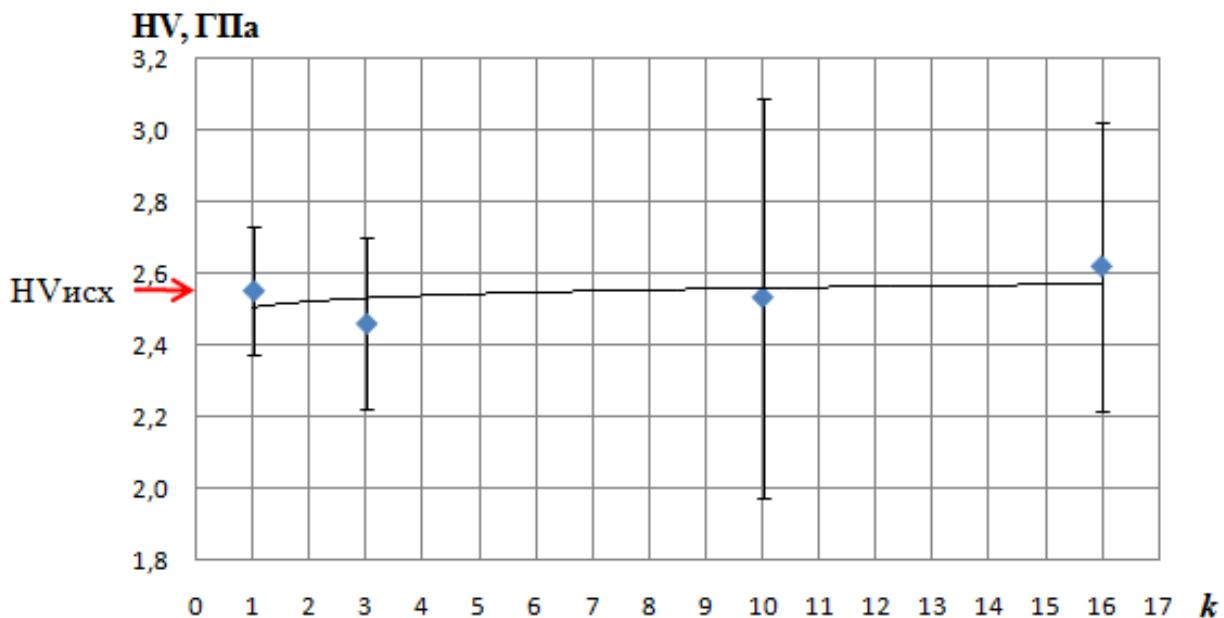


Рис. 4.12. Изменение микротвердости поверхности образцов из B95pcT2 в зависимости от времени магнитодинамической обработки (обрабатывающая среда – ферромагнитные инденторы с  $l/d=10$ ; масса загрузки – 3 слоя инденторов). Режимы обработки:  $B=0,1$  Тл.

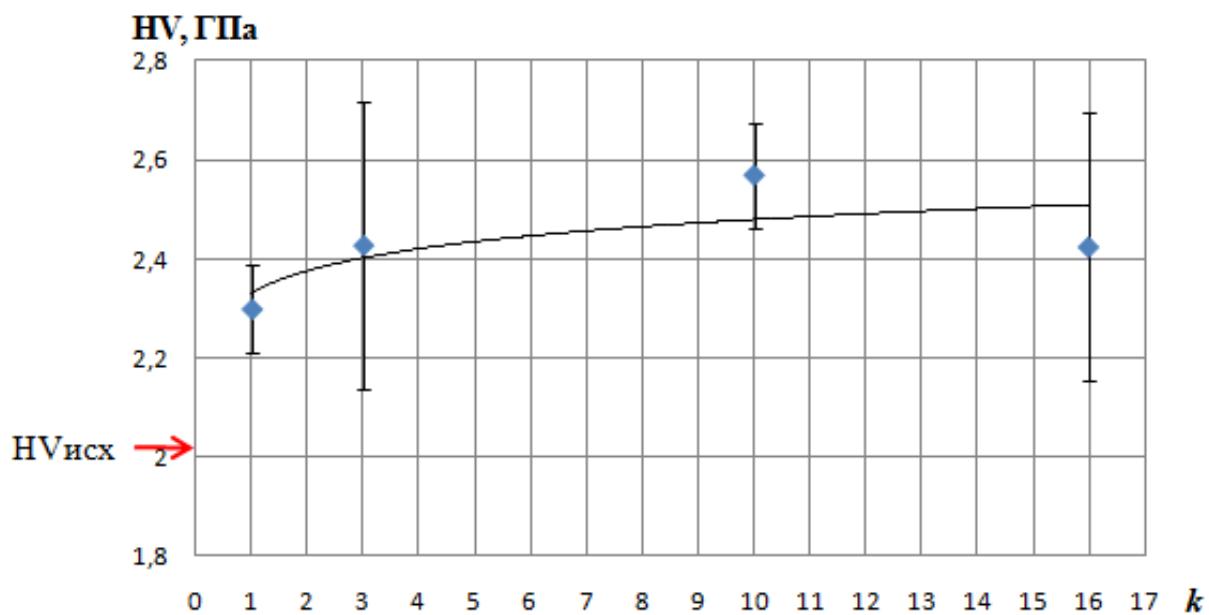


Рис. 4.13. Изменение микротвердости поверхности образцов из D16T в зависимости от времени магнитодинамической обработки (обрабатывающая среда – ферромагнитные инденторы с  $l/d=7$ ; масса загрузки – 1 слой инденторов). Режимы обработки:  $B=0,1$  Тл.

Анализ полученных результатов позволил подтвердить основные закономерности изменения физико-механических характеристик поверхностного слоя, модифицированного в функции от времени и условий магнитодинамической обработки, которые были положены в

основу модельных их описаний и представлены в научно-технической литературе, посвященной исследованию методов ППД свободнодвижущимися инденторами.

Установлено, что с увеличением времени обработки микротвердость поверхности растет до определенного предела и стабилизируется на этом уровне. Отмечено, что максимальное упрочнение образцов достигается при обработке ферромагнитными инденторами с  $l/d=10$  за 3-4 минуты обработки, а при обработке ферромагнитными инденторами с  $l/d=7$ - за 2-2,5 мин. Дальнейшее увеличение времени обработки не приводит к росту микротвердости. Полученные в результате исследований закономерности изменения микротвердости поверхности в процессе магнитодинамической обработки подтверждают экспериментально установленный факт, что подвергаемый упрочнению материал имеет ограниченную способность к аккумулированию энергии деформации. По мере накопления пластических деформаций наступает состояние энергетического насыщения, превышение которого приводит к разрушению и шелушению поверхности.

Аналогичные закономерности были установлены при экспериментальной оценке напряжённого состояния поверхностного слоя, модифицированного в процессе магнитодинамической обработки (рис. 4.14-4.17).

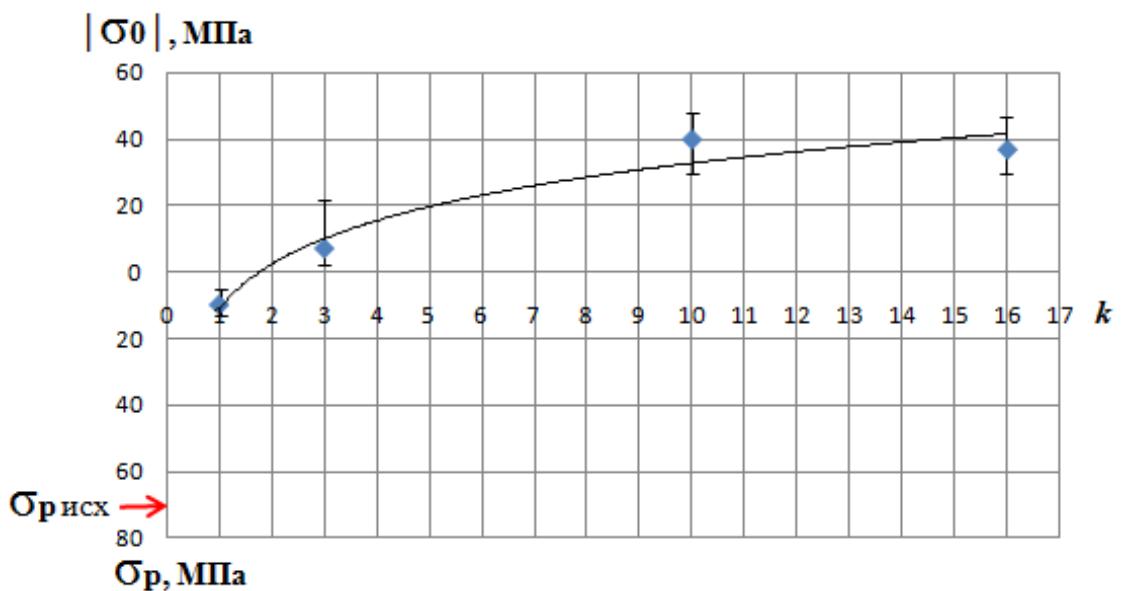


Рис. 4.14. Изменение остаточных напряжений сжатия в поверхности образцов из Д16Т в зависимости от времени магнитодинамической обработки (обрабатывающая среда – ферромагнитные инденторы с  $l/d=10$ ; масса загрузки – 3 слоя инденторов). Режимы обработки:

$$B=0,1 \text{ Тл.}$$

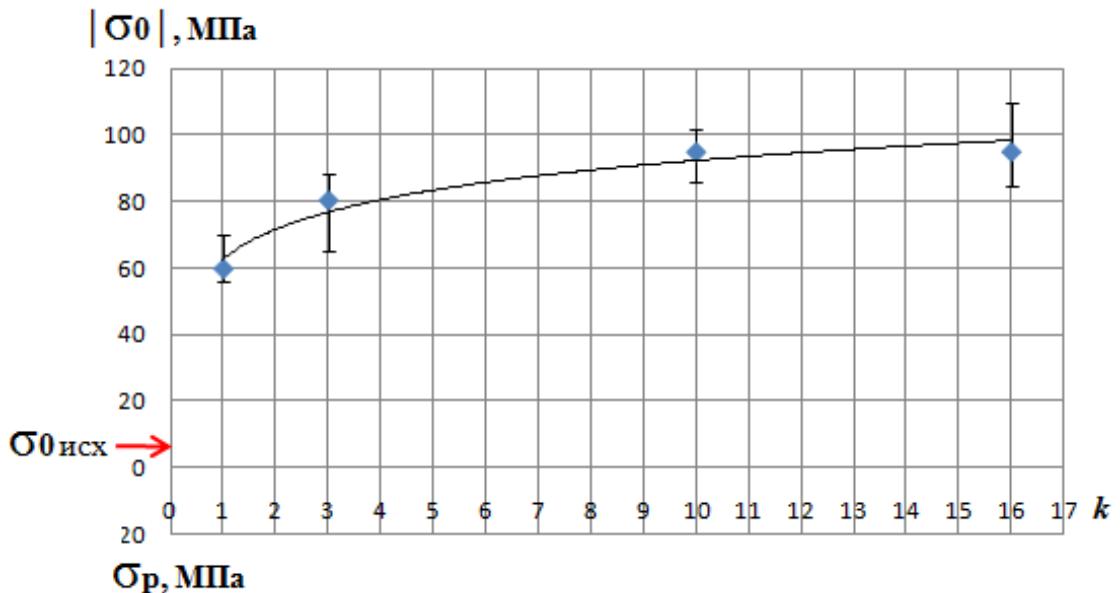


Рис. 4.15. Изменение остаточных напряжений сжатия в поверхности образцов из В95пчТ2 в зависимости от времени магнитодинамической обработки (обрабатывающая среда – ферромагнитные инденторы с  $l/d=10$ ; масса загрузки – 3 слоя инденторов). Режимы обработки:  $B=0,1$  Тл.

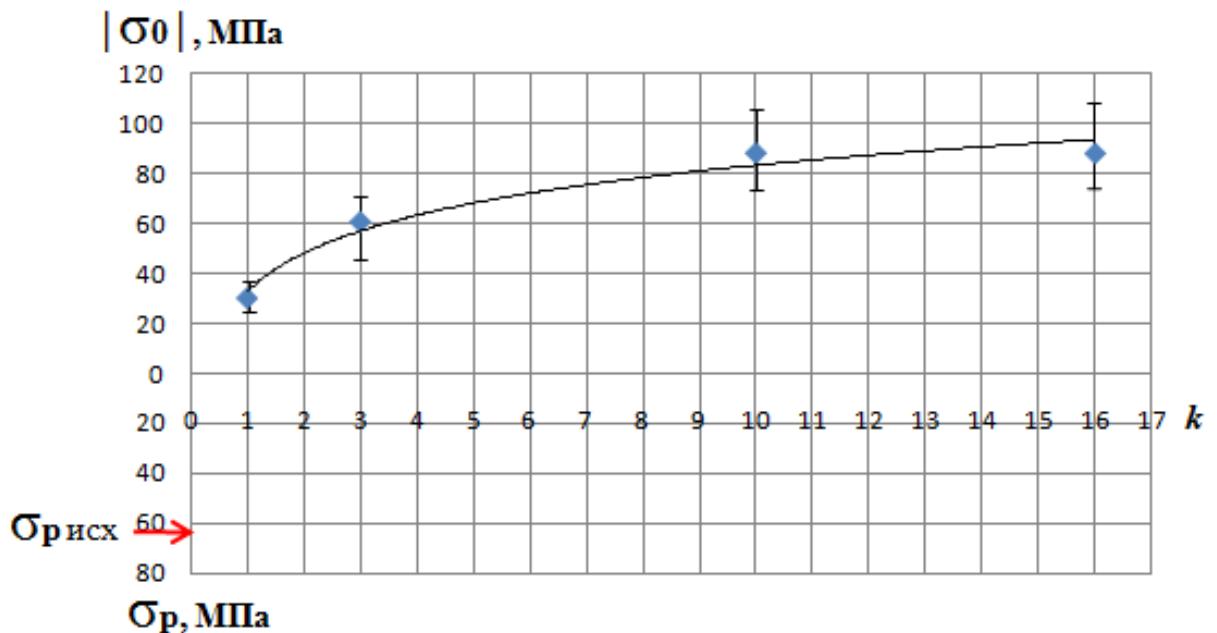


Рис. 4.16. Изменение остаточных напряжений сжатия в поверхности образцов из Д16Т в зависимости от времени магнитодинамической обработки (обрабатывающая среда – ферромагнитные инденторы с  $l/d=7$ ; масса загрузки – 1 слой инденторов). Режимы обработки:  $B=0,1$  Тл.

