

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Волохов Станислав Григорьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
СОПРЯЖЕНИЙ «СТАЛЬ – СТАЛЬ» ПРИМЕНИТЕЛЬНО К  
ФРИКЦИОННЫМ ГАСИТЕЛЯМ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ ВЛИЯНИЯ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Специальность 05.02.04 – Трение и износ в машинах

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., проф. Тихомиров В.П.

Брянск 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	4
<b>ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И СТЕПЕНИ РАЗРАБОТАННОСТИ ПРОБЛЕМЫ.</b>	10
1.1. Влияние магнитного поля на свойства металлов	10
1.2. Конструкторско – технологическое обеспечение качества и эксплуатационных свойств фрикционных гасителей колебаний	29
1.3. Особенности функционирования фрикционных гасителей колебаний	34
1.4. Современные технологические методы повышения эксплуатационных свойств фрикционных гасителей колебаний	38
1.5. Цель и задачи исследования	42
<b>ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ</b>	44
2.1. Методика проведения теоретических исследований	44
2.2. Методика проведения экспериментальных исследований	45
2.2.1. Объект исследования	45
2.2.2. Материалы, образцы, детали	49
2.2.3. Установка для исследования молекулярной составляющей коэффициента трения при воздействии магнитного поля	54
2.2.4. Установка для исследования триботехнических показателей пар трения скольжения в условиях влияния магнитного поля	60
2.2.5. Установка для исследования характеристик неподвижного соединения в условиях влияния магнитного поля	65
2.3. Выводы к главе 2	74
<b>ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС ТРЕНИЯ</b>	75
3.1. Исследование процессов трения металлических тел при решении контактных задач	75
3.2. Модель намагничивания в условиях контактного взаимодействия	84
3.2.1. Расчетные характеристики магнитного поля в условиях скользящего контакта	84
3.2.2. Распределение магнитного поля в условиях неподвижного	

соединения	96
3.3. Исследование влияния магнитного поля на молекулярную составляющую трения	100
3.4. Исследование влияния магнитного поля на триботехнические показатели пар трения скольжения применительно к фрикционным гасителям колебаний	105
3.5. Исследование влияния магнитного поля на триботехнические показатели неподвижных соединений применительно к фрикционным гасителям колебаний	113
3.6. Выводы к главе 3	120
<b>ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ И ПРОЦЕССЫ ИЗНАШИВАНИЯ</b>	122
4.1. Оценка температурного режима в условиях трения скольжения	122
4.2. Влияние магнитного поля на процессы изнашивания в условиях подвижного и неподвижного контактов	128
4.2.1. Влияние магнитного поля на процессы изнашивания в условиях скользящего контакта	129
4.2.2. Влияние магнитного поля на процессы изнашивания соединения с натягом	135
4.3. Влияние магнитного поля на изнашивание подвижных сопряжений	137
4.4. Выводы к главе 4	140
<b>ГЛАВА 5. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ</b>	142
5.1. Использование результатов работы в научных исследованиях и в учебном процессе	142
5.2. Расчет экономической эффективности	143
5.3. Выводы к главе 5	151
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	153
<b>ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ</b>	154
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ</b>	158
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ</b>	170

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы.* Улучшение показателей трения и изнашивания трибосопряжений может реализовано модификацией их структурного состояния, в том числе за счет воздействия различными видами энергий. Поэтому поиск способов управления силой трения путем стороннего воздействия актуален. Плохо изученными являются вопросы, связанные с влиянием магнитного поля на триботехнические показатели пар трения. Одним из направлений триботехнологии является изменение свойств поверхностного слоя при воздействии магнитным полем.

Воздействие магнитным полем обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами полей. Этими преимуществами являются: сохранение геометрии и шероховатости поверхности деталей; отсутствие расходных материалов и дополнительных сред; простота технологической оснастки и экологическая чистота; низкая стоимость технологической операции намагничивания пар трения.

В настоящее время не сложилось единой теории о природе воздействия магнитного поля на поверхности контактирующих тел. Несмотря на имеющийся экспериментальный материал и наличие целого ряда моделей, объясняющих магнитный эффект при взаимодействии тел, сегодня нет выстроенной теории, способной объяснить экспериментальные данные с единых позиций.

В технике вообще и в подвижном составе в частности, большое распространение получили гасители колебаний на основе сухого трения – фрикционные. Такие гасители используются в рессорном подвешивании локомотивов и вагонов в силу наличия многих позитивных качеств, таких как простота конструкции, компактность, нетребовательность к сезонному обслуживанию и т.п., что обеспечивает малые затраты на их изготовление и эксплуатацию.

Для работы фрикционных гасителей обычно характерны повышенный износ деталей, ударные нагрузки, возможные заклинивания и нестабильность

коэффициента трения, что является причинами ухудшения общей надежности, в частности шпинтонного узла.

Бедуящем в улучшении и контроле динамических показателей работы фрикционных гасителей колебаний будем возможное управление силой их работы в зависимости от колебательных процессов. Такая возможность возникает при введении в конструктивное решение фрикционных гасителей колебаний магнитного поля с воздействием на зону трения и обратной связью по его величине.

Таким образом, поиск и подтверждение технических решений, направленных на совершенствование работы шпинтонного узла фрикционных гасителей колебаний при его эксплуатации (вертикальное перемещение сухарей относительно втулки шпинтона в условиях трения скольжения, а также посадка шпинтона в раму тележки с гарантированным натягом) являются весьма актуальными.

В этой связи *целью настоящей работы* является исследование триботехнических показателей пар трения «сталь – сталь» применительно к фрикционным гасителям колебаний на основе установления закономерностей влияния магнитного поля на процессы их трения и изнашивания.

В соответствии с целью необходимо решить следующие взаимосвязанные *задачи*:

– разработка, изготовление оригинальных методик и установок для экспериментальных исследований влияния магнитного поля на триботехнические показатели в условиях подвижного и неподвижного контактов;

– исследование влияния магнитного поля на величину молекулярной составляющей коэффициента трения стальных поверхностей;

– разработка физически обоснованной модели намагниченности элементов пар трения;

– исследование влияния направленности магнитного потока, параллельно оси исследуемого образца (вертикальный магнитный поток) и перпендикулярно к

оси исследуемого образца (горизонтальный магнитный поток), на величину силы и коэффициента трения;

– исследование влияния параметров магнитного поля на процессы трения в условиях подвижного контакта и неподвижного соединения применительно к фрикционным гасителям колебаний;

– оценка влияния магнитного поля на температуру поверхности трения скользящего контакта;

– оценка влияния магнитного поля на процессы изнашивания пар трения скольжения и соединений с натягом применительно к фрикционным гасителям колебаний;

– расчет экономической эффективности от применения результатов исследований.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются пары трения «сталь – сталь» применительно к фрикционным гасителям колебаний рессорного подвешивания транспортных средств.

Предметом исследования являются а оригинальные методики и исследование триботехнических показателей пар трения скольжения и соединений с натягом применительно к фрикционным гасителям колебаний на основе влияния магнитного поля на процессы их трения и изнашивания.

**Методы и достоверность исследований.** Методологической основой работы является системный подход к изучению поведения фрикционного контакта при наличии воздействия магнитного поля. Методы исследования, теоретические и экспериментальные, базируются на современных представлениях о контактном взаимодействии твердых тел с учетом шероховатости, молекулярно-механической теории трения, современных достижениях поверхностных явлений. Применялась современная система моделирования магнитного поля в конечноэлементном пакете ANSYS. Экспериментальные исследования проводилась с использованием и обработкой данных на ПЭВМ. Достоверность полученных результатов достигается: использованием общепризнанных программных комплексов; использованием поверенных измерительных приборов;

сопоставлением расчетных и экспериментальных результатов; сравнением результатов исследования с данными, опубликованными другими авторами.

***Научная новизна работы*** заключается в следующем:

– разработан на основе эксперимента подход к оценке влияния магнитного поля на триботехнические показатели, отличающийся тем, что рассматривается не непосредственное влияние магнитного поля на триботехнические свойства трущихся тел, а на интенсификацию процессов, протекающих в зоне трения (рост оксидных пленок, активных центров, устранение частиц износа из зоны трения), которые способствуют повышению коэффициента трения стальных поверхностей и их износостойкости;

– установлено на основе модели намагничивания различие влияния вертикального и горизонтального магнитных полей на величину силы и коэффициента трения неподвижного контакта;

***Теоретическая и практическая значимость работы*** заключается в следующем:

– разработана верифицированная модель намагниченности, используемая для проектирования опытных образцов и предполагаемых к созданию для их испытаний установок;

– изготовленные автором оригинальные трибометрические установки позволяют получить количественные оценки коэффициента и силы трения при проведении испытаний на трение и изнашивание на образцах, и используются в учебном процессе;

– разработаны методики проведения экспериментов на изготовленных установках с подтверждением метрологических параметров;

– получены результаты влияния магнитного поля на молекулярную составляющую коэффициента трения в условиях скользящего контакта;

– получены результаты влияния магнитного поля на коэффициент и силу трения скользящего контакта, а также на срыв посадки с гарантированным натягом;

– получены результаты влияния магнитного поля на температуру поверхности трения и интенсивность изнашивания в условиях скользящего контакта;

– получены патенты на полезную модель для применяемых в исследованиях экспериментальных установок.

***Положения, выносимые на защиту,*** включают:

– теоретические основы намагничивания металлических пар трения и их применение в инженерных задачах;

– оценку влияния магнитного поля на молекулярную составляющую коэффициента трения;

– оценку влияния магнитного поля на триботехнические показатели скользящего контакта;

– оценку влияния магнитного поля на срыв посадки с гарантированным натягом;

– оценку влияния магнитного поля на температуру в зоне скользящего контакта;

– оценку влияния магнитного поля на интенсивность изнашивания в условиях скользящего контакта.

***Личный вклад соискателя.*** Автором получены лично основные положения, выносимые на защиту.

***Реализация результатов.*** Результаты исследований и стендовые установки нашли широкое применение в учебном процессе ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» при подготовке магистров по направлению 15.04.03. – «Прикладная механика».

***Апробация работы.*** Основные положения и наиболее важные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях:

– XI Международной научно-практической интернет-конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» (г.Орел, 2013 г.);



– Международной конференции «Современные проблемы математики, механики, информатики» (г. Тула, 2013 г.);

– XII Международной научно-практической интернет-конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» (г.Орел, 2014 г.);

– V Международной научно-практической конференции «Новые горизонты» (г.Орел, 2018 г.)

**Публикации.** Опубликовано 19 работ, из них по теме диссертации 5 статей в ведущих периодических изданиях из перечня Высшей аттестационной комиссии, 5 публикаций в рецензируемых периодических изданиях, 9 патентов на полезную модель и изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, основных результатов и выводов, списка использованной литературы из 122 наименований и приложения. Работа изложена на 158 страницах основного текста, содержит 89 рисунков, 8 таблиц и 1 приложение. Общий объем работы составляет 175 страниц.

***Соответствие паспорту специальности:***

– п. 1 «Механические, тепловые, химические, магнитные, электрические явления при трении»;

– п. 3 «Закономерности различных видов изнашивания и поверхностного разрушения»;

– п. 10 «Физическое и математическое моделирование трения и изнашивания».

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И СТЕПЕНИ РАЗРАБОТАННОСТИ ПРОБЛЕМЫ

### 1.1. Влияние магнитного поля на свойства металлов

В 1845 г. Фарадей исследовал влияние магнитного поля на ряд веществ, и после многих экспериментов он написал: «Теперь мы можем считать, что все вещества подвержены действию магнитных сил так же, как действию гравитации, электрических сил и сил сцепления. Однако все тела не проявляют такого магнетизма, который характерен для железа». Е. Герберт в 1926 г. описал эффект изменения свойств ферромагнитных материалов и их субкультур при воздействии внешнего магнитного поля [103, 104]. Физическая природа эффекта магнитного поля (МП) в области контакта металлических тел в настоящее время не имеет общего объяснения. Так ряд авторов рассматривает влияние магнитного поля на мартенситное превращение в стали с точки зрения термодинамического расчета [4, 77, 1].

Важно отметить, что при этом Д.Н. Гаркунов рассматривает трение в целом как явление, обусловленное как внешним воздействием, так и внутренними силами природы, причем к последним он относит главным образом электрические и магнитные силы [22].

Одной из причин роста перемещений дислокаций при воздействии магнитного поля в считают влияние электронных спинов, локализованных на дефектах кристаллической решетки. На это свидетельствует развитие спинотроники – науки об управлении электрическим током в полупроводниках. «При этом, возможность влияния электронных спинов, локализованных в дефектах структуры, на механические свойства кристаллов до недавнего времени не принимали во внимание. Это обусловлено тем, что процессы взаимодействия спинов и дефектов долгое время предположительно рассматривались как равновесные, а потому считалось, что они вносят слишком малый вклад по сравнению с упругим и электростатическим взаимодействиями, определяющими

подвижность дислокаций. Однако, получение строгих экспериментальных доказательств влияния спина на пластическую деформацию ионных кристаллов в магнитном поле и рост количества публикаций на эту тему определили возникновение нового направления в физике – пластичности спиновой микромеханики, целью исследования которой является получение знаний о микроскопических спин-зависимых процессах, влияющих на механические свойства твердых тел» [67].

Так же имеется теоретическое направление, которое в принципе позволяет выйти на модели зависимости коэффициента трения в системе взаимодействующих тел от напряженности магнитного поля. «Однако исследование влияния магнитного поля на пластичность металлов представляет собой наибольшую трудность для экспериментаторов, поскольку имеется целый комплекс факторов, способных исказить результаты экспериментов по исследованию пластичности металлов в магнитном поле: индукционные токи; термомеханические эффекты; втягивание в магнитное поле захватов испытательной машины. Несмотря на то, что фундаментальные работы ряда исследователей позволили создать теоретические основы анализа электронных процессов, влияющих на пластичность металла в магнитном поле, результаты, относящиеся к обнаруженным и исследованным эффектам (упрочнение кристаллов в магнитном поле, изменение их пластичности при сверхпроводящих переходах)» [26] по влиянию магнитного поля, нельзя механически распространять на ферромагнетики, поскольку эти результаты получены для слабых магнитных полей, для которых выполняется условие в работе [27] для полей  $\mu_B B \ll kT$ , а для металлов еще и  $\omega = B \frac{e}{m} \ll \omega_c$  где  $\mu_B$  – магнетон Бора,  $B$  – индукция магнитного поля,  $k$  – постоянная Больцмана;  $\omega$ - циклотронная частота,  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона,  $\omega_c$  – частота столкновения электрона с рассеивающими центрами.

По мнению [28], «исследование магнитопластического эффекта в области высоких значений микроволновых и постоянных магнитных полей, а также

исследование влияния магнитных полей на развитие трещин и прочность твердых тел относятся к перспективным,» хотя и слабо исследованным направлениям (рисунок 1.1). Таким образом, к альтернативной гипотезе можно отнести в первую очередь отсутствие непротиворечивой теории, способной описать экспериментальные данные с единых позиций, причем время получения недостающей информации явно выходит за длительность времени на проектирование узлов пар трения, что связано с недостаточной изученностью самого природного явления [44].

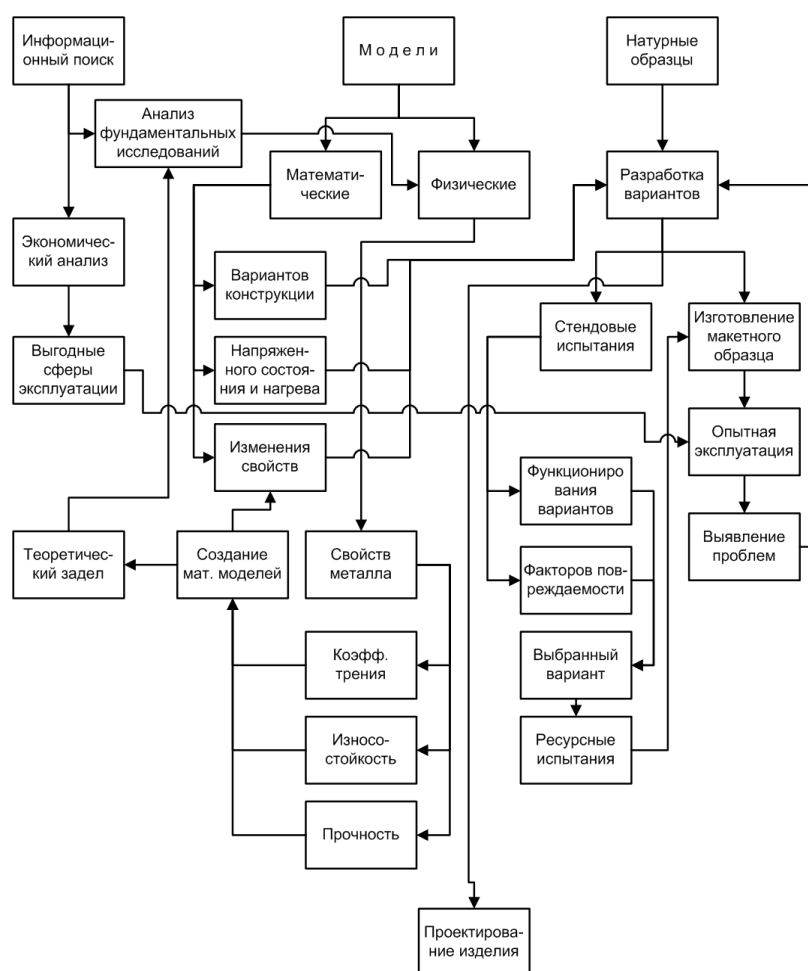


Рисунок – 1.1. План работ по инженерному анализу, построенный по результатам выявления известной информации по исследуемому явлению

Рассмотрим гипотезы, объясняющие изменение параметров материалов под воздействием магнитного поля.

В настоящее время [47, 3] не сложилось единой теории о природе воздействия магнитного поля на поверхности контактирующих тел. Как показано в [64], несмотря на имеющийся экспериментальный материал и наличие целого ряда моделей, объясняющих магнитный эффект при взаимодействии тел, сегодня нет выстроенной теории, способной объяснить экспериментальные данные с единых позиций. Более того, разные авторы исходят из противоположных взглядов на физическую картину явления. Так, например сделан вывод, «что внешнее электромагнитное поле способствует росту числа активных центров за счет дислокаций, а увеличение площади контакта, приводит к усреднению фрикционных связей и росту коэффициента трения» [95, 35].

В то же время в [41] при изучении на износостойкость стали авторы исходят из того, что в «связи с ориентацией доменов под действием магнитного поля затрудняется движение дислокаций в поверхностном слое пропорционально намагниченности образцов». Поэтому затрудняется пластическое деформирование микровыступов поверхностей и появление схватывания. Более того, авторы выдвигают гипотезу, что образовавшиеся фрагменты деформирования поверхности (частицы износа) могут, пластически изменяясь, приобрести округлую форму, и, будучи удерживаемыми магнитным полем в контакте, могут способствовать снижению силы трения. Однако эта гипотеза не подтверждается приведенными в [55] результатами экспериментов, согласно которым воздействие магнитного поля ведет к увеличению силы трения.

Влиянием магнитного поля на движение дислокаций также объясняется изменение свойств материала в [64, 41, 55, 34, 88].

Известно, что при резании металлов в зоне контакта возбуждается термоЭДС, причем процессы, связанные с ее возбуждением, не изучены, и, как утверждается в [39], подобные явления возникают не только в паре «инструмент – заготовка», но и в любой взаимодействующей паре металлических деталей. Согласно [39], в зоне резания возникает эрозия металлов (разрушение поверхностей деталей и инструмента в поле слабых электрических разрядов) под влиянием термоЭДС в зоне резания, характеризующаяся напряженностью

магнитного поля. При этом, предположительно, внешнее магнитное поле будет влиять на токи, возникающие вследствие термоЭДС.

В [58] высказана гипотеза, что внешнее электрическое поле может влиять на величину и полярность термоэлектрического тока. В связи с этим могут усиливаться или замедляться окислительные процессы, таким образом, в зоне трения нарастающая окисная пленка будет препятствовать непосредственному взаимодействию поверхностей. Такое явление может сопровождаться изменением контактного электрического сопротивления и возможным уменьшением износа поверхностей трения. Если внешнее поле влияет на термоЭДС, то следует ожидать интенсификации процессов на поверхности или же обратного явления, при котором могут ускоряться или замедляться эти процессы, особенно на начальном и заключительном этапах контакта. При этом внешнее поле может увеличивать эффект генерации и поглощения электронов как с поверхностей трения, так и из среды промежуточного слоя (окислов, диэлектрических примесей), что предположительно приводит к возникновению электромагнитного поля, усиливающего эффект межатомарного притяжения между парами трения, как следствие, возрастет коэффициент трения. Соответственно, внешнее магнитное поле также должно влиять на величину и полярность термоэлектрического тока и коэффициент трения для рассматриваемой в [9] модели процессов в контакте, основанной на анализе взаимодействия поверхностей на атомарном уровне.

В ряде работ [5, 3, 33, 34] рассмотрено влияние поля на внутреннее трение в различных веществах. В [33] выявлено, что при применении импульсного магнитного поля уровень внутреннего трения в сталях скачкообразно возрастает, после выключения поля сохраняется в течении непродолжительного времени, а затем монотонно уменьшается, возвращаясь к исходному значению. Также в [34] отмечено увеличение внутреннего трения в бронзе после воздействия импульсного магнитного поля, причем при повторном воздействии наблюдалось временное снижение внутреннего трения, а при последующей магнитопластической деформации – увеличение. При этом в рамках

магнитострикционной модели невозможно объяснить неоднозначную зависимость наблюдаемого явления от напряженности магнитного поля, а также различные по знаку изменения внутреннего трения в металле, обработанном импульсным магнитным полем.

В [37] изучено воздействие магнитного поля на электропластический эффект в кремнии. Как показали эксперименты, скорость движения дислокаций в образцах при возбуждении постоянным электрическим током, которые прошли обработку магнитным полем, была меньше, чем в образцах, которые подвергались воздействию только током. Возникает вопрос, как будет влиять на суммарный коэффициент трения совместное действие устройств, повышающих коэффициент трения за счет влияния магнитного поля и электрического тока.

Изменение подвижности примесей. Д.Н. Гаркунов, И.П. Суранов и Г.Б. Коптяева в результате исследования природы повышения износостойкости материалов магнитной обработкой объясняют изменение их физических свойств при воздействии магнитного поля прежде всего изменением поведения легкоподвижных компонентов, добавок, примесей в материале деталей. Очевидно, эффект повышения износостойкости деталей и инструмента магнитной обработкой зависит от направления и напряженности магнитного поля, обеспечивающих быстрый и полный отвод возбужденных молекул и атомарного водорода из зоны контакта поверхностного слоя [24].

Авторы работ [72, 73] объясняют увеличение стойкости работы режущего инструмента результатом магнитострикционного упрочнения и магнитодисперсионного твердения стали.

В работы [79] предполагается, что причиной изменения свойств намагниченного инструмента могут быть процессы электромагнитной индукции. В работе [23] предполагается, что повышение износостойкости намагниченных деталей обусловлено взаимодействием возбужденных молекул водорода, что позволяет обеспечить быстрый отвод молекул и атомарного водорода из зоны трения [79, 82].

В работах [79, 82] указывается, что в связи с воздействием магнитного поля изменяется расположение точечных дефектов, приводящее к возникновению диполей.

Взаимодействие магнитного поля с диполями приводит к распаду дефектных частей.

В работах [13, 20, 21] высказано предположение, что при трении намагниченных деталей в условиях использования смазочного материала снижение интенсивности изнашивания может быть связано с улучшением свойств смазочных материалов.

Японские исследователи [102] отметили, что переменное магнитное поле облегчает пластическую деформацию, и связали этот эффект с особенностями ферромагнитных материалов.

В работе [30] рассматривается влияние переменного магнитного поля на трение и изнашивание ферромагнитной стали. Отмечается, что происходит уменьшение величины износа, возрастает микротвердость, увеличивается трибоокисление поверхностей трения.

Воздействие на зону контакта магнитным полем по мнению авторов [61] позволяло несколько (до 22%) увеличить коэффициент трения. Это увеличение авторы связывают с приростом давления пары трения, а также с физическими явлениями, происходящими на поверхности зоны трения. Тем не менее, изучение влияния магнитного поля на поверхности трения представляет интерес в теоретическом аспекте и сфере приложения к инженерным задачам. Известен магнитопластический эффект [66], суть которого заключается в ослаблении взаимодействия дислокаций с препятствиями.

В работе [15] приводятся результаты исследования по определению трибологических характеристик пары трения «колесо – рельс» при воздействии внешнего постоянного магнитного поля. Отмечается, что коэффициент трения возрастает с увеличением напряженности магнитного поля. Установлено, что при воздействии электромагнитного поля в зависимости от уровня напряженности и состояния промежуточной среды, может происходить как упрочнение фрикционных связей, так и их разупрочнение[62].

В работе [65] отмечается, что возможности технологии магнитно-импульсной обработки заключаются в том, что при упрочнении деталей можно варьировать не только напряженностью поля, но и полярностью, продолжительностью и амплитудой импульсов, а также временем выдержки после обработки.



Природа эффекта обработки магнитным полем образцов на при их износе объясняется с равных точек трения, часто противоположных и исключаящих друг друга [77, 72, 73, 23, 20].

Влияние магнитного поля на мартенситное превращение в стали необходимо рассматривать, исходя из термодинамического расчета, проведенного в работах [48, 77]. Этот расчет строится на изменении температуры шагового превращения под влиянием магнитного поля

Авторы рассматривают, что причина увеличения долговечности «магнитообработанного инструмента связана с изменением собственной дислокационной структуры быстрорежущей стали под влиянием магнитного поля» [70, 72, 72]. Изменение износостойкости обработанного инструмента «происходит в результате магнитострикционного упрочнения и магнитодисперсионного твердения быстрорежущей стали. Намагничивание материала сопровождается магнитострикционной деформацией и, в соответствии с законом Гука, упругими напряжениями, что приводит к появлению локальных перенапряжений. Именно в этих очагах идут процессы размножения и перемещения дислокаций, формируются очаги пластической деформации. С увеличением плотности дислокаций инструмент упрочняется, испытывая своеобразный наклеп».

Так же «воздействие магнитного поля на изделия происходит не только увеличение числа дислокаций и их перераспределение, но также изменяется расположение и взаимодействие точечных дефектов. В местах локализации точечных дефектов образуется искажение электронного энергетического спектра кристаллической решетки, приводящее к появлению диполей. При наложении магнитного поля, оно взаимодействует с этими диполями и вызывает аномальный распад дефектных комплексов. Это приводит к резкому повышению подвижности дефектов структуры и к релаксации внутренних напряжений. Исследователи считают, что поглощение энергии поля идет более интенсивно, если используется импульсное магнитное поле» [74, 75, 109].

Рассматривая еще один вариант влияния магнитного поля на свойства ферромагнетика. «При наложении магнитного поля на реальный кристалл, в нем возникают электронные вихри, которые бомбардируют дефекты преимущественно в направлении к центру вихрей. В результате этого происходит как бы слипание дефектов, их групповое упорядочение и вынос на поверхность. Движение электронов приводит также к освобождению энергии деформации, запасенной реальной структурой до магнитной обработки, рекомбинации дефектов противоположного знака, стабилизации системы дефектов при общем снижении уровня Ферми металла. Все это приводит к дисперсионному твердению и упрочнению материала. Предполагается, что повышенная диффузионная подвижность дефектов сохраняется и после снятия магнитного поля» [38].

По мнению авторов, «намагниченность резца вызывает изменение температуры в зоне контакта инструментального и обрабатываемого материалов за счет нечетных термомагнитных эффектов. Причиной изменения температуры резания является эффект Риги-Ледюка, который заключается в повороте теплового потока под действием магнитного поля в какую-либо сторону относительно направления градиента температур, по сравнению с условиями при отсутствии магнитного поля. Это утверждение обосновывается опытами по определению стойкости резца при работе на прямой и обратной подаче. При этом, когда рабочая часть резца имеет северную полярность, тепловой поток отклоняется в плоскости, перпендикулярной направлению силовых линий магнитного поля резца, в сторону от вершины. Так как область вершины резца в тепловом отношении самая напряженная, такой поворот теплового потока способствует лучшему теплоотводу, температура резания снижается и стойкость резца повышается» [15, 62].

В [79] «предполагается, что причиной изменения стойкости намагниченного инструмента могут быть процессы, протекающие в зоне резания благодаря явлению электромагнитной индукции. Авторы [23] полагают, что повышение долговечности намагниченных деталей обусловлено взаимодействием возбужденных молекул водорода, появляющихся в воне контакта трущихся поверхностей. Предполагается, что

эффект повышения износостойкости деталей магнитной обработкой зависит от направления и напряженности магнитного поля. Авторы работ [20, 21] высказывают мысль о том, что при работе намагниченных деталей в условиях жидкостной или граничной смазки, снижение интенсивности изнашивания может быть связано с улучшением свойств смазочных материалов.

Все теории имеют свои недостатки и положительные стороны, но ни одна из них не дает объяснение всем выше перечисленным фактам, и встречающимся в многих работах авторов. К примеру, утверждается, «что твердость магнитообработанных изделий изменяется с течением времени, встречается в работах» [103, 96].

В работах [80, 56] приведена попытка объяснить влияние магнитного поля, переходом «через состояние неустойчивости типа бифуркации Хопфа и Тьюринга. Для образования эффектов, связанных с другими гипотезами, изменение твердости материала во времени не имеет значения».

«Известно большое число экспериментальных фактов, указывающих на положительное влияние магнитных полей малой напряженности на различные характеристики материалов: сопротивление усталостному разрушению [10]; сопротивление изнашиванию и малоцикловой усталости [11]; предел текучести и микротвердость [68]. Широко известен эффект повышения износостойкости от действия магнитного поля для деталей трибосопряжений различного назначения» [65, 46].

«Применяемые на практике методы модификации рабочих поверхностей трибосопряжений воздействием магнитного поля различны как по физическим и технологическим принципам, так и по конструктивным исполнениям установок. Методы подразделяют следующим образом:

- воздействие постоянным магнитным полем;
- воздействие импульсным магнитным полем.

Для воздействий постоянным магнитным полем характерны:

- обработка с размагничиванием через несколько часов;
- обработка одним импульсом, направленным магнитным полем;

– динамическая обработка при вращении изделия в магнитном поле в течение нескольких минут.

Наиболее широкое распространение получил метод воздействия импульсным магнитным полем, которому свойственны:

- обработка без последующего размагничивания;
- обработка несколькими циклами (2...10 циклов) с выдержкой между циклами 1...20 минут.

Опыт исследования и применения обработки магнитным полем вращающихся деталей машин из различных сталей показал, что коэффициент трения в рабочих узлах механизмов снижается в 1,2...2,5 раза. При этом повышается теплопроводность материала, увеличивается скорость отвода тепла. По мнению ряда исследователей [65, 46], благодаря обработке магнитным полем в микротрещинах поверхностей трения фиксируются тонкодисперсные продукты износа металлов.

Благодаря этому происходит некоторое укрепление микротрещин и выравнивание микрорельефа поверхности намагниченными продуктами износа. Вследствие этого частично снижается расклинивающий эффект в микротрещинах поверхности материала компонентами смазочной среды. Особенно это характерно для тяжело нагруженных деталей, работающих при знакопеременных динамических нагрузках. При этом опыты показали, что для большого ряда трибосопряжений размагничивание проводить необязательно» [71].

Воздействие магнитного поля на трение и изнашивание мало изучено. В литературе отражены частные результаты, которые, тем не менее, дают определенные сведения о влиянии магнитного поля на трибологические показатели пар трения. Так, на рисунке 1.2 представлена зависимость напряженности магнитного поля от нормальной нагрузки при изменении значений минимального износа. Одним из объяснений влияния магнитного поля является магнитопластический эффект, приводящий к снижению предела текучести и микротвердости. Внешнее воздействие на трибологическую

систему можно произвести при намагничивании импульсным магнитным полем соленоида предельным током или при намагничивании полем электромагнита постоянного тока.

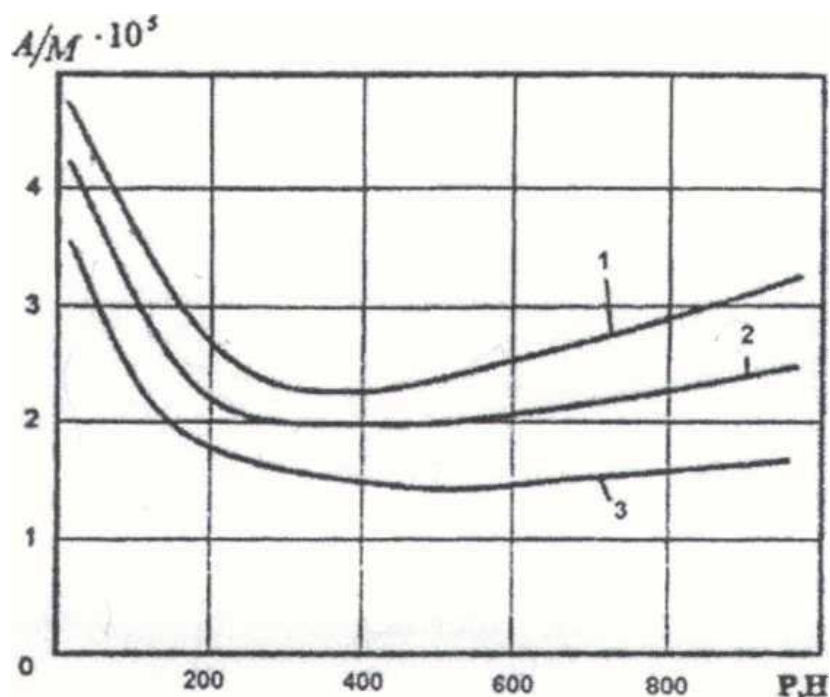


Рисунок – 1.2. Влияние напряженности магнитного поля и нормальной нагрузки на закономерности изменения значений минимального износа:  
 1 – образец из стали 45 после отжига; 2 – образец из стали 45 после отжига;  
 3 – образец из стали 45 после закалки

Как видно из рисунка 1.2, напряженность магнитного поля, при которой износ минимален, для данных условий испытаний, составляет примерно  $1,5 \cdot 10^5$  А/м для образца 3.

В работе [40] приведены результаты исследования влияния намагничивания (при пропускании постоянного электрического тока через контакт) при трении скольжения ферромагнитных материалов. На рисунке 1.3 показана структура доменов после трения.

Обращает на себя внимание (рисунок 1.4) соответствие намагниченности и коэффициента трения. Там, где наблюдается пик намагниченности, там имеет место повышенное значение коэффициента трения. Этот результат соответствует данным, полученным в работе [59].

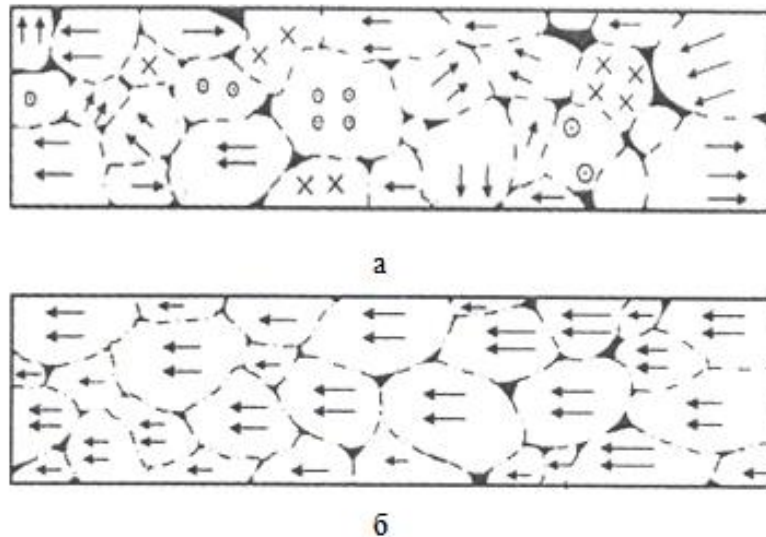


Рисунок – 1.3. Структура доменов ферромагнитного материала (сталь):  
а – до намагничивания; б – после намагничивания

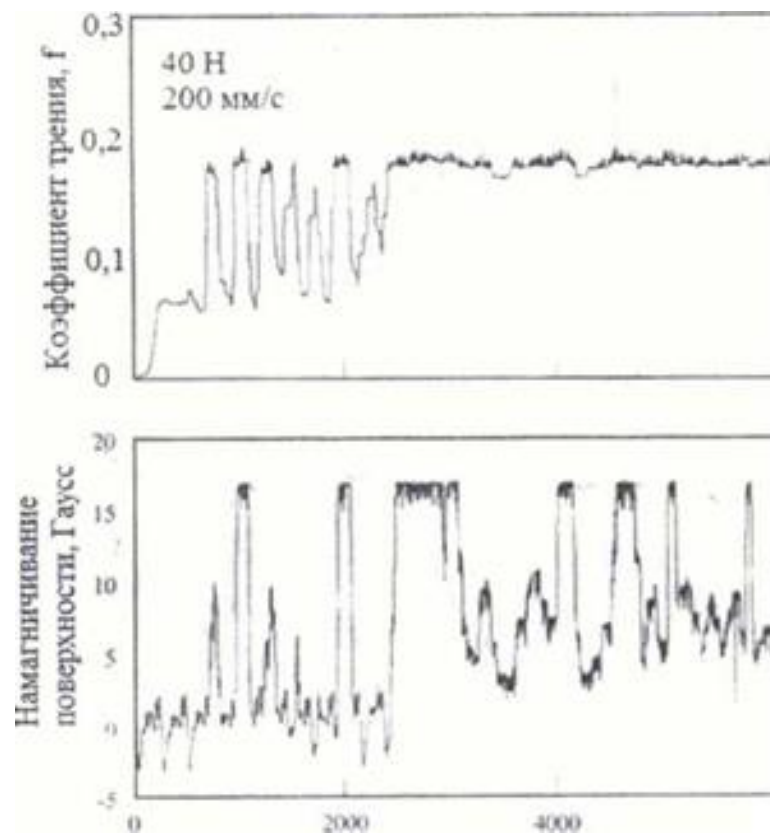


Рисунок – 1.4. Зависимость коэффициента трения и намагниченности  
от пути трения

Еще «предложен механизм влияния магнитного воздействия на атомно-электронном уровне, который состоит в следующем. Инструментальные и

конструкционные стали являются ферромагнетиками – веществами, способными намагничиваться во внешнем магнитном поле и создавать собственное магнитное поле, которое может значительно превосходить внешнее. В соответствии с теорией квантово-механического строения атомов внешнее магнитное поле формирует на поверхности трения образца многоэлектронную наноструктуру с измененной энергией определенных электронных конфигураций. Это обуславливает снижение способности вещества к созданию сильной адгезионной связи. В условиях трения без внешнего магнитного поля созданная электронная наноструктура продолжает осуществлять противoadгезионные функции за счет подпитки энергией остаточного магнитного поля и энергией фрикционных явлений. При этом у системы трения «железо – железо» реализуются более слабые химические связи. Прочность очагов схватывания и масштабы последующих вырывов материала, образующих частицы износа, уменьшаются» [42].

В работе [118] установлено влияние магнитного поля на фазовые превращения. Стали с углеродом массой 1 мас.% подвергались перлитному превращению в гелиевом сверхпроводящем магните в поисках влияния градиента магнитного поля на фазовое преобразование. Увеличение твердости составило 8% при градиенте поля 50 Т/м, при этом его величина зависит от состава стали. Было подтверждено, что упрочнение не имеет отношения к знаку градиента и отсутствует для однородных магнитных полей. Такой вид упрочнения не наблюдался для бинарного сплава  $Fe - C$ . Наблюдения и измерения внутреннего трения показали, что пересыщенные атомы углерода были введены в ферритные слои перлитной фазы под градиентом поля. Такие дополнительные углеродные атомы должны быть объединены с атомами  $Mn$  и (или)  $Cr$  вовремя их превращения в примесные комплексы, ответственные за растворение и возрастание упрочнения.

Экспериментально было подтверждено, что на потерю массы при изнашивании влияет магнитное поле [115]. Эти результаты также означают [113], что возможен контроль трибологического поведения с магнитными полями.

Другими словами, можно будет уменьшить потери на износ и продлить срок службы машин. Поэтому исследование влияния магнитного поля имеет применение для улучшения износостойкости рельсов и железнодорожных колес и повышения эффективности работы подшипников качения. Однако, влияние горизонтального магнитного поля на трибологическое поведение в настоящее время до конца не изучено. Здесь следует отметить различие между вертикальным магнитным полем (МП), когда магнитный поток направлен перпендикулярно поверхности трения и горизонтальным МП, при котором поток направлен вдоль поверхности трения.

Согласно [97], намагниченность нечувствительна к приложенным низким напряжениям в размагниченном состоянии, где ферромагнитный материал не намагничивается. Кроме того, магнитное поле влияет на пластичность ферромагнитного материала в соответствии с [114]. Намагниченность нечувствительна к приложенным низким напряжениям в размагниченном состоянии, где ферромагнитный материал не намагничивается. Кроме того, магнитное поле влияет на пластичность ферромагнитного материала в соответствии с [114].

Кроме того, некоторые исследователи подтверждают, что магнитное поле изменяет микротвердость и механические свойства материала. Микротвердость изношенной поверхности является важным фактором для трибологического поведения. В работе [113] выполнены измерения микротвердости по Виккерсу для поверхности скольжения ферромагнитных материалов в условиях магнитного поля  $H = 4,5 \cdot 10^4 \text{ А м}^{-1}$  и без магнитного поля. Наличие вертикального магнитного поля на поверхности скольжения увеличивает микротвердость. Не только в работе [98], но и в [124] и др. утверждается, что вертикальное магнитное поле на поверхности скольжения увеличивает ее микротвердость.

Ряд исследователей установили, что вертикальный тип магнитного поля уменьшает износ ферромагнитных материалов. Например, в работе [108] наблюдали уменьшение потери массы инструмента. Изучалось влияние внешнего наложенного тока при проделывании отверстия сверлом. В работе [105]



представили разницу эффектов, вызванных двумя видами внешнего магнитного поля. Эксперимент проводился с ферромагнитным штифтом, скользящим по ферромагнитному диску в атмосферной среде. Потеря массы при изнашивании увеличивалась при приложении горизонтального магнитного поля. Это контрастирует с изнашиванием без магнитного поля и для вертикального магнитного поля. Кроме того, причиной уменьшения потерь массы при применении вертикального магнитного поля является то, что в начальный период изнашивания при трении скольжения величина износа изменяется от сильного износа до умеренного. Когда применялось горизонтальное магнитное поле, то продолжался сильный износ. На изнашиваемых поверхностях пальца и диска, на которые действовало горизонтальное магнитное поле, можно видеть, что имел место сильный износ.

В работе [122] пришли к выводу, что энергия активации поверхности повышается за счет намагничивания. Вопреки этому, в работе [112] заявили об уменьшении энергии активации износа с помощью магнитного поля. А в работе [110] пришли к выводу, что магнитное поле снижает энергию активации износа. Кроме того, авторы выразили мнение, что намагничивание способствует образованию мельчайших частиц и окислению частиц износа, поскольку изнашиваемые частицы притягиваются магнитной силой и удерживаются в зоне контакта.

Исследователи [106] обнаружили влияние горизонтального магнитного поля на контакт качения стальных дисков, работающих в нескольких контактных условиях, с использованием двухдисковой машины. Они уточнили механизм инициирования трещины и предложили модель инициации трещины в контакте Герца с магнитным полем. Они также исследовали намагниченность ферромагнитного материала и его связь с энергетическим статусом. Исследовалась связь между толщиной обломков и местом начала трещины из-за прокатки, и между ними существуют определенные отношения.

Изнашивание в условиях сухого трения полиамидного образца по стальной поверхности уменьшается при наличии магнитного поля. Этот эффект

объясняется уменьшением адгезионного взаимодействия (прилипания) и переноса полимера на стальную поверхность. При скольжении со смазочным материалом при наличии магнитного поля, полярные молекулы ориентируются перпендикулярно поверхности трения. При этом наблюдается снижение величины износа вследствие создания защитной пленки, имеющей слоистую плотноупакованную полимолекулярную структуру, препятствующую образованию контактов, лишенных граничных слоев смазочного материала.

В работе [123] представлены результаты экспериментальных трибологических исследований образцов из ферромагнитных сталей. Опыты проводились для предварительно намагниченных образцов и образцов, подверженных воздействию магнитного поля во время проведения испытаний на изнашивание. Показано, что образцы с предварительным (остаточным) намагничиванием имеют худшие показатели (износ и коэффициент трения), чем в случае воздействия магнитного поля во время испытаний. Такой результат связан с образованием изношенных частиц в виде оксидов железа, которые удерживаются магнитным полем в зоне трения.

Схемы намагниченности представлены на рисунке 1.5.

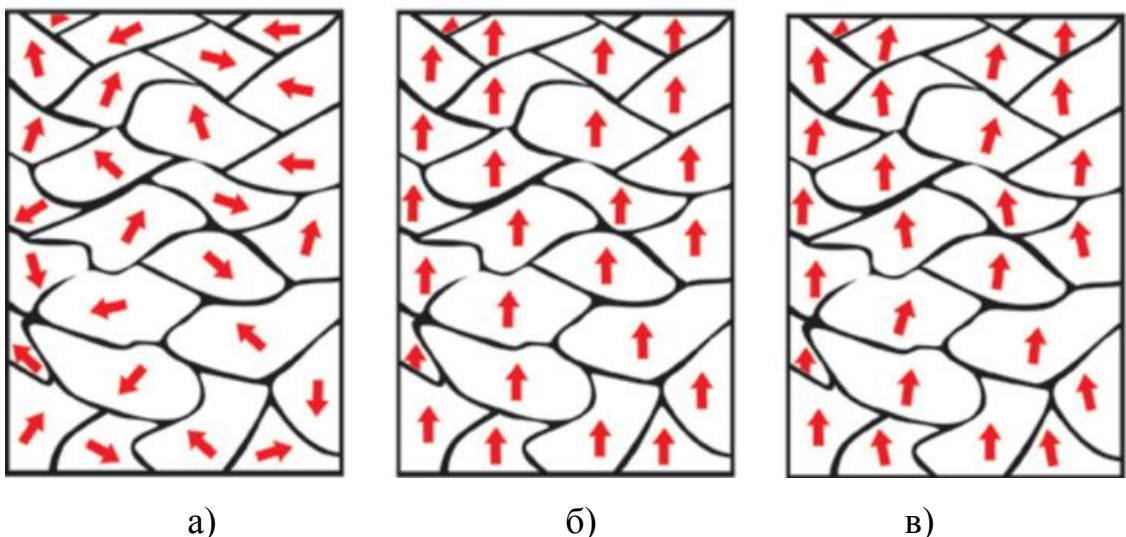


Рисунок – 1.5. Схемы намагниченности: а – исходное состояние доменной структуры ферромагнитного материала; б – воздействие магнитного поля; в – доменная структура после выключения магнитного поля (остаточная намагниченность)

Обзор опубликованных работ показывает, что дальнейшее развитие теоретических моделей влияния магнитного поля на свойства материала сдерживается, прежде всего, в отсутствием доступных приборов, позволяющих одновременно производить измерения различных физических величин (деформаций, температуры, напряжений, токов, магнитных и электрических полей) на микроскопических участках поверхностей деталей и в толще материала зоны их контактного взаимодействия в динамике.

