

УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ

На правах рукописи

Чуркин Александр Викторович



УДК 620.17.051 : 620.172.2

**Автоматизированная установка для исследования фрикционных  
характеристик материалов с анизотропной шероховатостью**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., профессор,  
Тарасов В.В.

Ижевск 2008

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗУЧЕНИЯ ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ.....</b>	<b>13</b>
1.1. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ .....	13
1.2. АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ И ПАР ТРЕНИЯ .....	21
1.3. ВЫВОДЫ .....	31
<b>ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ С АНИЗОТРОПНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ .....</b>	<b>33</b>
2.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ АНИЗОТРОПНОГО ТРЕНИЯ .....	33
2.2. ВЫБОР КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ УСТАНОВКИ .....	38
2.3. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ УСТРОЙСТВ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛ ТРЕНИЯ .....	41
2.4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ .....	55
2.5. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСИЛИЕМ НАГРУЖЕНИЯ ПАРЫ ТРЕНИЯ.....	60
2.6. ВЫВОДЫ. ....	67
<b>ГЛАВА 3. МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АНИЗОТРОПНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ .....</b>	<b>68</b>
3.1. МОДЕЛЬНЫЕ ОБЪЕКТЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК .....	68
3.2. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ЛИНЕЙНЫХ ТРАЕКТОРИЯХ ДВИЖЕНИЯ .....	70
3.3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА НЕЛИНЕЙНЫХ ТРАЕКТОРИЯХ ДВИЖЕНИЯ.....	77
3.4. ВЫВОДЫ .....	85

<b>ГЛАВА 4. НОВЫЕ СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ.....</b>	<b>86</b>
4.1. УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ .....	86
4.2. УПРАВЛЕНИЕ ФРИКЦИОННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ПАР ТРЕНИЯ.....	90
4.3. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЯ.....	94
4.4. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТАНОВКИ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ ГАЛЬВАНОПОКРЫТИЙ.....	99
4.5. ВЫВОДЫ .....	105
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>106</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>107</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ.....</b>	<b>122</b>

## Введение

**Актуальность темы.** Создание современной, конкурентно способной продукции в значительной степени зависит от свойств материалов, используемых при производстве машин и механизмов. Важное место в комплексе мер по обеспечению качества продукции занимают трибологические исследования, главной целью которых является разработка научно-обоснованных способов снижения или управления трением, уменьшения и устранения износа.

Одними из наиболее важных трибологических параметров являются фрикционные характеристики материалов и покрытий, влияющие на надежность и долговечность машин в целом. Наличие большого числа процессов (физических, химических, электрических и др.), действующих в зоне контакта, создает известные трудности теоретического анализа процессов трения. Поэтому наиболее достоверную информацию при оценке характеристик взаимодействующих материалов пар трения и сопряжений дают экспериментальные методы, реализуемые специализированными лабораторными установками.

Неотъемлемой частью системы экспериментальных трибологических исследований являются вычислительные средства, назначение которых состоит в управлении экспериментом, контроле и регистрации измеряемых параметров, обработке результатов. При этом эффективность применения компьютеров в области экспериментальных исследований в значительной степени зависит от возможной реализации физического взаимодействия объектов и уровня автоматизации процесса испытания.

Характерной особенностью фрикционного взаимодействия анизотропных материалов является неколлинеарность векторов трения и скорости главного движения в зоне контакта. В этих условиях, исследование процесса трения на стандартных испытательных машинах не позволяет производить определение силовых параметров с необходимой точностью, что приводит к снижению

достоверности проводимых исследований. Истинное представление о закономерностях изменения положения вектора трения в процессе взаимодействия твердых тел позволит более полно использовать эффект анизотропного трения при разработке фрикционных узлов и механизмов.

Поэтому разработка автоматизированных средств исследования поверхностей материалов и пар трения с анизотропной шероховатостью, на основе высокоинформативных методик трибологического анализа является актуальной.

**Объект исследования.** Процесс фрикционного взаимодействия поверхностей с анизотропной шероховатостью.

**Предмет исследования.** Средства и методы экспериментальных исследований фрикционных характеристик материалов.

**Цель работы.** Разработка автоматизированной установки и методик изучения фрикционных характеристик материалов с анизотропной шероховатостью.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие **основные задачи:**

1. Анализ средств и методов изучения фрикционных характеристик материалов, обоснование кинематической схемы и разработка испытательной установки.
2. Разработка устройств измерения силовых параметров трения с учетом неколлинеарности векторов трения и скорости главного движения; создание системы автоматизированного управления экспериментом.
3. Экспериментальное определение характеристик измерительных устройств и исполнительных механизмов установки.
4. Разработка методик определения фрикционных характеристик материалов с анизотропной шероховатостью.

**Методы исследования.** Теоретические исследования выполнены на основе классических законов теоретической механики, теории автоматического и программного управления, аналитических методов, математического анализа и средств вычислительной техники.

Экспериментальные исследования базируются на методах трибологических испытаний поверхностей материалов и сопряжений с применением средств измерительной техники и разработанной экспериментальной установки. Обработка полученных результатов проводилась с использованием методов математической статистики средствами вычислительной техники.

### **Научная новизна**

1. Разработана и создана автоматизированная установка для исследования процессов фрикционного взаимодействия поверхностей с анизотропной шероховатостью с учетом неколлинеарности векторов трения и скорости главного движения, в том числе на нелинейных траекториях движения.

2. Разработана методика непрерывного измерения фрикционной анизотропии индентором, движущимся по замкнутой круговой траектории, аппроксимируемой набором линейных участков, путем регистрации мгновенного значения сил трения.

3. Предложен новый способ и устройство для управления результирующей силой трения за счет изменения взаимной ориентации движущихся тел с анизотропной шероховатостью.

4. Разработаны устройства измерения силовых параметров трения для исследования фрикционных характеристик с учетом неколлинеарности векторов трения и скорости главного движения.

**Практическая ценность.** Создана автоматизированная установка с расширенными функциональными возможностями для исследований фрикционных процессов на анизотропных поверхностях, адаптируемая к сложно-рельефным объектам. Разработанные измерительные устройства,

многокоординатный привод и методики повышают достоверность оценки силовых параметров трения в условиях неколлинеарности векторов трения и скорости главного движения.

Установка может быть использована при выборе схемы технологической обработки поверхности для сокращения периода приработки изделий, для использования эффекта анизотропии в процессах ориентации (свободно движущихся) изделий на конвейерных транспортных операциях. С помощью предложенных дополнительных модулей на установке можно проводить картографирование параметров покрытий электрохимическим методом (толщина, химический состав и др.).

Результаты проведенных исследований использованы в учебном процессе Удмуртского государственного университета.

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. Конструкция автоматизированной установки с расширенными функциональными возможностями для изучения комплекса фрикционных и эксплуатационных свойств поверхностей.

2. Методика непрерывного определения фрикционной анизотропии, при движении индентора по замкнутой круговой траектории, аппроксимируемой набором линейных участков, путем регистрации мгновенного значения сил трения.

3. Конструкции устройств измерения знакопеременных сил трения для исследования фрикционных свойств материалов с учетом неколлинеарности векторов трения и скорости главного движения.

4. Устройство управления нагрузкой пары трения на основе системы непрерывного контроля величины нагружающего усилия.

5. Экспериментальные результаты оценки фрикционных характеристик материалов.

**Апробация работы.** Содержание и основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: 1 Всероссийской конференции “Аналитические приборы” (Санкт-

Петербург, 2002), Международной научной конференции “Современные проблемы механики и физико-химии процессов резания, абразивной обработки и ППД” (Киев, 2002), 17 Менделеевском съезде по общей и прикладной химии (Казань, 2003), 4 Международной научно-технической конференции “Информационные технологии в инновационных проектах” (Ижевск, 2003), 4 Международной школе-семинаре “Современные методы исследования и предупреждения коррозионных разрушений” (Ижевск, 2003), , Medzinarodna vedecka konferencia “Transfer - 2003” (Trencin, 2003), 6 Всероссийской конференции по электрохимическим методам анализа с международным участием “ЭМА - 2004” (Уфа, 2004), Материалы Всероссийской конференции по аналитической химии “Аналитика России - 2004”(Москва, 2004), 5-й Международной научно-технической конференции “Инженерия поверхности и реновация изделий”(Киев, 2005), 3-й Научно-практической конференции “Проблемы механики и материаловедения” (Ижевск, 2006), 6 Международном научно-техническом семинаре “Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении” (г.Свалява, Украина, 2006).

**Публикации.** Основные результаты, полученные при работе над диссертацией, опубликованы в 9 патентах на изобретения, 3 статьях, 5 сборниках материалов, 4 сборниках трудов и 3 тезисах. Подано пять заявок на изобретение.

Ссылки на публикации по материалам диссертации находятся в списке литературы под номерами: 26-30 , 53-61, 79-104, 114, 125.

**Личный вклад автора.** Диссертация является самостоятельной работой, обобщающей результаты, полученные лично автором и в соавторстве. Автор предложил идею использования трехкоординатного привода для задач испытания материалов, самостоятельно спроектировал и изготовил установку для исследования фрикционных характеристик поверхностей и сопряжений. Совместно с соавторами были предложены новые конструктивные решения узлов машин трения, устройств измерения сил трения, электрохимических

датчиков, на которые получен ряд патентов РФ. Обсуждение полученных экспериментальных результатов проводилось совместно с научным руководителем и с соавторами публикаций. Основные выводы по проведенной работе сформулированы автором работы.

**Связь диссертационной работы с планами НИР и НИОКР.** Работа выполнена в Институте прикладной механики УрО РАН при поддержке РФФИ, грант № 01-02-96457, при поддержке гранта молодых ученых УрО РАН в соответствии с планами научно-исследовательских работ по темам 2.25.3.2. “Исследование свойств структурно – неоднородных металлических материалов, пригодных для эксплуатации в экстремальных температурных условиях и активных средах”(№ гос. рег. 01940001195), 2.3.3. 2.3.6. “Исследование совмещенных термопластических процессов для оптимизации физико-механических свойств материалов и повышения качества изделий” (№ гос. рег. 01990007504).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка использованной литературы (124 источников). Диссертация содержит 123 страницы, из них 107 страниц машинописного текста, включая 10 таблиц, 39 иллюстраций. Приложение содержит акт о практическом использовании результатов работы.

### **Основное содержание работы**

**Введение** содержит обоснование актуальности темы диссертации, формулировку целей и задач работы, научную новизну, практическую значимость работы, защищаемые положения и раскрывает структуру диссертации.

**В первой главе** анализируются методы и средства обеспечения трибологических испытаний при изучении фрикционных характеристик материалов и изделий.

На основе обзора современных отечественных и зарубежных машин трения и их кинематических схем выделены направления исследований,

обеспечивающие проведение испытаний материалов при наличии пространственного вектора трения в зоне контакта.

Первое направление связано с разработкой многокомпонентных устройств измерения силовых параметров трения и методик анализа мгновенного положения вектора трения, обеспечивающих повышение точности и производительности анализа фрикционного взаимодействия поверхностей и сопряжений в целом.

Второе направление заключается в построении гибкой структуры установки, обеспечивающей расширение функциональных возможностей установки за счет применения многокоординатного привода движения пар трения с возможностью создания нелинейных траекторий движения.

**Вторая глава** посвящена разработке и анализу конструктивных особенностей отдельных подсистем испытательного комплекса.

В качестве модели фрикционного взаимодействия использовали тензорную модель анизотропного трения материалов для случая “изотропный индентор - анизотропная поверхность”. Анализ которой позволил определить информативно значимые параметры, которые могут быть измерены в точке приложения к образцам вынуждающей силы.

Для определения силовых параметров трения в условиях неколлинеарного положения векторов трения и скорости главного движения, разработан ряд оригинальных технических решений устройств измерения сил трения (одно и двухкоординатных) и устройство динамического нагружения пар трения.

Повышение точности определения пространственного положения вектора трения при создании двухкоординатного устройства измерения достигается построением системы регистрации мгновенных значений компонент вектора трения, действующих во взаимно-перпендикулярных направлениях в плоскости контакта, независимо от направления движения измерительного элемента по исследуемой поверхности.

На основе анализа схем кинематического взаимодействия цилиндрических объектов выбрана кинематическая схема установки и обоснована необходимость использования многокоординатного привода управления измерительным элементом в зоне фрикционного взаимодействия пары трения.

Гравиметрическим методом определены параметры созданных измерительных устройств и построены градуировочные характеристики.

**В третьей главе** приводятся методики и результаты экспериментальных исследований анизотропных поверхностей на различных траекториях движения измерительного элемента (линейных и нелинейных).

Представлены экспериментальные данные анализа силовых параметров процесса трения на линейных траекториях движения пар трения при поступательном и реверсивном характере движения измерительного элемента.

Особенностью применения двухкоординатного устройства измерения сил трения при поступательном движении в направлении главных осей скольжения стало обнаружение колебательного характера дополнительного силового воздействия, направленного ортогонально главному направлению движения пары трения.

При анализе фрикционных характеристик материалов на нелинейных (круговых) траекториях движения предложен способ определения фрикционной анизотропии путем мгновенной регистрации вектора трения. Приводятся данные экспериментального определения фрикционной анизотропии металлических материалов, построенные в виде анизотроп трения.

Подтверждено, что анизотропы трения фрикционных характеристик в общем случае имеют ассиметричный характер, который может быть объяснен наложением анизотроп микрогеометрии поверхности и физико-механических свойств поверхностного слоя.

**Четвертая глава** включает описание конструкции установки, областей ее применения, в том числе в смежных областях исследования поверхностей материалов.

Предложен способ и устройство управления фрикционным взаимодействием пар трения на основе эффекта анизотропии трения, за счет регулирования положения осей скольжения анизотропной пары трения относительно главного направления движения.

Показан вариант использования алгоритмического обеспечения и блочно-модульной конструкции установки в смежных областях исследования материалов. Приведен пример реализации контроля параметров гальванопокрытий электрохимическим методом с использованием возможностей испытательной установки.

**В заключении** излагаются основные результаты и выводы по работе.

# Глава 1. Методы и средства изучения фрикционных характеристик материалов

## 1.1. Методы изучения фрикционных характеристик материалов

Повышение надежности и долговечности машин является одной из главных проблем современного машиностроения. На сегодняшний день одной из основных причин выхода из строя машин и агрегатов является износ подвижных сопряжений рабочих органов под влиянием сил трения. Поэтому исследование процессов трения и их количественная оценка является задачей важной и актуальной.

Сложность процессов происходящих на поверхностях трения иллюстрирует схема основных факторов (Рис. 1), которые необходимо учитывать при анализе фрикционного взаимодействия твердых тел [36].



Рис. 1. Схема факторов, влияющих на фрикционное взаимодействие твердых тел

Выходные факторы - сила трения и износ, определяются не только свойствами исходного материала и характером окружающей среды, но и режимом, влияющим на изменение свойств поверхностного слоя трущихся тел. Режим определяется контактной температурой, нагрузкой и скоростью, а также температурным градиентом, возникающим на локальных участках взаимодействующих поверхностей.

При фрикционном контакте принято выделять три взаимосвязанных процесса:

- взаимодействие поверхностей;
- изменение поверхностных слоев твердых тел и присутствующих на поверхностях пленок;
- разрушение поверхностного слоя.

Всеобъемлющий теоретический учет взаимного влияния этих процессов друг на друга и на результат фрикционного взаимодействия в целом, является сложной задачей, которая еще не решена даже для простого случая взаимодействия изотропных тел [105], поэтому главенствующее место при проведении трибологических исследований играют экспериментальные методы [36 - 38 и д.р.].

Особое значение трибологические исследования играют при решении следующих задач:

- *снижения негативного влияния сил трения (замена трения скольжения на трение качения, применением смазочных материалов и т.д.);*
- *использования положительной (активной) роли сил трения (создание фрикционных муфт, тормозных устройств и т.д.);*
- *управления силами трения.*

Наиболее перспективной из перечисленных можно назвать задачу управления силами трения, которая предполагает создание управляемого (контролируемого, регулируемого, адаптивного) фрикционного взаимодействия пар трения.

В соответствии со схемой основных факторов (Рис. 1) выделим два базовых направления задач управления, а именно регулирование внешних (входных) или внутренних факторов.

К области регулирования входных факторов можно отнести управление режимами трения, за счет применения материалов с заданными физико-механическими свойствами, подбора смазочных материалов, регулирования

скорости, нагрузки, температуры в зоне контакта, обеспечения изменяемой кинематики трибосопряжения.

Наиболее перспективным в данном направлении является разработка кластерных материалов, нанопокровов и наноматериалов, физико-механические свойства которых значительно превосходят свойства исходных компонентов, используемых при их генерации.

Задача управления внутренними факторами представляется самой сложной, т.к. предполагает разработку материалов с управляемыми физико-механическими свойствами.

К одному из решений в данном направлении можно отнести магнитные смазочные материалы, которые могут изменять свои свойства под действием магнитного поля, обеспечивая регулирование параметров в зоне трения.

На практике, как правило, имеет место единство положительного и негативного влияния сил внешнего трения, поэтому при решении отмеченных задач необходимо четкое представление о фрикционных характеристиках (ФХ) материалов и пар трения.

К фрикционным характеристикам пар трения относят: фрикционную теплостойкость, износостойкость, прирабатываемость, схватываемость, коррозионную стойкость, механическую прочность при определении предельных нагрузок, сопротивление циклическим контактными нагрузкам и некоторые другие [38].

Одними из основных параметров процесса трения являются сила сопротивления движению (сила трения) и износ, которые определены как выходные факторы процесса фрикционного взаимодействия (Рис. 1).

Износостойкость пары трения это характеристика стойкости против истирания материалов, которая в значительной мере определяет долговечность сопряжений, узлов и агрегатов.

Одним из основных требований, предъявляемых к парам трения, является их высокая фрикционная теплостойкость, т.е. способность пары трения

сохранять устойчивое значение коэффициента трения при малом износе в широком диапазоне температур.

Коэффициент трения ( $K_{тр}$ ), как комплексная характеристика, в одинаковой мере зависит от материалов пары трения, режима трения и геометрии фрикционного контакта. Его величина выступает одним из критериев классификации материалов, в соответствии с которым выделяют: антифрикционные материалы и фрикционные материалы. По некоторым оценкам [38], коэффициент трения первых находится в диапазоне  $0 < K_{тр} < 0,2$ , а вторых соответственно  $0,2 < K_{тр} < 0,5$ . Такое условное деление определяется в соответствии с характером решаемых задач, первые предпочтительно применяют для снижения влияния сил трения, а вторые для использования положительной роли сил трения, например, в тормозных устройствах.

Методы определения ФХ материалов и пар трения условно разделяют на две группы:

- расчетно-аналитические методы анализа ФХ основанные на известных связях ФХ с базовыми элементарными свойствами твердых тел,
- экспериментальные методы.

С точки зрения характера проводимого анализа, первая группа методов носит предсказательный, прогнозный характер, т.к. рассчитывает поведение материала или пары трения для заданных условий работы. Необходимо отметить, что сами базовые свойства материалов определяются в статическом состоянии для каждого из материалов, поэтому точность и качество оценок производимых такими методами определяется степенью приближения расчетных, моделируемых условий реальным эксплуатационным.

Вторая группа методов направлена на экспериментальное определение ФХ в процессе взаимодействия пары трения. В зависимости от размера образцов и моделируемых режимов испытаний выделяют ряд подгрупп [38]:

- 1) лабораторные испытания на малых образцах,
- 2) лабораторные испытания на натуральных образцах,

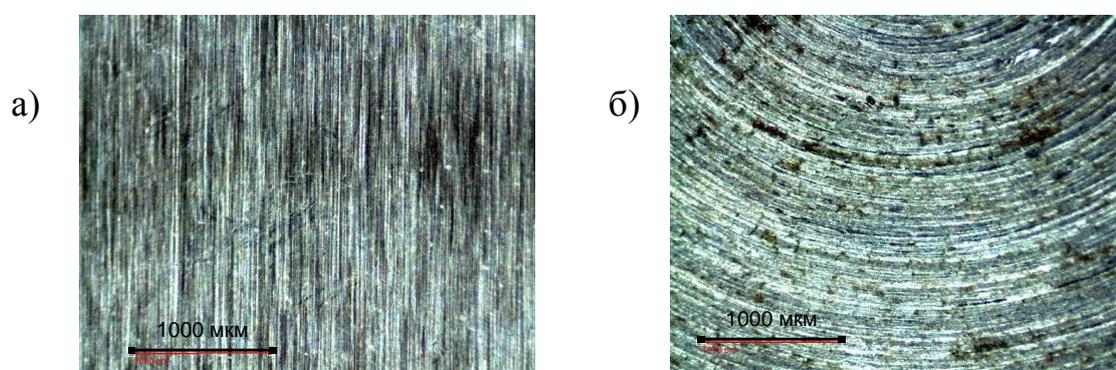
## 3) испытания в условиях эксплуатации.

Наиболее достоверные результаты испытаний можно получить в условиях эксплуатации узлов и агрегатов, однако они самые затратные, как по времени проведения и количеству требуемых ресурсов, так и по сложности анализа результатов исследования, поскольку в условиях эксплуатации не возможно учесть все влияющие на процесс факторы.

Поэтому широкое применение нашли лабораторные методы определения ФХ, которые занимают некоторое промежуточное положение между расчетно-аналитическими методами, и эксплуатационными методами испытания, т.к. позволяют оценивать ФХ в процессе взаимодействия тел в специальных (моделируемых) условиях.

При моделировании, как правило, решают две задачи: подбор материалов и испытание сопряжений для заданных условий (максимально приближенных к эксплуатационным) и испытание пар трения для изучения их ФХ в широком диапазоне условий, что характерно для исследований новых материалов.

Фактические эксплуатационные характеристики узла трения зависят не только от свойств конструкционных материалов, но и от процессов технологической обработки контактирующих поверхностей [52]. Особенностью механических способов обработки материалов является формирование на поверхностях выраженного микрорельефа, обладающего характерным направлением (Рис. 2).



**Рис. 2. Микрорельеф поверхностей: а- обработка плоским шлифованием, б – обработка торцом фрезы.**

Анализ параметров микрогеометрии (микрорельефа) поверхностей проводят щуповыми или зондовыми методами на нескольких локальных базовых участках. Выбор базового участка для анализа зависит от направления следов обработки материала. Так при их наличии, рекомендуют выбирать одно поперечное направление, дающее наибольшую информацию о профиле [38], а при отсутствии явных следов обработки, анализ производят на линейном участке траектории в нескольких различных направлениях.

Присутствие на поверхностях следов обработки и выраженных дискретных структур, характерно для широкого круга современных материалов [2]: композиционных, порошковых, кристаллических материалов, наноматериалов и т.п. Возникающая в этом случае неоднородность среды или анизотропия оказывает влияние не только на объемные свойства материала, но и на характеристики поверхностного слоя, участвующего во фрикционном взаимодействии [49].

В реальных узлах трения, как правило, оба контактирующих тела имеют заметную анизотропию физико-механических свойств поверхностей. Кроме того, при проведении фундаментальных и прикладных исследований в области трибологии зачастую возникает необходимость всестороннего анализа контактной ситуации и перебора возможных вариантов для нахождения оптимального сочетания пар трения.

Анализ литературы показывает, что наибольшее число работ по анизотропии трения связано с технологией обработки материалов давлением [34, 47-51, 64, 77, 115, 116], т.е. с областью пластических деформаций.

Среди работ, касающихся области упругих деформаций следует отметить труды посвященные: экспериментальной оценке сил трения и анализу процесса изнашивания анизотропно обработанных поверхностей [18, 19, 21-23, 46], модельному подходу к изучению анизотропного трения [31, 45, 111], износостойкости анизотропных поверхностей [43, 76, 119], исследованию процесса предварительного смещения и диссипации энергии в контактной зоне в условиях анизотропии трения [15, 42].

Если контактирующие поверхности обладают анизотропными свойствами, то при организации относительного движения сила трения в общем случае направлена не в сторону обратную движению, а составляет с этим направлением некоторый угол. Другими словами направления действия векторов трения и скорости главного движения неколлинеарны. В зоне контакта таких материалов возникает дополнительное силовое воздействие, направленное ортогонально направлению движения пары трения, зависящее от фактора анизотропии [105].

Не учет этого фактора при конструировании узлов и агрегатов влияет на эксплуатационные характеристики изделий в целом, но особенное значение он приобретает на стадии приработки. Которая характеризуется более интенсивным изнашиванием по сравнению с периодом нормальной эксплуатации. Длительность периода приработки определяется не только физико-механическими свойствами материалов, использованных при разработке элементов и узлов машин, но и режимами технологической обработки поверхностей деталей.

Недостаток информации о влиянии фактора анизотропии на процессы трения пар материалов ограничивает потенциальные возможности его применения, как для конструкторских расчетов, так и практических задач контроля и управления. В первую очередь такое положение дел может быть объяснено отсутствием эффективных средств исследования ФХ материалов и пар трения, способных производить определение силовых параметров фрикционного взаимодействия с учетом неколлинеарности векторов трения и скорости главного движения.

Наиболее распространенные методы анализа ФХ материалов основываются на гипотезе об однородной (квазигомогенной) сплошной среде, поэтому производят определение силовых параметров трения только в направлении относительного движения в паре трения с использованием однокоординатных устройств измерения.

Определение силовых параметров трения твердых тел, в зоне контакта которых возникает неколлинеарность векторов трения и скорости главного движения, требует применения многокоординатных измерительных устройств. Известен ряд способов [5, 6, 62], направленных на определение выраженной анизотропии поверхностного слоя материалов, использующих двухкоординатные устройства измерения.

Наиболее полными функциональными возможностями обладает способ [6], заключающийся в том, что по поверхности материала перемещают индентор, измеряют компоненты полного вектора сил сопротивления и по их отношению судят об анизотропии, причем компоненты полного вектора силы сопротивления измеряют одновременно при одном проходе индентора по круговой траектории, с фиксацией взаимного положения осей анизотропии контактирующих поверхностей.

Основной проблемой реализации приведенного способа является выбор нелинейной траектории относительного движения пары трения. Если для линейной траектории движения условия проведения испытания остаются постоянными на всем пути движения индентора, то при выборе нелинейной траектории движения или круговой, можно говорить только об определении мгновенных значений компонент полного вектора силы сопротивления из-за непрерывного изменения условий испытания. В этих условиях становится затруднительным проведение статистической обработки регистрируемых параметров, что ограничивает возможности данной методики областью качественного анализа фрикционного взаимодействия.

Одним из путей повышения точности и достоверности исследования анизотропных материалов может быть проведение измерений на нелинейных траекториях движения, аппроксимированных набором линейных участков, с обеспечением статистической обработки результатов измерений на каждом участке траектории.

Что касается регулирования параметров фрикционного взаимодействия, то его возможно достичь на основе использования эффекта анизотропного

трения, путем изменения взаимной ориентации контактирующих поверхностей в процессе трения в соответствии с некоторой целевой функцией ( $F_{\text{тр min}}$ ,  $F_{\text{тр max}}$ ,  $F_{\text{тр}}(t)$ ,  $F_{\text{тр}}(N)$  и т.д.).

Изменение фрикционных характеристик анизотропных пар трения можно достичь регулированием:

- траектории относительного движения при фиксированной взаимной ориентации поверхностей,
- взаимной ориентации контактирующих поверхностей при фиксированной траектории,
- траектории и ориентации одновременно.

Важным аспектом изучения фрикционного взаимодействия материалов с анизотропной шероховатостью является проведение анализа параметров процесса в реальном режиме времени, с применением средств и методов мгновенного измерения силовых параметров трения в зоне контакта.

Следовательно, развитие способов анализа силовых параметров трения на нелинейных траекториях движения, с учетом неколлинеарного положения векторов трения и скорости главного движения в зоне контакта, может обеспечить получение более глубоких знаний о характере фрикционного взаимодействия материалов и сопряжений.

## ***1.2. Аппаратура для исследования фрикционных характеристик материалов и пар трения***

Разработка лабораторных средств испытания материалов и пар трения представляет сложную техническую задачу, т.к. требует учета специфики трибологического эксперимента, в частности его длительность и многопараметричность [105].

Для анализа возможностей существующей испытательной аппаратуры необходимо рассмотреть обобщенную структуру испытательного комплекса (ИК) [97], в которой по функциональному признаку можно выделить три базовые подсистемы (Рис. 3).



**Рис. 3. Структура испытательного комплекса**

*Подсистема средств и методов испытания* определяет методику экспериментального исследования, кинематическую схему испытания, статические и динамические условия и ограничения, накладываемые на объект исследования в целом.