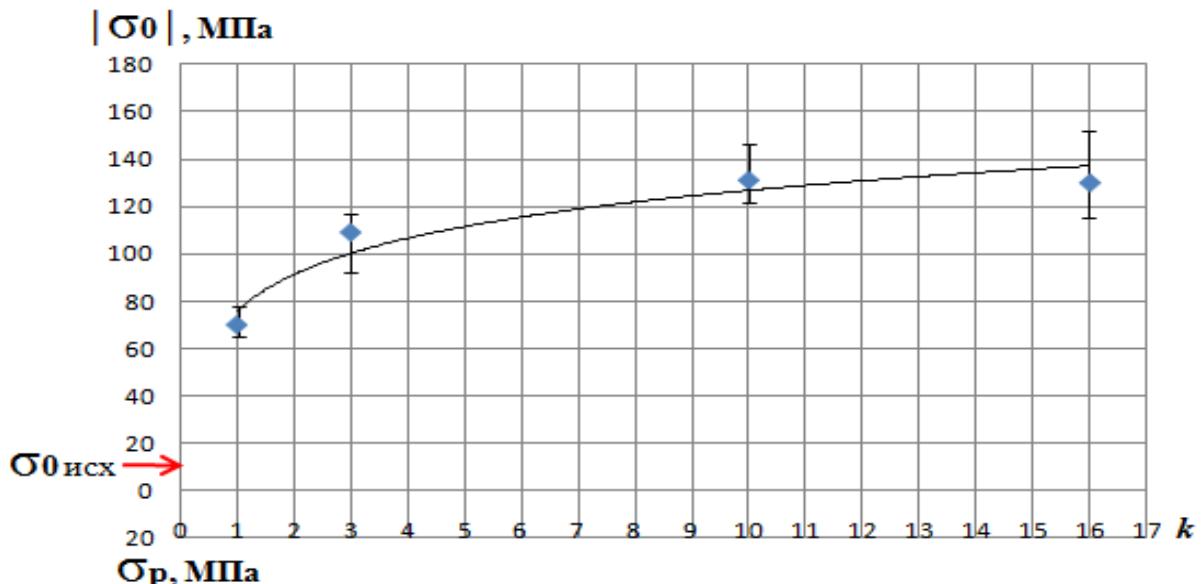


Рис.4.17. Изменение остаточных напряжений сжатия в поверхности образцов из В95пчТ2 в зависимости от времени магнитодинамической обработки (обрабатывающая среда – ферромагнитные инденторы с  $l/d=7$ ; масса загрузки – 1 слой инденторов). Режимы обработки:  $B=0,1$  Тл.

Проведено сравнение расчётных и экспериментальных значений микротвёрдости обработанной поверхности (рис. 4.12, 4.13, табл. 4.10, 4.11), а также величины остаточных напряжений (рис.4.14, 4.17, табл. 4.12, 4.13).

Таблица 4.10

Экспериментальные и расчётные значения микротвёрдости поверхности образцов из В95пчТ2, с  $R_{a_{исх}}=0,18$  мкм, обработанных в условиях при  $l/d=10$ ,  $B=0,1$  Тл.

Время обработки $t$ , мин	0	0,3	1	3	5
$k$	-	1	3	10	16
$HV_{расч}$ , ГПа	2,55	2,52	2,55	2,58	2,59
$HV_{эксп}$ , ГПа	2,55	2,55	2,46	2,54	2,62
$\delta\%$	-	1,2	3,5	1,6	1,1

Таблица 4.11

Экспериментальные и расчётные значения микротвёрдости поверхности образцов из Д16Т, с  $R_{a_{исх}}=1,61$  мкм, обработанных в условиях при  $l/d =7$ ,  $B=0,1$  Тл.

Время обработки $t$ , мин	0	0,3	1	2	3
$k$	-	1	3	10	16
$HV_{расч}$ , ГПа	2,02	2,34	2,41	2,48	2,5
$HV_{эксп}$ , ГПа	2,02	2,3	2,43	2,57	2,42
$\delta\%$	-	1,7	1	3,5	3,2

Таблица 4.12

Экспериментальные и расчётные значения величины остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из Д16Т, с  $R_{a_{исх}}=1,61$  мкм, обработанных в условиях при  $l/d=10$ ,  $B=0,1$  Тл.

Время обработки $t$ , мин	0	0,3	1	3	5
$k$	-	1	3	10	16
$\sigma_{0_{расч}}$ , МПа	$\sigma_p=67,17$	$\sigma_p=11$	$ \sigma_0 =8$	$ \sigma_0 =32$	$ \sigma_0 =41$
$\sigma_{0_{эксп}}$ , МПа	$\sigma_p=67,17$	$\sigma_p=10$	$ \sigma_0 =7$	$ \sigma_0 =39,9$	$ \sigma_0 =36,8$
$\delta\%$	-	9,1	12,5	17,9	12,2

Таблица 4.13

Экспериментальные и расчётные значения величины остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из В95пчТ2, с  $R_{a_{исх}}=0,18$  мкм, обработанных в условиях при  $l/d=7$ ,  $B=0,1$  Тл.

Время обработки $t$ , мин	0	0,3	1	2	3
$k$	1				
$\sigma_{0_{расч}}$ , МПа	$ \sigma_0 =9,64$	$ \sigma_0 =32$	$ \sigma_0 =78$	$ \sigma_0 =127$	$ \sigma_0 =138$
$\sigma_{0_{эксп}}$ , МПа	$ \sigma_0 =9,64$	$ \sigma_0 =30$	$ \sigma_0 =70$	$ \sigma_0 =131,1$	$ \sigma_0 =130$
$\delta\%$	-	6,2	10,2	3,1	5,8

Как показал сравнительный анализ разница между теоретическими и экспериментальными значениями не превышает 20 %, что говорит о том, что предложенные в главе 2 аналитические зависимости для оценки физико-механических параметров поверхностного слоя формируемого в процессе магнитодинамической обработки, вполне адекватны и могут быть использованы на практике [48].

## 5. РАСЧЁТ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

### 5.1 Расчёт технологических характеристик магнитодинамической обработки

Основными технологическими характеристиками магнитодинамической обработки являются: материал и геометрические размеры ферромагнитных инденторов, их энергетическое состояние и количество, загружаемое в рабочую зону устройства с ВЭМП, продолжительность энергосилового воздействия на обрабатываемую поверхность, от правильности выбора которых зависит производительность процесса, качество упрочнённого поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей.

В работе [64] показано, что эффект упрочнения поверхностного слоя для различных материалов, с разной величиной шероховатости поверхности, на макроуровне начинает проявляться при условии:

$$V_{min} = \left( \frac{R_a \text{исх} dk}{K_m} \left[ \frac{0.477(\pi C \sigma_t)^{\nu+1}}{b} \right]^{\frac{1}{\nu}} \frac{(\nu-1)\frac{(\nu-1)}{2\nu}}{2\nu} \right)^{\frac{1+n_y}{2n_y}}, \quad (5.1)$$

где  $V_{min}$  – минимальная скорость соударения инденторов с обрабатываемой поверхностью при которой начинается деформация основания микропрофиля и, как следствие, наблюдается эффект упрочнения поверхностного слоя, м/с;  $C$  – коэффициент стеснения (выбирается в пределах  $c = 2,8 \dots 3$ );  $b, \nu$  – параметры опорной кривой микропрофиля обрабатываемой поверхности;  $R_a$  – высота микронеровностей, м;  $\sigma_t$  – предел текучести, Па;  $k_{np}$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий физико-механические характеристики обрабатываемого материала:  $k_{np} = 1,3$  (для материалов с  $HV > 300$ );  $k_{np} = 1,4$  (для материалов с  $HV = 300: 150$ );

$k_{np} = 1,5$  (для материалов с  $HV < 150$ ) [9];  $K_m = \left( \frac{m}{2\varepsilon} \frac{1+n_y}{n_y} \right)^{\frac{n_y}{1+n_y}}$ ;  $m$  – масса ферромагнитных инденторов, м;  $\varepsilon$  – коэффициент податливости материала;  $n_y$  – коэффициент, характеризующий условия соударения.

Знание величины этой скорости позволяет обосновать энергетическое состояние ферромагнитных инденторов, необходимое для упрочнения поверхностного слоя, и на этой основе осуществить оптимизацию процесса магнитодинамической обработки деталей. Методика расчёта технологических характеристик представлена в таблице 5.1.

Последовательность расчёта технологических характеристик магнитодинамической обработки

№ этапа	Содержание этапа	Расчётная зависимость	№ формулы
1	Анализ исходных данных	$R$ – радиус рабочей зоны камеры; $L$ – длина рабочей зоны камеры; $B_v$ – переменная составляющая индукции магнитного поля; $H$ – напряженность магнитного поля; $\omega$ – угловая скорость МОВ слоя; $\mu$ – магнитная проницаемость материала индентора; $d$ – диаметр ферромагнитного индентора; $l$ – длина ферромагнитного индентора; $R_{aux}$ – исходное значение высоты микронеровностей; $HV$ – исходное значение микротвердости; $b, v$ – параметры опорной кривой микропрофиля обрабатываемой поверхности; $k$ – количество актов силового воздействия; $l_d$ – длина детали. $\varepsilon$ - коэффициент податливости материала; $n_y$ – коэффициент, характеризующий условия соударения	
2	Расчёт количества инденторов в МОВ слое, шт	$N = \frac{2\pi i L}{ld} \left[ R - \frac{l(i+1)}{4} \right]$	2.51
3	Расчёт массы ферромагнитных инденторов, кг	$m = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \rho$	
4	Определение момента инерции ферромагнитных инденторов, кг · м <sup>2</sup>	$I = \frac{1}{12} m l^2$	

№ этапа	Содержание этапа	Расчётная зависимость	№ формулы
5	Расчет магнитного момента ферромагнитных инденторов Дж/Тл	$\vec{p}_m = \frac{\mu - 1}{1 + (\mu - 1)J} \vec{H} \frac{\pi d^2}{4} l,$	
6	Определение энергетического состояния ферромагнитных инденторов, Дж	$E = \frac{p_m}{2\pi\omega^2} \left[ \frac{p_m}{I} B_v^2 + \frac{p_m}{m} \left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 \right]$	2.32
7	Определение скорости контактного взаимодействия инденторов с обрабатываемой поверхностью, м/с	$V_y = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{p_m^2}{m \pi \omega^2} \left[ \frac{B_v^2}{I} + \frac{1}{m} \left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 \right]}$	[61]
8	Расчёт диаметра пластического отпечатка, м	$d_k = \sqrt[4]{\frac{6 \cdot E \cdot d}{HV}}$	2.60
9	Определение минимальной скорости контактного взаимодействия инденторов, м/с	$V_{min} = \left( \frac{R_{a_{исх}} d_k}{K_m} \left[ \frac{0.477(\pi C \sigma_T)^{\nu+1}}{b} \right]^{\frac{1}{\nu}} \frac{(\nu-1)^{\frac{(\nu-1)}{2\nu}}}{2\nu} \right)^{\frac{1+n}{2n}}$	5.1
10	Проверка условия	$V_y \geq V_{min}$	
11	Расчёт площади пластического отпечатка, м <sup>2</sup>	$S_k = \frac{\pi d_k^2}{4}$	

№ этапа	Содержание этапа	Расчётная зависимость	№ формулы
12	Расчёт площади локального геометрического элемента поверхности $\text{м}^2$	$S_{\vartheta} = \frac{2Rdl}{2R - l}$	
13	Оценка интенсивности обработки	$P \approx 0,64 S_{\text{K}} / S_{\vartheta}$	2.59
14	Выбор кратности покрытия поверхности пластическими отпечатками	$k = 10-14$	
15	Определение времени обработки деталей длиной $l_{\text{д}} < L$ , с	$t_k = \frac{2\pi k}{P \cdot \omega}$	2.68
16	Определение времени обработки деталей длиной $l_{\text{д}} \gg L$ , с	$T = \frac{l_{\text{д}}}{L} \cdot t_k$	

## 5.2 Расчёт параметров качества поверхностного слоя, формируемого в процессе магнитодинамической обработки

В результате экспериментальных исследований, представленных в [56] установлена адекватность теоретических зависимостей (2.80, 2.90-2.92), которая позволяет рекомендовать их для расчёта параметров качества поверхностного слоя, формируемого в процессе магнитодинамической обработки, используя методический подход, представленный в таблице 5.2.

Последовательность расчёта параметров качества поверхностного слоя и оценки усталостной прочности детали.

<b>№ этапа</b>	<b>Содержание этапа</b>	<b>Расчётная зависимость</b>	<b>№ формулы</b>
1	Анализ исходных данных	$R$ – радиус рабочей зоны камеры; $L$ – длина рабочей зоны камеры; $B_v$ – переменная составляющая индукции магнитного поля; $H$ – напряженность магнитного поля; $\omega$ – угловая скорость МОВ слоя; $\mu$ – магнитная проницаемость материала индентора; $d$ – диаметр ферромагнитного индентора; $l$ – длина ферромагнитного индентора; $R_{aих}$ – исходное значение высоты микронеровностей; $HV$ – исходное значение микротвердости; $b, v$ – параметры опорной кривой микропрофиля обрабатываемой поверхности; $k$ – количество актов силового воздействия; $\varepsilon$ - коэффициент податливости материала; $n_y$ – коэффициент, характеризующий условия соударения; $S$ – толщина профиля стенки детали; $\chi$ – коэффициент, учитывающий несовпадение глубины наклена с глубиной залегания остаточных напряжений. $k_a$ – коэффициент учитывающий изменения предельных амплитуд напряжений.	
2	Расчёт количества инденторов в МОВ слое, шт	$N = \frac{2\pi i L}{ld} \left[ R - \frac{l(i+1)}{4} \right]$	2.51

<b>№ этапа</b>	<b>Содержание этапа</b>	<b>Расчётная зависимость</b>	<b>№ формулы</b>
2	Расчёт массы ферромагнитных инденторов, кг	$m = \frac{\pi d^2 l}{4} \cdot \rho$	
3	Определение момента инерции ферромагнитных инденторов, кг <sup>2</sup> м <sup>2</sup>	$I = \frac{1}{12} m l^2$	
4	Расчет магнитного момента ферромагнитных инденторов Дж/Тл	$\vec{p}_m = \frac{\mu - 1}{1 + (\mu - 1)J} \vec{H} \frac{\pi d^2}{4} l,$	
5	Определение энергетического состояния ферромагнитных инденторов, Дж	$E = \frac{p_m}{2\pi\omega^2} \left[ \frac{p_m}{I} B_v^2 + \frac{p_m}{m} \left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 \right]$	2.32
6	Определение скорости контактного взаимодействия инденторов с обрабатываемой поверхностью, м/с	$V_y = \frac{2E}{m} = \sqrt{\frac{p_m^2}{m\pi\omega^2} \left[ \frac{B_v^2}{I} + \frac{1}{m} \left[ \frac{\partial B_v}{\partial y} \right]^2 \right]}$	[61]
7	Расчёт диаметра пластического отпечатка, м	$d_k = \sqrt[4]{\frac{6 \cdot E \cdot d}{HV}}$	2.60
8	Определение минимальной скорости контактного взаимодействия инденторов, м/с	$V_{min} = \left( \frac{R_{a \text{ исх}} d_k}{K_m} \left[ \frac{0.477(\pi C \sigma_T)^{\nu+1}}{b} \right]^{\frac{1}{\nu}} \frac{(\nu - 1)^{\frac{(\nu-1)}{2\nu}}}{2\nu} \right)^{\frac{1+n}{2n}}$	5.1

