

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ЗАПОРОЖСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ЦЫГАНОВ ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ

УДК 621.891:669.018.44

НАУЧНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ
ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРИ
МНОГОКОМПОНЕНТНОМ ТЕРМОКОНТАКТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Специальность 05.02.04 – трение
и изнашивание в машинах

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
Ищенко Леонид Иосифович
доктор техн. наук, профессор

Запорожье – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
РАЗДЕЛ 1. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ПРИ МНОГОКОМПОНЕНТНОМ ТЕРМОКОНТАКТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.....	19
1.1 Трибосопряжения, изнашивающиеся при многокомпонентном динамическом нагружении.....	19
1.2 Узлы трения ГТУ и повреждение деталей при контактных взаимодействиях и эксплуатационных температурах.....	29
1.3 Состояние исследований в области изнашивания материалов деталей трибосопряжений при многокомпонентном термоконтатном воздействии.....	45
1.4 Постановка цели и задач исследования, основные этапы	59
РАЗДЕЛ 2. МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	65
2.1 Особенности исследований износостойкости материалов, работающих при многокомпонентном термоконтатном воздействии.....	65
2.2 Испытательные стенды и установки для оценки износостойкости трибосопряжений при многокомпонентном термоконтатном воздействии.....	69
2.3 Методика проведения исследований износостойкости трибосопряжений при многокомпонентном термоконтатном воздействии.....	92
2.3.1 Условия проведения исследований.....	92
2.3.2 Определение величины интенсивности изнашивания.....	98
2.4 Методы исследований качественных изменений поверхностного слоя в зоне контакта.....	108
2.4.1 Оценка состояния поверхностного слоя трибоспектральным методом.....	109
2.4.2 Оценка состояния поверхностного слоя по изменению работы выхода электрона с поверхности образцов.....	111

2.4.3 Оценка микрогеометрии поверхности.....	114
2.5 Методы экспериментального изучения трибопроцессов в поступательных плоскостных парах IV класса с периодическим ударным разрывом контакта (типа «направляющая-цепь»)	116
2.6 Оценка силы трения скольжения (движения) и силы трения покоя.....	122
Выводы.....	125
РАЗДЕЛ 3. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ИЗНАШИВАНИЕ СПЛАВОВ.....	
126	
3.1 Определение расчетного пути трения и элементов контактного разрушения трибосопряжения при трехкомпонентном динамическом нагружении.....	127
3.2 Влияние многокомпонентного динамического нагружения на износостойкость трибосопряжений.....	143
3.3 Процессы изнашивания трибосопряжений при многокомпонентном динамическом нагружении и высоких температурах.....	153
3.4 Процессы изнашивания трибосопряжений при многокомпонентном динамическом нагружении и отрицательных температурах.....	158
3.5 Оценка износа поступательных плоскостных пар IV класса с периодическим ударным разрывом контакта (типа «направляющая-цепь»)	164
Выводы.....	166
РАЗДЕЛ 4. ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СОПРЯЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ТЕРМОКОНТАКТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	
168	
4.1 Влияние нагрузочных параметров на состояние поверхностного слоя различных материалов.....	168
4.1.1 Анализ состояния поверхностного слоя трибоспектральным методом.....	168

4.1.2 Анализ состояния поверхностного слоя по изменению работы выхода свободного электрона.....	181
4.1.3 Анализ микрогеометрии поверхности.....	188
4.2 Состояние поверхностного слоя образцов при многокомпонентном динамическом нагружении и высоких температурах.....	191
4.3 Влияние отрицательных температур на трибологические свойства и состояние поверхностного слоя деталей трибосопряжений при многокомпонентном нагружении.....	194
Выводы.....	204
РАЗДЕЛ 5. ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ СОПРЯЖЕНИЙ ПРИ МНОГОКОМПОНЕНТНОМ ТЕРМОКОНТАКТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.....	
5.1 Модель формирования и разрушения поверхностного слоя деталей трибосопряжений при многокомпонентном динамическом нагружении.....	206
5.1.1 Наноструктурные изменения поверхностного слоя деталей трибосопряжений при многокомпонентном динамическом нагружении.....	206
5.1.2 Механизм разрушения поверхностного слоя в условиях циклического трибонагружения.....	210
5.1.3 Изнашивание материалов при трении в условиях многокомпонентном динамического нагружения.....	217
5.2 Влияние температуры окружающей среды на формирование и разрушение поверхностного слоя деталей трибосопряжений в условиях многокомпонентного динамического нагружения.....	228
5.3 Моделирование трибопроцессов в зоне контакта инструмента и заготовки при обработке металлов резанием.....	230
5.4 Прогнозирование влияния свободных макрорадикалов в зоне контакта трибосопряжений на износостойкость деталей.....	240

5.4.1 Трибодиагностика эффективности разрушения поверхности металла при воздействии свободных макрорадикалов.....	240
5.4.2 Разработка специального гранулированного абразивного материала.....	245
5.4.3 Способы изготовления и пути повышения трибологической эффективности специального гранулированного абразивного материала.....	251
Выводы.....	259
РАЗДЕЛ 6. МЕТОДОЛОГИЯ ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ ПРИ МНОГОКОМПОНЕНТНОМ НАГРУЖЕНИИ.....	
262	
6.1 Рекомендации по условиям эксплуатации узлов трения, работающих при многокомпонентном нагружении и различных температурах окружающей среды.....	262
6.2 Способы определения износостойкости трибосопряжений при многокомпонентном динамическом нагружении.....	268
6.2.1 Основы оценки инженерии поверхности трибосопряжений трибоспектральным методом.....	269
6.2.2 Основы оценки инженерии поверхности трибосопряжений по изменению величины работы выхода электрона по поверхности деталей.....	270
6.3 Предложения по ускоренной оценке износостойкости поступательных плоскостных пар IV класса с периодическим ударным разрывом контакта (типа «направляющая-цепь»).....	272
6.3.1 Оценка износостойкости трибосопряжения типа «направляющая-цепь» по натурным испытаниям	273
6.3.2 Ускоренные испытания режущих звеньев пильной цепи на износостойкость.....	277
6.4 Рекомендации по повышению износостойкости металлорежущего инструмента.....	283

6.4.1 Особенности многокомпонентного динамического нагружения трибосопряжения «деталь-режущий инструмент».....	283
6.4.2 Устройство для уменьшения вибраций режущего инструмента.....	285
6.4.3 Оптимизация условий нагружения в контакте методом вибродемпфирования.....	287
6.5 Применение методов инженерии поверхности повышенной износостойкости для трибосопряжений многокомпонентного контактного нагружения.....	291
6.5.1 Использование свободных макрорадикалов в трибосопряжениях....	291
6.5.1.1 Метод финишной обработки с применением гранулированного абразивного материала.....	291
6.5.1.2 Управление трибологическими свойствами зоны контакта сопряжений воздействием свободных макрорадикалов	294
6.5.2 Методологические принципы инженерии поверхности деталей сложного динамического контактного нагружения.....	303
Выводы.....	316
Общие выводы.....	320
Перечень ссылок.....	324
Приложение А. Распределение работы выхода электрона вдоль образца сплава ХТН-61 после износа при двухкомпонентном и трехкомпонентном нагружении.....	347
Приложение Б. Топография поверхности образцов различных материалов после износа при двухкомпонентном и трехкомпонентном нагружении.....	352
Приложение В. Результаты статистической обработки силы трения индентора при сканировании поверхностного слоя.....	368
Приложение Г. Акты внедрения результатов работы.....	398

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных проблем современного машиностроения выступает увеличение срока службы машин и механизмов и их конкурентоспособности на мировом рынке.

В настоящее время результаты исследований в области изнашивания материалов в особо тяжелых условиях механической и тепловой нагрузок, которые носят динамический характер, не позволяют с высокой степенью достоверности выбрать (или разработать) те или иные конструктивно-технологические мероприятия, которые направлены на повышение долговечности изделий.

Исследования изнашивания при условиях отрицательных температур и динамики нагружения до настоящего времени проведены в недостаточном объеме, а потому не существует однозначного представления о влиянии этих факторов на трибологические характеристики конструкционных материалов. Поскольку комплексное воздействие многокомпонентных условий нагружения изучено недостаточно и существующие положения теории трения и изнашивания не в полной мере объясняют полученные экспериментальным путем результаты, а поэтому не могут служить основанием для разработки приемлемых для практики предложений, то очевидна необходимость проведения соответствующих исследований.

В настоящей работе приведены комплексные исследования трибопроцессов в контактных парах деталей, работающих в особо жестких условиях как механического, так и теплового воздействий. Получены основные закономерности разрушения поверхностных слоев деталей трибосопряжений и раскрыты механизмы изнашивания, на основании которых предложены конструктивно-технологические решения, направленные на повышение долговечности трибосопряжений, работающих в условиях многокомпонентного динамического нагружения (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях).

Разработаны принципы моделирования эквивалентных состояний трибосопряжений, позволяющие проводить исследования трибопроцессов в модельных условиях без риска получить результаты не соответствующие объективной действительности, и изучать процессы трения и изнашивания в условиях программируемого изменения режимов нагружения. Последнее является одним из наиболее перспективных направлений в трибологии.