*Подсистема управления экспериментом* обеспечивает функционирование исполнительных устройств (электрических, гидравлических, пневматических и т.п.), которые создают, поддерживают и регулируют параметры объектов (процессов) в ходе эксперимента.

*Подсистема сбора и обработки данных* формирует массивы данных поступающих с измерительных устройств и датчиков, организует сбор, обработку и накопление информации, определяет метрологические характеристики ИК, влияет на качество и эффективность проведения эксперимента в целом.

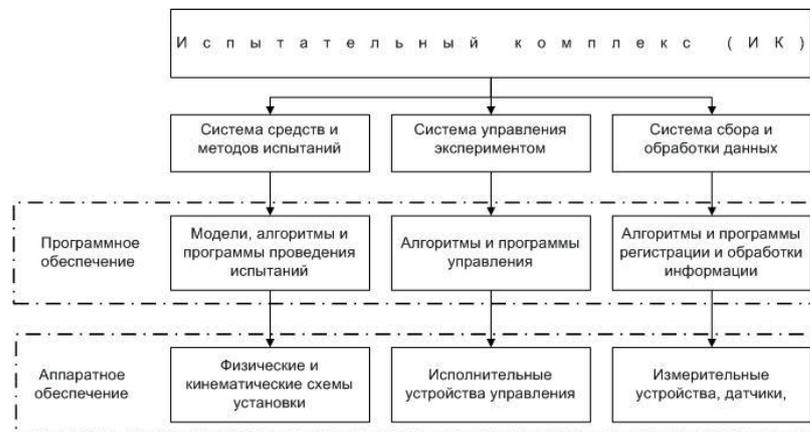
Применение вычислительных машин в структуре испытательных средств, привело к выделению отдельной группы ИК называемой измерительно-вычислительными комплексами, более подробно вопросы проектирования таких систем рассмотрены в [44, 112, 25]. Основными признаками принадлежности средства измерений к измерительно-вычислительным комплексам являются [69, 70, 118]:

- наличие процессора или управляющего компьютера,

- программного управления средствами измерений с нормированными метрологическими характеристиками,
- программного управления экспериментом,
- блочно-модульная структура.

Ниже представлена схема установки (Рис. 4) на которой выделены уровни программного (алгоритмического) и аппаратного (технического) обеспечения для каждой из подсистем [97].

Степень проработки конкретных подсистем определяет общие характеристики испытательного оборудования, его метрологические и технические характеристики, а также уровень автоматизации процесса испытания и сбора экспериментальных данных.



**Рис. 4. Структура установки с учетом аппаратного и программного обеспечения**

Базовые возможности установки определяются характеристиками аппаратного обеспечения каждой из подсистем. Поэтому среди основных направлений развития средств испытания ФХ материалов можно назвать следующие:

- создание блочно-модульных конструкций установок с целью расширения функциональных возможностей аппаратуры за счет реализации набора кинематических схем испытаний,
- совершенствование исполнительных устройств системы управления экспериментом,

- разработка измерительных устройств и датчиков с целью повышения точности и достоверности проводимого анализа.

Одним из примеров трибологических испытательных машин, реализующих блочно-модульное строение, можно считать серию машин трения T01-T08 Scientific centre for terotechnology (Польша), каждая из которых имеет свою кинематическую схему, при этом используется общая система управления и сбора информации.

Схожее строение имеет машина трения SRV-III (Optimol Instruments GmbH, Германия), которая обладает тремя базовыми схемами испытания. Для каждой схемы разработан собственный модуль, устанавливаемый на единой базовой плите испытательной камеры. Причем условия испытания для всех модулей формируются общей системой управления приводами перемещения и нагружения, а сбор аналитической информации реализуется модульной многоканальной системой сбора данных.

Существующие отечественные машины трения (СМЦ-2, УМТ-1, МПТ-1, Х4-Б, 2070 СМТ1 и др.) используются в первую очередь для испытания кинематических пар, характерных для простых тел: плоскости, цилиндры, кольца, диски, конусы, с преобладанием одного направления относительного движения в паре трения, как правило вращательного или поступательного (возвратно-поступательного) [8-13, 63].

Характерной особенностью фрикционного взаимодействия анизотропных материалов является неколлинеарность векторов трения и скорости главного движения в зоне контакта. В этих условиях, исследование процесса трения на стандартных испытательных машинах не позволяет производить определение силовых параметров с необходимой точностью, что приводит к снижению достоверности проводимых исследований.

Одним из первых приборов направленных на определение физико-механических свойств анизотропии поверхностного слоя твердого тела является прибор Берковича Е.С. [3]. Он построен по схеме “штифт – плоская поверхность” и производит измерение сил трения при движении индентора

(штифта) по поверхности образца за два независимых испытания, проводимых на линейных не пересекающихся траекториях движения в двух направлениях. Результатом анализа является соотношение измеренных величин сил трения в этих двух направлениях.

Область применения данного прибора ограничена случаем испытания материалов на микро-твердость царапанием, т.к. он в качестве индентора использует несъемную алмазную пирамиду. Устройство имеет механический двух-координатный привод перемещения держателя с ручным управлением, что увеличивает влияние человеческого фактора, снижает точность и достоверность проводимого анализа.

Интересным устройством испытания поверхностных свойств анизотропных материалов является прибор В.А. Белого и др. [4], в котором использован следящий привод движения измерительного элемента по исследуемой поверхности. Результатом испытания является определение одного направления движения индентора по поверхности испытуемого образца, при котором действие вектора силы трения будет соответствовать заданному соотношению составляющих его компонент, устанавливаемого априорно исследователем. Проведение данным прибором комплексного анализа поверхности трения в разных направлениях потребует проведения значительного количества испытаний.

Особенностью прибора В.А.Белого является отсутствие системы регистрации величин сил трения, действующих в перпендикулярных направлениях. Поскольку двухкомпонентный датчик силы, используемый в его конструкции, своими выходами связан с системой управления приводом движения, что существенно снижает эффективность исследования в целом.

Наиболее полными функциональными возможностями испытания анизотропных образцов обладает минитрибометр [105], который обеспечивает движение пары трения по линейным, круговым и спиральным траекториям, имеющий автоматизированную систему регистрации двух компонент вектора силы трения. Главным недостатком устройства является фактическое

отсутствие системы управления движением образцов, т.к. в качестве приводов движения использованы односкоростные электродвигатели.

Для сравнения функциональных возможностей испытательного оборудования приведем характеристики рассмотренных устройств с учетом их подсистем (Табл. 1).

Табл. 1

Сравнительные характеристики оборудования

Прибор		Е. Беркович и д.р. [3]	В.А. Белый и д.р. [4]	В.В.Тарасов [105]	“Оптимальная” установка
1		2	3	4	5
<i>Система средств и методов испытания</i>	Кинематическая схема испытания (условное название)	“штифт – плоская поверхность”			“штифт-нелинейная поверхность”
	Пара трения (тела)	Изотропный индентор (штифт)	Анизотропный индентор (штифт)		Сложно-рельефная анизотропная поверхность тела
<i>Система управления</i>	Привод движения (координата)	X	Поступательное движение		
		Y	Поступательное движение	Вращательное движение	Поступательное движение
		Z	Отсутствует		
	Управление приводом	Ручное механическое	Автоматическое на базе следящего привода	Полу-автоматическое	Программное управление по каждой из координат
	Траектория	линейная	нелинейная	Линейная, круговая, спиральная	Нелинейная пространственная
	Режим нагружения	Статический			Управляемый
<i>Система измерения</i>	Датчик	Механический	Тензометрический		
	система измерения	Механическая	Электрическая аналоговая	Электрическая цифровая	
	Выходная информация	Величина силы трения для двух взаимно-перпендикулярных направлений	Направление соответствующее заданному соотношению компонент вектора силы трения	Измерение мгновенных значений сил трения	Измерение мгновенных значений сил трения

Обзор технических средств испытания фрикционных характеристик анизотропных материалов позволил выделить основные тенденции развития отдельных подсистем и установок в целом.

Для подсистемы средств и методов испытания характерным является испытание плоских анизотропных поверхностей и пар трения. Наиболее перспективной задачей здесь является переход от испытания плоских объектов к сложно-рельефным и, возможно, к испытанию пространственно нелинейных объектов.

Наиболее разработанной подсистемой среди других является система сбора аналитической информации, регистрирующая мгновенные значения силовых параметров вектора трения с использованием тензометрических датчиков и аналого-цифровых преобразователей.

Анализ систем управления экспериментом показал, что при исследовании характеристик анизотропных материалов фактор управления параметрами испытания не используется в должной мере.

Поэтому применение современного многокоординатного управляемого привода движения образцов для испытания анизотропных материалов создаст потенциальные возможности для разработки новых перспективных способов испытания материалов.

Наиболее перспективные возможности для каждой из подсистем объединены в рамках “Оптимальной” испытательной установки (Табл. 1).

Данная установка предполагает проведение исследований при наличии:

- нескольких кинематических схем испытания, реализуемых по блочно-модульному принципу,
- управляемого нелинейного движения измерительного элемента по исследуемой поверхности,
- системы измерения, сбора и обработки данных с учетом фактического положения вектора трения,
- автоматизации процессов управления и сбора аналитической информации.

Сравнительный анализ подсистем испытательного оборудования для исследования фрикционных характеристик материалов показывает, что общие

возможности оборудования определяются совокупными возможностями каждой из подсистем установки в целом.

Основное внимание следует сосредоточить на расширении функциональных возможностей установки за счет применения управляемого многокоординатного привода движения, а также системы мгновенной регистрации силовых параметров трения с учетом возможного неколлинеарного положения векторов трения и скорости главного движения.

Дальнейший анализ проводится с учетом технических и физических ограничений возникающих при создании, как отдельных подсистем, так и установки в целом.

### ***Кинематические схемы установок для испытания материалов трением***

Установки трения в зависимости от целей классификации могут быть сгруппированы по общности: конструктивных признаков, геометрических признаков испытуемых объектов, режимов испытания (нагрузки, скоростей, температур), характеристик точности, физико-механических свойств испытуемых материалов и т.д. Важное влияние на функциональные возможности установки оказывает аппаратная часть системы средств и методов испытания (Рис. 4).

Одна из признанных классификаций была предложена профессором И.В.Крагельским [36], который подразделяет по кинематическому признаку все установки для испытания материалов трением на два класса (Табл. 2): I – установки однонаправленного относительного перемещения; II – знакопеременного относительного перемещения.

**Табл. 2**

**Классификация установок для испытания материалов трением**

Коэффициент взаимного перекрытия, $K_{ВЗ}$	Относительное перемещение			
	Однонаправленное ( I )		Знакопеременное( II )	
	Торцевое	Трение по образующей	Торцевое	Трение по образующей
$0,5 < K_{ВЗ} \leq 1$	а)	б)	в)	г)
$0 \leq K_{ВЗ} < 0,5$	д)	е)	ж)	з)

Внутри каждого класса установки разделяются на две группы: машины торцевого трения; машины трения с контактом по образующей. Внутри каждой группы разделяют две подгруппы по коэффициенту взаимного перекрытия  $K_{B3}$ :  $K_{B3} \rightarrow 1$ ;  $K_{B3} \rightarrow 0$ .

Коэффициент взаимного перекрытия в данном случае выступает параметром процесса трения и определяется как отношение площадей контакта двух тел, находящихся во взаимодействии, а значит, все эксплуатационные пары трения располагаются между двумя крайними пределами нулем и единицей.

При этом, схемы испытания с  $K_{B3} \rightarrow 0$ , наиболее характерны для проведения локального анализа контактных ситуаций на поверхностях трения, а вторые  $K_{B3} \rightarrow 1$ , лучше подходят для интегрального анализа процессов трения и износа.

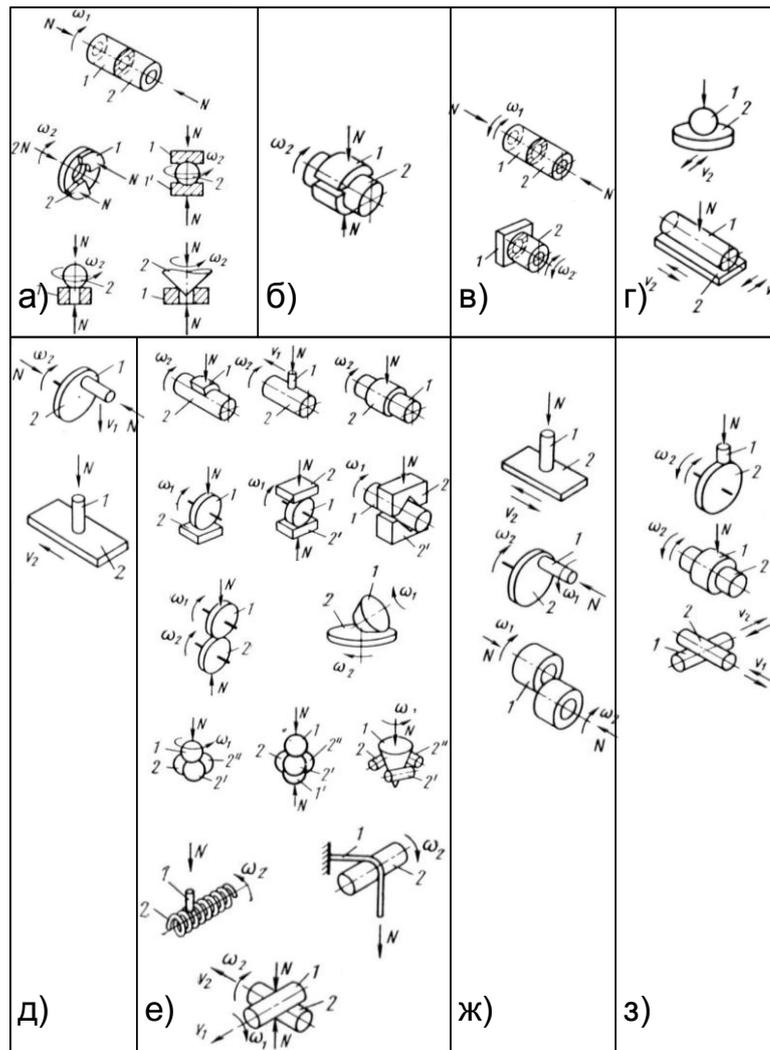


Рис. 5. Схемы испытания к Табл. 2

Для схемы “Оптимальной” установки (Табл. 1) в качестве одного из тел взаимодействия выбран “штифт”, а в качестве второго тела контакта выступает поверхность материала, такая комбинация позволяет производить испытания для целого ряда схем (Табл. 2, д, е, ж, з), объединенных коэффициентом взаимного перекрытия  $K_{B3} \rightarrow 0$ .

Реализация схемы “штифт - поверхность” может обеспечить возможность испытания сложно-рельефных поверхностей реальных деталей. Схема удобна для создания компактных устройств испытания, позволяющих снимать фрикционные характеристики на контактных поверхностях без разборки узла трения (“выездной” эксперимент). Однако первым этапом должна стать проработка технических решений измерительных устройств, предназначенных для анализа характеристик материалов на нелинейных траекториях движения.

Масштабный фактор испытываемых объектов, в частности индентора или “штифта”, влияет не только на выбор компонентов системы управления движением объектов, но и на качественные показатели системы сбора информации.

Как правило, лабораторные испытания на натуральных образцах (как правило, размерами 0,1-1м) сложны в реализации, т.к. требуют мощных приводов движения. Вместе с тем, трибологические испытания относятся к разрушающим методам исследования, при которых образцы приходят в негодность после испытания, что приводит к увеличению стоимости исследований.

Большое внимание в последнее время уделяется исследованию микро, нано образцов (например, с использованием приборов серии Нанотест 600). Результаты полученные на микро и нано уровне, не всегда адекватно согласуются с результатами испытаний на макро-уровне, из-за значительного различия масштабного фактора исследуемых объектов.

Современное исследовательское оборудование для изучения свойств поверхности материала рассчитано на образцы находящиеся в диапазоне 0,1-

$1 \times 10^{-3}$  м, который был выбран в качестве базового для разработки испытательной установки.

Однако в некоторых практических случаях приходится иметь дело со сложно-рельефными образцами. В этих случаях необходимо иметь гибкую, адаптивную систему управления, которая может быть реализована только с применением многокоординатных приводов движения.

Многокоординатные приводы различаются по количеству координат управления, силовым параметрам и типам приводов движения (гидравлических, пневматических или электрических). Они широко используются в станкостроении и приборостроении, при создании станков с ЧПУ, гибких автоматизированных линий и систем.

Таким образом, разработка испытательной установки с использованием многокоординатного привода перемещения исследуемых объектов в составе системы управления экспериментом при исследовании анизотропных материалов по схеме “штифт - поверхность” с применением системы сбора данных о пространственном положении вектора трения позволит повысить производительность и качество проведения трибологических исследований.

### ***1.3. Выводы***

Разработка автоматизированных средств, для исследования процессов фрикционного взаимодействия твердых тел, на основе высокоинформативных методик трибологического анализа является актуальной, с учетом требований точности и достоверности экспериментальных исследований.

Для ответственных изделий, имеющих анизотропию физико-механических свойств, проблема проведения экспериментального анализа ФХ особенно важна. Истинное представление о закономерностях изменения положения вектора трения в процессе взаимодействия твердых тел позволит более полно использовать эффект анизотропного трения при разработке фрикционных узлов и механизмов.

Разработка более точных и достоверных методов анализа силовых параметров трения анизотропных тел требует создания новых технических экспериментальных средств, учитывающих специфику фрикционного взаимодействия в условиях неколлинеарного положения векторов трения и скорости главного движения.

На основании проведенного анализа ставятся следующие задачи исследования:

1. Анализ средств и методов изучения фрикционных характеристик материалов, обоснование кинематической схемы и разработка испытательной установки.

2. Разработка устройств измерения силовых параметров трения с учетом неколлинеарности векторов трения и скорости главного движения; создание системы автоматизированного управления экспериментом.

3. Экспериментальное определение характеристик измерительных устройств и исполнительных механизмов установки.

4. Разработка методик определения фрикционных характеристик материалов с анизотропной шероховатостью.

## **Глава 2. Разработка устройств испытания материалов с анизотропной шероховатостью**

### ***2.1. Моделирование анизотропного трения***

Характерной особенностью фрикционного взаимодействия анизотропных материалов является неколлинеарность векторов трения и скорости главного движения в зоне контакта.

Неколлинеарное положение вектора трения при взаимодействии твердых тел может возникнуть, как под действием внешних факторов (Рис. 1), когда направление движущей силы отклонено от направления фактического движения пары трения, так и под действием внутренних факторов, когда возникает дополнительное силовое воздействие направленное ортогонально направлению перемещения, приводящее к отклонению вектора трения.

Анизотропия фрикционных свойств определяется внутренними факторами взаимодействующей системы и зависит от шероховатости поверхности, дискретных структур на поверхностях трения механических свойств материалов [35, 117].

При взаимодействии пар трения и сопряжений можно выделить три варианта контакта тел: изотропное – изотропное, изотропное – анизотропное, анизотропное – анизотропное.

При контакте пары изотропных тел положение вектора трения устанавливается в направлении обратном направлению приложения возмущающей (внешней) силы.

В случае контакта изотропного и анизотропного тел, положение вектора трения зависит от взаимной ориентации поверхностных свойств анизотропного тела и направления относительного перемещения пары трения. Такой контакт хорошо подходит для изучения анизотропии физико-механических свойств



В данном случае, оси  $X$  и  $Y$  расположены в соответствии с главными направлениями скольжения, а соответствующие этим осям коэффициенты трения представлены как  $K_{\text{тр}X}$  и  $k_{\text{тр}Y}$ . Направление движения пары трения соответствует единичному вектору  $\bar{e}$ , расположенному под углом  $\alpha$  (угол движения) к оси  $X$ . Для совершения движения в направлении  $\bar{e}$  необходимо приложить движущую силу  $P$  по линии  $OO_1$  под углом  $\beta$  (угол приложения силы) к оси  $X$ . Возникающая сила трения  $F_{\text{тр}}$  компенсирует движущую силу трения  $F_{\text{тр}} = -P$ .

В принятой модели анизотропного трения для составляющих силы трения по осям  $X$  и  $Y$  имеем,

$$\begin{cases} F_{\text{тр}X} = F_{\text{тр}} \cos \beta \\ F_{\text{тр}Y} = F_{\text{тр}} \sin \beta \end{cases}$$

С другой стороны, если представить силу трения как функцию от направления движения можно записать,

$$\begin{cases} F_{\text{тр}X} = -NK_{\text{тр}X} \cos \beta \\ F_{\text{тр}Y} = -Nk_{\text{тр}Y} \sin \beta \end{cases}$$

Отсюда,

$$F_{\text{тр}} = \sqrt{F_{\text{тр}X}^2 + F_{\text{тр}Y}^2} = N \sqrt{K_{\text{тр}X}^2 \cos^2 \beta + k_{\text{тр}Y}^2 \sin^2 \beta},$$

где множитель  $\sqrt{K_{\text{тр}X}^2 \cos^2 \beta + k_{\text{тр}Y}^2 \sin^2 \beta}$  называется эффективным коэффициентом трения.

А угол  $\beta$  запишется как,

$$\text{tg } \beta = \frac{F_{\text{тр}X}}{F_{\text{тр}Y}}.$$

Разница между величинами углов приложения движущей силы и направления движения будет представлять собой угол увода  $\theta = \alpha - \beta$  (угол увода).

В случае взаимодействия пары изотропных тел угол  $\alpha = \beta$ , и поэтому направление движения пары трения не имеет принципиального значения.

Как показано в работах [105, 106], при экспериментальном исследовании анизотропного трения с методической точки зрения наиболее важными являются два случая формирования траектории движения пары трения, проявляющиеся при свободном и вынужденном движении пары трения.

В первом случае, при свободном движении изотропного тела по анизотропной поверхности другого под действием вынуждающей силы  $P$  тело будет двигаться в направлении вектора движения  $\vec{e}$ , при этом по точкам начала и конца движения можно определить угол увода  $\theta$ . Однако, регистрация силовых параметров движения в данном случае затруднена, т.к. любой контакт измерительных элементов со свободно движущимся объектом влияет на условия контакта.

Подобные случаи взаимодействия объектов характерны главным образом для транспортных операций и некоторых других устройств. Например, в случае свободного движения анизотропного тела по поверхности изотропного первое будет стремиться к развороту до тех пор, пока не достигнет минимально возможного для данной пары трения коэффициента трения, фактически этот эффект можно использовать для устройств ориентации объектов, применяемых при создании автоматизированных производственных линий.

Во втором случае, пара трения совершает вынужденное движение по заданной траектории и фиксированном взаимном положении индентора и образца. При этом возникает дополнительное силовое воздействие на контактирующие объекты расположенное ортогонально главному направлению движения и представляющее собой силу  $F_{\perp}$  (Рис. 6).

Составляющие силы трения  $F_{\text{тр}}$  на направление движения  $\vec{e}$  и на нормальное к нему запишутся [105]:

$$F_{\parallel} = F_{\text{mpX}} \cos \alpha + F_{\text{mpY}} \sin \alpha = -N(K \cos^2 \alpha + k \sin^2 \alpha),$$

$$F_{\perp} = -F_{\text{mpX}} \sin \alpha + F_{\text{mpY}} \cos \alpha = N(K - k) \sin \alpha \cos \alpha .$$

А для угла увода получим выражение,

$$\text{tg } \theta = -\frac{F_{\perp}}{F_{\parallel}} = \frac{(K - k) \text{tg } \alpha}{K + k \text{tg}^2 \alpha} , \quad \theta = \text{arctg} \left( \frac{F_{\perp}}{F_{\parallel}} \right) .$$

Величина дополнительного силового воздействия действующего ортогонально направлению действия возмущающей силы, приводящей в движение пару трения, может играть как положительную, так и отрицательную роль в процессах трения.

Проведение экспериментального анализа фрикционных характеристик анизотропных материалов затрудняется тем, что положение главных осей скольжения, как правило, отличается от приведенного выше варианта ортотропного трения, т.к. в общем случае осей скольжения может быть несколько, при этом их пространственное положение относительно декартовых координат  $X$  и  $Y$  неизвестно.

В этих условиях, изучение трибологических свойств материалов от направления движения может быть произведено путем анализа симметрии геометрической фигуры (замкнутой линии анизотропии - анизотропы), изображающей это изменение в полярных координатах [2].

Так для построения анизотроп в соответствии со способами [5, 6], необходимо произвести экспериментальное определение силовых параметров трения при движении изотропного индентора (щупа, измерительного элемента) по поверхности анизотропного образца по нелинейной (круговой) траектории под действием нормальной силы  $N$ . При этом необходимо обеспечить сбор информации о мгновенных значениях компонент  $F_{\text{тр}x}$  и  $F_{\text{тр}y}$  вектора трения.

По результатам проведенного испытания производится построение анизотропы коэффициента трения, может быть получена информация о фактическом положении осей скольжения, уровнях коэффициентов трения компонент вектора силы трения, а также рассчитаны углы увода при изменении направления движения в паре трения.

Следовательно, если принять данную модель анизотропного трения в качестве базовой модели фрикционного взаимодействия поверхностей материалов с анизотропной шероховатостью, то для проведения эффективного анализа силовых параметров процесса трения необходимо наличие

многокомпонентных устройств измерения сил, функционирующих в составе многоканальной системы сбора аналитической информации.

## **2.2. Выбор кинематической схемы установки**

Кинематическая схема относится к аппаратному обеспечению системы средств и методов испытания в рамках рассматриваемой задачи построения установки и определяет базовые объекты фрикционного взаимодействия.

Рассмотрим более подробно взаимодействие двух объектов вращения, в частности цилиндрических тел. Каждое из тел образовано двумя поверхностями: *торцевой* (как правило, с плоской поверхностью) и *боковой* (поверхность вращения образованная вращательным перемещением образующей линии вокруг неподвижной оси) [20].

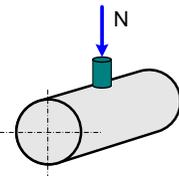
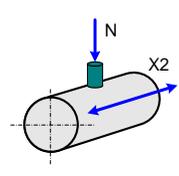
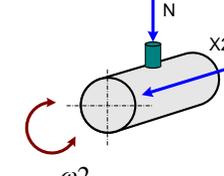
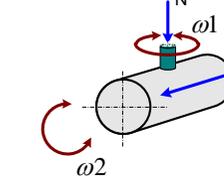
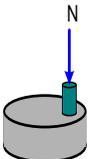
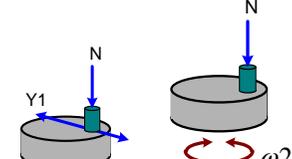
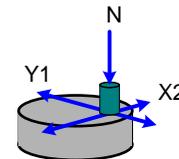
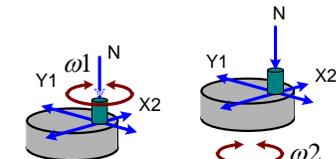
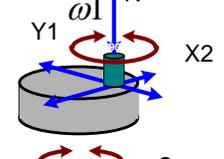
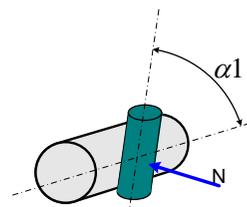
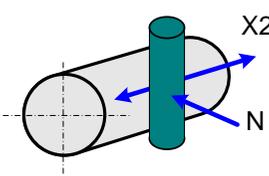
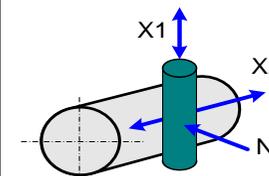
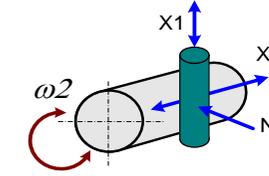
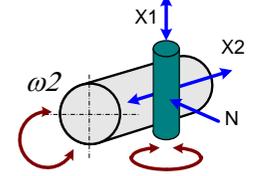
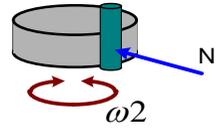
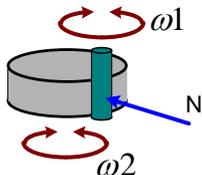
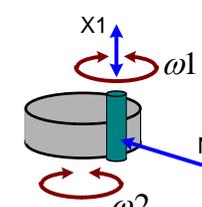
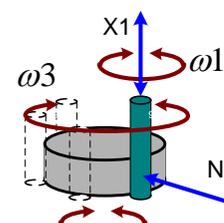
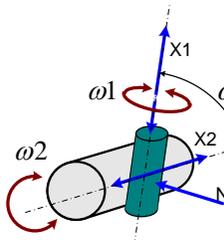
Для такой пары трения при различном сочетании контактирующих поверхностей возможны три базовые кинематические схемы (Табл. 3):

- торец – образующая,
- торец – торец,
- образующая – образующая.