<b>№ этапа</b>	<b>Содержание этапа</b>	<b>Расчётная зависимость</b>	<b>№ формулы</b>
9	Проверка условия	$V_y \geq V_{min}$	
10	Определение величины предельной энергии соударения ферромагнитных инденторов с обрабатываемой поверхностью, Дж	$E_{np} \approx 0,5\pi d \cdot HV \cdot R_{a_{ucx}}^2$	
11	Проверка условия	$E_y > E_{np}$	
12	Расчет среднеарифметической высоты профиля микронеровностей, МКМ	$R_{a_k} = \left[ R_{a_{ucx}} \pm \sqrt{\frac{2E}{\pi d HV}} \right] \left( 1 - K_{R_a} \frac{d_k}{d} \ln k \right)$	2.80
13	Расчет микротвердости в поверхностном слое, ГПа	$HV_k = \left[ \sqrt{\frac{32 E}{\pi d^3}} \cdot HV \right] \left( 1 + K_{HV} \frac{d_k}{d} \ln k \right)$	2.90
14	Расчет глубины упрочненного слоя, м	$h_{h_k} = \left[ 1.5 \cdot \sqrt[4]{\frac{32 Ed}{\pi HV}} (1.54 - 10^{-3}) \right] \left( 1 + K_{h_k} \frac{d_k}{d} \ln k \right)$	2.91
15	Расчет остаточных напряжений, МПа	$\sigma_{o_k} = \left[ 0.481 \left( \frac{E}{(r_{np})^3} \right)^{0.2} \right] k_\mu^{0.8} \left( 1 + K_{\sigma_o} \frac{d_k}{d} \ln k \right)$	2.92
18	Оценка усталостной прочности детали	$k_v = \frac{k_a \cdot \Delta HV}{1 - \frac{2 \cdot h_h \cdot \chi}{S}}$	[64]

### 5.3 Обоснование конструктивных и технических характеристик устройств для магнитодинамической обработки

Широкие возможности магнитоожиженного вращающегося слоя не позволяют однозначно определить конструкцию устройств. Однако, независимо от характера процесса, можно выявить основные элементы конструкции, наличие которых соответствует ключевым требованиям реализации возможностей МОВ слоя. К данным элементам относятся электромагнитная система (индуктор, генерирующий вращающееся электромагнитное поле), рабочая камера и ферромагнитные инденторы. Другие конструктивные элементы выполняются на основе от требований, устанавливаемых к конкретному устройству в зависимости от реализуемого процесса.

На рис. 5.1 представлена принципиальная схема устройства с вращающимся электромагнитным полем. Корпус 1, который представляет собой полый цилиндр, выполненный из немагнитного материала, помещён внутрь индуктора 2, генерирующего вращающееся электромагнитное поле. Индуктор размещен в металлической рубашке 3, которая служит емкостью для охлаждающей жидкости и в то же время экраном, который предохраняет рабочего от влияния электромагнитного поля. В корпусе установлена цилиндрическая втулка 4, которая является рабочей камерой устройства, во внутрь которой помещают ферромагнитные инденторы 5.

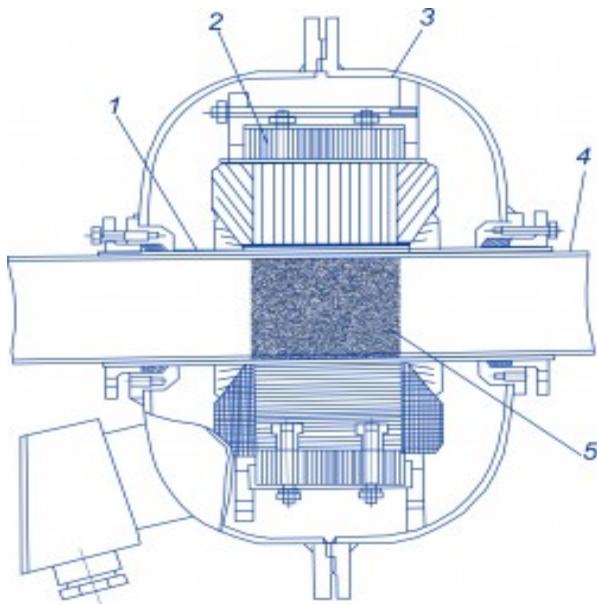


Рис. 5.1 Принципиальная схема устройства, реализующего ВЭМП.

В качестве охлаждающей жидкости используется сухое трансформаторное масло, которое непрерывно циркулирует в системе индуктор-теплообменник-маслобак-индуктор. В качестве охлаждающего агента могут быть использованы другие жидкости, а также газы.

Процессы в таком устройстве можно вести как непрерывно, так и циклически, подавая обрабатываемые изделия в рабочую зону с одной из сторон. В процессе обработки ферромагнитные инденторы не уносятся из рабочей зоны, адерживаются магнитным полем.

Рассмотрим характерные особенности основных узлов устройства. В работах [68] показано, что для создания в рабочей зоне вращающегося электромагнитного поля применяются цилиндрические индукторы, как внутреннего, так и наружного исполнения. Однако при соответствующем количестве пар полюсов индукция магнитного поля по мере увеличения расстояния от полюсов, у индуктора с наружным расположением катушек понижается в значительной степени быстрее, чем в расточке индуктора с внутренним расположением катушек[101]. В этой связи, для устройств с ВЭМП целесообразно применять цилиндрические наружные индукторы, электромагнитная система которых представляет собой кольцевую многофазную систему обмоток, размещенных в пазах магнитопровода.

Одним из основных условий эффективности работы МОВ слоя, а следовательно, и устройства является однородность магнитного поля в нормальном к оси индуктора сечении. В подобном поле ферромагнитные инденторы, движутся с переменной угловой скоростью, равномерно распределяясь по всему объему рабочей камеры, что обеспечивает отсутствие «темных зон», с непостоянством плотности заполнения рабочей камеры, и, как следствие, исключение участков непроклепа обрабатываемой поверхности детали при постоянном ведении технологического процесса. Ранее установлено, что двухполюсные индукторы создают поле с наибольшей однородностью. Поэтому для устройств с ВЭМП рекомендуется применять двухполюсные индукторы.

Одной из основных характеристик устройств с ВЭМП является величина магнитной индукции в центральной части расточки индуктора при холостом ходе, т. е. при условии отсутствия ферромагнитных инденторов. Данной величиной определяются скорость вращения магнитоожженного слоя, а соответственно, энергетические взаимодействия обрабатывающей среды с поверхностью детали. Опыт осуществления в устройствах с ВЭМП технологических процессов позволил определить целесообразный интервал индукции от 0,1 до 0,2 Тл [67].

Важным конструктивным параметром индукторов обуславливающего производительность устройства является длина и диаметр его расточки. На практике могут быть спроектированы и изготовлены индукторы с любым соотношением длины к диаметру его расточки. Однако целесообразно учитывать, что при выборе этого соотношения требуется руководствоваться условием минимального уровня потребляемого электрического тока для получения необходимой магнитной индукции в заданном диаметре расточки. Для его расчета можно использовать методику, предложенную А. П. Воскресенским [26], суть которой заключается в следующем. Поскольку в принципе индуктор представляет собой статор

трехфазного асинхронного электродвигателя, в расточке которого размещена немагнитная среда (наличием ферромагнитных инденторов в данном случае можно пренебречь), то ток индуктора практически не изменяется и равняется току холостого хода, то есть.

$$I_m = I_{m.x.x.} \quad (5.2)$$

Учитывая, что индуктор потребляет в основном реактивный ток ( $\cos\phi = 0,04-0,06$ ), можно записать, что

$$R_n \approx x + x_1 + x_p, \quad (5.3)$$

где  $R_n$  – полное сопротивление индуктора;  $x$  – индуктивное сопротивление индуктора;  $x_1$  – индуктивное сопротивление обмотки;  $x_p$  – индуктивное сопротивление главного поля.

Учитывая выражения (5.2) и (5.3), запишем следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} I_m &= \frac{U}{x}; \\ x &= \frac{4\pi f L n^2}{pq} \sum \lambda \cdot 10^9; \\ I_m &= \frac{2,22 F p}{m_\phi n f_W}, \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

где  $U$  – фазное напряжение индуктора;  $L$  – расчетная длина индуктора;  $f_c$  – частота сети;  $n$  – число витков на фазу;  $F$  – МДС, приходящаяся на полюс;  $\sum \lambda$  – суммарная проводимость потоков рассеяния с главного потока, проходящего через расточку индуктора;  $m_\phi$  – число фаз;  $f_W$  – обмоточный коэффициент;  $p$  – число пар полюсов.

Решив систему уравнений (5.4), получим значение тока, сопротивления и числа витков:

$$\left. \begin{aligned} I &= 2,22^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-9} \frac{f_c}{U} \cdot \frac{F^2 L}{m_\phi^2} \cdot \frac{\sum \lambda}{q f_W^2} \\ x &= \frac{10^9}{2,22^2 \cdot 4\pi} \cdot \frac{U^2}{f_c} \cdot \frac{m_\phi^2}{F^2 L p} \cdot \frac{q f_W^2}{\sum \lambda} \\ n &= \frac{10^9}{2,22^2 \cdot 4\pi} \cdot \frac{U}{f_c} \cdot \frac{m_\phi}{F L} \cdot \frac{q f_W}{\sum \lambda} \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

Значение МДС можно определить, интегрируя ее тангенциальную составляющую. Для бесконечно малого угла поворота

$$dF = 8 \cdot 10^2 B_v r_u d\varphi,$$

где  $B_v$  – значение тангенциальной составляющей индукции, Тл;  $r_u$  – расстояние от центра расточки индуктора, мм.

При условии  $r_u = \frac{D_u}{2}$  и  $t = 0$  МДС на полюс

$$F = 8 \cdot 10^2 \cdot \int_0^{2\pi} B_v r_u d\varphi \text{ или } F = 4 \cdot 10^9 D_u \frac{B_{\max}}{p},$$

где  $D_u$  – диаметр расточки индуктора.

Окончательное решение системы уравнений (5.5) принимает вид:

$$\begin{aligned}
 I &= k \frac{f_c}{U} \cdot \frac{D_u^2 L}{pm_\phi^2} B_{max} \frac{\Sigma \lambda}{q f_W^2}; \\
 x &= \frac{1}{k} \cdot \frac{U^2}{f_c} \cdot \frac{pm_\phi^2}{D_u^2 L} \cdot \frac{1}{B_{max}^2} \cdot \frac{q f_W^2}{\Sigma \lambda} \\
 n &= \frac{8,88 \cdot 10^9}{k} \cdot \frac{U}{f_c} \cdot \frac{pm_\phi}{D_u L} \cdot \frac{1}{B_{max}} \cdot \frac{q f_W}{\Sigma \lambda}
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

где  $k = 2,22^2 \cdot 4^3 \pi \cdot 10^{-5} \approx 10^{-2}$ .

Суммарная проводимость определяется по формуле:

$$\sum \lambda = \lambda_0 + \lambda_n + \lambda_s + \lambda_z,$$

где  $\lambda_0$  – проводимость магнитной цепи для главного потока;  $\lambda_n$  – проводимость рассеяния паза;  $\lambda_s$  – проводимость рассеяния лобовых витков обмотки;  $\lambda_z$  – проводимость рассеяния от внешних гармонических.

Отсюда следует, что основными параметрами индуктора является ток, индуктивное сопротивление и число витков на фазу, которые могут быть рассчитаны по уравнениям (5.6) без полного расчета индуктора. Анализируя данные уравнения видно, что при отношении длины индуктора к диаметру его расточки до значения 0,3 ток явнополюсного индуктора меньше, чем неявнополюсного. При наибольших значениях данного соотношения меньший ток потребляет индуктор с неявнополюсным сердечником.

На рис. 5.2 показан общий вид явнополюсного индуктора устройства с ВЭМП, выпускаемого серийно. Ярмо и полюса его набраны из изолированных лаком листов трансформаторной стали. Пластины полюсов стянуты изолированными стальными шпильками, а пластины ярма – двумя кольцами из немагнитной стали, скрепленными между собой по наружному диаметру ярма. Полюса крепятся к ярму специальными болтами.



Рис. 5.2. Общий вид индуктора устройства с ВЭМП.

Одним из наиболее простых по конструкции и наиболее ответственных узлов устройства с ВЭМП является размещенная внутри расточки индуктора рабочая камера. Корпус рабочей камеры и сменная втулка выполнены, как правило, из нержавеющей стали марки X18H10T или другого немагнитного материала, например, титана.

Сменная втулка, в которой находятся в движении ферромагнитные инденторы, является наименее долговечным узлом аппарата. Ранее установлено [67], что интенсивное движение ферромагнитных инденторов в МОВ слое, кавитация, акустические колебания среды, быстропеременные по направлению и величине электромагнитные поля, возникающая на поверхности металла разность потенциалов и механохимические явления приводят зачастую к разрушению втулки через 200–1000 ч работы.

#### **5.4 Формализация проектирования операций упрочняющей обработки магнитодинамическим методом**

Основным предназначением операций магнитодинамической обработки в технологии изготовления деталей машин, как было показано в предыдущих главах, является упрочнение детали с целью повышения её предела выносливости, износостойкости и других эксплуатационных свойств. Эта задача в процессе магнитодинамической обработки решается путем изменения геометрических и физико-механических характеристик качества и свойств материала поверхностного слоя, в результате чего: формируется качественно новая макро- и микрогеометрия поверхности; кристаллическая решетка материала поверхностного слоя получает упруго-пластические искажения, приводящие к формированию в поверхностном слое остаточных сжимающих микронапряжений и повышению микротвёрдости.

Разработанные на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований модели формирования параметров качества поверхностного слоя при магнитодинамической обработке позволяют эффективно осуществлять процесс поиска оптимальных условий обработки деталей и параметров технологической системы, в которой будет реализован рассматриваемый в работе метод.