Проведенный анализ возможных гипотез позволяет построить примерный план проведения работ по инженерному анализу, необходимых для создания магнитных устройств для изменения коэффициента трения. Основной причиной, сдерживающей создание магнитных усилителей сцепления (МУС) [16] является отсутствие опыта их проектирования и большой деловой риск, связанный с возникновением непредсказуемых проблем в ходе проектирования и опытной эксплуатации. Вероятность ошибок в процессе проектирования можно существенно снизить за счет своевременного выявления униформации – совокупности данных, необходимых для устранения информационного дефицита в процессе проектирования.

На основании общетеоретического подхода, изложенного в [74], предложен алгоритм инженерного анализа, направленного на выявление униформации и включающего в себя методику анализа теоретических работ, которая позволяет упростить их восприятие инженером-проектировщиком, исходя из того, что МУС есть применение нового физического эффекта (воздействие магнитного поля) при известной частной функции, которую можно определить, как обеспечение фрикционного взаимодействия колеса и рельса. На основе данного алгоритма предложен план работ, охватывающий потенциальные проблемы создания изделия (рисунок 1.6).

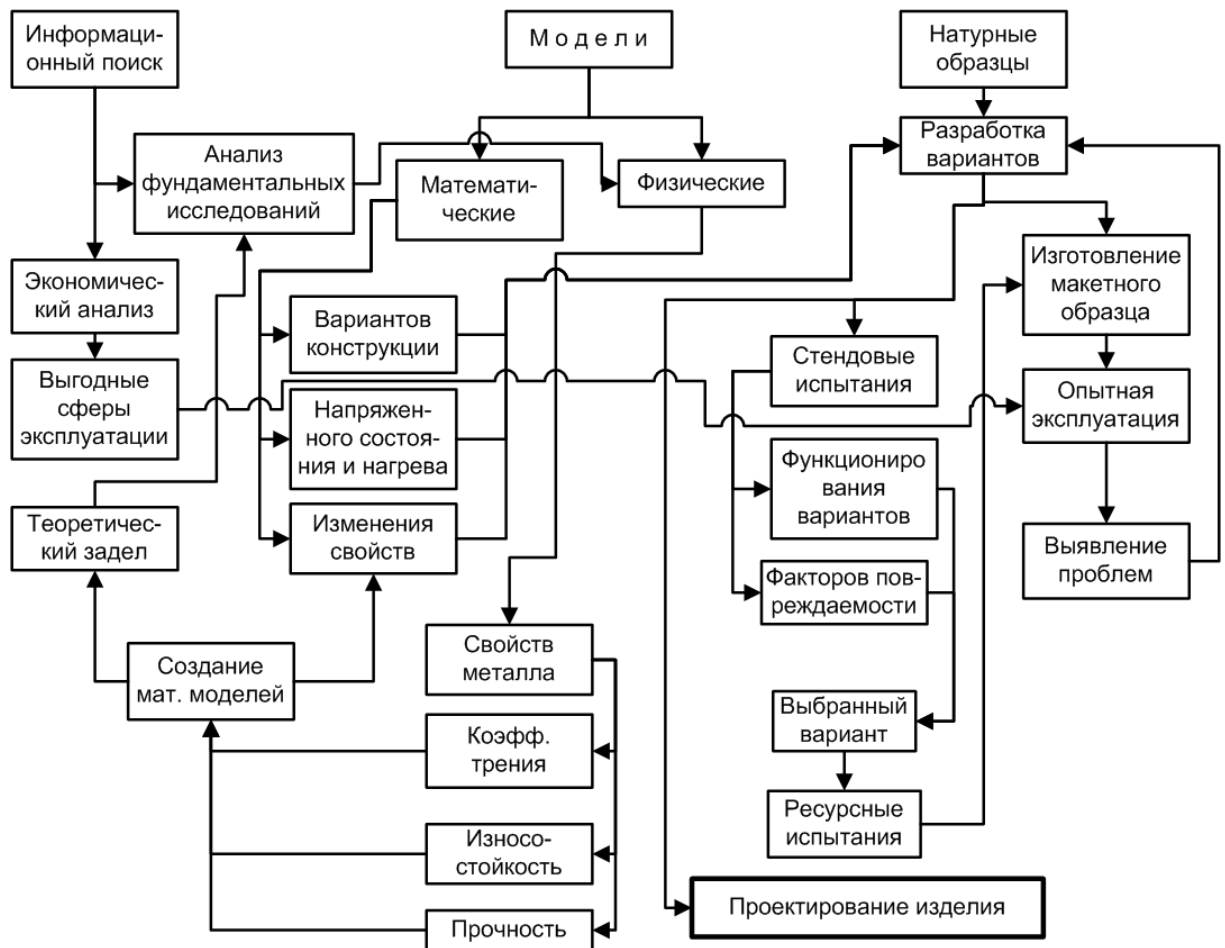


Рисунок – 1.6. Предлагаемый план работ по инженерному анализу при создании электромагнитного усилителя сцепления

Выявлена необходимость параллельно с экономическим проводить более подробный анализ фундаментальных исследований, результатом которого должен быть выбор технических решений ряда физических моделей и лабораторных установок для получения эмпирических закономерностей влияния магнитного поля на свойства вещества в диапазоне параметров, характерных для создаваемых МУС (изменение коэффициента трения, пластичности, износа, трещинообразования и выкрашивания). Полученные эмпирические закономерности могут быть использованы для создания математических моделей, предназначенных для проектирования вариантов конструкции, а также для формирования научно-теоретического задела для анализа и сопоставления с данными фундаментальных исследований.

## 1.2. Конструкторско – технологическое обеспечение качества и эксплуатационных свойств фрикционных гасителей колебаний

Во многих отраслях машиностроения широко используются всевозможные фрикционные гасители колебаний (демпферы трения), а также фрикционные муфты. При наличии источников электропитания на борту машины, эти объекты с незначительной доработкой могут быть превращены в демпфирующие элементы с управляемым трением, что является существенным шагом на пути создания электромеханических (мехатронных) систем.

«Термин демпфирование происходит от немецкого слова *Dämpfer* – глушитель [83] и в современном понимании означает принудительное гашение колебаний либо уменьшение их амплитуды до допустимых пределов [53]. Принудительное гашение колебаний (демпфирование) входит в комплекс действий, направленных на уменьшение интенсивности колебательного процесса объекта виброзащиты. Демпфирование обычно» применяется в тех случаях, когда «уравновешивание механизмов и роторов не приносит желаемых результатов или, когда колебания возникают вследствие других причин. Для принудительного гашения колебаний в современных машинах используются следующие технические средства: гасители колебаний (демпферы); виброизоляторы. Остановимся на каждом из них в отдельности».

«Демпфер (гаситель колебаний) – устройство для успокоения или предотвращения вредных механических колебаний звеньев машин и механизмов путем поглощения энергии» [53].

На рисунке 1.7 представлены схемы гасителей колебаний.

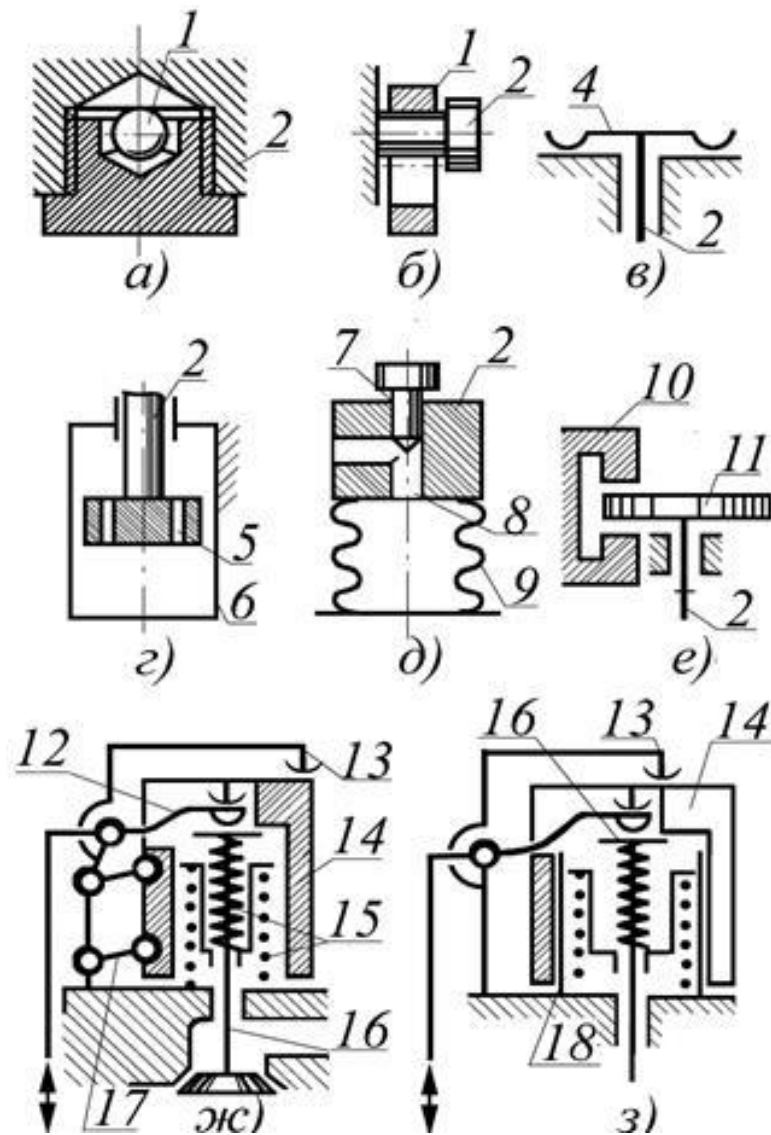


Рисунок – 1.7. Схемы гасителей колебаний

На рисунке 1.7 ж, з «представлены исполнения инерционно-ударного демпферов в клапанном механизме двигателя внутреннего сгорания. Движение клапану 16 передается от распределительного механизма посредством коромысла 12. При движении клапана 16 вниз сжимаются пружины 15, а звено 14 опускается вниз. При движении коромысла, освобождая пружины, клапан с ускорением движется вверх. Масса звена 14 вследствие инерции приводит к более медленному нарастанию ускорения и смягчению удара клапана по поверхности седла. Энергия, переданная звену 14, обуславливает его дальнейшее движение (после закрытия клапана) и удар о корпус 13. Звено 14» на

рисунке 1.7 ж подвешено к корпусу 13 посредством параллелограмма 17, на рисунке 1.7 звено 14 установлено так, что может поступательно перемещаться на втулке 18.

«Выбор типа гасителя определяется характеристиками колебательной системы и ее конструкцией. Наибольшее смягчение ударов и гашение колебаний обеспечивают гидравлические и фрикционные гасители колебаний. Этим объясняется их широкое применение в железнодорожном и автомобильном подвижном составе» [57].

Известно, что ресурс изделия рассчитывается на этапе конструирования, обеспечивается на этапе производства и поддерживается на этапе эксплуатации, что приводит к уменьшению стоимости всего жизненного цикла технической системы или конкретного изделия. При этом на каждом из указанных этапов проводится обоснованная рационализация конструкции путем многовариантного технико-экономического сопоставления:

1) на этапе конструирования проводится подбор материалов трения, обоснование технологичности конструкции с точки зрения воспроизведения геометрического объема;

2) на этапе производства уже значительное внимание уделяется свойствам сопрягаемых поверхностей и обеспечению их стабильности и требуемых критериев качества;

3) на этапе эксплуатации считается рациональным достижение обслуживания и ремонта изнашиваемых и заменяемых деталей в одно, как правило назначаемое время ремонта, при котором технически обеспечивается доступ к обслуживаемому узлу.

Таким образом, при разработке конструкции на этапе 1) фрикционного гасителя колебаний для машины известного назначения является уместным, прежде всего, определиться с предполагаемым, заданным ресурсом пары трения, сопоставимым с первым текущим ремонтом изделия. Исходя из этого и некоторых экономических соображений, принимается доступный вариант материалов трущихся поверхностей, исходя конструкция и компоновочного

габарита этого узла машины. При разработке геометрии детальных чертежей значительное внимание уделяется предстоящей возможности ее воспроизведения на технологическом оборудовании и заданию необходимой шероховатости трущихся поверхностей.

На этапе изготовления 2) уже все направлено на достижение параметров детали, заложенных конструктором. При этом, как указывалось, значительное внимание уделяется методам повышения ресурса по износу сопрягаемых поверхностей узлов, подвергающихся динамической нагрузке путем их упрочнения доступными и возможными технологическими методами:

- механическими способами, такими как дробеструйная обработка или упрочняющее накатывание;
- термическими способами, такими как газопламенная или индукционная закалка,
- химико-термическими способами, таким как азотирование, цементация с последующей закалкой или карбонитрирование.

При дробеструйной обработке или упрочняющем накатывании прочность повышается в основном благодаря частичной пластической деформации поверхностного слоя. Создаваемое собственное напряжение сжатия в близкой к поверхности области накладывается на эксплуатационные нагрузки, и таким образом уменьшаются напряжения в конструктивном узле. В течение срока службы в силу возникающих нагрузок может также происходить релаксация напряжений в упрочненных зонах. Учитывая большое количество циклов нагружения (времени эксплуатации) осей колесных пар, эти механизмы могут скомпенсировать, по крайней мере, часть изначальной прочности.

Благодаря индукционной или газопламенной закалке прочность повышается за счет структурных превращений в поверхностном слое в результате частичного нагрева с последующим ускоренным охлаждением. При этом технологическими параметрами являются глубина нагреваемой зоны и последующая скорость охлаждения. Характерной чертой поверхностной закалки является протекание процесса закалки в глубину. Если узел находится уже в улучшенном состоянии,



то возможно дальнейшее повышение прочности в близких к поверхности зонах, но только в ограниченном объеме.

Химико-термические способы, такие как азотирование, цементация с последующей закалкой или карбонитрирование, приводят к изменению химического состава в поверхностном слое. Они максимально изменяют материал и требуют применения специальных термообрабатывающих установок. Изменение структуры и химического состава в поверхностном слое материала происходит путем введения углерода и/или азота методом диффузии. Механизмы действия при цементации с последующей закалкой представляют собой обогащение поверхностного слоя углеродом, и последующее мартенситное превращение поверхностного слоя. Максимальная доля упрочнения приходится на напряжения, вызываемые искажением в кристаллической решетке в результате перенасыщения углеродом. При соответствующем составе стали также добавляется эффект дисперсионного упрочнения в результате выделения карбидов. Азотирование и карбонитрирование повышают прочность за счет включения атомов углерода и азота в тетраэдрические поры решетки и образования нитридов железа, углерода и др. при соответствующем содержании легирующих элементов в обрабатываемых марках сталей. При этом повышается износостойкость. Кроме того, в результате пассивируемости нитрида железа повышается коррозионная стойкость. Технологическими параметрами химико-термических способов обработки являются время обработки, температура, давление технологического газа и условия охлаждения.

Описанные методы доступных способов технологического повышения эксплуатационных свойств поверхностного слоя иллюстрируют многообразие возможности достижения необходимого ресурса. Его величина определяется обычно проведением технико-экономических исследований для уменьшения издержек жизненного цикла изделия.

Поэтому результатом этого этапа 3) является обоснование периодичности и времени проведения ремонтов изделия, исходя из назначенного срока службы по техническим условиям или контракту на поставку.

### 1.3. Особенности функционирования фрикционных гасителей колебаний

«Рассмотрим принцип образования сил сопротивления во фрикционных и гидравлических гасителях колебаний [8].

Во фрикционных гасителях колебаний сила сопротивления создается за счет трения каких-либо элементов гасителя. Такого типа гасители могут создавать или постоянную, или переменную величину сил трения, зависящую от величины и направления перемещения. У фрикционных гасителей сила трения всегда направлена в сторону, обратную скорости перемещения. Таким образом, если сила трения равна  $F_{тр}$ , то сопротивление гасителя:  $F_{гас} = -F_{тр} \text{sign} \dot{z}$ , где  $z$  – величина скорости перемещения, а  $\text{sign}$  – обозначение знака  $z$ . Если скорость  $z$  положительна, то  $\text{sign} \dot{z} = +1$ , и наоборот, если скорость  $z$  отрицательна, то  $\text{sign} \dot{z} = -1$ . Таким образом, при положительном направлении скорости перемещения  $F_{гас} = -F_{тр}$ , а при отрицательном  $F_{гас} = +F_{тр}$ .

В этом случае, как и было написано выше,

$$F_{гас} = -F_{тр} \text{sign} \dot{z} . \quad (1.1)$$

Примером такого типа гасителей являются дисковые фрикционные гасители, применяемые в моторвагонном подвижном составе.

Имеются гасители, которые создают некоторую постоянную величину сопротивления при движении в одном направлении  $F_B$  и также постоянную, но другую величину  $F_H$  при движении в другом направлении.

$$F_{тр} = -k_1 z \text{sign} \dot{z} , \quad (1.2)$$

где  $z$  – величина перемещения от положения равновесия колебательной системы;  $k_1$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции гасителя.

Обычно 
$$k_1 = k\varphi c , \quad (1.3)$$

где  $j$  – коэффициент относительного трения фрикционных гасителей колебания;  $c$  – жесткость упругого элемента, параллельно которому присоединен гаситель;  $k$  – коэффициент пропорциональности, показывающий, какую долю усилия при сжатии рессоры на единицу перемещения гаситель преобразует в нормальные давления между трущимися элементами.

Особую группу конструкций гасителей составляют гидравлические гасители. У них сопротивление пропорционально скорости перемещения элементов гасителя, т. е.

$$F_{\text{гас}} = -\beta \dot{z}, \quad (1.4)$$

где  $b$  – коэффициент сопротивления вязкого трения гидравлических гасителей.

Могут быть гидравлические гасители, у которых сопротивление пропорционально квадрату скорости перемещения, т.е.

$$F_{\text{гас}} = -\beta (\dot{z})^2 \text{sign} \dot{z}. \quad (1.5)$$

«В простейшем случае источник возбуждения и защищаемый объект считаются твердыми телами, движущимися вдоль одной и той же оси. На рисунке 1.8 а показана динамическая модель машины, установленной на фундаменте. Машина с общей массой  $m$  является источником возбуждения, а фундамент – защищаемым объектом. Масса фундамента существенно больше массы машины, и потому он считается основанием. Виброизолятор, помещенный между машиной и фундаментом (основанием), имеет приведенный коэффициент жесткости  $c$  и приведенный коэффициент сопротивления  $b$ .

Приведенный коэффициент жесткости  $c$  определяется из условия равенства потенциальной энергии виброизолятора и эквивалентной пружины и, в общем случае, может быть нелинейной функцией перемещения  $y$ , отсчитываемого от положения равновесия, определяемого постоянной составляющей внешней силы  $F(t)$ . Приведенный коэффициент сопротивления  $b$  определяется из условия равенства работ, затрачиваемых на трение в виброизоляторе и в эквивалентном

демпфере, и в общем случае также может быть нелинейной функцией перемещения  $y$  и скорости  $\dot{y}$ ».

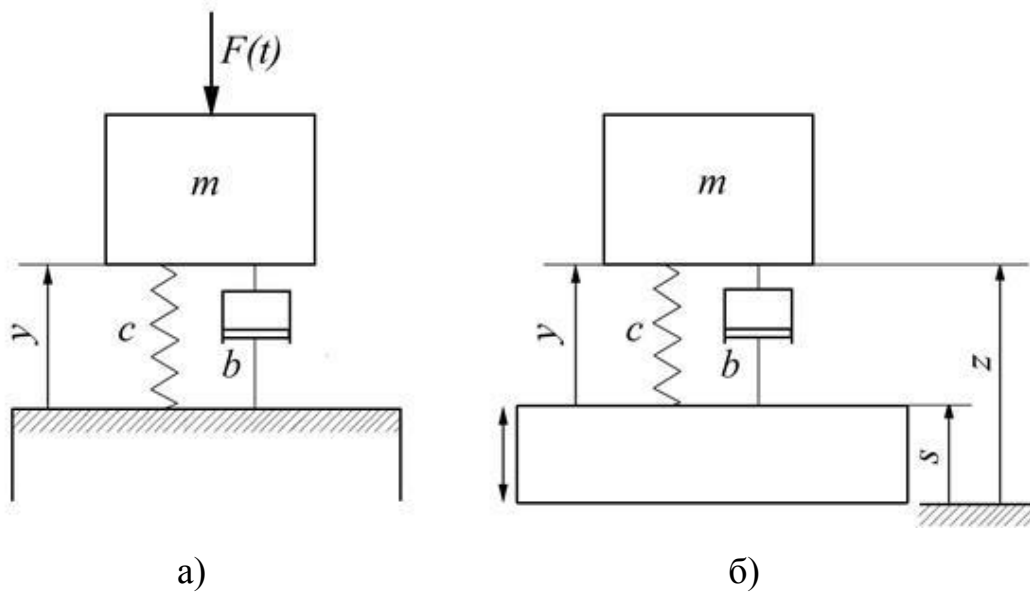


Рисунок – 1.8. Динамическая модель машины, установленной на фундаменте:  
а, б – соответственно силовое и кинематическое возбуждение колебаний

Обобщенная (приведенная) реакция виброизолятора  $Q$  и внешняя сила  $F(t)$  направлена вдоль одной и той же оси, совпадающей с направлением перемещения  $y$ , и потому виброизолятор называется одноосным.

Уравнение движения источника возбуждения, рассматриваемого как твердое тело, при указанных предположениях имеет вид:

$$m \ddot{y} = F(t) + Q(y, \dot{y}) . \quad (1.6)$$

Назначение виброизолятора в этом случае состоит в уменьшении динамической (переменной) составляющей реакции  $Q$ , передаваемой на основание (фундамент) при заданном воздействии переменной силы  $F(t)$ .

На рисунке 1.8 б показан другой случай, при котором защищаемый объект представлен как твердое тело с массой  $m$ , а источником возбуждения является основание, совершающее колебания по закону  $s(t)$ . Задача виброизоляции здесь состоит в уменьшении динамической составляющей  $Q$ , передаваемой на защищаемый объект.

Уравнение движения защищаемого объекта (механизма или машины) как твердого тела при колебаниях основания имеет следующий вид:

$$m[\ddot{y} + \ddot{s}(t)] = Q(y, \dot{y}), \text{ или } m \ddot{y} = -m \ddot{s}(t) + Q(y, \dot{y}). \quad (1.7)$$

Виброзащитные системы, показанные на рис. 1.8, различают по виду возбуждения колебаний. В первом случае (рис. 1.8 а) колебания вызываются переменной силой  $F(t)$ , и возбуждение колебаний называется силовым. Во втором случае (рис. 1.8 б) колебания вызываются перемещением основания по заданному закону движения, и возбуждение колебаний называется кинематическим. Уравнение движения (1.7) при кинематическом возбуждении совпадает с уравнением (1.6) при силовом возбуждении, если принять  $F(t) = m \ddot{s}$ .

Хорошие ходовые качества локомотива обеспечиваются стабильностью колебательного процесса с расчетной амплитудой колебаний. Это возможно при условии правильного подбора демпфирующей силы гасителя колебаний. Гасители колебаний дают возможность создавать силы трения любого характера, обеспечивающие демпфирование вертикальных колебаний подрессоренной массы локомотива. При этом механическая энергия колебаний переводится в тепловую с последующим ее рассеиванием. Рассмотрим устройство и особенности функционирования двух основных типов демпферов, применяемых на тепловозах.

Для обеспечения удовлетворительной вертикальной динамики сила трения (сила сопротивления) гасителя не должна намного отклоняться от расчетного значения. Снижение ее на 20 % приводит к увеличению вертикальных ускорений колебаний буксы почти в 2,5 раза, увеличение на 20 % повышает жесткость рессорного подвешивания на 40 – 50 % (листовые рессоры, включенные последовательно винтовым пружинам, увеличивают жесткость подвешивания всего на 10 – 15 %).

#### **1.4. Современные технологические методы повышения эксплуатационных свойств фрикционных гасителей колебаний**

«Большая часть деталей машин работает в условиях изнашивания, коррозии, а также циклических нагрузок, разрушающих поверхностный слой материала. На сегодняшний день существует множество способов упрочнения поверхности металлов и сплавов с целью повышения их физико-механических и эксплуатационных свойств, таких как твердость, износостойкость, коррозионная стойкость, усталостная прочность и других. Все эти способы разделяются на следующие основные классы:

*Термические методы* – закалка.

*Рекристаллизация* – обкатывание роликами или шариками, – алмазное выглаживание.

*Деформационное старение* – это процесс, протекающий после пластической деформации, если она происходит ниже температуры рекристаллизации.

*Химико-термические методы* основаны на процессе поверхностного насыщения стали различными элементами, путем их диффузии из внешней среды при высокой температуре.

*Цементация* – химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя атомами углерода при нагреве до температуры 900 – 950 °С. Цементации подвергаются стали с низким содержанием углерода (до 0,25%). По способу проведения различают цементацию в твердом карбюризаторе, цементацию в газовом карбюризаторе, цементацию в пастах, цементацию в кипящем слое и электролитическую цементацию. Лазерную цементацию осуществляют на основе растворов графита или сажи в ацетоне, спирте и других растворителях.

*Азотирование* – химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя азотом в атмосфере частично диссоциированного аммиака. Азотирование чаще проводят при температурах

500 – 600 °С. Низкотемпературное газовое азотирование применяется для среднеуглеродистых легированных сталей. Азот образует с легирующими элементами устойчивые нитриды, которые придают поверхностному азотированному слою очень высокую твердость. Азотирование применяется для упрочнения, повышения предела усталости и износостойкости, а также повышения коррозионной стойкости различных изделий. Известен метод азотирования при помощи лазерного излучения. Выполняется он с использованием паст на основе аммиачной соли, карбамида и др. Для азотирования сталей необходимо создать над поверхностью давление азота порядка 9 МПа, что делает затруднительным практическое применение данного процесса, в то время как титан, цирконий, гафний и сплавы на их основе достаточно подвергнуть лазерному оплавлению в струе азота.

Цианирование и нитроцементация – процессы химико-термической обработки, заключающиеся в высокотемпературном насыщении поверхности изделия азотом и углеродом. Причем, процесс совместного насыщения поверхности азотом и углеродом в жидких ваннах принято называть цианированием, а насыщение в газообразных средах – нитроцементацией.

Процесс нитроцементации обычно ведут при температурах 820 – 860 °С в средах эндогазов и эндоэкзогазов с добавками природного газа (метана) и аммиака. Чем больше толщина требуемого слоя насыщения, тем меньше должно быть содержание аммиака и метана и выше температура химико-термической обработки. Основное назначение процесса нитроцементации – повышение твердости, контактной выносливости, износостойкости и предела выносливости изделий. Эффективная толщина насыщаемого слоя не должна превышать 1 мм, так как при большей толщине в структуре слоя появляются фазы, резко снижающие предел выносливости и контактную выносливость материала.

Цианирование проводят при температурах от 800 до 950 °С в расплавах, содержащих цианистые соли, причем с повышением температуры химико-термической обработки доля углерода в слое растет, а азота – понижается.

Борирование – процесс химико-термической обработки, состоящий в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали бором при высокотемпературной выдержке в соответствующих насыщающих средах. Это один из наиболее эффективных и универсальных процессов химико-термической обработки. Борированию могут подвергаться стали перлитного, ферритного и аустенитного классов. Борирование может осуществляться в твердых, жидких (электролизное и безэлектролизное борирование) и газообразных средах. Лазерное борирование проводят, в основном, с использованием легирующих составляющих в твердой фазе в виде смеси порошков бора, карбида бора, борного ангидрида, буры, ферробора со связующим веществом. В отличие от цементации и азотирования, при борировании в структуре отсутствует остаточный аустенит, что обеспечивает высокие твердость и износостойкость.

*Метод газотермического напыления* заключается в расплавлении материала покрытия (проволока или порошок) с последующим нанесением (напылением) его на основу в газовом потоке. В микроне зоне удара частиц расплава о покрываемую поверхность, они деформируются и растекаются, последовательно слипаясь друг с другом и затвердевая, формируя плоский слой. Связь напыляемых частиц с основой происходит за счет тепловой и кинетической энергии, которая определяется температурой и скоростью этих частиц. Связь покрытия с основой – адгезионная, она осуществляется за счет межмолекулярных сил и механического сцепления его с неровностями шероховатой поверхности.

*Высокоскоростное газопламенное напыление* – характеризуется высокими скоростями нанесения порошкового покрытия на материал подложки. Скорость нанесения обычно превосходит скорость звука не менее, чем в 5 раз. В странах Европы и Северной Америки высокоскоростное напыление практически вытеснило гальванику и методы вакуумного напыления во многих отраслях. Твердосплавные покрытия, нанесенные методами высокоскоростного напыления, по всем статьям превосходят гальванические покрытия, процесс создания которых признан чрезвычайно канцерогенным.

*Плазменное напыление* – процесс нанесения покрытия, заключающийся в



том, что в высокотемпературную плазменную струю подается распыляемый материал, который нагревается, плавится и в виде двухфазного потока направляется на подложку. При ударе и деформации происходит взаимодействие частиц с поверхностью основы или напыляемым материалом и формирование покрытия. Часто используются для создания покрытий, повышающих износостойкость. Плазменное напыление, проводимое в атмосферных условиях с успехом заменило вакуумные технологии.

*Электродуговая металлизация* заключается в непрерывном плавлении металла, распылении его на мельчайшие частицы и нанесении на подготовленную методом абразивно-струйной обработки поверхность. Попадая на металлизированную поверхность, частицы деформируются, нагромождаются друг на друга и образуют металлизационное покрытие слоистого строения. При этом температура изделия в ходе напыления не превышает 120 °С.

Основными недостатками данного метода являются большая пористость получаемого покрытия и высокий расход материала.

*Детонационное напыление* является одним из видов газотермического нанесения покрытий, использующих энергию горючих газов (в основном пропан-бутана) в смеси с кислородом, а также со сжатым воздухом (азотом, аргоном). Детонационно-газовый метод, используя энергию взрыва газовых смесей, является циклическим процессом, обладает высокой удельной мощностью. Преимуществами данного метода являются высокая адгезия покрытия, низкая пористость, отсутствие деформации. К недостаткам можно отнести довольно низкую производительность и недостаточную надежность существующего оборудования.

*Газопламенное напыление.* Металлический либо полимерный порошковый, проволочный либо шнуровой материал подается в пламя ацетилен-кислородной либо пропан-кислородной горелки, расплавляется и переносится сжатым воздухом на поверхность изделия, где, остывая, формирует покрытие. Метод прост в освоении и применении, может применяться как в ручном, так и в автоматизированном режиме. Является самым распространенным методом

газотермического напыления.

*Метод наплавки* заключается в нанесении на поверхность изделия слоя металла при помощи сварки плавлением. Различаются, в основном, методом плавления наносимого материала: газопорошковая наплавка; наплавка под флюсом; наплавка самозащитными проволоками; вибродуговая наплавка; плазменная наплавка. Основной функцией данной группы методов является возможность восстановления изношенных поверхностей деталей.

*PVD-процесс* – процесс нанесения покрытия, заключающийся в осаждения материала в виде индивидуальных атомов или молекул. Наиболее общие *PVD* методы включают разбрызгивание и испарение. Разбрызгивание, которое является главным процессом *PVD*, использует перенос материала от источника к детали посредством бомбардировки цели газовыми ионами, которые ускоряются высоким напряжением.

Интересно отметить, что практически любой способ реализации может быть осуществлен с применением лазерного излучения. Из всех выше перечисленных технологических методов повышения эксплуатационных свойств наиболее распространенными являются первые два. На них приходится более 60% от всего объема поверхностно упрочненных материалов.

## **1.5. Цель и задачи исследования**

*Целью настоящей работы* является исследование триботехнических показателей пар трения «сталь – сталь» применительно к фрикционным гасителям колебаний на основе установления закономерностей влияния магнитного поля на процессы их трения и изнашивания.

В соответствии с целью необходимо решить следующие взаимосвязанные *задачи*:

– разработка, изготовление оригинальных методик и установок для экспериментальных исследований влияния магнитного поля на триботехнические показатели в условиях подвижного и неподвижного контактов;

– исследование влияния магнитного поля на величину молекулярной составляющей коэффициента трения стальных поверхностей;

– разработка физически обоснованной модели намагниченности элементов пар трения;

– исследование влияния направленности магнитного потока, параллельно оси исследуемого образца (вертикальный магнитный поток) и перпендикулярно к оси исследуемого образца (горизонтальный магнитный поток), на величину силы и коэффициента трения;

– исследование влияния параметров магнитного поля на процессы трения в условиях подвижного контакта и неподвижного соединения применительно к фрикционным гасителям колебаний;

– оценка влияния магнитного поля на температуру поверхности трения скользящего контакта;

– оценка влияния магнитного поля на процессы изнашивания пар трения скольжения и соединений с натягом применительно к фрикционным гасителям колебаний;

– расчет экономической эффективности от применения результатов исследований.

## ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1. Методика проведения теоретических исследований

Методологической основой работы является системный подход к исследованию триботехнических показателей сопряжений «сталь – сталь» применительно к фрикционным гасителям колебаний на основе влияния магнитного поля.

Исследования базируются на современных положениях статистической теории и методологии, теории контактного взаимодействия пар трения, молекулярно-механической теории трения и изнашивания, а также применении современных математических методов исследований.

Теоретические исследования триботехнических показателей сопряжений «сталь – сталь» применительно к фрикционным гасителям колебаний проводились на базе системного анализа, основой которого является построение моделей технических систем при широком использовании информационно-вычислительной техники.

Теоретические исследования по моделированию намагниченности сопряжений «сталь – сталь» применительно к фрикционным гасителям колебаний проводились с использованием современной системы моделирования магнитного поля в конечноэлементном пакете *ANSYS*.

Проведение теоретических исследований в настоящей работе базируется также на моделировании процесса контактного взаимодействия, трения и изнашивания сопряжений «сталь – сталь» применительно к фрикционным гасителям колебаний с учетом их физико-механических свойств.

Основой теоретических исследований являются широкое применение современных математических методов исследований, соответствующий математический аппарат, а также методы математического моделирования.

При проведении исследований использовались современные средства расчета и обработки данных.

## **2.2. Методика проведения экспериментальных исследований**

### **2.2.1. Объект исследования**

Объектом исследования являются пары трения «сталь – сталь» применительно к фрикционным гасителям колебаний рессорного подвешивания транспортных средств.

В технике вообще и в подвижном составе в частности, большое распространение получили гасители колебаний на основе сухого трения – фрикционные. «Такие гасители колебаний используются в рессорном подвешивании локомотивов и вагонов в силу наличия позитивных качеств, таких как сравнительная простота конструкции, компактность, нетребовательность к сезонному обслуживанию и т.п., что обеспечивает малые затраты на их изготовление и эксплуатацию. Однако, одним из самых существенных недостатков традиционных конструкций фрикционных гасителей колебаний в динамическом отношении является наличие зон нечувствительности такого рессорного подвешивания, где они применяются.

Исследования показали, что для работы фрикционных гасителей обычно характерны повышенный износ деталей, ударные нагрузки, возможные заклинивания и значительная нестабильность коэффициента трения, что является причинами снижения общей надежности узла. Основные факторы нестабильности коэффициента трения – нарушение технологии изготовления фрикционных элементов, отклонение размеров отдельных деталей и несовершенство конструктивного исполнения с большой чувствительностью к изменению коэффициента трения» [31, 89].

Бедуящем в улучшении и контроле динамических показателей работы фрикционных гасителей колебаний будем возможное управление силой их работы в зависимости от колебательных процессов. Такая возможность возникает при введении в конструктивное решение фрикционных гасителей колебаний магнитного поля с воздействием на зону трения и обратной связью по его величине. При наличии источников электропитания на борту машины, они с незначительной доработкой могут быть превращены в демпфирующие элементы с управляемым трением, что является существенным шагом на пути создания электромеханических (мехатронных) систем.

Известны пассажирские вагоны и электропоезда, находящиеся в эксплуатации в странах бывшего СССР, оборудованные тележками типа КВЗ-ЦНИИ I и КВЗ-ЦНИИ II, которые выпускаются с 1965 года [32, 60, 81]. Со второй половины 1960-х на протяжении более четырех десятилетий Рижские электропоезда ЭР2 выполняют основной объем пригородных пассажирских перевозок на железных дорогах бывшего Советского Союза и постсоветского пространства.

Управляемый фрикционный гаситель колебаний выполнить на базе серийного сравнительно просто. Для чего потребуется лишь интегрировать в нем на сухари электромагнитную катушку, которая предназначена создавать магнитное поле в зоне трения.

У железнодорожных тележек широкое распространение получило решение, основанное на буксовом фрикционном гасителе. Направляющая часть этого устройства 1 называется шпинтоном (рисунок 2.1).



Шпинтон одновременно является гасителем колебаний, предназначенным для снижения колебаний в рессорном подвешивании тележек грузовых и пассажирских вагонов. Работая одновременно и параллельно с пружинами, он создает диссипативные (рассеивающие) силы, необходимые для гашения или ограничения амплитуд колебаний вагона или его частей. Шпинтон представляет собой круглый стальной стержень. Шпинтоны (в зависимости от конструкции) запрессовывают в раму с натягом.

Принцип действия шпинтонного узла основан на возникновении сил трения между фрикционными сухарями и втулкой при их взаимных перемещениях во время колебания рамы относительно буксы. По высоте сухари расположены между двумя конусными кольцами. Комплект сухарей и конусных колец постоянно поджимается пружиной, которая упирается в бурт утолщенной части шпинтона.

В процессе колебаний вагона и рамы тележки на надбуксовых пружинах происходит перемещение фрикционных сухарей и возникновение больших сил трения между втулкой и сухарями. Это приводит в эксплуатации к изнашиванию шпинтона по цилиндрической поверхности в результате вертикальных перемещений фрикционной втулки.

«Типичный режим эксплуатации пары трения шпинтонного узла:

- давление на поверхности трения не менее 2 МПа;
- скорость относительного перемещения деталей 0,1...0,2 м/с;
- длительность одного цикла нагружения 0,2...0,4 с;
- среднечасовое число нагружений 200...1500 циклов.

Рассмотрим передачу как вертикальных, так и горизонтальных сил в буксовых соединениях колесных пар с рамой тележки на примере буксовых гасителей колебаний типа ТВЗ-5. Их технические характеристики: расчетное сжатие пружины 37...38 мм при жесткости 88 кН/м; сила трения при сжатии 1,4...4,3 (среднее 2,85) кН, при отдаче 1,0...2,0 (среднее 1,5) кН.

Расчетная средняя сила нажатия пружины 11 (рис. 2.15) на шесть фрикционных сухарей 5 составляет 3,3 кН, что обеспечивает прижатие их к



фрикционной втулке 4 суммарной силой 6,60 кН, т.е. 1,1 кН на один фрикционный сухарь 5. Значение усредненной силы трения и усредненного коэффициента сухого трения фрикционных сухарей 5 по фрикционной втулке 4 находится соответственно в пределах 1,5...2,85 кН и 0,227...0,43. Реальные поперечные силы величиной порядка 5 кН, действующие через один фрикционный гаситель колебаний, превышают расчетные силы прижатия фрикционных сухарей 5 к фрикционной втулке 4 в 2,5...5 раз при движении в кривых, что приводит к значительному износу пары трения» [8].

В следствии чего, поиск и подтверждение технических решений, направленных на совершенствование работы шпинтонного узла при его эксплуатации (вертикальное перемещение сухарей относительно втулки шпинтона в условиях трения скольжения, а также посадка шпинтона в раму тележки с гарантированным натягом) являются весьма актуальными.

### 2.2.2. Материалы, образцы, детали

Экспериментальные исследования процессов в контакте пар трения, проводят на лабораторных установках [29, 36] и в реальных условиях эксплуатации [63]. Каждое направление этих исследований имеет свои преимущества и недостатки. В настоящей работе применены лабораторные методы исследований, которые позволяют выделить из общего количества основные факторы, влияющие на процесс трения и изнашивания. При проведении лабораторных исследований легче соблюсти принцип, сформулированный В.Д. Кузнецовым: «Задача научного исследования и заключается в том, чтобы исследовать явление не во всей сложности, а в упрощенном виде, когда из всех влияющих на это явление факторов изменяется только один, а остальные остаются неизменными».

Показано, что свыше 50% описываемых в международном журнале "Wear" испытаний, проведенных в течение 13 лет, было осуществлено на лабораторных

установках и лишь 17% – на реальных объектах. Поэтому в основу дальнейших исследований был положен лабораторный подход.

Учитывая, что в работе предполагается изучение влияния на триботехнические процессы магнитного поля и подтверждение ранее проведенных теоретических расчетов, перед началом исследований проводилась настройка магнитных систем лабораторных установок и их тарировка.

Магнитное поле измерялось датчиком Холла. Перед выполнением эксперимента производилась тарировка датчика. Для этого датчик помещался в центр соленоида, диаметр которого меньше его длины. На полый керамический цилиндр радиусом 33 мм и длиной 290 мм равномерно намотаны две обмотки провода диаметром 1 мм по 362 витка каждая. Данное соотношение длины и диаметра обмотки позволяет рассматривать соленоид как бесконечно длинный. Силовые линии в соленоиде параллельны оси керамического цилиндра (рисунок 2.2).

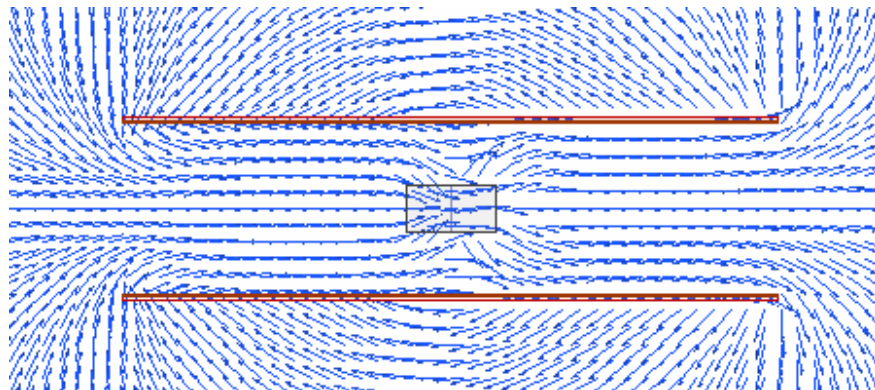


Рисунок – 2.2. Схема распределения силовых линий в соленоиде

Обмотка катушек питалась от источника постоянного напряжения через реостат. Для получения тарировочной зависимости изменялась величина тока катушек соленоида  $I = 0 \div 5A$  и измерялась электродвижущая сила (ЭДС) Холла –  $\mathcal{E}_{холл}$ . Магнитная индукция  $B_c$  рассчитывалась по формуле:

$$B_c = \frac{\mu_0 In}{\sqrt{1 + 4\left(\frac{r}{L}\right)^2}}, \quad (2.1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная  $4\pi 10^{-7}$  Гн/м;  $In$  – МДС катушек,  $\frac{r}{L}$  – отношение радиуса соленоида к длине.

Тарировочный график представляет собой прямо пропорциональную зависимость  $\mathcal{E}_{холл} = kB_c$  (рисунок 2.3). Чувствительность датчика составляет:  $k = 1 мВ / Гс$ , коэффициент чувствительности –  $0,104 Тл / В$ .

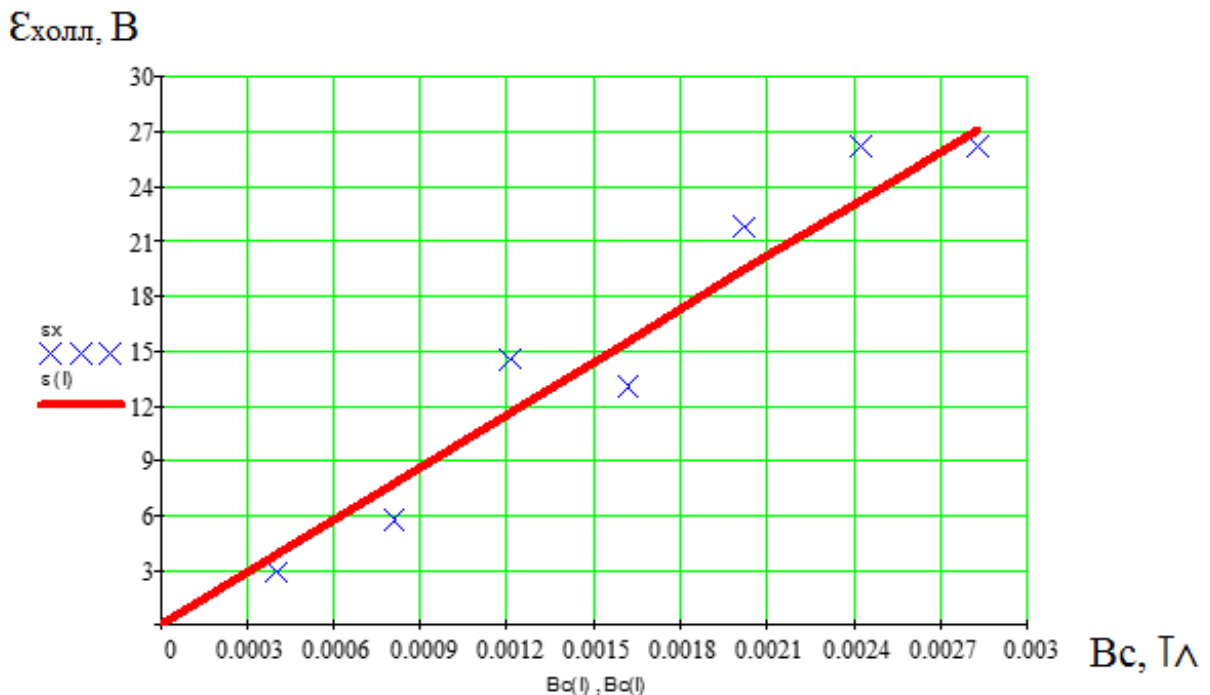


Рисунок – 2.3. Тарировочная зависимость датчика Холла (электродвижущей силы от магнитной индукции)

Для исследования влияния магнитного поля на молекулярную составляющую коэффициента трения была разработана схема для испытаний пары трения «сталь – сталь». Схемное решение этой трибологической системы представляет собой пару трения «шар – плоский образец» (одношариковый трибометр). Шар изготовлен из закаленной стали ШХ 15. Плоские образцы прямоугольного сечения обоймы изготовлены из стали 45. Твердость составляет 45 *HRC*, параметр шероховатости  $Ra = 0,8$  мкм.