Для каждой из базовых схем можно реализовать, как поступательные (линейные или вращательные), так и более сложные траектории относительного движения пары трения, в зависимости от количества необходимых степеней свободы пары трения.

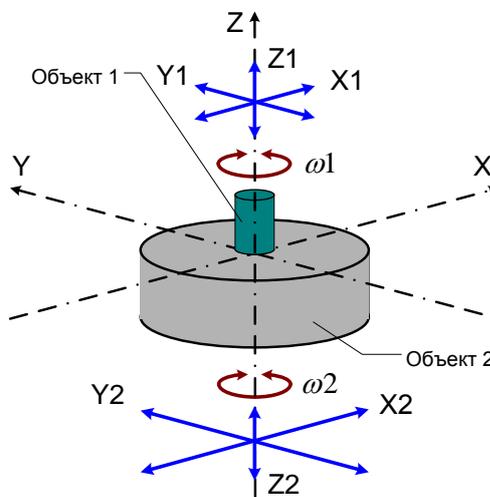
В первой главе (Табл. 1) в качестве кинематической схемы “Оптимальной” установки было предложено использовать схему “штифт - поверхность”, относящуюся к схемам с малым значением коэффициента взаимного перекрытия  $K_{B3} \rightarrow 0$ .

## Классификация схем взаимодействия поверхностей цилиндрических тел

Кон- такт	Базовая схема	Количество степеней свободы (без учета координаты нагружения N)					
		1	2	3	4	5	
Торец- образующая							
Торец- торец							
Образующая-образующая		$\alpha 1 = 90$ град.					
		$\alpha 1 = 0$ град.					 $90 > \alpha 1 > 0$ град.

В таком случае необходимо в качестве “штифта” рассматривать цилиндрическое тело контактирующее торцом, а в качестве “поверхности” плоский торец цилиндра или его боковую поверхность, то можно утверждать, что схемы “торец-образующая” и “торец-торец” являются частными случаями схемы “штифт - поверхность”, которая является наиболее подходящей к анализу анизотропных материалов.

Рассмотрим более подробно особенности построения структуры испытательной установки на примере реализации торцевого контакта двух тел цилиндрической формы (Рис. 7).



**Рис. 7. Схема степеней свободы пары трения “торец - торец”**

Можно выделить основные степени свободы относительного движения в декартовых координатах:  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ . Где индекс единица соответствует индентору (объект 1), а индекс двойка соответствует испытываемому образцу (объекта 2). Относительное движение по оси  $Z$  совпадает с направлением приложения нормальной силы нагружения  $N$ , однако перемещение по оси  $Z$  ничтожно мало и фактически соответствует линейному износу пары трения в процессе движения. Поэтому, измерение, контроль и управление величиной силы нагружения  $N$  может рассматриваться как отдельная задача для системы управления экспериментом.

Для реализации полного набора испытательных схем для контакта “торец-торец” пары цилиндрических тел (Табл. 3) необходимо: обеспечение относительного движения образцов по четырем координатам и создание

нагружающего усилия на образцы. Поскольку реализация вращения образцов не представляет затруднений, то наибольший интерес с точки зрения исполнения представляет система относительных перемещений образцов по взаимно-перпендикулярным направлениям.

Такая схема позволяет создавать нелинейные траектории относительного движения пар трения и является неотъемлемой составной частью более сложных схем, реализующих независимое управление по большему числу степеней свободы исследуемых объектов.

Следовательно, реализация кинематической схемы испытания “торец - торец” в двухкоординатном исполнении позволяет реализовать необходимые типы перемещений исследуемых объектов, индентора по нелинейным траекториям на анизотропной поверхности материала, что позволит расширить функциональные возможности испытательного оборудования и перейти к решению более широкого круга исследовательских задач.

### ***2.3. Конструктивные решения устройств измерения сил трения***

Для рассматриваемой задачи регистрации и контроля силовых параметров процесса трения с учетом возможной неколлинеарности положения векторов трения и скорости главного движения, в соответствии со способами [5, 6], необходимо иметь три измерительных элемента для согласованной во времени регистрации двух компонент силы трения и силы нагружения.

Анализ технических решений в области устройств измерения сил показал, что имеются конструктивные решения многокомпонентных датчиков, например трехкоординатный датчик [14]. Подобные устройства используются в составе измерительно-координатных машин и предназначены для измерения и контроля геометрии изделий сложной формы. Они обладают высокой чувствительностью каждой из компонент и малыми размерами применяемых измерительных элементов (щупов).

Применение известных конструкций многокоординатных датчиков для испытания материалов требует внесения значительных конструктивных изменений связанных с наличием нагружающей силы.

Поскольку в качестве кинематической схемы установки для установки выбрана схема с коэффициентом взаимного перекрытия стремящимся к нулю (см. Табл. 2), то существенное влияние на точность и качество результатов оказывает размерный фактор образцов. Если один из контактирующих объектов значительно меньше другого, то привязка измерительного элемента к нему может обеспечить большую чувствительность, т.к. тот по определению обладает значительно меньшим весом и инерционностью, что является важным при регистрации динамических характеристик трения [109].

С учетом вышеизложенного нами были сформулированы требования к устройству измерения сил трения:

- регистрация знакопеременных сил,
- повышение точность измерения сил трения,
- независимость измерения компонент вектора трения.

Согласно заявленным требованиям разработан ряд оригинальных измерительных устройств [26, 57], конструктивно выполненных в одно- и двух-координатном исполнении.

В качестве базовой конструкции приняли рычажную схему однокомпонентного устройства [7], обеспечивающую измерение сил трения при однокоординатном поступательном перемещении образцов по схеме “штифт-плоскость”, на основе которой предложена усовершенствованная конструкция [57], обеспечивающая регистрацию знакопеременных сил при возвратно-поступательном движении (Рис. 8).

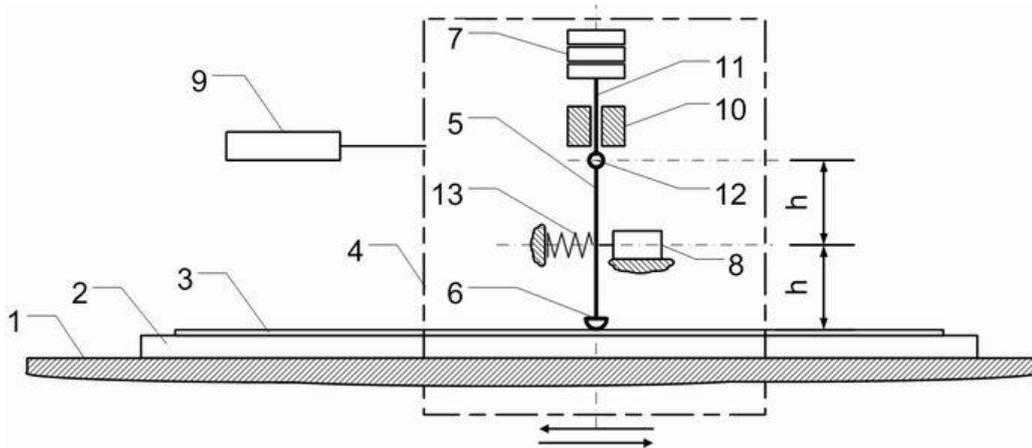


Рис. 8. Схема устройства для измерения сил трения

где 1- основание, 2 - держатель образца, 3 - образец, 4 - каретка, 5 - держатель контртела, 6 - контртело, 7 - узел нагружения, 8 - измеритель силы трения, 9 - привод перемещения, 10 - направляющая, 11 – шток, 12 – шарнир, 13 – пружина.

Устройство содержит основание 1, держатель 2 образца 3, каретку 4 с держателем 5 контртела 6, узел 7 нагружения образца 3 и контртела 6, измеритель силы трения 8, привод 9 перемещения держателя 5 и каретки 4. Направляющая 10 закреплена на каретке 4 перпендикулярно поверхности образца 3, а шток 11, перемещающийся в направляющей 10 поступательно.

Узел нагружения 7, закрепленный на одном конце штока 11, шарнир 12, расположенный на другом конце штока 11 с осью качания параллельной поверхности образца 3 и перпендикулярной направлению перемещения каретки 4 и контртела 6.

Держатель 5 в виде стержня, один конец которого закреплен на оси шарнира 12, а на другом крепится контртело 6, пружина 13 и измеритель силы трения 8, установленные на каретке оппозитно с разных сторон держателя 5 контртела 6 и параллельно рабочей поверхности образца 3, на равном расстоянии от оси шарнира 12 до рабочей поверхности образца 3 и удерживающих держатель 5 контртела 6 перпендикулярно плоскости образца 3 усилием, выбираемым из условия необходимого диапазона измерения сил трения в обоих направлениях.

Принцип работы устройства заключается в том, что на держателе 2 и 5 устанавливают соответственно образец 3 и контртело 6. Каретку 4 размещают в исходном состоянии, например, в правом крайнем положении. Приводят в контакт образец 3 и контртело 6, нагружают их с помощью узла нагружения 7 и включают привод 9. При движении контртела 6 относительно образца 3 возникает сила трения, стремящаяся повернуть держатель 5 вокруг оси шарнира 12 в направлении противоположном движению контртела 6.

Поскольку держатель 5 удерживается пружиной 13 и измерителем силы трения 8 в равновесии, перпендикулярно плоскости образца 3 усилием равным половине диапазона измерителя 8, то появление дополнительной силы приведет к смещению равновесия сил и измеритель 8 покажет силу в два раза большую чем, действующая сила трения между контртелом 6 и образцом 3, в соответствии в отношении плеч сил относительно оси шарнира 12.

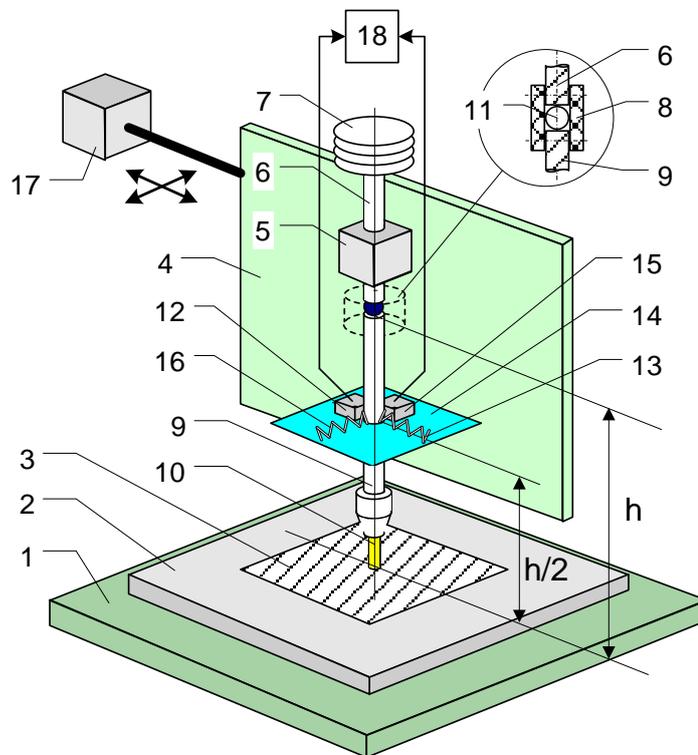
Регистрация знакопеременных сил трения обеспечивается тем, что узел нагружения, шток, передающий нормальную нагрузку на держатель, держатель с контртелом, имеют симметричную конструкцию относительно оси крепления последних в направляющей, закрепленной на каретке, а пружина и измеритель силы трения, установленные на каретке оппозитно с разных сторон держателя контробразца и параллельно поверхности образца, удерживают держатель контробразца перпендикулярно плоскости образца усилием, выбираемым из условия необходимого диапазона измерения сил трения.

В случае обеспечения равных диапазонов в обоих направлениях это условие равно половине диапазона измерителя. При движении контртела относительно образца возникает сила трения, стремящаяся повернуть держатель вокруг оси шарнира в направлении противоположном движению контртела, которая регистрируется измерителем.

Повышение точности измерения малых сил трения достигается тем, что пружина и измеритель силы трения установлены на каретке на равном расстоянии от оси шарнира до рабочей поверхности образца и при движении контртела относительно образца измеритель покажет силу в два раза большую,

чем действующая сила трения между контртелом и образцом, в соответствии в отношении плеч сил относительно оси шарнира. Причем при регистрации знакопеременной силы трения в конструкции устройства используется однополярный измеритель силы трения.

Конструктивные решения однокоординатного устройства регистрации знакопеременных сил трения при организации возвратно-поступательного движения позволили разработать более совершенное двухкоординатное устройство регистрации сил [26], способное производить измерение компонент вектора силы трения в двух взаимно-перпендикулярных направлениях (Рис. 9).



**Рис. 9.** Схема двухкоординатного устройства измерения сил трения: 1 – основание, 2 – держатель, 3- образец, 4 – подвижная каретка, 5 – направляющая, 6 – шток, 7 – узел нагружения, 8 – гибкая муфта, 9 – держатель контртела, 10 – контртело, 11 – шарик, 12 – измеритель силы трения, 13 – пружина, 14 – плоскость установки датчиков, 15 – дополнительный измеритель силы трения, 16 – дополнительная пружина, 17 – привод перемещения, 18 – система сбора данных.

Конструкция устройства содержит основание 1, закрепленный на нем держатель 2 образца 3, установленную на основании 1 в направляющих (условно не показаны) подвижную каретку 4 с направляющей 5, штоком 6,

расположенным перпендикулярно рабочей поверхности образца 3 с возможностью поступательного перемещения в направляющей 5.

На одном конце штока 6 размещен узел нагружения 7, а на другом гибкая муфта 8, соединяющая шток 6 с держателем 9 контртела 10 с возможностью пространственного качания держателя 9 относительно точки контакта с шариком 11, установленным соосно штоку 6 и размещенным внутри гибкой муфты 8 между торцами штока 6 и держателя 9.

Измеритель силы трения 12 и пружина 13, закреплены на каретке 4 оппозитно с разных сторон держателя 9 контртела 10 в плоскости 14 в направлении относительного движения образца 3 и контртела 10.

Дополнительные измеритель силы трения 15 и пружина 16, установлены на каретке 4 аналогично первым в плоскости 14, но ортогонально направлению относительного движения образца 3 и контртела 10. Причем плоскость 14 расположена на расстоянии  $\frac{1}{2}$  от точки контакта держателя 9 контробразца 10 с шариком 11 до рабочей поверхности образца 3.

Привод 17, установлен на основании, обеспечивает движение каретки 4 с держателем 9 контртела 10, а система сбора данных 18 своими входами подключена к выходам измерителей 12, 15.

Вместе с тем, гибкая муфта 8 фиксирует взаимное угловое положение штока 6 с держателем 9 и выполнена упругой в осевом направлении для фиксации положения шарика 11 усилием, превышающим вес держателя 9 с контртелом 10.

Работа устройства реализуется следующим образом. В держателях 2 и 9 устанавливаются образец 3 и контртело 10. Каретку 4 размещают в исходной точке траектории движения. Приводят в контакт образец 3 и контртело 10, нагружают их с помощью узла нагружения 7 и включают привод 17, обеспечивающий заданную траекторию движения (линейную, круговую, овальную и т.д.) контртела 10 по поверхности образца 3. При движении контртела 10 относительно образца 3 возникает сила трения, которая пытается повернуть держатель 9 относительно точки его контакта с шариком 11 в

направлении действующего вектора трения, который в общем случае (например, при контакте анизотропных тел) не совпадает с направлением противоположным направлению движения контртела 10.

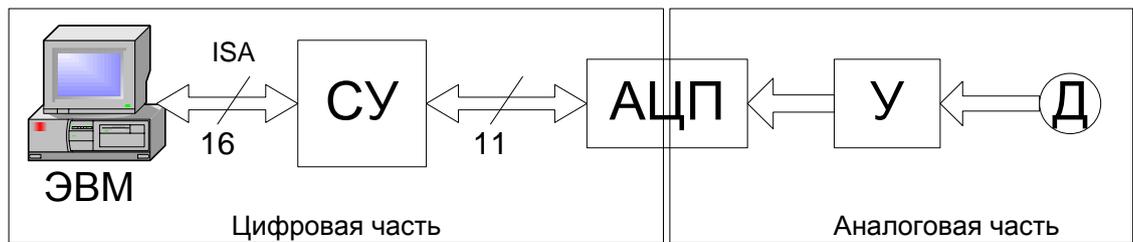
Поскольку держатель 9 удерживается пружинами 13 и 16 и измерителями силы трения 12 и 15 в равновесии, перпендикулярно плоскости образца 3 усилием равным половине диапазона измерителей 12 и 15, то появление дополнительных составляющих силы трения по каждой из ортогональных координат приведет к смещению равновесия сил и измерители 12 и 15 покажут силу в два раза большую, чем действующие силы трения между контртелом 10 и образцом 3 по заданным ортогональным направлениям, в соответствии с отношением плеч сил действующих относительно точки контакта держателя 9 и шарика 11.

Регистрация информации о мгновенных значениях сил трения действующих в двух взаимно перпендикулярных направлениях и ее последующая обработка с использованием системы сбора данных 18 позволяет вычислить направление и значение действующего вектора трения в любой точке траектории движения образцов.

Практическая реализация схемных решений и предложенных конструкций устройств измерения сил трения, требует определения их параметров с учетом элементной базы системы сбора данных.

***Параметры двухкоординатного устройства измерения сил трения и методика его градуировки.***

Рассмотрим основные элементы схемы одного типового измерительного канала для системы сбора аналитической информации (Рис. 10), построенной с использованием пьезо/тензо-датчиков, аналого-цифрового преобразования и вычислительных средств.



**Рис. 10 Типовая схема одного измерительного канала.**

На представленной схеме можно выделить две условные части: аналоговую и цифровую.

Погрешности такой системы измерения можно распределить на три группы в соответствии с производимыми операциями:

- аналоговые преобразования,
- цифровые преобразования,
- дискретизация.

Известно, что цифровая часть схемы не вносит существенных погрешностей в процесс регистрации, например, А.М. Григоренко [17] отмечает, что: “Погрешностью цифрового преобразования (квантования) при достаточной разрядности АЦП, вычислительных устройств и накопителей информации обычно пренебрегают, т.к. уже при восьми разрядах погрешность квантования составляет менее 0,1%. Обычно разрядность квантования значительно больше. Погрешность же дискретизации можно принимать в три раза меньшей, чем совокупная методическая и инструментальная погрешность”. Объем регистрируемых данных зависит от частоты дискретизации при измерении входного аналогового сигнала.

Поэтому, наибольшее влияние на качественные показатели канала измерения оказывает аналоговая часть, т.к. именно она осуществляет преобразование реальной физической величины в условный электрический сигнал. Сегодня выпускается широкая номенклатура датчиков и преобразователей, различающихся как по форме исполнения, так и по номинальным характеристикам. Поэтому, применение известных сертифицированных измерительных датчиков, преобразователей, согласующих устройств, представляется наиболее рациональным при разработке системы сбора данных.

Номинальные диапазоны измерения сил на испытательной установке будут определяться не только параметрами измерительного датчика, но и конструктивными особенностями устройств измерения, с учетом отмеченной выше специфики трибологических испытаний.

При разработке устройств измерения выбрали диапазон малых значений регистрируемых знакопеременных сил трения  $-150 < F_{тр} < +150$  грамм на основании следующих условий:

- точности измерения компонент вектора силы трения,
- необходимостью проведения испытаний в области упругих деформаций поверхностного слоя, т.к. значительные контактные нагрузки приводят к его пластической деформации, что влияет на стабильность условий испытания материалов.

На основании приведенных требований при создании установки в конструкции устройства измерения сил применили сертифицированные тензометрические датчики *FSG15N1A* Канадской фирмы HoneyWell (Табл. 4), использующие мостовую схему включения тензосопротивлений, выполненные в едином корпусе, что обеспечивает стабильность параметров измерительного элемента.

**Параметры датчика силы FSG15N1A при напряжении питания 10V и 25°C**

п/п	Параметр	Минимальное	Типовое	Максимальное
1	Напряжение питания, В	-	10	12
2	Смещение нуля мВ	-30	0	30
3	Действующая сила, Грамм	0	-	1500
4	Чувствительность, мВ/грамм	0,20	0,24	0,28
5	Температурный дрейф, мВ 25→0°C, 25→50°C		±0,1	
6	Вх. Сопротивление, кОм	4,0	5,0	6,0
7	Вых. Сопротивление, кОм	4,0	5,0	6,0
8	Сила разрушения, Грамм			4500
9	Вибрации, кГц	0,001	-	2

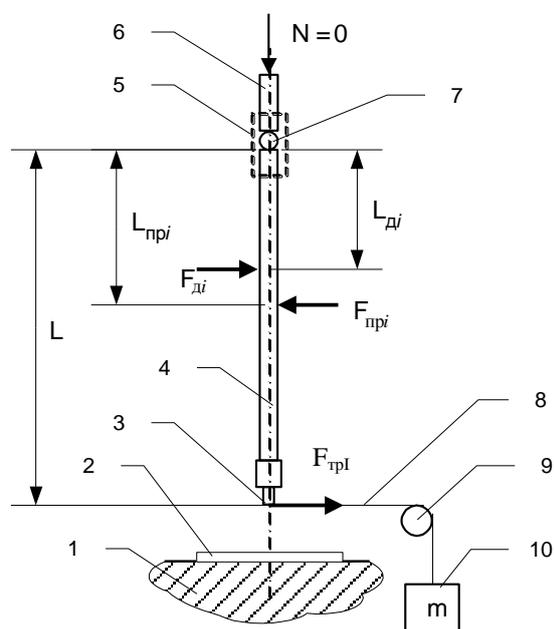
В качестве аналого-цифровых преобразователей использовали десяти-разрядное устройство Ф7077/1, которое обеспечивает длительность одного преобразования не хуже 8 мксек и позволяет регистрировать процессы с частотами до 5 кГц и обеспечивает регистрацию входных уровней сигналов от -10В до +10В.

Для согласования уровня входного сигнала АЦП и выходного сигнала датчика произведен расчет параметров усилителя  $K_u = 27,7$ . Который вычислен отношением положительного диапазона аналогового входа АЦП к показанию датчика силы при максимальной нагрузке при номинальном напряжении питания и чувствительности 0, 24 мВ на грамм.

Для обеспечения стабильности параметров нескольких каналов применили дифференциальные усилители RL-4DA200 (г.Таганрог), которые представляют собой четыре дифференциальных усилителя, заключенные в единый корпус и имеют калиброванные коэффициенты усиления, выполненные по нашему заказу в соответствии с расчетным коэффициентом усиления  $K_u$ .

Выбор элементной базы одного канала системы сбора аналитической информации позволяет перейти к определению параметров двухкоординатного устройства, путем экспериментального построения градуировочных характеристик.

Градуировка датчиков сил трения ( $F_{\text{тр}X}$ ,  $F_{\text{тр}Y}$ ), проведена экспериментально при отсутствии силы нагружения ( $N=0$ ) гравиметрическим методом согласно эквивалентной схеме (Рис. 11).



**Рис. 11. Эквивалентная схема нагружения датчика силы по  $i$  – ой оси:  $N$  – сила нагружения;  $F_{\text{при}}$ ,  $F_{\text{ди}}$  – сила предварительного поджатия и реакции датчика;  $F_{\text{тр}i}$  – составляющая силы трения;  $L_{\text{ди}}$ ,  $L_{\text{при}}$ ,  $L$  – расстояния от точки контакта с шариком 7 до датчика, пружины и рабочей поверхности индентора 3.**

Эквивалентная схема устройства для регистрации силы трения в одной из плоскостей установки измерительного элемента состоит из столика 1 с образцом 2, индентора 3, закрепленного в держателе 4, который в свою очередь при помощи гибкой муфты 5 соединен с неподвижной направляющей 6, причем между торцами направляющей и держателя размещен шарик 7, обеспечивающий точечный контакт последних.

На держатель 4 действует сила реакции датчика  $F_{\text{ди}}$ , расположенная на расстоянии  $L_{\text{ди}}$  от места контакта с шариком 7, сила натяжения пружины  $F_{\text{при}}$ , расположенная на расстоянии  $L_{\text{при}}$  от места контакта с шариком 7.

Действие силы трения моделируется в виде силы  $F_{\text{тр}i}$ , прикладываемой к концу индентора 3, находящемуся на расстоянии  $L$  при помощи гибкой нити 8 переброшенной через блок 9 и нагружаемой контрольным грузом 10.

Методика градуировки заключается в следующем: к индентору 3, крепится гибкая нить 8 (параллельно плоскости образца 2, в направлении установки датчика силы), нагружается через блок контролируемой массой 10, моделируя силу  $F_{\text{тр}i}$ , после чего датчиком производится регистрация действующего значения силы  $F_{\text{д}i}$ .

В общем случае для эквивалентной схемы (Рис. 11) уравнение равновесия моментов для любой из координат X и Y запишется:

$$M_{\text{д}i} = M_{\text{пр}i} \pm M_{\text{тр}i},$$

где  $M_{\text{д}i} = F_{\text{д}i} L_{\text{д}i}$  - момент сил в точке установки датчика,

$M_{\text{пр}i} = F_{\text{пр}i} L$  - момент сил в точке установки пружины,

$M_{\text{тр}i} = F_{\text{тр}i} L$  - момент сил трения в точке касания индентора 3.

Причем  $M_{\text{тр}i}$  имеет положительный знак при совпадении с направлением действия  $M_{\text{пр}i}$ , в противном случае отрицательный.

Алгоритм проведения одного градуировочного измерения разбит на 3 этапа (Рис. 12).

### 1 Этап

Регистрация нулевых показаний системы измерения при отсутствии воздействия градуировочной массы. В этом случае  $M_{\text{тр}i} = 0$ , а моменты от действия пружины поджатия и реакции датчика уравновешены  $M_{\text{д}i} = M_{\text{пр}i}$ .

### 2 Этап

Производится консольное нагружение устройства контролируемым грузом 11. При этом в системе измерения протекают переходные процессы.

### 3 Этап

Регистрация системой измерения величины силы, приложенной в точке крепления гибкой нити 10 ( $M_{\text{тр}i} \neq 0$ ,  $F_i = m$ ). Причем изгибающим моментом самого держателя пренебрегли, вследствие его конструктивных особенностей и малых уровней нагружающих усилий до 150 грамм.

Уравнение для условного момента трения в этом случае запишется в виде  $M_{\text{тр}i} = F_i * L$ . Варьирование силы  $F_i$  на инденторе 3 обеспечивается набором образцовых грузов 11 в диапазоне 10-150 г с шагом 10 г.

Переходные процессы на втором этапе завершаются примерно за 1 секунду (Рис. 12). Оставшееся время до окончания второго этапа используется для успокоения системы, т.к. нагружение системы контрольным грузом производится оператором.

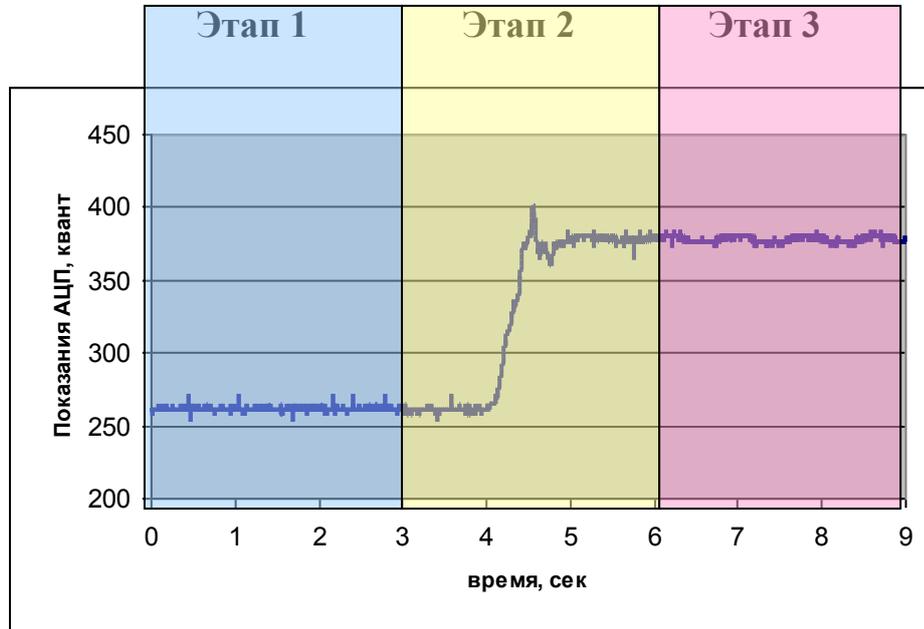


Рис. 12. Типовая временная диаграмма алгоритма градуировки (груз весом 120 грамм).