Для создания САПР операции магнитодинамической обработки необходимо formalизовать не только расчет параметров процесса упрочнения, но и другие действия технолога, направленные на подбор конструктивных и энергетических характеристик оборудования, обрабатывающей среды и т.д. Расчёт оптимальных технологических параметров операции магнитодинамической обработки, с учетом проведенных в этом направлении исследований, представлен на рис. 5.3 и включает в себя следующую последовательность действий:

1. Анализ исходных данных для проектирования, которыми являются:

а) конструктивные параметры упрочняемой детали: её геометрическое и размерное описание, материал и механические свойства (твёрдость, предел прочности, динамический предел текучести и т.д.), вес, требуемые эксплуатационные показатели;

б) технологические ограничения на операцию: требуемые показатели качества поверхности, минимально допустимые энергосиловые параметры и др.;

в) организационно-экономические ограничения: ожидаемые производительность и себестоимость и, при необходимости, санитарно-гигиенические и экологические ограничения.

2. Ввод варьируемых технологических параметров магнитодинамической обработки, обусловленных конструкторскими и технологическими возможностями устройства, обеспечивающего ВЭМП, именно: геометрические размерные соотношения ферромагнитных инденторов, индукция магнитного поля и частота его вращения.

3. Оператор 3 осуществляет расчёт эффективного количества ферромагнитных инденторов, загружаемых в рабочую камеру устройства с ВЭМП, исходя из условия, установленного в результате экспериментальных исследований, что толщина МОВ слоя не должна превышать трёх длин ферромагнитного индентора.

4. Подсистема 4 определяет энергетическое состояние ферромагнитных инденторов и их энергосиловые характеристики ударно-импульсного воздействия на поверхность обрабатываемого материала.

5. Оператор 5 оценивает энергетическое состояние ферромагнитных инденторов с позиции достаточности усилия ударно-импульсного воздействия для развития пластической деформации в зоне контактного взаимодействия индентора с поверхностью обрабатываемого материала и, как следствие получения упрочняющего эффекта. В случае недостаточности подаётся команда оператору 2 для изменения варьируемых технологических параметров. При соблюдении условия происходит переход к подсистеме 6.

6. В рамках подсистемы 6 осуществляется расчёт параметров качества упрочнённого поверхностного слоя, т.к. среднеарифметическое отклонение профиля, микротвёрдость, величина остаточных сжимающих напряжений и оценка повышения усталостной прочности..

7. Оператор 7 введен в программу расчёта, если при осуществлении упрочняющей обработки предусмотрены требования по качеству поверхности, которые могут выступать в качестве критериев обработки.

8. Подсистема 8 производит расчёт продолжительности магнитодинамической обработки.

9. Оператор 9 предусматривает обеспечение требуемой по условиям производства конкретных деталей производительности магнитодинамической обработки.

10. По результатам проведенных в рамках предложенной программы расчётов оператор выполняет выход на печать наиболее рациональных технологических параметров операции упрочняющей обработки деталей магнитодинамическим методом, а также соответствующих ему параметров качества поверхности.

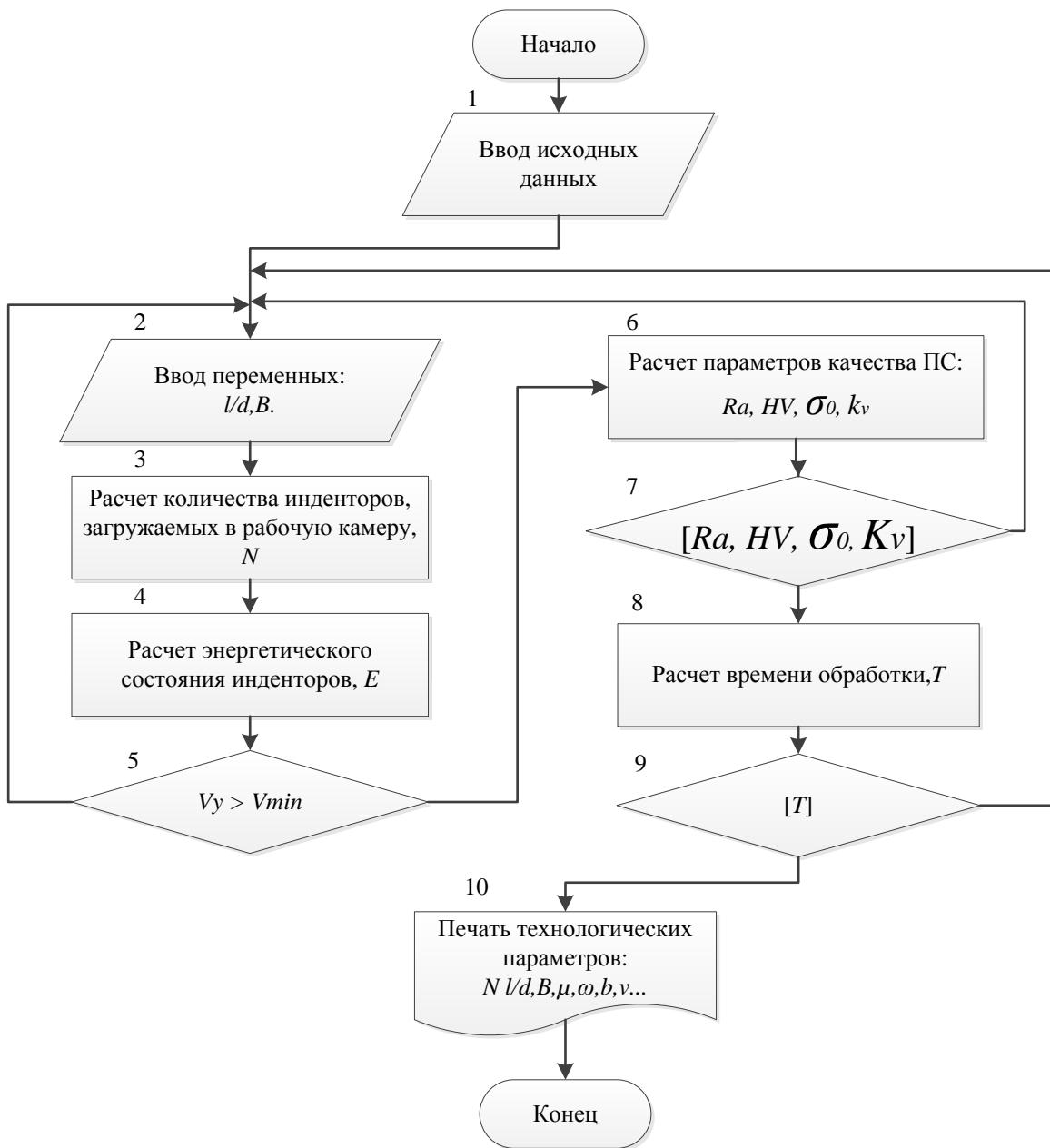


Рис. 5.3 Алгоритм проектирования операции магнитодинамической обработки.

Реализация такой системы с использованием ЭВМ позволяет полностью формализовать проектирование операций упрочнения магнитодинамическим методом, а её структура приемлема для встраивания в существующие и проектируемые САПР ТП изготовления деталей.

## 5.5 Практическое применение и технико-экономическое обоснование магнитодинамической обработки

Результаты диссертационного исследования и разработанный на их основе метод магнитодинамической упрочняющей обработки прошли апробацию на ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева» в г. Таганроге. Объектом магнитодинамической упрочняющей обработки являлись несущие длинномерные детали, применяемые в узлах летательных аппаратов (лонжерон, стрингер, пояс верхний) и представленные на рис.5.5. Испытания, проведённые на фрагментах промышленных деталей, в условиях специально разработанного и изготовленного на предприятии опытного образца устройства с ВЭМП, показали приемлемость разработанной в диссертационной работе методики выбора технологических параметров магнитодинамической упрочняющей обработки для обеспечения качества деталей в соответствии с требованиями технической документации на их изготовление.

Разработанный магнитодинамический метод предложен в качестве альтернативного метода упрочнения длинномерных деталей. На ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева» для упрочнения деталей по существующей технологии используется установка дробеметного упрочнения УДП-2,5 предприятия-изготовителя ОАО «Электромеханика». Ввиду отсутствия другого оборудования на ТАНТК все детали, включая мелкогабаритные, упрочняются на этом оборудовании.



Рис. 5.4. Детали, подвергаемые упрочняющей обработке.

Процесс магнитодинамической упрочняющей обработки длинномерных деталей может быть реализован на установках проходного типа. Принципиальная схема такой обработки показана на рис. 5.6.

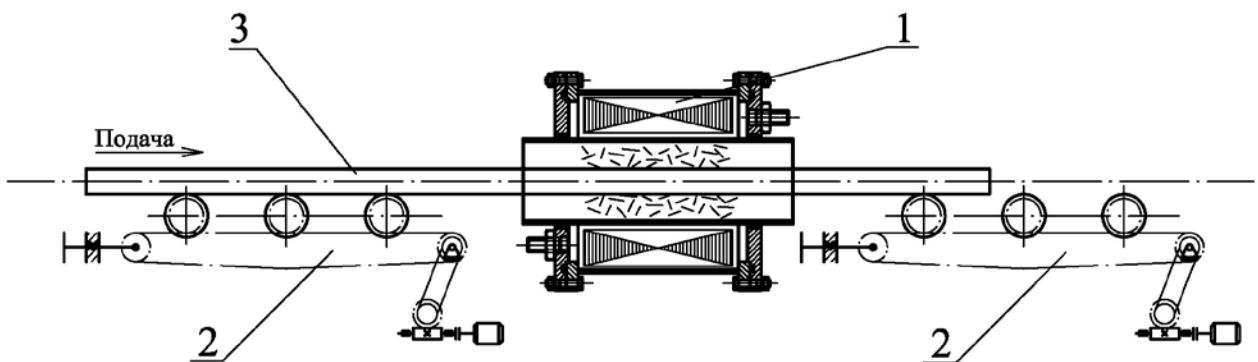


Рис. 5.5. Схема обработки длинномерных деталей: 1-рабочий блок устройства с ВЭМП; 2-приводной роликовый рольганг; 3-деталь.

Для непрерывного ведения процесса обработки длинномерных деталей целесообразно применять подающее устройство, обеспечивающее прохождение деталей через рабочую зону устройства с ВЭМП. Как видно на схеме, при обработке длинномерных деталей область охватывания поверхности детали, а следовательно, и производительность процесса зависят от объема рабочей камеры. Как было указано выше, индукторы с отношением длины рабочей зоны к ее диаметру свыше 0,3 целесообразно изготавливать в неявнополюсной форме исполнения. Индукторы с удлиненной рабочей зоной обладают соизмеримой активной мощностью, что при данной конструкции позволяет сократить число витков в полюсных катушках и, соответственно, уменьшить наружный диаметр индуктора. Данная форма исполнения позволяет достичь увеличения производительности процесса при обработке длинномерных деталей, за счет увеличения площади охвата поверхности обрабатываемой детали, а также сократить количество проскоков (вылета) обрабатывающей среды, за счет более замкнутого рабочего пространства. В случае обработки деталей малых размеров, детали необходимо закреплять на оси, размещая их в пространстве рабочей камеры. Закреплять детали можно прижимными устройствами типа струбцины.

Технико-экономические преимущества магнитодинамической упрочняющей обработки длинномерных деталей приведены в табл. 5.3.

Сравнительный анализ технических характеристик установок для упрочнения длинномерных деталей типа «пояс верхний»

<b>№ п/п</b>	<b>Характеристика</b>	<b>Ед. изм.</b>	<b>Установка УДП-2,5</b>	<b>Установка на базе устройства с ВЭМП</b>
1.	Напряжение питающей сети	В	380	380
2.	Номинальная частота	Гц	50	50
3.	Число фаз	шт	3	3
4.	Установленная мощность	кВт	185	7
5.	Габаритные размеры обрабатываемого изделия:  длина ширина высота	мм	6500 400 1600	14000 150 150
6.	Материал изделия	-	АК-4-1ЧТ В95пчТ1, - T2,-T3, 1163	Все немагнитные сплавы
7.	Размер обрабатывающей среды	мм	Дробь Ø2 мм	Цилиндры $l/d = 8-12$ $d=1-3$ мм
8.	Скорость перемещения изделия	м/мин	0,5-5	В зависимости от длины техноло- гической зоны рабочей камеры
9.	Производительность (по обрабатывающей среде)	кг/мин	210	0,1
10.	Объем загрузки	кг	5000	1-15
11.	Уровень шума, не более	дБА	80	80
12.	Габаритные размеры:  длина ширина высота	мм	36000 6400 8800	720 880 1100

Как видно из табл. 5.3, упрочнение длинномерных деталей на установке проходного типа, реализующей магнитодинамический метод обработки, по сравнению с существующей технологией упрочнения на УДП-2,5 позволит значительно снизить материалоёмкость и энергоёмкость оборудования, сократить технологическое время обработки, перекрыть вспомогательное время на установку и, как следствие, повысить производительность процесса упрочнения, обеспечив параметры качества поверхностного слоя, регламентируемые техническими требованиями.

Расчёт конструкторско-технологических параметров магнитодинамической упрочняющей обработки длинномерных деталей типа «пояс верхний» представлен в приложении.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Применение вращающегося электромагнитного поля в качестве источника энергии свободнодвижущихся ферромагнитных инденторов является основой для разработки и совершенствования новой разновидности динамических методов ППД – магнитодинамической обработки.
2. Магнитодинамическая обработка расширяет технологические возможности динамических методов ППД конвективными потоками свободнодвижущихся инденторов и позволяет обеспечить эффективную отделочно-упрочняющую обработку внутренних полостей, длинномерных тонкостенных деталей.
3. Технологический эффект магнитодинамической обработки обусловлен движением большого количества ферромагнитных неравноосных инденторов, помещённых во вращающееся электромагнитное поле, которые в совокупности формируют МОВ слой, взаимодействующий с обрабатываемой поверхностью и являющийся результатом воздействия на каждый индентор целого комплекса сил и моментов.
4. Установлено, что режим магнитоожижения возможен при условии  $B_c \ll B_v$ , так как в противном случае дисперсная система переходит в структурированное состояние; для устойчивого процесса магнитоожижения вращающегося слоя диссилируемая и подводимая энергии должны быть равны; переход МОВ слоя из магнитоожженного состояния в «твёрдую» фазу произойдет при снижении индукции ВЭМП ниже 0,08 Тл.
5. На основе анализа энергетического баланса получено выражение для оценки энергетического состояния ферромагнитных инденторов, позволяющее обосновать энерго-силовые условия ударно-импульсного воздействия при которых обеспечивается развитие пластической деформации в зоне контактного взаимодействия индентора с поверхностью обрабатываемого материала и как следствие упрочняющий эффект.
6. Характер силового воздействия ферромагнитных инденторов зависит от степени стесненности их в МОВ слое. Экспериментально подтверждено, что масса загрузки в рабочую зону устройства инденторов, образующих МОВ слой, не должна превышать 3-х радиально расположенных кольцевых слоёв, соизмеримых с длиной индентора.
7. Полученная на основе теоретико-вероятностных представлений зависимость позволяет обоснованно прогнозировать продолжительность магнитодинамической обработки и, как следствие, оценить производительность процесса.
8. Предложенные для определения параметров качества упрочнённого в процессе магнитодинамической обработки поверхностного слоя расчётные зависимости в явном виде раскрывают влияние на их формирование энергетического состояния и размеров инденторов,

геометрических характеристик исходной поверхности и механических свойств обрабатываемого материала. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что предложенные зависимости с точностью 10-15 % могут быть применены при проектировании технологии магнитодинамической обработки деталей.