Актуальность темы. Конкурентоспособность машин зависит от ряда факторов, среди которых одно из первых мест занимает ресурс. Для современных машин и механизмов ресурс определяется долговечностью наиболее ответственных деталей трибосопряжений, срок службы которых во многом зависит от износа контактирующих поверхностей.

Процессы трения и изнашивания, а также разрушение поверхностных слоев трибосопряжений определяется динамическим характером приложения нагрузок в контакте, амплитудами взаимных перемещений, создающими специфические условия контактного взаимодействия. При этом большая часть трибосопряжений работают в условиях многокомпонентного динамического нагружения: удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях с воздействием как высоких, так и низких температур. Такой комплекс условий нагружения вызывает сложное напряженное состояние поверхностных слоев контактирующих пар. Этим объясняется ограниченные возможности общих положений теории трения, а также большинства результатов экспериментальных исследований. Кроме того, традиционные методы исследований основаны на раздельном изучении влияния одного или крайне ограниченного числа факторов без учета их взаимодействия, а также без учета динамики системы в целом.

В мировой практике прослеживается направление развития функционально ориентированных методов исследований и их корреляция с данными, получаемыми из натуральных исследований. Это вполне закономерно, поскольку проектирование трибоузлов на основе обычных конструкционных решений без учета специфичности условий их эксплуатации (прежде всего

изменения нагрузочных параметров во времени) зачастую приводит к тому, что такие трибосопряжения оказываются недостаточно надежными. Уместно отметить, что достоверность получаемых результатов при натуральных испытаниях весьма низка из-за большого разброса контролируемых величин, которые являются следствием изменяющегося во времени характера контактного взаимодействия. Этот характер у каждой отдельно взятой машины является своим и будет зависеть как от конструктивных особенностей изделия, технологии его изготовления, так и от условий эксплуатации. Поэтому возникает настоятельная необходимость в определении характера нагружения трибоузлов, диапазонов нагрузочных параметров, их эволюции в процессе эксплуатации, составлении на базе статистических данных типового комплекса нагрузочных режимов и их изменения за установленный период времени. Особый интерес представляет рассмотрение особенностей изменения износостойкости трибосопряжений, которые эксплуатируются при высоких и отрицательных температурах в условиях многокомпонентного динамического нагружения (удара с проскальзыванием или удара с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях), представленных в выполненной работе.

Таким образом, существует проблема изнашивания трибосопряжений при многокомпонентном термоконтантном воздействии не имеющая надлежащего научного обоснования, что требует новых подходов к ее разрешению. Исследовав влияние каждого из параметров нагружения в отдельности или в совокупности на трибохарактеристики узла (детали), можно определить эквивалентное состояние взаимодействующих поверхностей и затем моделировать эти состояния в лабораторных условиях. Такое моделирование дает возможность повысить достоверность получаемых результатов и значительно сократить сроки испытаний. С другой стороны исследование механизма повреждаемости материалов, создание моделей изнашивания контактных поверхностей деталей, работающих в экстремальных условиях, позволяют целенаправленно создавать (или

выбирать из числа существующих) износостойкие материалы, разрабатывать конструктивно-технологические мероприятия направленные на повышение долговечности изнашивающихся деталей.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ МО Украины ДБ 04123 2002-2004р. «Вплив умов тримірного навантаження на довговічність деталей трибоз'єднань», ДБ 03226 2006-2007р. "Принципи формування поверхневого шару деталей трибоз'єднань ГТУ за умов тримірного навантаження під час експлуатації та виготовлення", ДБ 01311 2011-2012р. «Зменшення зношення елементів складнонавантажених трибосистем методами, які охоплюють триботехнічне матеріалознавство та триботехнологію», ДБ 01313 2013-2014р. «Основи підвищення зносостійкості трибоз'єднань за рахунок оптимізації характеру складного термомеханічного навантаження» и работ по хозяйственным договорам с предприятиями ГП ЗМКБ «Ивченко-прогресс» (г. Запорожье), «Салют» (г. Москва) и другими, где соискатель был ответственным исполнителем.

Цель и основные задачи исследований.

Цель: Разработка научно-практических основ повышения долговечности трибосопряжений, эксплуатирующихся в условиях многокомпонентного динамического контактного нагружения и различных эксплуатационных температур.

Для достижения поставленной цели определены следующие основные **задачи исследований:**

1. Произвести анализ особенностей работы и изнашивания трибологических узлов, эксплуатирующихся в условиях многокомпонентного динамического контактного нагружения.

2. Обосновать и разработать комплекс методик, а также создать экспериментальное оборудование для исследования трибохарактеристик материалов, которые работают в особых условиях.

3. Разработать принципы моделирования эквивалентного состояния физических моделей и минимизации износа.

4. Определить основные закономерности трения и изнашивания при многокомпонентном контактном нагружении, выяснить физическую картину процесса, механизмы изнашивания (с учетом наноструктурных изменений поверхностного слоя).

5. Разработать модели формирования и разрушения поверхностного слоя деталей трибосопряжений при многокомпонентном динамическом нагружении, высоких и отрицательных температурах окружающей среды.

6. Конкретизировать конструкторско-технологические направления повышения износостойкости трибосопряжений в рассматриваемых условиях контактирования.

7. Разработать, исследовать и рекомендовать для применения в производстве мероприятия, направленные на повышение износостойкости деталей.

Объект исследования – процессы контактного взаимодействия и изнашивания трибосопряжений при различных условиях кинетики и динамики нагружения, температуры окружающей среды.

Предмет исследования – закономерности трения и изнашивания, а также механизм изнашивания при многокомпонентном контактном нагружении, наноструктурные свойства поверхностного слоя, прогнозирующая модель формирования и разрушения поверхностного слоя деталей трибосопряжений при различных условиях контактного нагружения.

Методы исследования. В процессе выполнения диссертационной работы применялись современные методы модельных и натурных исследований. Методология исследований предусматривает: моделирование процессов контактного взаимодействия в трибосопряжениях с помощью физических моделей с учетом принципов моделирования; изучение закономерностей изнашивания материалов деталей пар трения, как при отдельном, так и комплексном влиянии нагружающих параметров с

помощью созданного специального оборудования; установление закономерностей изменения качества поверхностного слоя материалов в зоне контакта. После испытания образцов при различных условиях кинетики и динамики нагружения в процессе трения с использованием комплекса специального экспериментального оборудования определяли величину износа методами профилографирования, сканирования или статистическим методом. Качество контактирующей поверхности оценивали по микрогеометрии (анализ шероховатости, 2D и 3D модели поверхности) и состоянию поверхностного слоя. Для оценки изменения состояния поверхностного слоя поверхностей в работе использовали трибоспектральный метод (анализ трибограмм и результатов статистической обработки значений силы трения индентора в процессе сканирования поверхностного слоя) и метод анализа электронного строения поверхностного слоя металлов на основе изменения работы выхода свободных электронов.

Научная новизна полученных результатов. В результате теоретических и экспериментальных исследований очерчено и обосновано научное направление – структурная организация процессов контактного взаимодействия при многокомпонентном термомеханическом нагружении и их эволюция при переходе от квазистатического трения к динамическим процессам, включающим удар с последующим проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При этом получены следующие научные результаты:

1. Теоретически обобщена и установлена степень влияния основных параметров многокомпонентного динамического нагружения на закономерности трения и изнашивания. Показано, что многокомпонентное динамическое нагружение усложняет процессы контактного взаимодействия, которые не определяются общими теоретическими основами трибологии и неоднозначно влияют на износостойкость трибосопряжений. В частности, наличие поперечных проскальзываний при трении с трехкомпонентным нагружением (удар и проскальзывание во взаимно перпендикулярных

направлениях) повышает интенсивность изнашивания конструкционных сталей и эвтектических жаропрочных сплавов в сравнении с износом при двухкомпонентном нагружении (удар и продольное проскальзывание) до 2,5 раз за счет изменения прочности и размеров фрагментов поверхностного слоя.

2. Предложена концепция повышения износостойкости трибосистем, которая заключается в реализации триботехнического принципа минимизации изнашивания материалов на основе использования реологического явления структурно-энергетической адаптации материалов при трении с разными видами динамического нагружения и температуры среды. При этом создаются такие условия контактирования при которых формируется поверхностный слой с неоднородным по прочности и величине фрагментов структурным состоянием в пределах статистически различимой базовой длины, что позволяет, используя методы инженерии поверхности, повысить износостойкость трибосопряжений с многокомпонентным нагружением до 30%.

3. Усовершенствована модель структурной организации и разрушения поверхности при трении с многокомпонентным динамическим нагружением как целостной картины динамической системы трения, которая позволила обосновать и учесть динамику условий нагружения, структурного и энергетического состояния поверхностных слоев, микрогеометрии поверхности, деструкционных явлений.

4. Раскрыт и обоснован механизм изнашивания трибосопряжений при повышении сложности нагружения, специфическими особенностями которого является: повышение однородности поверхностного слоя (равнопрочности и размера фрагментов) в пределах статистически различимой базовой длины; снижение прочности; уменьшение величины и повышение равномерности равновесной шероховатости поверхности от 1,3 до 10 раз; увеличение интенсивности экзоэлектронной эмиссии поверхности со снижением величины и разброса работы выхода электрона до 10%.