Разность среднего значения показаний ненагруженного и нагруженного датчика в квантах АЦП соответствует массе груза. Аналогично проводилось еще 9 экспериментов в условиях повторяемости.

Из полученных данных исключены промахи по критерию Романовского, затем с использованием методом наименьших квадратов построены градуировочные характеристики (Рис. 13).

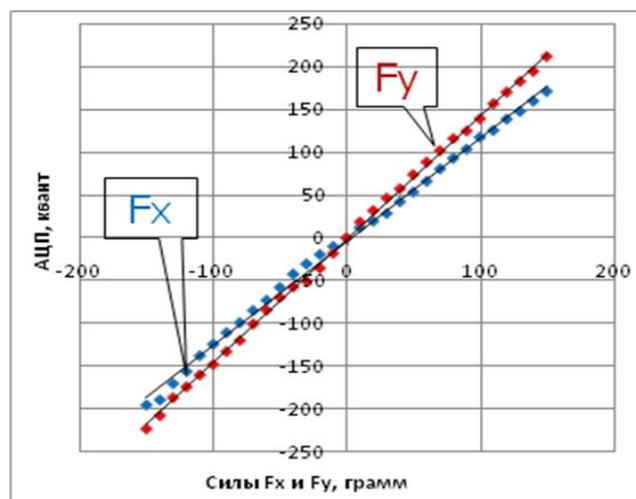


Рис. 13 Градуировочные характеристики устройства по осям X( $F_x$ ) и Y( $F_y$ ).

В силу того, что  $L_{дх} \neq L_{ду}$ , полученные градуировочные характеристики не совпадают для различных осей X и Y. Рассчитанные значения доверительных интервалов для коэффициентов градуировочных характеристик представлены ниже (Табл. 5).

Табл. 5

Доверительные интервалы коэффициентов градуировочных характеристик (P = 0,95)

Координата устройства	Коэффициенты		Уравнение (с учетом округления)
	$b \pm \Delta b$	$a \pm \Delta a$	
X	$1,20 \pm 0,03$	$-5,07 \pm 1,29$	$F_x = 1,20x - 5,07$
Y	$1,45 \pm 0,02$	$-1,71 \pm 0,46$	$F_y = 1,45y - 1,71$

Таким образом, задача регистрации и контроля силовых параметров процесса трения в условиях неколлинеарного положения векторов трения и скорости главного движения достигается применением многоканальной системы сбора аналитической информации с использованием оригинального двухкомпонентного устройства измерения [26].

Определение его параметров проведено на основе гравиметрической методики градуировки, с учетом параметров элементов измерительных каналов системы сбора данных (типа измерительного элемента - датчика силы *FSG15N1A*, усилителей аналоговых сигналов), и в целом конструктивных особенностей устройства. Построены градуировочные характеристики устройства и оценены доверительные интервалы для знакопеременных сил в диапазоне от -150 до 150 грамм.

#### **2.4. Разработка системы управления измерительным элементом**

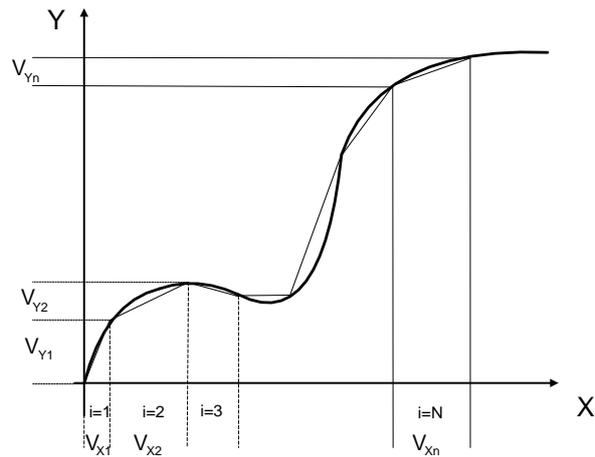
Система управления перемещением измерительного элемента на плоскости создает относительное перемещение образцов по заданной траектории. Нормируемыми диапазонами скоростей машин трения являются следующие, м/с : 0-0,001; 0,001-0,01; 0,01-0,1; 0,1-1; 1-5; 5-20; 20-50; 50-100; 100-200.

Наиболее приемлемым скоростным диапазоном при построении установки можно считать диапазон малых скоростей относительного движения от 0 до 0,001 м/с. Это позволит исключить влияние динамического фактора на процесс проводимого анализа и повысить точность определения силовых параметров трения в условиях испытания анизотропных материалов.

Анализ базовой кинематической схемы установки показал, что для эффективного управления относительным перемещением образцов на нелинейных траекториях в плоскости контакта необходимо обеспечить независимое управление по двум взаимно-перпендикулярным координатам. А с учетом возможного управления нагружающим устройством система управления должна содержать не менее трех независимых каналов управления.

Одним из известных способов задания нелинейной траектории с использованием многокоординатных приводов движения является кусочно-линейная аппроксимация, причем степень приближения определяется количеством линейных отрезков (Рис. 14).

Для создания нелинейной траектории движения индентора требуется ее предварительное преобразование в последовательный набор линейных участков. На каждом из них могут быть заданы различные параметры процесса испытания: скорость движения  $V$ , нагрузка  $N$  и т.п. Причем скорости  $V_{xi}$ ,  $V_{yi}$  по соответствующим координатам задаются длиной участка  $L_{xi}$ ,  $L_{yi}$ , и временем  $T_i$  необходимым для прохождения этого участка.



**Рис. 14. Кусочно-линейная аппроксимация нелинейной траектории движения индентора:  $i$  – номер участка,  $N$  – количество участков,  $V_x, V_y$  – скорости по осям  $X, Y$  на участке траектории.**

Аппроксимация нелинейной траектории кусочно-линейными отрезками определяет характер формирования управляющей информации для системы управления (Табл. 6).

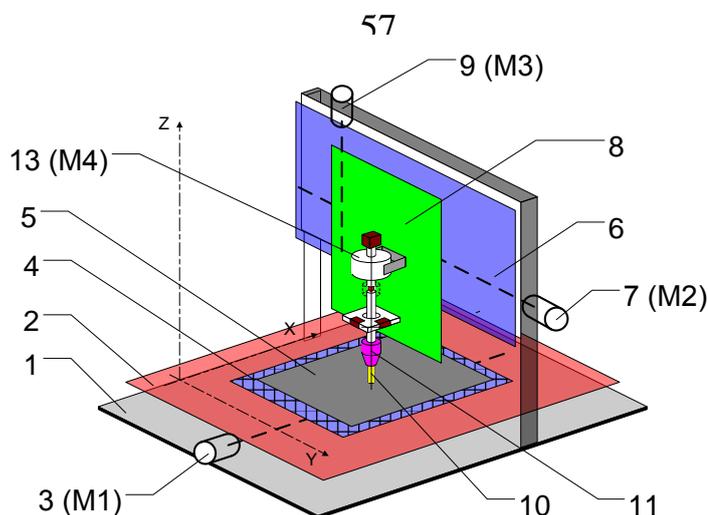
**Табл. 6**

**Файл задания для системы управления.**

Участок N	Перемещение Ось X, шаг	Перемещение Ось Y, шаг	Нагрузка Ось Z, шаг	Вращение Ось U, шаг	Время T
1	12	34	45	0	10
2	15	23	30	0	15
---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---
N	0	32	50	5	43

Программа управления считывает табулированные управляющие данные перед началом проведения эксперимента и осуществляет согласованное во времени независимое управление каждым каналом в процессе проведения испытания. Причем в данной версии два канала  $X$  и  $Y$  определяют траекторию движения индентора, канал  $Z$  определяет уровень нагружения, а канал  $U$  зарезервирован для управления угловым положением одного из образцов.

Общая компоновочная схема привода перемещения измерительного элемента представлена ниже (Рис. 15).



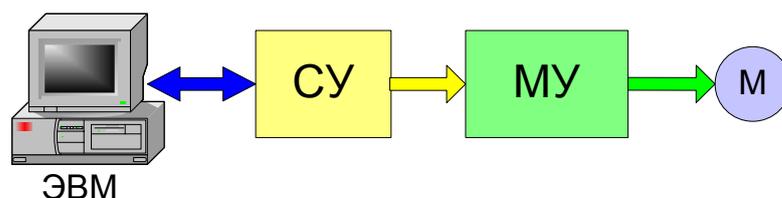
**Рис. 15. Схема трехкординатного привода перемещения измерительного элемента**

Компоновочная схема устройства содержит: - основание 1, каретку 2 перемещения по оси X, приводимую в движение двигателем 3(M1), установленным на основании 1. На каретке 2 закреплен держатель 4 фиксирующий положение образца 5. Каретка 6 перемещения по оси Y, приводимая в движение шаговым с двигателем 7(M2), установленным на основании 1. Каретка 8 перемещения по оси Z, установленная в направляющих на каретке 6 и приводимая в движение шаговым с двигателем 9(M3), установленным на каретке 6. Образец 10 (индентор), установленный в держателе 11, фиксируется на каретке 8 перемещения по оси Z.

Двигатель вращения индентора 13(M3) обеспечивает возможность дальнейшего совершенствования системы управления процессом испытания за счет управления угловым положением индентора, расширяя функциональные возможности установки в целом. Применение данного параметра управления может служить отправной точкой при создании методов управления фрикционным взаимодействием пар трения.

На типовой блок схеме одного канала управления (Рис. 16) выделяют следующие элементы:

- устройство управления (ЭВМ),
- согласующее устройство (СУ),
- модули управления двигателями (МУ),
- электрические двигатели (М).



**Рис. 16. Блок схема одного канала управления**

При создании ИК в качестве управляющей ЭВМ использовали персональный компьютер (ПК) семейства IBM-PC с процессором Intel Pentium 200 МГц. Согласующее устройство установлено на системной шине компьютера и производит передачу дискретной управляющей информации от ЭВМ к модулям управления двигателей.

В качестве устройств управления шаговыми двигателями использованы модули немецкой фирмы KEMO electronic (stepper-motor-interfase M106), которые обеспечивают гальваническую развязку силовой части схемы и логической (цифровой) схемы управления (Табл. 7). Для управления двигателем используются два логических входа, имеющим логический уровень ТТЛ.

**Табл. 7**

**Параметры модулей управления M106 (KEMO electronic)**

Параметр	Значение
Количество сигналов управления, шт	2
Напряжение питания, В	4-18
Номинальный ток, А	2
Количество выводов, шт	4
Частота импульсов, Гц	256

В качестве исполнительных двигателей используются шаговые двигатели FL39ST44-0304A для обеспечения перемещений по осям X и Y, нагружения Z и управления угловым положением индентора U, технические данные двигателей приведены в Табл. 8.

Техническая характеристика шагового двигателя FL39ST44-0304A

Параметр	Значение
Напряжение питания, В	12
Номинальный ток, А	0,3
Входное сопротивление, Ом	40
Угол шага, Град	1,8
Количество шагов, Шт.	200
Момент, г-см	2800
Количество обмоток, Шт.	2
Количество выводов, Шт.	4
Частота рабочих импульсов, Гц	2000
Размеры оси(диаметр x высота), мм.	5x23
Размеры(диаметр/высота), мм.	39/44

Поступательное движение по каждой из координат создается за счет преобразования вращательного движения в поступательное при помощи передачи винт-гайка (пара трения: сталь-фторопласт), стальной винт имеет резьбу с шагом 3 мм на оборот, а применение шагового двигателя FL39ST44 позволяет управлять вращением приводного винта с разрешением до 200 шагов на оборот.

На первом этапе разработки установки алгоритм управления приводом не предполагал использование системы слежения за фактическим перемещением индентора, т.к. это требует значительного увеличения каналов сбора информации. Поэтому алгоритм управления использует минимальный линейный шаг движения индентора равный 0,06 мм, состоящий из 4 шагов двигателя. Это демонстрирует наличие фактического резерва повышения точности перемещения, который может достигать значения в 0,015мм.

Этот запас по точности перемещения может быть использован при организации малых относительных перемещений, оставляя резервы для совершенствования алгоритмического обеспечения установки.

Поскольку, частотный диапазон модулей управления не превышает 250 Гц, а система регистрации данных может обеспечить работу на частотах до 5 кГц, то система управления экспериментом является существенно более

медленным процессом, что учтено при реализации алгоритма управления установки.

Таким образом, в результате реализации базовой кинематической схемы “штифт - поверхность” с применением многокоординатного привода движения стало возможным реализовать нелинейные траектории относительного перемещения образцов. В качестве индентора (штифта) используются цилиндрические образцы длиной 5 - 50 мм, диаметрами 0,5 – 6 мм, а в качестве исследуемых сложно-рельефных поверхностей образцы длиной до 300 мм, шириной до 200 мм и толщиной до 120 мм.

### ***2.5. Система управления усилием нагружения пары трения.***

Приведенные ранее конструктивные решения устройств измерения сил трения не затрагивали проблемы управления нагружающим усилием в ходе испытания. Создание управляемых режимов нагружения является важным при создании циклических режимов испытания, характерных для широкого круга узлов и механизмов. Особенную значимость управление нагружением играет при исследовании сложно-рельефных поверхностей, профиль которых меняется по ходу траектории движения.

Для нашей установки был выбран диапазон нагрузок от 0 до 10Н обусловленный необходимостью работы в режиме упругого контакта анизотропных пар трения.

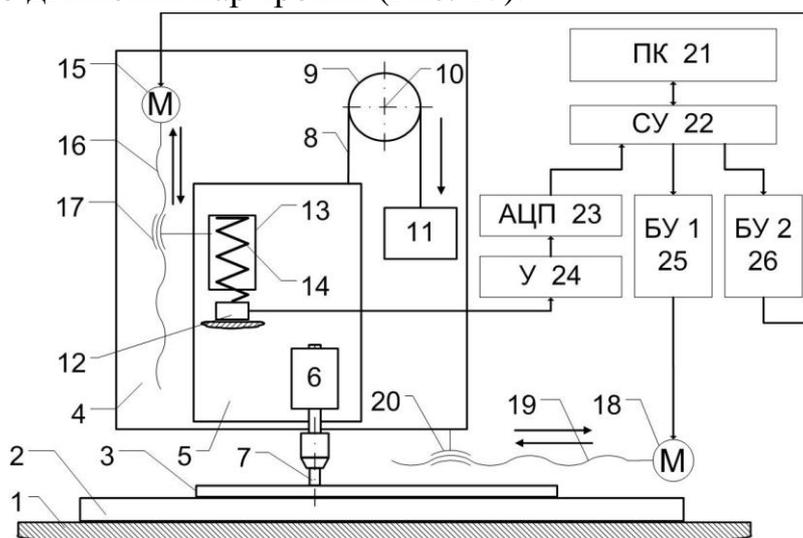
Система управления нагружением образцов должна обеспечить управление нагружающим усилием в соответствии с заданной целевой функцией, а ее регулирование желательно осуществить в автоматизированном режиме. Причем система сбора информации о мгновенном значении нагрузки в паре трения может быть включена в цепь обратной связи системы управления. Это позволит расширить функциональные возможности устройства, повысить

точность измерения и поддержания нагрузки, что особенно важно при анализе силовых параметров трения на сложно-рельефных образцах.

Для реализации системы регулирования нагружением необходимо: *два канала управления*, для создания перемещений и управления нагружающим устройством, *один канал измерения*, для определения мгновенного значения нагружающей силы.

Предложена конструкция устройства [58], позволяющая реализовать отмеченные выше функции управления нагрузкой на базе применения многокоординатного привода, которая стала важным элементом разрабатываемой трибологической установки.

В качестве примера, рассмотрим работу нагружающего устройства при испытаниях на износостойкость в режиме линейного возвратно-поступательного движения пар трения (Рис. 17).



**Рис. 17** Схема установки трения с динамическим управлением нагрузкой

Установка трения содержит основание 1, держатель 2 плоского образца 3, каретку горизонтального перемещения 4, размещенную в линейных направляющих на основании 1 (на схеме не показаны), каретку вертикального перемещения 5 с держателем 6 образца 7, размещенную в линейных направляющих на каретке 4 (на схеме не показаны). Установленные на каретке 4 уравнивающее устройство, состоящее из гибкого элемента 8, ролика 9, закрепленного на оси 10 каретки 4, противовес 11.

Измеритель силы нагружения 12, выполненный в виде тензометрического датчика силы и нагружающее устройство, установленные на каретке 4.

Нагружающее устройство включает: стакан 13, внутри которого находится пружина 14, упирающаяся одним концом в дно стакана 13, а другим в измеритель силы нагружения 12. Привод нагружения, размещенный на каретке горизонтального перемещения 4, содержит: электродвигатель 15, ходовой винт 16, гайку 17, жестко связанную со стаканом 13 нагружающего устройства.

Привод возвратно-поступательного перемещения, установленный на основании 1, включающий: электродвигатель 18, ходовой винт 19, гайку 20, жестко связанную с кареткой горизонтального перемещения 4.

Управляющий компьютер 21 (ПК), соединенный посредством согласующего устройства 22 (СУ) с аналого-цифровым преобразователем 23 (АЦП), ко входам которого через усилитель аналогового сигнала 24 (У) подключен измеритель силы нагружения 12, с блоком управления 25 (БУ1) привода возвратно-поступательного движения, с блоком управления 26 (БУ2) привода нагружения.

Согласующее устройство 22 (СУ) обеспечивает необходимое количество каналов ввода-вывода для подключения внешних устройств и выполняет функции согласования уровней входных сигналов поступающих в управляющий компьютер с АЦП, а также выходных сигналов поступающих из управляющего компьютера на блоки управления приводами машины трения БУ1 и БУ2.

Работа устройства реализуется следующим образом.

Перед началом испытания, установка трения находится в исходном состоянии. Каретка горизонтального перемещения 4 находится в крайнем правом (или левом) положении держателя образца 2. Гайка 17 привода нагружения отведена в крайнее верхнее положение, каретка вертикального перемещения 5 с установленным на ней держателем образца 6 под действием противовеса 11 максимально подняты над поверхностью держателя образца 2,

обеспечивая свободный доступ для установки образцов. Производится установка образцов 3 и 7 в соответствующих держателях 2 и 6.

Дальнейшая работа установки трения осуществляется в автоматическом режиме в соответствии с алгоритмом испытания, обеспечение которого возлагается на программу управления, функционирующую на компьютере 21.

Первым шагом алгоритма испытания является градуировка нулевого значения измерителя силы нагружения 12, которая производится перед каждым испытанием для исключения влияния веса образца 7 на результаты измерения и заключается в определении нулевой точки отсчета измерителя силы нагружения 12.

Вторым шагом алгоритма испытания является приведение образцов 3 и 7 в контакт и установка силы нагружения, для чего компьютер 21 формирует и передает через интерфейсную плату 22 сигналы управления модулю управления 26, обеспечивающему работу двигателя 15. Двигатель 15 вращает винт 16, передвигая гайку 17 и стакан 13 вниз, сжимает пружину 16, при этом каретка 5 движется вниз до контакта образцов 3 и 7.

Дальнейшее движение гайки 19 вниз будет приводить к сжатию пружины 14 и возрастанию силы нагружения приведенных в контакт образцов 3 и 7.

Изменение силы нагружения фиксируется тензометрическим измерителем силы 12, аналоговый сигнал с которого поступает на усилитель 24, преобразуется аналого-цифровым преобразователем 23 и поступает в цифровом виде через согласующее устройство 22 в управляющий компьютер 21, на котором функционирует программа управления экспериментом.

Программным путем осуществляется анализ достигнутого значения нагружающей силы и формируется управляющая информация для двигателя 15, который осуществляет дальнейшее движение гайки 19 вниз для увеличения нагружающей силы или вверх для уменьшения нагрузки.

Следующим шагом алгоритма управления является обеспечение возвратно-поступательного движения нагруженных образцов 3 и 7, для чего компьютер 21 формирует управляющие сигналы, передаваемые через

согласующее устройство 22 для модуля 25, обеспечивающего работу двигателя 18, который вращает ходовой винт 19, приводя в движение гайку 20 и каретку горизонтального перемещения 4.

Далее по алгоритму испытания производится управление двигателями 18 и 15, соответственно производится регулирование параметров возвратно-поступательного движения и величины нагружающей силы.

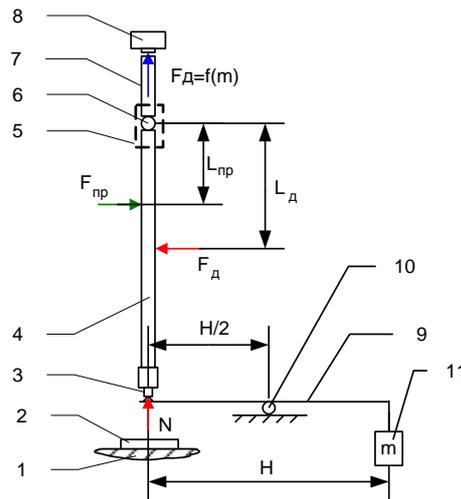
После окончания программы испытания производится возврат рабочих органов установки в исходное состояние.

Практическая реализация конструкции устройства регулирования нагружающего усилия, требует проведения анализа его параметров с учетом конструктивных особенностей самого устройства и параметров системы сбора данных.

### ***Определение параметров устройства нагружения***

Градуировка устройства нагружения проведена экспериментально гравиметрическим методом в статическом режиме, при отсутствии контакта образцов и движения индентора (Рис. 18). В данном случае моменты сил устройства измерения сил трения находятся в равновесии, когда  $F_{прх} \cdot L_{пр} = F_{дх} \cdot L_{дх}$ ,  $F_{пру} \cdot L_{пр} = F_{ду} \cdot L_{ду}$ .

Схема градуировки устройства нагружения состоит из столика 1 с образцом 2, по которому при контакте скользит индентор 3 установленный в держателе 4, в свою очередь соединенный помощи гибкой упругой муфты 5 и опорного шарика 6 с направляющей 7, закрепленной на вертикальной каретке (на рисунке не показана), обеспечивающей нагружение образца 2 и индентора 3 в режиме испытания. Причем, направляющая 7 выполнена с возможностью поступательного движения и опирается одним концом в датчик силы 8. Показания датчиков по отдельным каналам аналого-цифрового преобразования поступают и обрабатываются при помощи компьютерных средств.



**Рис. 18.** Эквивалентная схема градуировки устройства нагружения:  $F_d$  – сила нагружения;  $F_{пр}$ ,  $F_d$  – сила предварительного поджатия и реакции датчика;  $L_d$ ,  $L_{пр}$  – расстояние от точки качания держателя 3 в шаровой опоре 4 до датчика и до пружины предварительного поджатия;  $H$  – длина рычага;  $H/2$  – точка установки опоры рычага.

Методика градуировки заключается в том, что сила нагружения  $N$  создается при помощи рычага 9, опоры 10 и груза 11. Причем, опора 10 установлена на расстоянии  $1/2$  общей длины рычага 11.

Градуировка проведена ступенчатым увеличением прикладываемой нагрузки до 300 грамм с шагом в 10 грамм на участке от 0 до 100 грамм, с шагом 20 грамм на участке от 100 до 300 грамм.

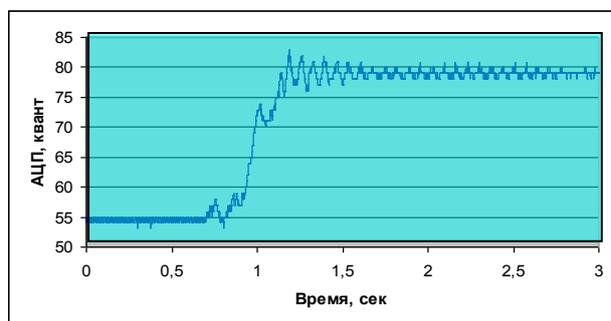
Алгоритм регистрации аналитической информации при градуировке состоял из трех этапов.

*Этап 1.* Регистрация показаний нулевого значения силы нагружения, когда рычаг 9 находится в уравновешенном положении на опоре 10, а воздействие груза  $m$  отсутствует.

*Этап 2.* Нагружение устройства контролируемой массой  $m$ , выбираемой из требуемого диапазона градуировки. При этом в системе нагружения протекают переходные процессы (Рис. 19), исключаемые из процесса анализа.

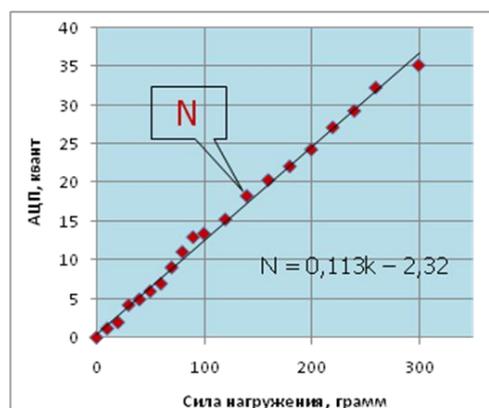
*Этап 3.* Регистрируются показания датчика силы соответствующего установленному контрольному грузу массой  $m$ , и производится вычисление достигнутого значения нагрузки после статистической обработки показаний системы измерения.

Длительность каждого из трех этапов составляет 3 секунды, а при частоте дискретизации на аналого-цифровых преобразователях 1 кГц, обеспечивается сбор информации по 3 тыс. показаний системы измерения нагрузки на каждом этапе.



**Рис. 19.** Типовой переходный процесс для груза массой 200 грамм

По результатам статистической обработки были построены градуировочная характеристика в диапазоне от 0 до 300 грамм (Рис. 20).



**Рис. 20.** Градуировочная характеристика устройства нагружения

Таким образом, задача управления и контроля уровня силы нагружения пары трения достигается применением оригинальной конструкции системы нагружения [58], обеспечивающей возможность ее динамического изменения в процессе движения пары трения.

Определение параметров устройства нагружения проведено на основе гравиметрической методики градуировки, на основе которой построена градуировочная характеристика устройства в диапазоне от 0 до 300 грамм, с учетом ее конструктивных особенностей на базе выбранных компонентов канала сбора информации (измерительного элемента — датчика силы *FSG15N1A*, усилителя аналогового сигнала *RL-4DA200* и АЦП *Ф7077/1*).

Применение в конструкции устройства управления нагружением двух кареток, приводимых в движение независимыми приводами, а так же использование единой системы управления приводами машины трения позволяет реализовать более сложные режимы проведения испытания образцов, позволяет избежать временного рассогласования приводов при длительных циклических испытаниях, обеспечивает регулирование параметров движения и нагружения (по амплитуде, по частоте, по времени, по количеству циклов движения или нагружения и т.д.).

## **2.6. Выводы.**

Анализ модели анизотропного трения позволил обосновать выбор базовой кинематической схемы и сформулировать требования к подсистемам испытательного комплекса.

На базе выработанных требований был разработан ряд оригинальных конструкций устройств измерения сил трения. Двухкоординатное устройство позволяет производить измерение параметров процесса фрикционного взаимодействия с учетом неколлинеарного положения векторов трения и скорости главного движения в зоне контакта. На основе выбранных первичных преобразователей и элементов системы сбора информации рассчитаны параметры двухкоординатного устройства и его градуировочные характеристики.

Для реализации программно-управляемых режимов нагружения на сложно-рельефных поверхностях трения, предложено устройство управления усилием нагружения и экспериментально определена градуировочная характеристика канала регистрации силы нагружения.

Перемещение измерительного элемента по контролируемой сложно-рельефной поверхности осуществляются на основе применения многокоординатной системы управления измерительным элементом. А создание нелинейных траекторий движения достигается программной аппроксимацией нелинейной траектории набором кусочно-линейных участков.

### Глава 3. Методики и результаты экспериментальных исследований анизотропных поверхностей

#### 3.1. Модельные объекты для анализа фрикционных характеристик

Для проверки работоспособности подсистем установки и разработанных устройств измерения проведена серия экспериментов по определению силовых параметров трения при взаимодействии изотропного индентора с анизотропными плоскими поверхностями.

В качестве индентора использовали металлический стержень (сталь 40Х, 210 НV, L=15 мм, Ø 4 мм, один конец которого имеет форму полусферы радиусом 2 мм).

В качестве модельных анизотропных объектов использовали металлические образцы (сталь 45, HRC=52) цилиндрической формы (L=35 мм, Ø 30 мм), торцевые поверхности которых были обработаны плоским шлифованием.