9. Разработанный алгоритм выбора технологических условий обработки и рекомендации по конструктивному исполнению устройств с ВЭМП дают возможность формализовать проектирование операций упрочнения магнитодинамическим методом и способствуют повышению эффективности процесса технологической подготовки производства в САПР ТП.

10. Установки проходного типа, реализующие магнитодинамический метод обработки по сравнению с существующей технологией упрочнения на УДП-2,5 позволяют значительно снизить материалоёмкость и энергоёмкость оборудования, сократить технологическое время обработки, перекрыть вспомогательное время на установку деталей и как следствие повысить производительность процесса упрочнения, обеспечив параметры качества поверхностного слоя, регламентируемые техническими требованиями.

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

1. Дальнейшие исследования в области применения магнитодинамической упрочняющей обработки деталей из различных материалов, в том числе ферромагнитных.
2. Расширение области использования магнитодинамической обработки внутренних поверхностей полых деталей.
3. Разработка технологических схем и конструкции устройств с вращающимся электромагнитным полем, обеспечивающих повышение производительности процесса и обработку деталей различных по форме и конфигурации тонкостенных деталей.
4. Исследование влияния магнитного эффекта на качество поверхности, эксплуатационные свойства деталей, формируемых в процессе магнитодинамической обработки.
5. Изучение возможности применения магнитодинамической для упрочнения сварочных соединений и нанесения покрытий различного функционального назначения.
6. Исследование стойкостных свойств рабочих сред для магнитодинамической обработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апполонский С.М. Электротехника и электроника. Трехфазные электрические цепи Учеб. Пособие / С.М. Апполонский, В.В. Леонтьев. – СПб.: СЗТУ, 2002. – 59 с.
2. Бабичев А.П. Виброударная и виброволновая упрочняющая обработка в технологии изготовления и ремонта деталей транспортных средств (на примере летательных аппаратов, автомобильного и Ж.Д. транспорта) / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев, П.Д. Мотренко и др. // Волновые, виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях: сб. тр. по материалам междунар. науч. симп. технологов-машиностроителей, 7 – 10 окт. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2014. – С. 3-11.
3. Бабичев А.П. Описание процесса удаления металла при гидроабразивной обработке / А.П. Бабичев, Н.Т. Мишняков // Вопросы вибрационной технологии: межвузовский сб. науч. статей по материалам междунар. науч.-техн. конф. «Новые достижения, практическая реализация и перспективы развития методов обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД)». – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2012. – 246 с.
4. Бабичев А. П. Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.
5. Бабичев А.П. Теория вероятности в решении технологических задач (на примере вибрационной обработки в гранулированных средах) / А.П. Бабичев и др. – Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2013. – 126 с.
6. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. – Л.: Машиностроение, 1986. – 172 с.
7. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
8. Барон Ю.М. Технология абразивной обработки в магнитном поле / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1975. – 127 с.
9. Батуев Г.С. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г.С. Батуев, Ю.В Голубков, А.К. Ефремов, и др. – Машиностроение, 1977. – 240с.
10. Бернштейн М.Л. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле / М.Л. Бернштейн, В.Н. Пустовойт. – М.: Машиностроение, 1987. – 256 с.
11. Бибик Е.Е. Реология дисперсных систем / Е.Е. Бибик. – Л.: Энергия, 1981. – 172 с.
12. Биргер И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. М.: Машгиз, 1968. – 232 с.
13. Болдырев А.И. Инженерия поверхностного слоя изделий при электрохимической и комбинированной обработке / А.И. Болдырев // Вестник ДГТУ. 2009. Т. 9. № 4(43). С. 627-635.

14. Болдырев А.И. Моделирование процесса комбинированной электро-химикомеханической обработки / А.И. Болдырев // Вестник ВГТУ. 2010. Т. 6. №2. С. 141-145.
15. Болдырев А.И. Энергетический анализ создания поверхностного слоя с заданными эксплуатационными свойствами / А.И. Болдырев, Т.В. Тришина // Новые процессы получения и обработка металлических материалов: мат. со-вещ. Воронеж: АН СССР, 1990. С. 46-48.
16. Болога М.К. Магнитоожижение во вращающемся магнитном поле / М.К. Болога, И.Ф. Марта // Магнитная гидродинамика. – 1988. – № 3. – С. 103-108.
17. Болога М.К. Некоторые динамические аспекты магнитоожиженных слоев / М.К. Болога, В.М. Заморев, С.В. Сюткин // Электронная обработка материалов. – 1986. – №1. – С. 59-63.
18. Бороухин Ю.А. О стойкостных зависимостях сверл, подвергнутых магнитной обработке / Ю.А. Бороухин // Труды Горьковского политехнического института. – Вып. 39. – 1977. – С 36-39.
19. Брандт З. Статические методы анализа данных. / З. Брандт – М.: Мир, 1975. – 311 с.
20. Буевич Ю.А. О движении частиц при магнитоожижении в переменном поле / Ю.А. Буевич, М.К. Болога, С.В. Сюткин и др. // Магнитная гидродинамика. – 1985. – № 3. – С. 3-12.
21. Буевич Ю.А. К теории развитого магнитоожиженного слоя / Ю.А. Буевич, С.В. Сюткин, В.В. Тетюхин // Магнитная гидродинамика. – 1984. – № 4. – С. 3-11.
22. Бутенко В.И. Локальная отделочно-упрочняющая обработка поверхностей деталей машин / В.И. Бутенко. Таганрог: ТРТУ, 2006. - 126 с.
23. Вернигоров Ю.М. Магнитовибрационная технология производства порошковых магнитов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08, 05.16.06 / Вернигоров Юрий Михайлович. – Ростов н/Д, 1995. – 369 с.
24. Вершинин Н.П. Установки активации процессов. Использование в промышленности и сельском хозяйстве: учебное пособие / Н.П. Вершинин. – Сальск: Международная Академия авторов открытий и изобретений, 2004. – 313 с.
25. Винтер Э.К. Магнитный резонанс в металлах / Э.К. Винтер. – М.: Мир, 1976. – 486 с.
26. Воскресенский А.П. Некоторые вопросы проектирования индукционных вращателей / А.П. Воскресенский // ВНИИЭМ. – Т.36, 1971. – С. 96-110.
27. Галей М.Т. Изучение влияния магнитного поля на стойкость быстрорежущего инструмента / М.Т. Галей, В.С. Ашехнин // Станки и инструмент. – 1981. – № 6. – С. 31-34.
28. Гаркунов Д.Н. О природе повышения износстойкости деталей и инструмента магнитной обработкой / Д.Н. Гаркунов, Г.И. Сураинов, Г.Б. Коптяева // Трение и износ. – 1982. – № 2. – С. 496-498.

29. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1972. – 368 с.
30. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей / Б.В. Гнеденко. – М.: Наука, 1988. – 448 с.
31. Гольдштик М.А. Об ударе шара о твердую поверхность / М.А. Гольдштик, А.И. Леонтьев // ИФЖ. – 1960. - № 11. – С. 218-233.
32. Давиденков Н.Н. Измерение остаточных напряжений в дисках / Н.Н. Давиденков, Заводская лаборатория. – 1959. – № 3.
33. Довгалев А. М. Классификация инструментов для магнитно-динамического упрочнения / А.М. Довгалев, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2008. – № 2 (19). – С. 30 – 38.
34. Дрозд М.С. Инженерные расчеты упругопластической деформации / М.С. Дрозд, М.И. Матлин, Ю.И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 204 с.
35. Жданович В.И. Исследование процесса магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Жданович Венедикт Иванович. – Минск, 1974. – 21 с.
36. Исследование критического коэффициента заполнения аппарата с вихревым слоем ферромагнитными частицами. – «Химическое и нефтяное машиностроение», 1973, № 11. Авт.: В.В. Кафаров, Д.Д. Логвиненко, О.П. Щеляков, В.Л. Кирейкова, Е.И. Полщипкова.
37. Калинин В.Ф. Цепи трёхфазного тока в электрооборудовании: учебно- методический комплекс / В.Ф. Калинин, В.М. Иванов, Е.А. Печагин. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 260 с.
38. Кафаев В.А. Области применения аппаратов с вихревым слоем, создаваемым электромагнитным полем / В.А. Кафаев, Д.Д. Логвиненко, О.В. Цанткер и др. // Химическое и нефтяное машиностр. – 1974. – № 11. – С. 718-721.
39. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием: Библиотека технолога./ А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. – М: Машиностроение, 2004. – 288 с.
40. Кобчиков В.С. Технология магнитно-абразивного полирования изделий из твердых сплавов: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Кобчиков Валентин Семенович. – Л., 1985. – 21 с.
41. Козлюк А.Ю. Повышение стойкости режущего инструмента путем комбинированной магнитно-импульсной обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Козлюк Андрей Юрьевич. – Бийск, 1995. – 136 с.
42. Колесов, И. М. Основы технологии машиностроения / И. М. Колесов. – М.: Высшая школа, 2001. – 591 с.

43. Коновалов Е.Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е.Г. Коновалов, Г.С. Шулев. – Минск: Наука и техника, 1967. – 125 с.
44. Коновалов Е.Г. Чистовая упрочняющая ротационная обработка поверхностей / Е.Г. Коновалов, В.А. Сидоренко. Минск: Вышэйшая школа, 1968. – 363 с.
45. Копылов Ю.Р. Вибрационное упрочнение / Ю.Р. Копылов. – Воронеж: ВИВД, 1999. – 386 с.
46. Кочубей А.А. Динамические аспекты процесса обработки ферромагнитными гранулированными средами во вращающемся электромагнитном поле / А.А. Кочубей, В.А. Лебедев, М.М. Чаава // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): сб. тр. VI всероссийской науч.-техн. конф. с международным участием, 25-27 апреля / под ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016 г. – С. 98-105.
47. Кочубей А.А. Кинетическое состояние ферромагнитных инденторов в магнитоожженном вращающемся слое / А.А. Кочубей, В.А. Лебедев // Аграрный потенциал в системе продовольственного обеспечения: теория и практика: сб. тр. всероссийской науч.-практ. конф., 21-22 июня. – Ульяновск; Ульяновская ГСХА, 2016 г. – Ч.2. – С. 83-89.
48. Кочубей А.А. Остаточные напряжения после магнитодинамической упрочняющей обработки / А.А. Кочубей, А.А. Ломовцев // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2016. – №7-1. – С. 99-104.
49. Кочубей А.А. Применение вращающегося электромагнитного поля в технологических целях / А.А. Кочубей, В.А. Лебедев // Интегрированные и виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и др. отраслях: сб. ст. Междунар. науч. симпозиум технологов-машиностроителей, 30 сентября-03 октября, п. Дивноморское. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2015. – С. 210-217.
50. Кудрявцев И.В. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении / И.В. Кудрявцев. – М.: Машгиз, 1951. – 278 с.
51. Кудрявцев И.В. Исследование по упрочнению деталей машин. М.: Машиностроение, 1972. – 327 с.
52. Кудрявцев И.В. Поверхностный наклеп для повышения прочности и долговечности деталей машин / И.В. Кудрявцев. М.: Машиностроение, 1969. – 100 с.
53. Кухарская Э.В. Модификация поверхности каолина органическими и кремнийорганическими полимерами с помощью ультразвука / Э.В. Кухарская, Ю.И. Сорокин // «Каучук и резина». – 1966. – № 10. – С. 51-63.
54. Лебедев В.А. Закономерности процесса упрочнения деталей гранулированными средами в виброударных технологических системах / В.А. Лебедев, Г.В. Серга, А.А. Кочубей // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 6(314). – С. 78-81.

55. Лебедев В.А. Моделирование процесса ППД свободнодвижущимися инденторами / В.А. Лебедев, А.А. Кочубей, А.А. Ломовцев // Динамика технических систем – 2015: сб. тр. XII Междунар. научно-технической конференции, 16-17 декабря / под ред. А.Д. Лукьянова. – Ростов н/Д, 2015. – С. 295 – 299
56. Лебедев В.А. Моделирование характеристик качества поверхностного слоя, упрочненного в процессе магнитодинамической обработки / В.А. Лебедев, А.А. Кочубей, И.В. Чумак // Вестник ДГТУ. – 2016. – Т.16, №3(86). – С. 71-78
57. Лебедев В.А. Обоснование эффективной загрузки ферромагнитными инденторами рабочей зоны устройства для магнитодинамической обработки / В.А. Лебедев, А.А. Кочубей, А.Г. Хведелидзе // Современные аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности: сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. Технические науки, 20 мая, г. Таганрог. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2016. – С. 161-166.
58. Лебедев В.А. Особенности обработки деталей гранулированными средами в условиях магнитоожженного вращающегося слоя / В.А. Лебедев, Ю.М. Вернигоров, А.А Кочубей // Наукоймкие технологии на современном этапе развития машиностроения (ТМ-2016): сб. тр. VIII Международной науч.-техн. конф., 19-21 мая. – М: Техполиграфцентр, 2016 г. – С. 104-106.
59. Лебедев В.А. Отделочно-упрочняющая обработка деталей свободнодвижущимися инденторами в условиях вращающегося электромагнитного поля / В.А Лебедев, А.А. Кочубей // Аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности: материалы XIII регион. науч.-практ. конф. учреждений высш. и сред. проф. образования, г. Таганрог, 21 мая. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2015. – С. 245-247.
60. Лебедев В.А. Оценка параметров качества поверхностного слоя, упрочненного в процессе магнитодинамической обработки / В.А. Лебедев, А.А. Кочубей, И.В. Чумак // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. – №8, Ч. 2. – С. 56-63.
61. Лебедев В.А. Оценка производительности упрочняющей обработки в условиях вращающегося электромагнитного поля / В.А. Лебедев, А.А. Кочубей, М.М. Чаава и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – №7(139). – С. 19-24.
62. Лебедев В.А. Сущность и закономерности динамики процесса обработки ферромагнитными гранулированными средами во вращающемся электромагнитном поле / В.А. Лебедев, Ю.М. Вернигоров, А.А. Кочубей // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. – №1(52). – С. 84-91.
63. Лебедев В.А. Технологическое обеспечение качества поверхности при вибрационной ударно-импульсной обработке: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Лебедев Валерий Александрович. – Тула, 1984. – 185с.