С целью установления закономерностей влияния магнитного поля на поведение контакта при *скольжении* была разработана схема для испытаний пары трения «сталь – сталь». Схемное решение этой трибологической системы, приведенное на рисунке 2.4, представляет собой пару трения «палец – диск» [18, 87].

Как излагалось выше, для объекта исследования (шпинтона) были разработаны и изготовлены образцы из того же материала с максимальным воспроизведением технологии его изготовления.

Перед началом экспериментов на установке измерялась скорость вращения диска, изготовленного из стали 45. Твердость составляет 55 *HRC*, параметр шероховатости  $Ra = 0,8$  мкм.

Измерение скорости производилось на новых и прошедших испытания образцах при необходимой нагрузке. Исследование показало, что скорость вращения диска при изменении нагрузки практически не менялась, и в дальнейшем учитывалась постоянной. До и после проведения испытаний проводилась тарировка тензобалки, показания вводились в измерительную систему [87].

Цилиндрические образцы (палец) изготовлены из стали 45. Твердость составляет 45 *HRC*, параметр шероховатости  $Ra = 0,8$  мкм. Размеры образцов: длина 80 мм, диаметр 20 мм.

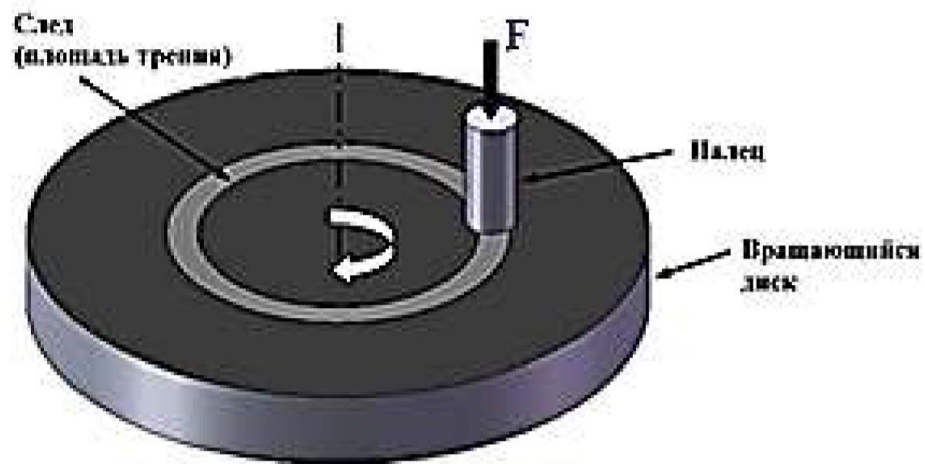


Рисунок – 2.4. Пара трения «палец – диск» материалов «сталь – сталь»

Факторы, принятые во внимание при проведении исследований:

- сила прижатия образцов  $F$ , Н ;
- скорость относительного скольжения  $v$ , м/с;
- площадь контакта  $A_a$ , м<sup>2</sup>;
- твердость более мягкого материала  $HRC$ ;
- шероховатость  $Ra$ , мкм;
- путь трения  $S$ , м;
- время  $t$ , с;
- сила тока  $I$ , А;
- напряженность магнитного поля  $\Phi$ , Вб;
- сила трения  $F_{тр}$ , Н.

В качестве объекта исследования *неподвижного соединения* использовалось соединение с натягом стержня, изготовленного из стали 40, и втулки, изготовленной из стали 09Г2С. Сборочный эскиз соединения показан на рисунке 2.5. Параметры посадки рассчитывались по следующей формуле:

$$\Delta = p_k d_2 \left( \frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right) \quad (2.2)$$

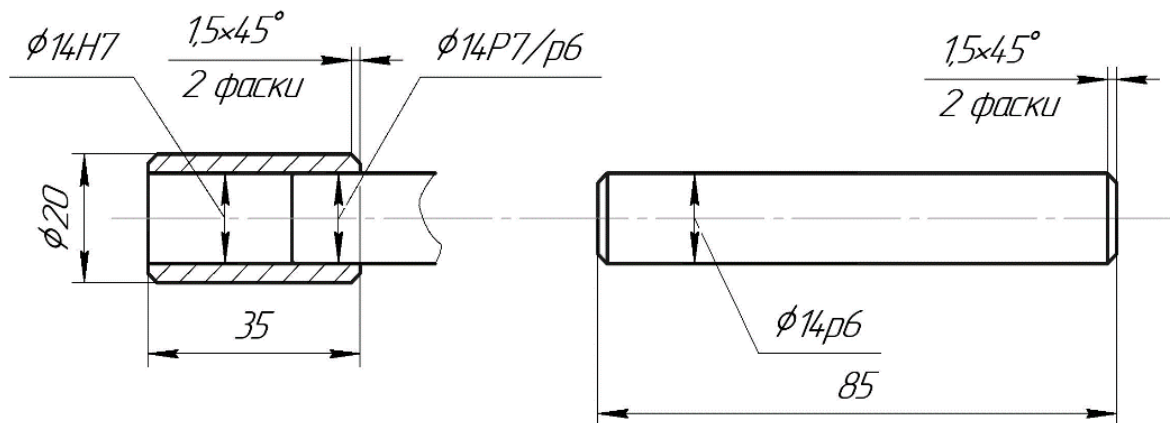


Рисунок – 2.5. Сборочный эскиз соединения с натягом

### 2.2.3. Установка для исследования молекулярной составляющей коэффициента трения при воздействии магнитного поля

В настоящее время разработаны новые средства анализа поверхностей трения, позволяющие исследовать структуры систем, измененных свойств материалов от воздействия внешних факторов и процессов изнашивания. Выявленные при лабораторных исследованиях тенденции и зависимости изменения сил, величин коэффициента трения, могут стать базисом для разработки и использования описанных эффектов в машиностроении.

«Анализ литературных источников показывает, что молекулярную составляющую коэффициента трения и ее изменение, при воздействии тока и магнитного поля, можно оценить с помощью трибометров (шариковых или роликовых)» [45, 51].

С этой целью была разработана инденторная установка исследования молекулярной составляющей коэффициента трения с возможностью воздействия магнитным полем [17], представленная на рисунке 2.6.

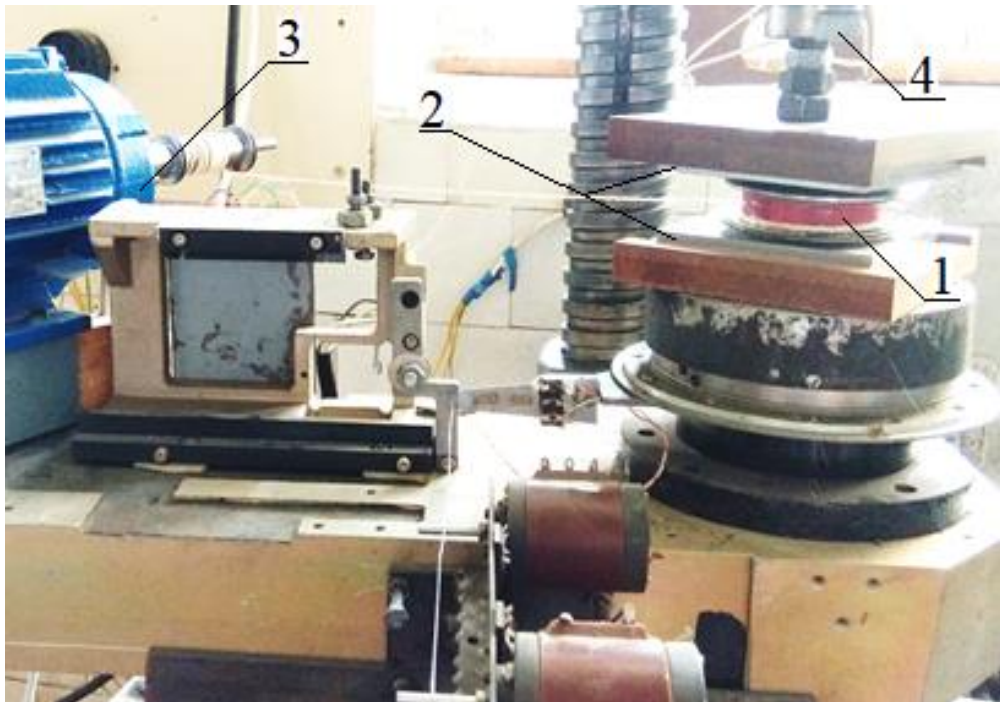


Рисунок – 2.6. Установка для измерения молекулярной составляющей коэффициента трения

Установка смонтирована на базе сверлильного станка. Питание электродвигателя 3 осуществляется посредством частотного преобразователя для плавного пуска и работы двигателя. В патрон вращения сверлильного станка через немагнитную втулку зажимается верхняя обойма образца 2. Между образцами устанавливается одношариковый индентор 1. Вертикальная нагрузка задается через вал сверлильного станка 4. Ток обмотки инденторного устройства контролируется амперметром. Устройство регистрации (тензометрическая станция) показаний подключается к компьютеру, где данные преобразуются в графический вид, и тарируются совместно с тензобалкой (рисунок 2.7).

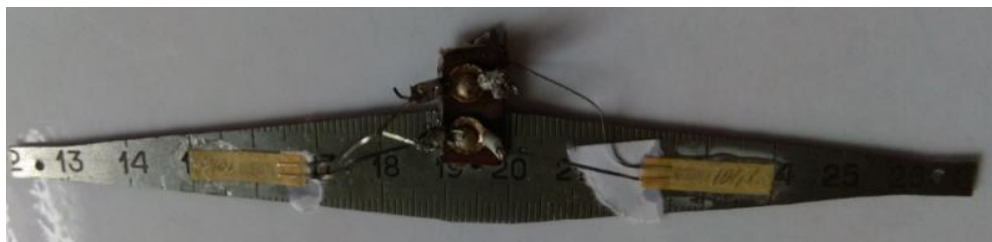


Рисунок – 2.7. Общий вид тензобалки

Одношариковый трибометр (рисунок 2.8), содержит обмотку 4 создающую МДС, которая выполнена из 112 витков (длиной 1 м) медного провода диаметром 1,2 мм. Шар 1 устанавливается в немагнитный корпус 2. Дисковые накладки 3 накрывают корпус, образуя паз для обмотки. Индентор зажимается образцами 5, в процессе работы зазор между накладкой и образцами составляет 1,5...2 мм.

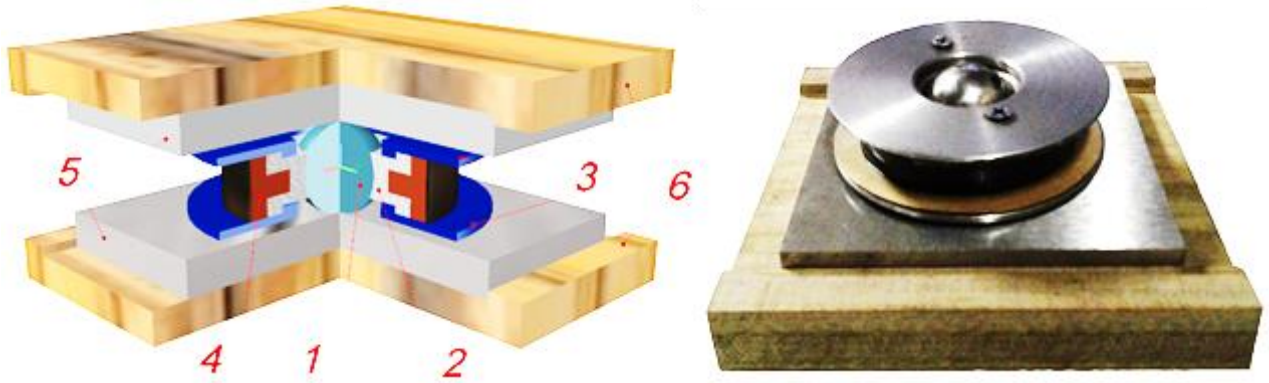


Рисунок – 2.8. Инденторное устройство одношарикового трибометра:

1 – шар; 2 – корпус; 3 – накладка; 4 – обмотка электромагнита; 5 – образец;  
6 – текстолитовый держатель

Верхний и нижний образцы устанавливаются в текстолитовые держатели 6, которые обеспечивают магнитную изоляцию. Эксперименты проводились при разных нагрузках (рисунок 2.9), на шар (были выбраны три нагрузки  $N = (13, 23 \text{ и } 33) \text{ Н}$ , создаваемые грузом постоянной массы). Сила прижатия образца при намагничивании (магнитным полем) определялась с помощью динамометра, присоединенного к верхнему образцу. Поскольку площадь контакта мала, а сила (примагничивания) при полном насыщении контакта не превышает 0,1 Н, то ею можно пренебречь.

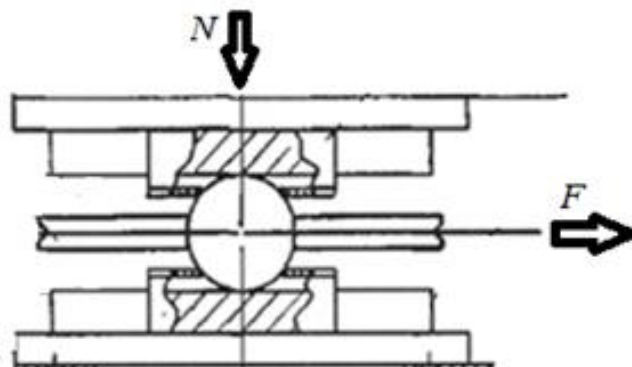


Рисунок – 2.9. Схема определения момента трения (вращение со сдвигом)



Индентор устанавливается между образцами и нагружался силой  $N$ . Через точки трения с верхним и нижним образцами проходит ось вращения. К индентору приложена (через нерастяжимую нить) сила  $F$ , вектор силы вынесен от вертикали шара, что создает условия для его верчения со смещением.

Использование индентора позволяет достичь быстрого насыщения стали, т. к. магнитное поле стягивается в зону контакта. Эффективность повышается за счет расположения обмотки в близости от зоны трения и материалов различной магнитной проницаемости. Насыщение наступает при индукции 1,5 Тл. Магнитодвижущая сила при этом составляет 90 А – витков.

Данная конструкция позволяет достичь быстрого насыщения, поскольку основной магнитный поток шара стягивается в область зоны контакта.

Опыты повторялись не менее 3 раз. Сила, приводящая к верчению шара  $F$ , замерялась с помощью предварительно тарированной упругой балки.

Последовательность экспериментов осуществлялась в следующем порядке:

1. Тарировка тензобалки.
2. Очистка рабочих поверхностей образцов и индентора.
3. Установка образцов и индентора.
4. Установка значения силы тока или величины магнитного поля (по условиям эксперимента) без подключения к образцам.
5. Нагружение вертикальной силой.
6. Выдержка образцов под нагрузкой.
7. Включение электропитания катушки (катушек).
8. Включение электродвигателя.
9. После поворота индентора (по условиям эксперимента) электродвигатель отключается.
10. Осуществляется выемка образцов.
11. Производится проверочная тарировка тензобалки.

Измерительная часть системы – продукция «ZETLab» (рисунок 2.10), «включает в себя анализатор спектра типа А17-Т8 ТУ 6683-017-23516373-02, входные каналы которого соединяются с тензометрическим измерительным

контуром, а выходные – с персональной электронно-вычислительной машиной (ПЭВМ)».

«Прибор А17-Т8, используемый на стенде, имеет восемь измерительных каналов. Он обеспечивает регистрацию и анализ сигналов одновременно с каждого из них в диапазоне от 0,1 до 10 кГц. Анализатор спектра оснащен встроенным генератором, позволяющим формировать сигналы специальной или произвольной формы. Тензометрический измерительный контур системы собран по шести проводной мостовой схеме».

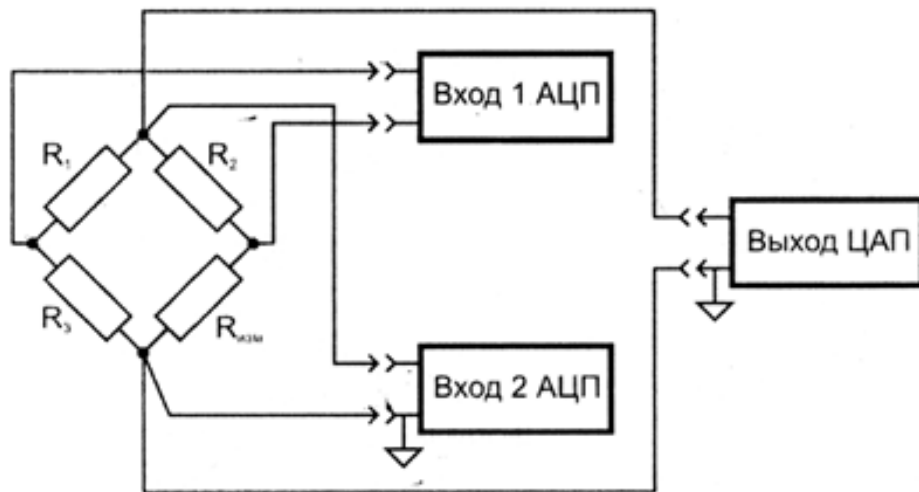


Рисунок – 2.10. Включение тензодатчиков

«Данная схема позволяет проводить требуемые измерения без тензометрического усилителя. Однако, для функционирования системы необходимо использовать два входных канала аналого-цифрового преобразователя (АЦП) анализатора спектра. Первый канал (вход 1 АЦП) служит для измерения напряжения возбуждения  $U_{\text{возб}} = U_{\text{ген}} + U_{\text{пом}}$ , складывающегося из напряжения встроенного генератора при постоянном токе или действующего напряжения при переменном токе генератора  $U_{\text{ген}}$ , и напряжения помех, наведенных каким-либо внешним источником  $U_{\text{пом}}$ . Второй канал (вход 2 АЦП) необходим для замера суммарного напряжения непосредственно на измерительной части моста  $U_{\text{сум}} = U_{\text{ген}} + U_{\text{пом}} + U_{\text{изм}}$ . Разница между значениями суммарного напряжения  $U_{\text{сум}}$  и напряжения возбуждения  $U_{\text{возб}}$  является измерительным сигналом  $U_{\text{изм}}$ .

При оценке общей точности замера регистрируемой величины, каждая из составляющих погрешностей  $\delta_i$  принимает характер случайной величины и учитывается методами математической статистики и теории вероятностей, а ее предельное значение  $\Delta_i$  становится частной предельной погрешностью [88].

Общую предельную погрешность измерений  $\Delta$  можно определить, воспользовавшись правилом сложения частных погрешностей

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}. \quad (2.3)$$

Погрешность при измерении касательной силы ( $\Delta F_k$ ) складывается из следующих частных погрешностей: погрешности измерения проволочных тензорезисторов ( $\Delta_1 \approx 1\%$ ); погрешности, вносимой соединительными проводами ( $\Delta_2 \approx 1\%$ ); погрешности, анализатора спектра ( $\Delta_3 \approx 1\%$ ) и погрешности обработки осциллограмм ( $\Delta_4 \approx 1,5\%$ ).

Таким образом, погрешность при измерении  $F_k$  составляет:

$$\Delta F_k = \sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2 + 1,5^2} = 2,29 \%. \quad (2.4)$$

Полученное значение погрешности  $\Delta F_k$  обеспечивает достаточную точность измерения величины коэффициента трения, что полностью удовлетворяет поставленным задачам настоящих экспериментальных исследований» [49].

Описанная измерительная система использовалась в следующих главах.

#### 2.2.4. Установка для исследования триботехнических показателей пар трения скольжения в условиях влияния магнитного поля

Для исследования влияния магнитного поля на триботехнические показатели пар трения скольжения, была разработана и изготовлена установка, представленная на рисунке 2.11.

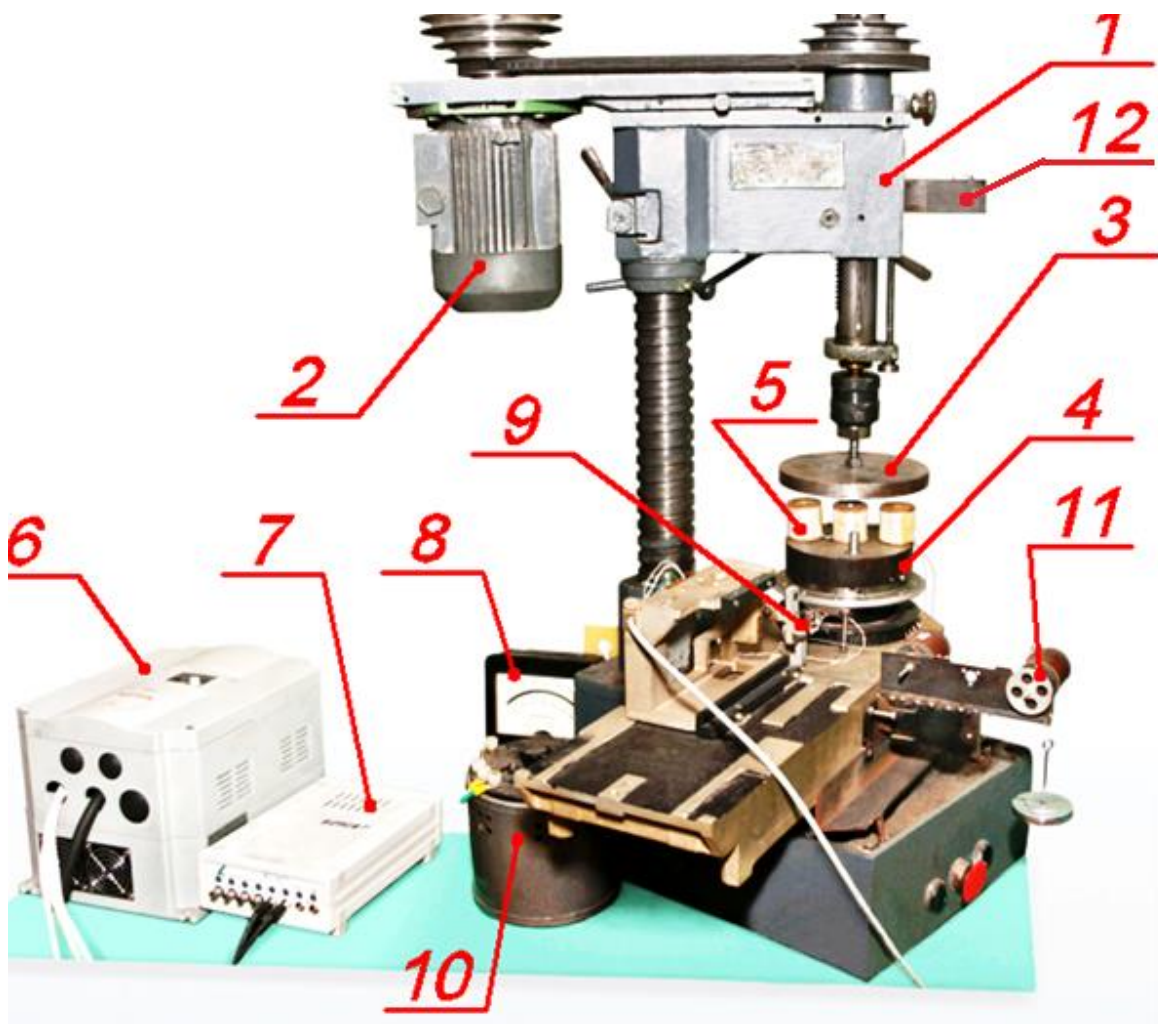


Рисунок – 2.11. Установка для проведения испытаний пар трения скольжения при воздействии магнитного поля

За основу взята конструкция сверлильного станка 1. Электропитание двигателя 2 станка осуществляется посредством частотного преобразователя 6 для плавного регулирования частоты вращения диска трения 3. В патрон вращения сверлильного станка через немагнитную втулку зажато устройство – диск трения

3. Вертикальная нагрузка задается нагрузочным устройством 12. На станине сверлильного станка установлена конструкция, содержащая нижний опорный диск 4, установленный на два подшипниковых узла и имеющий возможность вращения вокруг своей оси.

Для измерения силы трения (коэффициента трения) на нижний диск через изоляционную прокладку укреплена тензобалка 9 с тензодатчиком. Устройство снятия показаний 7 подключено к компьютеру, тарировка тензобалки проводится с использованием диска 11. Конструкция нижнего опорного диска позволяет размещение образцов различного диаметра и формы сечения (рисунок 2.12).

Первые варианты образцов в связи с разным диаметром имели разную площадь контакта и соответственно разные катушки 5 (рисунки 2.11, 2.12), т.е. различное число витков при одинаковом сечении провода, которые при их монтаже на оба образца подключались следующими способами:

- последовательно, с вариативностью по полярности соединения начала и конца обмоток катушек;
- параллельно, с вариативностью по полярности соединения начала и конца обмоток катушек.

При этом изменялась сила тока на катушках (возбуждение магнитного поля). Предусматривалась возможность не подключать сразу обе катушки, а второй (центральный) образец оставить как магнитопровод. Блок питания катушек 10 и амперметр 8 представлены на рисунке 2.11.



Рисунок – 2.12. Электромагнитные катушки установки и исследуемые образцы

Воздействие магнитных силовых линий на зону контакта в режиме трения осуществляется следующим образом: магнитное поле проходит через образец трения (держатель катушки) на верхний диск трения, через воздушный зазор на нижнюю опору. Либо через образец трения, верхний диск трения, через маленький воздушный зазор ( $\approx 1$  мм) на центральный держатель катушки, где при подключенной катушке поле усиливается или ослабляется, на нижнюю опору, и поле замыкается. На рисунке 2.13 представлены схемы воздействия магнитного поля в случае разного подключения магнитных катушек (А – D)

Для оценки влияния магнитного поля была реализована схема трибометра для испытаний пары трения «палец – диск» с установленной катушкой (рисунок 2.14). Схема, иллюстрирующая картину магнитного поля представлена на рисунке 2.13, вариант С.

Особенностью трибометра, представленного на рисунке 2.14 является то, что палец закреплен на нижнем опорном диске, а верхний вращающийся диск прижимается к пальцу под действием груза постоянной массы.

На рисунке 2.15 показан образец с установленной на нем электромагнитной катушкой и дополнительной катушкой, которые могут создавать магнитные потоки в соответствии с рисунком 2.13, вариант D.

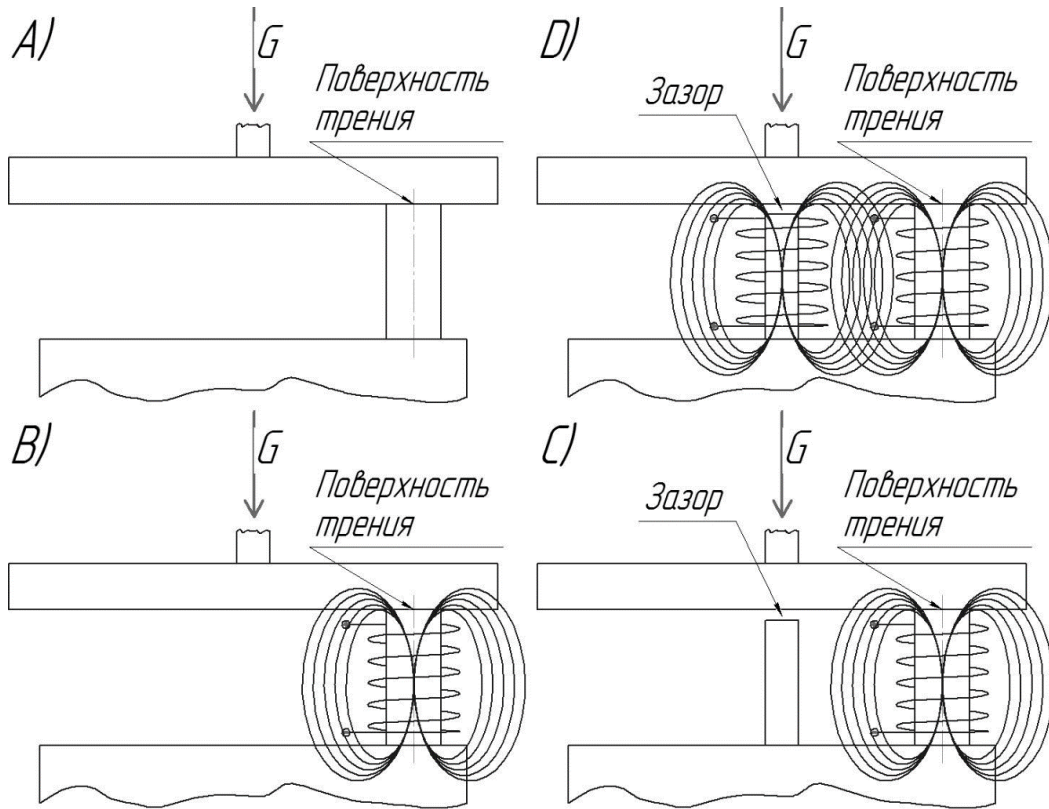


Рисунок – 2.13. Схемы подключения магнитных катушек и их полей по вариантам подключения: А. – образец без катушки; В – образец с катушкой (магнитным полем); С – образец с катушкой и центральным стержнем. (замкнутое поле, зазор у стержня с плоскостью трения.); D – катушки на образце и стержне, последовательное или параллельное подключение.

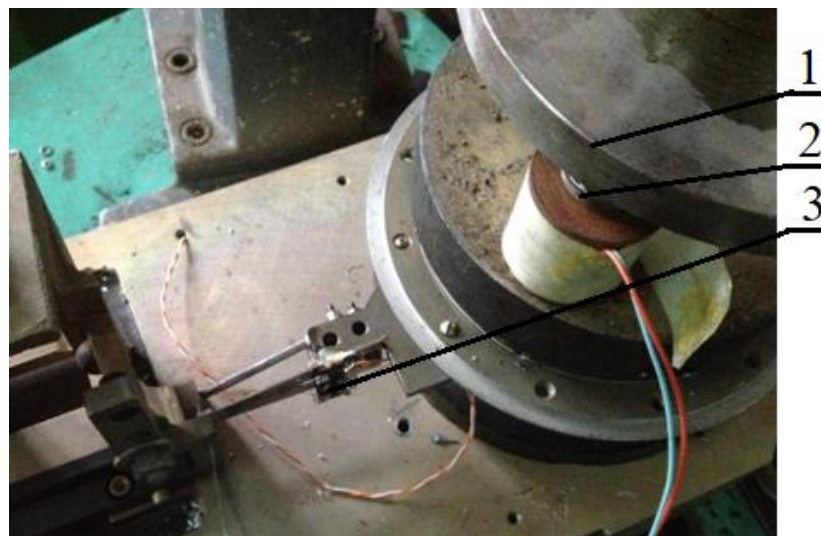


Рисунок – 2.14. Трибометр для испытаний пары трения «палец – диск»: 1, 2 – соответственно палец и диск, 3 – тензобалка

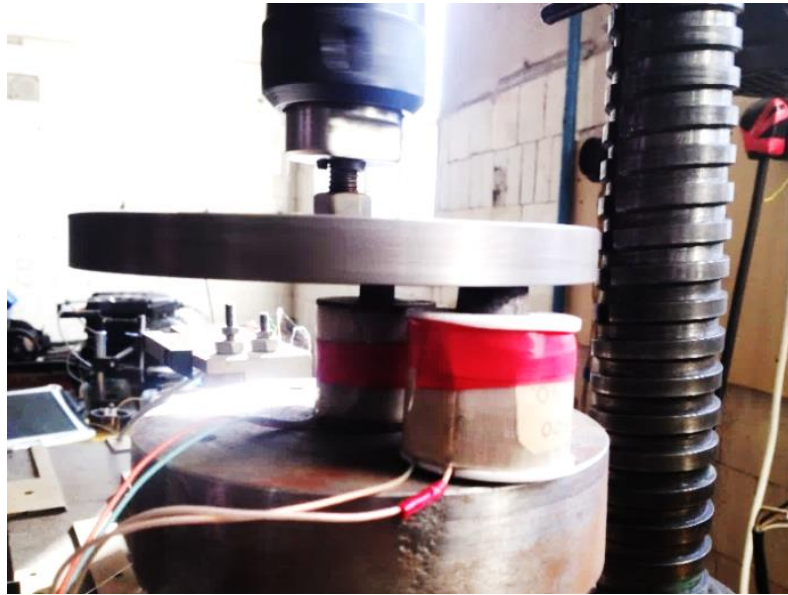


Рисунок – 2.15. Катушки на образце и стержне

Магнитное поле создает в зоне трения силу дополнительного электромагнитного притяжения, которая зависит от напряженности магнитного поля и площади контакта. Притяжение диска к пальцу при воздействии магнитного поля (примагничивание) определялось с помощью динамометра, подсоединенного к диску. Величина магнитной составляющей силы прижатия диска к пальцу постоянна и поэтому не учитывалась.

После установки образцов и катушек проводились испытания на трение без магнитного поля и при его наличии. При этом варьировались контактные давления путем изменения нагрузки и величины тока, проходящего через электромагнитную катушку для разных схем подключения катушек. Оцифрованные данные результатов эксперимента записывались на компьютер.

Последовательность выполнения экспериментов.

1. Тарировка тензобалки.
2. Очистка рабочих поверхностей образцов, вначале промывкой четыреххлористым углеродом, затем спиртом.
3. Установка образцов в установку.
4. Установка требуемого значения силы тока или величины магнитного поля (по условиям эксперимента) без подключения к образцам.



5. Нагружение вертикальной силой.
6. Выдержка образца под нагрузкой.
7. Включение электропитания катушки (катушек).
8. Включение электродвигателя.
9. После поворота диска (по условиям эксперимента) выключение электродвигателя.
10. Выемка образца.
11. Повторная тарировка тензобалки.

Измерительная часть системы является продукцией «ZETLab» и описана в предыдущей части.

#### **2.2.5. Установка для исследования характеристик неподвижного соединения в условиях влияния магнитного поля**

Задача экспериментальных исследований настоящего этапа заключается в следующем: необходимо качественно и количественно установить факт изменения силы срыва посадки базового варианта (без влияния магнитного поля) на срыв с вариантом, при котором на соединение с натягом воздействует магнитное поле. Предполагается, что воздействие магнитного поля на прессовую посадку, в зависимости от напряженности магнитного поля и направления вектора магнитной индукции, будет либо увеличивать величину силы сопротивления срыва посадки при прочих равных условиях, либо ее ослаблять. Для проведения экспериментальных исследований была разработана и изготовлена установка, общий вид которой представлен на рисунке 2.16.

Образец прессовой посадки (соединение с натягом стержня и втулки) 2 устанавливается в углубление в нижней части оправки 1, где втулка упирается в саму оправку, а стержень может беспрепятственно проходить в отверстие при срыве посадки. Нагрузочным устройством является пресс с ручным приводом с контролируемым увеличением давления (рисунок 2.17).

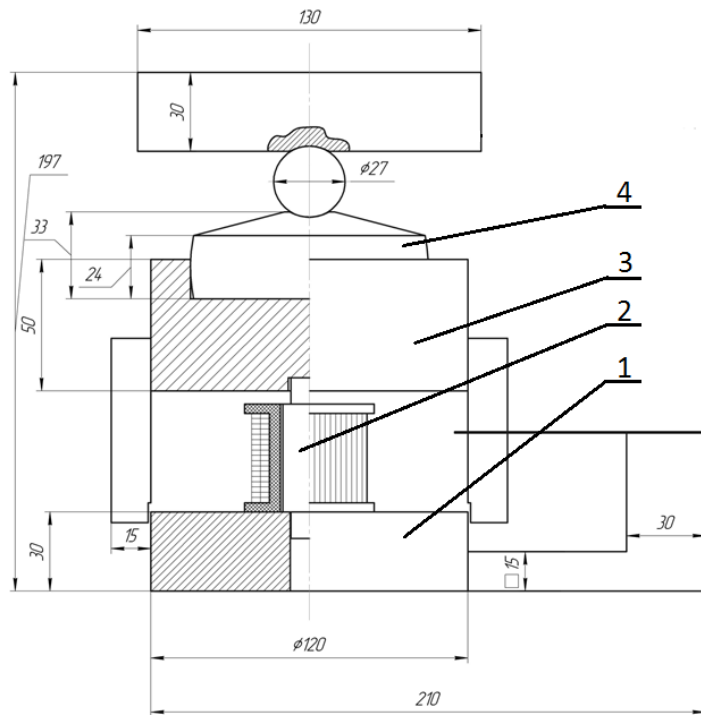


Рисунок – 2.16. Общий вид установки для исследования силы срыва посадки с натягом с зазором в магнитопроводах (пластины по сторонам)



Рисунок – 2.17. Пресс, используемый в качестве установки для создания силы давления на образец

Нагрузка прессом прикладывается к образцу 2 (стержень) через регистрирующее устройство – месдозу 4, а также через центрирующее устройство 3 (рисунок 2.16). При этом перекосы компенсируются сферой. Нагрузка прикладывается вертикально по оси образца до срыва.

Для тарировки использовался динамометр, который был установлен последовательно силовой схемы вместо месдозы. При этом устанавливался неразборный образец (целый, без прессовой посадки), и несколько раз проводилось нагружение с регистрацией величины нагрузки по динамометру, а также напряжения в диагонали электрической мостовой схемы месдозы.

В ходе эксперимента исследовались следующие факторы:

- влияние магнитного поля на прессовую посадку металлических деталей;
- воздействие магнитного поля на прессовую посадку металлических деталей с целью выявления возможности использования эффекта.

Чтобы осуществить срыв прессовой посадки были изготовлены специальные оправки для закрепления образцов и установки катушек с магнитным полем, а также регистрирующих устройств. Были изготовлены образцы с указанной прессовой посадкой с одинаковой геометрией и силой запрессовки.

Для исследования влияния магнитного поля на прессовую посадку была реализована следующая последовательность проведения эксперимента:

1. Проведение первоначальной тарировки системы, как по нагрузке, так и по электрической части.
2. Установка образца в углубление в нижней части оправки, где втулка упирается в саму оправку, а стержень может беспрепятственно проходить в отверстие при срыве посадки.
3. Нагружение стержня силой в осевом направлении до момента срыва прессовой посадки (смещения стержня относительно втулки) с регистрацией силы воздействия. При этом воздействие магнитного поля отсутствует.
4. Проведение такого же эксперимента по срыву посадки, как и в предыдущем пункте, но при воздействии магнитного поля. При этом в

зависимости от напряженности магнитного поля и направления вектора магнитной индукции будет либо увеличение усилия срыва прессовой посадки, либо его ослабление.

5. Проведение статистической обработки данных эксперимента и выявление степени влияния магнитного поля на прессовую посадку и методы управления величиной этого влияния.

*Вариант испытаний с параллельным оси образца (вертикальным) направлением силовых линий магнитного поля.*

Образец изготовлен таким образом, что может помещаться внутри одной катушки с магнитным полем (соленоида) и имеет несколько большую осевую длину для предотвращения повреждения катушки (рисунок 2.18). Это позволило организовать магнитное поле параллельно прессовой посадке (линии контакта стержня со втулкой)

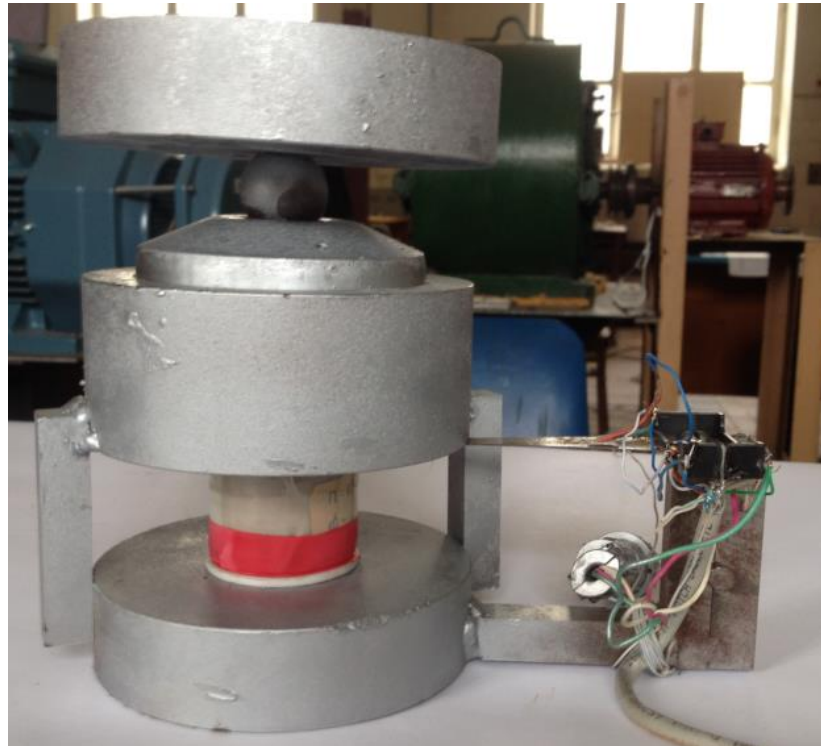


Рисунок – 2.18. Установка, представленная на рисунке 2.16 с одной катушкой

При такой установке магнитной катушки линии напряженности магнитного поля проходят параллельно прессовой посадке (контакта втулки и стержня), как показано на рисунке 2.19.

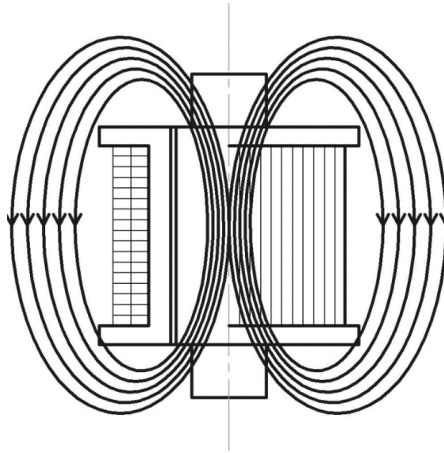


Рисунок – 2.19. Схема потока линий поля в образце

При этом магнитопровод всей установки замкнут на металлический образец двумя железными пластинами по бокам оправки. Воздушный зазор магнитопроводов не превышает 1 мм. Параметры катушки индуктивности: провод медный; число витков 1500; диаметр 0,4 мм.

Стоит отметить, что перед экспериментом предварительно проводится намагничивание образца в магнитном поле в течение 1 минуты без механической нагрузки, а потом, не выключая ток через катушку, прикладывается осевая сила к стержню до момента начала его смещения относительно втулки (срыва посадки). Момент срыва и величина нагрузки фиксируются измерительной системой.

*Вариант испытаний с перпендикулярным оси образца (горизонтальным) направлением силовых линий магнитного поля.*

Для этого эксперимента использовалась оправка (магнитопровод) для установки образца с возможностью закрепления на ней двух катушек индуктивности (рис. 2.20). Это позволило организовать магнитное поле перпендикулярно прессовой посадке (линии контакта стержня со втулкой).

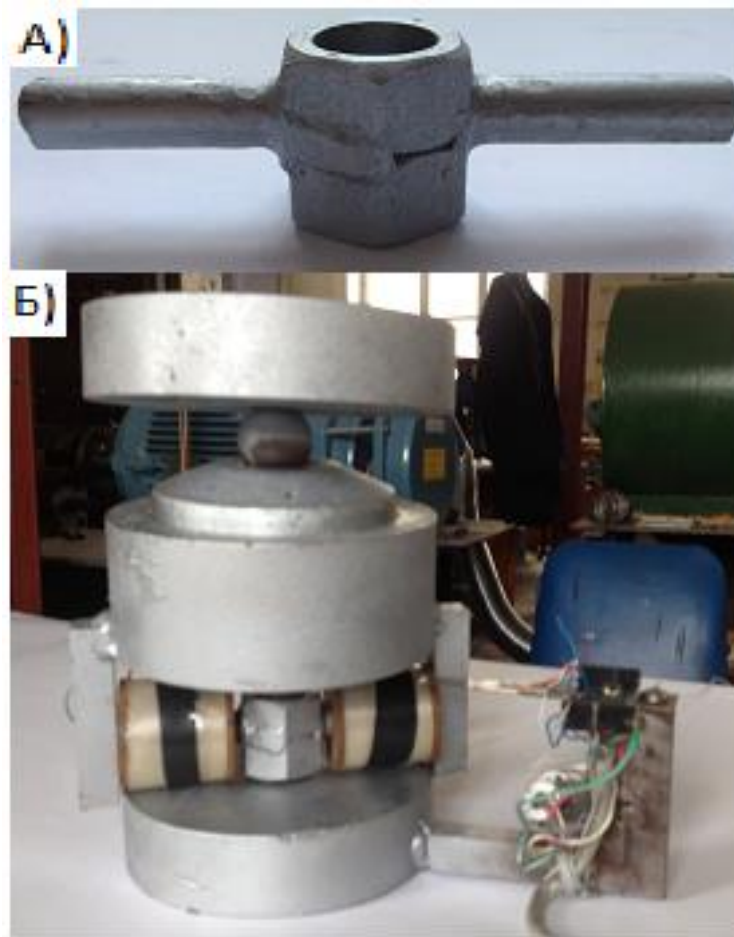


Рис. 2.20. Схема установки с двумя катушками Б) и оправкой А) для них

При этом были реализованы следующие схемы соединения катушек: *параллельно и последовательно* (рис. 2.21).

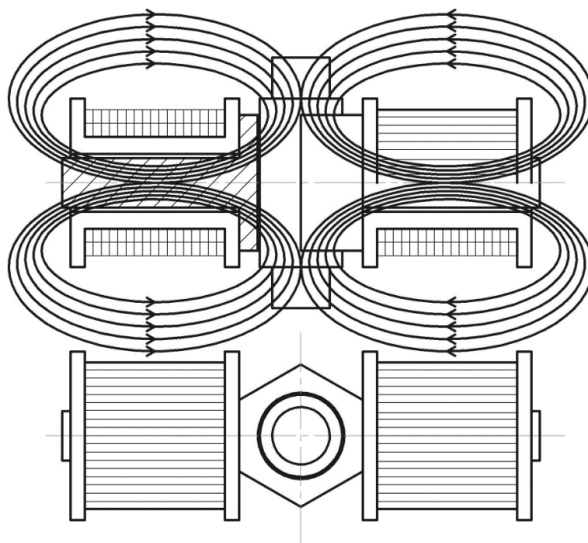


Рис. 2.21. Схема линий магнитного поля

При *параллельном* соединении напряжение на катушках одинаковое, а сила тока вдвое меньше, а при *последовательном* – наоборот, ток протекает по катушкам один и тот-же, а напряжение уменьшается вдвое.