Для анализа параметров микрогеометрии поверхностей образцов использовали профилограф-профилометр Pertometr M2 Немецкой фирмы Mahr GmBH. Прибор позволяет определять профиль шероховатости (микронеровностей) с разрешением 12 нм.

Основные регистрируемые параметры:

$R_a$  – среднее арифметическое значение шероховатости, мкм,

$R_z$  – усредненная высота неровностей профиля, мкм,

$R_{max}$  – максимальная глубина неровностей, мкм.

Определение параметров производилось на длине участка ощупывания  $L_m = 4$  мм, в соответствии с рекомендациями DIN EN ISO 4288, приведенными в Табл. 9.

Определение предельной длины волны согласно DIN EN ISO 4288

Периодические профили	Апериодические профили		Cutoff – предельная длина волны	Отдельный участок и общий участок измерения
$S_m$ в мм,	$R_z$ в мкм	$R_a$ в мкм	$\lambda_c$ в мм	$L_m$ в мм (при $n=5$ )
$S_m \leq 0,13$	$R_z \leq 0,5$	$R_a \leq 0,1$	0,25	0,25 - 1,25
$0,13 < S_m \leq 0,4$	$0,5 < R_z \leq 10$	$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	0,8 - 4
$0,4 < S_m$	$10 < R_z$	$2 < R_a$	2,5	2,5 - 12,5

$S_m$  - средняя ширина элемента профиля (расстояние между бороздками).

При проведении измерений шероховатости поверхностей рекомендуют снимать несколько (не менее пяти) участков, наиболее характерных для данной поверхности [36, 41]. Это связано с тем, что анализ свойств микрогеометрии поверхности осуществляется контактным способом на локальном участке поверхности при движении измерительного щупа по линейной траектории.

Для поверхностей обладающих анизотропией направление перемещения измерительного элемента имеет особую важность, т.к. поверхностные свойства различны для разных направлений. Это подтверждено данными анализа микрогеометрических свойств на нескольких модельных образцах (Табл. 10), для которых анализ проведен в двух направлениях, при этом одно из направлений совпадало с выраженными следами обработки материала, а второе располагалось перпендикулярно первому.

Табл. 10

Параметры исследуемых поверхностей

Параметр	$R_a$ , мкм		$R_z$ , мкм		$R_{max}$ , мкм	
	вдоль	поперек	вдоль	поперек	вдоль	Поперек
Образец 1	0,55	1,34	3,01	8,38	4,38	8,60
2	0,43	1,43	2,29	9,40	3,77	11,4
3	0,22	0,31	1,62	2,35	2,57	3,03
4	0,25	0,55	1,84	1,23	2,49	1,49

Установлено, что для параметра  $R_a$  соотношение величин для одного образца в отмеченных направлениях может достигать 3 раз (образец 2, Табл. 10). Это отношение тем меньше чем, более качественно обработана

поверхность, и влияние анизотропии микрогеометрии поверхностных свойств на результаты анализа снижается.

Четкое направление обработки удается выделить не всегда, что характерно для поверхностей материалов обработанных химическими, абразивными (пескоструйная обработка) и некоторыми др. способами.

В нашем исследовании в качестве такого материала использовали поверхность металла, обработанную шабрением и имеющую следующие параметры:  $R_a = 0,43$  мкм,  $R_z = 3,03$  мкм,  $R_{max} = 4,52$  мкм.

Апробация функциональных возможностей установки проведена на примере исследования фрикционных характеристик анизотропных поверхностей в разных режимах и на различных траекториях движения с использованием ряда оригинальных технических решений [26,57,58,59] и разработанной установки в целом.

### ***3.2. Исследование модельных объектов на линейных траекториях движения***

Работоспособность систем испытательного комплекса была оценена серией экспериментов на модельных парах трения. Порядок испытаний определялся последовательным усложнением условий анализа параметров трения, усложнением траекторий относительного движения пары трения, требующим последовательного увеличения количества задействованных подсистем комплекса.

Качество функционирования системы регистрации сил трения и нагружения, проверено при испытании пар трения при поступательном движении индентора по исследуемой поверхности с монотонным увеличением нагрузки (Рис. 21). Причем для исключения влияния фактора управления нагрузкой пары создание плавного монотонного нагружения, воспроизводилось

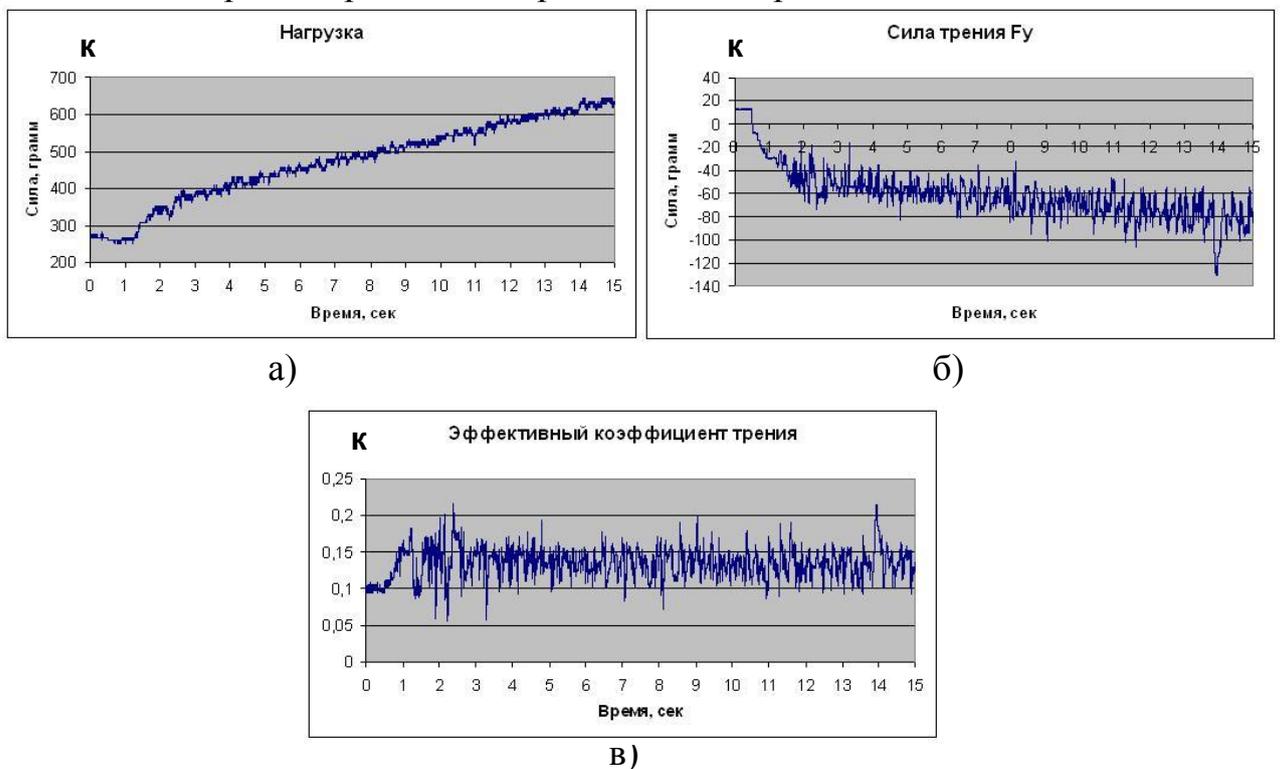
поступательным перемещением индентора по наклонной поверхности образца в течении 15 секунд со скоростью 1мм/сек.

Направление перемещения выбирали поперек выраженных следов обработки образца, которое традиционно используется при анализе параметров микрогеометрии поверхностей. В нашем случае данное направление совпадало с направлением оси Y двухкоординатного устройства измерения сил трения, поэтому на диаграмме (Рис. 21, б) приведен график изменения по одной составляющей силы трения  $F_y$ .

Индентором выступал металлический стержень, один конец которого имеет форму полусферы с радиусом 2 мм (сталь 40X, 210 HV, , L= 15 мм, Ø 4 мм).

Испытуемый образец: металлический цилиндр (материал: сталь 45 твердостью 210 HV) торцевая часть которого была обработана способом плоского шлифования, с выраженным направлением обработки поверхности.

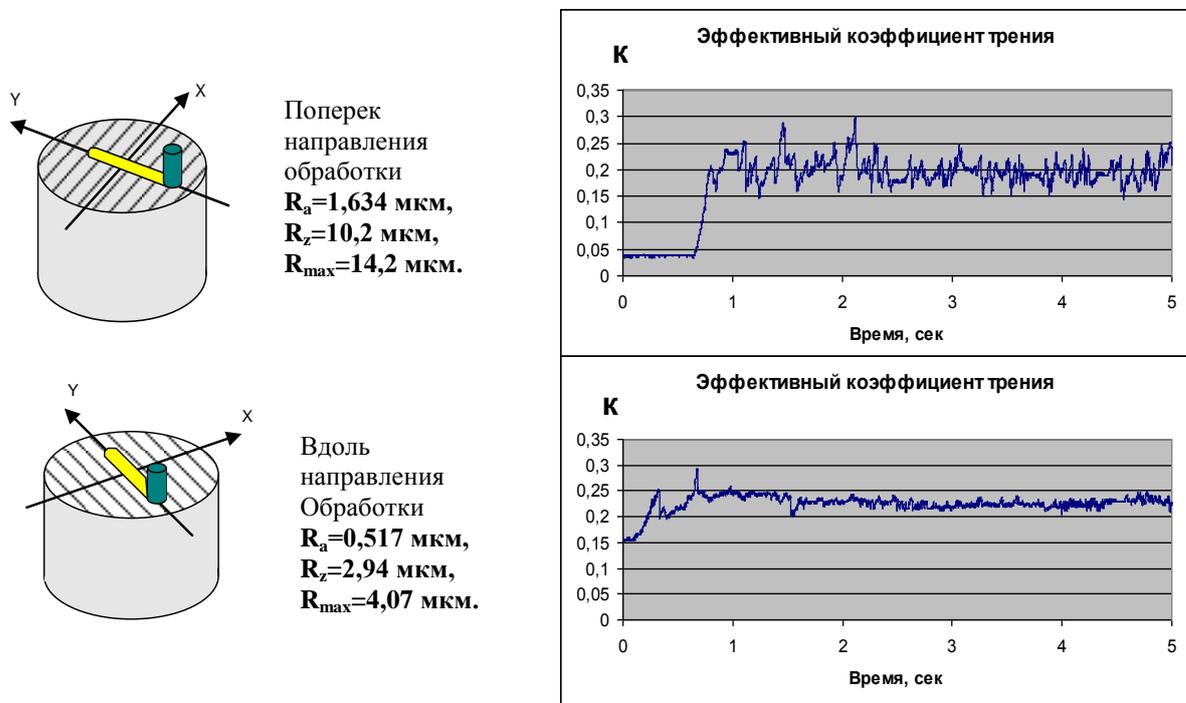
Образец: Сталь 45 (210 HV),  $R_a=1,43$  мкм,  $R_z=9,40$  мкм,  $R_{max}=11,4$  мкм, движение поперек направления обработки со скоростью 1 мм/сек.



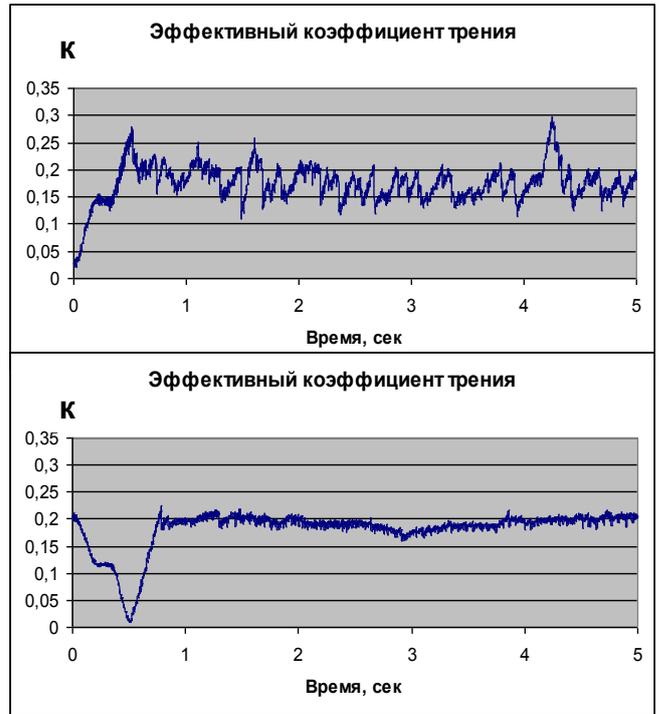
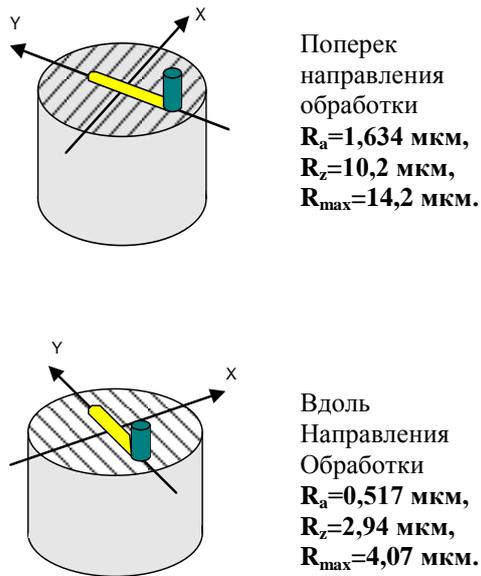
**Рис. 21.** Диаграммы изменения силовых параметров трения при увеличении нагружающего усилия: а) нагрузка, б) сила трения в) коэффициент трения.

Проведенные эксперименты демонстрируют, что при увеличении силы нагружения происходит пропорциональное увеличение силы трения  $F_y$ , а величина коэффициента трения находится примерно на одном уровне (Рис. 21 в). Это является подтверждением закона Амонтона-Кулона, утверждающим, что коэффициент трения остается неизменным с увеличением нагрузки [24], и фактически является подтверждением работоспособности многоканальной системы измерения силовых параметров процесса трения.

Следующим этапом проверки подсистем комплекса стал эксперимент, направленный на определение эффективного коэффициента трения при двух режимах управления перемещением индентора: ручном (Рис. 22) и автоматизированном (Рис. 23). Причем выбиралась линейная траектория движения по исследуемой анизотропной плоской поверхности в направлении обработки и перпендикулярно ему. При этом исходили из гипотезы об ортогональной анизотропии свойств металлической поверхности обработанной плоским шлифованием.



**Рис. 22.** Диаграмма изменения коэффициента трения при ручном управлении перемещением индентора ( $V \sim 1,0-1,6$  мм/с)



**Рис. 23.** Диаграмма изменения коэффициента трения при автоматизированном управлении перемещением индентора ( $V = 0,9$  мм/с)

Анализ полученных диаграмм при определении эффективного коэффициента трения показал, что система сбора данных позволяет оценивать силовые параметры процесса трения независимо от типа режима управления перемещением измерительного элемента по исследуемой поверхности. Это может быть объяснено тем, что реализовано одновременное определение сил по всем каналам измерения, которое производится с малым временем преобразования (8 мксек), а частота сбора аналитической информации может достигать 2кГц. Причем система управления перемещением измерительного элемента имеет на порядок меньшую частоту управления силовыми приводами до 250 Гц.

Если анализировать временные диаграммы, то можно выделить стартовый участок сбора аналитической информации длительностью около секунды на котором происходят переходные процессы соответствующие моменту страгивания нагруженного индентора и переход к скольжению по поверхности. Данный участок траектории движения при определении эффективного коэффициента трения необходимо исключить из анализа. Однако, сам факт регистрации системой измерения силовых параметров пары

трения, предшествующих началу движения, показывает возможность использования установки для исследования процессов предварительного смещения.

Важной особенностью применения двухкоординатного устройства измерения сил трения при движении по линейным поступательным траекториям в направлении главных осей скольжения стало обнаружение колебательного характера дополнительного силового воздействия, направленного ортогонально главному направлению движения пары трения. На практике подобный случай приводит к возникновению биения пары трения и характеризуется периодическим изменением направления вектора трения.

Наиболее выражено данный эффект проявился при движении изотропного образца вдоль направления следов обработки поверхности (Рис. 24).

Испытуемый образец: Сталь 45 (210 HV).

Обработка поверхности: плоским шлифованием.

Параметры микрогеометрии:  $R_a=0,518$  мкм,  $R_z=2,75$  мкм,  $R_{max}=4,00$  мкм.

Движение: поступательное вдоль направления обработки  $V=1$  мм/с.

Нагрузка: 600 грамм.



**Рис. 24. График изменения компоненты X силы трения, действующей ортогонально направлению главного движения**

Причем в данном эксперименте амплитуда колебаний дополнительного воздействия при движении вдоль следов обработки примерно в 1,5-2 раза превышала амплитуду колебаний при движении поперек следов обработки анизотропного тела.

Следующий этап проверки подсистем установки заключался в проверке реверсивного режима движения пары трения на линейных траекториях движения располагающихся перпендикулярно направлению обработки поверхности.

**Индентор:** Изотропный, сталь 40X (210 HV), L=15 мм, Ø 4 мм, радиус закругления 2 мм.

**Образец:** Сталь 45 (HRC 52), Обработка контактной поверхности плоским шлифованием.

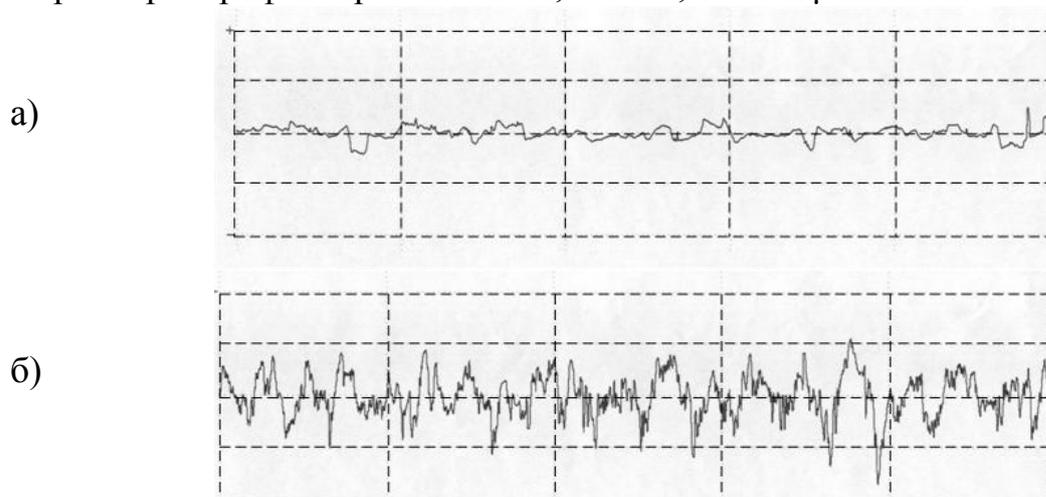
**Движение:** поперек следов обработки  $V=0,9$  мм/с.

**Нагрузка:** N = 660 грамм.

**Путь трения:** L=18 мм.

Профилограмма поверхности в направлении относительного движения пары трения снятая поперек следов обработки (Рис. 25).

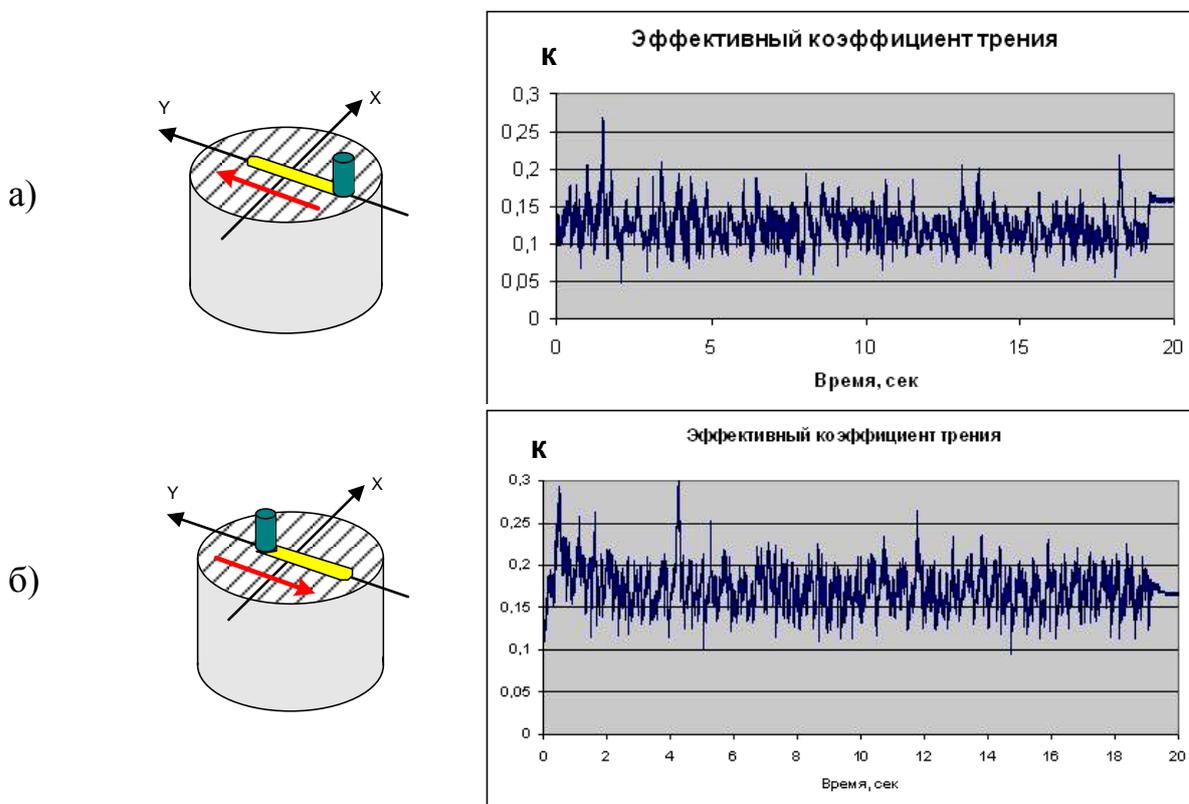
Параметры профилограммы: L= 0,800 мм; h=5.00 μм.



**Рис. 25. Профилограмма: а) вдоль следов обработки:  $R_a=0,517$  мкм,  $R_z=2,94$  мкм,  $R_{max}=4,07$  мкм, б) поперек следов обработки:  $R_a=1,634$  мкм,  $R_z=10,2$  мкм,  $R_{max}=14,2$  мкм.**

Результаты определения эффективного коэффициента трения, полученные при реверсивном типе движения, представлены на Рис. 26. Как видно, проявляется выраженное отличие величины эффективного коэффициента трения при движении индентора в прямом и обратном

направлении, что может быть объяснено влиянием анизотропии поверхностного слоя материала на процесс трения.



**Рис. 26. Определение эффективного коэффициента трения при движении индентора: а - в прямом направлении; б – в обратном направлении**

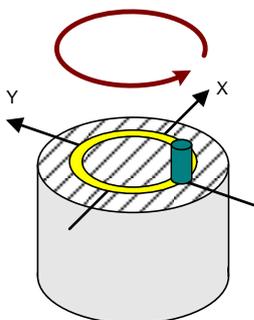
Результаты анализа параметров трения, проведенные при реверсивном режиме трения, являются косвенным подтверждением работ Пружанского Л.Ю. [52] установившего, что истирающая способность обработанной поверхности различна для разных направлений относительного движения пары трения.

Исследование модельных анизотропных поверхностей при организации линейного движения показало, что применение новых конструктивных решений устройств измерения сил позволяет регистрировать параметры трения с учетом двух компонент вектора трения. Причем направление перемещения измерительного элемента по анизотропной поверхности влияет на параметры фрикционного взаимодействия пары трения.

### 3.3. Методика определения фрикционных характеристик на нелинейных траекториях движения

Нелинейные траектории движения при анализе фрикционных характеристик материалов используются при построении анизотроп трения. Анизотропией трения называют геометрическую фигуру демонстрирующую изменение характеристик какого либо свойства материала от направления [2]. Как правило, построение анизотроп трения производят путем экспериментального изучения характеристик свойств материала.

Известным способом определения характеристик материалов на нелинейной (круговой) траектории является способ акад. БССР В.А.Белого [5], реализующийся тем, что по поверхности материала перемещают индентор, измеряют компоненты полного вектора сил сопротивления и по их отношению судят об анизотропии, причем компоненты полного вектора силы сопротивления измеряют одновременно при проходе индентора по свежему следу круговой траектории.



При круговом движении можно говорить только об измерении мгновенных значений компонент полного вектора силы сопротивления, достоверность получаемых в этом случае данных может быть подвергнута сомнению из-за непрерывного изменения условий испытания.

Развитием способа анализа анизотропии поверхностных характеристик материалов, является способ В.В. Тарасова [6], основным отличием которого от предыдущего является возможность проведения испытания с учетом взаимной ориентации индентора и образца, при этом контактирующие поверхности обоих могут обладать анизотропными свойствами.

Важной особенностью использования отмеченных способов, является применение двухкоординатных устройств измерения сил трения на нелинейной

траектории движения измерительного элемента. В этом случае информация системы сбора данных позволяет говорить только о качественной картине процесса трения и о возможности определения экстремальных значений исследуемых параметров, а заявленное одновременное измерение величин компонент вектора трения в точке измерения будет соответствовать единственно возможной точке траектории с уникальными условиями прохода из-за нелинейного изменения направления движения пары трения.

В этих условиях, возможность статистической обработки результатов испытания становится проблематичной, а сравнение результатов испытаний ограничивается случаем качественного анализа контактной ситуации.

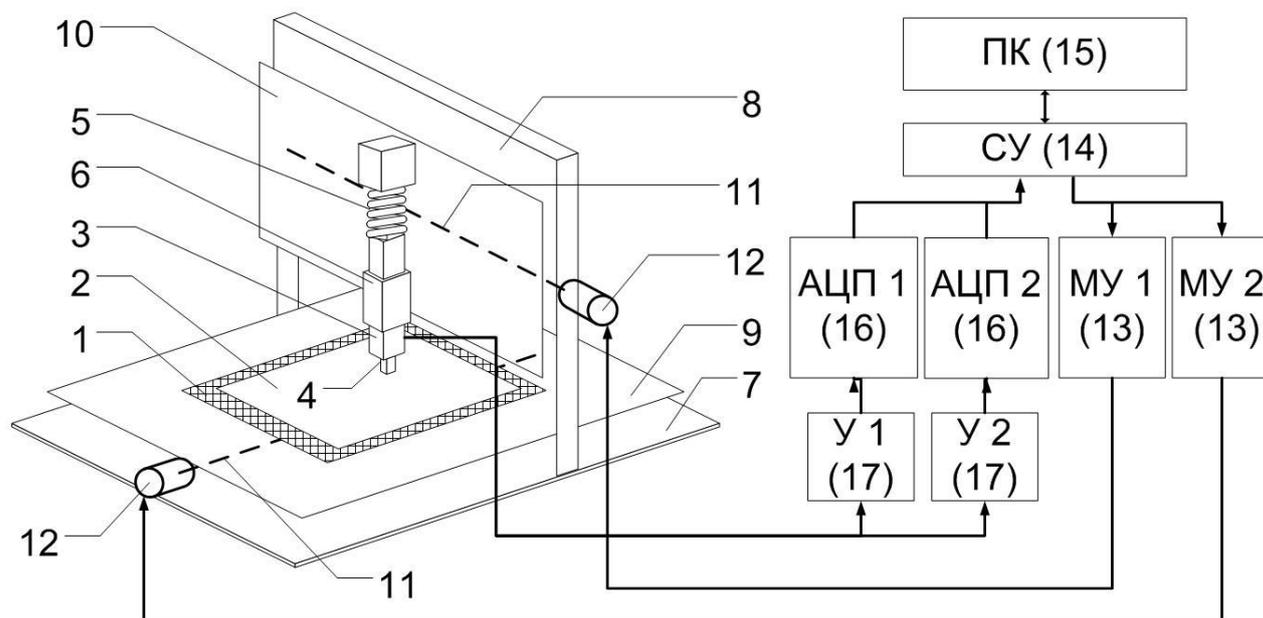
С учетом отмеченных недостатков существующих методов анализа, был предложен новый способ, направленный на повышение точности и достоверности экспериментального анализа свойств анизотропных материалов и пар трения.