64. Лебедев В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования / В. А. Лебедев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. – 183 с.
65. Лебедев В.А. Энергетические аспекты отделочно-упрочняющей обработки деталей в условиях вращающегося электромагнитного поля / В.А. Лебедев, Ю.М. Вернигоров, А.А. Кочубей и др. // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2016. – №6(60). – С. 35-42.
66. Литвиненко В.А. Финишная обработка фасонных поверхностей с высокими требованиями к качеству методом МАП с вращающейся рабочей зоной: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Литвиненко Валентина Алексеевна. – Л., 1985. – 22 с.
67. Логвиненко Д.Д., Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем / Д.Д. Логвиненко, О.П. Щеляков. – Киев: «Техника», 1976. – 143 с.
68. Логвиненко Д.Д. Определение основных параметров аппаратов с вихревым слоем / Д.Д Логвиненко, О.П. Щеляков, Г.А. Польщиков. – Химическое и нефтяное машиностроение. – 1974, № 1. – С. 200-206.
69. Лурье А.И. Уравнения Лагранжа-Максвелла в курсе теоретической механики / А.И. Лурье, К.Ш. Ходжаев // В кн.: сб. научн.-метод. статей по теор. мех. – Вып.6. – М.: Высшая школа. – 1976. – с. 72-81.
70. Макаров А.Д. Некоторые вопросы влияния магнитного поля на стой-костные характеристики режущего инструмента / А.Д. Макаров // Труды Уфимского политехнического института. – Вып. 77. – 1975. – С. 176-178.
71. Малегон И.П. Упруго-пластическая деформация – единая основа методов ППД / И.П. Малегон // сб. науч. тр. АТИ. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ. – 2009. – С. 39-54.
72. Малыгин Б.В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 112 с, ил.
73. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1989. – 237 с.
74. Марта И.Ф. Магнитоожижение во вращающемся магнитном поле / И.Ф. Марта // Магнитная гидродинамика. –1987. – № 4. – С. 83-90.
75. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. Киев: Техника, 1971. – 142с.
76. Мирошниченко В.Ф. Термодинамические основы процесса влияния электромагнитных полей на расплав полимеров / В.Ф. Мирошниченко, Н.И. Семенюк // «Пластические массы». – 1970. – № 10. – С. 62-70.
77. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием Текст. / Л. Г. Одинцов [и др.]; справочник. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.

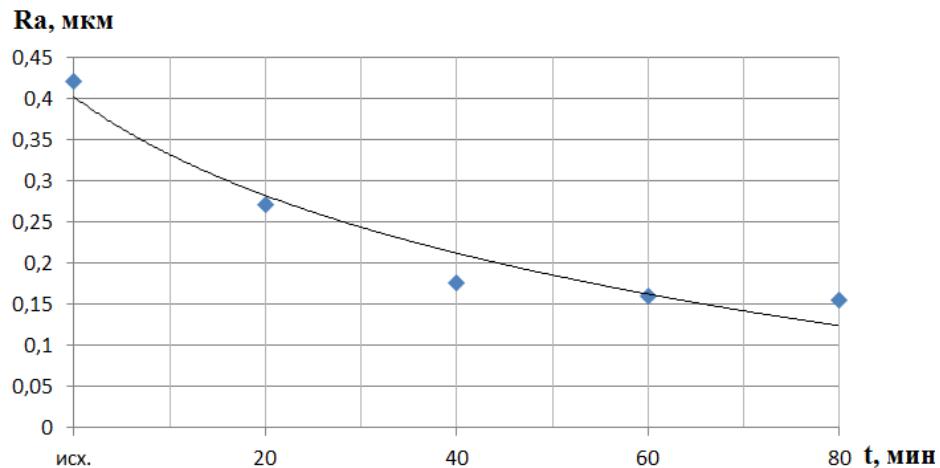
78. Панченко В.М. Исследование технологических возможностей магнитно-абразивной обработки для повышения эксплуатационных свойств деталей машин: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Панченко Владимир Михайлович: – Брянск, 1976. – 20 с.
79. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – Л.: Политехника, 1990. – 272 с.
80. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д.Д. Папшев.-М. Машиностроение, 1978. – 152с.
81. Петров В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента / В.В. Петров. – М.: Машиностроение, 1977. – 166 с.
82. Полетаев В.А. Исследование на износостойкость зубчатых колес, упрочненных импульсной магнитной обработкой / В.А. Полетаев, А.Н. Шабалин // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 3. – С. 26–27.
83. Полетаев В.А. Магнитно-импульсная обработка пильчатой гарнитуры чесальных машин / В.А. Полетаев, Н.В. Третьякова // Текстильная промышленность. – 1995. – № 3. – С. 20–21.
84. Полетаев В.А. Повышение долговечности медицинских метчиков методом импульсной магнитной обработки / В.А. Полетаев, А.А. Зайцев // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 3. – С. 29–30.
85. Полетаев В.А. Применение ферромагнитной жидкости при упрочнении деталей машин импульсной магнитной обработкой / В.А. Полетаев, И.З. Басыров, А.С. Орлов // Вестник машиностроения.– 2002. – № 3. – С. 40–43.
86. Поливанов К.М. Об одной задаче расчета вращающегося: электромагнитного поля / К.М. Поливанов, С.А. Левитан // Электротехника. – №12, 1969. – С. 24-26.
87. Рыковский Б.П. Местное упрочнение деталей поверхностным пластическим наклепом / Б.П. Рыковский, В.А. Смирнов, Г.М. Щетинин. – М.: Машиностроение, 1985. – 152 с.
88. Сакулевич Ф.Ю. Магнитно-абразивная обработка точных деталей / Ф.Ю. Сакулевич, Л.К. Минин, Л.А. Олendorf. – Минск: Вышэйш. шк., 1977. – 288 с.
89. Саверин М.М. Дробеструйный наклеп / М.М. Саверин. – М.: Машгиз, 1955. – 312 с.
90. Скворчевский Н.Я. Исследование производительности магнитно-абразивной обработки и качества поверхности при применении различных смазочно-охлаждающих жидкостей: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Скворчевский Николай Яковлевич: – Минск, 1980. – 21 с.
91. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки // Г.Л. Амитан, И.А. Байсупов, Ю.М. Барон и др.; Под общ. Ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 719 с., ил.

92. Степанова Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие / Т.Ю. Степанова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2009. – 64с.
93. Субач А.П. Динамика процессов и машин объемной обработки / А.П. Субач. – Рига: Зинатне, 1991. – 400 с.
94. Тамаркин М.А. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / Тамаркин Михаил Аркадьевич: – Ростов-н/Д, 1995. – 310 с.
95. Таранов А.С. Повышение эффективности упрочнения поверхности валов при ремонте сельскохозяйственной техники поверхностным пластическим деформированием в переменном магнитном поле: автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / Таранов Алексей Степанович. – Челябинск, 2010. – 44 с.
96. Хаар де Тер. Основы гамильтоновской механики / Хаар де Тер. – М.: Наука, 1974. – 223 с.
97. Цайткер К.Л. Герметичный аппарат для проведения процессов в псевдоожженном слое / К.Л. Цайткер, Д.Д. Логвиненко // «Химическое и нефтяное машиностроение». – 1971. – № 4.
98. Черданцев И.А. Теория переменных токов / И.А. Черданцев. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1932. – 500 с.
99. Чечерников В.И. Магнитные измерения / В.И. Чечерников // Под ред. профессора Е.И. Кондорского. – М.: Изд-во Московского университета, 1963. – 386 с.
100. Шевцов С.Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах. / С.Н. Шевцов. – Ростов н/Д: изд-во СКНЦ ВШ, 2001. – 194 с.
101. Янке Д. Специальные функции (формулы, графики, таблицы) / Д. Янке, Ф. Эдме, Ф. Леш. – М.: Наука, 1968. – 344 с.
102. Babichev I.A., Prokopetch G.A. Formation of regular microrelief on surface while processing by multicontact vibrohitting tool | 2th International Technological-Scientific Conference. Polska/Gorz:Wlkp / Lubniewice, 1993. P. 275-278.
103. Baraff D. Analytical methods for dynamic simulation of nonpenetrating rigid bodies. Computer Graphics, 1989, v.23, No.3, pp.223-232.
104. Batrouni G.G. et al. Stochastic model for the motion of particle on an inclined rough plane and the onset of viscous friction. Phys. Rev. E, 1996, 53, No.6, pp. 6496-6503
105. Bideau D., Hansen A. Disorder and Granular Media,. Elsevier, (North Holland, Amsterdam), 1993, 178 p.
106. Bizon C. et al. Patterns in 3D vertically oscillated granular layers.-simulation and experiment. Phys.Rev.Lett., v.80, No.1, 1998, pp.57-60.

107. Brach R.M. Mechanical impact dynamic: Rigid body collisions. 1991, John Wiley & Sons, New York, 126 p.
108. Chatterjee A., Ruina A. Two interpretations of rigidity in rigid-body collisions. Trans. ASME. J. Appl. Mech., V.65, Dec. 1998, pp.894-900.
109. Duffy J., Mindlin R.D. Stress-Strain Relations and Vibrations of Granular Medium. ASME Journal of Applied Mechanics. 1957, 24, pp.585-593.
110. Elliott T.L. Surface hardening. Tribol Int. 1978. V.1 1, №2. P.121-125.
111. Fauve S., Douady S., Laroche C. Collective behaviors of granular masses under vertical vibration. J. Phys. France, 1989, Vol. 50, No. 3, pp. 187-191.
112. Goodman L.E. Contact stress analysis of normally loaded rough spheres. ASME J. Appl.Mech., 1962, v.29, pp.515-522.
113. Goyal S., Pinson E.N., Sinden F.W. Simulation of dynamics of interacting rigid bodies including friction 1: General problem and contact model. Engineering with cimputer. 1994, v. 10, pp. 162-174.
114. Hall W.F., Busenberh S.N. Viscosity of magnetic suspension. Y. ChemPhys 1969. – vol. 51. – N1. – P.137-144.
115. Howard J.R. Fluidized bed technology-Principles and applications. Adam Hingler Ed., 1990, (ISBN 0-85274-055-7) 263 p.
116. Ichiki K., Hayakawa H. Analisis of statistical quantities in simulation of fluidized beds. Phys.Rev.E.-1998-57, No.2, pp. 1990-1996.
117. Jyson L.et al. Subharmonic Motion of Particles in a Vibrating Tube. Phys.Rev.E, 1998, 58, No.2a, pp. 1218-1221.  
.

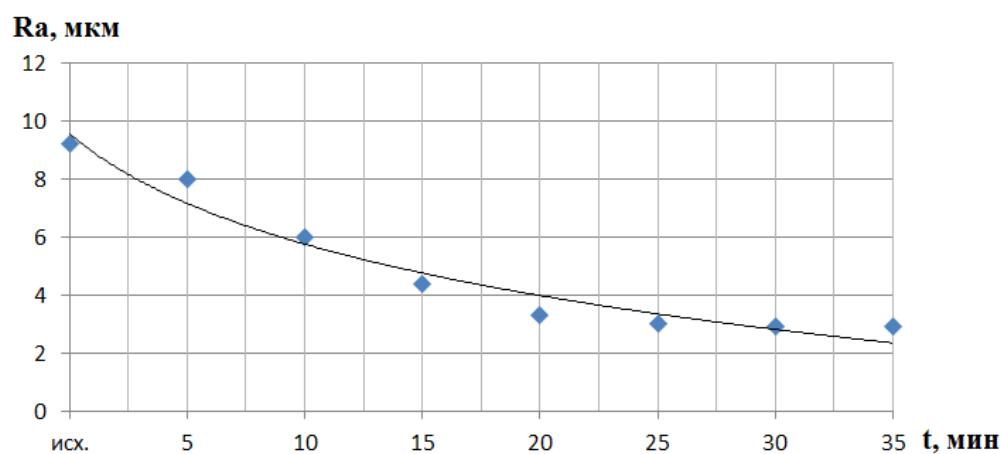
**Аппроксимация экспериментальных зависимостей изменения параметров качества от продолжительности обработки, полученных в результате экспериментальных исследований динамических методов поверхностного пластического деформирования**

1. Изменение высоты микропрофиля поверхности образцов из Р18 в зависимости от времени виброударной обработки ( $A=3\text{мм}$ ,  $d=8\text{мм}$ ). [2]



$$y = -0,173 \ln(x) + 0,4015; R^2 = 0,9447$$

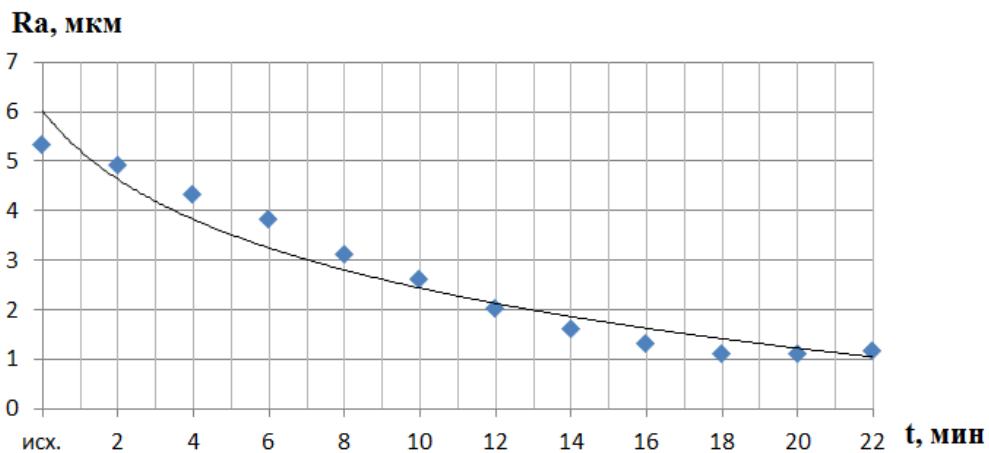
2. Изменение высоты микропрофиля поверхности образцов из Д16 в зависимости от времени виброударной обработки ( $A=2\text{мм}$ ,  $d=9\text{мм}$ ). [4]



$$y = -3,473 \ln(x) + 9,5665; R^2 = 0,99561$$

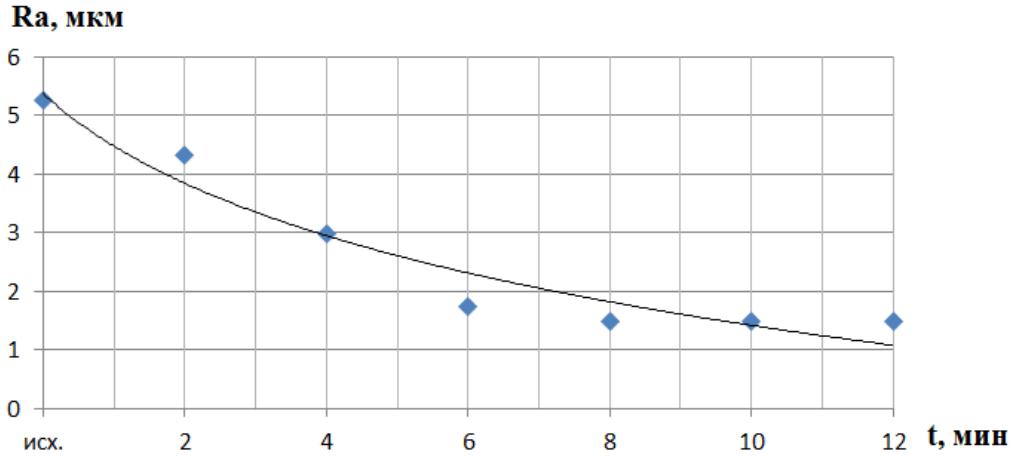
**Приложение 1**

Рис. 3. Изменение высоты микропрофиля поверхности образцов из 12Х18Н10Т в зависимости от времени центробежно-ротационной обработки ( $D=4\text{мм}$ ,  $\omega=10\text{Гц}$ ). [94]



$$y = -2,001 \ln(x) + 6,0207; R^2 = 0,9419$$

4. Изменение высоты микропрофиля поверхности образцов из Д16 в зависимости от времени центробежно-ротационной обработки ( $D=6,5\text{мм}$ ,  $\omega=10\text{Гц}$ ). [94]