5. Получили дальнейшее развитие принципы моделирования эквивалентных состояний трибологических пар, которые эксплуатируются в особенных условиях нагружения, включая трибологические, кинематические, нагрузочные, металлофизические и физико-механические критерии в направлении учета специфики многокомпонентного нагружения.

6. Разработана методология ускоренной оценки износостойкости поступательных плоскостных пар IV класса с периодическим ударным разрывом контакта (типа «направляющая-цепь») и трибосопряжений «деталь-режущий инструмент» с учетом условий многокомпонентного нагружения, включающая методы и специальные экспериментальные установки для ускоренных испытаний трибосопряжений, что позволяет уменьшить время испытаний от 7 до 20 раз.

7. Впервые разработаны модели изнашивания трибосопряжений с наличием в зоне контакта свободных макрорадикалов и СОЖ. Предложены научно обоснованные методы инженерии поверхности для управления износостойкостью трибосопряжений при многокомпонентном термоконтактном воздействии путем введения в зону контакта свободных макрорадикалов, создания поверхностного слоя с разнориентированными кристаллитами, градиентным слоистым покрытием. На основании трибодиагностики роли свободных макрорадикалов как поверхностно-активных веществ в процессах обработки гранулированным абразивным материалом развита методология повышения эффективности финишной абразивной обработки.

Практическое значение полученных результатов. Результаты всех составляющих комплекса выполненных теоретических и экспериментальных исследований реализованы в предложенных в работе новых технических решениях. Использование полученных закономерностей позволяет целенаправленно разрабатывать износостойкие материалы и технологии, применение которых существенно повышает ресурс изделий. Практическая

ценность определяется объемом разработанных конструктивно-технологических решений.

1. Разработаны методы и экспериментальные установки для ускоренных испытаний трибосопряжений в условиях многокомпонентного динамического нагружения взамен длительных эквивалентных испытаний, которые позволяют повысить достоверность испытаний и снизить их продолжительность. Показана эффективность их применения при оценке износостойкости поступательных плоскостных пар IV класса с периодическим ударным разрывом контакта (типа «направляющая-цепь») и трибосопряжений «деталь-режущий инструмент». Разработаны инструменты стержневого и дискового типов для ускоренных испытаний режущих звеньев пильной цепи на износостойкость, позволяющие до двадцати раз снизить время испытаний на стойкость.

2. Разработаны методы определения износостойкости трибосопряжений на основе оценки состояния поверхностного слоя деталей после трения с применением трибоспектрального метода и по изменению величины работы выхода электрона.

3. Разработаны рекомендации повышения износостойкости трибосопряжений, базирующиеся на создании соответствующих характеристик поверхностного слоя и изменении параметров нагружения. Представлены методологические принципы инженерии поверхности повышенной износостойкости для трибосопряжений многокомпонентного контактного нагружения.

4. Разработано устройство, позволяющее уменьшить вибрации и повысить износостойкость режущего инструмента за счет использования специальных демпфирующих пластин.

5. Усовершенствован гранулированный абразивный материал, методы его получения путем регулирования условиями псевдоживой радикальной полимеризации и применения при финишной обработке. За счет изменения условий обработки и наличия свободных макрорадикалов в зоне контакта

инструмента и заготовки возможно управление однородностью структурного состояния обработанного поверхностного слоя и это износостойкостью.

б. Результаты исследования внедрены на ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс» (г. Запорожье), АО «Мотор-Сич» (г. Запорожье), КО «Запорожский завод высоковольтной аппаратуры» (г. Запорожье). На основе использования разработанных технологических рекомендаций получения износостойкого ультрадисперсного наноструктурного поверхностного слоя деталей трибосопряжений в зависимости от условий контактирования и изготовления, отмечено повышение износостойкости трибосопряжений в промышленных условиях предприятий до 30%. Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы на предприятии составляет около 140 тыс. грн. (в ценах 2013г.) в год.

Личный вклад автора в разработку полученных результатов.

Основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно, в частности: разработка программ и методик исследований, экспериментального оборудования, практического использования результатов исследований, защищенных патентами, непосредственное участие в экспериментальных исследованиях; анализ и обобщение результатов, производственные испытания и внедрение.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на Международных, Всеукраинских и Вузовских конференциях, а именно: Международной научно-технической конференции «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів» (Запорожье, 2007, 2008), Международной научно-технической конференции «Сучасні проблеми трибології» (Киев, 2010), Международной научно-технической конференции «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту» (Кременчуг, 2010), Всеукраинской научно-технической конференции «Прикладні аспекти механіки та матеріалознавства в новітніх технологіях» (Кременчуг, 2011), Международной научно-практической конференции «Олівійський форум –

2011» (Ялта, 2011), Medzinarodneno vedeckeho workshopu nekonvencne technologie 2011 (Zilina, 2011), Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (Севастополь, 2011), Международной научно-технической конференции «Прогресивні технології життєвого циклу авіаційних двигунів та енергетичних установок» (Запорожье-Алушта, 2011, 2012, 2013), Международной научно-практической конференции «IV Українсько-Польські наукові Діалоги» (Яремче, 2011), Международной научно-практической конференции «Трибологические основы повышения ресурса машин» (Москва, 2012), Международной научной онлайн конференции «Математическое и компьютерное моделирование в биологии и химии. Перспективы развития» 2012, Международной научно-практической конференции «Ольвійський форум-2012: стратегії України в геополітичному просторі» (Севастополь, 2012), Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы инженерной механики» (Николаев, 2012), второй технической конференции украинского отделения международного отделения по продвижению материалов и технологий (SAMPE) «Технологическая модернизация авиастроительного производства – ключ к успеху на рынках авиационной техники» (Киев, 2012), Международной научно-практической конференции «Ольвійський форум-2013: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі» (Ялта, 2013), 3-ей технической конференции украинского отделения международного общества SAMPE «Активізація науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт – шлях до скорочення термінів створення нової конкурентоспроможної техніки та зменшенню супутніх витрат» (Киев, 2013), Четвертой технической конференции украинского отделения международного общества SAMPE «Технологічний розвиток аерокосмічної галузі – одна з основних передумов відновлення обсягів виробництва в машинобудуванні» (Київ, 2014), III Международной научно-технической конференции «Машины и пластическая деформация металлов» (Запорожье,

2015), Пятой технической конференции украинского отделения международного общества SAMPE «Українські високі технології як основа міжнародних коопераційних машинобудівних проєктів» (Київ, 2015), Шестой технической конференции украинского отделения международного общества SAMPE «Управління авіаційним виробництвом в перехідний період» (Київ, 2016), на ежегодных научно-практических конференциях по результатам научной деятельности «Тиждень науки» Запорожского национального технического университета.

Доклад по диссертации в полном объеме был представлен на X международной научно- технической конференции «Прогресивні технології життєвого циклу авіаційних двигунів та енергетичних установок» (Запорожье-Алушта, 2013).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано на четырех языках (русском, украинском, английском и французском) в 49 научных работах (из них 9 единоличных), в том числе монографий – 2, статей – 29 (6 в зарубежных изданиях), патентов Украины – 18, а также в материалах и тезисах конференций.

Поскольку в литературных источниках отсутствуют сведения о систематических исследованиях в области изнашивания материалов при многокомпонентном нагружении (особенно при трехкомпонентном нагружении), в которых бы преследовались те же цели, что и в настоящей работе, то в диссертации приводится краткий общий литературный обзор. Однако обсуждение литературных данных по отдельным вопросам диссертационной работы дается в соответствующих ее разделах.

РАЗДЕЛ 1.

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ПРИ МНОГОКОМПОНЕНТНОМ ТЕРМОКОНТАКТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Процесс эксплуатации ряда трибосопряжений, характеризуется сложным распределением нагрузки в пространстве и времени. При этом процесс разрушения поверхностей усложняется многокомпонентным характером нагружения, геометрией контакта и свойствами среды.

1.1 Узлы трибосопряжений, изнашивающиеся при многокомпонентном динамическом нагружении.

Большая часть деталей трибосопряжений различных машин и механизмов в процессе эксплуатации находится в условиях трехкомпонентного динамического нагружения (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях), в связи с функциональными взаимными перемещениями в разных направлениях, наличием вибраций или их комбинациями.

Сочетание одновременного воздействия на трибопару таких факторов, как: нагрузка в контакте и ее динамический характер приложения; кинематика взаимного перемещения поверхностей при приложении нормальной нагрузки в условиях с разрывом контакта, в отличие от только однонаправленного тангенциального смещения, не может не внести свои коррективы в общепринятые (при отдельном влиянии факторов) механизмы разрушения поверхностных слоев материала. Кроме того, с увеличением длительности работы трибоузла происходит постепенное изменение условий изнашивания. Меняется динамический режим нагружения (как правило, в сторону увеличения динамических нагрузок за счет увеличения зазоров), характер взаимодействия деталей в узле, контактирование в упругой области сменяется контактированием в упруго-пластической или пластической областях.

В связи с этим трибосистемы можно классифицировать по видам многокомпонентного нагружения согласно рисунку 1.1.