Способ определения анизотропии физико-механических, преимущественно фрикционных свойств материала, заключается в том, что по поверхности материала перемещают индентор по нелинейной траектории движения, аппроксимированной набором линейных участков с заданной степенью приближения.

При прохождении индентора по каждому из участков производят одновременное количество измерений компонент полного вектора силы сопротивления, и по отношению их средних значений судят об анизотропии на данном участке траектории. Причем измерения совершают при проходе по свежему следу и при одном и том же взаимном положении осей анизотропии контактирующих поверхностей.

Суммарная информация по всем участкам нелинейной траектории позволяет судить об изменении силовых параметров трения по ходу нелинейной траектории движения и об анизотропии поверхностных физико-механических свойств.

Ниже представлена двухкоординатная установка (Рис. 27), на которой реализована методика определения фрикционной анизотропии в соответствии с заявленным способом на ряде анизотропных поверхностей.



**Рис. 27. Машина трения**

Двухкоординатная установка содержит держатель 1 образца 2, держатель 3 контртела 4, взаимодействующий с держателем 3 механизм нагружения 5, связанный с держателем 3 двухкомпонентный датчик силы 6, двухкоординатный привод, состоящий из основания 7 и рамы 8, кареток 9 и 10, установленных соответственно на основании 7 и раме 8 в направляющих (на чертеже не показаны). Линейные перемещения кареток 8 и 9 во взаимно перпендикулярных направлениях обеспечиваются при помощи передач винт-гайка 11 и электродвигателей 12, имеющих независимые друг от друга модули управления 13 (МУ 1 и МУ 2), подключенные через согласующее устройство 14 (СУ) к компьютеру управления 15 (ПК).

Система автоматизированного измерения мгновенного значения главного вектора силы трения состоит из двух измерительных каналов, каждый из которых содержит аналого-цифровой преобразователь 16 (АЦП), подключенный информационными выходами и входом запуска преобразования

посредством согласующего устройства 14 (СУ) к компьютеру управления 15 (ПК), а аналоговым входом к одному из тензометрических элементов двухкомпонентного датчика силы 6 при помощи усилителей аналоговых сигналов 17 (У 1 и У 2).

Согласующее устройство 14 (СУ) обеспечивает необходимое количество каналов ввода-вывода для подключения внешних устройств и выполняет функции согласования уровней входных сигналов поступающих в компьютер управления с АЦП, а также сигналов поступающих из управляющего компьютера на АЦП (сигнал запуска преобразования) и модули управления 13 (МУ 1 и МУ 2) двухкоординатного привода установки трения.

Способ реализуется следующим образом.

Перед началом испытания, установка трения находится в исходном состоянии.

Каретки 9 и 10 находятся в крайнем правом (или левом) положении при котором обеспечивается удобство постановки испытуемых образцов в соответствующие держатели 1 и 3, при этом образцам задают определенную взаимную ориентацию.

Процедура испытания начинается с автоматической установки держателя 1 образца 2 и держателя 3 контртела 4 в исходной точке начала испытания. После чего оператор приводит образцы в контакт и осуществляет их нагружение при помощи механизма 5.

Дальнейшая работа установки трения обеспечивается в автоматическом режиме программой управления, функционирующей на компьютере 15 (ПК), которая поддерживает заданные оператором параметры движения контртела 4 по поверхности плоского образца 2.

В нашем случае реализуется круговая траектория, аппроксимированная линейными участками при фиксированном взаимном положении образцов, путем передачи управляющих сигналов через согласующее устройство 14 (СУ) на модули управления 13 (МУ 1 и МУ 2), которые в свою очередь управляют

электродвигателями 12 двухкоординатного привода, приводящими в движение каретки 9 и 10 посредством передач винт-гайка 11.

Параллельно с процессом управления двухкоординатным приводом установки трения компьютер управления 15 (ПК) регистрирует компоненты главного вектора силы трения, поступающие с информационных выходов независимых аналого-цифровых преобразователей 16 (АЦП 1 и АЦП 2), каждый из которых преобразует аналоговый сигнал, получаемый с одного из тензометрических элементов, двухкомпонентного датчика 6 и усиливаемый усилителями 17 (У 1 и У 2). При перемещении индентора по каждому из линейных участков траектории движения обеспечивают равное количество одновременных измерений компонент полного вектора сопротивления движению индентора и по отношению их средних значений судят об анизотропии на данном участке траектории.

Совокупный анализ на всех участках траектории движения дает представление об изменении силовых параметров трения по ходу траектории движения и об изменении анизотропии поверхностных физико-механических свойств пары трения.

После окончания программы испытания установка трения останавливается, с образцов снимается нагрузка и они выводятся из контакта, а каретки 9 и 10 переводятся в исходное состояние.

Рассмотрим пример построения анизотропы эффективного коэффициента трения пары “изотропный штифт - анизотропная плоскость”.

Индентор (штифт): Сталь 40Х (210 НV), L=15 мм, Ø 4 мм, радиус закругления 2 мм.

Образец: Сталь 45 (HRC 52) обработанная плоским шлифованием, параметры шероховатости: вдоль направления обработки -  $R_a=0,154$  мкм,  $R_z=0,99$  мкм,  $R_{max}=1,92$  мкм; поперек направления обработки -  $R_a=0,344$  мкм,  $R_z=3,40$  мкм,  $R_{max}=7,71$  мкм.

Анализ проводили при движении индентора по квази-нелинейной (круговой) траектории движения индентора диаметром 10 мм, аппроксимированной 24-мя линейными участками траектории. При этом изменение направления движения индентора между соседними участками составляло 15 градусов, время прохождения одного участка траектории 2 секунды, а частота опроса датчиков системы сбора аналитической информации 1 кГц.

На каждом участке получали по две тысячи измерений на основании которых определяли средние значения величин сил по двум взаимно перпендикулярным направлениям, после чего рассчитывали величину вектора сил сопротивления, а по его отношению к среднему значению силы нагружения оценивали эффективный коэффициент трения.

Совокупный анализ на всех участках траектории движения позволил построить диаграммы изменения отдельных компонент вектора трения (Рис. 28). А также анизотропу трения - изменение эффективного коэффициента трения исследуемой пары трения от угла движения индентора в полярных координатах (Рис. 29).

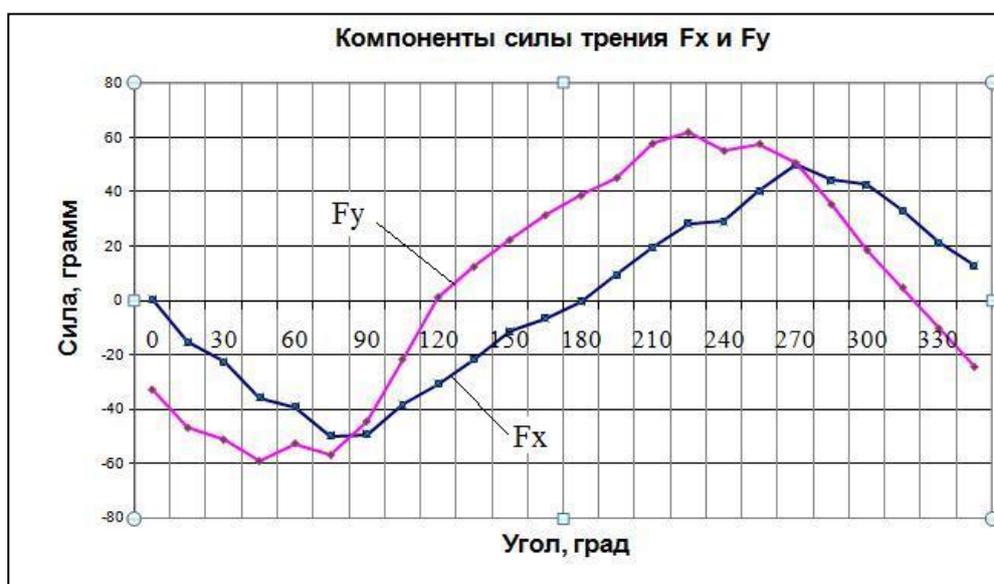
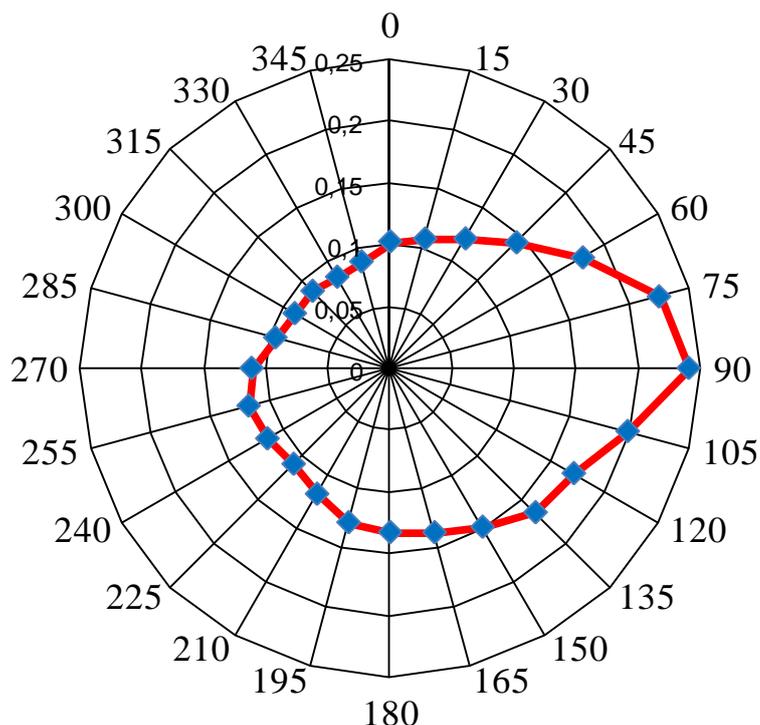


Рис. 28. Компоненты вектора силы трения

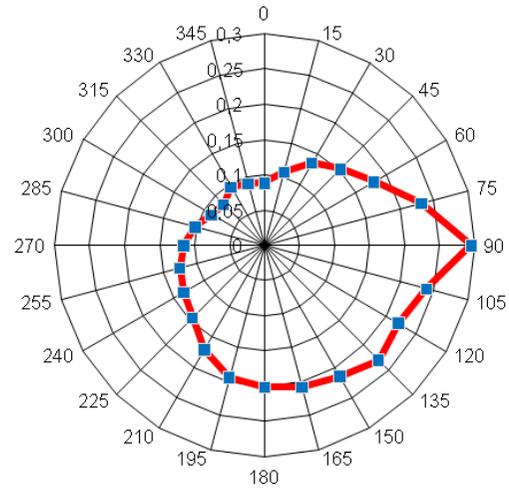


**Рис. 29. Анизотропа эффективного коэффициента трения**

Аналогичным образом можно представить изменение любого из регистрируемых параметров процесса трения. Анизотропии изменения отдельных компонент силы трения по осям  $X$  и  $Y$ , силы нагружения, произвести расчеты углов увода, угла приложения движущей силы, в зависимости от целей исследования.

Таким образом, предложенная методика позволяет произвести построение анизотроп эффективного коэффициента трения при контакте пар трения, причем построение характеристики трения осуществляется на основе математического анализа информации на каждом линейном участке траектории.

Далее приводятся экспериментальные результаты определения эффективных коэффициентов трения для плоских поверхностей обработанных с различной степенью качества (Рис. 30), полученные при помощи представленной методики анализа поверхности на нелинейной (круговой) траектории движения аппроксимированной кусочно-линейными участками.



А)

*Вдоль направления обработки*

$$R_a=0,518 \text{ мкм,}$$

$$R_z=2,75 \text{ мкм,}$$

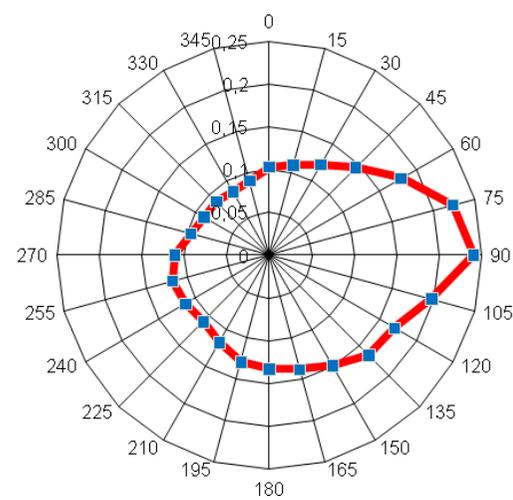
$$R_{\max}=4,00 \text{ мкм.}$$

*Поперек направления обработки*

$$R_a=1,662 \text{ мкм,}$$

$$R_z=10,1 \text{ мкм,}$$

$$R_{\max}=11,8 \text{ мкм.}$$



Б)

*Вдоль направления обработки*

$$R_a=0,154 \text{ мкм,}$$

$$R_z=0,99 \text{ мкм,}$$

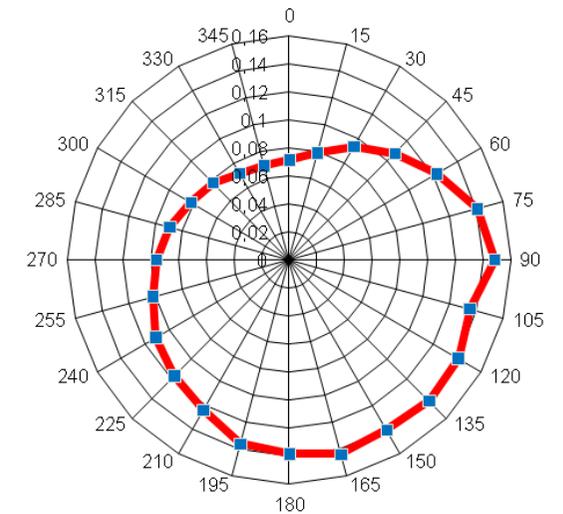
$$R_{\max}=1,92 \text{ мкм.}$$

*Поперек направления обработки*

$$R_a=0,344 \text{ мкм,}$$

$$R_z=3,40 \text{ мкм,}$$

$$R_{\max}=7,71 \text{ мкм.}$$



В)

$$R_a=0,470 \text{ мкм,}$$

$$R_z=3,09 \text{ мкм,}$$

$$R_{\max}=3,92 \text{ мкм.}$$

**Рис. 30. Анизотропы эффективного коэффициента трения**

**А,Б – поверхности обработанные плоским шлифованием с различным качеством,**

**В - поверхность обработанная шабрением.**

### **3.4. Выводы**

Экспериментальные исследования показали, что представленные технические решения устройств измерения сил трения и многокоординатный привод движения измерительного элемента, работающие в составе единого испытательного комплекса, позволяют решать широкий круг исследовательских задач.

Опробованы различные режимы управления перемещением измерительного элемента при испытании материалов на линейных и нелинейных траекториях движения. При организации линейных траекторий движения конструкция установки позволяет реализовать два режима испытания: перемещение индентора относительно неподвижного образца или перемещение образца относительно неподвижного индентора, причем в обоих случаях возможен реверсивный режим трения.

Для анализа характеристик материалов с анизотропной шероховатостью предложена и опробована методика определения фрикционной анизотропии эффективного коэффициента трения путем мгновенной регистрации вектора трения при сканировании поверхности по круговой траектории, аппроксимированной набором линейных участков. Показано, что анизотропы трения, в общем случае имеют ассиметричный характер, который может быть объяснен наложением анизотроп микрогеометрии поверхности и физико-механических свойств поверхностного слоя.

Экспериментально подтверждено наличие дополнительного силового воздействия носящего колебательный характер при поступательном движении пары трения вблизи ( $\approx 5$  градусов) главных осей скольжения для случая ортотропной анизотропии микрогеометрии.

## Глава 4. Новые средства исследования материалов и покрытий

### *4.1. Установка для испытания фрикционных характеристик материалов*

В результате проведенных исследований аппаратных средств и методов испытания материалов, разработки конструктивных решений, устройств измерения сил трения с учетом неколлинеарности векторов трения и скорости главного движения, и применения многокоординатной системы управления измерительным элементом на нелинейных траекториях движения, была разработана новая испытательная установка для определения фрикционных характеристик материалов и пар трения.

Универсальная трибологическая установка предназначена для испытания материалов при малых скоростях относительного движения и динамическом нагружении образцов при исследованиях, контроле и испытаниях. Реализует испытательную схему “индентор-поверхность” с возможностью организации сложных траекторий движения измерительного элемента по исследуемой поверхности за счет применения многокоординатного привода. Позволяет производить определение силовых параметров трения при наличии анизотропии физико-механических свойств поверхностного слоя материалов и пар трения.

#### Параметры испытательной установки

##### *Система управления приводом движения индентора*

*Типы траекторий движения:* линейные (поступательное, возвратно-поступательное) и нелинейные.

*Диапазоны регулирования:*

По осям: X: 200 мм, Y: 200 мм, Z: 100 мм,

Точность позиционирования 0.06 мм.

угловое положение индентора (координата U): 360 град.

Скорость: 0 – 10 мм/с.

Нагрузка предельная (координата Z): 0 – 1500 грамм.

*Компоненты системы управления.*

Двигатели шаговые FL39ST44-0304A.

Модули управления: Блок М 106, “КЕМО electronic”.

### ***Система сбора данных***

*Диапазоны регистрируемых величин:*

Силы трения по осям X и Y: 750 грамм.

Нагрузка (координата Z): 0 – 1500 грамм.

*Компоненты системы сбора данных.*

Тип датчиков: Тензометрические датчики силы FSG15N1A Honeywell.

Тип усилителя : RL-4DA200 фирмы “RLDA”.

Тип АЦП: Ф7077/1.

***Согласующее устройство:*** Интерфейсная плата на 72 дискретных канала ввода-вывода.

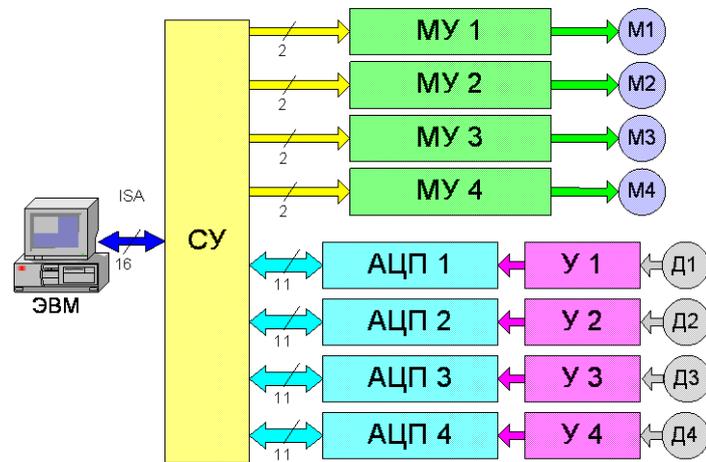
### ***Программное обеспечение комплекса***

Специализированный пакет программ для управляющей ЭВМ, управляет ходом эксперимента. В качестве программ планирования и обработки данных применяются стандартные программы офисного пакета Microsoft Office.

При рассмотрении структурной блок-схемы согласования информационных каналов трибологической установки (Рис. 31) можно выделить четыре канала управления, два из которых обеспечивают управление двигателями М1 и М2, осуществляющих перемещения образцов, один канал для управления двигателем М3 нагружающего устройства и один канал управления двигателем М4, отвечающим за угловое положение индентора.

Установка содержит 4 независимых канала регистрации аналитических сигналов процесса испытания материалов, первые два канала используются для измерения компонент главного вектора силы трения датчиками Д1 и Д2, третий канал используется для определения уровня действующей нормальной силы,

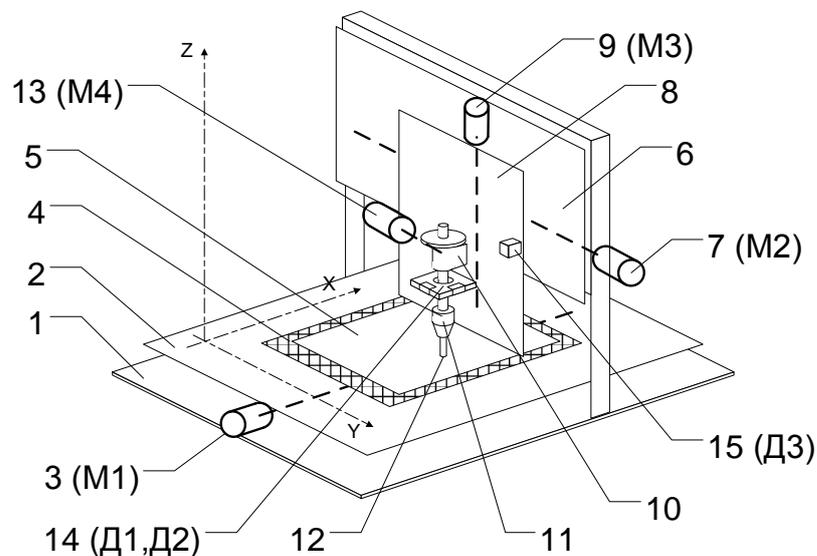
измеряемой датчиком Д3, а четвертый канал может быть использован по усмотрению исследователя, например, для измерения температуры в зоне трения с использованием датчика Д4.



**Рис. 31.** Структурная блок-схема согласования информационных каналов трибологической установки: СУ - согласующее устройство, МУ1 - МУ2 - модули управления, М1-М4 - двигатели, АЦП1-АЦП4 - аналого-цифровые преобразователи, У1-У4 - усилители сигналов, Д1-Д4 - датчики.

Причем работа всех четырех каналов осуществляется собственными АЦП, что обеспечивает одновременное и независимое проведение преобразования измеряемых сигналов, а параллельный обмен с каждым из АЦП осуществляется по независимым портам согласующего устройства СУ.

Рассмотрим основные элементы силовой части испытательной установки (Рис. 32).



**Рис. 32.** Схема испытательной установки

На основании 1 при помощи направляющих (на рисунке не показаны) закреплена каретка перемещения 2 по оси X, приводимая в движение посредством передачи винт-гайка и электродвигателя 3, на которой посредством держателя 4 закреплён плоский образец 5. На основании 1 в направляющих (на рисунке не показаны) закреплена каретка перемещения 6 по оси Y, приводимая в движение посредством передачи винт-гайка и электродвигателя 7. На каретке 6 размещена каретка перемещения 8 по оси Z, приводимая в движение посредством передачи винт-гайка и электродвигателя 9. На каретке 8 смонтирован узел нагружения 10, держатель 11 образца 12, установленный с возможностью вращения вокруг своей оси при помощи двигателя 13 связанного с ним посредством червячной передачи, датчики сил 14, регистрирующие компоненты главного вектора сил трения, датчик нагружения образца 15.

*Согласующее устройство.* К персональному компьютеру могут быть подключены устройства сопряжения с использованием трех типов стандартных внешних интерфейсов, средства которых входят в базовую конфигурацию компьютера: через системную магистраль, через параллельный интерфейс Centronics, через последовательный интерфейс RS-232C. Каждый из указанных интерфейсов имеет свои преимущества и недостатки.

В качестве базового интерфейса для реализации программного управления оборудованием трибологической установки была выбрана системная магистраль. Этот выбор осуществлен на базе следующих требований:

- обеспечение сопряжения компьютера с уникальным внешним оборудованием,
- обеспечение заданной скорости обмена (параллельный обмен с внешними устройствами),
- отсутствие дополнительного источника питания и конструктивных элементов устройства сопряжения (плата встраивается в РС).

Функционирование платы сопряжения обеспечивается микросхемами ввода-вывода КР580ВВ55А. В изготовленном устройстве используются три микросхемы, которые обеспечивают работу 72 дискретных каналов ввода-вывода, что в соответствии со схемой согласования (Рис. 31) является достаточным для обеспечения функционирования подсистем установки.

#### ***4.2. Управление фрикционным взаимодействием пар трения***

Анализ параметров силового взаимодействия анизотропных пар трения, проводимый с учетом неколлинеарного положения векторов трения и скорости главного движения на круговой траектории (пункт 3.3), не только подтвердил важность экспериментального анализа положения осей скольжения, но и показал потенциальные возможности разработки способов управления фрикционным взаимодействием с использованием эффекта анизотропного трения.

Поскольку способ определения анизотропии фрикционных свойств материалов [6], позволяет выделить направления относительного движения пары трения, при которых параметры трения принимают экстремальные значения (min и max). То на базе этой информации можно сформировать целевую функцию управления фрикционным взаимодействием пары трения, обеспечивающую достижение заданного значения сил сопротивления в диапазоне, лежащем между этими экстремальными значениями.

Способ управления заключается в том, что пару трения, в зоне контакта которой хотя бы одно из тел обладает анизотропией физико-механических свойств поверхностного слоя, приводят в контакт под действием нормальной силы, устанавливая исходную взаимную ориентацию осей скольжения пары трения, задают при помощи привода движения необходимое относительное перемещение и измеряют компоненты полного вектора сил сопротивления. Вычисляют величину силы сопротивления, на основе которой осуществляют

управление взаимной ориентацией осей скольжения пары трения, в соответствии с заданной целевой функцией в диапазоне регулирования между точками экстремумов (min и max) силы сопротивления для данной контактной пары.

Расширение диапазона регулирования обеспечивается предварительным подбором анизотропных пар трения.

Причем данный способ может быть использован как для регулирования силы сопротивления по одной из координат движения пары трения, так и для регулирования сил сопротивления с учетом полного вектора сил трения.

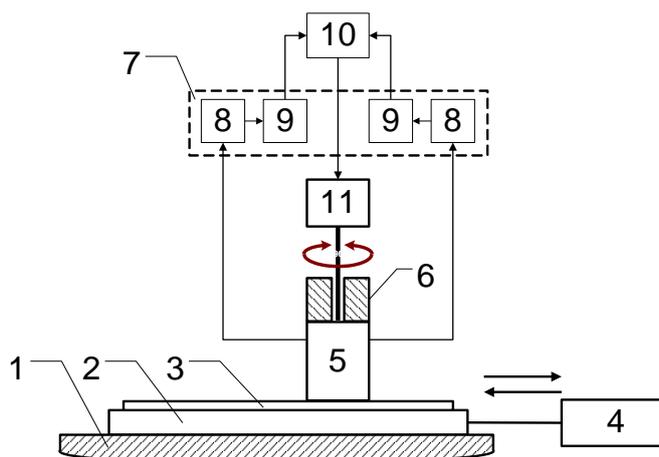
Среди устройств наиболее близких по своим возможностям к рассматриваемому случаю управления можно выделить устройство [4], содержащее держатель образца, привод перемещения держателя, индентор, взаимодействующий с ним механизм нагружения, связанный с индентором двухкомпонентный датчик силы.

Особенностью данного устройства является узкая область его применения. Связано это с определяемой характеристикой анизотропной пары, а именно с установлением одного направления движения пары трения для которого на базе априорной информации устанавливается необходимое соотношение компонент силы сопротивления движению.

Система управления устройства использует двухкоординатный привод движения, связанный с системой измерения величин компонент силы сопротивления, однако целью регулирования является управление траекторией движения индентора, т.е. заранее траектория движения не известна, что не свойственно реальным парам трения узлов и механизмов.

Реализация способа управления фрикционным взаимодействием пар трения может быть произведена устройством (Рис. 33), содержащим основание 1, установленный на нем с возможностью возвратно-поступательного движения держатель 2 образца 3, связанный с приводом перемещения 4, индентор 5, взаимодействующий с устройством нагружения 6 и двухкомпонентным датчиком 7, выполненным в виде двух преобразователей 8 с усилителями 9,

подключенными к входам автоматического вычислителя 10, выход которого в свою очередь включен в цепь управления привода вращения 11, установленного на основании 1 и связанного шлицевым соединением с индентором 5, причем последний выполнен цилиндрическим, его торцевая поверхность имеет выраженную анизотропию физико-механических свойств, а установлен он в нагружающем устройстве с возможностью вращения вокруг своей оси.



**Рис. 33. Схема устройства управления трением**

Способ управления трением реализуется устройством следующим образом.

На основании 1 устанавливают образец 3 в держателе 2, приводят индентор 5 в контакт с образцом 3, прикладывают нагрузку при помощи устройства нагружения 6. Устанавливают некоторую произвольную ориентацию осей скольжения индентора 5.

Затем при помощи привода перемещения 4 осуществляют движение образца 3 относительно индентора 5.

В процессе движения автоматический вычислитель 10 принимает сигналы, поступающие с двухкомпонентного датчика сил 7 и производит расчет параметров сил сопротивления, на основании которого в соответствии с заданной целевой функцией, формирует сигнал управления для привода вращения 11, обеспечивая тем самым изменение углового положения осей скольжения индентора 5.