Для регистрации данных с месдозы применялась крейтовая система сбора данных *LTR* фирмы *L-Card*. Система сбора данных представляет собой модульный блок *LTR-EU-2-5* согласно классификации производителя, в котором установлены две измерительные карты для разных целей.

Модуль имеет отдельное питание, заземление, способен обрабатывать до 16 каналов одновременно с большой частотой дискретизации и сохранять данные на ПЭВМ, как по интерфейсному кабелю, так и через интернет.

В модуле установлены следующие карты (блоки): *LTR 212* (тензометрический модуль); *LTR 114* (АЦП, измерение силы тока и напряжения). Для эксперимента использовался тензометрический модуль *LTR 212*, в качестве регистратора данных – ПЭВМ.

«Модуль *LTR 212* измеряет величину разбаланса полного моста (рис. 2.22), подключенного к *i*-му входу. Даже если применена, полу - или четверть-мостовая схема подключения, все равно *LTR 212* измеряет разбаланс полного моста, так или иначе дополненного до полного моста во всех описанных далее схемах подключения» [2]. Цепи *+EXC*, *-EXC* являются сильно-токовыми цепями питания моста, а остальные цепи – слабо-токовые (измерительные).

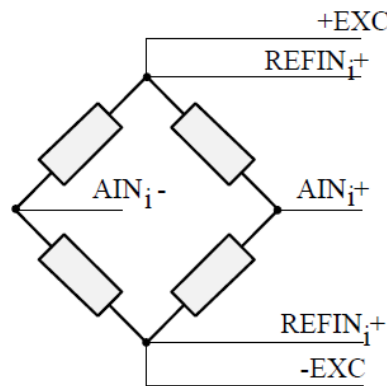


Рис. 2.22. Цепи *+EXC*, *-EXC*

Измеряемая *LTR 212* величина разбаланса моста  $\Delta$  определяется формулой:

$$\Delta = \frac{U_{AIN}^+ - U_{AIN}^-}{U_{REFIN}^+ - U_{REFIN}^-} * U_{REF} \quad (2.5)$$

«В этой формуле:  $U_{AIN}^+ - U_{AIN}^-$  – это разность напряжений между сигнальными выходами моста  $REFIN_{i+}$  и  $REFIN_{i-}$ ;  $U_{REFIN}^+ - U_{REFIN}^-$  – это разность приложенных напряжений между точками питания моста + и –;  $U_{REF}$  – значение номинального напряжения питания моста, равного 5,0 В или 2,5 В.

Вообще величина относительного разбаланса – это безразмерная величина, но в данном случае она приведена к Вольтам путем умножения на “идеальное”, или стабилизированное значение номинального напряжения питания моста. И именно в Вольтах выражены показания прибора *LTR 212*,» [2] которые получает компьютер по интерфейсному кабелю (рис. 2.23).

Пределы допускаемой дополнительной приведенной погрешности измерений напряжения переменного тока, вызванной отклонением температуры окружающего воздуха от нормальных условий применения в диапазоне рабочих температур на каждые 10 °С, для модуля измерительного LTR212 в поддиапазонах – 10 мВ; ±10 мВ; 20 мВ – ±20 мВ; 40 мВ – ±40 мВ; 80 мВ; ±80 мВ	%	±0,05 ±0,035 ±0,025
Диапазон измерений – напряжения постоянного тока – для модуля измерительного LTR212	В	От 10 <sup>-9</sup> до 0,08 (положительная и отрицательная полярность)
Пределы допускаемой основной приведенной погрешности измерений напряжения разбаланса моста для модуля измерительного LTR212 в поддиапазонах – 10 мВ; ±10 мВ; 20 мВ – ±20 мВ; 40 мВ – ±40 мВ; 80 мВ; ±80 мВ	%	±0,1 ±0,07 ±0,05

Рис. 2.23. Характеристики измерительного модуля



Таким образом, данная измерительная система позволяет получать данные без предусилителя сигнала непосредственно с датчика (масдозы).

В месдозе три электрических вывода соединены внутри с двумя тензодатчиками по полумостовой схеме (рис. 2.24):

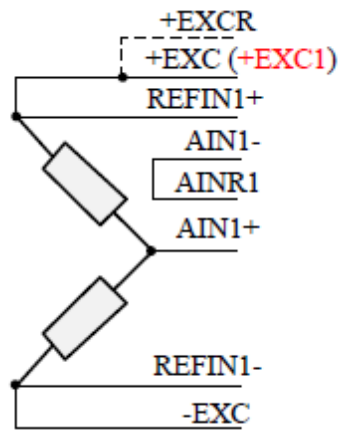


Рис. 2.24. Схема подключение месдозы

При этом вторая часть полумоста, как уже говорилось, реализована в модуле *LTR 212*, которую при настройке системы нужно программно сбалансировать. Сопротивление каждого тензодатчика месдозы составляет 400 Ом. Измерительная система автоматически дополнит схему до полной и сбалансирует нагрузку, доведя напряжение в диагонали полумоста почти до нуля.

При подаче нагрузки на образец, которая проходит через месдозу, происходит разбалансировка моста из-за изменения сопротивления в тензодатчиках, и в диагонали моста появляется напряжение. Оно очень мало (порядка  $10^{-4}$  В), но измерительная система способна с запасом регистрировать такие данные.

### 2.3. Выводы к главе 2

1. Разработана и изготовлена установка для исследования молекулярной составляющей коэффициента трения при воздействии магнитного поля на основе одношарикового трибометра.

2. Разработана и изготовлена установка для исследования триботехнических показателей пар трения скольжения в условиях влияния магнитного поля.

3. Разработана и изготовлена установка для исследования характеристик неподвижного в условиях влияния магнитного поля.

4. Основываясь на расчетах, были обоснованы размеры опытных образцов, разработаны их чертежи, установлена прессовая посадка с натягом с учетом возможности срыва посадки на предполагаемом к использованию оборудовании.

5. В результате проведенных исследований были разработаны патентоспособные конструкции установок для исследования трибологических характеристик пар трения при воздействии внешних полей (электрического и магнитного).

### **ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС ТРЕНИЯ**

#### **3.1. Исследование процессов трения металлических тел при решении контактных задач**

В настоящее время к важным задачам теории трения относятся определение и расчет силы трения, установление закономерностей силы трения от факторов влияющих на сам процесс. Под трением будем понимать реакцию трибологической системы под действием внешней сдвигающей силы. Сила трения действует параллельно плоскости касания твердых тел и направлена противоположно движению.

Для изучения влияния тока и магнитного поля на трения металлических тел можно применять методы теории подобия, в частности, метод анализа размерностей [14]. В источниках упоминается больше 20 факторов, оказывающих влияние на процессы, происходящие в зоне трения, там же электрический ток и магнитное поле [84].

Несущественная зависимость силы трения от скорости скольжения проявляется при низких скоростях относительного скольжения. Это связано с тем, пока температура, генерируемая трением, не вызывает протекание химических реакций на поверхности засчет наличия промежуточной и окружающей сред, приводящих к образованию модифицированных слоев. При низких температурах также не происходит изменение физико-механических свойств материала поверхности, например твердости. При повышенных скоростях происходит изменение свойств поверхностных слоев. Засчет модификации поверхностных слоев и наличия разного рода пленок, образующихся в результате химических реакций, имеет место трение других (измененных) элементов, и зависимость силы трения от скорости будет уже иной.

Таким образом, зависимость силы трения от скорости определяется изменениями поверхностного слоя. Отметим, что существование внешнего трения при повышенной температуре определяется правилом положительного градиента механических свойств по глубине [50].

Трение не может быть объяснено «только взаимодействием неровностей [69, 90]. При проектировании любого технического объекта инженер практически всегда сталкивается с контактными задачами, связанными с взаимодействием контактирующих поверхностей [43]. При непосредственном давлении одного тела на другое фактическая площадь их контакта состоит из отдельных пятен, несущих всю нагрузку. Представляет интерес оценить форму и размеры площадей дискретных пятен касания, а также распределение этих площадок. Обычно в задачах механики контактного взаимодействия шероховатых поверхностей используют распределение высот выступов так, чтобы опорные кривые профиля и модели совпадали. Так, в модели Гринвуда – Вильямсона [100] принят закон распределения, а в работе [111] показано, что распределение высот вершин не всегда является Гауссовым. Закон распределения высот выступов  $\delta$  зависит от предыстории технологии изготовления контактирующих деталей и их поверхностей и может принимать вид

$$\delta = \frac{m_0 m_4}{m_2^2}, \quad (3.1)$$

где  $m_0, m_2, m_4$  – моменты спектральной плотности.

Чем меньше величина  $\delta$ , тем больше вероятность появления высоких вершин, что характерно для поверхностей при обработке резанием. При  $\delta \rightarrow \infty$  распределение высот выступов близко к Гауссовому. В некоторых случаях приемлемым считается принятие для высот выступов бета-распределения. Для известных моделей шероховатой поверхности в виде набора сферических сегментов, высоты которых имеют вероятностное распределение, принимается для всех неровностей радиус закругления верхней части выступа одним и тем же. Ранее [120, 121] показано, что учет вероятностного распределения радиусов

закругления по сравнению с допущением о постоянстве радиуса приводит к существенному расхождению оценок параметров площади контакта.

С физической точки зрения выявить и провести соответствующий анализ площадок контакта в микрометровом диапазоне измерения представляет собой довольно сложную задачу, и применение компьютерных технологий делает возможным проведение такого анализа на основе теории фракталов [93].

Фрактальная размерность определяется двумя способами: методом «периметр – площадь» для всей карты контакта и методом «покрытия» каждого острова в отдельности квадратной сеткой и измерением числа ячеек, покрывающих площадь, при уменьшении размеров ячеек [86]. Во втором случае фрактальная размерность определяется для каждого  $i$ -го острова (пятна), и окончательный результат вычислялся как среднее арифметическое.

Проведенные дополнительные исследования показали, что более приемлемым методом для оценки фрактальной размерности является метод «периметр – площадь», т.к. метод «покрытия» каждого острова в отдельности является более затратным и дает большой разброс значений.

Сравнение соотношения «периметр–площадь» для нефрактальных и фрактальных геометрических объектов (пятно касания представлено в виде острова) приведено в табл. 3.1».

Таблица 3.1

Теоретические соотношения «периметр–площадь» для нефрактальных объектов.

Фигура	Периметр $P$	Площадь $A$	$R=P/A^{1/2}$
Круг	$\pi D$	$\pi D^2/4$	3,545
Шестигранник	$6L$	$3^{3/2}L^2/2$	3,722
Квадрат	$4L$	$L^2$	4

При увеличении «гладкости» взаимодействующих поверхностей (уменьшение шероховатости) сила трения возрастает. Согласно двойственной природе трения сила трения состоит из двух составляющих, одна из которых

(механическая) не зависит от площади контакта, а другая (молекулярная) зависит. Это выражение имеет вид

$$F_f = F_{\text{мех}} + F_{\text{мол}} = f F_n + \tau A_r, \quad (3.2)$$

где  $f$  – коэффициент трения материалов;  $\tau$  – удельное сопротивление сдвигу фрикционных связей;  $A_r$  – фактическая площадь контакта.

На рис. 3.1 представлена схема контактного взаимодействия.

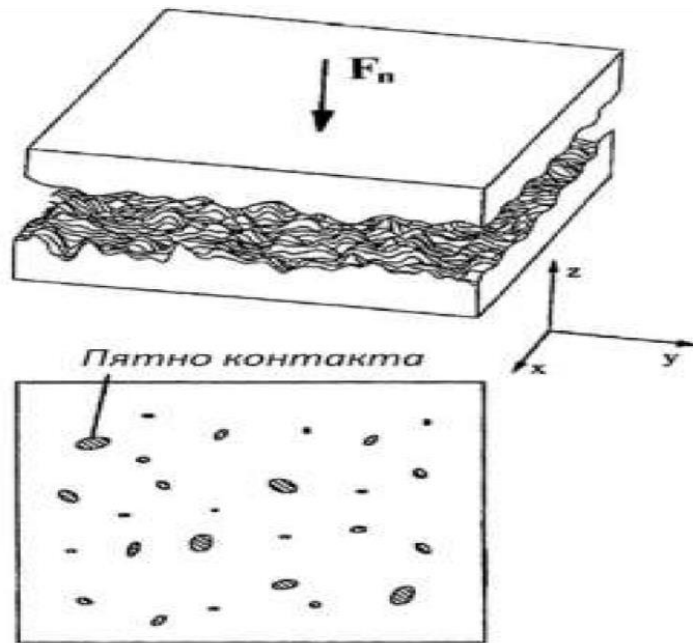


Рис. 3.1. Схема контактного взаимодействия шероховатых поверхностей

Адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения определяется зависимостью

$$f_a = \frac{\tau_n}{p_r} = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta, \quad (3.3)$$

где  $\tau_0$  – сопротивление сдвигу фрикционных связей при отсутствии контактного давления;  $p_r$  – фактическое давление;  $\beta$  – коэффициент упрочнения молекулярных связей.

Механическая составляющая (пропахивание) связана с внедрением неровности более твердой поверхности в мягкое полупространство. Для упругого

контакта рассмотрим скольжение сферического индентора по полупространству (рис. 3.2).

Коэффициент трения  $f_{pe}$  определяется выражением

$$f_{pe} = \frac{f_a + \frac{8}{3\pi} \arcsin \sqrt{\frac{z_0}{2R}}}{1 - f_a \frac{8}{3\pi} \arcsin \sqrt{\frac{z_0}{2R}}}, \quad (3.4)$$

где  $f_a$  – коэффициент трения, определяемый адгезией между индентором и полупространством, как показано на рис. 3.2.

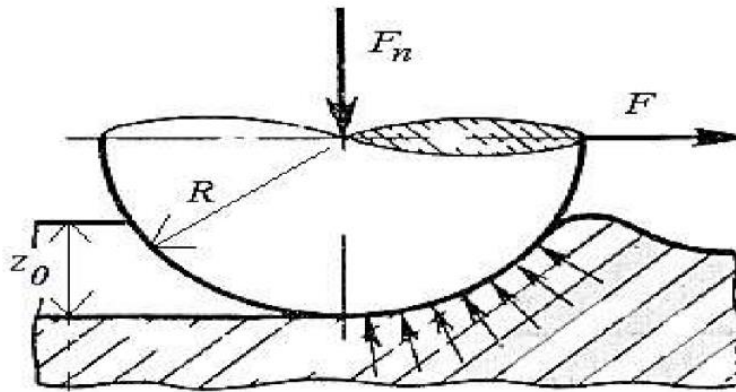


Рис. 3.2. Пропахивание полупространства взаимодействующих тел индентором в виде шара

Расчет механической составляющей трения следует производить при малых нагрузках, моделируя индентор в виде сферы, а при больших – конусом. Полагают, что в момент приработки модель неровности представляется в виде конуса, а при установившемся режиме изнашивания – индентором, верхняя часть которого имеет сферическую форму.

Переход от упругого состояния к пластическому в данном случае определяется по И.В. Крагельскому, Н.М. Михину критерием [50]

$$\delta_c = 2,4(1 - \mu^2)^2 R \left(\frac{H}{E}\right)^2, \quad (3.5)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $H$  – твердость полупространства;  $E$  – модуль упругости,  $R$  – радиус шара. С другой стороны, некоторые исследователи полагают, что критическая деформация  $\omega_c$  равна [101]

$$\omega_c = \left( \frac{\pi KH}{2E^*} \right)^2 R, \quad (3.6)$$

тогда

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}, \quad (3.7)$$

где  $E$ ,  $\mu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона материалов контактируемых тел соответственно;  $K$  – коэффициент;  $H$  – твердость;  $r$  – радиус.

Для множественного контакта преимущественно упругое и пластическое состояния оценивают с помощью показателя пластичности (Гринвуд – Вильямсон) [100]:

$$\psi = \left( \frac{E^*}{H} \right) \left( \frac{R_q}{R^*} \right)^{1/2}, \quad (3.8)$$

где  $E^* = \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$ ,  $H$  – твердость более мягкого материала;

$R_q = \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}$  – среднее квадратичное отклонение профиля;

$R^* = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}$  – приведенный радиус.

Считается, что упругий контакт имеет место при  $\psi < 0,6$ , а при  $\psi > 1$  – преимущественно пластический контакт.

Сила трения множественного контакта определяется суммой сил трения на единичных контактах (рис. 3.3) и определяется выражением

$$F_f = \sum_{i=1}^n F_i. \quad (3.9)$$

При упругом контакте сила трения оценивается выражением:

$$F_{fe} = n_e \left( \frac{\tau_0}{p_r} + f_{pe} \right) F_{ne}, \quad (3.10)$$

при пластическом контакте



$$F_{fp} = n_p \left( \frac{\tau_0}{\sigma_T} + \beta + f_{pp} \right) F_{np}. \quad (3.11)$$

Здесь  $n_e$ ,  $n_p$  – число контактов, находящихся соответственно в упругом и пластическом состояниях.

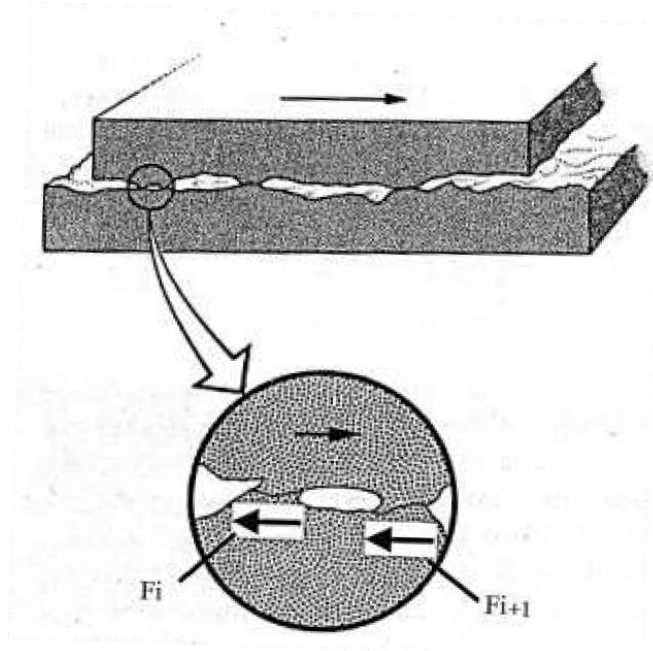


Рис. 3.3. Контактное взаимодействие и силы трения на пятнах касания

Трение без смазочного материала, когда он не вводится в зону трения, не зависит от номинальной площади (при определенных условиях), и зависит от фактической площади, нормального давления и в значительной степени от топографии поверхностей трения, материалов и окружающей среды. Важным понятием в теории трения является понятие «третьего» тела, которое разделяет сопряженные тела – это пленки, формируемые в результате топохимических реакций, активируемых трением и ювенильными поверхностями, выступающими обычно в роли катализатора.

В таком случае сила трения определяется выражением

$$F_f = \sum_{i=1}^n F_{fi}, \quad (3.12)$$

где  $n$  – число эффектов трения.

Каждый эффект реализуется при достижении определенного состояния, которое соответствует силе трения  $F_{fi}$ . Коэффициент трения имеет вид

$$f = \sum_{i=1} \frac{F_{fi}}{N} = \sum_{i=1} fi. \quad (3.13)$$

Выделив основные эффекты, запишем  $f = f_{\text{мол}} + f_{\text{мех}}$ .

Здесь  $f_{\text{мол}}$  – молекулярная (адгезионная) составляющая коэффициента трения;  $f_{\text{мех}}$  – механическая (деформационная) составляющая.

Сила среза фрикционной связи определяется выражением  $F = \delta A \tau$ . Здесь  $\tau$  – сопротивление материала срезу. Тогда при пластическом контакте (рис. 3.4)

$$f_a = \frac{\tau \delta A}{N} = \frac{\tau}{H}. \quad (3.14)$$

Сопротивление материала срезу оценивается уравнением  $\tau = \tau_0 + \beta H$ , где  $\tau_0$  – сопротивление срезу при отсутствии давления;  $\beta$  – коэффициент упрочнения фрикционной связи;  $H$  – твердость.

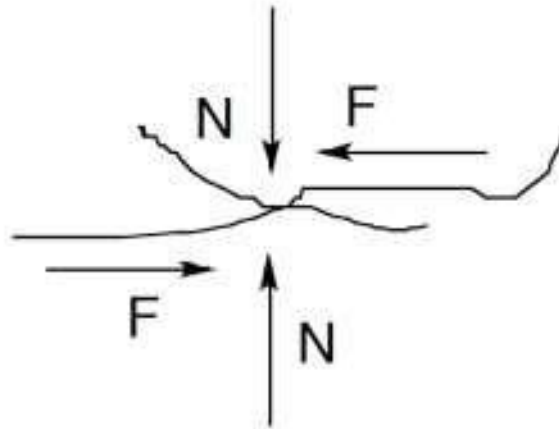


Рис. 3.4. Схема взаимодействия неровностей контактирующих поверхностей

Для оценки силы трения используют чаще всего модели неровности в виде конуса или сферы. Молекулярная и механическая составляющие силы трения при скольжении теплонагруженного контакта должны быть скорректированы в связи с изменениями физико-механических свойств поверхностного слоя и наличия

пленок в результате химических реакций на поверхности трения. Кроме того, приведенные зависимости не содержат в явном виде такие физические факторы, как скорость и температура. Так, при росте скорости относительного скольжения увеличивается температура поверхности трения, и снижается твердость, что приводит к уменьшению коэффициента трения при увеличении скорости (при постоянных значениях  $\tau_0$  и  $\beta$ ). Приводимые в трибологических исследованиях кинетические зависимости коэффициента трения справедливы для частных случаев и основываются на эмпирических знаниях. Насколько сложна картина трения скольжения можно убедиться, анализируя эффекты на поверхности трения [85], (рис. 3.5).

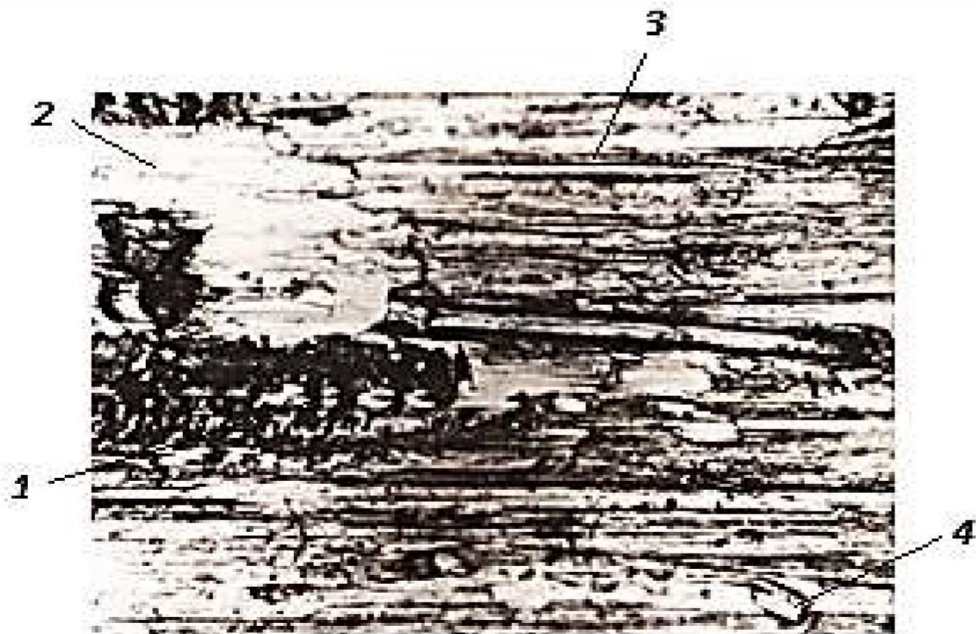


Рис. 3.5. Поверхность трения: 1 – молекулярное взаимодействие и разрыв материала; 2 – намазывание, предваряющее «лепестковый» износ; 3 – пропахивание неровностью сопряженной поверхности; 4 – пропахивание частицами износа

## 3.2. Модель намагничивания в условиях контактного взаимодействия

### 3.2.1. Расчетные характеристики магнитного поля в условиях скользящего контакта

Важно понимать параметры и распределение магнитного поля в устройстве. Для плоских структур математические решения выводятся, основываясь на некоторых допущениях – аналитических упрощениях. Применение упрощенных математических моделей достаточно на этапе предварительного расчета. Данный подход приводит к приближенному решению [6] и не может быть применен к магнитным полям, которые характеризуются сложной геометрией, многообразием границ раздела сред, нелинейными магнитными свойствами. В то же время актуальной задачей является расчет трехмерных объектов, подверженных намагничиванию. В таком случае одномерные аналитические решения не могут быть применены. Поставленные задачи приводят к решению дифференциальных уравнений Максвелла для квазистатических электромагнитных полей».

«Для повышения степени достоверности математических моделей требуется анализ магнитного поля в ферромагнитных средах на основе применения численных методов решения нелинейных краевых задач. Такие исследования позволяют по новому построить математические модели и учесть особенности процессов, возникающие с высокими нагрузками и нетипичными конфигурациями и соотношениями геометрических размеров.

Численный анализ охватывает широкий спектр задач. Следует отметить, что численные методы требуют значительных вычислительных ресурсов, и с появлением высокопроизводительных компьютеров оказались наиболее востребованными. На сегодняшний день известны программные продукты для расчета электромагнитных полей: *Elcut*, *FEMM*, *Ansys* и др., позволяющие с высокой точностью выполнять расчет объемных магнитных систем численными методами» [7, 99, 101].

Изложенный теоретический посыл был использован для проектирования опытных образцов и предполагаемых к созданию для их испытаний установок с целью разработки чертежей и проектирования измерительных схем (подбора измерительной аппаратуры). При изучении различных полей в электромеханических системах [12, 25, 19] широкое применение получили методы конечных элементов. Основным принцип метода конечных элементов заключается в том, что объем делится на малые геометрические элементы, которые на плоскости имеют форму треугольников, прямоугольников, а при трехмерной задаче – тетраэдров, параллелепипедов, и образуют сетку из этих элементов.

Элементы не перекрывают друг друга, каждый элемент сетки имеет вершины – узлы и задается отдельным полиномом. Скалярный магнитный потенциал характеризуется коэффициентами, постоянными для данного полинома. Магнитный потенциал  $\varphi_{m(i)}$  описывается линейным полиномом

$$\varphi_{m(i)} = a_{(i)} + b_{(i)}x + c_{(i)}y, \quad (3.15)$$

где  $a_{(i)}$ ,  $b_{(i)}$ ,  $c_{(i)}$  – коэффициенты  $i$ -го элемента.

Задача состоит в определении коэффициентов для каждого элемента в частных производных для векторного магнитного потенциала  $A$ . В результате мы имеем возможность определить значение нужного параметра сетки. В условиях плоскопараллельной задачи для двумерного магнитного поля уравнение Пуассона [94, 99, 100] имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j + \left( \frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right), \quad (3.16)$$

где  $A$  – векторный магнитный потенциал;  $B = \text{rot}A$  – вектор магнитной индукции;  $\mu_x, \mu_y$  – компоненты тензора магнитной проницаемости среды;  $H_{cx}, H_{cy}$  – составляющие коэрцитивной силы;  $j$  – вектор плотности тока.

Допуская что структура материала изотропна, запишем пропорциональные зависимости плотности тока от напряженности электрического поля и потенциала электромагнитного поля:

$$j = \sigma E = -\sigma \cdot \left( \nabla \varphi + \frac{\partial A}{\partial t} \right), \quad (3.17)$$

где  $\sigma$  – удельная проводимость среды;  $E$  – напряженность электрического поля;  $\varphi$  – скалярный потенциал.

В электродинамике можно в первом приближении воспользоваться теорией расчета для неподвижных тел. В условиях электростатики  $\text{div}A=0$ , при этом уравнение упрощается

$$j = \sigma E = -\sigma \cdot \nabla \varphi, \quad (3.18)$$

Источник магнитодвижущей силы определяется током в заданной точке. Пространственное распределение тока задается граничными условиями Неймана, характеризующими плотность тока, или посредством ампер-витков катушки. Связь плотности тока и намагничивающей силы имеет пропорциональную зависимость, коэффициентом пропорциональности является величина, обратная площади поперечного сечения катушки:

$$j = \frac{n \cdot I}{S}, \quad (3.19)$$

где  $n \cdot I$  – ампер-витки соленоиды ( $n$  – число витков,  $I$  – сила тока);  $S$  – площадь поперечного сечения катушки.

Замена вариационной краевой задачи сводится к минимизации нелинейного энергетического функционала. Расчетные уравнения метода конечных элементов получаются в результате минимизации функционала  $F$  в области  $\Omega$ , которая предварительно разделена на произвольное число элементов:

$$F = \int_{\Omega} \left( \int_0^{B_x} \nu \cdot B_x \cdot dB_x + \int_0^{B_y} \nu \cdot B_y \cdot dB_y \right) \cdot d\Omega - \int_S A_z \cdot \Delta \cdot d\Omega. \quad (3.20)$$

Векторный магнитный потенциал  $A$  внутри произвольного треугольного элемента  $m$  с вершинами  $i, j, k$ , имеющими координаты  $(x_i, y_i), (x_j, y_j), (x_k, y_k)$ , определяется значениями  $A_z$  в вершинах.

$$A_z = \frac{\left[ (a_i + b_i \cdot x + c_i \cdot y) \cdot A_{zi} + (a_j + b_j \cdot x + c_j \cdot y) \cdot A_{zj} \right] + (a_k + b_k \cdot x + c_k \cdot y) \cdot A_{zk}}{2 \cdot S_{\Delta}}, \quad (3.21)$$

где:  $A_{zi}, A_{zj}, A_{zk}$  – векторный магнитный потенциал в вершинах треугольника;

$$a_i = x_j \cdot y_k - x_k \cdot y_j, \quad b_i = y_j - y_k, \quad c_i = x_k - x_j, \quad a_j = x_k \cdot y_i - x_i \cdot y_k, \quad b_j = y_k - y_i,$$

$$c_j = x_i - x_k, \quad a_k = x_i \cdot y_j - x_j \cdot y_i, \quad b_k = y_i - y_j, \quad c_k = x_j - x_i \quad \text{– коэффициенты базисной}$$

функции;  $S_{\Delta} = \frac{(x_i \cdot b_i + x_j \cdot b_j + x_k \cdot b_k)}{2}$  – площадь треугольника  $m$ .

Внутри треугольника  $B_x$  и  $B_y$  присваиваются постоянные значения.

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = (c_i \cdot A_{zi} + c_j \cdot A_{zj} + c_k \cdot A_{zk}) / (2 \cdot S_{\Delta}); \quad (3.22)$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} = -(b_i \cdot A_{zi} + b_j \cdot A_{zj} + b_k \cdot A_{zk}) / (2 \cdot S_{\Delta}); \quad (3.23)$$

$$|B| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}. \quad (3.24)$$

Минимум функционала находят из условия.

$$\frac{\partial F^m}{\partial A_{zp}} = 0, \quad (3.25)$$

Постоянство суммарного заряда замкнутой системы в электродинамике описывается уравнением непрерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot j = 0 \quad (3.26)$$

где  $\nabla \cdot j$  – дивергенция плотности тока;  $\frac{\partial \rho}{\partial t}$  – изменение плотности заряда.

В магнитостатике, при этом уравнение непрерывности вырождается в условие соленоидальности поля [94, 97 – 102].

$$\nabla \cdot j = 0 \quad (3.27)$$

Материал магнитопровода должен соответствовать следующим требованиям: малые потери в сердечнике; высокая плотность потока; большая магнитная проницаемость. Конструкционные стали на основе *Fe* являются ферромагнетиками и хорошо зарекомендовали себя в качестве магнитного материала при изготовлении электрических машин. Основные кривые намагничивания, рассматриваемые в данной работе приведены на рис. 3.6.

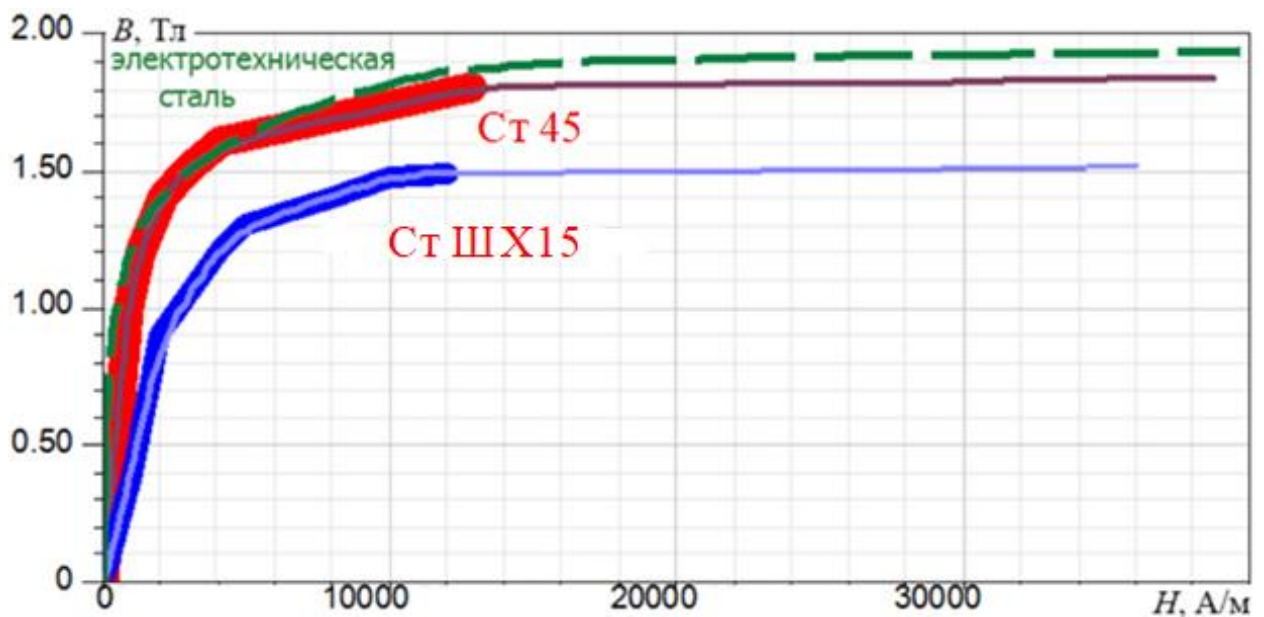


Рис. 3.6. Основные кривые намагничивания

Теоретические исследования по моделированию намагниченности сопряжений «сталь – сталь» применительно к фрикционным гасителям колебаний проводились с использованием современной системы моделирования магнитного поля в конечноэлементном пакете *ANSYS*.

Исследование методом конечных элементов с использованием программного продукта для расчета электромагнитных полей *ANSYS* позволило получить распределение магнитного поля в инденторном устройстве одношарикового трибометра установки для измерения молекулярной составляющей коэффициента трения (рис. 3.7).



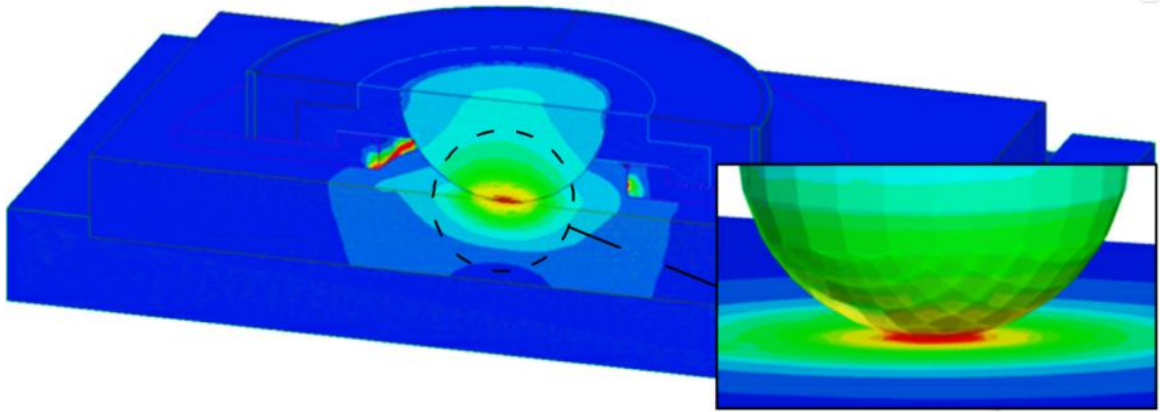


Рис. 3.7. Концентрация магнитного поля в одношариковом триботре

На рис. 3.8 приведены зависимости параметров магнитного поля в зоне контакта инденторного устройства и образца от величины тока, проходящего в обмотке.

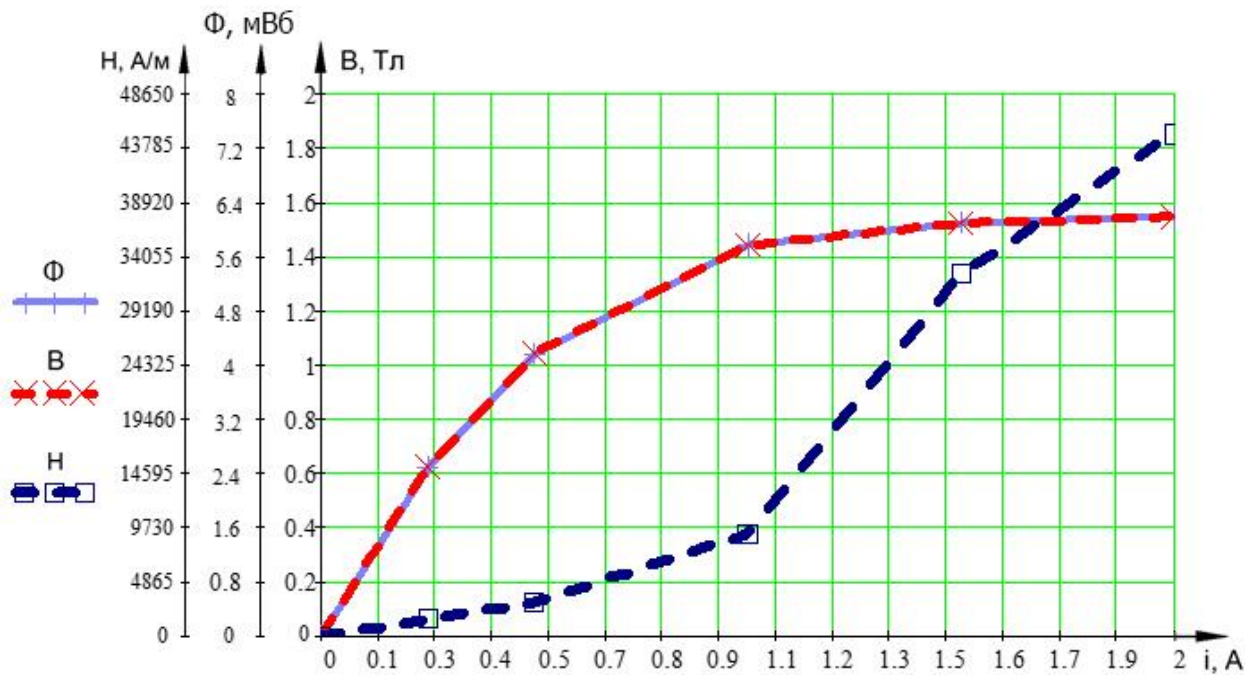


Рис. 3.8. Зависимость параметров магнитного поля от силы тока

Характеристики магнитного поля установки для исследования триботехнических показателей пар трения скольжения в условиях влияния магнитного поля рассчитываются в следующей последовательности:

1. Строится геометрия расчетной магнитной цепи. Определяются источники магнитного поля. В рассматриваемых моделях МП создавалось протеканием по

катушке постоянного тока. Установка состоит из двух пластин и одного или двух стержней. На стержни надеты катушки (рис. 3.9).

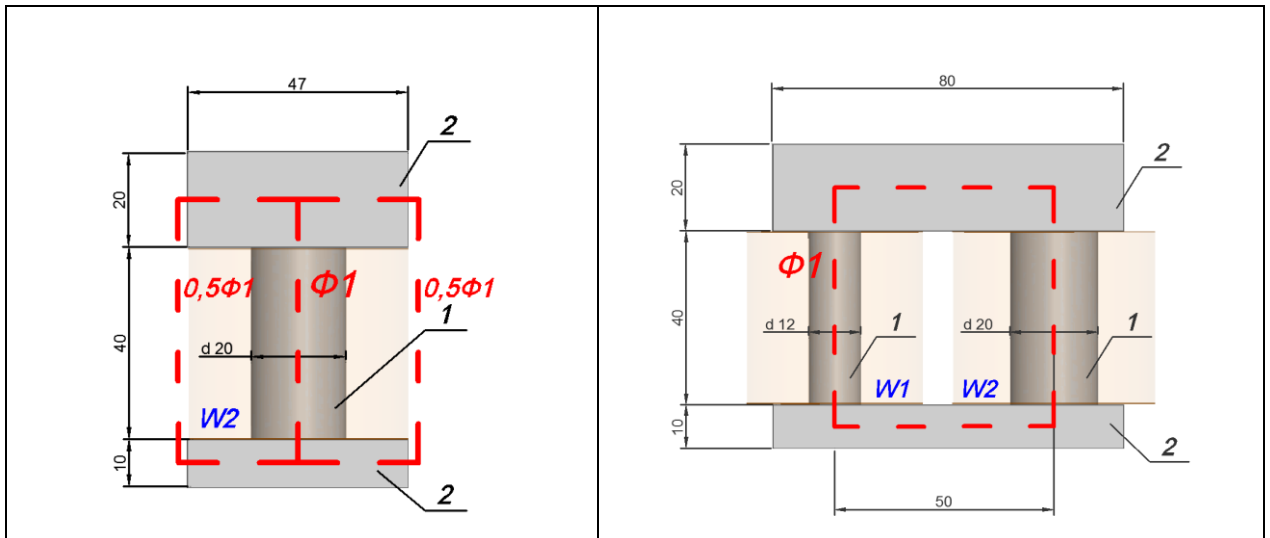


Рис. 3.9. Расчетные магнитные цепи: 1 – стержень; 2 – пластина,  
W1 – катушка 1300 витков; ; W2 – катушка 1500 витков

2. Задаются основные кривые намагничивания стали и магнитные проницаемости. Магнитная проницаемость воздуха  $\mu=1$ , для парамагнитных материалов  $\mu \approx 1$ . Магнитопровод выполнен из материала Ст. 45, основная кривая намагничивания приведена на рис. 3.6.

3. Осуществляется построение сетки конечных элементов (рис. 3.10).

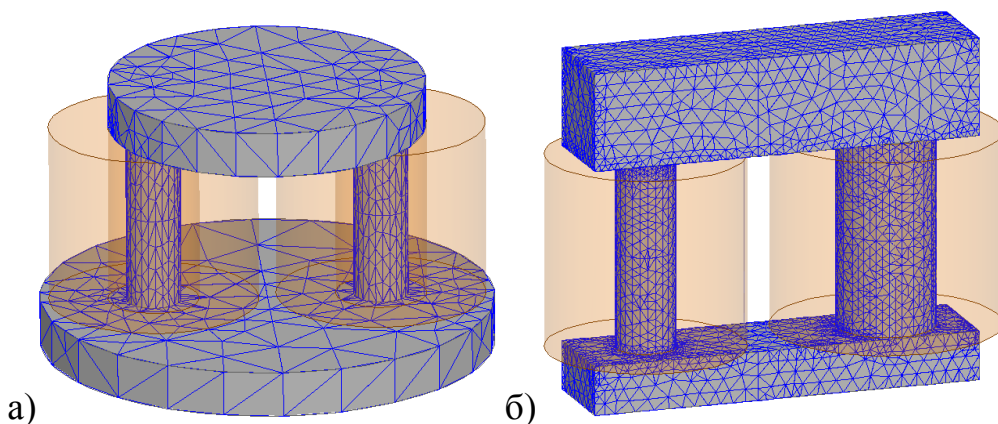


Рис. 3.10. Разбиение сеткой конечных элементов:  
а – крупный шаг 1...10 мм; б – мелкий шаг 0,1...2 мм

Установлено, что размер сетки при решении задач МКЭ очень важен. Для получения решения высокой точности требуется достаточно густая сетка и значительные вычислительные ресурсы. При подробной сетке расчет занимает значительное время.

4. Расчет характеристик поля, получение градиента распределения магнитного поля в цепи, построение графиков.

Проводится намагничивание с постепенным возрастанием тока катушки от 0 до 0,8 А. Наличие воздушного зазора способствует спрямлению веббер-амперной характеристики цепи (рис. 3.11). Насыщение магнитного поля в центре катушки не достигается (рис. 3.12) по отношению к характеристике магнитопровода (Сталь 45), приведенной на рис. 3.6.