Учитывая изложенное, в данной работе рассматривали вопросы износа контактирующих поверхностей при многокомпонентном нагружении трибосопряжений в условиях высокоамплитудного реверсного скольжения, которое может осуществляться при различных температурах окружающей среды, а также постоянного скольжения в процессе обработки металлов резанием и в поступательных плоскостных парах IV класса с периодическим ударным разрывом контакта (типа «направляющая-цепь»).

В частности, в условиях трехкомпонентного нагружения работают тормозы и муфты (рис. 1.2 и 1.3). Например, диски муфт взаимодействуют с ударом и окружным проскальзыванием при наличии радиального проскальзывания связанного с дисбалансом и несоосностью соединяемых валов.

Сложный характер динамического нагружения трибосопряжений часто сопровождается неравномерностью геометрии контакта и износа контактирующих деталей, как наглядно следует из представленного на рисунке 1.4 характера износа шлицевого соединения ступицы ведомых дисков горячештамповочного пресса.

В значительной степени неравномерность усилий в контакте трибосопряжений проявляется при работе главного исполнительного механизма кривошипных кузнечно-прессовых машин. Передача нагрузки от деформируемой детали на механизмы и узлы кривошипной машины представляет собой сложный процесс, определяемый как особенностями протекания собственно деформирования детали и упругостью элементов системы пресс–инструмент, так и действием других внешних сил на ползун машины при его возвратно-поступательном движении.

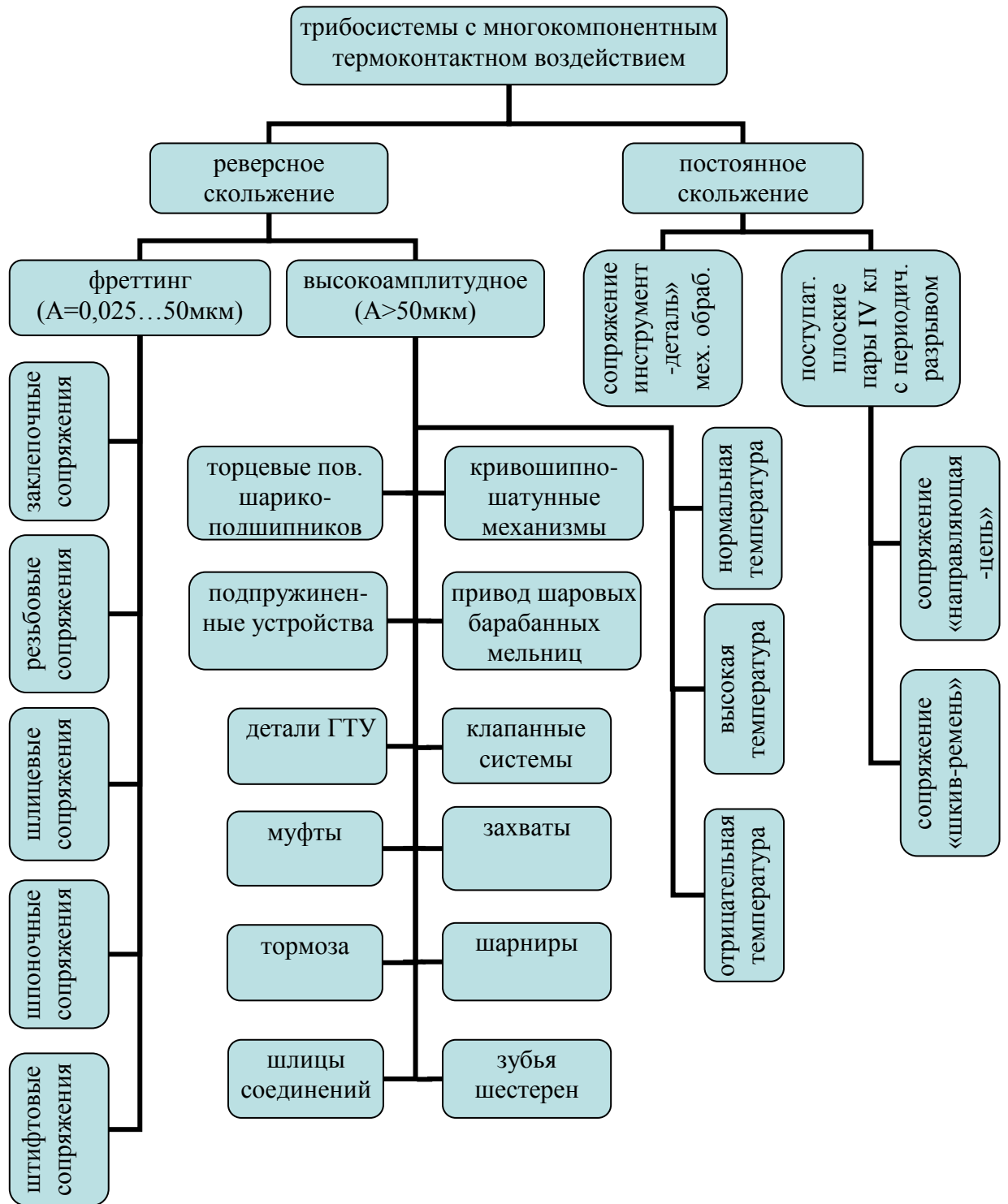


Рисунок 1.1 – Классификация трибосистем по видам многокомпонентного термодинамического нагружения

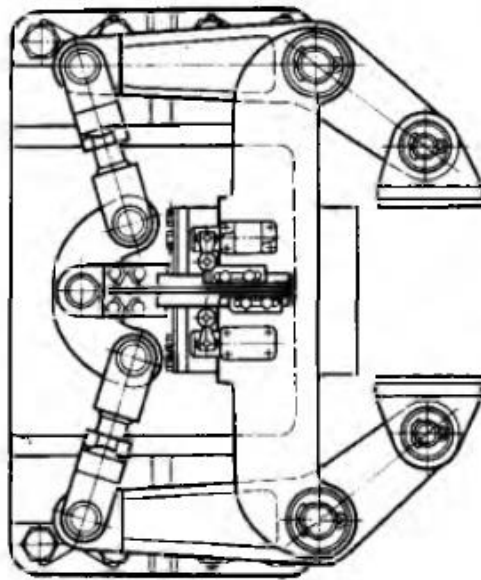


Рисунок 1.2 – Конструкция двухколовочного тормоза маховика листоштамповочного пресса

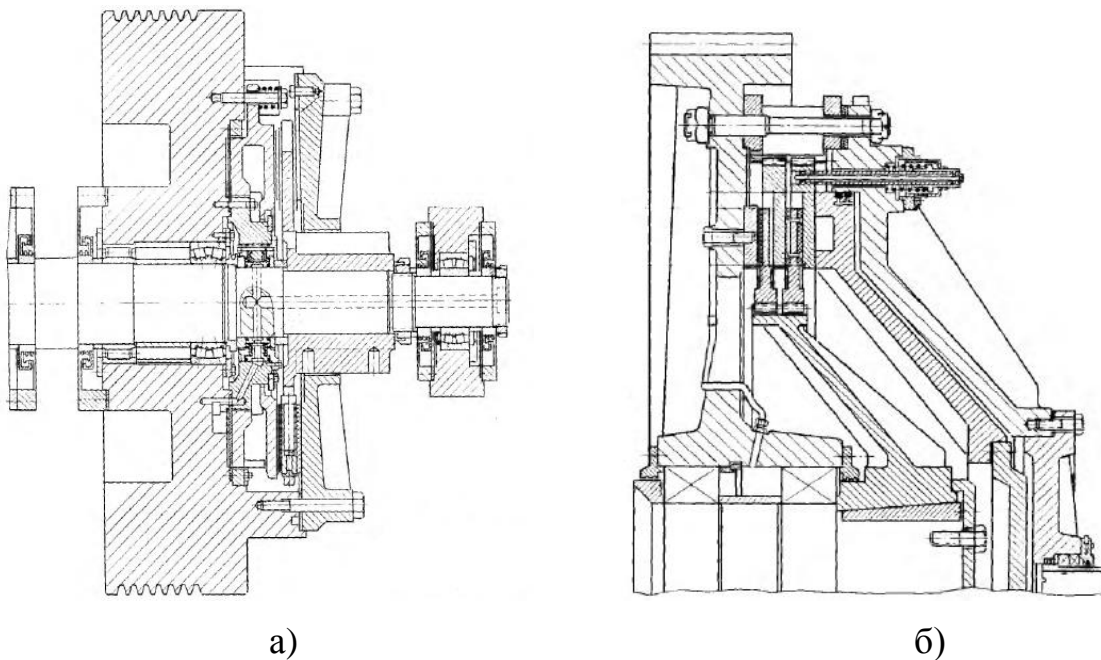


Рисунок 1.3 – Конструкции муфт: а) межопорная муфта; б) двухдисковая муфта горячештамповочного пресса

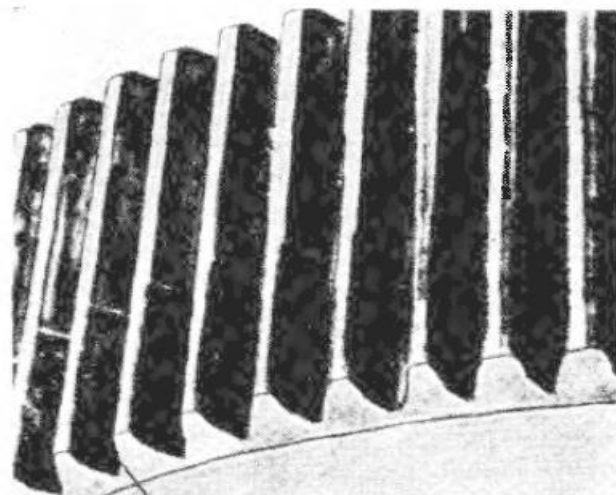


Рисунок 1.4 – Характер износа шлицевого соединения ступицы ведомых дисков горячештамповочного прессы

При этом, как представлено на рисунке 1.5, в начальный момент времени резко возрастает усилие от удара по неподвижной заготовке $P_{уд}$ и достигает максимального усилия штамповки P_{max} . Резкое снятие нагрузки при окончании вырубке после выборки зазоров главного исполнительного механизма приводит к внешним нагрузкам обратного знака, т.е. возникают реверсные нагрузки – отрицательные по знаку P_{min} [173].