В момент начала движения устанавливается некоторое промежуточное значение величины силы сопротивления, находящееся между значениями мин и макс, соответствующее первоначальному фактическому положению осей скольжения пары трения, а при достижении требуемого значения силы сопротивления угловое вращение индентора прекращают, причем процесс вычисления параметров сил сопротивления производится непрерывно на протяжении всего времени относительного движения пары трения.

Особенностью рассмотренного устройства является наличие привода вращения индентора, обеспечивающего управление угловым положением осей скольжения анизотропного индентора в процессе относительного перемещения. А также автоматического вычислителя, обеспечивающего обработку информации получаемой от двухкомпонентного датчика силы, рассчитывающего величины компонент вектора трения и вырабатывающего сигнала управления для привода вращения индентора.

Поскольку для реализации функции управления достаточно задействовать только один привод вращения индентора, то нет необходимости прямой связи с приводом перемещения держателя образца. Это обеспечивает возможность применения устройства в тормозных и фрикционных устройствах, причем может быть реализован, как поступательный, так и вращательный тип относительного движения пары трения.

### ***4.3. Алгоритмическое обеспечение процесса испытания***

Одним из перспективных направлений развития средств испытания является возможность создания распределенной структуры управления экспериментом с использованием возможностей локальных и глобальных сетей. Подобная структура вносит значительные коррективы не только в функции программного обеспечения, но и в работу всей установки в целом.

Распределенная структура испытательной установки может быть представлена в виде схемы, включающей следующие элементы: компьютер пользователя, диспетчерский компьютер, компьютер управления, объект управления (Рис. 34).

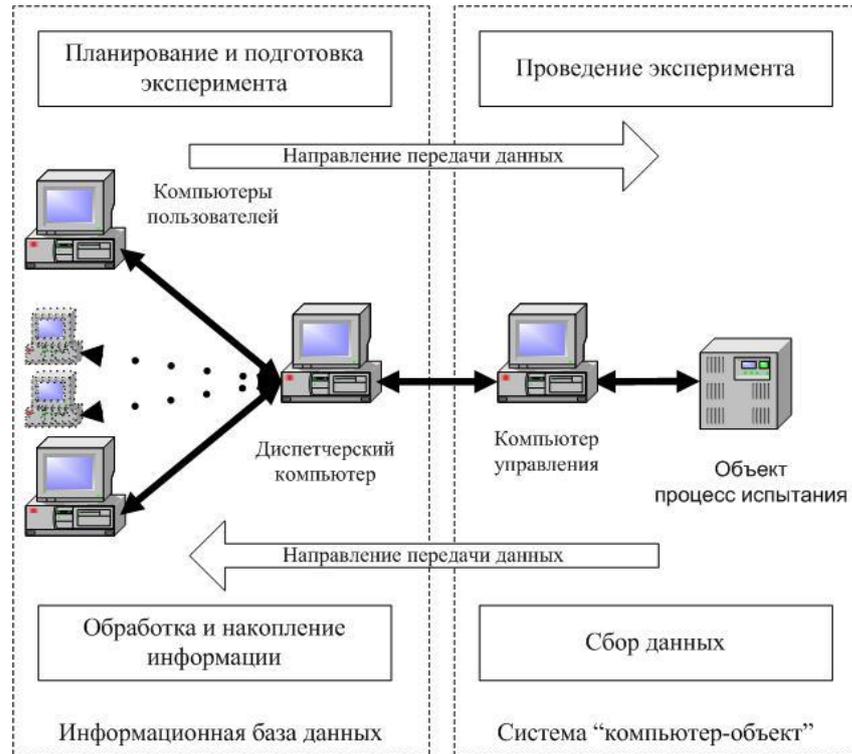
Основными целями применения распределенной системы управления в рамках испытательной установки является обеспечение:

- многопользовательского доступа,
- повышение производительности и эффективности использования оборудования,
- высокого уровня безопасности функционирования объекта управления,
- распределения функций между компонентами системы.

При реализации централизованной системы управления “компьютер-объект управления-измерения” на основе применения единственной ЭВМ, ее программное обеспечение объединяет все другие подсистемы в рамках единой установки и обеспечивает проведение всего комплекса исследований (подготовку и проведение экспериментов, обработку полученных результатов).

В основе функционирования распределенной системы управления лежат программные методы и средства, т.к. основное отличие от традиционной системы управления “компьютер-объект управления” заключается в перераспределении функций отдельной ЭВМ между несколькими

компьютерами. При этом, взаимодействие нескольких компьютеров на аппаратном уровне осуществляется стандартными сетевыми средствами.



**Рис. 34. Схема распределенной системы управления**

При реализации распределенной системы, управляющая ЭВМ осуществляет только процесс проведения эксперимента, т.е. входит в структуру как один из его элементов. При этом программное обеспечение управляющей ЭВМ значительно упрощается, т.к. задачи подготовки и обработки результатов решаются другими вычислительными средствами.

Рассмотрим функциональное назначение каждой из ЭВМ, входящих в распределенную структуру установки (Рис.3) более подробно.

*Основными функциями пользовательской ЭВМ являются:*

- обеспечение интерфейса с пользователем,
- математическая обработка введенных пользователем данных, преобразование их в массивы информации, пригодной для использования управляющей машиной.

*В состав функций, обеспечиваемых диспетчерской ЭВМ входят:*

- поддержание интерфейса с диспетчером,

- диспетчеризация и администрирование системы.

*Управляющая ЭВМ реализует следующие функции:*

- управления аппаратной частью установки,
- оперативного контроля и реакции в аварийных ситуациях,
- диагностики и настройки подсистем, включая взаимодействие с человеком-оператором.

Каждая ЭВМ дополнительно выполняет функцию обеспечения протокола и передачи данных между ЭВМ, она носит второстепенный характер и поэтому в данной ситуации не рассматривается.

Подсистему сбора и обработки данных в рамках распределенной системы управления можно представить на основе взаимодействия двух систем: системы накопления и обработки данных и системы сбора данных (Рис.4).

В качестве системы накопления и обработки данных может выступать информационная база данных, которая обеспечит эффективное взаимодействие между отдельными пользователями и диспетчерским компьютером. При этом диспетчерский компьютер играет роль сервера базы данных.

Система сбора данных при этом не изменяется и строится по традиционной схеме “компьютер-объект измерения”, однако функциональная нагрузка этой системы ограничивается сбором данных и настройкой конфигурации измерительных модулей установки.

***Укрупнённый алгоритм работы*** может быть представлен следующим образом.

*Планирование эксперимента.* Планирование эксперимента производится в рамках функционирования информационной базы данных, т.е. используются компьютер пользователя и диспетчерский компьютер (сервер базы данных). При этом взаимодействие не ограничивается локальной компьютерной сетью и может быть осуществлено с использованием глобальных сетей.

Пользователь формирует условия проведения экспериментального исследования, разрабатывает траектории движения, режимы нагружения образцов, задает временные характеристики эксперимента на основе

возможного набора испытательных схем, диапазонов регулирования параметров установки, предоставляемых базой данных пользователю.

На следующем шаге диспетчерская ЭВМ производит обработку полученной от пользователя информации, определяет возможность выполнения всех условий эксперимента. Если обнаруживаются какие-либо ошибки, то пользователю предоставляется возможность корректировки. Если заданные параметры соответствуют техническим характеристикам, то выполняется следующий шаг алгоритма, при котором формируется массив данных управления подсистемами ИК.

*Проведение эксперимента.* Проведение эксперимента производится с компьютера управления испытательной установки (компьютера управления) при участии оператора-испытателя.

Следующим шагом является непосредственная подготовка испытательной установки к проведению эксперимента: подготовка испытуемых образцов, закрепление их в держателях установки.

Оператор запрашивает сформированный массив управляющих данных с сервера базы данных и запускает процесс проведения эксперимента.

Далее управляющая программа непосредственно в реальном режиме времени обеспечивает проведение эксперимента и регистрацию информационных сигналов измерительных модулей установки.

В результате работы управляющей ЭВМ формируются массивы необработанных (сырых) данных, которые передаются обратно в информационную базу данных.

*Обработка результатов испытания.* Дальнейшая обработка и анализ информации полученной в результате проведения эксперимента осуществляется в рамках функционирования базы данных, т.е. происходит возврат в систему сетевого взаимодействия пользовательской ЭВМ и сервера базы данных. При этом каждый пользователь имеет возможность применения собственных методов и алгоритмов обработки данных, что существенным образом расширяет возможности испытательной установки.

На уровне системы “компьютер – процесс испытания”, в основном реализуется программное обеспечение низкого уровня, т.е. реализуются программы обмена данными на аппаратном уровне между компьютером и модулями комплекса. На уровне информационной базы данных реализуются алгоритмы и программы высокого уровня, т.е. процессы обмена между компьютерами, планирования и подготовки экспериментов, а так же обработки и накопления информации.

Испытательная установка, работающая в соответствии с распределенной схемой построения, предоставляет исследователю принципиально новые возможности работы. Которые позволяют реализовать построение нескольких баз данных, имеющих принципиально разные алгоритмы подготовки эксперимента и обработки результатов испытаний. При этом, каждая из баз данных может использовать возможности принципиальной и кинематической схемы установки в рамках своих собственных исследований. Что позволяет освободить исследователя от разработки достаточно сложной системы низкоуровневого программного обеспечения.

#### ***4.4. Особенности применения установки при электрохимическом анализе гальванопокрытий***

Практическая реализация модульного построения подсистем испытательного комплекса и распределенной системы управления экспериментом продемонстрированы на примере реализации системы электрохимического анализа гальванических покрытий.

Для контроля свойств гальванопокрытий существуют простые и дешевые методы контроля, например, локальный электрохимический анализ, сочетающий методологию зондового анализа с электроаналитическими подходами [71, 75]. Особенностью локального электрохимического анализа является возможность проведения электрохимического процесса на заданном участке поверхности образца, минимизируемом до точечных размеров [72]. Однако существующие устройства электрохимического анализа металлических покрытий имеют невысокую производительность, вследствие малой автоматизации процесса анализа.

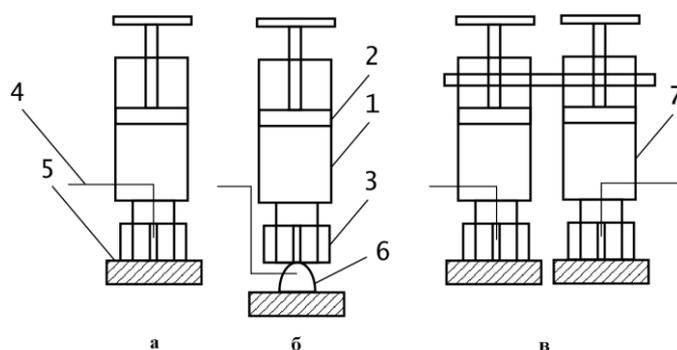
Разработка установки для анализа фрикционных характеристик материалов с применением автоматизированного многокоординатного привода движения измерительного элемента, позволила взглянуть на методику проведения локального электрохимического анализа по новому, с точки зрения повышения его функциональных возможностей и обеспечила возможность создания методики интегрального электрохимического контроля (ИЭК) покрытий, которая была разработана Черепановым И.С. [113], с использованием подсистемы управления испытательным комплексом, а именно многокоординатного привода перемещения измерительного элемента.

Основой системы обеспечивающей проведение ИЭК является прижимная электрохимическая ячейка-датчик, сканирующая при помощи привода пространственного перемещения поверхность образца. Конструкция ячейки снабжена поршневой системой, причем верхняя часть корпуса каждой ячейки

является резервной камерой для отвода электролита и совмещена с рабочим резервуаром.

Это позволяет производить отвод и перемешивание электролита без расстыковки с поверхностью образца, а также подъем и перемещение ячейки, от одной точки поверхности к другой, при выполнении интегрального контроля поверхности, когда необходимо последовательно переходить от одной точки анализа к следующей.

При этом используются три варианта ячеек (Рис. 35) [54-56].



**Рис. 35** Устройства для интегрального электрохимического контроля металлических покрытий по классической схеме (а), анализ в капле электролита (б) и анализ с предварительной катодной обработкой контролируемого участка поверхности (в).

Ячейка состоит из пластмассового корпуса 1, включающего резервную камеру, пластмассового поршня 2, съемного пластмассового наконечника с калиброванным отверстием и эластичной обкладкой 3, а также платинового противоиэлектрода 4. Кроме того, устройство (Рис. 35 в) содержит вспомогательную электрохимическую ячейку для предварительной катодной обработки контролируемого участка [110, 73].

Схема анализа выглядит следующим образом: при помощи поршня 2 в рабочую камеру отбирается раствор электролита, ячейка устанавливается на поверхность рабочего образца 5, включается поляризирующее напряжение и записывается вольтамперограмма процесса растворения. Затем поршень 2 отводится в резервную камеру - при этом происходит перемешивание электролита, ячейка поднимается и при помощи привода переводится на другой участок поверхности. Анализ повторяется на выбранном числе точек

поверхности, после чего отработанный электролит выводится при помощи поршня 2 и ячейка промывается.

Если участок поверхности образца частично армирован изоляционным материалом, исключающим непосредственный контакт зонда с поверхностью анализируемого материала, анализ проводится в капле рабочего раствора электролита конструкции при помощи конструкции (Рис. 35 б) следующим образом. В корпус ячейки 1 при помощи поршня отбирается раствор электролита, устройство подводится к поверхности на расстояние меньше осевого размера капли, в зазор между торцом зонда и поверхностью образца вводится капля б, включается поляризующее напряжение и регистрируется аналитический сигнал.

Оксидные пленки, присутствующие на поверхности, могут существенно исказить результаты измерений. В этом случае проводится предварительная катодная обработка участка, подлежащего растворению, реализуемая при помощи устройства (Рис. 35 в), которая содержит вспомогательную электрохимическую ячейку аналогичную описанной.

Вспомогательная ячейка 7 устанавливается на контролируемую поверхность, проводится катодная обработка участка образца. Затем электролит перемешивают, устройство передвигают на другой участок, а на его место устанавливают рабочую ячейку и проводят процесс растворения. При этом процессы растворения и обработки программируются во времени.

Структура установки для проведения ИЭК в данном случае дополняется следующими элементами (Рис. 36): электрохимическим зондом, источником поляризующего напряжения, в нашем случае использовали полярограф ПУ-1.

Анализ в капле позволяет проводить измерения на наклонных поверхностях (угол наклона образца до  $10^\circ$ ). В этом случае рецептурный состав электролита дополняется неионогенным поверхностно-активным веществом (ПАВ) для уменьшения поверхностного натяжения раствора. Это особенно важно в том случае, если анализ ведется на поверхности, частично армированной изоляционным материалом.

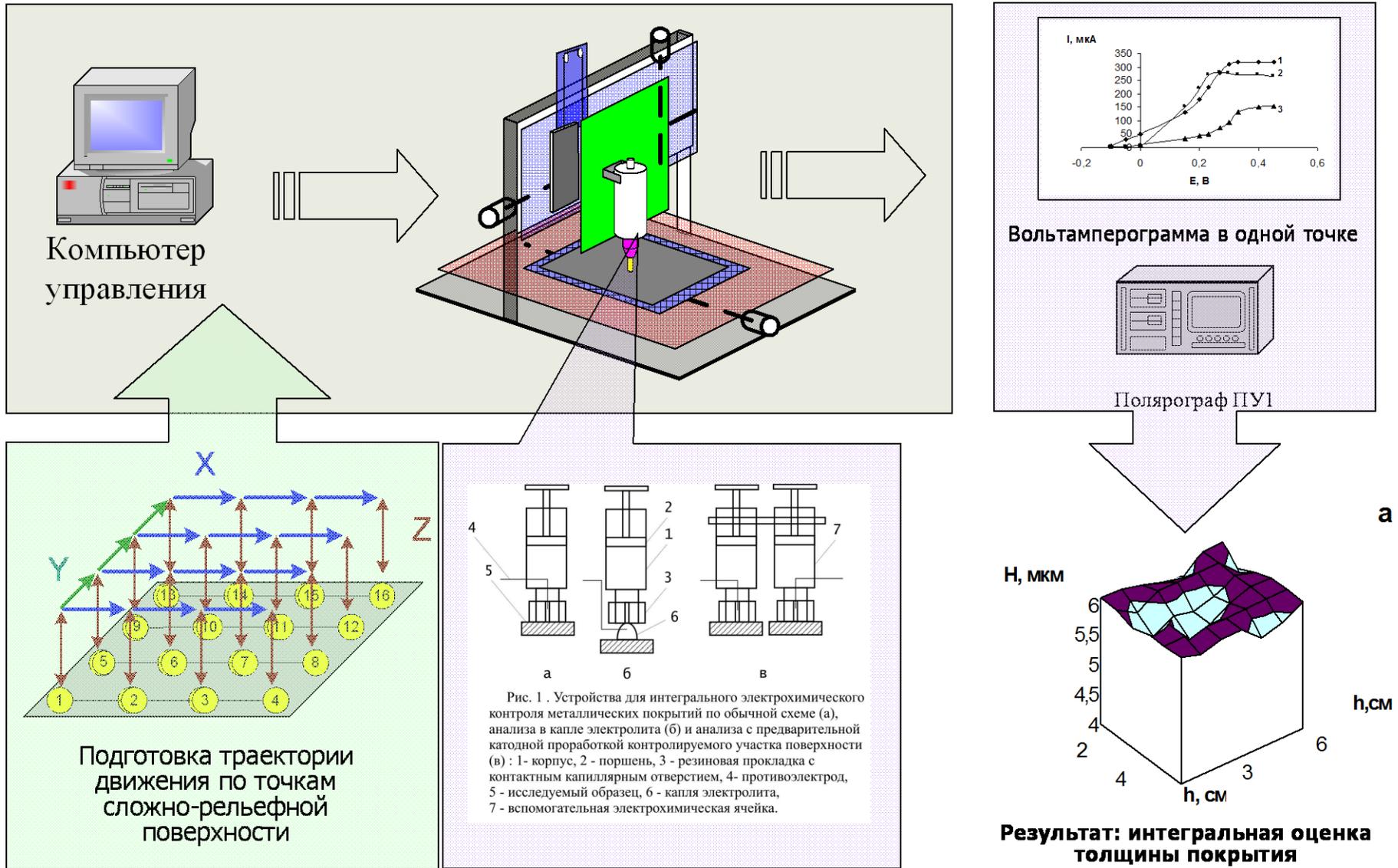
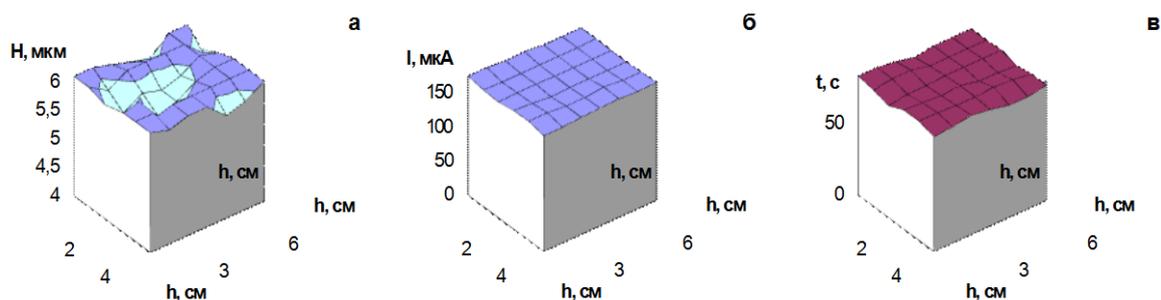


Рис. 36. Структура установки при картографировании параметров металлических покрытий методом ИЭК

Использование дополнительных модулей в конструкции испытательной установки позволяет проводить картографирование параметров покрытий электрохимическим методом (Рис. 37).



**Рис. 37.** Картограммы интегрального контроля кадмиевых покрытий (Кдб): а – по толщине покрытия, б – по предельному току растворения, в – по времени перфорации.

Применение установки для исследования гальванопокрытий электрохимическим методом позволило предложить новый способ определения износа металлических покрытий [60], направленный на расширение функциональных возможностей, повышение точности, информативности и производительности.

Предлагаемый способ реализуется тем, что при одинаковых условиях проводят полное электрохимическое растворение микро-участков поверхности эталонного образца, представляющего собой неизношенное покрытие, и исследуемого покрытия, подвергнутого изнашиванию, получают аналитические сигналы процессов растворения, на основании которого определяют толщину покрытий, и по разности толщин изношенного и неизношенного покрытий оценивают линейный износ.

Повышение точности и расширение функциональных возможностей достигается тем, что растворение проводят при помощи электрохимической ячейки - зонда, конструкция которой позволяет выделять на поверхности образцов равные по площади участки и подвергать их электрохимическому растворению. Для исключения инструментальной погрешности растворение проводят последовательно, используют один и тот же источник тока и электрохимический зонд.

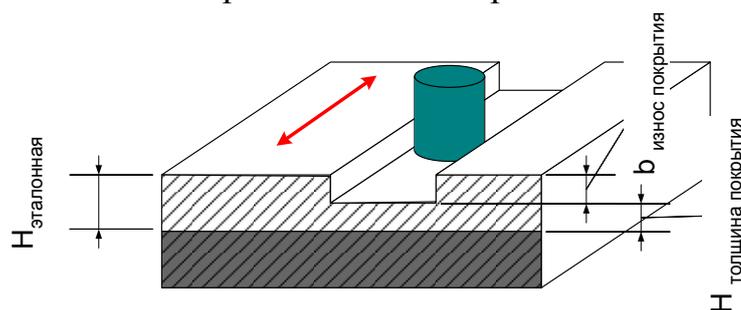
Для повышения производительности анализ проводят в гальваностатическом режиме поляризации, фиксируя в качестве аналитического сигнала время полной перфорации покрытия, которое является линейной функцией толщины покрытия.

Для повышения информативности определение толщины покрытия после изнашивания проводят в нескольких точках, смещая зонд при помощи системы пространственного перемещения параллельно поверхности образца, что позволяет оценить интегральный (по площади) износ.

Линейный износ  $b$  рассчитывается по формуле:

$$b = H - h,$$

где  $H$  - толщина покрытия эталонного образца,  $h$  - толщина покрытия исследуемого образца. При реализации интегрального контроля путем измерения толщины изношенного покрытия в нескольких точках значение  $h$  представляет собой усредненное значение параллельных измерений.



**Рис. 38.** Схема к анализу износостойкости покрытий

Таким образом, разработанная блочно-модульная конструкция ИК при незначительном изменении структуры, позволила реализовать новую методику ИЭК, которая существенным образом повышает производительность метода ЛЭА при определении толщины защитного покрытия, наличия его структурных дефектов и коррозионных свойств металлических покрытий, а разработка новых конструкций прижимных ячеек обеспечила возможность работы на шероховатых и наклонных поверхностях с использованием предварительной катодной обработки. При этом использование метода электрохимического анализа к задаче измерения износа покрытий позволило разработать новый способ определения износа металлических покрытий.

#### **4.5. Выводы**

Конструкция многокоординатной испытательной установки может послужить базой для дальнейшего развития средств и методов анализа, как фрикционных характеристик материалов, так и средств анализа поверхностей в целом.

Предложен способ и устройство управления фрикционным взаимодействием анизотропных тел за счет оптимизации положения вектора трения относительно главного направления движения.

Для смежных областей исследования материалов, в частности, при электрохимическом анализе поверхностей модульный принцип построения установки позволил реализовать процесс картографирования параметров гальванопокрытий электрохимическим методом. А использование методов электрохимического анализа поверхностей трения позволило предложить способ определения относительной износостойкости металлических покрытий.

## Заключение

В результате проведенных в работе комплексных исследований разработана установка для исследования процессов фрикционного контакта твердых тел, на основе применения многокоординатного привода движения, оригинальные устройства измерения сил трения и ряд методик анализа силовых параметров процесса трения в условиях неколлинеарности векторов трения и скорости главного движения.

1. Разработана автоматизированная установка для исследования процессов фрикционного взаимодействия поверхностей с анизотропной шероховатостью с учетом неколлинеарности векторов силы трения и скорости главного движения, снабженная многокоординатным приводом, реализующим нелинейные траектории движения измерительного элемента в пределах  $200 \times 200 \times 100$  мм, со скоростями относительного перемещения до 10 мм/сек, с точностью позиционирования 0,06 мм.
2. Разработана методика определения фрикционной анизотропии материалов путем регистрации мгновенного значения сил трения на круговой траектории, аппроксимируемой набором линейных участков.
3. Предложен способ управления результирующей силой трения за счет изменения взаимной ориентации движущихся тел с анизотропной шероховатостью.
4. Разработано двухкоординатное устройство измерения знакопеременных сил в диапазоне от -150 до 150 грамм для определения положения вектора трения при анализе фрикционных характеристик анизотропных материалов.
5. Разработано устройство управления нагрузкой пары трения на основе системы непрерывного контроля величины нагружающего усилия, в диапазоне от 0 до 300 грамм.
6. Использование дополнительных модулей в конструкции установки позволяет проводить картографирование параметров покрытий электрохимическим методом (толщина, химический состав, износ).

## Литература

1. Александрович, А.И. Тензор коэффициентов трения анизотропных поверхностей / А.И.Александрович, Б.С.Векшин, И.Н. Потапов // Трение и износ. -1985. -Т.VI. -№ 6. - С. 996-1004.
2. Ашкенази, Е.К. Анизотропия конструкционных материалов: справочник. / Е.К.Ашкенази, Э.В. Ганов. – Л.: Машиностроение. - 1980. - С. 5-8.
3. А1 195686 SU G 01 N 19/02. Прибор для испытания материалов на микротвердость царапанием / Е.С. Беркович, Н.М. Емельянов (СССР). - № 1055835/25-28; заявл. 15.11.66 // Изобретения (Заявки и патенты). – 1967. - №10.
4. А1 665244 SU G 01 N 19/02. Прибор для определения анизотропии физико-механических свойств поверхностного слоя твердого тела / В.А. Белый, В.П. Богданович, В.М. Переплетчиков, В.Г. Савкин, А.И. Свириденко (СССР). - № 2046465/25-28; заявл. 12.07.74 // Изобретения (Заявки и патенты). – 1979. - № 20.
5. А1 705312 SU G 01 N 19/02. Способ определения анизотропии поверхностных физико-механических, преимущественно фрикционных, свойств материала / В.А. Белый, В.П. Богданович, Е.М. Миронович (СССР). - № 2013337/25-28; заявл. 04.04.74 // Изобретения (Заявки и патенты). – 1979. - № 47.
6. А1 1388769 SU G 01 N 19/02. Способ определения анизотропии поверхностных физико-механических, преимущественно фрикционных, свойств материала / В.В. Тарасов (СССР). - № 4126558/25-28; заявл. 10.10.68 // Изобретения (Заявки и патенты). – 1988. - № 14.
7. А1 1388768 SU G 01 N 19/02. Устройство для измерения силы трения / Н.И. Егоренков, А.И. Кузавков (СССР). - № 4089287/25-28; заявл. 09.07.86 // Изобретения (Заявки и патенты). - 1988, - № 14.
8. А1 1416895 SU G 01 N 19/02. Устройство для определения силы трения при динамическом знакопеременном движении / В.В. Аждер, Э.М. Мохнаткин,

- Г.И. Поштару, В.И. Ений (СССР). - № 4117893/25-28; заявл. 11.06.86 // Изобретения (Заявки и патенты). - 1988, - № 30.
9. А1 954856 SU G 01 N 3/56. Устройство для измерения силы трения / Ю.А. Евдокимов, В.Н.Путилин, В.В.Сычев, Г.П.Авдеев (СССР). - № 2508818/25-28; заявл. 18.07.77 // Изобретения (Заявки и патенты). - 1982, Бюл. - №32.
- 10.А1 1043518 SU G 01 N 3/56. Устройство для испытания материалов на трение и износ / В.В.Шаповалов, Н.В.Дымов (СССР). - № 3379136/25-28; заявл. 11.01.82 // Изобретения (Заявки и патенты). - 1983, - № 35.
- 11.А1 1348717 SU G 01 N 3/56. Устройство для измерения силы трения / Н.Н.Юрченко, Р.А.Макаров (СССР). - № 3991562/25-28; заявл. 19.12.85 // Изобретения (Заявки и патенты). - 1987, - № 40.
- 12.А1 1377666 SU G 01 N 19/01. Устройство для испытания материалов на трение и износ /Л.Г.Гулянский (СССР). - № 3858404/25-28; заявл. 21.02.85 // Изобретения (Заявки и патенты). - 1988, - № 8.
- 13.А1 1578576 SU G 01 N 3/56. Устройство для испытания материалов на трение и износ / В.В. Аждер, Э.М. Мохнаткин, Г.И. Поштару, В.И.Комендант, В.И.Ений, В.Ф.Чебан (СССР). - № 4402997/25-28; заявл. 04.04.88 // Изобретения (Заявки и патенты). - 1990, - № 26.
- 14.А1 1136040 SU G 01 L 1/04. Датчик силы / Э.А.Келлер, П.В.Шевелев (СССР). - № 3598889/24-10; заявл. 01.04.83 // Изобретения (Заявки и патенты). – 1985. - № 3.
- 15.Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Д. Бакли. -М.: Машиностроение. - 1986. - 360 с.
- 16.Грудев А.П. Трение и смазка при обработке металлов давлением: Справочник. / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. -М.: Металлургия. - 1982. - С. 312.
- 17.Григоренко, А.М. Некоторые вопросы теории технической информации / А.М. Григоренко. - М.: Изд-во «ЮБЕКС». -1998. - С. 112.
- 18.Долголенко, П.В. Влияние направлений следов обработки на износ плоскостных пар трения / П.В. Долголенко // Качество поверхности деталей

- машин: Труды семинара по качеству поверхности. Сб.4. - М.: Изд. АН СССР. - 1959. - С. 49-54.
19. Днепренко, В.Н. Анизотропия износостойкости сплава Fe-20% Mn при трении / В.Н. Днепренко, В.В. Карпович, Л.Н. Лариков, О.В. Микуляк, В.Е. Панарин // Трение и износ. -1992. -Т. 13. -№ 6. - С. 1026-1031.
20. Дружинский, И.А. Сложные поверхности: математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник. / И.А. Дружинский. – Л.: Машиностроение. - 1985. - С. 263.
21. Дьяченко, П.Е. Влияние направления следов механической обработки на силу трения / П.Е. Дьяченко // Трение и износ в машинах. - Сб. II. - М.-Л.: Изд. АН СССР. -1946. - С. 130-134.
22. Дьяченко, П.Е. Влияние микрогеометрии поверхности цапф на работу подшипников из свинцовистой бронзы / П.Е. Дьяченко, Б.Л. Слинко. // Трение и износ в машинах. - Сб.V. - М.-Л.: Изд. АН СССР. -1950. - С. 25-41.
23. Дьяченко, П.Е. Влияние направлений следов механической обработки на изнашивание свинцовистой бронзы / П.Е. Дьяченко, Т.В. Смушкова // Трение и износ в машинах. - Сб.VII. - М.-Л.: Изд. АН СССР. - 1953. - С. 56-71.
24. Жуковский, Н.Е. Избранные сочинения / Н.Е. Жуковский. - Т.7. - М.-Л.: Изд. АН СССР. - 1948.-426с.
25. Заико, А.И. Точность аналоговых линейных измерительных каналов ИИС / А.И. Заико. -М.: Изд-во стандартов. -1987.
26. Положительное решение о выдаче патента по заявке № 20077137192/28 от 28.08.08: МКИ G 01 N 19/02. Устройство для измерения силы трения / В.В.Тарасов, А.В. Чуркин, С.Ю. Лоханина.
27. Заявка на изобретение № 2008133133/(041658) от 11.08.2008; МКИ G 01 N 19/02. Устройство для изучения анизотропии трения / В.В.Тарасов, А.В. Чуркин, В.А. Постников.
28. Заявка на изобретение № 2008133134/(041659) от 11.08.2008; МКИ G 01 N 19/02. Способ определения относительной износостойкости / В.В.Тарасов, С.Ю. Лоханина, А.В. Чуркин.