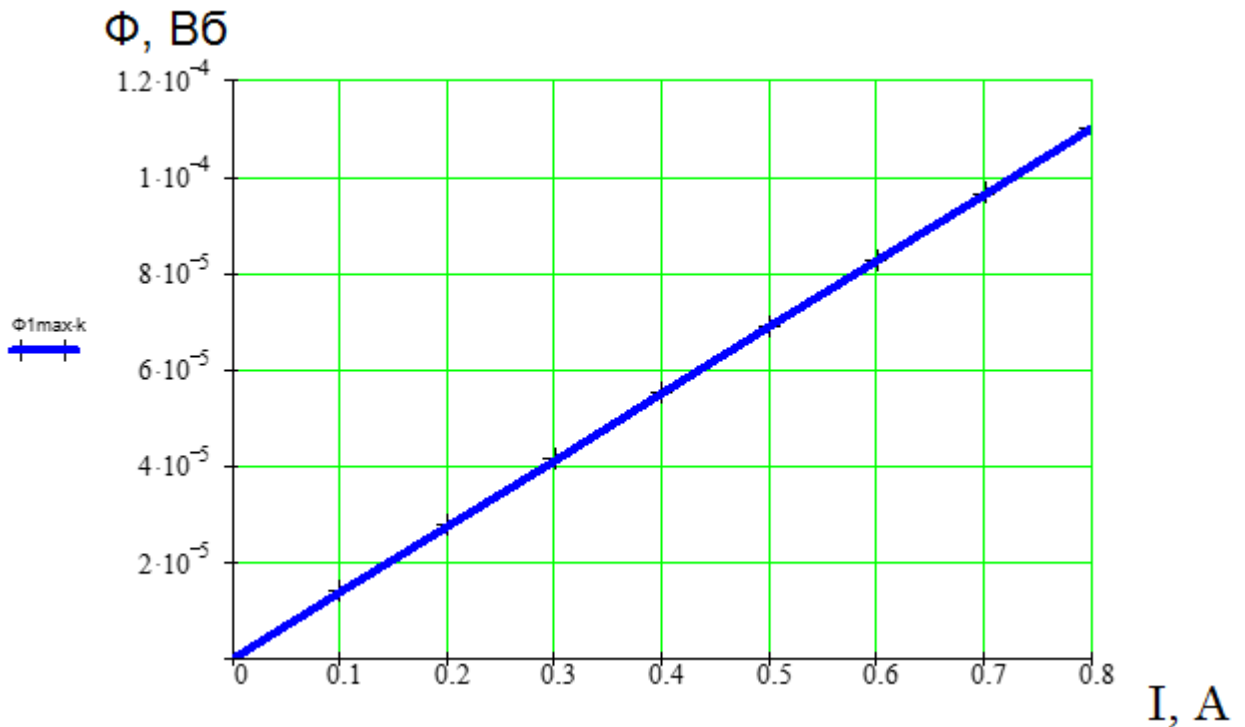


Рис. 3.11. Зависимость магнитного потока стержня, Вб от тока, А

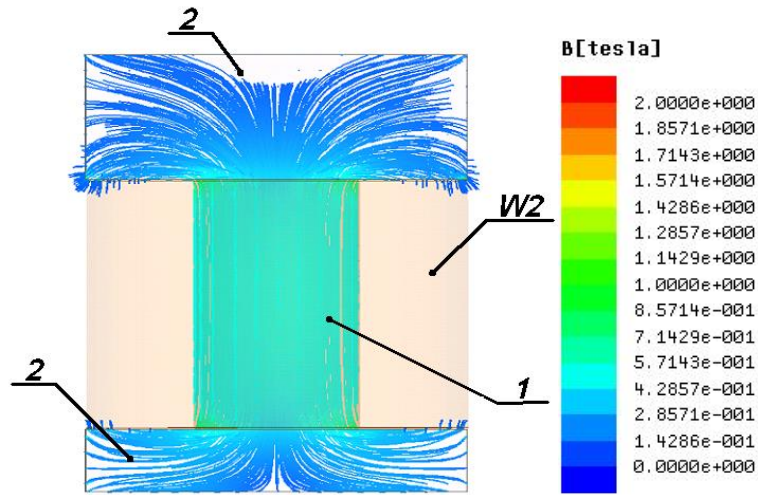


Рис. 3.12. Концентрация магнитного поля в стали образца:  
1 – стержень; 2 – пластина; W2 – катушка 1500 витков

Параметры магнитного поля *в центре катушки* представлены на рис. 3.13, 3.14, где обозначены следующие элементы магнитной цепи: В(Н)2 – верхняя пластина; В(Н)3 – стержень диаметром 20 мм; В(Н)4 – нижняя пластина; В(Н)6 – воздушный зазор.

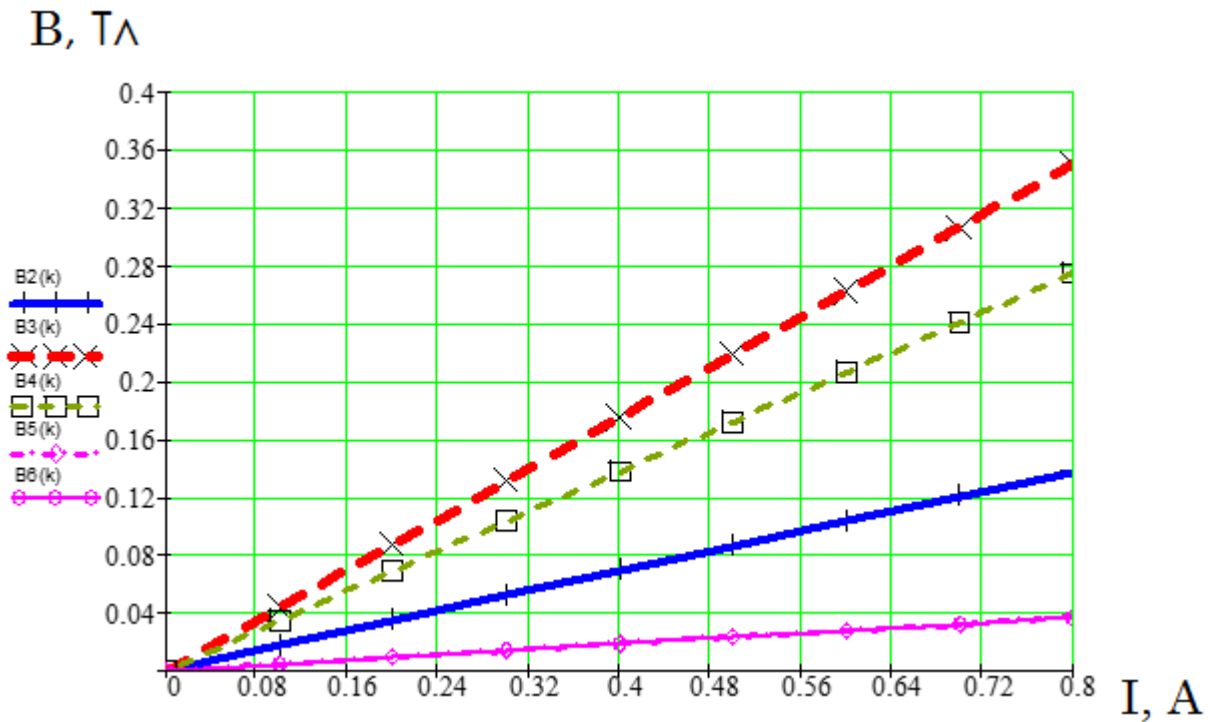


Рис. 3.13. Зависимость магнитной индукции, Тл от силы тока, А  
*в центре катушки*

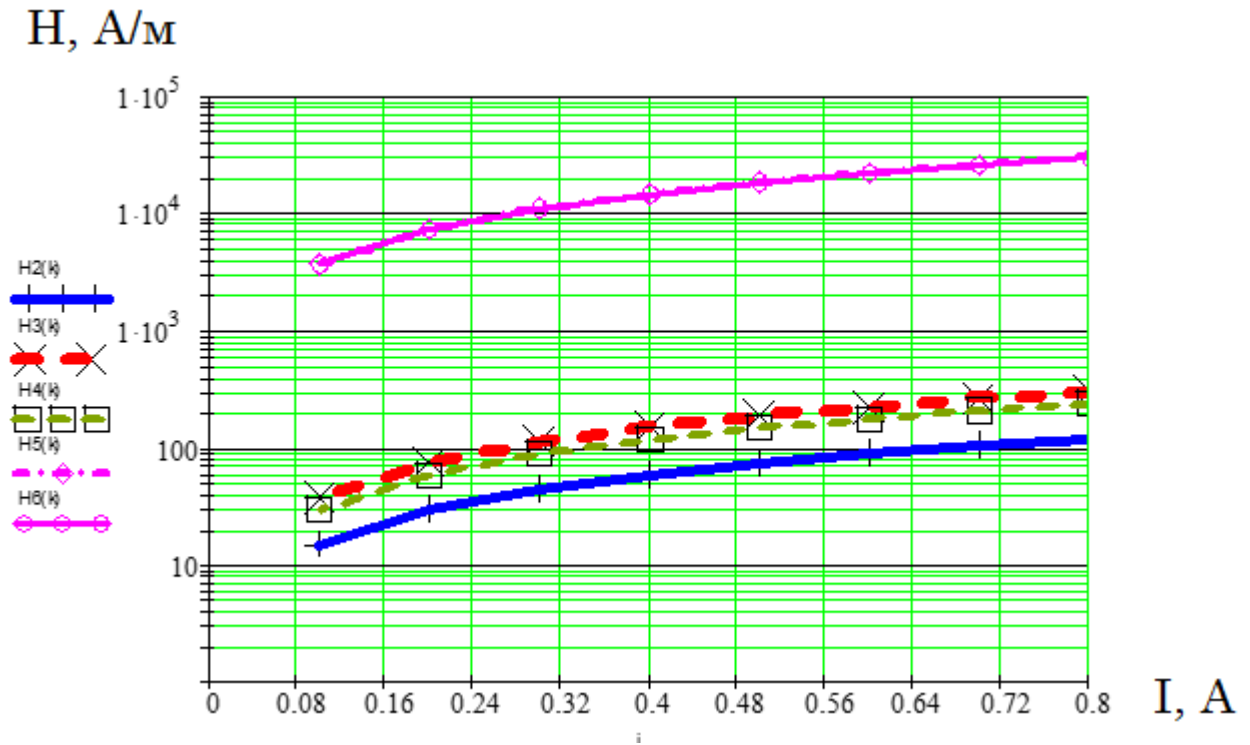


Рис. 3.14. Зависимость напряженности магнитного поля, А/м от силы тока, А  
в центре катушки

Намагничивание двухстержневого магнитопровода рассчитывается при различных сочетаниях диаметров стержней и катушек:

- левый стержень  $\varnothing 12$  мм; правый стержень  $\varnothing 12$  мм;
- левый стержень  $\varnothing 20$  мм; правый стержень  $\varnothing 20$  мм;
- левый стержень  $\varnothing 12$  мм; правый стержень  $\varnothing 20$  мм;
- одна катушка  $W_1 = 1300$  витков;
- одна катушка  $W_1 = 1500$  витков;
- две катушки  $W_1 = W_2 = 1300$  витков;
- две катушки  $W_1 = W_2 = 1500$  витков;
- две катушки  $W_1 = 1300$  витков;  $W_2 = 1500$  витков.

Катушки, соединенные последовательно, их МДС согласованы. Две катушки способны насытить оба стержня, одна катушка насыщает лишь тот стержень, на котором она надета. Воздушный зазор между левым стержнем и верхней пластиной принимает следующие значения: 0 мм; 0,5 мм; 1 мм. Силовые

линии концентрируются в средней части цилиндрической пластины, рис. 3.15. Для упрощения магнитной цепи цилиндр можно заменить параллелепипедом.

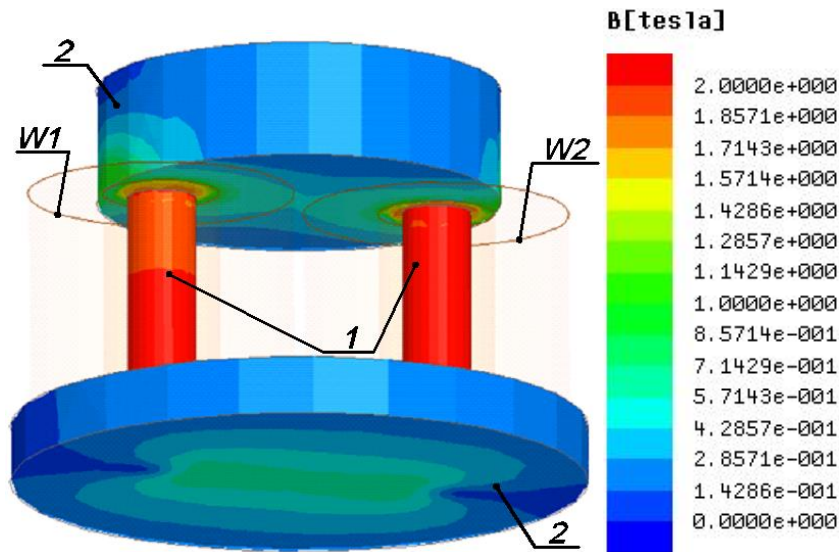


Рис. 3.15. Концентрация магнитного поля в стержнях (воздушный зазор между левым стержнем и верхней пластиной 1 мм):

1 – стержень; 2 – пластина; W1, W2 – катушки 1500 витков

Рассчитывается намагничивание двухстержневого магнитопровода постепенным возрастанием тока катушки от 0 до 0,8 А. При токе 0,25 А достигнуто насыщение первого стержня  $\varnothing 12$  мм. Величина максимального магнитного потока составляет 0,00020 Вб. Стержни плотно прилегают к верхней и нижней пластинам. Индукция первого стержня  $\varnothing 12$  мм выше и составляет 1,76 Тл, индукция второго стержня  $\varnothing 20$  мм – 0,63 Тл. Напряженность первого стержня – 10920 А/м, второго – 537 А/м. Изменение концентрации магнитного поля в стали представлено на рис. 3.16.

Параметры магнитного поля в элементах рассчитываемой установки представлены на рис. 3.17, 3.18, где обозначены следующие элементы магнитной цепи: В(Н)1 – стержень  $\varnothing 12$ мм; В(Н)2 – верхняя пластина; В(Н)3 – стержень  $\varnothing 20$ мм; В(Н)4 – нижняя пластина.

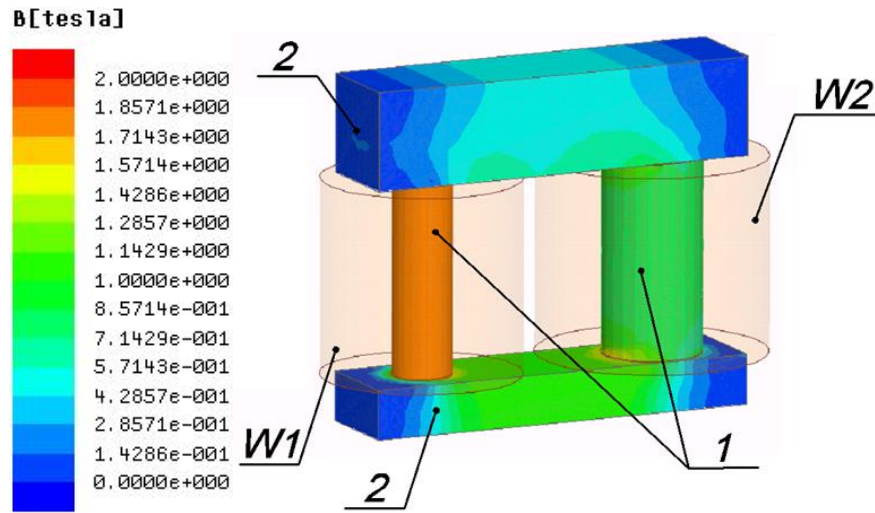


Рис. 3.16. Концентрация магнитного поля в стержнях до полного насыщения:  
1 – стержень; 2 – пластина; W1 – катушка 1300 витков; W2 – катушка 1500 витков

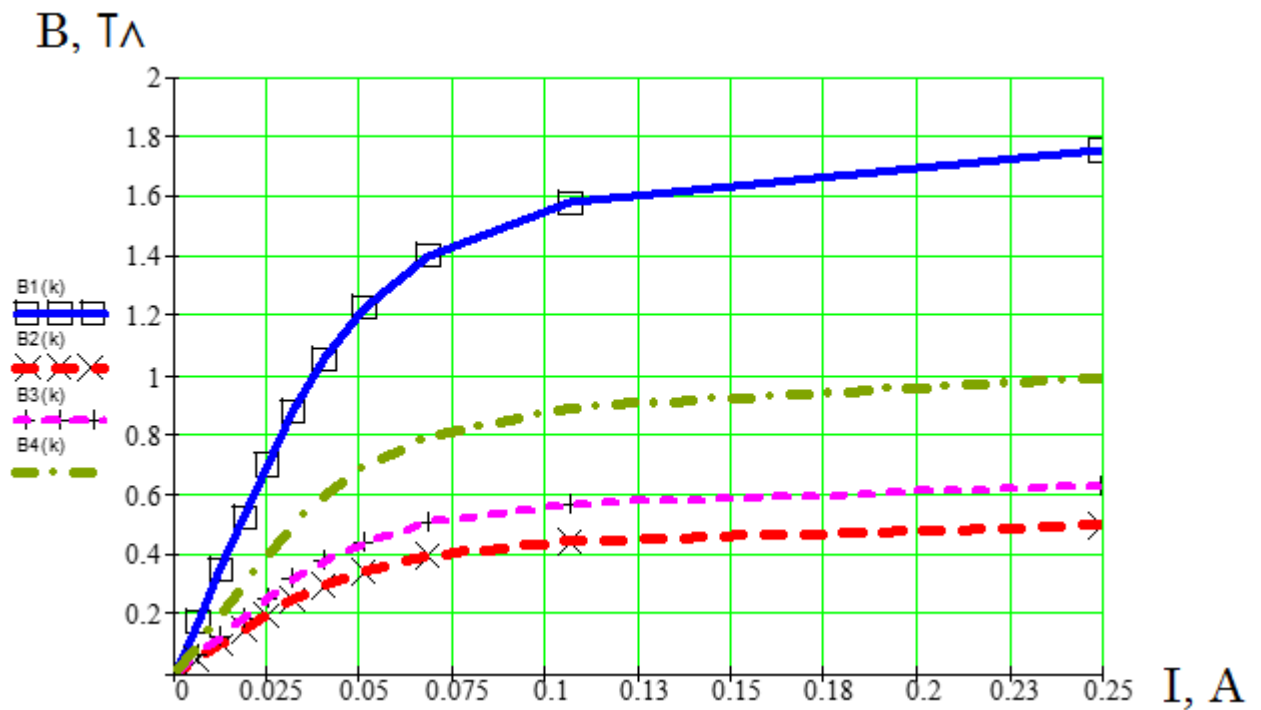


Рис. 3.17. Зависимость магнитной индукции, Тл от силы тока, А  
в элементах рассчитываемой установки

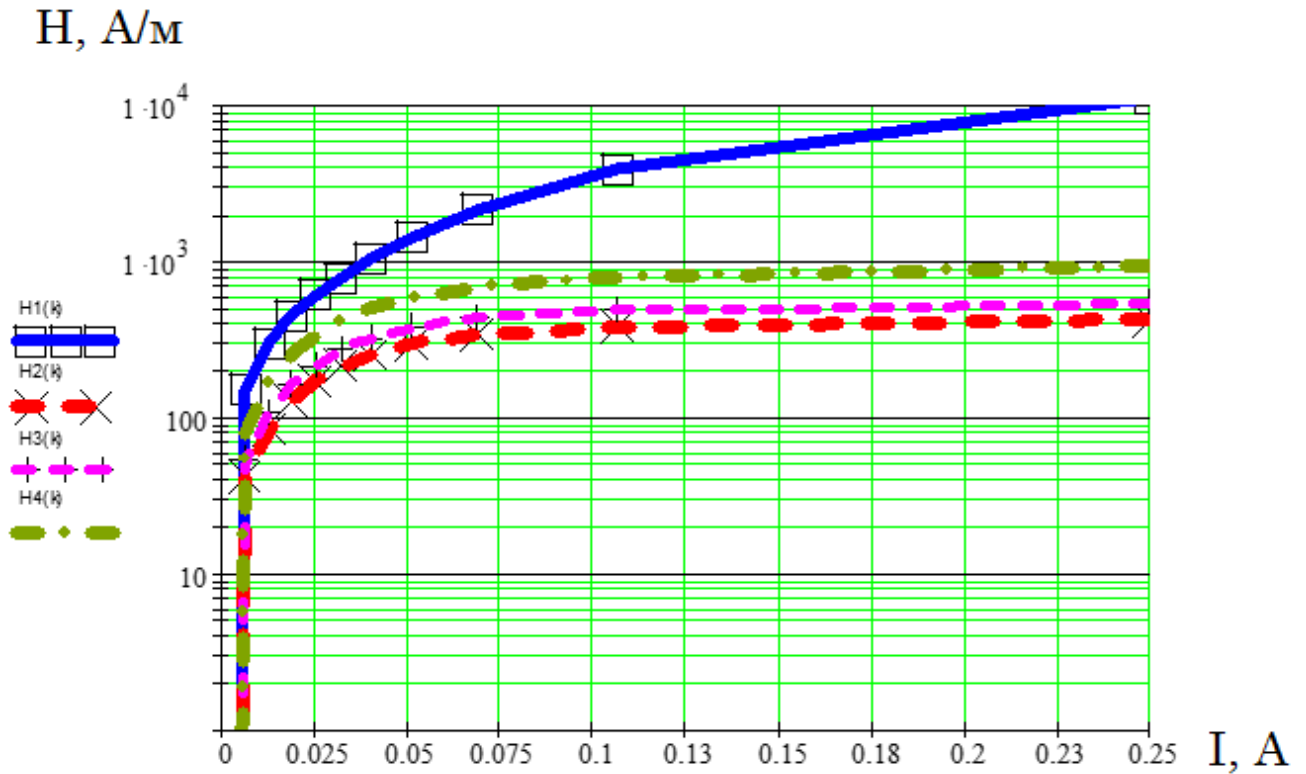


Рис. 3.18. Зависимость напряженности магнитного поля, А/м от силы тока, А в элементах рассчитываемой установки

### 3.2.2. Распределение магнитного поля в условиях неподвижного соединения

Исследование методом конечных элементов с использованием программного продукта для расчета электромагнитных полей *ANSYS* позволило получить распределение магнитного поля установки для исследования силы срыва посадки с натягом.

Результаты распределения магнитного поля (с учетом теоретических исследований) проектируемой установки с образцами с натягом приведены графически на рис. 3.19 – 3.21.



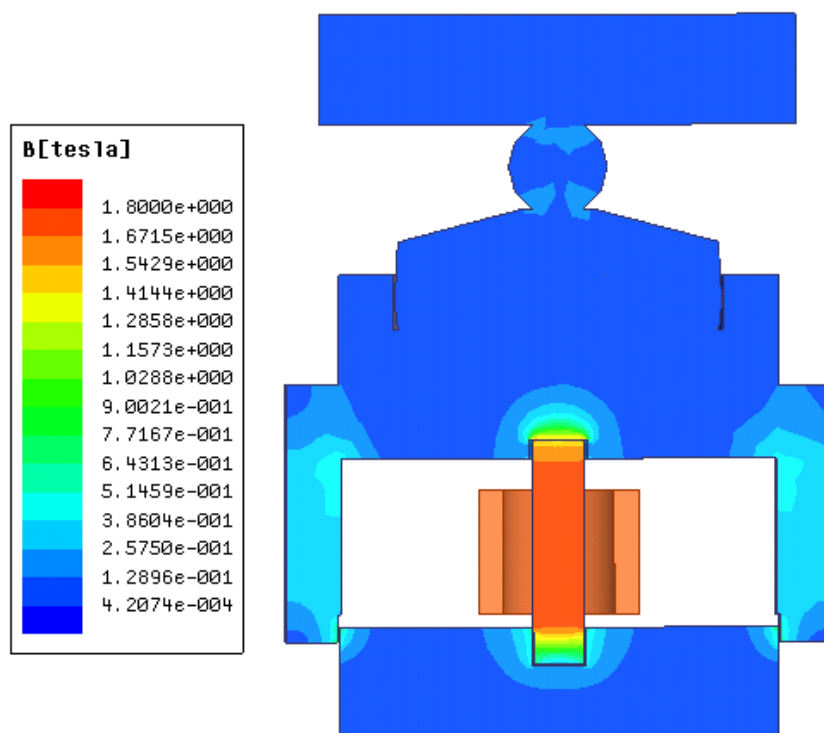


Рис. 3.19. Концентрация магнитного поля в образце при одной катушке  
Ток в катушке 1,4 А, МДС 2100 А, витков 1500

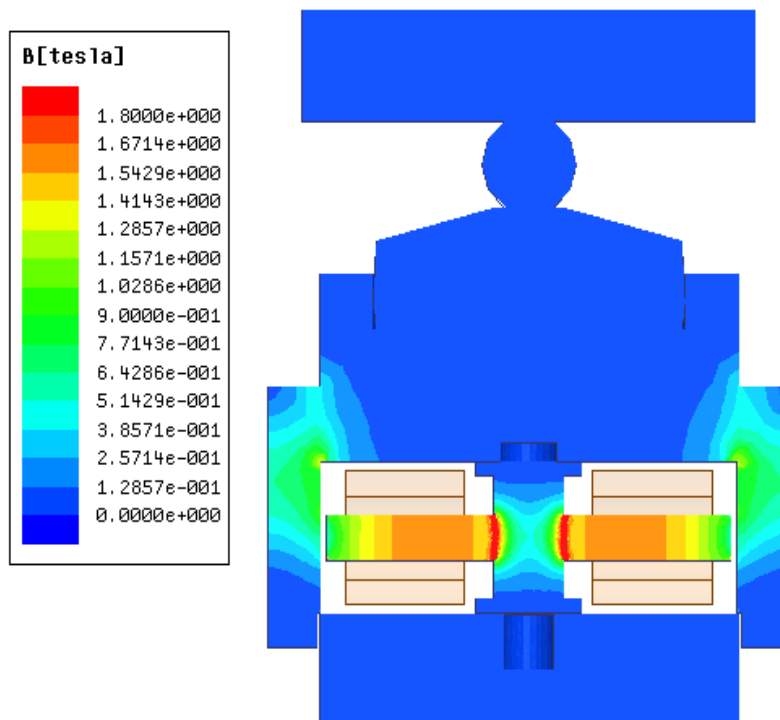


Рис. 3.20. Концентрация магнитного поля в образце при двух катушках,  
магнитный поток согласован. Ток катушек 1 А, МДС 1300 А, витков 1300

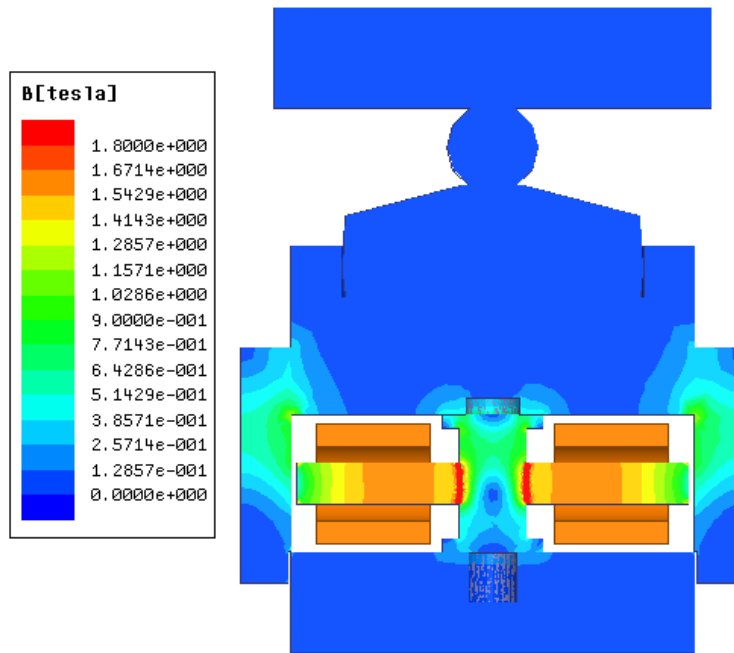


Рис. 3.21. Концентрация магнитного поля в образце при двух катушках, магнитный поток встречный. Ток катушек 1 А, МДС 1300 А, витков 1300

Теоретическими предпосылками расчета и исследований соединений с натягом (рис. 3.22) являются посадочное давление  $p$ , связанное с натягом  $\delta$  зависимостью Ляме

$$p = \frac{\delta}{d \left[ \frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right]}, \quad (3.28)$$

где

$$c_1 = \frac{1 + \left(\frac{d_1}{d}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_1}{d}\right)^2} - \mu, \quad c_2 = \frac{1 + \left(\frac{d}{d_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{d}{d_2}\right)^2} + \mu, \quad (3.29)$$

здесь  $d$  – посадочный диаметр сопряжения;  $d_1$  – диаметр отверстия детали (для сплошного вала  $d_1$ );  $d_2$  – наружный диаметр детали;  $E_1$ ,  $E_2$  – модули упругости материалов деталей;  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – коэффициенты Пуассона.

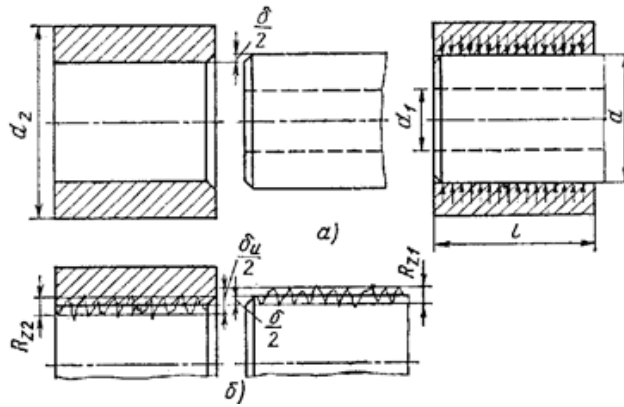


Рис. 3.22. Расчетная схема для определения стандартной посадки с натягом

Поскольку измерение реальных деталей осуществляется по вершинам микронеровностей, то измеряемый натяг  $\delta_u$ , больше расчетного натяга  $\delta$  на величину обмятия микронеровностей (рисунок 3.22)

$$\delta = \delta_u - 5.5(R_{z1} + R_{z2}) \quad (3.30)$$

где:  $R_{z1}$ ,  $R_{z2}$  – высота микронеровностей шероховатости.

При нагружении соединения осевая сила  $F_a$  (рис. 3.23)

$$F_a \leq N \frac{f}{k} = P \pi d l_p \frac{f}{k}, \quad (3.31)$$

где:  $N$  – сила нормального давления на сопрягаемые поверхности;  $d$ ,  $l_p$  – диаметр и длина посадочной поверхности;  $f$  – коэффициент трения;  $k$  – коэффициент запаса сцепления.

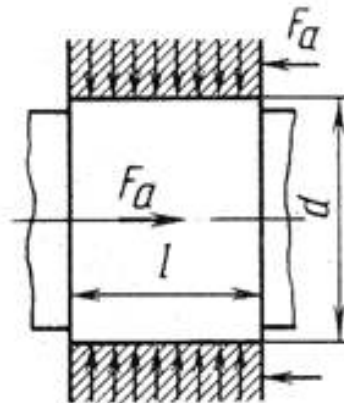


Рис. 3.23. Расчетная схема соединения с натягом

### 3.3. Исследование влияния магнитного поля на молекулярную составляющую трения

Экспериментальные и теоритические исследования трения и изнашивания «объединяют адгезионные и деформационные процессы в молекулярно-механическую теорию трения. Силу трения Крагельский представлял в виде суммы механической  $F_{мех}$  и молекулярной  $F_{мол}$  составляющих» [50, 51].

В следствии чего, коэффициент трения является функцией площади контакта тел и давления, а также зависит от молекулярной структуры поверхностей.

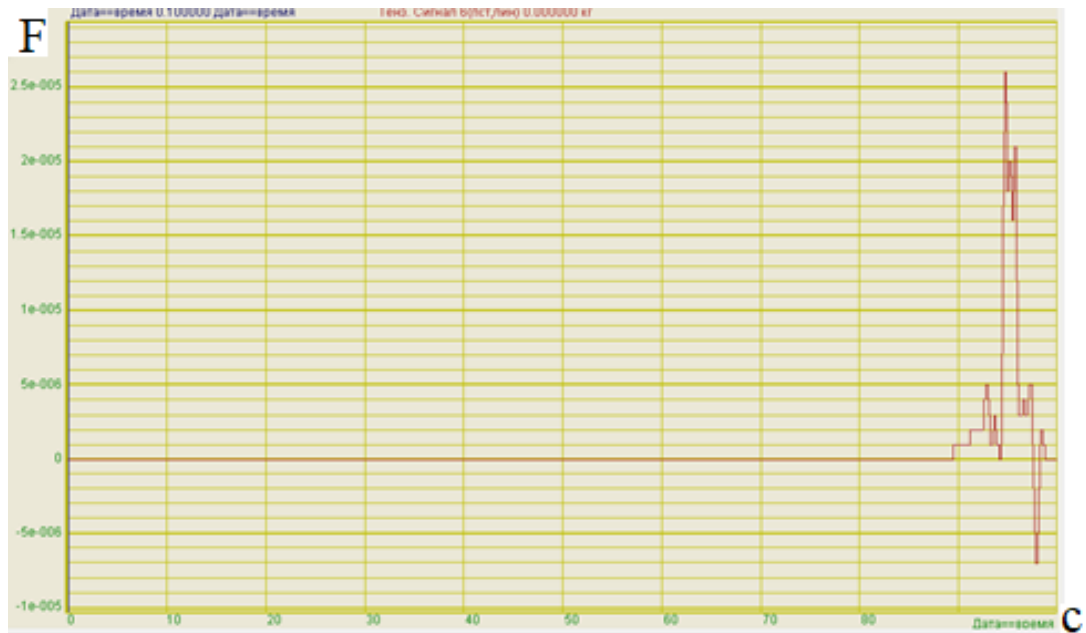
Трибологические исследования позволили выявить закономерности поведения трибосистем в рамках молекулярно-механической теории трения, предложенной И.В. Крагельским и развиваемой его учениками и последователями. Несмотря на большое количество публикаций в области трения и изнашивания, позволяющих рационально подбирать материалы пар трения и прогнозировать поведение узла трения в разных условиях эксплуатации, некоторые вопросы остаются не исследованными. Так, среди нерешенных вопросов выделяется вопрос о влиянии магнитного поля на величину коэффициента трения. Большая напряженность магнитного поля по некоторым исследованиям, в ряде случаев, влияет на механическую составляющую силы трения из-за магнитопластичности, упрочнения поверхностного слоя и т.п.

Пик силы соответствует срыву фрикционных связей (их срезу). Эта максимальная сила, умноженная на радиус оправки, дает внешний момент, который соответствует максимальному моменту трения вращения шара в лунке, образованной при внедрении шара в полупространство. Целью этих испытаний является установление влияния магнитного поля и его напряженности на величину молекулярной составляющей коэффициента трения стальных поверхностей.

В качестве примера рассмотрим результаты опыта при нагрузке  $N = 23$  Н. Шар имеет радиус  $R = 13,5$  мм; радиус оправки  $R_{оп} = 31,25$  мм. Картина

изменения силы трения от нагрузки, приложенной к оправке, насаженной на шар, представлена на рис. 3.24.

а) нагрузка 23 Н без магнитного поля



б) нагрузка 33 Н без магнитного поля

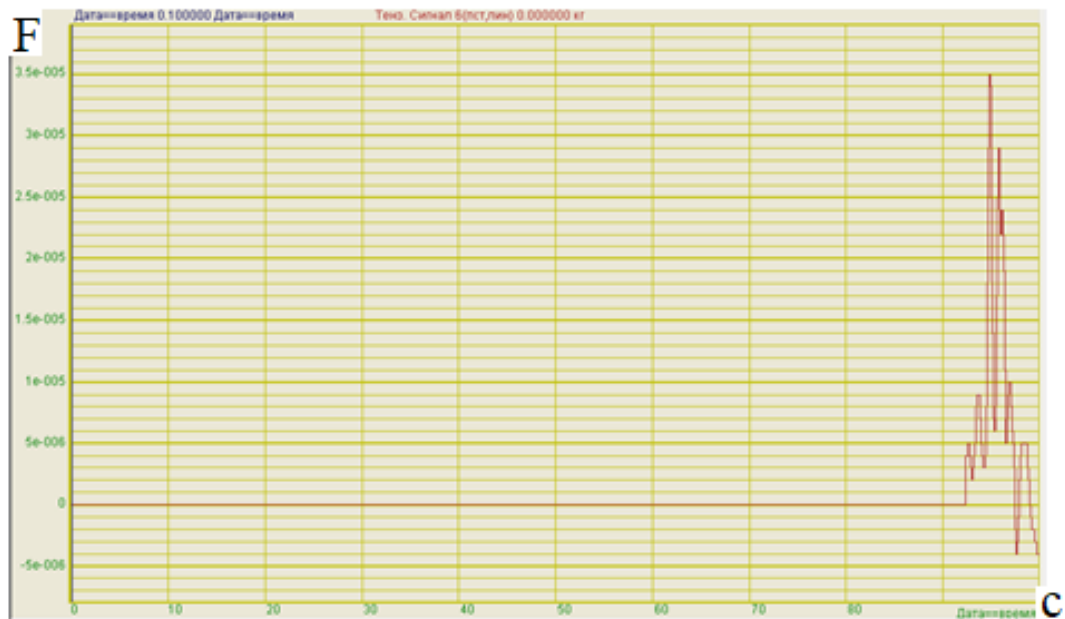


Рис. 3.24. Осциллограммы изменения силы трения от нагрузки, приложенной к оправке шара (нагрузка  $N = 23$  Н и 33 Н)

Момент трения вращения для данной схемы одношарикового трибометра определяется зависимостью:

$$T_f = 2N f_{\text{верч}}, \quad (3.32)$$

где  $f_{\text{верч}}$ , – коэффициент трения вращения (скалярная величина, имеющая размерность длины, мм, и зависящая от твердости деформируемого полупространства). Приравняв внешний момент и момент трения вращения, получаем:

$$f_{\text{верч}} = \frac{T_{\text{вн}}}{2N} \quad (3.33)$$

Состояние контакта. С этой целью находится деформация полупространства

$$\delta = 0,825 \sqrt[3]{\frac{N^2}{\left[\frac{2(1-\mu^2)}{2 \cdot 10^5}\right]^{-2} R}} \quad (3.34)$$

Так как деформация оказалась меньше критического значения ( $0,0012 < 0,0027$  мм), то контакт является упругим. Радиус пятна контакта равен:

$$r_{\text{от}} = \sqrt{R\delta} \quad (3.35)$$

В этом случае максимальное давление составляет:

$$p_0 = 0,578 \sqrt[3]{\frac{N}{\left(\frac{1-0,3^2}{10^5}\right)^2 R^2}} \quad (3.36)$$

Среднее давление  $p = 2p_0/3$

С другой стороны,

$$N f_{\text{верч}} = \frac{2}{3} N r_{\text{от}} \cdot p \quad (3.37)$$

Отсюда:

$$f_{\text{мол}} = \frac{N f_{\text{верч}}}{\frac{2}{3} N r_{\text{от}}} \quad (3.38)$$

Зависимость молекулярной составляющей коэффициента трения представлена на рис. 3.25.

Рис. 3.25 показал, что молекулярная составляющая коэффициента трения в рассматриваемом диапазоне не зависит от контактных давлений. Эти данные согласуются с результатами ранее проведенных исследований [94].

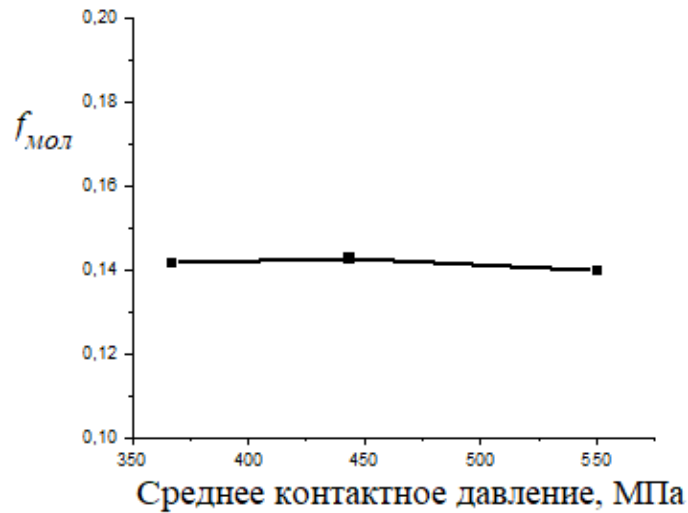


Рис. 3.25. Зависимость молекулярной составляющей коэффициента от давления

После проведения цикла опытов при разных нагрузках без магнитного поля были повторены опыты при тех же нагрузках, но при воздействии магнитного поля с разной напряженностью. Целью этих испытаний было установить влияние магнитного поля и его напряженности на величину молекулярной составляющей коэффициента трения стальных поверхностей. Типичная картина изменения силы трения при воздействии магнитного поля показана на рис. 3.26.

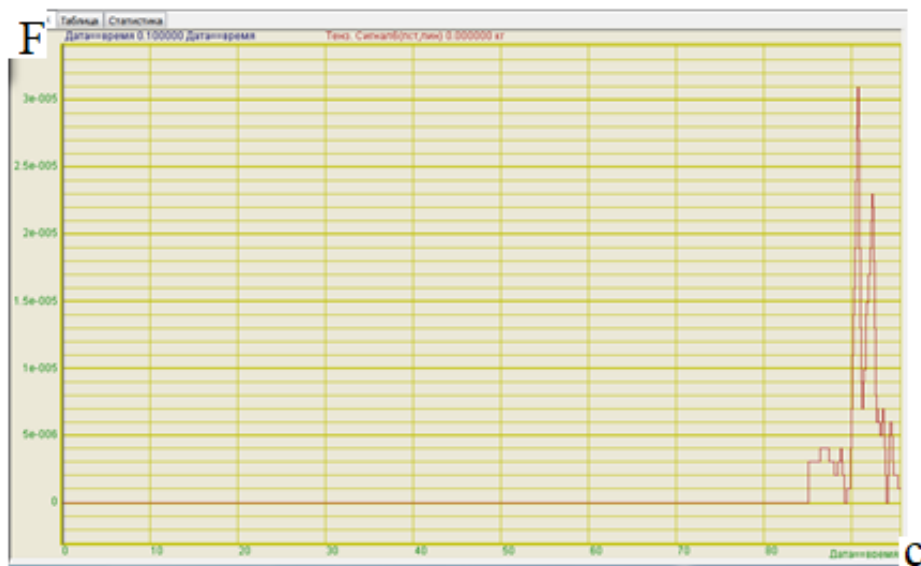


Рис. 3.26. Осциллограммы изменения силы трения от нагрузки, приложенной к оправке шара, при воздействии магнитного поля ( $N = 23 \text{ Н}$ , коэффициент трения  $f_{\text{мол}} = 0,142$ )

Картина изменения силы после воздействия магнитного поля качественно не отличается от картины без магнитного поля. При вращении шара в лунках деформируемого полупространства четко показана зона предварительного смещения, которая заканчивается срывом – срезом фрикционных (молекулярных) связей. На рис. 3.27 показана зависимость силы трения от силы тока в магнитной катушке.

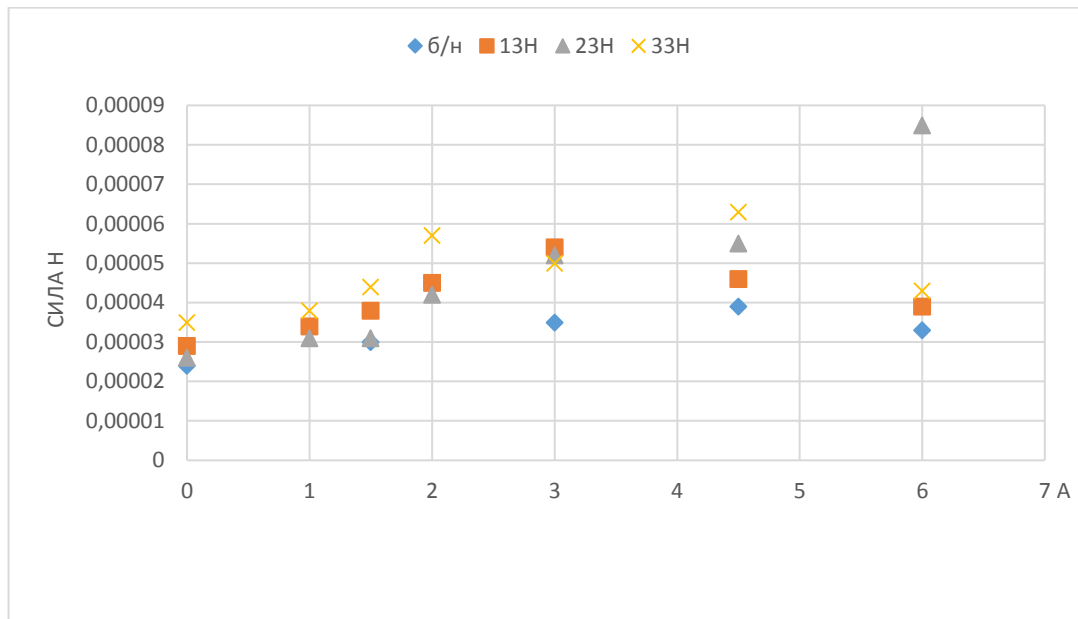


Рис. 3.27. Зависимость силы трения от силы тока

Приложение магнитного поля приводит к росту момента трения по сравнению с моментом трения без магнитного поля. Эксперименты показали нелинейную зависимость момента трения от силы тока, причем в пределах изменения силы тока наблюдается максимум силы трения, соответствующий диапазону 3...4 А. Подобное поведение рассматриваемой трибосистемы наблюдается и при других нормальных нагрузках. При воздействии магнитного поля наблюдается рост силы, приводящей к вращению шара.

Наличие максимума приведенной зависимости можно объяснить одновременным протеканием двух противоположных процессов. С одной стороны, «интенсификацией выхода дислокаций на стальную деформируемую поверхность касания, приводящей к росту количества активных центров и формированию фрикционных молекулярных связей. С другой стороны,



увеличение напряженности магнитного поля способствует росту процесса окисления, коагуляции (объединения частиц износа) в большие по размерам агрегаты, находящиеся в зоне контакта и выполняющие роль тел качения (третьего тела), снижающих момент трения».

Таким образом, рассмотрены два процесса воздействия магнитного поля на элементы шарикового трибометра – выход дислокаций на поверхность трения и формирование активных центров, увеличивающих сопротивление относительно движению, а с другой стороны – окисление и образование тел качения (третьего тела), снижающих трение. Превалировать будет тот процесс, вероятность протекания которого будет в данный момент наибольшей. При силе тока до 3...4 А вероятность образования активных центров фрикционных молекулярных связей больше вероятности протекания процесса окисления поверхности трения (формирование оксидов и их разрушения), и наблюдается рост молекулярной составляющей силы трения. При дальнейшем увеличении силы тока происходит снижение молекулярной составляющей силы трения, так как вероятность образования оксидов и коагуляции частиц больше, чем вероятность протекания процесса формирования активных центров. Описанное является ярким примером конкуренции процессов в исследуемых параметрах, являющихся предметом изучения.

### **3.4. Исследование влияния магнитного поля на триботехнические показатели пар трения скольжения применительно к фрикционным гасителям колебаний**

Трение скольжения характеризуется преобразованием кинетической энергии в тепловую. Выделение тепла приводит к активизации химических процессов, приводящих к трансформации поверхностных слоев и формированию пленок разной природы. Анализ литературных источников показал, что магнитное поле оказывает существенное влияние на трение и изнашивание,

однако это влияние неоднозначно. В одних случаях трение растет, а в других – снижается. Четких рекомендаций, позволяющих управлять трением не существует, что определяется непознанностью закономерностей влияния магнитного поля на процессы трения. Предполагается, что воздействие магнитного поля на коэффициент трения в зависимости от напряженности магнитного поля и направления вектора магнитной индукции будет либо увеличивать величину коэффициента трения при прочих равных условиях, либо ее ослаблять.