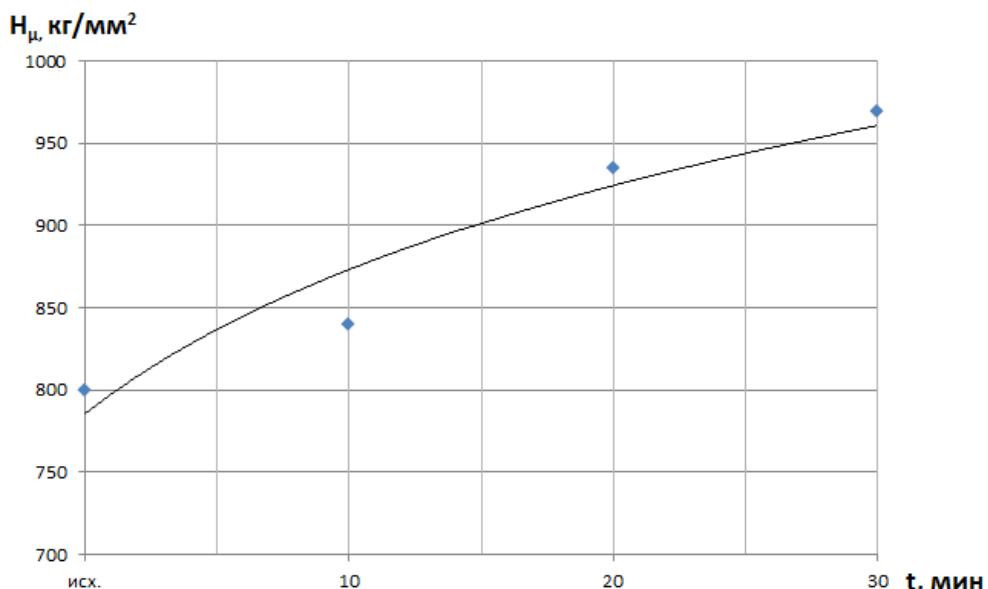


t	исх.	2	4	6	8	10	12
R <sub>a</sub>	5,26	4,31	2,99	1,75	1,49	1,48	1,49

$$y = -2,208 \ln(x) + 5,3701; R^2 = 0,9428$$

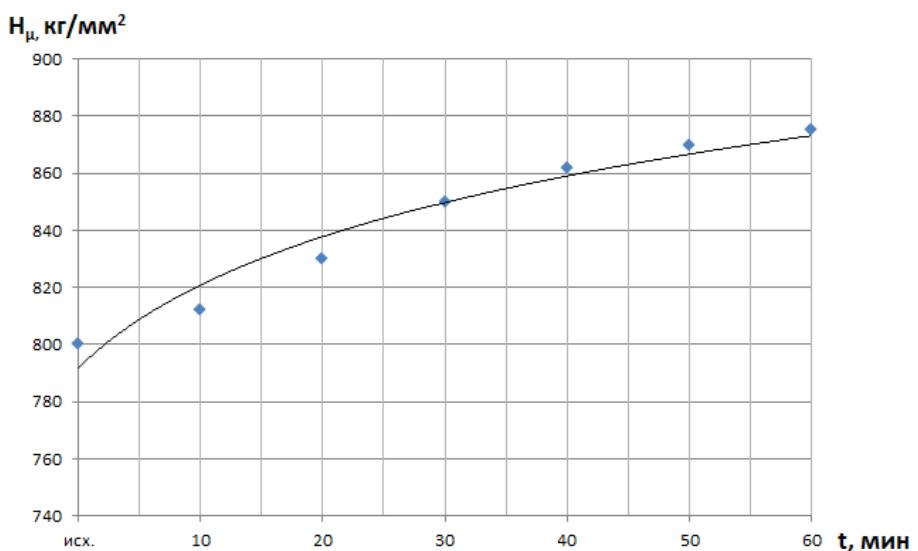
**Приложение 1**

5. Изменение микротвердости поверхности образцов из Р18 в зависимости от времени виброударной обработки ( $D=14\text{мм}$ ,  $A=3,5\text{мм}$ ,  $F=35\text{Гц}$ ). [71]



$$y = 126,37 \ln(x) + 785,6; R^2 = 0,9208$$

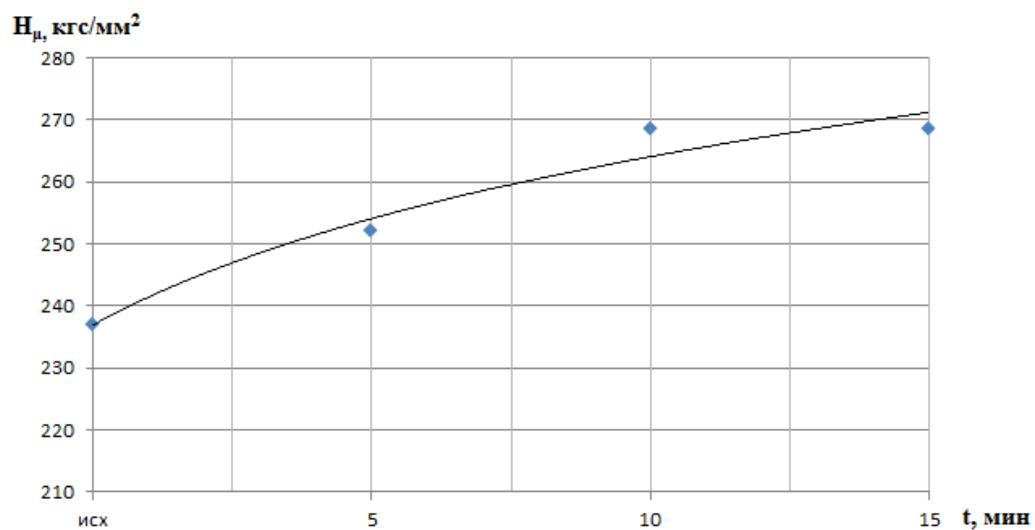
6. Изменение микротвердости поверхности образцов из Х12М в зависимости от времени виброударной обработки ( $D=8\text{мм}$ ,  $A=2\text{мм}$ ,  $F=35\text{Гц}$ ). [71]



$$y = 41,792 \ln(x) + 791,82; R^2 = 0,9559$$

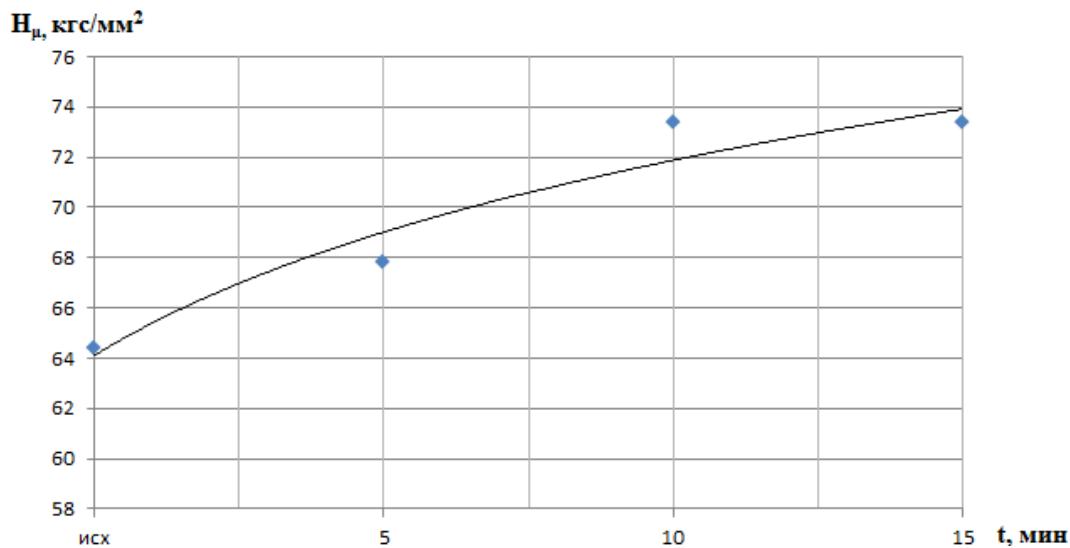
**Приложение 1**

7. Изменение микротвердости поверхности образцов из С45 в зависимости от времени центробежно-ротационной обработки ( $D=6,5\text{мм}$ ,  $\omega=10\text{Гц}$ ). [94]



$$y = 24,709 \ln(x) + 236,92; R^2 = 0,9547$$

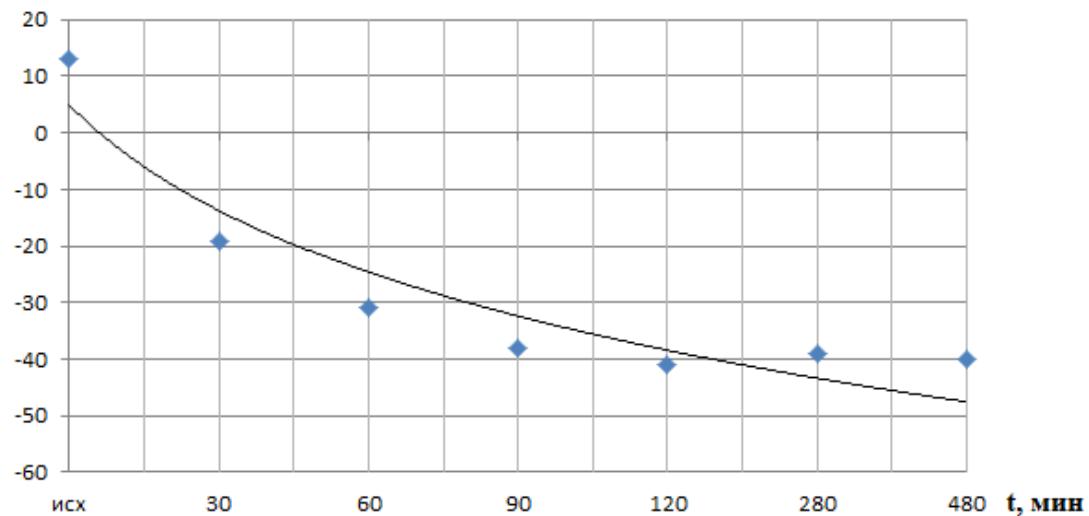
8. Изменение микротвердости поверхности образцов из Д16 в зависимости от времени центробежно-ротационной обработки ( $D=6,5\text{мм}$ ,  $\omega=10\text{Гц}$ ). [94]



$$y = 7,0775 \ln(x) + 64,102; R^2 = 0,9309$$

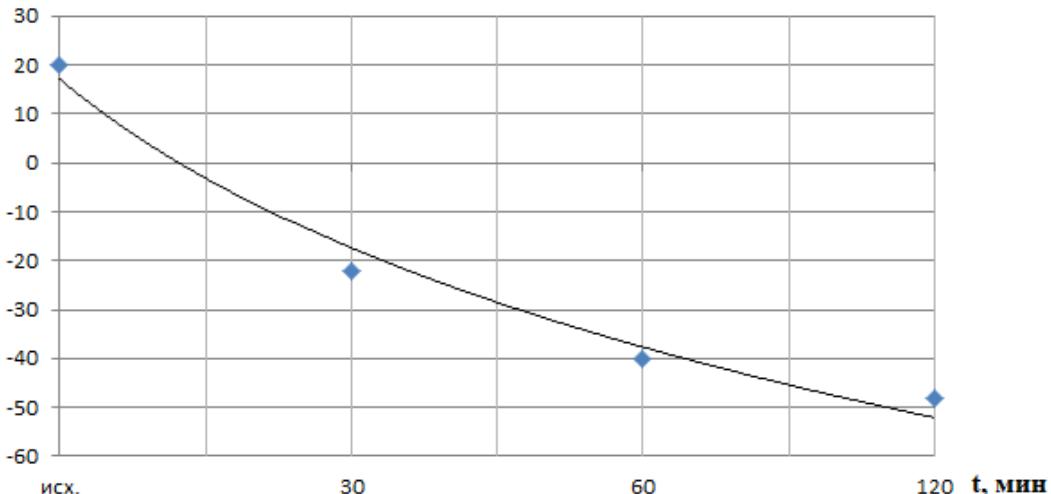
**Приложение 1**

9. Изменение микротвердости поверхности образцов из ШХ15 в зависимости от времени виброударной обработки ( $D=9\text{мм}$ ,  $A=3\text{мм}$ ,  $F=33\text{Гц}$ ).