29. Заявка на изобретение № 2008138774/(049994) от 29.09.2008; МКИ G 01 N 19/02. Способ определения анизотропии физико-механических, преимущественно фрикционных свойств материала / А.В. Чуркин, В.В.Тарасов, С.Ю. Лоханина.
30. Заявка на изобретение № 2008138773/(049992) от 29.09.2008; МКИ G 01 N 19/02. Способ и устройство управления фрикционным взаимодействием пар трения / А.В. Чуркин, В.В.Тарасов, В.Б.Дементьев.
31. Исимару, А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах (Монотонное рассеяние, турбулентность, шероховатые поверхности) / А. Исимару. - Т.2. - М.: Мир. -1981. - С. 317.
32. Исаченков, Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. / Е.И. Исаченков. –М.: Машиностроение. - 1967. - С. 27-29.
33. Исаченков, Е.И. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением. / Е.И. Исаченков. - М.: Машиностроение. - 1978. – С. 208.
34. Казаченок, В.И. Штамповка с жидкостным трением: Дисс. на соиск. уч. степ. док-ра техн. наук. / В.И. Казаченок. - Ижевск: ИМИ. - 1972. – С. 350.
35. Ковалев, В.А. Анализ ориентационного строения поверхностей твердых тел / В.А. Ковалев, С.А. Чижик. // Трение и износ. -1993. -Т.14. -№ 2. - С. 285-298.
36. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ. / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. - М.: Машиностроение. - 1977. - С. 420-444.
37. Крагельский, И.В. Трение и износ. / И.В. Крагельский. - М.: Машиностроение. – 1968. - С. 389.
38. Крагельский, И.В. Трение и износ. / И.В. Крагельский. - М.: Машгиз. -1962. - С.282-290.
39. Кузин, Ф.А. Кандидатская диссертация. Методика написания, правила оформления и порядок защиты: Практическое пособие для аспирантов и соискателей ученой степени / Кузин Ф.А. – 6-е изд., доп.-М.: Ось-89. - 2003. - С.224.

40. Леванов, А.Н., Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. / А.Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, С.П. Буркин. - М.: Металлургия. - 1976. – С. 416.
41. Лукьянов, В.С., Рудзит Я.А. Параметры шероховатости поверхности. / В.С. Лукьянов, Я.А. Рудзит. -М.: Изд. Стандартов. - 1979. – С.162.
42. Максак, В.И. Предварительное смещение и жесткость механического контакта. / В.И. Максак. -М.: Наука. - 1975. – С. 60.
43. Макушок, Е.М. Массоперенос в процессах трения. / Е.М. Макушок, Т.В. Калиновская, А.В. Белый. - Минск: Наука и техника. - 1978. - С. 118-124.
44. Новоселов, О.Н., Фомин А.Ф. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем. / О.Н. Новоселов, А.Ф. Фомин. - М.: машиностроение. - 1980.
45. Найак, П.Р. Применение модели случайного поля для исследования шероховатых поверхностей / П.Р. Найак. // Проблемы трения и смазки. - М.: Мир. – 1971. - Т.93. - №3. - С.85-95.
46. Опейко, Ф.А. Экспериментальное исследование анизотропного трения / Ф.А. Опейко. // Сб. научно-техн. работ МИМЭСХ. - М.: Сов.наука. - 1952. -С. 235-243.
47. Охрименко, Я.М. Экспериментальное исследование внешнего трения при осадке (сообщение 3) / Я.М. Охрименко. // Обработка стали и сплавов: сб. трудов МИС. - №XXXVI. -М.: Металлургиздат. -1957. - С. 371-393.
48. Охрименко, Я.М., Тюрин В.А. Теория процессовковки. / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин. - М.: Высшая школа. - 1977. – С. 295.
49. Павлов, И.М. Теория прокатки. / Павлов И.М. -М.: Металлургиздат. - 1950. – С. 610.
50. Павлов, И.М. Анизотропия трения при обработке металлов давлением. / И.М. Павлов, П.С. Костычев // Структура и свойства стали: сб. трудов МИС №XXX. -М.:Металлургиздат. - 1951. - С. 112-135.
51. Павлов, И.М., Соотношение между коэффициентами трения в зависимости от направления перемещения при деформации. / И.М. Павлов, В.Г. Дьяков. //

- Технология производства и обработки стали: сб. трудов МИС №XXXI. -М.:  
Металлургиздат. -1953. - С. 221-241.
52. Пружанский, Л.Ю. Истирающая способность обработанной поверхности /  
Л.Ю. Пружанский. -М.: Изд-во "Наука". – 1975. - С.64.
53. С1 2235997 RU G 01 N 27/48. Способ оценки коррозионной стойкости  
металлических покрытий / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С.Черепанов,  
А.В.Чуркин. (ИПМ УрО РАН). - № 2003107503/28; заявл. 19.03.03 //  
Изобретения (Заявки и патенты). – 2006. - № 32.
54. С1 2231754 RU G 01 N 21/48. Электрохимическая ячейка для измерения  
толщины покрытий металлами и сплавами / В.В.Тарасов, А.В.Трубачев,  
И.С.Черепанов, А.В.Чуркин. (ИПМ УрО РАН). - № 2002122046/28; заявл.  
12.08.02 // Изобретения (Заявки и патенты). – 2004. - № 15.
55. С1 2234078 RU G 01 N 27/48. Способ и устройство для определения  
параметров металлических покрытий / В.В.Тарасов, А.В.Трубачев,  
И.С.Черепанов, А.В.Чуркин. (ИПМ УрО РАН). - № 2002133807/28; заявл.  
15.12.02 // Изобретения (Заявки и патенты). – 2004. - № 20.
56. С1 2229119 RU G 01 N 27/48. Способ определения параметров металлических  
покрытий / В.В.Тарасов, А.В.Трубачев, И.С.Черепанов, А.В.Чуркин. (ИПМ  
УрО РАН). - № 2002130131/28; заявл. 10.11.02 // Изобретения (Заявки и  
патенты). – 2004. - № 20.
57. С1 2284503 RU G 01 N 19/02. Устройство для измерения силы трения /  
В.В.Тарасов, А.В. Чуркин, И.С.Черепанов. (ИПМ УрО РАН). -№  
2005116155/28; заявл. 27.05.05 // Изобретения (Заявки и патенты). - 2006. -  
№27.
58. С1 2290622 RU G 01 N 3/56 G 01 N 9/02. Машина трения / В.В.Тарасов, А.В.  
Чуркин, И.С.Черепанов. (ИПМ УрО РАН). -№ 2005116150; заявл. 27.05.05 //  
Изобретения (Заявки и патенты). – 2006. - №36.
59. С1 2287801 RU G 01 N 3/56, G 01 N 19/02. Двухкоординатная машина трения  
/ В.В.Тарасов, А.В. Чуркин, И.С.Черепанов. (ИПМ УрО РАН). - №

- 2005134423/28; заявл. 07.11.05 // Изобретения (Заявки и патенты). - 2006. - №32.
- 60.С1 2293305 RU G 01 N 3/36. Способ оценки износа металлических покрытий / В.В.Тарасов, А.В.Трубачев, И.С.Черепанов, А.В.Чуркин. (ИПМ УрО РАН). - № 2005121075/28; заявл. 05.07.05 // Изобретения (Заявки и патенты). -2007. - № 4.
- 61.С1 2315284 RU G 01 N 19/02. Способ оценки относительной износостойкости материала / В.В. Тарасов, И.С. Черепанов, С.Ю. Лоханина, А.В. Чуркин. (ИПМ УрО РАН). - № 2006133407/28; заявл. 18.09.06 // Изобретения (Заявки и патенты). – 2008. - № 2.
- 62.Сборник “Склерометрия”. - М. - 1965. - С. 98.
- 63.Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В.Д.Зозуля, Е.Л.Шведков, Д.Я.Ровинский, Э.Д.Браун; Отв. ред. И.М.Федорченко. -Киев: Наукова думка. - 1990. - 264 с.
- 64.Северденко, В.П. Анизотропия трения при открытой осадке / В.П Северденко, А.В. Степаненко. // ДАН БССР. -1966. -Т.Х. -№10. - С. 744-747.
- 65.Семенюк, Н.Ф. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля (Распределение высот вершин, средняя кривизна в вершинах, градиент поверхности) / Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко. // Трение и износ. -1980. -Т.1. -№ 3. - С. 465-471.
- 66.Семенюк, Н.Ф. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля (Полная кривизна, главные кривизны и отношение главных кривизн в вершинах микронеровностей. Удельная площадь гауссовской поверхности и удельный объем зазора) / Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко. // Трение и износ. -1980. -Т.1. - № 5. - С. 815-823.
- 67.Семенюк, Н.Ф. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля (Фактическая площадь контакта, коэффициент трения, термическое сопротивление,

- адгезионное взаимодействие с учетом деформации в зоне контакта) / Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко // Трение и износ. -1980. -Т.1. -№ 6. - С. 1010-1020.
68. Семенюк, Н.Ф. Фактическая площадь упругого контакта анизотропной шероховатой поверхности с гладкой / Н.Ф. Семенюк, Т.Ф. Калмыкова. // Трение и износ. -1983. -Т.4. -№ 3. - С. 465-475.
69. Сергеев, А.Г. Метрология: Учеб. пособие для вузов. / А.Г. Сергеев, В.В. Крохин. -М.: Логос. - 2000. - С 408.
70. Сергеев, А.Г. Метрология: Учебник. / А.Г. Сергеев. -М.: Логос. - 2004. -С. 288.
71. Слепушкин, В.В. Электрохимический анализ с прижимными ячейками / В.В. Слепушкин // Журнал аналит. химии. - 1987. -Т. 42. -№ 4. - С. 606.
72. Слепушкин, В.В. Локальный электрохимический анализ / В.В. Слепушкин, Б.М. Стифатов, Е.Я. Нейман. // Журнал аналит. химии. -1994. - Т. 49. - № 9. - С. 911.
73. Слепушкин, В.В. / Определение толщины металлопокрытий методом анодного электрохимического растворения при линейном изменении напряжения / В.В. Слепушкин, В.В. Зулин. // Журнал аналит. химии. - 1979. - Т. 34. - № 7. - С. 1247.
74. Слепушкин, В.В. Влияние омического падения напряжения в растворе на результаты анодно-полярографического метода / В.В. Слепушкин, Н.Н. Кузьмина, М.Г. Ярцев. // Журнал аналит. химии.- 1978. - Т. 33. - № 4. - С. 667.
75. Стифатов, Б.М. Локальный электрохимический анализ пленочных элементов микроэлектроники: Дис.канд. хим. наук. 02.00.02. / Б.М. Стифатов. - М.: МИТХТ. - 1990. – С.20.
76. Степанов, А.В. Трение и износ упруго-анизотропных тел / А.В. Степанов. // ЖТФ. -1950. - Т. XX. вып.12. -С.1443-1451.
77. Степаненко, А.В. Исследование анизотропии контактного трения при открытой осадке и прокатке: Дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. / А.В. Степаненко. - Минск: БПИ. - 1966. - 202 с.

78. Степанчук, В.И. Эффекты скольжения второго порядка и мелкомасштабной рейнольдсовой шероховатости в теоретических расчетах опор с газовой смазкой / В.И. Степанчук. - М.: Машиноведение. – 1987. - №1. - С.105-114.
79. Тарасов, В.В. Метод локального электрохимического экспресс-контроля состава и толщины металлических покрытий / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С. Черепанов, А.В. Чуркин. // 1 Всероссийск. конф. "Аналитические приборы": Тез. докл. - СПб. - 2002. - С. 82-83.
80. Тарасов, В.В., Чуркин А.В. Оптимизация системы сбора информации для трибологических испытаний. / В.В. Тарасов, А.В. Чуркин. // 1 Всероссийск. конф. " Аналитические приборы ": Тез. докл. СПб. - 2002. -С. 317-318.
81. Тарасов, В.В. Система управления движением измерительного элемента на плоскости. / В.В. Тарасов, А.В. Чуркин, И.С. Черепанов. // 1 Всероссийск. конф. " Аналитические приборы ": Тез. докл. СПб. - 2002. -С.319-321.
82. Тарасов, В.В. Интегральный электрохимический экспресс-контроль поверхности металлов и сплавов в процессе абразивной обработки / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С. Черепанов, А.В. Чуркин. // Междун. научн. конф. "Современные проблемы механики и физико-химии процессов резания, абразивной обработки и ППД": Тез. докл. - Киев. - 2002. - С. 143 - 144.
83. Тарасов, В.В. Способ оценки коррозионной стойкости металлических покрытий / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С. Черепанов, А.В. Чуркин. // Материалы 4 международной школы-семинара "Современные методы исследования и предупреждения коррозионных разрушений". - Ижевск. - 2003. - С. 94-95.
84. Тарасов, В.В. Автоматизация экспресс-контроля коррозионной стойкости поверхностей / В.В. Тарасов, А.В. Чуркин, И.С. Черепанов. // Материалы 4 международной школы-семинара "Современные методы исследования и предупреждения коррозионных разрушений" - Ижевск. -2003. -С.96-97.
85. Тарасов, В.В. Коррозионные исследования металлических образцов после трибологических испытаний / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С. Черепанов,

- А.В. Чуркин. // В сб. трудов 4 Международной научно-технической конференции “Информационные технологии в инновационных проектах” - Ч.1. - Ижевск. - 2003. - С.102-103.
- 86.Тарасов, В.В. Прибор для исследования трибологических и коррозионных процессов на поверхности / В.В. Тарасов, А.В. Чуркин, И.С. Черепанов. // В сб. трудов 4 Международной научно-технической конференции “Информационные технологии в инновационных проектах” - Ч.1. -Ижевск. - 2003. - С.104-105.
- 87.Тарасов, В.В. Анализ конструктивных решений электрохимических датчиков, применяемых для контроля состава и свойств металлических покрытий / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С. Черепанов, А.В. Чуркин. // Аналитика и контроль. - 2003. - №3. - Т.7. - С. 215-219.
- 88.Тарасов, В.В., Чуркин А.В., Черепанов И.С. Блок модульного сопряжения для автоматизации трибологических установок. / В.В. Тарасов, А.В. Чуркин, И.С. Черепанов. // Материалы международного форума “Аналитика и аналитики ”. - Воронеж. - 2003. - Т.2. - С.617.
- 89.Тарасов, В.В. Автоматизированная система интегрального электрохимического контроля металлических покрытий / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С. Черепанов, А.В. Чуркин. // Материалы международного форума “Аналитика и аналитики ”. - Воронеж. - 2003. -Т.2. - С.616.
- 90.Тарасов, В.В. Исследование коррозионных и защитных свойств гальванических покрытий металлами и сплавами / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С. Черепанов, А.В. Чуркин. // Материалы 4 – й Междун. научно-техн. конференции “Инженерия поверхности и реновация изделий”. - Киев. - 2004. - С. 196-198.
- 91.Тарасов, В.В. Система управления движением измерительного элемента на плоскости / В.В. Тарасов, А.В. Чуркин, И.С. Черепанов. // Материалы 4 – й Междун. научно-техн. конференции “Инженерия поверхности и реновация изделий”. - Киев. -2004.

92. Тарасов, В.В. Автоматизированная система интегрального электрохимического контроля коррозионных свойств металлических покрытий / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С. Черепанов, А.В. Чуркин. // Защита металлов. - 2004. - Т.40. - №4. - С. 433-438.
93. Тарасов, В.В. Приборный комплекс интегрального электрохимического контроля модифицированных металлических поверхностей / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С. Черепанов, А.В. Чуркин. // Материалы VI Всероссийской конференции по электрохимическим методам анализа с международным участием "ЭМА - 2004". - Уфа. - 2004. - С.153-154.
94. Тарасов, В.В. Интегральный электрохимический контроль параметров гальванопокрытий на сложно-рельефных образцах / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С. Черепанов, А.В. Чуркин. // Материалы Всероссийской конференции по аналитической химии "Аналитика России - 2004". - Москва. - 2004. - С. 252-253.
95. Тарасов, В.В. Электрохимические датчики контроля состава и свойств металлических покрытий / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С. Черепанов, А.В. Чуркин. // Датчики и системы. – 2004. - №2. - С.28-31.
96. Тарасов, В.В. О возможности применения метода интегрального электрохимического контроля для оценки линейного износа металлических гальванопокрытий / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С. Черепанов, А.В. Чуркин. // Материалы 5 – й Междун. научно-техн. конференции "Инженерия поверхности и реновация изделий". - Киев. - 2005. - С. 220-221.
97. Тарасов, В.В. Некоторые аспекты построения испытательных систем и комплексов по принципам построения распределенных систем / В.В. Тарасов, А.В. Чуркин. // В сб. трудов ИПМ УрО РАН "Проблемы термогазодинамики и прочности": Под ред. А.В. Алиева. - Ижевск. - 2005. - С. 241-250.
98. Тарасов, В.В. Интегральный электрохимический контроль гальванических покрытий / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С. Черепанов, А.В. Чуркин. // В

- сб. трудов ИПМ УрО РАН “Проблемы термогазодинамики и прочности”:  
Под ред. А.В. Алиева. - Ижевск. - 2005. - С. 324-326.
99. Тарасов, В.В. Автоматизированная машина трения для испытания материалов в условиях динамического нагружения / В.В. Тарасов, А.В. Чуркин. // Сб. науч.тр. ИПМ УрО РАН “Технологическое обеспечение надежности и долговечности машин”. – Ижевск. – 2006. - С.207-209.
100. Тарасов, В.В., Чуркин А.В., Лоханина С.Ю. Устройство измерения сил трения при трибологических испытаниях / В.В. Тарасов, А.В.Чуркин, С.Ю. Лоханина // Тез.докл. III науч.-практ. конференции “Проблемы механики и материаловедения”, ИПМ УрО РАН. – Ижевск. – 2006. - С.78-79.
101. Тарасов, В.В. К вопросу о подборе состава электролитов осаждения гальванопокрытий в прижимных ячейках / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С. Черепанов, А.В. Чуркин. // Тез.докл. III науч.-практ. конференции “Проблемы механики и материаловедения”. ИПМ УрО РАН. – Ижевск. - 2006. - С.117-118.
102. Тарасов, В.В. К оценке точности результатов измерения толщины металлических гальванопокрытий / В.В. Тарасов, И.С. Черепанов, А.В.Чуркин, С.Ю. Лоханина // Материалы 6-го международного научно-технического семинара (21-23 февраля 2006 г., г. Свалява, Карпаты). – Киев: АТМ Украины. – 2006. - С 163-164.
103. Тарасов, В.В. Анализ закономерностей процессов электрокристаллизации металлов в прижимных ячейках при реализации восстанавливающего кулонометрического метода контроля гальванопокрытий в машиностроении / В.В. Тарасов, А.В. Трубачев, И.С. Черепанов, А.В. Чуркин. // Материалы 6-го международного научно-технического семинара (21-23 февраля 2006 г., г. Свалява, Карпаты). – Киев: АТМ Украины. – 2006. – С. 197-198.
104. Тарасов, В.В. Новые средства испытания материалов, имеющих выраженную анизотропию физико-механических свойств / В.В. Тарасов, А.В. Чуркин, И.С. Черепанов. // Материалы 6-го международного научно-

- технического семинара (21-23 февраля 2006 г., г. Свалява, Карпаты). – Киев: АТМ Украины. – 2006. - С. 198-201.
105. Тарасов, В.В. Анизотропия трения / В.В. Тарасов. – Ижевск: ИПМ УрО РАН. – 1998. - С.37-41.
106. Тарасов, В.В. Моделирование трения в технологических процессах обработки металлов / В.В. Тарасов, Н.С. Сивцев. – Ижевск: ИПМ УрО РАН. – 2006. - С. 166.
107. Тихомиров, В.П. Имитационное моделирование герметичности плоских стыков / В.П. Тихомиров, Л.В. Вольпер, О.А. Горленко. // Машиноведение. – 1986. - №2. - С.91-94.
108. Филиппов, А.А. Изготовление сборочной оснастки с поверхностью двойной кривизны / А.А. Филиппов, Б.Н. Слюсарь, А.А. Кагеян, М.Б. Флек. // “Сборка в машиностроении, приборостроении”. – 2004. - №11. - С. 29.
109. Феликсон, Е.Н. Упругие элементы силоизмерительных приборов / Е.Н. Феликсон. – М.: Машиностроение. – 1977. - С. 160.
110. Фрейман, Л.И. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите / Л.И. Фрейман, В.А. Макаров, И.Е. Брыксин. - Л.: Химия. - 1972. - С. 124.
111. Хусу, А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. - М: Наука. - 1975. - С. 344.
112. Цапенко, М.П. Измерительно-информационные системы: Структура и алгоритмы, системотехническое проектирование. / М.П. Цапенко. - М.: Энергоатомиздат. - 1985.
113. Черепанов, И.С. Разработка метода электрохимического контроля металлических гальванопокрытий: Дис. канд. хим. наук: 05.11.13.: - Ижевск: ИПМ УрО РАН. – 2004. - С. 109.
114. Черепанов, И.С. О возможности применения метода интегрального электрохимического контроля для оценки качества и защитных свойств металлических покрытий / И.С. Черепанов, А.В. Трубачев, В.В. Тарасов, А.В.

- Чуркин. // Материалы 4 международной школы-семинара “Современные методы исследования и предупреждения коррозионных разрушений”. - Ижевск. - 2003. - С.104-105.
115. Чертавских, А.К., Белосевич В.К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением / А.К. Чертавских, В.К. Белосевич. - М.: Металлургия. - 1968. - 362 с.
116. Шарапин, Е.Ф. Элементы теории обработки металлов давлением / Е.Ф. Шарапин. -Харьков: Metallurgizdat. - 1961. - С. 208.
117. Экслер, Л.И. Исследование параметров формы микронеровностей шероховатой поверхности применительно к оценке трения и износа: Дисс. на соиск. уч. степ. к-та техн. наук. / Л.И. Экслер. - М.: ИМАШ.- 1974. – С. 152.
118. Юдин, М.Ф., Селиванов М.Н., Тищенко О.Ф., Скороходов А.И. Основные термины в области метрологии / М.Ф. Юдин, М.Н.Селиванов, О.Ф. Тищенко, А.И. Скороходов // Под ред. Тарбеева – М.: Издательство стандартов. - 1989. - С.37-40.
119. Якобсон, М.О. Качество поверхности и долговечность направляющих металлорежущих станков / М.О. Якобсон // Качество поверхности деталей машин: Труды семинара по качеству поверхности. - Сб. 5. - М.: Изд. АН СССР. - 1961. - С. 348-354.
120. Bowden, P.P. The friction and lubrication of solids / P.P. Bowden, D. Tabor. // - v.2. - Oxford: Claredon Press. - 1964.
121. Huber, M.T. Opory tarcia i ich rola w niektorych zagadnieniach kolejmctwa// Archiwum Mechaniki Stosowanej / M.T. Huber. - T.I. - Gdansk, - 1949.- S. 271.
122. Huber, M.T. Teoria tarcia walka toczacego sie po plaszczynie poziomej i stizgajacego jednoczesme po niej w kierunku poprzecznym / M.T. Huber. // Archiwum Mechaniki Stosowanej.- T.2. – Gdansk. - 1951.- S.304 -306.
123. Moszynski, W. Zagadnienie tarcia anizotropowego oraz tarcia tocznoslizgowego ciat stalych / W. Moszynski // Przegląd Mechaniczny. -1952. - R.XI. - z 2. -S.46-53.

124. Moszynski, W. Zagadnienie tarcia anizotropowego oraz tarcia tocznoslizgowego ciał stałych / W. Moszynski // Przegląd Mechaniczny. -1950. - R.IX. - z 1. - S.3-11.
125. Tarasov, V.V., Trubachev A.V., Cherepanov I.S., Churkin A.V. The device for the investigation of the tribological and corrosion processes on the surface / V.V. Tarasov, A.V. Trubachev, I.S. Cherepanov, A.V. Churkin. // Zbornik prednasok 5. medzinarodnej vedeckej konferencie "Transfer 2003" diel. – Trencin. – 2003. - S. 428-431.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**



«Утверждаю»

Ректор УдГУ д.т.н., профессор

В.А. Журавлев

2006г.

АКТ

практического использования результатов  
диссертационной работы А.В.Чуркина в учебном  
процессе и научной работе студентов  
Удмуртского государственного университета

Мы, нижеподписавшиеся, декан физического факультета к.ф.-м.н., доцент Бовин В.П., зав. кафедрой «Физика твердого тела», к.ф.-м.н., доцент Крылов П.Н. составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы научного сотрудника ИПМ УрО РАН А.В.Чуркина использовались в учебном процессе Университета в виде методических материалов в курсе лекций «Трибомеханика» и «Механика поверхности», а также в практических и лабораторных работах.

Указанные материалы опираются на результаты диссертационной работы в части вопросов, касающихся оценки анизотропии фрикционных характеристик твердых тел, они также представляют методический и прикладной интерес с точки зрения автоматизации физических исследований в научной практике студентов физического факультета.

Декан физического факультета,  
к.ф.-м.н., доцент

В.П.Бовин

Зав. кафедрой физики твердого тела  
к.ф.-м.н., доцент

П.Н.Крылов