На рис. 3.28 приведена осциллограмма реализации процесса трения при разных контактных нагрузках на палец (50, 60, 75 Н, что соответствует давлениям 160, 190, 250 кПа), и соответствующие им расчетные величины силы и коэффициента трения без воздействия магнитного поля (рис. 2.13, вариант А).

Наблюдаем, что характер изменения силы трения зависит от нагрузки в пределах принятого диапазона ее изменения. При малой нагрузке трение скольжения сопровождается значительной амплитудой изменения силы трения, в то время как при большей нагрузке амплитуда силы трения существенно меньше.

Падающая зависимость коэффициента трения от давления характерна для преимущественно упругого контакта пары «сталь – сталь». Обращает на себя внимание тот факт, установленный в результате проведенного эксперимента, что в пределах диапазона изменения давления от 160 до 250 кПа коэффициент трения снижается 0,178 до 0,146.

Действительно, при малых значениях давления, когда контакт является преимущественно упругим, коэффициент трения имеет падающую характеристику. В соответствии с [122] для коэффициента трения единичного контакта он описан зависимостью

$$f = \frac{\tau_n}{p_r} + k_e \sqrt{\frac{h}{r}}, \quad (3.39)$$

где  $\tau_n$  – сдвиговая прочность фрикционных связей;  $p_r$  – фактическое давление;  $k_e$  – множитель для упругого контакта;  $h, r$  – деформация и радиус закругления

сферического сегмента соответственно, моделирующего верхнюю часть выступа шероховатого слоя.

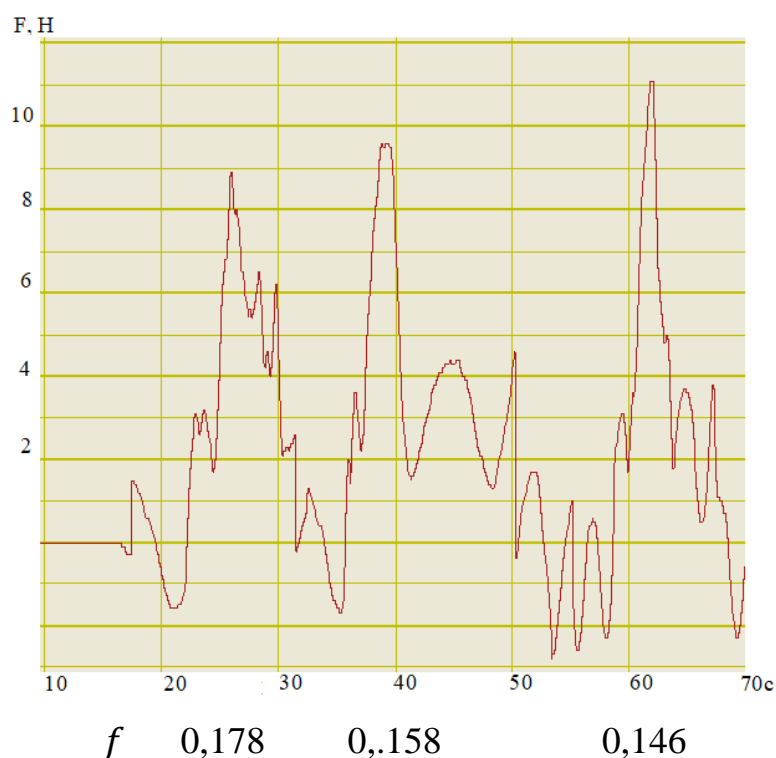


Рис. 3.28. Осциллограмма изменения во времени силы и коэффициента трения при разных нагрузках на палец (рис. 2.13, вариант А)

При росте давления определяющим в снижении коэффициента трения является вклад первого слагаемого, характеризующего молекулярное взаимодействие элементов пары трения. Аналогичный результат наблюдается и для множественных пятен контакта.

На рис. 3.29 приведены данные опытов при дополнительном воздействии магнитного поля одной катушки на палец с током в 1 А (рис. 2.13, вариант В).

При этом наблюдаем, что происходит существенное увеличение силы трения. Как и в случае трения без магнитного поля при росте нагрузки эффект трения со скачками амплитуды (*stick – slip effect*) уменьшается. Изменение коэффициента трения для данной схемы подвода магнитного поля также носит падающий характер. В пределах того же диапазона контактного давления

коэффициент трения снижается от 0,32 до 0,247, что выше, чем результаты эксперимента без магнитного поля (0,178 до 0,146) на 68 %.

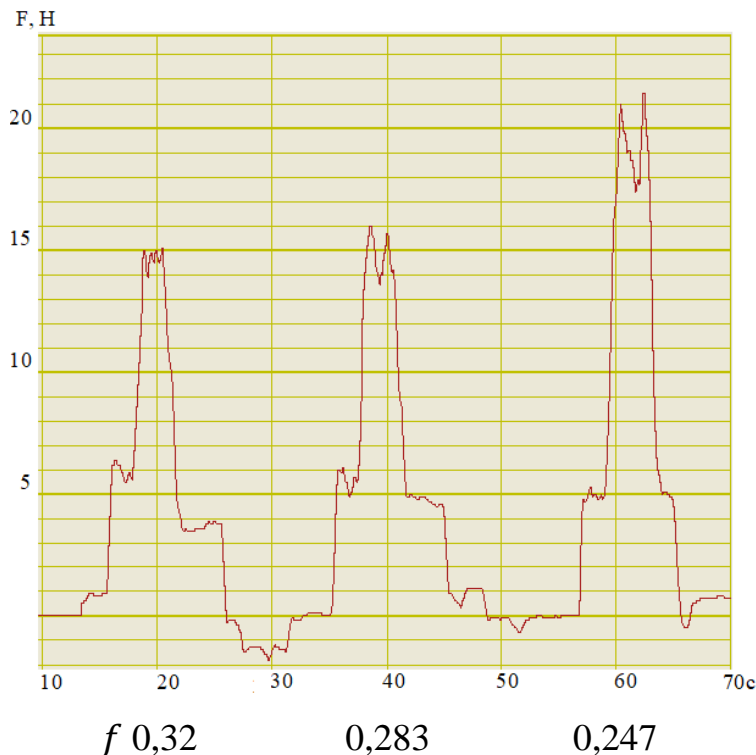


Рис. 3.29. Осциллограмма изменения во времени силы и коэффициента трения при разных нагрузках на палец при токе в катушке 1 А (рис. 2.13, вариант В)

На рис. 3.30 показана осциллограмма изменения силы и коэффициента трения во времени при добавлении в схему центрального стержня с малым зазором от поверхности трения (дополнительный магнитопровод в системе, рис. 2.13, вариант С).

Из рис. 3.30 видно, что сила трения немного уменьшилась из-за воздействия магнитного поля на палец, но коэффициент трения стал еще более стабильным, хотя и немного уменьшается с увеличением нагрузки.

Изменение коэффициента трения для данной схемы подвода магнитного поля также носит падающий характер. В пределах того же диапазона контактного давления коэффициент трения снижается от 0,3 до 0,25, что выше, чем результаты эксперимента без магнитного поля (0,178 до 0,146) на 36 %.

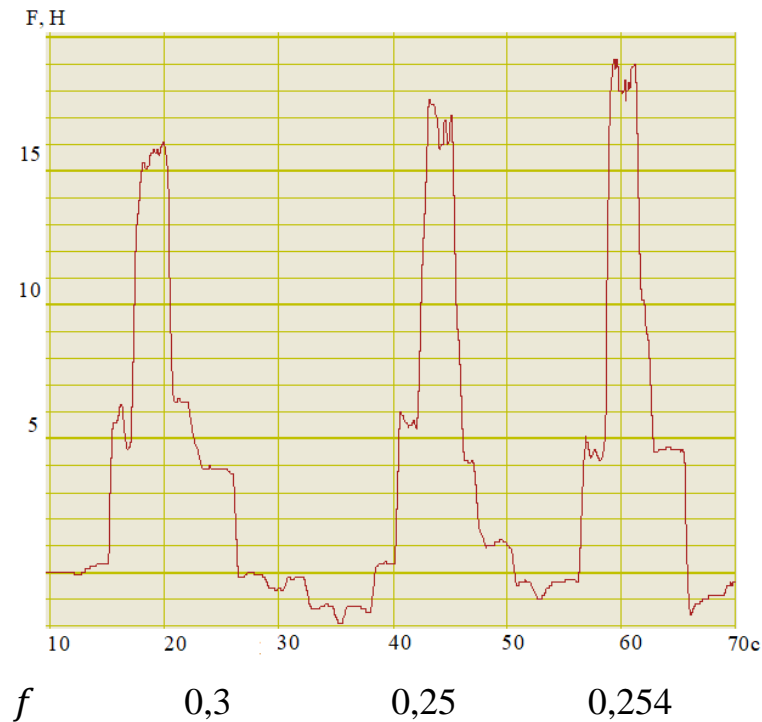


Рис. 3.30. Осциллограмма изменения во времени силы и коэффициента трения при разных нагрузках на палец при дополнительном магнитопроводе в системе и токе в катушке 1 А (рис. 2.13, вариант С)

На рис. 3.31 представлена осциллограмма изменения во времени силы и коэффициента трения при *последовательном* подключении катушек (рис. 2.13, вариант D).

При последовательном включении двух катушек происходит сложение магнитных полей (создаваемых каждой катушкой) с учетом конструктивного зазора между ними и соответствующего воздействия изменения величины силы трения при стабилизации коэффициента трения.

На рис. 3.32 представлена осциллограмма изменения во времени силы и коэффициента трения при *параллельном* подключении катушек (рис. 2.13, вариант D).

При параллельном подключении каждая катушка создает свое магнитное поле, и в этом случае суммарное увеличение общего магнитного потока обратно пропорционально. При этом наблюдается также рост и силы, и коэффициента трения при его лучшей стабилизации.

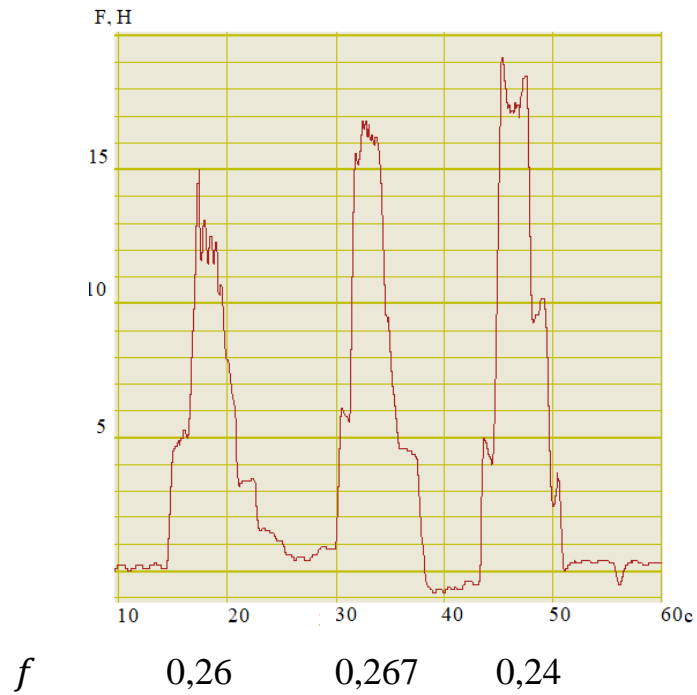


Рис. 3.31. Осциллограмма изменения во времени силы и коэффициента трения при разных нагрузках на палец, дополнительном магнитопроводе в системе, *последовательном* подключении катушек и токе их подключения 1 А (рис. 2.13, вариант D)

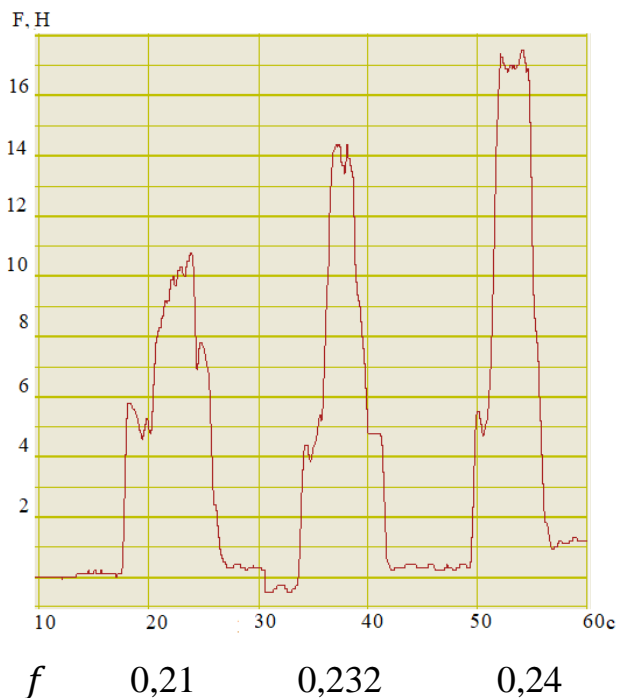


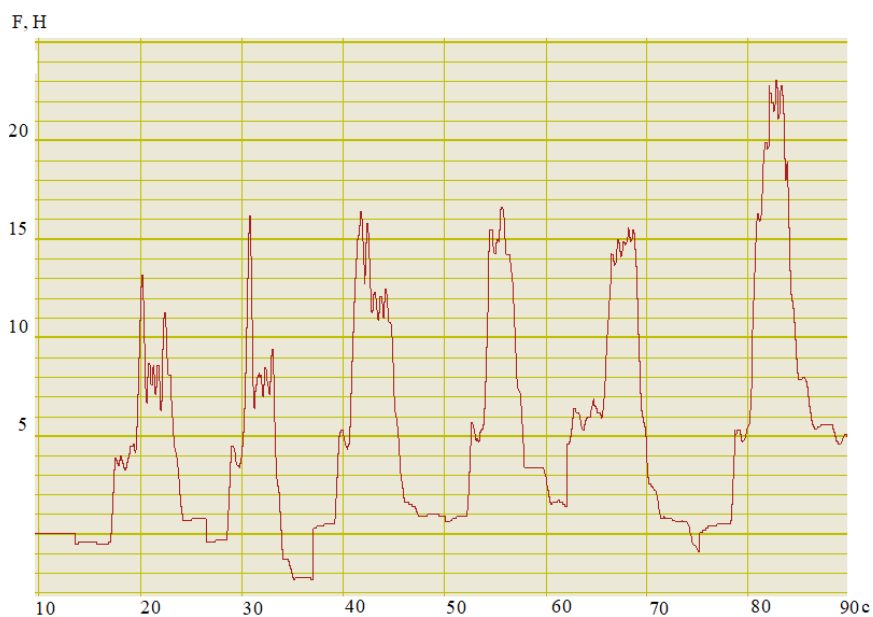
Рис. 3.32. Осциллограмма изменения во времени силы и коэффициента трения при разных нагрузках на палец, дополнительном магнитопроводе в системе, *параллельном* подключении катушек и токе их подключения 1 А (рис. 2.13, вариант D)

Как было показано, происходит рост коэффициента трения от воздействия магнитного поля двух катушек при разных схемах их подключения. В пределах того же диапазона контактного давления и силы тока при последовательном и параллельном подключении катушек, коэффициент трения при этом увеличивается от 0,21 до 0,267, что выше, чем результаты эксперимента без магнитного поля (0,178 до 0,146) на 44 %.

Две катушки способны насытить оба стержня, подключаются таким образом, чтобы магнитные потоки в верхней части магнитной цепи (зона контакта) были направлены в одну сторону. Таким образом, концентрация силовых линий магнитного потока в верхней части магнитной цепи больше, чем в нижней.

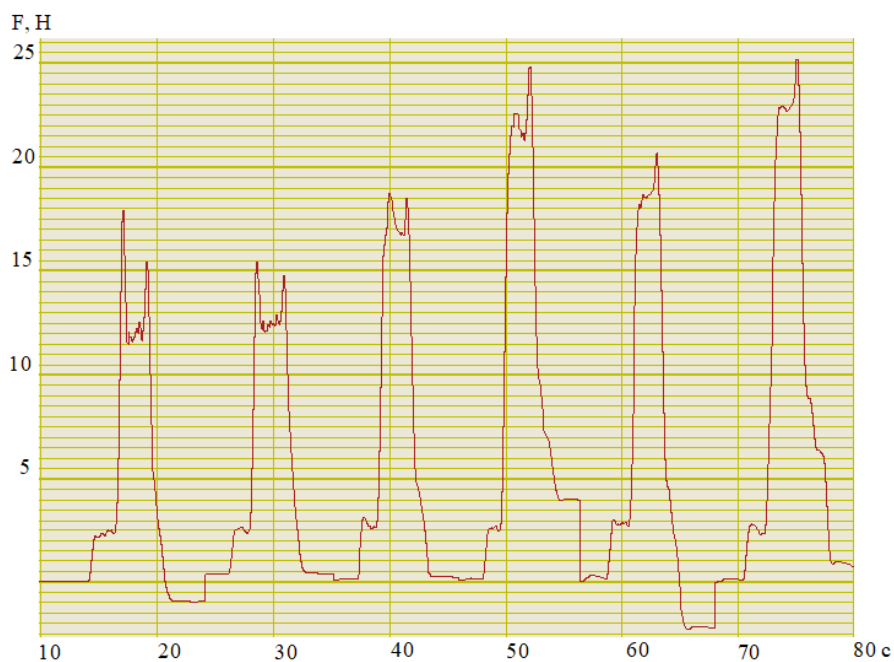
На рис. 3.33 – 3.35 представлены осциллограммы изменения силы и коэффициента трения от величины тока в катушке. Зависимость коэффициента трения исследовалась при последовательном изменении силы тока в катушке и разных контактных нагрузках на палец (50, 60, 75 Н, что соответствует давлениям 160, 190, 250 кПа), при этом в начале опыта проводилась предварительная тренировка образца путем его намагничивания в течение 1 минуты (первый пик).

В среднем по всем испытаниям наблюдается рост коэффициента трения с ростом силы тока в катушках. Коэффициент трения увеличивается по всем опытам от 0,2 до 0,467, что выше, чем результаты эксперимента без магнитного поля (от 0,178 до 0,146) на 88 %. Это указывает на существенное влияние величины силы тока как стабилизирующего фактора для силы и коэффициента трения и возможность его использования в технических решениях в исследованном диапазоне.



$I$	1А	1,5А	3А	4,5А	6А	7,5А
$f$	0,2	0,23	0,28	0,3	0,3	0,44

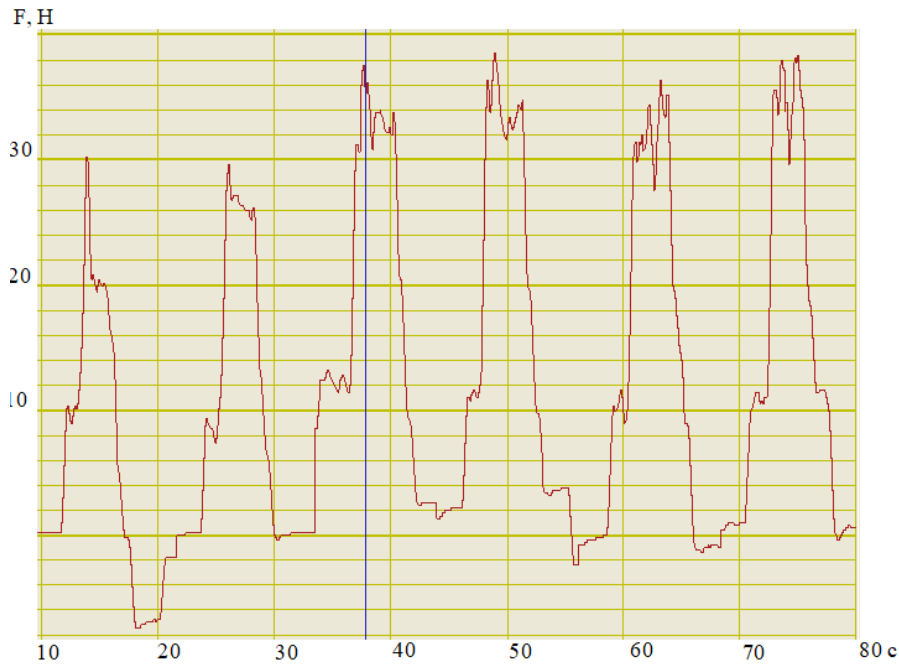
Рис. 3.33. Осциллограмма изменения во времени силы и коэффициента трения при нагрузке на палец 50 Н (160 Па) и разной силе тока (рис. 2.13, вариант В)



$I$	1А	1,5А	3А	4,5А	6А	7,5А
$f$	0,23	0,24	0,292	0,375	0,317	0,392

Рис. 3.34. Осциллограмма изменения во времени силы и коэффициента трения при нагрузке на палец 60 Н (190 Па) и разной силе тока (рис. 2.13, вариант В)





$I$	1А	1,5А	3А	4,5А	6А	7,5А
$f$	0,32	0,36	0,45	0,467	0,453	0,46

Рис. 3.35. Осциллограмма изменения во времени силы и коэффициента трения при нагрузке на палец 75 Н (250 Па) и разной силе тока (рис. 2.13, вариант В)

### 3.5. Исследование влияния магнитного поля на триботехнические показатели неподвижных соединений применительно к фрикционным гасителям колебаний

Для проведения экспериментальных исследований на установке, общий вид которой представлен на рис. 2.16, были изготовлены образцы, в соответствии с эскизом сборочного чертежа (рис. 2.5), для проведения экспериментов по срыву прессовой посадки.

Общий вид графика срыва посадки без магнитного поля приведен на рис. 3.36. Результаты расчета коэффициента трения при срыве посадки  $f$  по испытаниям 6-ти образцов приведены в табл. 3.2. При этом изменение величины  $f$  не превышает 3%, что подтверждает правильность эксперимента (рис. 3.37), среднее значение  $f = 0,0809$ . Сила срыва составляет 2550 Н.

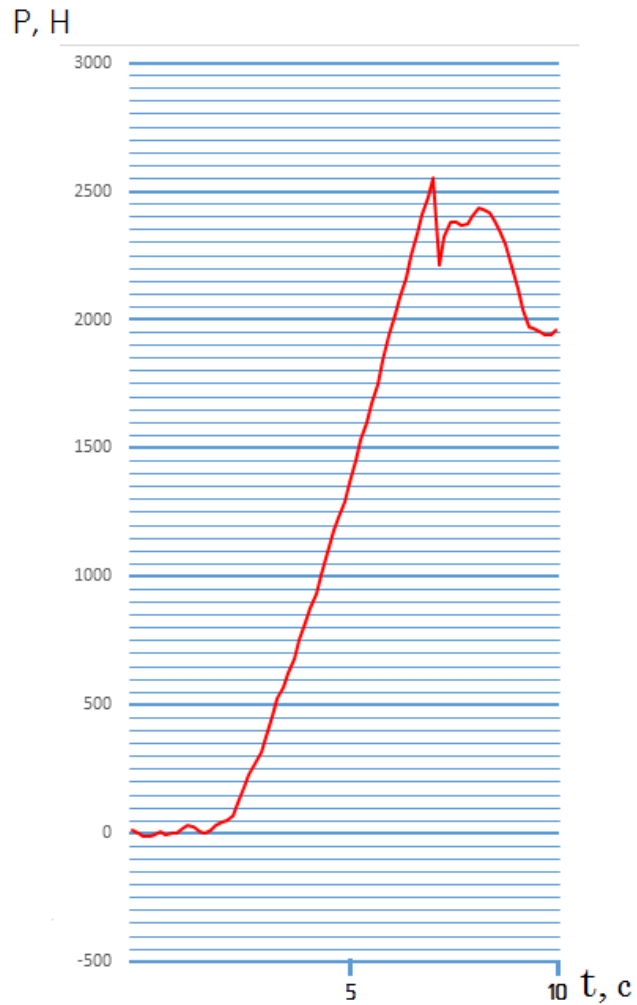


Рис. 3.36. Срыв посадки без магнитного поля (образец № 3, табл. 3.2)

Таблица 3.2

Изменение величины коэффициента трения при срыве посадки

№ образца	1	2	3	4	5	6
$f$	0,078	0,0792	0,081	0,0814	0,0828	0,0832

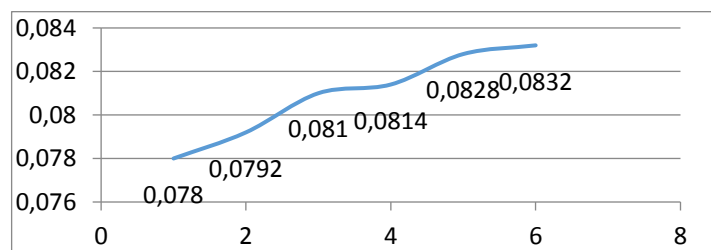


Рис. 3.37. Изменение коэффициента трения  $f$  при срыве посадки  
вариационного ряда образцов

Влияние магнитного поля на срыв посадки с *параллельным оси образца (вертикальным) направлением силовых линий магнитного поля* при одной катушке (рис. 2.19) представлено на рис. 3.38. Использовано три образца (табл. 3.3), среднее значение  $f = 0,0917$  (рис. 3.39), увеличение величины  $f$  при наличии магнитного поля в данном случае составляет 13,3%. Сила срыва составляет 2900 Н, увеличение силы срыва по сравнению с испытаниями без воздействия магнитного поля в данном случае составляет 13,7%.

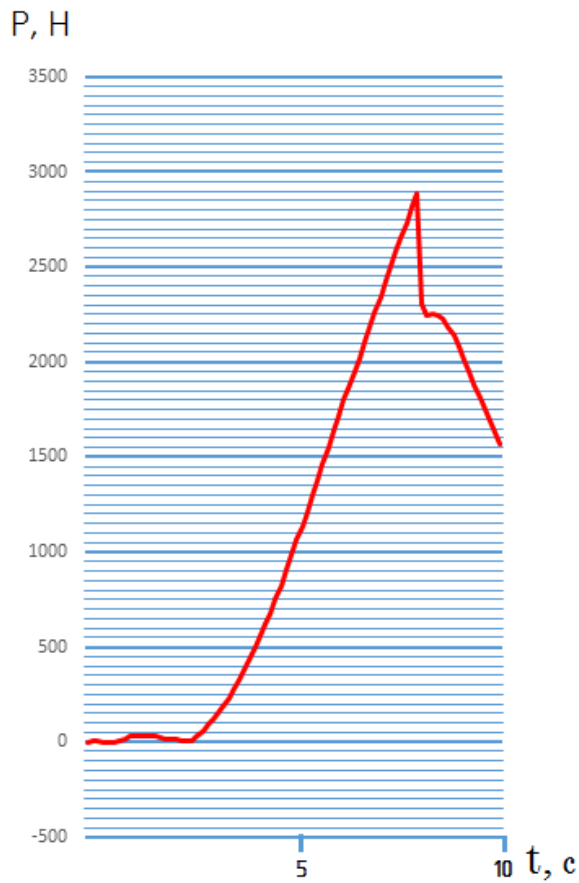


Рис. 3.38. Срыв образца при воздействии магнитного поля одной катушки (образец № 2, табл. 3.3)

Таблица 3.3

Изменение величины коэффициента трения при срыве посадки

№ образца	1	2	3
$f$	0,0897	0,092	0,0935

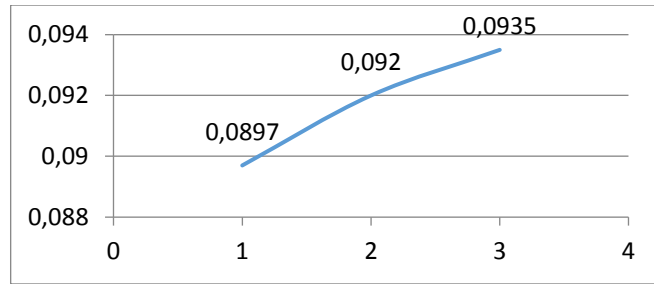


Рис. 3.39. Изменение коэффициента трения  $f$  при срыве посадки вариационного ряда образцов

Влияние магнитного поля на срыв посадки *с перпендикулярным оси образца (горизонтальным) направлением силовых линий магнитного поля* при параллельном подключении двух катушек (рис. 2.21) представлено на рис. 3.40. использовано три образца (табл. 3.4) среднее значение  $f = 0,0978$  (рис. 3.41) увеличение величины  $f$  при наличии магнитного поля в данном случае составляет 21%. Сила срыва составляет 3100 Н, увеличение силы срыва по сравнению с испытаниями без воздействия магнитного поля в данном случае составляет 21,6%.

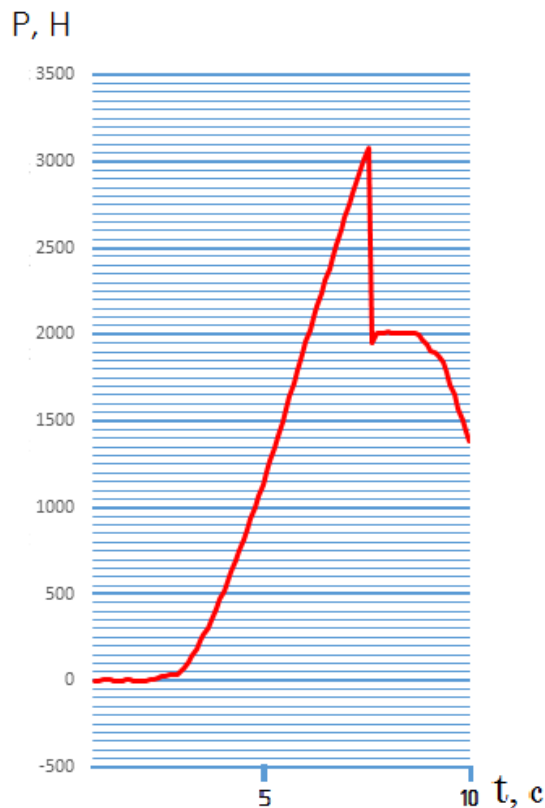


Рис 3.40. Срыв образца при параллельном подключении катушек (образец № 2, табл. 3.4)

Изменение величины коэффициента трения при срыве посадки

№ образца	1	2	3
$f$	0,0952	0,098	0,1002

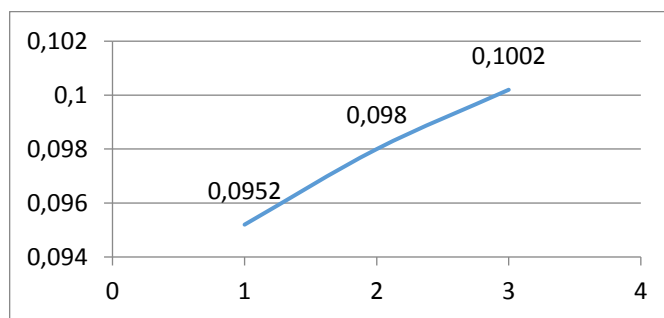


Рис. 3.41. Изменение коэффициента трения  $f$  при срыве посадки вариационного ряда образцов

Влияние магнитного поля на срыв посадки *с перпендикулярным оси образца (горизонтальным) направлением силовых линий магнитного поля* при последовательном подключении двух катушек (рис. 2.21), представлено на рис. 3.42. использовано три образца (табл. 3.5) среднее значение  $f = 0,1043$  (рис. 3.43) увеличение величины  $f$  при наличии магнитного поля в данном случае составляет 28,9%. Сила срыва составляет 3250 Н, увеличение силы срыва по сравнению с испытаниями без воздействия магнитного поля в данном случае составляет 27,5%.

По результатам выше приведенных опытов построен усредненный график (рис. 3.44) зависимости коэффициента трения от влияния магнитного поля при разном расположении катушек.

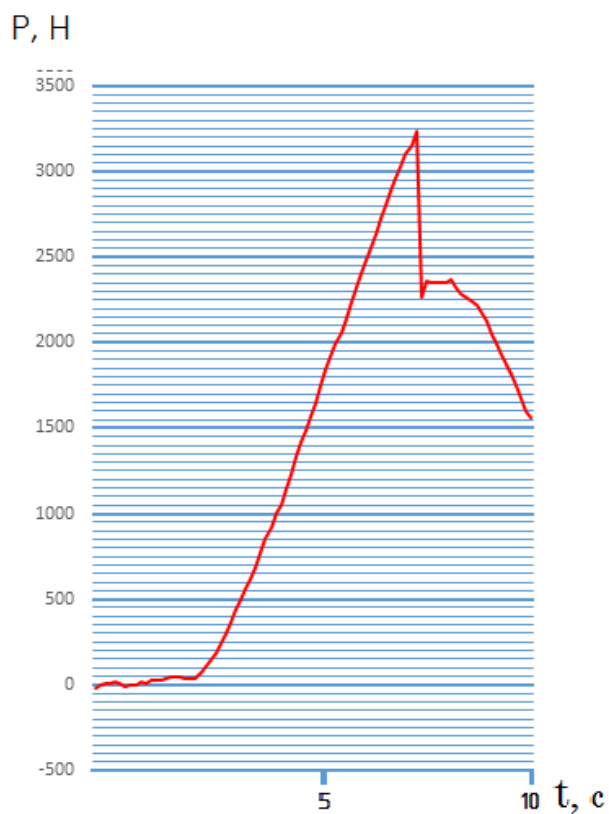


Рис. 3.42. Срыв с полем при последовательном подключении катушек  
(образец № 2, табл. 3.5)

Таблица 3.5

Изменение величины коэффициента трения при срыве посадки

№ образца	1	2	3
$f$	0,083	0,1	0,13

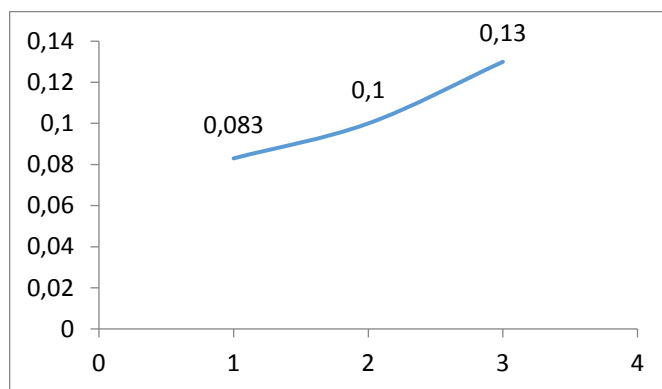


Рис. 3.43. Изменение коэффициента трения  $f$  при срыве посадки  
вариационного ряда образцов

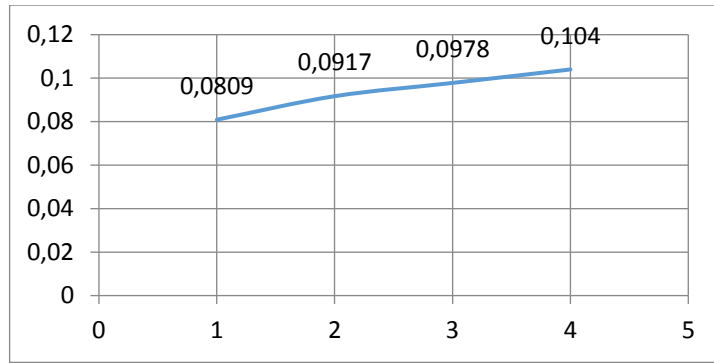


Рис. 3.44. Влияние магнитного поля на величину коэффициента трения  $f$  при разном расположении катушек по всем экспериментам

На рис 3.45 графически представлено расчетное обобщение изменения магнитного поля в предполагаемом соединении с натягом при различном устройстве опытной установки и воздействии изменяемых величин магнитного поля.

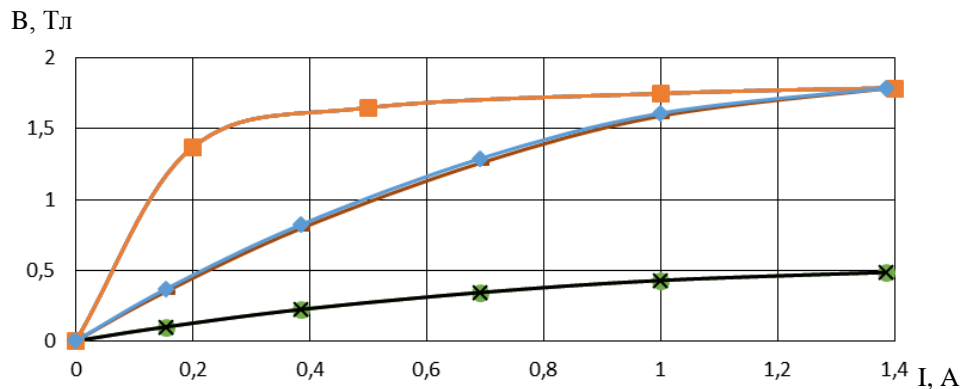


Рис. 3.45. Индукция магнитного поля в образце при различных токах катушек:

- вертикальный стержень (одна катушка);
- \*— горизонтальный стержень (две катушки, поток согласован);
- ×— горизонтальный стержень (две катушки, поток встречный)

### 3.6. Выводы к главе 3

1. Разработана математическая модель намагниченности элементов пар трения и проведен расчет для спроектированных установок. Было выявлено, что намагничивание зоны трения опытных образцов находится в стабилизированном магнитном потоке.

2. Расчет магнитных полей проектируемых установок позволил установить необходимый диапазон изменения величины силы тока от 0 до 8 А, проходящего через катушки, для достижения насыщения магнитным полем испытываемого образца.

3. В соответствии с расчетом были подобраны лабораторные измерительные приборы и спроектированы цепи их включения для измерения параметров магнитного поля.

4. На основе физической модели трения вращения и расчетно-экспериментального метода произведена оценка влияния магнитного поля на молекулярную составляющую коэффициента трения стальных поверхностей при испытаниях на одношариковом трибометре. Установлено, что влияние магнитного поля на молекулярную составляющую коэффициента трения (в рассматриваемом диапазоне его значений) не зависит от давления. Выявлено, что магнитное поле при его возбуждении током катушки в диапазоне от 1,5 до 6,0 А изменяется, с максимумом при величине тока от 3 до 4 А и влияет на процессы трения. Показанная зависимость момента трения от силы тока имеет экстремум, который наблюдается при разных нагрузках.

5. Предложен механизм такого поведения трибосистемы при воздействии магнитного поля, который определяется протеканием противоположных с точки зрения влияния на трение процессов: ростом выхода дислокаций на поверхность трения и активизацией окислительных процессов.

6. Исследовано влияния магнитного поля при трении скольжения и варьировании нагрузкой на образцы и силой тока в катушках. Получены



осциллограммы сравнения коэффициентов трения пары «сталь – сталь» в диапазоне давлений от 160 до 250 кПа и силы тока от 0 до 8 А.

Анализ результатов показал, что при одних и тех же значениях силы тока: при воздействии магнитного поля одной катушки коэффициент трения по сравнению с испытаниями без воздействия магнитного поля увеличивается на 68 %; при добавлении в схему центрального стержня с малым зазором от поверхности трения коэффициент трения увеличивается на 36 %; при *последовательном* и *параллельном* подключении катушек в среднем коэффициент трения увеличивается на 44 %.

В среднем по всем испытаниям наблюдается рост коэффициента трения с ростом силы тока в катушках до 88 %.

7. Увеличение давления на образец и силы тока в магнитной катушке при скользящем контакте приводит к стабилизации и достижению максимума коэффициента трения в диапазоне режимов проведенных испытаний. Можно обоснованно предположить, что указанные параметры ведут к повышенной диссипации энергии при трении.

8. Установлено влияние магнитного поля на величину силы срыва прессовой посадки с гарантированным натягом.

Показано, что при воздействии магнитного поля *с параллельным оси образца (вертикальным) направлением силовых линий магнитного поля* при одной катушке происходит увеличение силы срыва по сравнению с испытаниями без воздействия магнитного поля на 13,7%, а коэффициента трения на 13,3%. При воздействии магнитного поля *с перпендикулярным оси образца (горизонтальным) направлением силовых линий магнитного поля* при параллельном подключении двух катушек происходит увеличение силы срыва по сравнению с испытаниями без воздействия магнитного поля на 21,6%, а коэффициента трения на 21%. При воздействии магнитного *с перпендикулярным оси образца (горизонтальным) направлением силовых линий магнитного поля* при последовательном подключении двух катушек происходит увеличение силы срыва по сравнению с

испытаниями без воздействия магнитного поля на 27,5%, а коэффициента трения на 28,9%.

9. Для проведенной вариативности установки катушек и соответствия направлений воздействия магнитного поля по оси образца присутствует устойчивая тенденция увеличения силы срыва посадки с натягом и соответствующего коэффициента трения.

## ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ И ПРОЦЕССЫ ИЗНАШИВАНИЯ

### 4.1. Оценка температурного режима в условиях трения скольжения

Трение по своей природе является сложным термодинамическим процессом, сопровождающимся изменением диссипацией энергии внутри системы, ее температурного поля, тепломассопереносом, износом или разрушением поверхностных слоев, изменением их структуры и физико-механических свойств. То обстоятельство, что в результате трения могут осуществляться такие процессы, как нагрев, разрушение контактных поверхностных слоев, изменение их структуры и физико-механических свойств, обуславливает необходимость использования процессов трения инструментом управления сложными механическими системами.

Фрикционный нагрев и повышение температуры на скользящем контакте оказывает существенное влияние на трение и изнашивание [18, 76, 116, 117]. Многочисленные исследования показали, что реальная область контакта между двумя трущимися телами обычно небольшая по сравнению с геометрической (номинальной) областью взаимодействия. Установление зависимостей трибологических свойств от температуры предполагает использование аналитических, численных и эмпирических подходов. Экспериментальные методы непосредственного измерения температуры видимой области контакта позволяют оценить адекватность разработанных аналитических моделей. Решение проблем теплопередачи с использованием движущихся тепловых источников имеют большое значение в понимании фрикционного нагрева. *Jaeger* [107] использовал подход, основанный на суперпозиции различными типами источника передачи тепла для оценки среднего повышения температуры в контакте за счет движущихся источников различной формы. *Archard* приводит простые физические соображения при выводе уравнений для определения температуры

поверхности. Важной задачей при определении температуры поверхности является задача распределения тепла между трущимися телами.

Коэффициент трения  $k_{тр}$  при изменении температуры может снижаться, возрастать или проходить через один или два минимума. Пионерской работой в этом смысле следует считать исследование И.В. Крагельского и Г.И. Трояновской. Ими была получена зависимость:

$$k_{тр} = C_1 T^{m-n} \frac{dT}{dx} + A_1 T^{m-r}, \quad (4.1)$$

где  $C_1$ ,  $A_1$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $r$  – коэффициенты;  $T$  – температура;  $dT/dx$  – градиент температуры.

В работе [96] на основе термодинамического рассмотрения зависимость коэффициента трения от факторов температурного режима имеет вид

$$k_{тр} = C_1 T_u^{-A_0 C_v} + 2T_{max}^{-1} \frac{dT}{dx} + C_2, \quad (4.2)$$

где  $C_v$  – теплоемкость;  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $A_0$  – коэффициенты.

Как видно из приведенных формул, все они содержат 3 – 5 неизвестных факторов, что делает их мало пригодными при интерпретации экспериментальных данных.

В работе [25] получена зависимость для определения коэффициента трения, которая имеет следующий вид:

$$k_{тр} = C \cdot \frac{T}{A + BT + DT^2}. \quad (4.3)$$

Измеренное повышение температуры сравнивается с выше приведенными аналитическими моделями для среднего повышения температуры на скользящем контакте.

Первоначально при отсутствии температурного разрыва в области реального контакта, коэффициент распределения теплового потока может быть оценен путем приравнивания максимальных температур поверхности двух тел, находящихся в контакте. Подробный анализ моделей оценки повышения температуры на скользящем контакте приведен в работе [119].

Учет распределения тепловых потоков для конкретной трибосистемы с ее геометрией элементов пары трения, кинематикой и теплофизическими свойствами приведен в теории Эшби [92].

В соответствии с моделью Эшби температура при трении скользящего кругового источника определяется выражением

$$T_b - T_0 = \frac{fFv}{A_a} \left[ \frac{1}{\frac{k_1}{b_{1eff}} + \frac{k_2}{b_{2eff}}} \right], \quad (4.4)$$

где  $T_b, T_0$  – температуры поверхности и начальная (окружающей среды) соответственно;  $f$  – коэффициент трения;  $F$  – нагрузка;  $v$  – скорость скольжения;  $A_a$  – номинальная площадь контакта;  $k$  – коэффициент теплопроводности;  $b_{eff}$  – эффективная глубина проникновения тепла.

Как показано ранее, коэффициент трения зависит от контактного давления (рис. 4.1). В соответствии с рис. 4.1, в расчетах принято: палец и диск изготовлены из бандажной стали; коэффициент теплопроводности  $k_1 = k_2 = 41$  Вт/(м град); скорость скольжения 3 м/с; номинальная площадь контакта  $A_a = 314$  мм<sup>2</sup>.

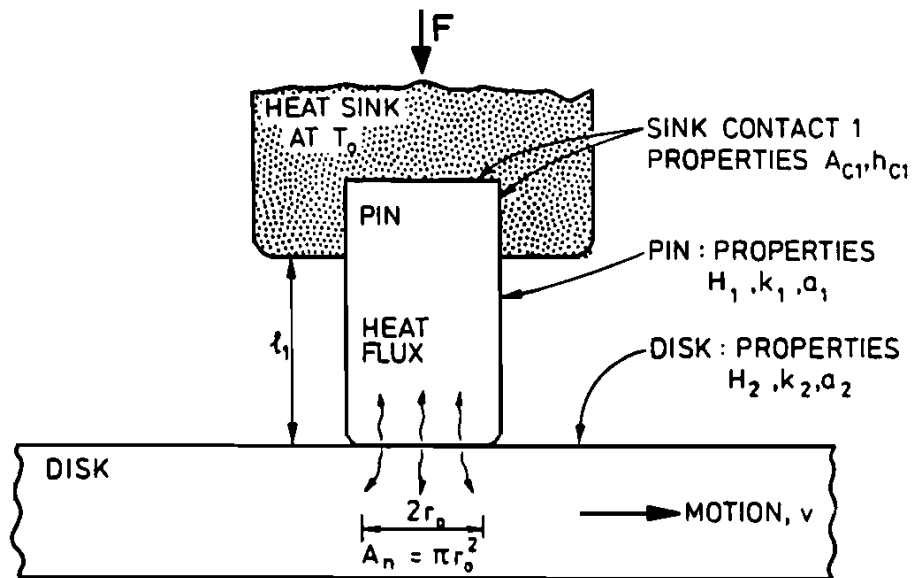


Рис. 4.1 Схема распределения тепловых потоков [92]

Эффективную глубину проникновения тепла оценим по формуле (Эшби):

$$l_{1eff} = l_1 + \frac{A_a k_1}{A_{c1} h_{c1}}, \quad (4.5)$$

$$l_{2eff} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} r_0, \quad (4.6)$$

где  $l_1$  – длина (рис. 4.1);  $A_a$  – номинальная площадь контакта;  $A_{c1}$  – поверхность теплоотдачи;  $h_{c1}$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>град);  $r_0$  – радиус площади контакта.