 **$\sigma_0, \text{МПа}$** 

$$y = -27,05 \ln(x) + 5,0894; R^2 = 0,8934$$

10. Изменение сжимающих остаточных напряжений поверхности образцов из 30Х3ВА в зависимости от времени виброударной обработки ( $D=9\text{мм}$ ,  $A=3\text{мм}$ ,  $F=33\text{Гц}$ ). [4]

 **$\sigma_0, \text{МПа}$** 

$$y = -50,02 \ln(x) + 17,24; R^2 = 0,9817$$

**Проектирование технологической операции магнитодинамической обработки детали типа  
«Пояс верхний»**

**Постановка задачи:** Спроектировать технологическую операцию упрочняющей обработки детали А200.2202.103.001/002 «Пояс верхний» с целью повышения ресурса в условиях эксплуатации летательного аппарата Бе-200.

**Исходные данные:**

**Сведения о детали:**

Деталь А200.2202.103.001/002 «Пояс верхний» является составной частью переднего лонжерона консольной части крыла гидросамолета Бе-200ЧС, выполняет функцию несущего элемента каркаса консольной части крыла.

Деталь изготовлена из материала В95пчТ2, физико-механические свойства материала представлены в таблице 1. Исходная шероховатость после механической обработки составляет  $R_a=1,6$  мкм; параметры опорной кривой микропрофиля обрабатываемой поверхности  $b = 1,2$ ,  $v = 1,1$ ; исходное значение микротвердости составляет  $HV=2,6$  ГПа; длина детали  $l_d = 13,7$  м;

Таблица 1

Физико-механические свойства материала В95пчТ2

$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_m$ , МПа	$E \cdot 10^{-5}$ , МПа	$\alpha \cdot 10^6$ , 1/град	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Твердость HB	Электропроводность в % по отношению к меди	Теплопроводность в кал/°C
500- 520	380- 410	0,74	23,2	2850	150	30	0,28

Габаритные размеры и профиль детали представлены на рис. 1. Деталь представляет собой Т-образный профиль высотой равной 60 мм и основанием 80 мм, переходящий в профиль с L-образным сечением, с толщиной стенки от 3 до 6 мм, длина детали составляет 13700 мм.

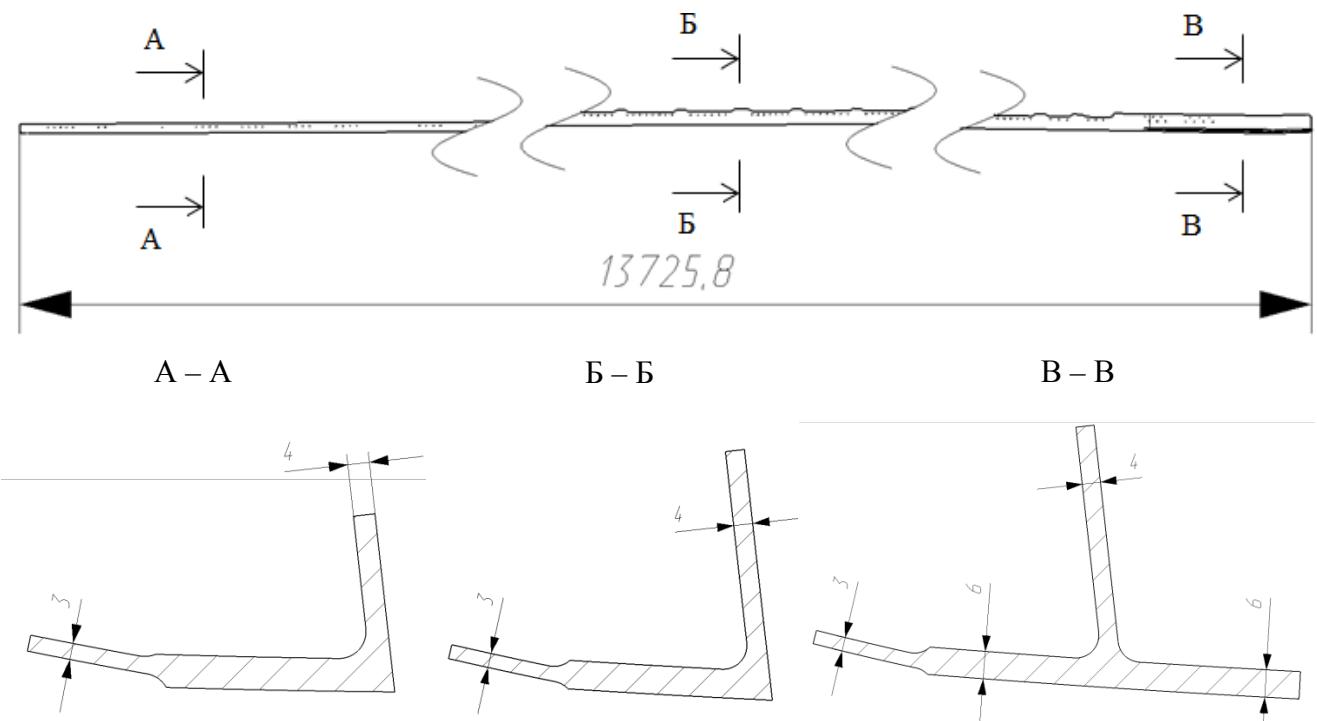


Рис. 1. Пояс верхний.

*Сведения об устройстве:*

Устройство для магнитодинамической обработки, компоновочная схема которого представлена на рис. 3.1 включает в себя индуктор, генерирующий вращающееся электромагнитное поле с угловой скоростью  $\omega = 45,4 \text{ об/с}$ , и индукцией  $B_v = 0,15 \text{ Тл}$ , рабочую камеру диаметром не менее  $D = 0,15 \text{ м}$ , длиной  $L = 1 \text{ м}$  и оснащено подающим механизмом, обеспечивающим непрерывную подачу обрабатываемой детали в рабочую зону в пределах до 5 м/мин.

*Сведения об обрабатывающей среде:*

В качестве обрабатывающей среды рекомендуется, с учетом размера рабочей камеры, использовать стальные цилиндрические инденторы, диаметром  $d = 2 \text{ мм}$  и длиной  $l = 20 \text{ мм}$ , выполненные из материала ШХ15. Магнитная проницаемость материала индентора составляет  $\mu = 6,09 \cdot 10^4$ . Торцы инденторов должны иметь сферическую форму с радиусом, равным половине диаметра цилиндрической поверхности. Инденторы предварительно должны быть обглотованы в течение 1 часа в устройстве с ВЭМП, а затем тщательно промыты для удаления продуктов износа и загрязнений.

## Проектирование операции упрочнения магнитодинамическим методом ППД :

Проектирование операции осуществлялось с использованием программного обеспечения MathCAD, на основании расчетных алгоритмов, полученных в диссертационном исследовании, представленных в табл. 5.1, 5.2.

### 1. Обоснование энергетических параметров обрабатывающей среды:

– энергетическое состояние ферромагнитного индентора:

$$\begin{aligned} E &= \frac{p_m}{2\pi\omega^2} \left[ \frac{p_m}{I} B_v^2 + \frac{p_m}{m} \left( \frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 \right] = \\ &= \frac{4,121 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3,14 \cdot 45,4^2} \left[ \frac{4,121 \cdot 10^{-6}}{1,636 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,15^2 + \frac{4,121 \cdot 10^{-6}}{4,908 \cdot 10^{-4}} \cdot (0) \right] = 1,804 \cdot 10^{-9} \text{ Дж} \end{aligned}$$

– величина предельной энергии соударения ферромагнитных инденторов с обрабатываемой поверхностью:

$$E_{np} \approx 0,5\pi d \cdot HV \cdot R_{a_{ucx}}^2 \approx 0,5 \cdot 3,14 \cdot 0,002 \cdot 2,6 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} = 2,091 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}$$

– проверка условия  $E \geq E_{np}$ :

$$1,804 \cdot 10^{-9} \geq 2,091 \cdot 10^{-8}$$

### 2. Расчет параметров качества поверхности и оценка повышения эксплуатационных свойств

– среднеарифметическая высота профиля микронеровностей:

$$\begin{aligned} R_{a_k} &= \left[ R_{a_{ucx}} \pm \sqrt{\frac{2E}{\pi d H V}} \right] \left( 1 - K_{R_a} \frac{d_k}{d} \ln k \right) = \\ &= \left[ 1,6 \cdot 10^{-6} \pm \sqrt{\frac{2 \cdot 1,804 \cdot 10^{-9}}{3,14 \cdot 0,002 \cdot 2,6 \cdot 10^{-6}}} \right] \cdot \left( 1 - 0,27 \cdot \frac{5,371 \cdot 10^{-4}}{0,002} \cdot 2,485 \right) = 9,265 \cdot 10^{-8} \text{ мкм} \end{aligned}$$

– микротвердость в поверхностном слое:

$$\begin{aligned} HV_k &= \left[ \sqrt{\frac{32 E}{\pi d^3}} \cdot HV \right] \left( 1 + K_{HV} \frac{d_k}{d} \ln k \right) = \\ &= \left[ \sqrt{\frac{32 \cdot 1,804 \cdot 10^{-9}}{3,14 \cdot 0,002^3}} \cdot 2,6 \cdot 10^6 \right] \cdot \left( 1 + 0,17 \cdot \frac{5,371 \cdot 10^{-4}}{0,002} \cdot 2,485 \right) = 2,721 \cdot 10^6 \text{ Па} \end{aligned}$$

– глубина упрочненного слоя:

$$\begin{aligned} h_{h_k} &= \left[ 1,5 \cdot \sqrt[4]{\frac{32 E d}{\pi H V}} (1,54 - 10^{-3}) \right] \left( 1 + K_{h_h} \frac{d_k}{d} \ln k \right) = \\ &= \left[ 1,5 \cdot \sqrt[4]{\frac{32 \cdot 1,804 \cdot 10^{-9} \cdot 0,002}{3,14 \cdot 2,6 \cdot 10^6}} \cdot (1,54 - 10^{-3}) \right] \cdot \left( 1 + 0,17 \cdot \frac{5,371 \cdot 10^{-4}}{0,002} \cdot 2,485 \right) = 1,141 \cdot 10^{-4} \text{ м} \end{aligned}$$

– величина сжимающих остаточных напряжений:

$$\sigma_{o_k} = \left[ 0,481 \left( \frac{E}{(r_{np})^3} \right)^{0,2} \right] k_\mu^{0,8} \left( 1 + K_{\sigma_o} \frac{d_k}{d} \ln k \right) = \\ = \left[ 0,481 \cdot \left( \frac{1,804 \cdot 10^{-9}}{(5 \cdot 10^{-12})^3} \right)^{0,2} \right] \cdot 1,852^{0,8} \left( 1 + 0,17 \frac{5,371 \cdot 10^{-4}}{0,002} \cdot 2,485 \right) = 9,435 \cdot 10^4 \text{ МПа}$$

– оценка повышения усталостной прочности:

$$k_v = \frac{k_a \cdot \Delta HV}{1 - \frac{2 \cdot h_H \cdot \chi}{S}} = \frac{1 \cdot 0,956}{1 - \frac{2 \cdot 1,141 \cdot 10^{-4} \cdot 2,8}{0,003}} = 1,214$$

### 3. Расчет технологических параметров

– количество инденторов в МОВ слое:

$$N = \frac{2\pi i L}{l d} \left[ R - \frac{l(i+1)}{4} \right] = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 0,15}{0,02 \cdot 0,002} \left[ 0,075 - \frac{0,002 \cdot (1+1)}{4} \right] = 1,532 \cdot 10^3 \text{ шт}$$

– масса загрузки ферромагнитных инденторов:

$$M = N \cdot m = 1,532 \cdot 10^3 \cdot 4,908 \cdot 10^{-4} =$$

– время обработки деталей длиной  $l_d < L$ :

$$t_k = \frac{2\pi k}{P \cdot \omega} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 12}{6,194 \cdot 10^{-3} \cdot 45,4} = 268,126 \text{ с}$$

– время обработки деталей длиной  $l_d \gg L$ :

$$T = \frac{l_d}{L} \cdot t_k = \frac{13,7}{0,15} \cdot 268,126 = 3,673 \cdot 10^3 \text{ с}$$

### 4. Содержание операции магнитодинамической обработки детали «Пояс верхний»:

4.1 Установить деталь в подающее устройство, закрепить;

4.2 Подать деталь в рабочую камеру устройства;

4.3 Провести обработку режимах, указанных в табл. 2;

Таблица 2

#### Технологические режимы обработки

№ п/п	Технологический параметр	Значение
1.	Масса загрузки обрабатывающей среды, кг	$M = 5,012 \text{ кг}$
2.	Время обработки, с	$T = 3,673 \cdot 10^3 \text{ с}$
3.	Длина индентора, мм	$l = 20 \text{ мм};$
4.	Диаметр индентора, мм	$d = 2 \text{ мм};$
5.	Подача	$F=0,22 \text{ м/мин}$

4.4 Снять деталь;

4.5 Провести контроль качества.

Утверждаю:

Проректор ДГТУ по НИР и ИД,

д.Ф.М.Н., проф.



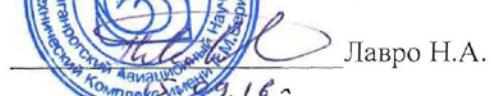
Сухинов А.И.

Утверждаю:

Зам. Генерального директора –

Главный конструктор, к.т.н.

ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева»



Лавро Н.А.

АКТ

промышленных испытаний метода  
магнитодинамической упрочняющей обработки деталей

Комиссия в составе специалистов ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева» зам. главного технолога Прищепы В.Ю. и представителей ДГТУ: профессора кафедры «Технология машиностроения» Лебедева В.А., и аспиранта кафедры «Технология машиностроения» Кочубей А.А. составила заключение о результатах промышленных испытаний метода магнитодинамической упрочняющей обработки. Обработка подвергнуты длинномерные профильные детали со сравнительно малой площадью сечения (лонжероны, стрингеры, пояса, трубы) из алюминиевых сплавов, применяемых в производстве летательных аппаратов. Обработка произведена с использованием, в качестве рабочей среды, цилиндрических инденторов, выполненных из материалов 50ХФА и ШХ15, с целью обеспечения качества поверхности требуемого уровня.

Испытание проводились на опытно-экспериментальном устройстве с вращающимся электромагнитным полем, с применением режимов, назначаемых в соответствие с методическими указаниями диссертационного исследования. Контроль результатов обработки осуществлялся в соответствии с утвержденной заводской методикой.

Использование магнитодинамической упрочняющей обработки позволяет повысить производительность упрочняющей обработки вышеуказанного типа деталей на 30% и снизить энергозатраты процесса в 8 раз по сравнению с применяемой на «ТАНТК им. Г.М. Бериева» технологией и при этом обеспечить требуемые параметры качества обработанных поверхностей деталей.

От ДГТУ:

Проф. каф. «ТМ»



Аспирант



От ПАО «ТАНТК им Г.М. Бериева»:

Зам. главного технолога