Приняв в качестве исходных данных:  $F = 47$  Н;  $v = 3$  м/с;  $f = 0,14$ ;  $k_1 = k_2 = 41$  Вт/(м град); эффективные длины:

$$l_{1eff} = 30 \cdot 10^{-3} + \frac{314 \cdot 10^{-6} \cdot 41}{600 \cdot 10^{-6} \cdot 41} = 0,713 \text{ м}; \quad (4.7)$$

$$l_{2eff} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} 10 \cdot 10^{-3} = 8,86 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (4.8)$$

Повышение температуры равно

$$T_b = 15 + \frac{0,1407 \cdot 47 \cdot 3}{314 \cdot 10^{-6}} \left[ \frac{1}{\frac{41}{0,713} + \frac{41}{8,86 \cdot 10^{-3}}} \right] = 25,45 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.9)$$

Измерение температурного режима в зоне фрикционного контакта (схема испытаний «палец – диск») проводилось с помощью тепловизора *Testo 875*. С помощью тепловизора осуществлялось наблюдение и измерение температуры поверхности на скользящем контакте. Повышение температуры было измерено в условиях постоянной скорости скольжения и нагрузки, равной от 50 до 75 Н. Площадь номинального контакта составляла 314 мм<sup>2</sup>.

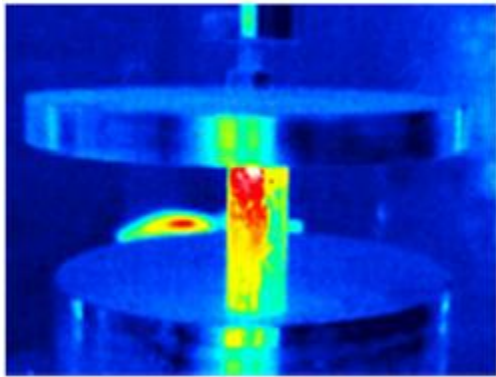
Измерение температуры, соответствующее исходным данным, приведенным в расчете, проведенное с помощью тепловизора, без воздействия магнитного поля представлено на рис. 4.2, а осциллограмма изменения во времени силы трения – на рис. 4.3.

Файл: IV\_00265.BMT

Дата: 26.03.2017

Тип  
объектива: Стандартный 32°Серийный номер  
объектива: 20373826

Время: 9:56:12



Параметры изображения:

Коэффициент излучения: 0,95

Отраж. темп. [°C]: 20,0

Рис. 4.2. Температура поверхности при отсутствии магнитного поля ( $T_{max} = 28,9^{\circ}\text{C}$ )

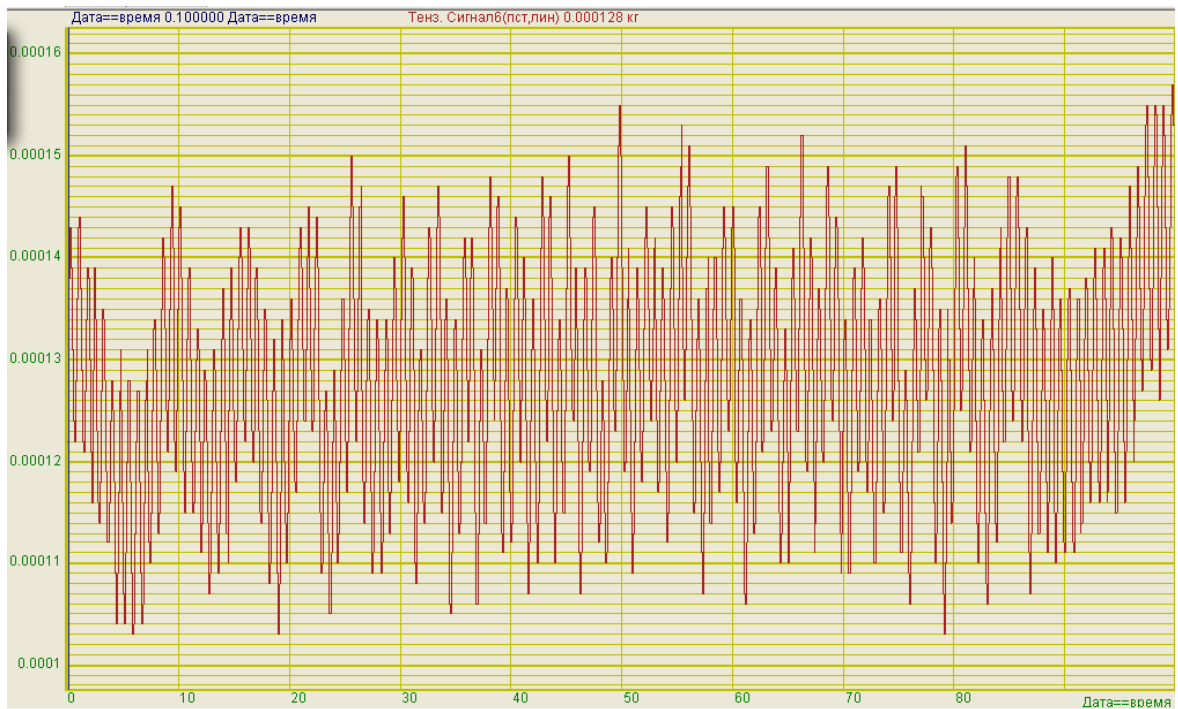


Рис. 4.3. Осциллограмма изменения во времени силы трения, нагрузка 50 Н, без магнитного поля (ось ординат в условных единицах)

Измерение температуры, соответствующее исходным данным, приведенным в расчете, проведенное с помощью тепловизора, при воздействии магнитного поля представлено на рис. 4.4, а осциллограмма изменения во времени силы трения – на рис. 4.5.

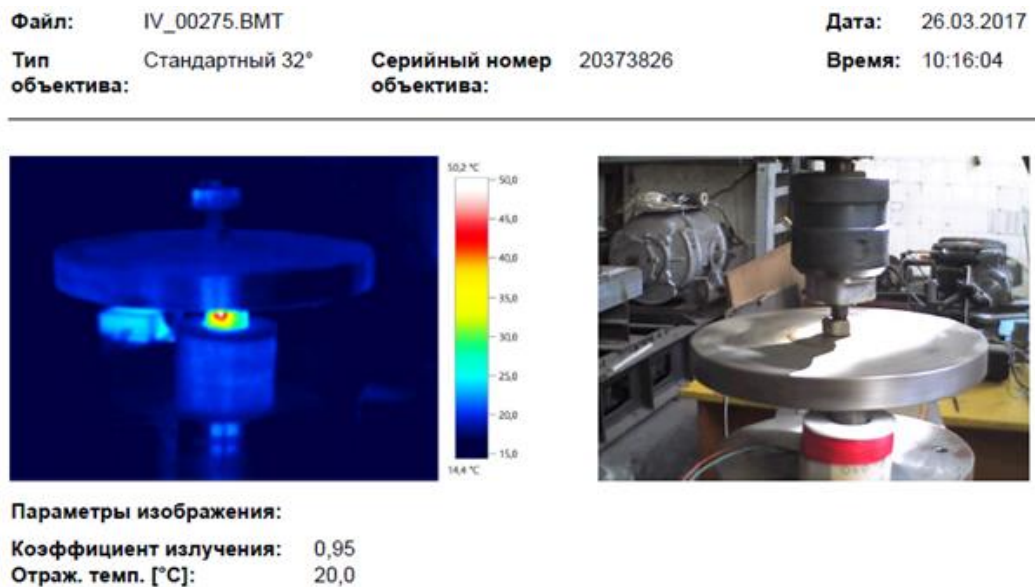


Рис. 4.4. Температура на поверхности трения при воздействии магнитного поля ( $T_{max} = 50,2^{\circ}\text{C}$ )

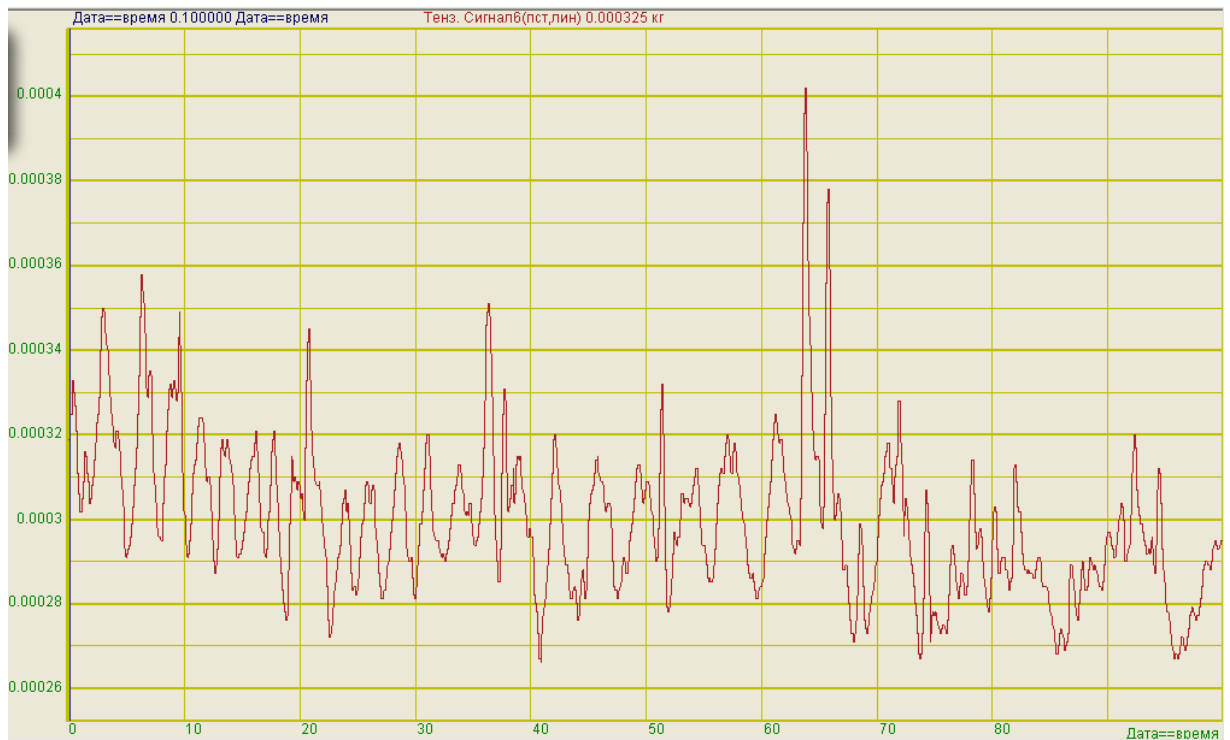


Рис. 4.5. Осциллограмма изменения во времени силы трения, нагрузка 50 Н при воздействии магнитного поля (ось ординат в условных единицах)



Полагая неизменными теплофизические характеристики материалов трущихся элементов, произведенный теоретический расчет повышения температуры по вышеприведенной методике (Эшби) с учетом того, что сила трения имеет повышенное значение при воздействии магнитного поля (рис. 4.5), показал приемлемую сходимость с экспериментальными данными. Погрешность расчетов не превысила 10%.

Таким образом, при наличии магнитного поля повышаются сила трения и, как следствие, температура контакта сопряженных тел (схема испытаний «палец – диск»).

#### **4.2. Влияние магнитного поля на процессы изнашивания в условиях подвижного и неподвижного контактов**

«При относительном перемещении деформирующихся тел, касание между ними происходит не в точках, а в зонах, называемых площадками контакта[35]. На этих площадках контакта могут происходить весьма разнообразные физико-механические явления, например, упругие и пластические деформации частиц, молекулярное сцепление частиц, адсорбция тонких слоев газа, дисперсность коллоидальных частиц и др. Некоторые ученые при изучении этого вопроса насчитали более 20 таких явлений, причем, многие из них оказались во взаимной связи. Количественные и качественные соотношения между этими явлениями, происходящими на упругих площадках двух соприкасающихся (трущихся) тел, зависят от наличия между ними жидкостной или газообразной прослойки – смазочного материала».

Трение и изнашивание тесно связаны между собой. Фундаментальные исследования по влиянию магнитного поля на трение и изнашивание трибосистем практически отсутствуют. Для ферромагнитных материалов, являющихся элементами трибосопряжений, основное влияние на процессы трения и изнашивания оказывает намагниченность, усиливаемая доменами. Именно

намагниченность формирует магнитоэластические напряжения, масштабы образования и движения дислокаций, ответственных за пластические свойства поверхности трения.

#### 4.2.1. Влияние магнитного поля на процессы изнашивания в условиях скользящего контакта

Некоторые исследователи считают, что магнитное поле непосредственно не влияет на трение и изнашивание материалов. Оно оказывает влияние на процессы, связанные с взаимодействием магнитного поля с заряженными частицами, интенсифицируя в данном случае процесс повышенного образования активных центров на поверхности трения, что, в свою очередь, приводит к росту сопротивления относительно движению элементов пары трения. Процесс образования оксидной пленки не является ведущим, так как возникновение оксидной пленки на поверхности трения компенсируется износом этой пленки. К тому же вероятность образования активного центра выше, чем образование оксида (рис. 4.6).

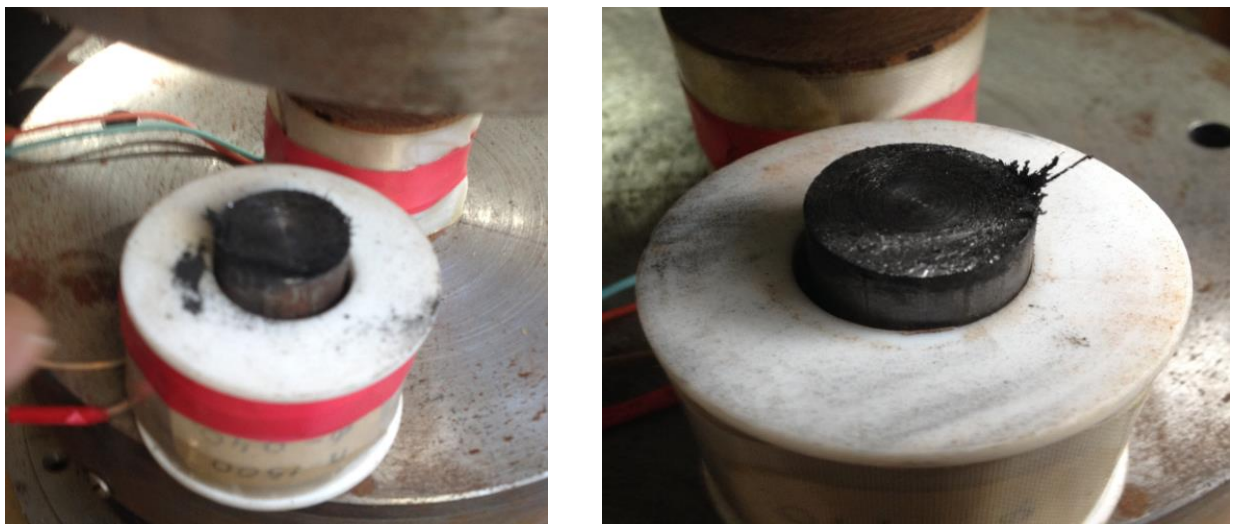
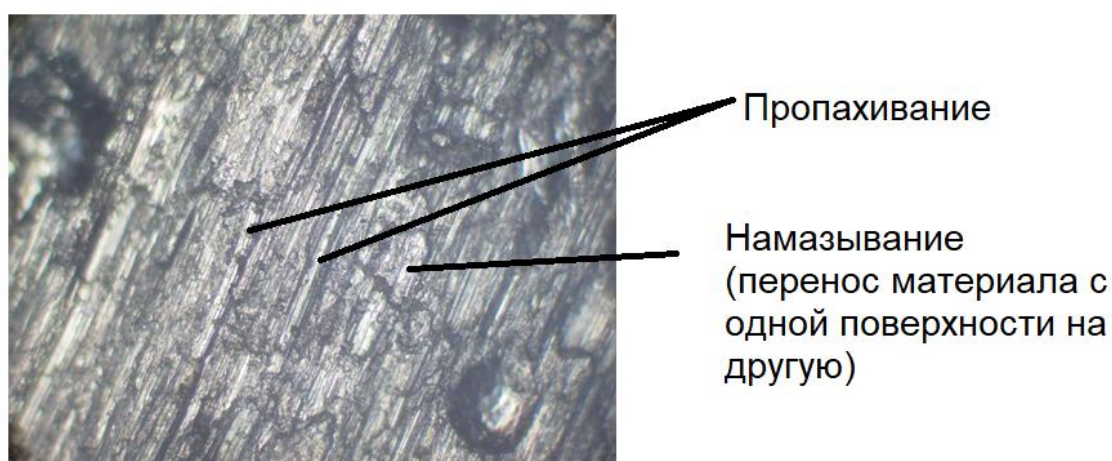


Рис. 4.6. Продукты износа

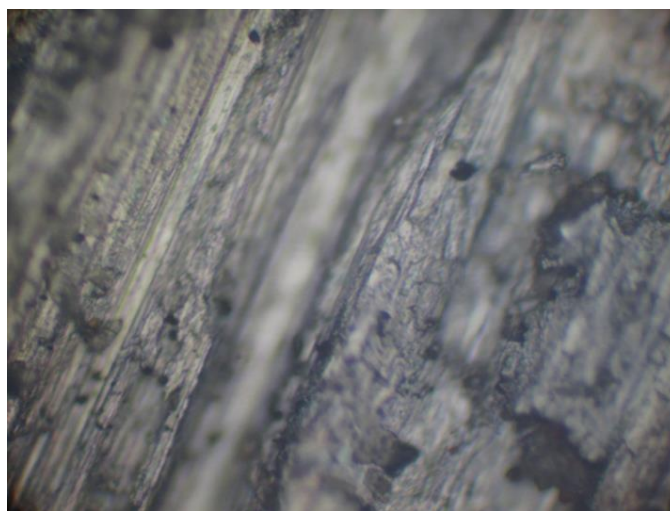
Продуктами износа являются оксидные частицы черного цвета, которые под действием магнитного поля выносятся из зоны трения.

Приведем результаты некоторых исследований влияния магнитного поля на триботехническое поведение узла трения путем придания за счет намагничивания образцам новых свойств.

Приработка пары трения без магнитного поля по схеме «палец – диск». На рис. 4.7 представлены микрофотографии стальной поверхности трения при разном увеличении после приработки.



x125



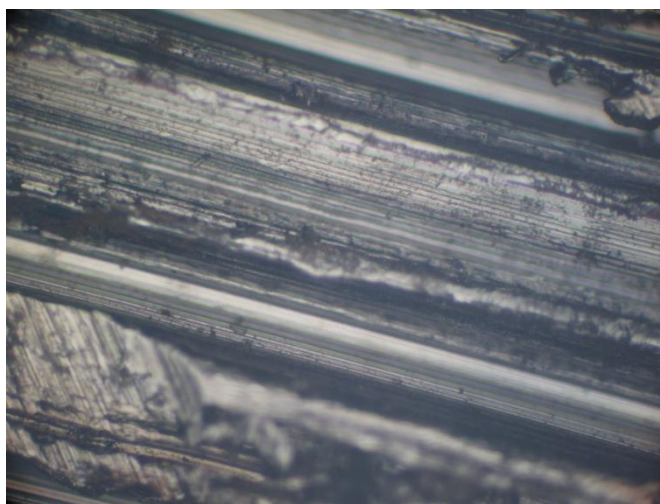
x500

Рис. 4.7. Микрофотографии стальной поверхности трения после приработки без магнитного поля по схеме «палец – диск»

На рис. 4.7 видны следы пропахивания и намазывания вследствие пластического деформирования неровностей и переноса на контртело.

Испытание без магнитного поля после приработки. На рис. 4.8 представлена микрофотография поверхности после испытаний.

После приработки отсутствуют перенос материала с одной поверхности на другую, следы пропахивания показывают увеличенную ширину, что связано с ростом радиуса закругления вершин выступов после окончания процесса приработки и упругим характером взаимодействия.



x250

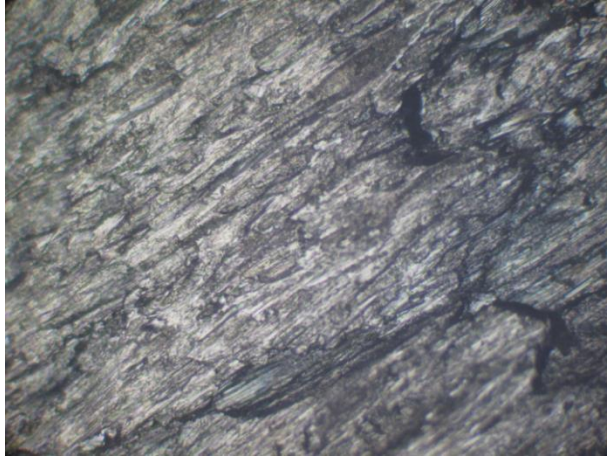
Рис. 4.8. Микрофотография поверхности после испытаний без магнитного поля

Испытания при наличии магнитного поля. На рис. 4.9 представлены микрофотографии поверхности приработанной поверхности после испытаний с влиянием магнитного поля при разных увеличениях.

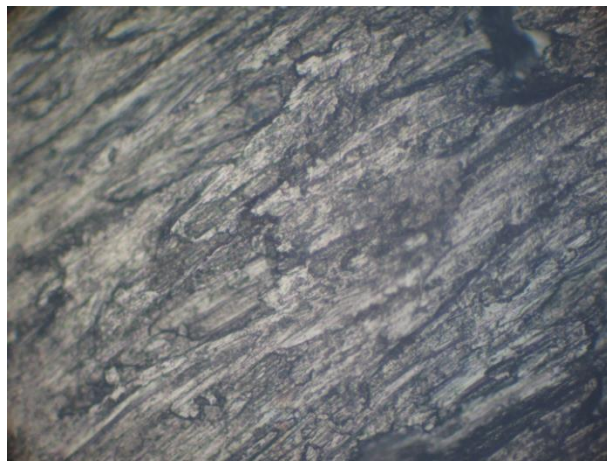
При сравнительных испытаниях частота вращения диска была постоянной, скорость скольжения составляла

$$\frac{\pi \cdot 80}{30} 0,08 = 0,67 \text{ м/с}^2 \quad (4.10)$$

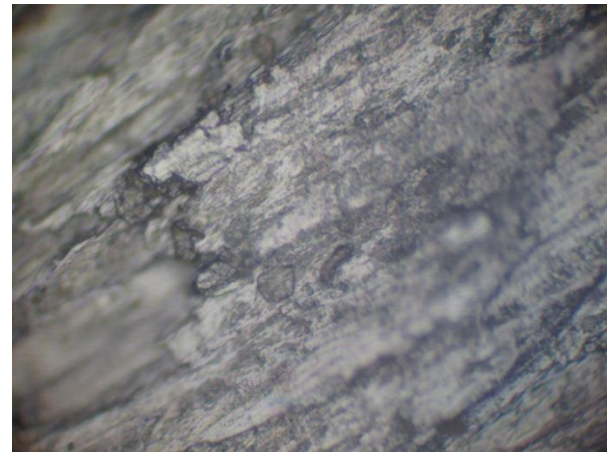
Использовалась одна катушка, через витки которой пропускался ток 3,5 А. Сравнение микрофотографий показывает улучшение качества поверхности (не видны ярко выраженные следы пропахивания). Это подтверждает гипотезу о выводе из зоны трения под действием магнитного поля частиц износа.



x125



x250



x500

Рис. 4.9. Микрофотографии приработанной поверхности при воздействии на пару трения скольжения магнитного поля (при разном увеличении)

Влияние магнитного поля сказывается на интенсификации процесса окисления поверхности и формирования оксидной пленки. Наблюдаемое увеличение коэффициента трения и снижение износа можно объяснить разрушением тонкой оксидной пленки и взаимодействием ювенильных поверхностей, при этом частицы износа уносятся из зоны трения под действием магнитного поля.

Таким образом, влияние магнитного поля на скользящий контакт без смазочного материала приводит к усилению следующих эффектов:

- удаление частиц износа окислов железа из зоны контакта;
- рост химической адсорбционной активности частиц износа железа или частиц оксидного железа;
- увеличение шероховатости поверхности и износа при малых скоростях скольжения, когда ориентация магнитного поля параллельна направлению скольжения;
- усиление хемосорбционной активности кислорода в поверхностном слое ферромагнитного материала (при высоких скоростях скольжения) из-за влияния внутреннего магнитного поля.

При проведении данных исследований использовался металлографический микроскоп *ММР-2*. Технические характеристики микроскопа приведены в табл. 4.1.

Технические характеристики металлографического микроскопа *ММР-2*

Методы исследования	В отраженном свете по методу светлого поля и в поляризованном свете
Увеличение микроскопа	40х – 1250х
Насадка	Бинокулярная 1х с наклоном 45°, компенсация диоптрийной разницы ( $\pm 5$ диоптрий), межзрачковое расстояние 55 – 75 мм
Револьверная головка	4 позиции для объективов
Объективы	План-Ахромат PL 4х0,1; 10х0,25; 40х0,65; 100х1,25ми
Окуляры широкопольные	WF-10х/18мм; WF-12,5х/18мм; WF-10х/18мм (с измерительной шкалой 0,1 мм)
Предметный столик	200х180 мм, неподвижный с двух-координатным перемещением
Фокусировочный механизм	2-х сторонние коаксиальные винты грубой и точной фокусировки, встроенный механизм блокировки фокусировки для защиты препарата и быстрой настройки при его смене, механизм регулировки плавности хода
Светофильтры	Синий, зеленый
Осветитель	Система освещения по Келеру с линзой, полевой ирисовой диафрагмой
Источник света	Встроенный в основание с плавной регулировкой яркости (галогенная лампа 6 В, 30 Вт)

#### 4.2.2. Влияние магнитного поля на процессы изнашивания соединения с натягом

После проведения ряда экспериментов, несколько образцов подверглось разрезу по плоскости сопряжения «стержень – втулка». Внешний вид разрезанного образца представлен на рис. 4.10. Далее подготавливались шлифы для визуального анализа зоны сопряжения.



Рис. 4.10. Разрезанный образец

На рис. 4.11 представлена морфология структуры металла. В зоне сопряжения «стержень – втулка» без воздействия магнитного поля ярко выражена граница их раздела. В зоне сопряжения «палец – втулка» при воздействии магнитного поля наблюдается локальное отсутствие выраженной границы раздела

Известно, что фактическая площадь контакта состоит из многих зон, несущих всю нагрузку. Для соединения с натягом имеет место насыщенный пластический контакт. В инженерной практике расчета соединений с натягом не учитываются физический контакт и молекулярные связи при взаимодействии вала и втулки.

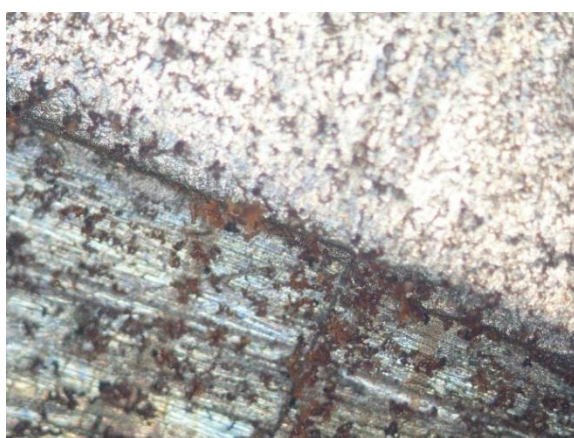
На пятнах контакта при влиянии магнитного поля увеличиваются активные центры, их количество и насыщение со временем выхода дислокаций. Магнитное поле ускорят рост этого числа активных центров за счет выхода дислокаций на



поверхность контакта, а увеличение площади физического контакта, приводит к упрочнению фрикционных связей и росту коэффициента трения.

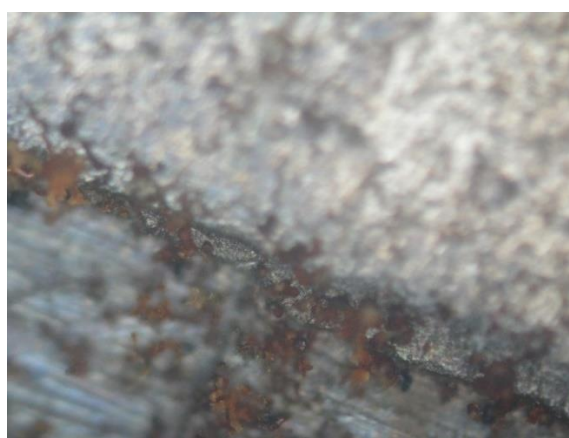
При воздействии магнитного поля на образец происходит не только увеличение количества дислокаций и их перераспределение, а также изменяется расположение и взаимодействие точечных дефектов кристаллической решетки. Интенсификация выхода дислокаций на стальную деформируемую поверхность касания, приводящая к росту количества активных центров, способствует формированию фрикционных молекулярных связей.

а)



Контактная область соединения с натягом без магнитного поля (x100)

б)

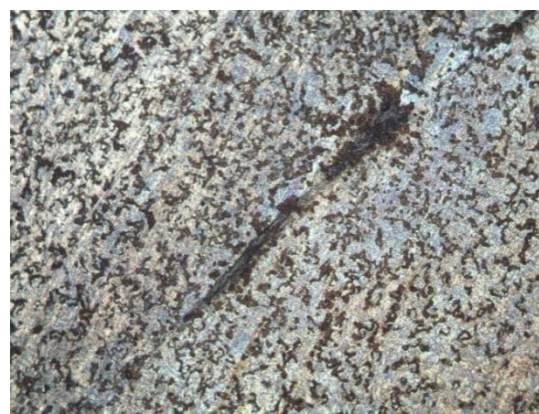


Контактная область соединения с натягом без магнитного поля (x200)

в)



г)



Участок прессового соединения при воздействии магнитного поля (x200)

Рис. 4.11. Шлифы контактной области соединения с натягом:

а, б – зона сопряжения «стержень – втулка» без воздействия магнитного поля;  
в, г – сопряжение «стержень – втулка» при воздействии магнитного поля

### 4.3. Влияние магнитного поля на изнашивание подвижных сопряжений

Следует понимать, что изнашивание – это прежде всего результат взаимодействия поверхностей, в котором протекает не только микросрезы взаимодействующих неровностей, деформирование и нагрев, но также и изменением механических свойств, структуры, фазового состава и химической активности поверхностных слоев. В процессе длительного воздействия на поверхностях трения образуются частицы износа, которые оказывают повреждающее воздействие на контактирующие поверхности. Износ применительно к пути трения и объему выполненной работы, работе трения и т.д., является показателем интенсивности изнашивания.

Возможные процессы, протекающие в межконтактной зоне трения (формирование оксидного слоя и его разрушение, дробление частиц износа (диспергирование), вынос частиц из зоны и др.) оказывают существенное влияние на интенсивность изнашивания. Износ и интенсивность изнашивания определяют и по другим косвенным признакам (наличием частиц в масле, изменением размеров изнашиваемых элементов, изменением веса и т.п.).

Образцы после обработки их магнитным полем изменяют свои свойства во времени, и эта зависимость не прямолинейна. Вначале происходит увеличение твердости, а по достижении определенной величины происходит уменьшение твердости. Повышение износостойкости намагниченных образцов при необходимых условиях эксплуатации подразумевает взаимодействие возбужденных молекул водорода, появляющихся в зоне контакта трущихся поверхностей при насыщении магнитным полем, что помогает обеспечить быстрый отвод молекул и атомарного водорода из зоны пар трения. В этих условиях снижается вероятность протекания водородного изнашивания. Результаты испытаний на изнашивание пальца (схема «палец – диск») представлены в табл. 4.2. Интенсивность изнашивания при воздействии магнитного поля меньше на 49,7%, чем при испытаниях без воздействия магнитного поля.

С целью визуального выявления тенденции влияния магнитного поля на зону сопряжения исследуемых образцов был проведено их фотографирование на электронном микроскопе с большим увеличением. На рис. 4.12 представлены копии профилограмм исходной шероховатости и после прохождения электрического тока и воздействия магнитного поля. На рис. 4.9 приведены фотографии поверхности трения скользящего контакта, полученные после испытаний по схеме «палец – диск» после приработки.

Таблица 4.2

Износ (весовой) и интенсивность изнашивания  $I_m$  как отношение весового износа к пути трения образцов.

	Вес	Износ весовой	Время испытания	Интенсивность изнашивания
Без воздействия магнитного поля	128,75 г. 127,95 г.	0,8 г.	60 мин.	$I_m = 2,65 \cdot 10^{-4}$ г/м
При воздействии магнитного поля	128,51 г. 128,06 г.	0,45 г.	60 мин	$I_m = 1,77 \cdot 10^{-4}$ г/м

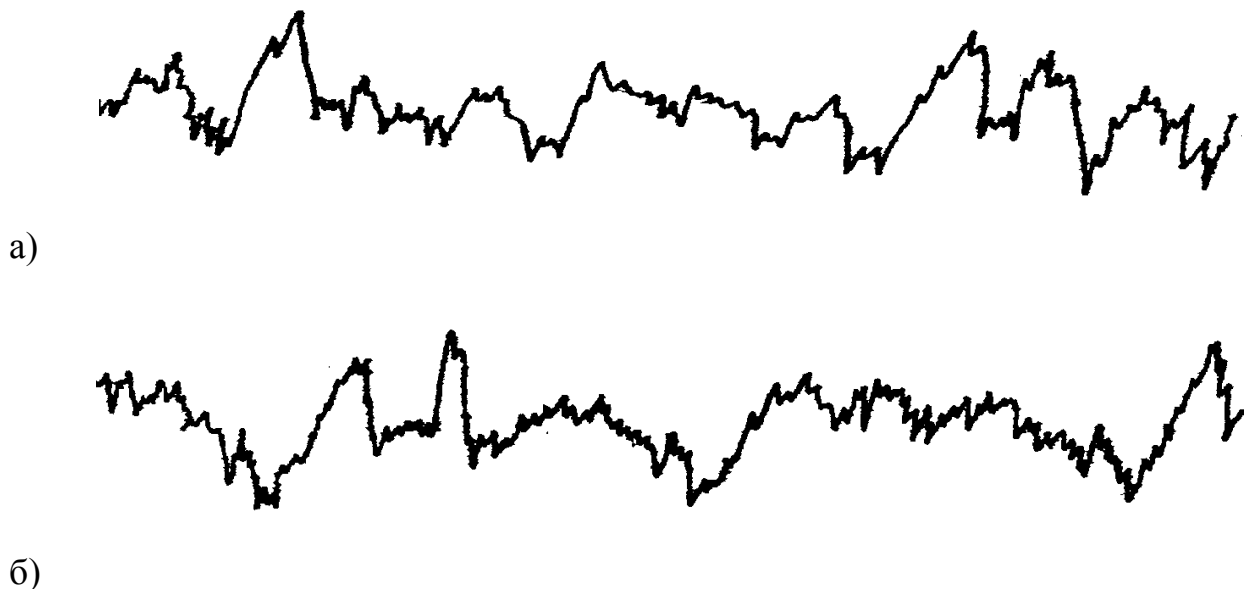


Рис 4.12. Копии профилограмм: а – исходная шероховатость стальной поверхности  $Ra = 1,07$  мкм; б – после прохождения электрического тока в магнитной катушке,  $I = 4$  А,  $Ra = 0,76$  мкм (ВУ 5000; ГУ 200)

При воздействии магнитного поля радиусы закругления вершин выступов увеличиваются, что приводит к уменьшению износа. Параметр  $Ra$  не в полной мере отражает изменения, возникшие в зоне трения при прохождении электрического тока в магнитной катушке и наличии магнитного поля. Тем не менее, картина положительных изменений в зоне трения при более детальном рассмотрении профилограмм дает основание считать достоверным влияние электрического тока и магнитного поля на триботехнические характеристики пары трения. Профилограммы показывают, воздействию электрического тока и магнитного поля не нанесло повреждения (по условиям испытаний) в зоне трения. [13].

Важную роль в процессе трения имеют частицы износа, которые возникают в результате разрушения поверхностей трения и находятся в зоне контакта сопряженных поверхностей, находящихся в относительном скольжении

Среднее количество частиц износа в единицу времени определяется зависимостью [53].

$$N = \frac{I_h v_S S}{\frac{\pi}{2}(R - \sqrt{R^2 - b^2}) \left[ b^2 + \frac{(R - \sqrt{R^2 - b^2})^2}{3} \right]}, \quad (4.11)$$

где  $I_h$  – средняя линейная интенсивность изнашивания;  $v_S$  – скорость скольжения;  $S$  – номинальная площадь контакта;  $R$  – радиус закругления выступов шероховатого слоя;  $b$  – радиус пятна контакта.

Радиус микрочастиц при упругом контакте выражается зависимостью

$$b = 0,7 \sqrt[3]{4pR R_{max}(2R - R_{max})(1/E_1 + 1/E_2)}. \quad (4.12)$$

где  $p$  – контактное давление;  $R_{max}$  – максимальная высота неровностей;  $E_{1,2}$  – модули упругости материалов сопряженных элементов пары трения.

При пластическом контакте радиус микрочастиц равен

$$b = 1,4 \sqrt{\frac{pR_{max}(2R - R_{max})}{HV}}, \quad (4.13)$$

где  $HV$  – микротвердость

Выполненные исследования [53] свидетельствуют о том, что наименьшие размеры  $d$  имеют микрочастицы, получаемые при минимальных значениях параметра  $Ra$  шероховатости поверхности.

Также отметим, что величина среднего параметра  $d$  образующихся частиц экспоненциально зависит от давления в контакте  $p$  взаимодействующих поверхностей и экспоненциально зависит от микротвердости  $HV$  материалов. Влияние магнитного поля приводит к тому, что мелкие частицы износа выносятся из зоны трения, тем самым снижая интенсивность изнашивания за счет исключения режущего и пропахивающего действия частиц износа, которые могут находиться в зоне трения.

#### 4.4. Выводы к главе 4

1. Увеличение давления и тока в магнитной катушке ведет к стабилизации и достижению максимума коэффициента трения. Можно обоснованно предположить, что указанные параметры ведут к повышенной диссипации энергии при трении.

2. Влияние магнитного поля приводит к росту коэффициента трения и, как следствие, к повышению температуры на контакте. Теоретическая оценка и экспериментальная проверка температурного режима на скользящем контакте с использованием тепловизора показали почти двойной рост температуры. При этом экспериментально подтверждена применимость модели Эшби (*Ashby*) для расчета повышения температуры трения.

3. Экспериментально подтверждено, что продукты износа в виде оксидных частицы черного цвета под действием магнитного поля выносятся из зоны трения. Это объясняется тем, что оно оказывает влияние на процессы, связанные с взаимодействием магнитного поля с заряженными частицами, интенсифицируя в данном случае процесс повышенного образования активных центров на поверхности трения, что приводит к не только увеличению числа дислокаций и их

перераспределению, но также изменению расположения и взаимодействия точечных дефектов кристаллической решетки. Интенсификация выхода дислокаций на стальную деформируемую поверхность касания, приводящая к росту количества активных центров, способствует формированию фрикционных молекулярных связей.

4. Сравнение микроструктуры поверхности после испытаний на изнашивание показывает, что после приработки при воздействии магнитного поля качество поверхности лучше по сравнению с испытаниями без магнитного поля (отсутствуют ярко выраженные следы пропахивания), что объясняется выводом из зоны трения под действием магнитного поля частиц износа.

5. Экспериментально подтверждено, что в зоне сопряжения деталей посадки с натягом без воздействия магнитного поля ярко выражена граница их раздела. При воздействии магнитного поля наблюдается локальное отсутствие выраженной границы раздела. Это объясняется тем, что на пятнах контакта магнитное поле увеличивает активные центры, их количество и насыщение со временем выхода дислокаций. Внешнее электромагнитное поле способствует росту этого числа активных центров за счет выхода дислокаций на поверхность контакта, а увеличение площади физического контакта приводит к упрочнению фрикционных отношений и росту коэффициента трения.

6. Как показали испытания на изнашивание при скользящем контакте, интенсивность изнашивания при воздействии магнитного поля меньше на 49,7%, чем при испытаниях без воздействия магнитного поля. Уменьшение интенсивности изнашивания связано с удалением частиц износа из зоны трения при воздействии внешнего магнитного поля, а также с увеличением радиусов закругления вершин выступов шероховатости при воздействии магнитного поля.

## **ГЛАВА 5. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Результаты исследования могут быть использованы как на предприятиях, изготавливающих фрикционные гасители колебаний, так и в учебных и научных организациях.

### **5.1. Использование результатов работы в научных исследованиях и в учебном процессе**

Результаты теоретических и экспериментальных исследований также могут быть использованы при оценке триботехнических показателей пар трения в условиях скользящего контакта и неподвижного (посадки с гарантированным зазором) при воздействии магнитного поля.

Разработанные зависимости позволяют более детально подойти к исследованию процессов трения и изнашивания контактирующих поверхностей при влиянии магнитного поля на процесс трения.

Разработанные установки позволят проводить испытания на трение и изнашивание на образцах, исследовать влияние магнитного поля и его напряженности на величину молекулярной составляющей коэффициента трения стальных поверхностей, а также направленности магнитного потока: параллельного к поверхности трения (горизонтальный магнитный поток) и параллельно оси исследуемого образца (вертикальный магнитный поток) на величину коэффициента трения.

С помощью разработанных методик возможно проведение исследований влияния параметров магнитного поля на процессы трения в условиях подвижного контакта и неподвижного соединения с натягом, влияния магнитного поля на температуру поверхности трения скользящего контакта, влияния магнитного поля на процессы изнашивания пар трения скольжения и соединений с натягом,

влияния магнитного поля на износостойкость сопряженных поверхностей в условиях скользящего контакта.

Результаты исследований и стендовые установки нашли широкое применение в учебном процессе ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» при подготовке магистров по направлению 15.04.03. – «Прикладная механика».

## 5.2. Расчет экономической эффективности

Расчет экономической задачи проводится по «Методике определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем (далее – Методика) [107], утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» 27 декабря 2007г.» (№ 2459р)». По методике, стоимость жизненного цикла объекта (СЖЦ) рассчитывается исходя «из

$$СЖЦ = Ц_{пр} + \sum_{t=1}^T (И_t + \Delta K_t - Л_t) \cdot \alpha_t, \quad (5.1)$$

где  $Ц_{пр}$  – цена приобретения объекта (первоначальная стоимость);

$И_t$  – годовые эксплуатационные расходы;

$\Delta K_t$  – сопутствующие единовременные затраты, связанные с внедрением объекта в эксплуатацию;

$Л_t$  – ликвидационная стоимость объекта;

$\alpha_t$  – коэффициент дисконтирования;

$t$  – порядковый номер года эксплуатации объекта (исчисляемый от даты приобретения объекта);

$T$  – срок службы объекта.

Для оценки экономической эффективности применения шпинтонов на электропоездах ЭР2 (путем модернизации буксовых узлов их вагонов) принимаются следующие исходные положения и условия:



– модернизация буксового узла должна заключаться в замене комплекта сухарей и установке электромагнитной катушки;

– средняя величина срока службы указанного комплекта сухарей, не превышает 5-ти лет, а их плановый ремонт (разборка, дефектировка, замена (или восстановление), сборка) выполняется при проведении текущих ремонтов ТР-2, ТР-3 электропоезда, а также его капитальных ремонтов КР-1, КР-2;

– ликвидационная стоимость комплекта сухарей, балансиров, втулок и пружин на порядок меньше затрат на их приобретение и ремонт, вследствие чего при расчете СЖЦ величина  $L_t$  не учитывается;

– электромагнитные катушки являются безремонтными объектами в течение всего срока их службы».

В качестве показателей, подлежащих применению в расчете величины СЖЦ рассматриваемой части буксового узла до и после его модернизации, принимаются следующие данные:

– среднегодовой пробег электропоезда ЭР2 на сети дорог 149 тыс. км;

– нормативная периодичность выполнения плановых ремонтов электропоезда: 150 тыс.км до ТР-2, 300 тыс.км до ТР-3, 600 тыс.км до КР-1 и 1800 тыс.км до КР-2 (в соответствии с распоряжением ОАО «РЖД» от 06.04.2006г. № 622р);

– среднестатистические величины себестоимости выполнения плановых ремонтов рассматриваемой части буксового узла (до его модернизации) при ТР-2 – 1 700 руб, при ТР-3 – 3 425 руб и при КР-1 – 12 123 руб;

– среднесетевое количество неисправностей рассматриваемой части буксового узла 0,001 отказов/год;

– средняя величина затрат на выполнение одного непланового ремонта вследствие неисправности рассматриваемой части буксового узла 1600 руб.;

– стоимость электромагнитной катушки существующей конструкции 21 тыс. руб;

– стоимость работ по модернизации буксового узла для применения гидрофедера 18 тыс. руб;

– цена сухарей (при заказе его промышленной серии численностью около 10 тыс. единиц) 20 тыс. руб.

Экономическая эффективность модернизации буксового узла оценивается сопоставлением величин стоимости жизненного цикла узлов старой и новой (модернизированной) конструкции.

Для узла старой конструкции  $\Delta K_t = 0$  и  $L_t \cong 0$  и, следовательно,

$$СЖЦ = Ц_{\text{пр}} + \sum_{t=1}^T I_t \cdot \alpha_t \cdot \quad (5.2)$$

Величину  $I_t$  для такого узла составляют только текущие затраты на производство плановых и неплановых ремонтов. Для расчета  $I_t$  необходимо определить затраты по каждому  $t$ -году жизненного цикла узла и при этом определить год, принимаемый за начало отсчета жизненного цикла.

Различные элементы буксового узла имеют различные сроки службы, зависящие от их конструкции. Валики и втулки, а также балансиры в процессе эксплуатации изнашиваются и заменяются по мере достижения браковочных размеров (при этом возможно и восстановление ряда этих элементов с применением соответствующих технологий), пружины заменяются вследствие постепенной потери упругости или возникновения усталостных трещин. На практике длительность эксплуатации указанных элементов до их замены не отслеживается, и поэтому не может быть определена по статистическим данным. Согласно экспертным оценкам, срок службы – средний для совокупности указанного комплекта элементов буксового узла – ориентировочно может быть принят равным 14...16-ти годам.

Вследствие сокращения темпов поставок новых электропоездов (Демиховским и Торжокским заводами в период экономического кризиса, следует ожидать соответствующего замедления темпов списания старых электропоездов ЭР2, в результате чего они могут остаться в эксплуатации еще на 12...18 лет (в среднем на 15 лет) с соответствующим продлением срока их службы.

Таким образом, при сопоставлении величин СЖЦ буксового узла старой и модернизированной конструкций в качестве года, с которого начинается отсчет  $t$ , целесообразно принять один и тот же год, т.е. сроки службы старого и модернизированного узлов при расчетах СЖЦ условно принимаются одинаковыми и равными 15-ти годам.

С учетом изложенного, величина суммы текущих затрат  $\sum_{t=1}^T I_t \cdot \alpha_t$  для узла старой конструкции может быть представлена как  $\sum_{t=1}^{15} I_t \cdot \alpha_t$ .

Коэффициент дисконтирования  $\alpha_t$  для постоянной нормы дисконта определяется

$$\alpha_t = (1 + E)^{-t}, \quad (5.3)$$

где  $E$  – норма (ставка) дисконтирования.

Согласно типовым требованиям к составлению технико-экономических обоснований инвестиционных проектов (утвержденных Департаментом технической политики ОАО «РЖД» 08.12.2006г.), величина  $E$  принимается равной 0,1. В то же время, учитывая значительность инфляционных процессов в экономике РФ за последние 20 лет, при оценке коэффициента дисконтирования необходимо учесть возможные темпы инфляции на ближайшие пятнадцать лет, поскольку от них зависит сумма текущих затрат  $I_t$  – расходов на оплату труда и приобретение запасных частей для ремонта буксового узла.

В соответствии с Методикой определения СЖЦ [107] номинальная норма дисконта, учитывающая инфляцию  $E_{ni}$ , определяется

$$E_{ni} = E + i + E \cdot i, \quad (5.4)$$

где  $i$  – годовая инфляция (представляемая в долях единицы).

Коэффициент дисконтирования с учетом инфляции  $\alpha_{ni}$  может также оцениваться

$$\alpha_{ni} = \left( \frac{1 + 0,01i}{1 + E} \right)^t, \quad (5.5)$$

где  $i$  – в процентах.

Как можно видеть, факторы инфляции и дисконта воздействуют на величину  $\alpha_{ti}$  разнонаправленно, при увеличении  $i$  затраты на ремонт буксового узла возрастают, а при увеличении  $E$  – снижаются.

Согласно прогнозам государственных органов РФ, инфляция в России в период экономического кризиса может достигнуть 14%. В год, предшествующий началу кризиса, величина  $i$  составила только 8%. При отсутствии данных о прогнозируемой средней величине  $i$  на последующие 15 лет для определения приведенных затрат на ремонт рассматриваемого узла принято, что средние темпы инфляции в этот период будут составлять около 10%. Согласно приведенной выше формуле, в данном случае  $\alpha_{ti} = 1$ , т.е. сокращение затрат на ремонт вследствие действия нормы дисконта «уравновешивается» влиянием годовых темпов инфляции.

Что касается единовременных затрат на приобретение рассматриваемого комплекта изношенных элементов старого буксового узла, а также на выполнение модернизации узла с приобретением сухарей то, согласно приведенным выше условиям расчета СЖЦ, эти затраты осуществляются в начальный момент рассматриваемого среднего срока службы комплекта старой конструкции и срока службы нового (модернизированного) узла и поэтому не подлежат дисконтированию.

Как указано выше, величина  $\sum_{t=1}^{15} I_t$  для буксового узла старой конструкции представляет сумму затрат на его ремонт за срок службы. Поэтому для выполнения расчета по определению СЖЦ следует вычислить значения  $I_t$  для каждого из  $t$ -годов. Для выполнения этих вычислений необходимо, в свою очередь, определить размещение текущих ремонтов ТР-2, ТР-3 и капитальных ремонтов по  $t$ -годам пятнадцатилетнего периода.

Способ определения размещения ремонтов заключается в следующем. Обозначим пробег электропоезда (с узлом старой или модернизированной конструкции) от начального момента расчета СЖЦ до  $t$ -года, как  $L_{эт}$ , нормативный межремонтный пробег до ТР-2, как  $L_{ТР2}$ , до ТР-3 –  $L_{ТР3}$  и до КР-1 –

$L_{кр1}$ . Используя нормативные значения  $L_{тр2}$ ,  $L_{тр3}$  и  $L_{кр1}$ , представленные выше, определим числовой ряд величин пробегов  $L$  электропоезда (от начала расчетного периода), при достижении которых он должен подвергаться плановым ремонтам: для I ТР-2  $L = L_{тр2} = 150$  тыс. км; для I ТР-3  $L = L_{тр3} = 300$  тыс. км; для II ТР-2  $L = L_{тр3} + L_{тр2} = 450$  тыс. км; для I КР-1  $L = L_{кр1} = 600$  тыс. км; для III ТР-2  $L = L_{кр1} + L_{тр2} = 750$  тыс. км; для II ТР-3  $L = L_{кр1} + L_{тр3} = 900$  тыс. км; для IV ТР-2  $L = L_{кр1} + L_{тр3} + L_{тр2} = 1050$  тыс. км; для II КР-1  $L = 2L_{кр1} = 1200$  тыс. км и т.д. (I, II, III, IV – порядковые номера ремонтов данного вида в периоде жизненного цикла).

Используя величину среднегодового пробега электропоезда  $L_{г}$ , принятую равной 149 тыс.км, определим ряд возрастающих величин  $L_{эт}$  для  $t = 1 \dots 15$ . Поскольку  $L_{эт} = t \cdot L_{г}$ , то  $L_{э1} = 149$  тыс. км,  $L_{э2} = 298$  тыс. км,  $L_{э3} = 447$  тыс. км,  $L_{э4} = 596$  тыс. км, и т.д. Сопоставлением элементов двух числовых рядов – пробегов  $NL_j$  ( $N$  – порядковый номер ремонта,  $j$  – вид ремонта) и  $L_{эт}$  – определяется размещение  $NL_j$  по  $L_{эт}$ :

– пробег до I ТР-2 (150 тыс. км) больше, чем  $L_{э1}$  (149 тыс.км), и меньше, чем  $L_{э2}$  (298 тыс.км), и, следовательно, год производства первого ТР-2 соответствует  $t = 2$ ;

– пробег до I ТР-3 (300 тыс.км) больше, чем  $L_{э2}$  (298 тыс.км), и меньше, чем  $L_{э3}$  (447 тыс. км), и, следовательно, год выполнения первого ТР-3 соответствует  $t = 3$  и т.д.

В качестве критерия определения  $t$ , соответствующего пробегу  $NL_j$ , используется следующее условие: при  $L_{t-1} < NL_j < L_t$  пробег  $NL_j$  достигается в  $t$ -году.

В табл. 5.1 представлены результаты определения  $t$ -годов, в течение которых выполняются плановые ремонты различных  $j$ -видов и  $N$ -порядковых номеров. При этом по достижении электропоездом нормативного пробега до КР-2, т.е. 1800 тыс. км, ремонт КР-2, согласно данным этой таблицы, не выполняется (вместо него производится КР-1, поскольку выполнение КР-2 за несколько лет до окончания срока службы электропоезда нецелесообразно). В этой же таблице приведены затраты, соответствующие каждому из плановых ремонтов, т.е.

каждому из 15-ти годов срока службы, соответствующие исходным данным для расчета СЖЦ (см. п. III).

Таблица 5.1

## Количество ремонтов и затраты на их проведение

Порядковый № года (t) срока службы	Количество ремонтов			Затраты на выполнение ремонтов, руб.			Годовые затраты на ремонт, руб/год
	ТР-2	ТР-3	КР-1	ТР-2	ТР-3	КР-1	
1							–
2	1			1 700			1 700
3		1			3 425		3 425
4	1			1 700			1 700
5							–
6			1			12 123	12 123
7	1			1 700			1 700
8		1			3 425		3 425
9							–
10	1			1 700			1 700
11			1			12 123	12 123
12	1			1 700			1 700
13							–
14		1			3 425		3 425
15	1			1 700			1 700
Всего	6	3	2	10 200	10 275	24 246	44 721

Количество отказов узла, приводящих к необходимости выполнения неплановых ремонтов узла в t-году, является вероятностной величиной. Поэтому

для оценки затрат на неплановые ремонты применяется принцип аннуитета, т.е. определения суммы таких затрат за весь срок службы узла (15 лет) и последующего ее равномерного распределения по  $t$ -годам указанного периода.

Затраты на один такой ремонт  $C_{нр}$  составляют в среднем 1600 руб, среднегодовое их количество  $n_{нр}$ , приходящееся на один узел, – 0,001 отказов. Следовательно, средняя величина годовых затрат на неплановые ремонты рассматриваемого узла ( $C_{нрт}$ ) составит

$$C_{нрт} = 1600 \cdot 0,001 = 1,6 \text{ руб/год.} \quad (5.6)$$

Данная величина на 3...4 порядка меньше годовых затрат на плановые ремонты узла, и поэтому не включается в дальнейший расчет СЖЦ.

Согласно данным табл. 5.1, за 15 лет сумма затрат на ремонты рассматриваемой части буксового узла существующей конструкции составляет 44721 руб. Поскольку начальная стоимость этой части узла составляет 21000 руб. (исходные данные), то полная стоимость его жизненного цикла (СЖЦ<sub>с</sub>) определяется

$$СЖЦ_с = 21\ 000 + 44\ 721 = 65\ 721 \text{ руб.} \quad (5.7)$$

В данном случае используется  $\alpha_t = 1$ , а все текущие затраты  $I_t$  состоят из расходов на ремонт, указанных в табл. 5.1.

Модернизация буксового узла устраняет потребность в ремонтах рассматриваемой части этого узла, вследствие чего стоимость ее жизненного цикла после модернизации (СЖЦ<sub>м</sub>) определяется только как сумма единовременных инвестиций на приобретение гидрофедеров и на выполнение работ по модернизации узла. Эти затраты составят соответственно 20 и 18 тыс.руб, т.е. СЖЦ<sub>м</sub> = 38000 руб. Из этого следует, что разность между СЖЦ<sub>с</sub> и СЖЦ<sub>м</sub>, т.е. между стоимостями жизненного цикла буксовых узлов старой и новой (модернизированной) конструкции, составит:

$$\Delta СЖЦ = 65\ 121 - 38\ 000 = 27\ 721 \text{ руб.} \quad (5.8)$$

Применительно к секции электропоезда  $\Delta СЖЦ = 27\ 721 \cdot n_6$ , где  $n_6$  – число буксовых модернизированных узлов в секции электропоезда (8 шт.), или  $\Delta СЖЦ =$

= 221768 руб. Применительно к пятисекционному электропоезду  $\Delta CЖЦ = 1108,84$  тыс. руб. Величина указанной экономии средств достигается за 15 лет, и, следовательно, годовая экономия от рассматриваемой модернизации буксового узла составит для одной секции  $221768 / 15 = 14786$  руб, для одного пятисекционного электропоезда – 73989 руб. Количество секций электропоездов ЭР2 в настоящее время составляет 1221 единиц. При полной их модернизации экономия за счет снижения стоимости жизненного цикла буксовых узлов составит  $221,768 \cdot 1221 = 270779$  тыс. руб (270,779 млн. руб) за период  $T_{сл} + \Delta T$ , где  $T_{сл}$  – срок службы модернизированного буксового узла,  $\Delta T$  – период осуществления модернизации парка электропоездов ЭР2.

В целях анализа «чувствительности» величины  $\Delta CЖЦ$  к изменениям ее составляющих рассмотрим «пессимистический» вариант исходных данных: ценой гидрофедера, увеличенной в 1,5 раза (с 20 до 30 тыс. руб.), и с затратами на модернизацию буксового узла, увеличенными на 30% (с 18 до 23,4 тыс. руб.). При этом  $CЖЦ_m$  возрастет до  $30 + 23,4 = 53,4$  тыс. руб и  $\Delta CЖЦ$  буксового узла сократится с 27,7 тыс. руб. до  $65,7 - 53,4 = 12,3$  тыс. руб, т.е. на 44,4%. В этом случае годовая экономия от модернизации одного пятисекционного электропоезда снизится с 73989 руб/год до 41138 руб./год, а суммарная экономия средств от модернизации всего парка электропоездов ЭР2 за период  $T_{сл} + \Delta T$  составит 150,5 млн. руб.

### 5.3. Выводы к главе 5

1. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы на предприятиях, изготавливающих фрикционные гасители колебаний, и в учебных и научных организациях для исследования влияния магнитных полей на процессы протекающие при трении и изнашивании.

2. Согласно данным, приведенным в расчетах при модернизации буксового



узла для реализации воздействия магнитного поля уменьшит стоимость жизненного цикла этого узла на 18,5...41,5% за счет уменьшения стоимости затрат на плановые ремонты. Уменьшение среднегодовых трат применительно к рассматриваемому десяти вагонному электропоезду ЭР2 на период продленного срока его службы составит 40...73 тыс. руб./год.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей диссертационной работе изложены новые научно обоснованные технические решения.

В первая часть работы входят введение, первая и вторая главы. Во введении описывается актуальность темы, цель и задачи исследования, указаны научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту. В первой главе анализируются состояние вопроса и степень разработанности проблемы. Проанализированы существующие подходы к обеспечению качества и эксплуатационных свойств фрикционных гасителей колебаний. Во второй главе описаны методики проведения исследований экспериментальных и теоретических, экспериментальные установки и материалы, используемые в исследованиях.

Вторая часть работы состоит из третьей и четвертой глав. В третьей главе приведены исследование процессов трения металлических тел при решении контактных задач, модель намагничивания в условиях контактного взаимодействия, расчетные характеристики магнитного поля в условиях скользящего контакта и неподвижного соединения, влияние магнитного поля на молекулярную составляющую трения, триботехнические показатели пар трения скольжения и неподвижных соединений применительно к фрикционным гасителям колебаний. В четвертой главе приведены результаты оценки температурного режима в условиях трения скольжения, воздействие магнитного поля на изнашивание в условиях подвижного и неподвижного контактов применительно к фрикционным гасителям колебаний.

Третья часть работы включает пятую главу, в которой приведены расчет экономической эффективности от применения результатов исследований, а также использование результатов работы в научных исследованиях и в учебном процессе.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе приведены новые научно обоснованные технические решения, заключающиеся в разработанном подходе к оценке влияния магнитного поля на триботехнические показатели пар трения, установлении на основе модели намагничивания различия влияния горизонтального и вертикального магнитных полей на величину силы и коэффициента трения неподвижного контакта, имеющие существенное значение для развития страны, заключающееся в повышении триботехнических показателей фрикционных гасителей колебаний подвижного состава транспортных средств.

1. Разработаны методики и оригинальные установки для экспериментальных исследований оценки влияния магнитного поля на величину коэффициента трения. Проведен расчет намагниченности элементов пар трения для спроектированных установок. Было выявлено, что намагничивание зоны трения опытных образцов находится в стабилизированном магнитном потоке.

2. Экспериментально установлено, что молекулярная составляющая коэффициента трения при воздействии магнитного поля (в рассматриваемом диапазоне его значений) не зависит от давления. Выявлено, что магнитное поле при его возбуждении током катушки в диапазоне от 1,5 до 6,0 А изменяется, с максимумом при величине тока от 3 до 4 А и влияет на процессы трения. Показанная зависимость момента трения от силы тока имеет экстремум, который наблюдается при разных нагрузках (13, 23 и 33 Н).

3. Предложен механизм такого поведения трибосистемы при воздействии магнитного поля, который определяется протеканием противоположных, применительно к трению трение, процессов: ростом выхода дислокаций на поверхность трения и активизацией окислительных процессов.

4. Выявлена особенность влияния магнитного поля на трение скольжения при варьировании нагрузкой на образцы и силой тока в катушках с разными схемами их подключения. Получены осциллограммы сравнения коэффициентов

трения пары «сталь – сталь» в диапазоне давлений от 0,16 до 0,25 МПа и силы тока от 0 до 8 А.

Анализ результатов показал, что при одних и тех же значениях силы тока: при воздействии магнитного поля одной катушки коэффициент трения по сравнению с испытаниями без воздействия магнитного поля увеличивается на 68 %; при добавлении в схему центрального стержня с малым зазором от поверхности трения коэффициент трения увеличивается на 36 %; при последовательном и параллельном подключении катушек в среднем коэффициент трения увеличивается на 44 %.

В среднем по всем испытаниям наблюдается рост коэффициента трения с ростом силы тока в катушках до 88 %.

5. Установлено, что увеличение давления на образец и силы тока в магнитной катушке при скользящем контакте приводит к стабилизации и достижению максимума коэффициента трения в диапазоне режимов проведенных испытаний. Можно обоснованно предположить, что указанные параметры ведут к повышенной диссипации энергии при трении.

6. Установлено влияние магнитного поля на величину силы срыва прессовой посадки с гарантированным натягом.

Показано, что при влиянии магнитного поля *с параллельным осью образца (вертикальным) направлением силовых линий магнитного поля* при одной катушке происходит увеличение силы срыва по сравнению с испытаниями без воздействия магнитного поля на 13,7%, а коэффициента трения на 13,3%. При воздействии магнитного поля *с перпендикулярным осью образца (горизонтальным) направлением силовых линий магнитного поля* при параллельном подключении двух катушек происходит увеличение силы срыва по сравнению с испытаниями без воздействия магнитного поля на 21,6%, а коэффициента трения на 21%. При воздействии магнитного *с перпендикулярным осью образца (горизонтальным) направлением силовых линий магнитного поля* при последовательном подключении двух катушек происходит увеличение силы срыва по сравнению с

испытаниями без воздействия магнитного поля на 27,5%, а коэффициента трения на 28,9%.

Для проведенной вариативности установки катушек и соответствия направлений воздействия магнитного поля по оси образца присутствует устойчивая тенденция увеличения силы срыва посадки с натягом и соответствующего коэффициента трения.

7. Увеличение давления и тока в магнитной катушке ведет к стабилизации и достижению максимума коэффициента трения. Можно обоснованно предположить, что указанные параметры ведут к повышенной диссипации энергии при трении.

8. Влияние магнитного поля приводит к росту коэффициента трения и, как следствие, к повышению температуры на контакте. Теоретическая оценка и экспериментальная проверка температурного режима на скользящем контакте с использованием тепловизора показали почти двойной рост температуры. При этом экспериментально подтверждена применимость модели Эшби (*Ashby*) для расчета повышения температуры трения.

9. Экспериментально подтверждено, что продукты износа в виде оксидных частицы черного цвета под действием магнитного поля выносятся из зоны трения. Это объясняется тем, что оно оказывает влияние на процессы, связанные с взаимодействием магнитного поля с заряженными частицами, интенсифицируя в данном случае процесс повышенного образования активных центров на поверхности трения, что приводит не только к насыщению числа дислокаций, но и их перераспределению, а также изменению взаимодействия и расположения точечных дефектов кристаллической решетки. Интенсификация выхода дислокаций на стальную деформируемую поверхность касания, приводящая к росту количества активных центров, способствует формированию фрикционных молекулярных связей.

10. Сравнение микроструктуры поверхности после испытаний на изнашивание показывает, что после приработки при воздействии магнитного поля качество поверхности лучше по сравнению с испытаниями без магнитного поля

(отсутствуют ярко выраженные следы пропахивания), что объясняется выводом из зоны трения под действием магнитного поля частиц износа.

11. Экспериментально подтверждено, что в зоне сопряжения деталей посадки с натягом без воздействия магнитного поля ярко выражена граница их раздела. При воздействии магнитного поля наблюдается локальное отсутствие выраженной границы раздела. Это объясняется тем, что на пятнах контакта магнитное поле увеличивает активные центры, их количество и насыщение со временем выхода дислокаций. Внешнее электромагнитное поле способствует росту этого числа активных центров за счет выхода дислокаций на поверхность контакта, а увеличение площади физического контакта приводит к упрочнению фрикционных отношений и росту коэффициента трения.

12. Как показали испытания на изнашивание при скользящем контакте, интенсивность изнашивания при воздействии магнитного поля меньше на 49,7%, чем при испытаниях без воздействия магнитного поля. Уменьшение интенсивности изнашивания связано с удалением частиц износа из зоны трения под воздействием магнитного поля, а также с увеличением радиусов закругления вершин выступов шероховатости при воздействии магнитного поля.

13. Расчет экономической эффективности показал, что согласно данным, приведенным в расчетах, модернизация конструкции буксового узла с реализацией воздействия магнитным полем уменьшит стоимость жизненного цикла рассматриваемой части этого узла на 19...42% за счет сокращения затрат на плановые ремонты. При этом уменьшение среднегодовых затрат применительно к десяти вагонному электропоезду ЭР2 на период продленного срока его службы составит 41...74 тыс. руб./год.

14. Результаты диссертации могут быть использованы как на предприятиях, изготавливающих фрикционные гасители колебаний, так и в учебных и научных организациях.

15. По теме диссертационного исследования получено 4 патента на полезную модель.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Антонов, В.Г. Методы и средства точных магнитных измерений / В.Г. Антонов, Т.Н. Маляревская, Н.В. Студенцов. - Л.: Изд-во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1980. - С. 65.
2. Акристиний, М.В. Многоканальные системы сбора данных. Крейтовая система LTR. Руководство программиста / М.В. Акристиний; ЗАО «Л-Кард». - 2002. - URL: [http://www.lcard.ru/download/ltr\\_sw.zip](http://www.lcard.ru/download/ltr_sw.zip) (дата обращения: 15.01.2011).
3. Альшиц, В.И. Магнитопластический эффект в монокристаллах алюминия / В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик // Физика твердого тела. - 1992. - Т. 34. - № 5. - С. 155-158.
4. Баранов, Ю.В. Механизмы влияния электростатического поля на пластическое деформирование металлических материалов / Ю.В. Баранов, И.Л. Батаров, А.М. Рощупкин // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 1993. - № 6. - С. 60-70.
5. Беклемишев, Н.Н. Влияние импульсного электромагнитного поля на характеристики конструкционной прочности металлических материалов / Н.Н. Беклемишев, А.Н. Васютин, Ю.Л. Доронин // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 1990. - № 2. - С.73-77.
6. Буль, О.Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEEM: учеб. пособие / О.Б. Буль. - М.: Академия, 2005. - 336 с.
7. Буль, О.Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов: Программа ANSYS: учеб. пособие / О.Б. Буль. - М.: Академия, 2006. - 288 с.
8. Войнов, К.Н. Надежность вагонов / К.Н. Войнов. - М.: Транспорт, 1989.
9. Васильев, С.В. ЭДС при контактном взаимодействии тел в условиях резания / С.В. Васильев // Трение и износ. - 1983. - Т. 4. - № 4. - С. 715-719.

10. Володин, В.Л. Исследование сопротивления усталостному разрушению металлов после импульсных воздействий / В.Л. Володин, В.В. Гайдук // Изв. вузов. Черная металлургия. - 2002. - № 2. - С. 18-22.

11. Володин, В.Л. Исследование влияния импульсных воздействий на сопротивление сталей износу и малоцикловой усталости / В.Л. Володин, В.В. Гайдук // Изв. вузов. Черная металлургия. - 2002. - № 8. - С. 23-27.

12. Воробьев, В.И. Моделирование усилителя сцепления колеса с рельсом / В.И. Воробьев, В.О. Корчагин, С.Г. Волохов // Совершенствование транспортных машин: сб. науч. тр. / под ред. В.В. Рогалева. - Брянск: БГТУ, 2017. - С. 147-154.

13. Воробьев, Д.В. Улучшение фрикционных характеристик пары трения колесо - рельс за счет воздействия на контакт электрического тока и магнитного поля: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.В. Воробьев. - Брянск, 2005. - 19 с.

14. Воробьев, В.И. Влияние электрического тока и магнитного поля на коэффициент сцепления колеса с рельсом / В.И. Воробьев, В.П. Тихомиров, М.А. Измеров, С.Г. Волохов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2013. - № 6 (302). - С. 137-142.

15. Воробьев, Д.В. Улучшение функциональных характеристик пары трения колесо - рельс за счет воздействия на контакт электрического тока и магнитного поля: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.В. Воробьев. - Брянск, 2005. - 21 с.

16. Воробьев, В.И. Планирование инженерного анализа при создании устройств, использующих магнитное поле для снижения потерь энергии в системе «колесо - рельс» / В.И. Воробьев, О.В. Измеров, С.Г. Волохов // Энерго- и ресурсосбережение - XXI век: XI междунар. науч.-практ. интернет-конф. - Орел: Госуниверситет-УНПК, 2013. - С. 243-246.

17. Воробьев, В.И. Инденторное устройство для определения молекулярной составляющей коэффициента трения / В.И. Воробьев, В.П. Тихомиров, В.О. Корчагин, С.Г. Волохов // Совершенствование транспортных машин: сб. науч. тр. / под ред. В.В. Рогалева. - Брянск: БГТУ, 2017. - С. 125-129.



18. Волохов, С.Г. Использование физических эффектов при создании узлов транспортных машин / С.Г. Волохов // Новые горизонты: материалы V междунар. науч.-практ. конф. - 2018. - С. 29-31.
19. Волохов, С.Г. Установка для исследования пар трения при воздействии магнитного поля / С.Г. Волохов // Повышение эффективности транспортных машин. - Брянск, 2017. - С. 108-118.
20. Галей, М.Т. Некоторые особенности эксплуатации намагниченного режущего инструмента. Магнитная обработка режущего инструмента и перспективы дальнейшего развития этого метода / М.Т. Галей // ВДНХ СССР. - М., 1978. - С. 18-20.
21. Галей, М.Т. Повышение стойкости режущих инструментов путем магнитной обработки / М.Т. Галей // Станки и инструмент. – 1973. – №5. – С. 31.
22. Галей, М.Т. Экспериментально-теоретические работы по изучению некоторых явлений при резании и трении / М.Т. Галей // Электрические явления при трении и резании металлов. - М., 1985. - 424 с.
23. Гаркунов, Д.Н. Триботехника: монография / Д.Н. Гаркунов. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с.
24. Гаркунов, Д.Н. О природе повышения износостойкости деталей и инструмента магнитной обработкой / Д.Н. Гаркунов, Г.И. Суранов, Г.Б. Коптяева // Трение и износ. - 1982. - Т. 3. - № 2. - С. 327-330.
25. Геча, В.Я. Использование конечноэлементных моделей для проектирования фрагментов сложных электромеханических систем / В.Я. Геча // Труды ВНИИЭМ. - М., 1985.
26. Головин, Ю.И. Влияние постоянного магнитного поля на скорость пластического течения монокристаллов NaCl:Ca / Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов // Физика твердого тела. - 1995. - Т. 37. - Вып. 7. - С. 2118-2121.
27. Головин, Ю.И. Магнитопластичность твердых тел / Ю.И. Головин // Физика твердого тела. - 2004. - Т. 46. - Вып. 5. - С. 769-803.

28. Головин, Ю.И. Магнитоэластические эффекты в кристаллах / Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов // Известия РАН. Серия физическая. - 1997. - Т. 61. - № 5. - С. 850-859.
29. Голубенко, А.Л. Результаты экспериментальных исследований опытных образцов подрезиненного колеса / А.Л. Голубенко, В.П. Ткаченко, В.П. Турчин. - Ворошиловград: Ворошиловгр. машиностр. ин-т, 1988. - 201 с.
30. Горячева, И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. - М.: Наука, 2001.
31. Губачева, Л.А. Исследование изнашивания деталей фрикционного гасителя колебаний тележек пассажирских вагонов / Л.А. Губачева // Новини науки Придніпров'я: наук.-практ. журн. - РВА «Дніпро», 2005. - Вып. 5. - С. 31-35.
32. Gubacheva, L.A. Assurance of operate reliability of rolling stock / L.A. Gubacheva, N.M. Naish // Journal of Guangdong non-ferrous metals. - 2005. - Vol. 15. - № 2, 3. - P. 200-212.
33. Дацко, О.И. Влияние импульсов магнитного поля на неупругие свойства азотсодержащей стали / О.И. Дацко, В.И. Алексеенко, А.Л. Брусова // Журнал технической физики. - 1999. - Т. 69. - С. 122.
34. Дацко, О.И. Внутреннее трение в магнитообработанном материале с дислокациями / О.И. Дацко, В.И. Алексеенко // Физика твердого тела. - 1997. - Т. 39. - № 7. - С. 1234-1236.
35. Дерягин, Б.В. Поверхностные силы / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, В.М. Муллер. - М.: Наука, 1987. - 389 с.
36. Демкин, Н.Б. Расчет характеристик контакта при малых нагрузках // Фрикционный контакт при малых нагрузках / Н.Б. Демкин. - Калинин: Калинин. политехн. ин-т, 1989. - С. 4-7.
37. Демкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. - М.: Машиностроение, 1981. - С. 244.

38. Диков, А.Г. Исследование влияния магнитного поля на трение и износ / А.Г. Диков, Е.А. Борисова, В.В. Зелинский // Успехи современного естествознания. - 2012. - № 6. - С. 73-74.
39. Евдокимов, В.Д. Технология упрочнения машиностроительных материалов: учеб. пособие-справ. / В.Д. Евдокимов, Л.П. Клименко, А.Н. Евдокимова; под ред. В.Д. Евдокимова. - Одесса - Николаев: Изд-во НГГУ им. Петра Могилы, 2005. - 352 с.
40. Зелинский, В.В. Влияние магнитного поля на износостойкость стали ХВГ / В.В. Зелинский, А.Г. Лагуткин // Трение и износ. - 1988. - Т. 9. - С. 965-974.
41. Зелинский, В.В. Установление преобладающих видов и причин изнашивания режущих инструментов / В.В. Зелинский, Е.А. Борисова // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. - 2012. - № 2 (12). - С. 55-60.
42. Измеров, М.А. Закон распределения пятен в задачах механики дискретного контакта / М.А. Измеров, В.П. Тихомиров, В.И. Воробьёв, С.Г. Волохов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2014. - № 6 (308). - С. 21-27.
43. Измеров, О.В. Выявление информации для планирования инженерного анализа использования магнитного поля при трении металлических тел / О.В. Измеров, В.С. Авдащенко, С.Г. Волохов // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. / под ред. В.В. Рогалева. - Брянск: БГТУ, 2013. - С. 180-189.
44. Исаев, И.П. Проблемы сцепления колёс локомотивов с рельсами / И.П. Исаев, Ю.М. Лужнов. - М.: Машиностроение, 1985. - С. 238.
45. Кантович, Л.И. Повышение ресурса инструмента и деталей горных машин методом магнитной обработки / Л.И. Кантович, Б.В. Малыгин, К.М. Первов // Горное оборудование и электромеханика. - 2007. - № 1. - С. 13-16.
46. Козловский, В.Н. Анализ литературных источников по влиянию магнитного поля на фрикционные свойства пар трения / В.Н. Козловский, В.С. Авдащенко, С.Г. Волохов // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. / под ред. В.В. Рогалева. - Брянск: БГТУ, 2013. - С. 215-224.

47. Кондратов, В.М. Внутреннее трение Fe-Ni и Fe-Cr-Ni мартенситностареющих сталей / В.М. Кондратов // Термическая обработка и физика металлов: тр. вузов РФ. - Свердловск: Урал. политехн. ин-т, 1993. - Вып. 1. - С. 50-57.
48. Контрольно-измерительное оборудование ZETLAB: Тензометрия. - URL: <https://zetlab.com/> (дата обращения: 20.03.2017).
49. Крагельский, И.В. Узлы трения машин: справочник / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. - М.: Машиностроение, 1984. - 282 с.
50. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добрынин, В.С. Комбалов. - М., 1977. - 526 с.
51. Крайнев, А.Ф. Словарь-справочник по механизмам / А.Ф. Крайнев. - М.: Машиностроение, 1981. - 438 с.
52. Кузнецов, П.С. Разработка и исследование устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием и минимальным дестабилизирующим воздействием на вакуумную среду оборудования высоких технологий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / П.С. Кузнецов. - М., 2012. - 26 с.
53. Ландау, Л.Д. Теория поля / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. - Изд. 8-е, стер. - М.: Физматлит, 2001. - 534 с. - ISBN 5-9221-0056-4.
54. Лебедев, В.П. Электронное торможение дислокаций в магнитном поле / В.П. Лебедев, В.С. Крыловский // Физика твердого тела. - 1985. - Т. 27. - С. 1285-1290.
55. Левитский, Н.И. Теория механизмов и машин: учеб. пособие для вузов / Н.И. Левитский. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Наука, 1990. - 592 с.
56. Лысиков, Е.Н. Тепловые и электрические контактные явления в трибосистеме «колесо - рельс» / Е.Н. Лысиков, С.В. Воронин // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. - 2012. - Вип. 129 - С. 155-162.
57. Лукин, В.В. Конструирование и расчет вагонов / В.В. Лукин, Л.А. Шадур, В.Н. Котуранов, А.А. Хохлов, П.С. Анисимов. - М.: УМК МПС России, 2000.

58. Лужнов, Ю.М. Влияние магнитного поля на механизм взаимодействия колес и рельсов / Ю.М. Лужнов, А.П. Прунцев // Труды МИИТ. - 1975. - Вып. 480.
59. Лужнов, Ю.М. Сцепление колес с рельсами: природа и закономерности / Ю.М. Лужнов. - М.: Интекст, 2003. - 144 с.
60. Лужнов, Ю.М. Физические основы и закономерности сцепления колёс локомотивов с рельсами: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю.М. Лужнов. - М., 1978. - 35 с.
61. Макара, В.А. О влиянии постоянного магнитного поля на электропластический эффект в кристаллах кремния / В.А. Макара // ФТТ. - 2001. - № 3. - С. 462-465.
62. Малыгин, Б.В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин / Б.В. Малыгин. - М.: Машиностроение, 1989. - 112 с.
63. Моргунов, Р.Б. Спиновая микромеханика в физике пластичности / Р.Б. Моргунов // УФН. - 2004. - Т. 74. - С. 131-151.
64. Моргунов, Р.Б. Спин-зависимые реакции между дефектами структуры и их влияние на пластичность кристаллов в магнитном поле / Р.Б. Моргунов // Вестник РФФИ. - 2003. - № 2 (32). - С. 19-46.
65. Осинская, Ю.В. Упрочнение бериллиевой бронзы БрБ2 при старении в постоянном магнитном поле / Ю.В. Осинская, А.В. Покоев // Физика и химия обработки материалов. - 2003. - № 3.
66. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для техн. вузов / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше [и др.]. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 2001. - 664 с.
67. Пинчук, Л.С. О некоторых возможностях поляризации пар трения / Л.С. Пинчук, А.С. Неверов, В.А. Гольдаде // Трение и износ. - 1980. - Т. 1. - № 6. - С. 1089-1092.
68. Полетаев, В.А. Исследование механических свойств деталей электронасосов, упрочненных комбинированным способом / В.А. Полетаев, Г.С. Самок, Г.С. Королькова // Вестник ИГЭУ. - 2008. - Вып. 3. - С. 1-4.

69. Постников, С.Н. Некоторые физические аспекты магнитной обработки инструмента / С.Н. Постников, А.Ф. Голдина, В.Н. Тараканов // Вопросы электрофизики трения и обработки резанием: тр. Горьк. политехн. ин-та им. А.А. Жданова. - 1974. - Вып. 4. - С. 27-35.
70. Постников, С.Н. Электрические явления при трении и резании / С.Н. Постников. - Горький: Волго-Вят. кн. изд-во, 1975. - 280 с.
71. Постников, С.Н. Перестройка дефектных комплексов в кристаллических твердых телах под действием магнитных полей допороговых энергий / С.Н. Постников [и др.] // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Статистика и динамика деформируемых систем: всесоюз. межвуз. сб. - Горьк. ун-т, 1980. - С. 138-143.
72. Протасов, А.В. Магнитная подача абразивного материала в зону контакта колесо - рельс: автореф. ... канд. техн. наук / А.В. Протасов. - Ворошиловград, 1984. - 21 с.
73. Рыжкин, А.А. О влиянии температурного поля на трибологические характеристики пары трения / А.А. Рыжкин // Вестник ДГТУ. - 2005. - Т. 5. - № 3 (25). - С. 460-471.
74. Садовский, В.Д. Влияние магнитного поля на мартенситное превращение стали / В.Д. Садовский // Металловедение. - М.: Наука, 1971. - С. 47-53.
75. Самарский, А.А. Введение в численные методы: учеб. пособие для вузов / А.А. Самарский. - 3-е изд., стер. - СПб.: Лань, 2005. - 288 с.
76. Сборник материалов по итогам НИР механического факультета Ташкентского института / М.Г. Балабеков, М.И. Черноглазов, А.М. Усманов, С.В. Беликевич. - Ташкент, 1982. - Вып. 83. - С. 4-6.
77. Свирид, М.Н. Восстановление трибосистемы в жидкостях с высоким электросопротивлением под действием электромагнитного поля / М.Н. Свирид // Проблемы техники: наук.-вироб. журн. - Нац. мор. ун-т, 2010. - № 2. - С. 19-29.
78. Соколов, М.М. Гасители колебаний подвижного состава: справочник / М.М. Соколов, В.И. Варавва, Г.М. Левит. - М.: Транспорт, 1985.

79. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов. - М.: Машиностроение, 1987. - 208 с.
80. Теория механизмов и машин: учеб. для вузов / К.В. Фролов, С.А. Попов, А.К. Мусатов [и др.]; под ред. К.В. Фролова. - М.: МГТУ им. Баумана, 2002. - 496 с.
81. Тихомиров, В.П. Применение теории подобия к исследованию характеристик пар трения / В.П. Тихомиров, В.И. Воробьев, С.Г. Волохов, А.Н. Чвала // Современные проблемы математики, механики, информатики: материалы междунар. конф. - Тула, 2013. - С. 472-476.
82. Тихомиров В.П. Контактное взаимодействие фрактальных поверхностей / В.П. Тихомиров, О.А. Горленко, М.А. Измеров, П.В. Тихомиров // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2011. - № 4. - С. 12-23.
83. Тихомиров, В.П. Контактное взаимодействие фрактальных поверхностей / В.П. Тихомиров // Трение и износ. - 1997. - Т. 18. - № 3. - С. 369-374.
84. Тихомиров В.П. Контактная механика фрактальных поверхностей / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2015. - № 1 (45). - С. 60-66.
85. Тяпунина, Н.А. Влияние магнитного поля на неупругие свойства кристаллов LiF / Н.А. Тяпунина, В.Л. Красников, Э.П. Белозеров // Физика твердого тела. - 1999. - Т. 41. - Вып. 6. - С. 1035-1040.
86. Челноков, И.И. Гасители колебаний вагонов / И.И. Челноков. - М.: Трансжелдориздат, 1963.
87. Юров, В.М. Поверхностное натяжение и трение скольжения твердых тел / В.М. Юров, С.А. Гученко, Н.Х. Ибраев // Вестник КарГУ. Серия «Физика». - 2009. - № 3 (55). - С. 10-16.
88. Прибор для определения молекулярной составляющей коэффициента трения: пат. на полез. модель RUS 151872 / Тихомиров В.П., Стриженок А.Г., Воробьев В.И., Волохов С.Г. - 18.03.14.

89. Прибор для определения молекулярной составляющей коэффициента трения: пат. на изобрет. RUS 147093 / Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Самоотканов А.В., Пугачев А.А., Бондаренко Д.А., Волохов С.Г. - 04.04.14.

90. Установка для определения коэффициента трения: пат. на полез. модель RUS 149581 / Новиков В.Г., Воробьев В.И., Фокин Ю.И., Пугачев А.А., Бондаренко Д.А., Волохов С.Г., Шалупин П.И., Товпеко Н.И., Авдащенко В.С., Козловский В.Н. - 12.08.14.

91. Прибор для определения коэффициента трения: пат. на полез. модель RUS 153781 / Воробьев В.И., Новиков В.Г., Пугачев А.А., Бондаренко Д.А., Волохов С.Г., Козловский В.Н., Корчагин В.О., Авдащенко В.С. - 01.12.14.

92. Archard, J.F. The temperature of rubbing surfaces / J.F. Archard // *Wear*. - 1959. - № 2. - P. 438-455.

93. Ashby, M.F. Temperature maps for frictional heating in dry sliding / M.F. Ashby, J. Abulawi, H.S. Kong // *Tribology Transactions*. - 1991. - № 34. - P. 577-587.

94. Bhushan, B. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: Multiple asperity contact / B. Bhushan // *Tribology Letters*. - 1998. - V. 4. - P. 1-35.

95. Chang, Y.P. Effects of friction on tribo-magnetization mechanisms for self-mated iron pairs under dry friction condition / Y.P. Chang, L.M. Chu, H.M. Chou, Y.C. Hwang // *Proc. IMechE*. - 2009. - Vol. 223. - P. 1-12.

96. Chang, W. An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces / W. Chang, I. Etsion, D. Bogy // *Journal of Tribology*. - 1987. - V. 109. - P. 257-263.

97. Chin, K.J. Tribological behavior and surface analysis of magnetized sliding contact XC 48 steel/XC 48 steel / K.J. Chin, H. Zaidi, M.T. Nguyen, P.O. Renault // *Wear*. - 2001. - P. 470-476.

98. Chikazumi, S. Physics of magnetism / S. Chikazumi. - John Wiley & Sons Inc., 1964. - P. 433-434.

99. El Mansori, M. Surface modifications of a non-ferromagnetic copper/ferromagnetic steel XC48 couple in magnetized sliding contact / M. El Mansori, H. Zaidi, K.E. Kardiri, D. Paulmier // *Surface and Coatings Technology*. - 1996. - Vol. 86-67. - P. 511-515.



100. Evans, L.C. Partial Differential Equations / L.C. Evans // American Mathematical Society. - Providence, 1998. - ISBN 0-8218-0772-2.
101. Greenwood, J.A. Contact of nominally flat surfaces / J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson // Proc. Royal Soc. London. Ser. A. - 1966. - V. 293. - P. 300-319.
102. Hardy, W.B. Collected Scientific Papers / W.B. Hardy. - Cambridge, 1936.
103. Herbert, E. Iron and Steel Institute / E. Herbert. - 1929. - № 2. - 239 p.
104. Herbert, E. Metallurgio / E. Herbert. - 1931. - № 3. - 219 p.
105. Hiratsuka, K. The magnetic effect on the wear of metals / K. Hiratsuka, T. Sasada, S. Norose // Wear. - 1986. - Vol. 110. - P. 251-261.
106. Iida, Y. Surface damage resulting from rolling contact operating in magnetic field / Y. Iida, T.A. Stolarski, K. Sato // PhD. Thesis. - University of Brunel, 2007. - P. 109-110, 120-122.
107. Jaeger, J.C. Moving Sources of heat and the temperature of sliding contacts / J.C. Jaeger // Journal and Proceedings of the Royal Society of New South Wales. - 1942. - № 76. - P. 203-224.
108. Kanji, M. Proceedings of the 3rd AIMTDR conference / M. Kanji, K. Pal. - Bombay, 1969.
109. Kontorova, T.A. Zh. Eksp. Teor. Fiz. - 8,1340 / T.A. Kontorova, Ya.I. Frenkel. - 1938.
110. Kumagai, K. Study on Reduction in Wear due to Magnetisation / K. Kumagai, L. Suzuki, O. Kamiya // Wear. - 1993. - Vol. 162-164. - P. 196-201.
111. Nayak, P. Primeneniye modeli sluchaynogo polya dlya issledovaniya sherokhovatykh poverkhnostey / P. Nayak // Problemy treniya i smazki. - 1971. - № 3. - P. 85-95.
112. Muju, M.K. Wear of non-Magnetic materials in the Presence of a Magnetic Field / M.K. Muju, A. Radhakrishna // Wear. - 1980. - Vol. 58. - P. 49-58.
113. Muju, M.K. A model of adhesive wear in the presence of a magnetic field / M.K. Muju, A. Ghosh // Wear. - 1977. - Vol. 41. - P. 103-116.

114. Polyanin, A.D. Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists / A.D. Polyanin. - Boca Raton: Chapman & Hall CRC Press, 2002. - ISBN 1-58488-299-9.
115. Rowe, K.G. In situ thermal measurements of sliding contacts / Kyle G. Rowe, Alexander I. Bennett, Brandon A. Krick, W. Gregory Sawyer // Tribology International. - 2013. - № 62. - P. 208-214.
116. Shimotomai, M. Influence of Magnetic Field Gradients on the Pearlitic Transformation in Steels / M. Shimotomai // Materials Transactions. - 2003. - Vol. 44. - № 12. - P. 2524-2528.
117. Stratton, J.A. Electromagnetic Theory / J.A. Stratton. - New York: McGraw-Hill, 1941. - P.167.
118. Tikhomirov, V.P. Dvumernaya model' nerovnostey poverkhnosti tverdykh tel / V.P. Tikhomirov, O.A. Gorlenko // Treniye i iznos. - 1986. - T. 7. - № 3. - P. 527-531.
119. Woog, P. Contribution a l'étude de graissage. Onctuosité. Influences moléculaires / P. Woog. - Paris, 1926.
120. Yamamoto, Y. Effect of a magnetic field on boundary lubrication / Y. Yamamoto, S. Gondo // Tribology International. - 1987. - Vol. 20. - P. 342-346.
121. Yetim, A.F. The effect of magnetic field on the wear properties of a ferromagnetic steel / A.F. Yetim, H. Covaci, M. Aslan [et al.] // Wear. - 2013. - V. 301. - P. 636-640.
122. Zaidi, H. Analysis of surface and subsurface of sliding electrical contact steel/steel in magnetic field / H. Zaidi, J.K. Chin, J. Frene // Surface and Coatings Technology. - 2001. - Vol. 148. - P. 241-250.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 147093

**ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОЙ  
СОСТАВЛЯЮЩЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет путей сообщения" МГУПС (МИИТ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014113135

Приоритет полезной модели 04 апреля 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 25 сентября 2014 г.

Срок действия патента истекает 04 апреля 2024 г.

*Врио руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Л.Л. Кирий*



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 149581

УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА  
ТРЕНИЯ

Патентообладатель(ли): **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"Брянский государственный технический университет" (RU)**

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014133211

Приоритет полезной модели **12 августа 2014 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации **08 декабря 2014 г.**

Срок действия патента истекает **12 августа 2024 г.**

Врио руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 153781

### ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ

Патентообладатель(ли): **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ "Брянский государственный технический университет" (RU)**

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014148400

Приоритет полезной модели 01 декабря 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 07 июля 2015 г.

Срок действия патента истекает 01 декабря 2024 г.

*Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

*Л.Л. Кирий*



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 151872

**ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОЙ  
СОСТАВЛЯЮЩЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ**

Патентообладатель(ли): **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"Брянский государственный технический университет" (RU)**

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014110287

Приоритет полезной модели 18 марта 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 26 марта 2015 г.

Срок действия патента истекает 18 марта 2024 г.

*Врио руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий