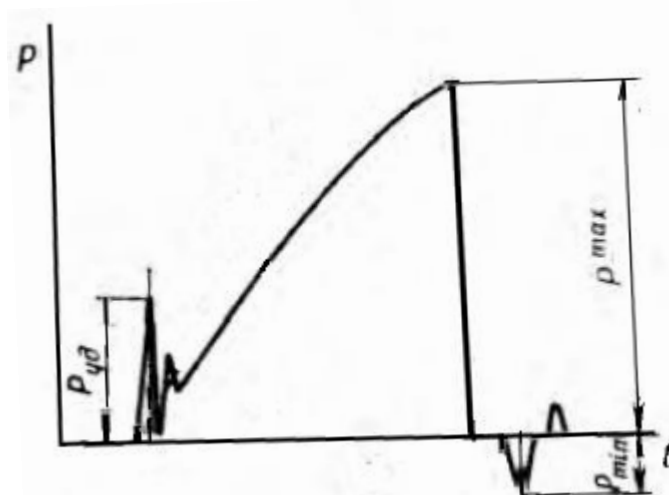


Рисунок 1.5 – Изменение усилия деформирования при работе главного исполнительного механизма на разделительных операциях кривошипных кузнечно-прессовых машин [173]

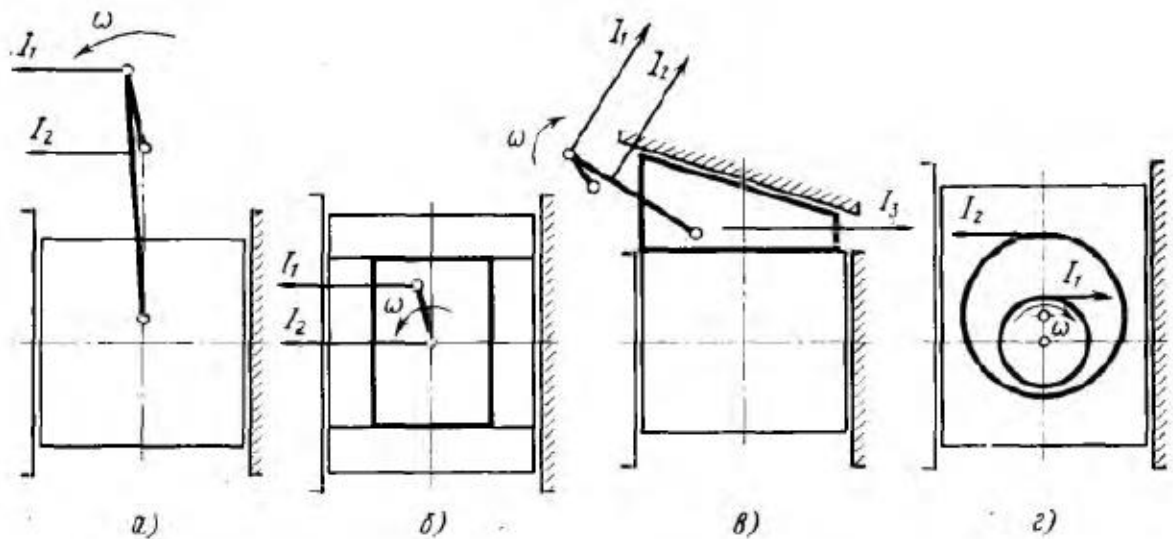
Подобное нагружение воспринимают и трибосопряжения привода шаровых барабанных мельниц.

Причем, особенности нагружения кривошипно-шатунных механизмов существенно зависят их от кинематических схем. Как следует из структурных схем, представленных на рисунке 1.6, главные исполнительные механизмы машин подразделяют на механизмы с одним выходным звеном и механизмы с двумя выходными звеньями, по числу входных звеньев – на механизмы с одним входным звеном и механизмы с двумя входными звеньями, по общему числу звеньев – на механизмы четырех-, пяти-, шести-, семи-, восьми-, девяти-десяти- и одиннадцатизвенные. Усилие на сопряженном с кривошипом шатуне и направление его действия зависят от структурной и кинематической схем механизма [173].

При этом большое значение на направление и величину усилий нагружения в зоне контакта шатун-направляющая оказывает и разновидность шатуна (рис 1.7). Учитывая, что ползун в процессе контактирования с направляющими может занимать различное положение – касаться одной или другой направляющей, неизбежно возникновение трехкомпонентного нагружения в виде удара и проскальзываний в двух взаимоперпендикулярных направлениях.

С одним выходным звеном		С двумя выходными звеньями
С одним входным звеном	С двумя входными звеньями	
<i>Четырех- и пятизвенные</i>		
<i>Шести- и семизвенные</i>		
<i>Восьми- и девятизвенные</i>		
		—
<i>Десяти- и одиннадцатизвенные</i>		
		—

Рисунок 1.6 – Типовые структурные схемы исполнительных механизмов машин [173]



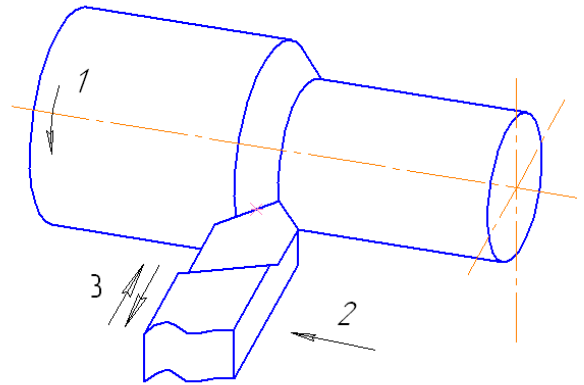
- а) – традиционный шатун; б) – кулиса; в) – клиновой механизм;
г) – круговой шатун

Рисунок 1.7 – Действие возмущающих импульсов в разных схемах главного исполнительного механизма [173]

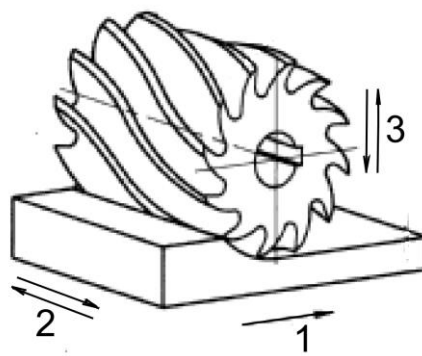
Трехкомпонентное нагружение возникает и в зоне контакта металлорежущего инструмента и заготовки при механической обработке деталей резанием. Вызвано оно тремя факторами: вращением детали, продольным движением инструмента и вибрациями (рис. 1.8).



а)



б)



в)

- 1– продольное проскальзывание; 2– поперечное проскальзывание;
3– переменное (ударное) нагружение

Рисунок 1.8 – Трибосопряжение «режущий инструмент-деталь»

а) – внешний вид сопряжения «резец-деталь»; б) – схема нагружения сопряжения «резец-деталь»; в) – схема нагружения сопряжения «фреза-деталь»

В частности остро стоит проблема вибрационной стойкости и износа инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов. Анализ конструкции энергетических установок показал, что 85% материалов, которые применяются на производстве, относятся к труднообрабатываемым, а именно к жаропрочным сталям. При этом 90-95% всех технологических операций составляет механическая обработка [1].

Режущая способность инструмента определяется сопротивлением режущих кромок истиранию и его прочностными характеристиками при высокой температуре и знакопеременных нагрузках вызванных как неравномерностью припуска, так и вибрациями. Возникновение вибраций при обработке резанием характеризуется возмущающими силами и свойствами упругой системы. При изучении вибраций необходимо учитывать одновременность действия нескольких процессов, что не позволяет исследовать влияние различных факторов процесса резания на колебания. Для изучения вибраций в зоне резания необходимо установить общие закономерности колебательного процесса вне влияния на него факторов сложного процесса резания и геометрии инструмента. При этом использование зависимостей износостойкости деталей трибосопряжений от условий нагружения и свойств контактирующих поверхностей позволит повысить эффективность лезвийной обработки и уменьшить износ режущего инструмента.

В поступательных плоскостных парах IV класса с периодическим ударным разрывом контакта (типа «направляющая-цепь») также действует сложное динамическое нагружение (рис. 1.9):

а) плоскопараллельное колебательное движение цепи характеризуется амплитудным значением сдвига и частотой сдвига;

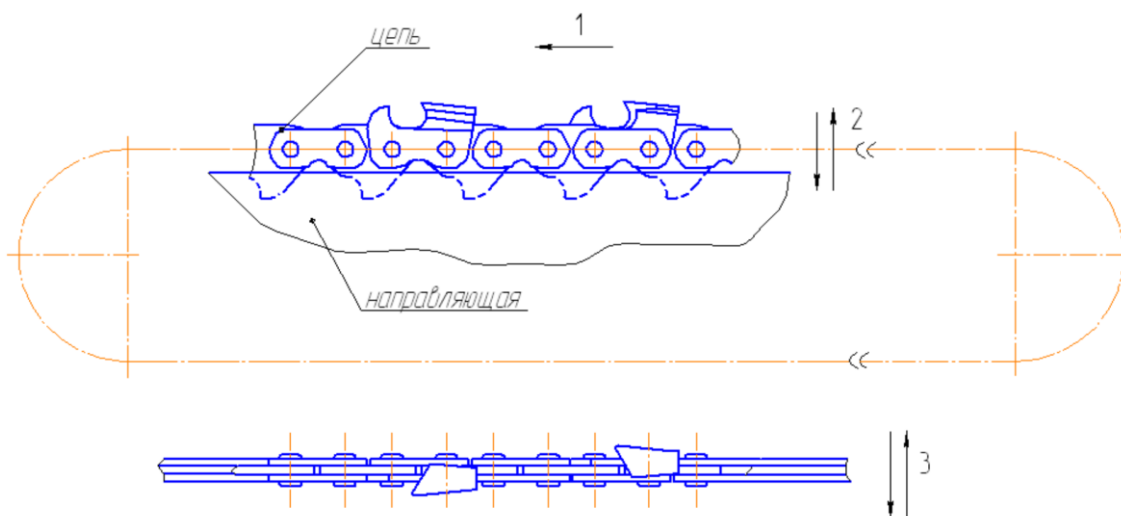
б) волновые поперечные колебания цепи в плоскости, перпендикулярной плоскости цепной передачи – характеризуются амплитудным сдвигом волны, длиной волны и частотой колебаний;

в) нарушение плоскопараллельного движения цепи при входе в контакт с обрабатываемым материалом.

Кроме того, применение бензо- и электропилы в зонах с низкой климатической температурой зимой обуславливает дополнительное усложнение комплекса факторов нагружения отрицательными температурами.



а)



б)

- 1– продольное проскальзывание; 2– поперечное проскальзывание;
3– переменное (ударное) нагружение

Рисунок 1.9 – Трибосопряжение «направляющая-цепь»

а) – внешний вид сопряжения; б) – схема нагружения

Многокомпонентное динамическое контактное нагружение и различная температура окружающей среды в поступательных плоскостных парах IV класса с периодическим ударным разрывом контакта (типа «направляющая-цепь») создают неравномерность износа контактирующих деталей. В частности длительность эксплуатации направляющей бензомоторного изделия “Мотор Сич” не превышает двойную стойкость цепи, что сопровождается значительными экономическими потерями.

1.2 Узлы трения ГТУ и повреждение деталей при контактных взаимодействиях и эксплуатационных температурах.

Характеристики надежности газотурбинных установок (ГТУ) в значительной мере определяются технологическими факторами. Изнашивание в экстремальных условиях так же, как и усталостная прочность и износостойкость, в значительной мере определяется природой контактирующих материалов, их прочностными, физико-механическими, химико-технологическими свойствами, многие из которых формируются как в процессе поверхностной обработки, так и при контактном взаимодействии.

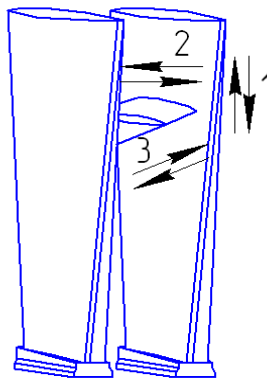
Поверхности деталей трибосопряжений ГТУ работают в сложных условиях динамического нагружения, что усложняет определение повреждений по их внешнему виду. Характер повреждений зависит от сочетания параметров нагружения (вид силового действия, амплитуда и частота перемещений, абсолютное значение нагрузок, скоростей приложения нагрузок), физико-механических свойств материала, состояния поверхности

(макро- и микрогеометрии), наличия на поверхности пленок окислов, и тому подобное.

Например, особенности нагружения трибосопряжений, структурно и кинематически входящих в механические системы летательных аппаратов, предъявляют специфические требования к испытательному оборудованию. Большинство трибосопряжений работают в условиях сухого или граничного трения. Поверхности трения воспринимают высокие динамические удельные нагрузки, законы изменения которых могут носить стохастический или детерминированный характер. Возможно изменение температуры окружающей среды от -60 до $+1000^{\circ}\text{C}$. Относительное скольжение трущихся поверхностей носит качательный, осциллирующий или возвратно-поступательный характер. Так, в условиях трехкомпонентного нагружения находятся антивибрационные полки вентиляторных лопаток авиационных газотурбинных двигателей (рис. 1.10), а также некоторые конструкции бандажных полок рабочих лопаток турбины газотурбинных двигателей.



а)

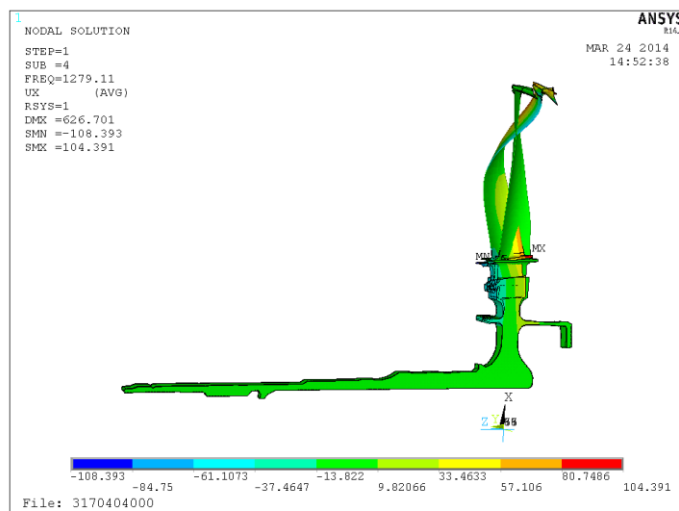


б)

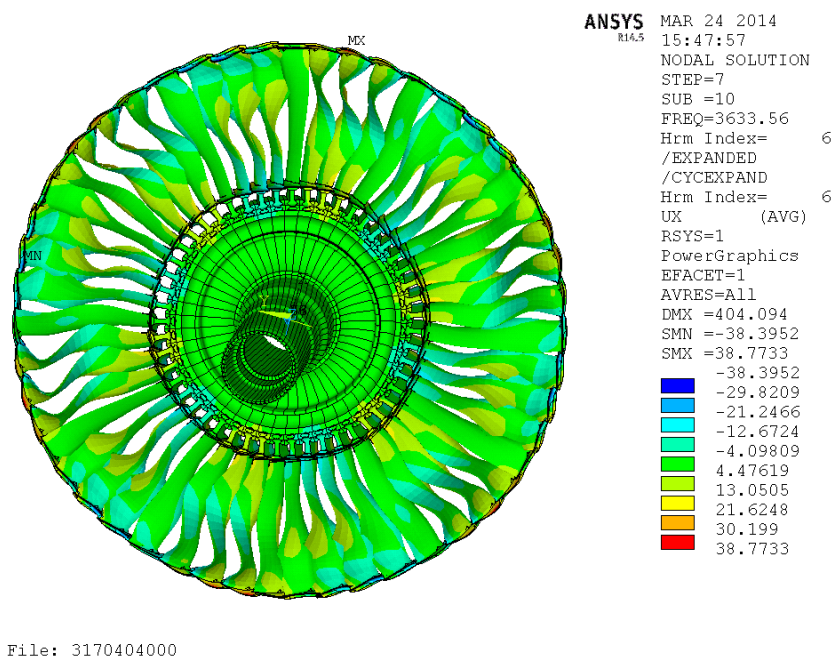
1– продольное проскальзывание; 2– поперечное проскальзывание;
3– переменное (ударное) нагружение

Рисунок 1.10 – Антивибрационная полка вентиляторной лопатки двигателя Д18 а) – внешний вид полки со следами износа; б) – схема нагружения

В частности, как показывает моделирование деформационных процессов рабочих лопаток турбины газотурбинных двигателей (рис. 1.11), основанное на результатах оценки величины износа бандажных полок рабочих лопаток представленных в работе [3], происходит сложный характер деформирования лопаток, что сопровождается многокомпонентным нагружением в трибосопряжении.



а)



б)

Рисунок 1.11 – Модель деформационных процессов рабочих лопаток турбины газотурбинных двигателей а) – лопатка; б) – турбина

Кроме того, важным вопросом является также разработка требований к конструкции самолетов и вертолетов специальных вариантов применительно к условиям их эксплуатации. Эти требования можно и необходимо учитывать на самых ранних этапах проектирования новых самолетов и вертолетов, а также самолетов и вертолетов специальных типов. Так, ряд материалов обычно применяемых в авиастроении, не вполне пригоден для эксплуатации в условиях Заполярья. Как известно, температура воздуха у земной поверхности может колебаться в весьма широких пределах. Зарегистрированы температуры от +60 до -85°C, однако практический интерес представляет диапазон температур от +50 до -70°C. Наиболее опасными являются сочетания низкой температуры с высокой влажностью (средняя влажность 88% в течение года колеблется от 85 до 95%) [2].

Многие контактирующие детали ГТУ испытывают ударные нагрузки (полки передней фиксации лопаток соплового аппарата, корпуса сопловых аппаратов, отдельные конструкции бандажных полок рабочих лопаток

турбины, в частности с прямыми полками). Повреждение поверхностей в этом случае происходит в результате смятия и пластичного оттеснения металла во все стороны [3]. Даже при трении скольжения поверхности трения отрываются одна от другой и время от времени их неровности контактируют, причем этот контакт носит характерные черты удара.

В условиях реверсивного трения без разрыва контакта может происходить схватывание поверхностей. При этом на контактирующих поверхностях могут наблюдаться задиры, царапины, пластичные оттеснения и перенесения материала одной детали, на поверхность другой. Риски, царапины ориентированы по направлению перемещения деталей. При этом формой, размерам и взаимному расположению поврежденные участки зеркальным отображением располагаются на контактирующих поверхностях.

Для современных энергетических установок и, в частности, авиационных двигателей ресурс определяется долговечностью наиболее ответственных деталей таких как диски, рабочие и сопловые лопатки турбины, срок службы которых во многом зависит от износа конкретных поверхностей. Так, например, износ бандажных полок турбины на 0,5 мм вызывает почти десятикратное повышение вибрационных напряжений в пере лопатки, что приводит к усталостному разрушению последней и отказу двигателя в целом. Если учесть, что только в одном рабочем колесе турбины количество таких лопаток может быть более 100 (в зависимости от конструкции двигателя), то вероятность отказа изделия при разрушении лопатки значительно повышается [3].

Некоторые детали ГТУ (штифт фиксирующий камеры сгорания, корпуса сопловых аппаратов турбины, бандажные полки рабочих лопаток турбины) изнашиваются с образованием характерных повреждений - осповидные углубления (язвины), причиной образования которых может быть контактная усталость. Такое повреждение поверхности происходит в результате многократного действия контактных повторяющихся нагрузок при одновременном проскальзывании взаимодействующих поверхностей. В

других деталях (шарнирно болтовые соединения узлов крепления коллектора, кольца камеры сгорания, воротники реактивных сопел, бандажные полки рабочих лопаток турбины) наблюдаются изношенные поверхности, которые не имеют царапин, вырывов металла и следов схватывания. Такое изнашивание может происходить в результате интенсификации окислительных процессов, высокочастотных взаимных перемещений, в результате вибраций, как при тангенциальном сдвиге поверхностей, так и при нормальном перемещении с небольшими амплитудами, а также их сочетанием [3].

Исследования износостойкости турбинных лопаток [4,5], которые работают в условиях совместного действия механической нагрузки и относительных перемещений контактирующих поверхностей показывают, что имеют место определенные трудности в моделировании этих факторов. Наиболее полно условия нагружения может быть воспроизведено на натурном стендовом авиадвигателе, однако такие испытания дают недостаточно достоверные результаты при большой длительности и очевидной дороговизне. Установлено [4], что при работе двигателя наблюдается существенное рассеивание по кругу ротора условий нагружения каждой из пар полок по давлению в зоне контакта, амплитуде проскальзывания, частоте колебаний. Возникают как продольные колебания с амплитудой около 0,1 мм и частотой 70 Гц, так и поперечные колебание с амплитудой до 0,2 мм и частотой около 30 Гц. Поэтому в одном рабочем колесе вследствие неконтролируемых условий нагружения возникают зоны повышенного и пониженного износа, причем разброс может составлять $\pm 650\%$. Положение таких зон в данное время установить невозможно.

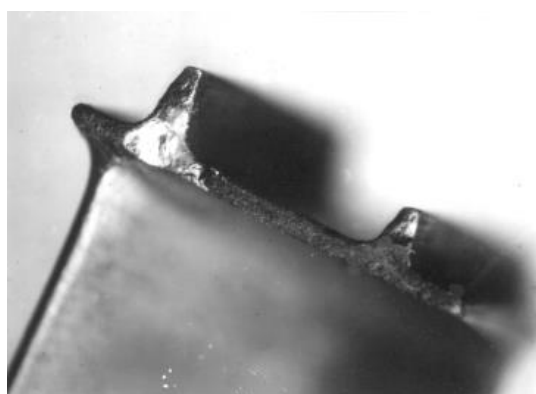
Процессы трения и изнашивания, а также разрушения поверхностных слоев деталей, которые работают в экстремальных условиях (например, антивибрационных полок лопаток вентилятора) определяются динамической нагрузкой в контакте – амплитудами взаимного перемещения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях при наличии нормальной нагрузки, которая

создает специфические условия контактного взаимодействия. При этом на трибосопряжения влияют сниженные (до -60°C) климатические температуры иногда циклически меняющиеся (скорость нагрева и охлаждения может достигать в некоторых случаях 250 град/с).

Из деталей авиационного газотурбинного двигателя (ГТД), повреждающихся в условиях приложения циклических нагрузок и отрицательных температур (при запуске и остановке двигателя в зимний период времени, в условиях Крайнего Севера, взлете и посадке с высотных аэродромов и площадок температура окружающего воздуха достигает до минус 60°C , полете на высоте 10000 м – минус 50°C), наибольшее количество составляют плоскостные детали. К ним следует отнести рабочие и сопловые лопатки турбины, у которых изнашиваются бандажные полки, а также хвостовики замковых соединений, вентиляторные лопатки (изнашивающимися элементами являются антивибрационные полки), установочные фланцы, дистанционные пластины и другие элементы, испытывающие высокие уровни вибраций и динамического нагружения, вызванные действием периодически изменяющихся во времени сил давления газов или набегающего воздушного потока, а также неуравновешенных вращающихся масс. В ходе эксплуатации ГТД износ контактирующих поверхностей антивибрационных полок вентиляторных лопаток обуславливает увеличение амплитуды их колебаний и может привести к излому лопатки. Это может привести к попаданию обломка в тракт компрессора и аварийному выходу из строя двигателя, что создает опасность авиакатастрофы.

К корпусным деталям в первую очередь относятся корпуса сопловых аппаратов всех ступеней турбины, в которых интенсивному изнашиванию подвержены торцы передней фиксации лопаток.

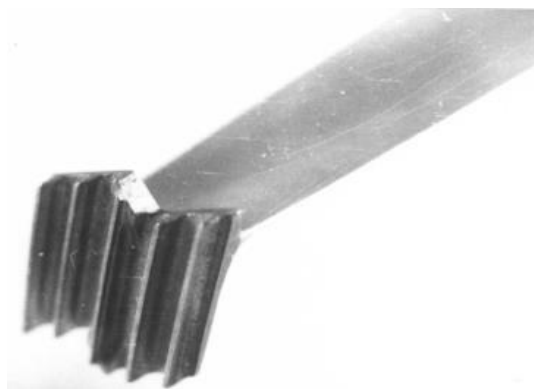
Причем, как показывает анализ конструкционного исполнения и особенностей изнашивания указанных деталей авиационного двигателя, эксплуатируются в большей степени в условиях нагружения в виде соударения с проскальзыванием (двухкомпонентное нагружение) бандажные полки рабочей лопатки турбины и лопатки соплового аппарата, корпус внутренний соплового аппарата, штифт фиксирующий камеры сгорания (рис.1.12 и 1.13).



а



б



в

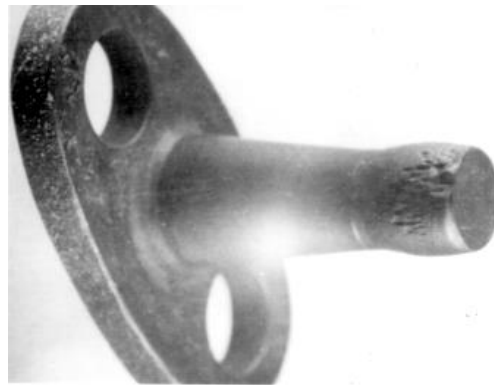
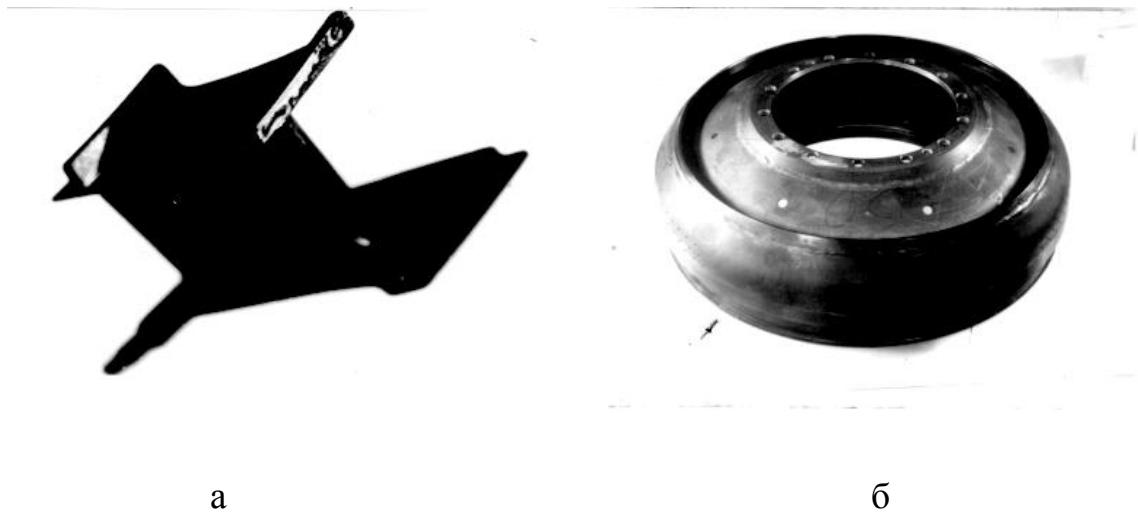


г

а – АИ-20М; б – АИ-25; в – Д-30; г – Д-18Т

Рисунок 1.12 – Повреждение поверхности бандажной полки рабочей лопатки турбины различных двигателей при динамическом

контактном нагружении в виде соударения с проскальзыванием [3]



а – лопатка соплового аппарата двигателя АИ–25; б – корпус внутренний соплового аппарата двигателя АИ –25; в – штифт фиксирующий камеры сгорания двигателя АИ – 25.

Рисунок 1.13 – Повреждение поверхности различных деталей ГТД при динамическом контактном нагружении в виде соударения с проскальзыванием [3]

Нагружению в виде соударения с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях (трехкомпонентное нагружение) в большей степени подвержены зубья ведущей и ведомой шестерен, козырек межпазового выступа диска IV ступени, трактообразующий козырек диска II

ступени и диск КВД, хвостовик лопатки компрессора и III ступени КНД, контрольный замок в месте контакта с хвостовиком лопатки компрессора низкого давления, торцевые шлицы диска, центробежного колеса компрессора и торцевые поверхности внутреннего полукольца шарикоподшипника вспомогательной силовой установки и другие. При этом указанное разделение трибоузлов по видам нагружения условно, учитывая их изменение в процессе работы вследствие возникновения вибраций, действующих в различных направлениях.

Встречающиеся в эксплуатации разрушения рабочих лопаток в большинстве случаев носят усталостный характер. Такие разрушения обычно вызываются переменным напряжением, возникающим в рабочих лопатках при резонансных колебаниях, которые являются результатом действия периодически изменяющихся во времени сил давления газов, вызванных гармоническими составляющими переменных сил поля давления газов, действующих на лопатку в плоскости наименьшей жесткости. Зазоры по контактными граням бандажных полок рабочих лопаток турбины, возникающие из-за износа контактных поверхностей, приводят к повышению вибронпряжений в лопатках. Значительный суммарный зазор по стыкам бандажных полок может служить причиной их разрушения. Кроме того, вибрационные напряжения, суммируясь с напряжениями от газодинамических сил, способствуют усталостному износу лопаток, поскольку в процессе эксплуатации происходит соударение бандажных полок и деформация соприкасающихся поверхностей, что приводит к дополнительным нагрузкам в периферийных сечениях лопаток [3].

С увеличением длительности работы трибоузла происходит постепенное изменение условий изнашивания. Меняется динамический режим нагружения (как правило, в сторону увеличения динамических нагрузок за счет увеличения зазоров), характер взаимодействия деталей в узле (износ при фреттинге может происходить в режиме износа при ударе с последующим проскальзыванием).

Объемы материала разрушаются вследствие малоциклового усталости. Появление зазора в соединении приводит к развитию процессов удара, которые могут полностью нарушить упорядоченную последовательность скоростей износа материалов, имеющей место при взаимодействии поверхностей в условиях без разрыва контакта.

Как следует из данных изменения температуры бандажных полок рабочих лопаток I – III ступеней турбины во времени при имитации опробования двигателя АИ-20М на самолете в момент запуска и дальнейшего опробования двигателя температура бандажных полок резко изменяется в пределах от температуры окружающего воздуха, которая может достигать минус 60°С до 780°С на I ступени, до 680°С на II ступени и до 570°С на III ступени. В более поздних конструкциях двигателей абсолютные значения температур превышают приведенные, однако характер изменения их при переходе с режима на режим остается практически таким же. Максимальная неравномерность температурного поля и, следовательно, максимальные температурные напряжения возникают при выходе на режим и при остановках. Для двигателя Д18Т скорость нагрева при переходе с режима малого газа на взлетный – 42 град/с [3].

По исследованиям [6] распределение отказов по деталям турбины следующие: рабочие лопатки турбины – 40%, камеры сгорания – 24%, сопловые лопатки – 20%, диски – 7,8%, прочие элементы – 8,2%. Из этого следует, что наибольшее количество отказов приходится на долю рабочих лопаток турбины. Это не случайно, так как из всего многообразия возможных сочетаний действующих нагрузок, наиболее неблагоприятные приходится именно на данные конструктивные элементы.

Наряду с неравномерным температурным полем на переходных режимах, а также на других этапах работы двигателя на рабочие лопатки турбины действуют вибрационные нагрузки, вызывающие контактное взаимодействие и износ бандажных полок лопаток и обуславливающие появление вибрационных напряжений.

О наличии волновых деформационных процессов при разрушении деталей ГТД указывается в работе [7]. В частности, переход от трещины типа отрыва к трещине по типу антиплоского сдвига в лопатке ступени компрессора ГТД имеет характерную волновую поверхность. Данная зона обладает строгой геометрической закономерностью распределения волновых деформационных процессов при циклическом развитии магистральной трещины.

Вибрационные напряжения вызываются периодическим возникновением возмущающих сил. Действие этих сил приводит к возникновению вынужденных колебаний лопаток, причинами появления которых являются неуравновешенность вращающихся деталей двигателя, а также некоторая парциальность подвода газового потока к рабочим лопаткам, возникающая из-за наличия сопловых лопаток, стоек и нестационарности процесса горения. Низкочастотные формы колебаний рабочих лопаток вызываются общей неравномерностью потока, возникающей в большинстве случаев еще до выхода потока в сопловой аппарат турбины. Возбуждение высокочастотных форм колебаний вызывается неравномерностью потока газа в осевом зазоре турбины, создаваемой лопатками соплового аппарата, и непосредственно связано с их числом.

Величина возникающих в лопатке вибрационных напряжений зависит от интенсивности возмущающих сил, т. е. от скорости вращения ротора, количества и расположения сопловых лопаток, степени неравномерности процесса горения по кольцу, осевого зазора, демпфирующих свойств материала, величины зазора или натяга между бандажными полками и т. д. Наибольшие вибрационные напряжения для всех ступеней турбины имеют место на проходных оборотах (т. е. нестационарных режимах).

При этом можно выделить следующие систематические составляющие движений:

а) колебание лопатки при изгибе по перу в плоскости вращения ротора, вызванные силами инерции набегающего потока воздуха, в результате чего:

1) контакт соединенных полок может периодически раскрываться, что приводит к нагружению в виде удара;

2) происходит проскальзывание поверхностей соединенных полок в плоскости вращения ротора;

б) вращательные колебания лопатки, вызванные влиянием набегающего потока воздуха на перо, которое имеет закрутку, приводят к проскальзыванию полок в плоскости, перпендикулярной плоскости вращения.

Амплитуда взаимного перемещения бандажных полок является одним из факторов, влияющих на характер разрушения контактирующих поверхностей. Оценка наиболее вероятного диапазона изменения амплитуд колебаний бандажных полок может быть проведена по методике [8,9]

Амплитуда свободного конца лопатки (т.е. бандажной полки) определяется из выражения:

$$A = \frac{\sigma L^2}{1,7578Eh}, \quad (1.1)$$

где σ – величина вибрационных напряжений в узле колебаний лопатки;

L – резонансная длина;

E – модуль упругости материала;

h – средняя толщина.

Резонансная длина лопатки находится из зависимости:

$$L = \alpha_1 \sqrt{\frac{r}{\omega} \left(\frac{Eg}{\gamma}\right)^{1/2}}, \quad (1.2)$$

где $\alpha_1 = 1,875$ – первый корень частотного уравнения;

r – радиус инерции сечения относительно нейтральной оси;

$\omega = 2\pi f$ – круговая собственная частота колебаний лопатки;

f – резонансная частота колебаний лопатки;

g – ускорение силы тяжести;

γ – удельный вес материала лопатки.

С учетом влияния инерции вращения элементов лопатки и деформации сдвига наиболее существенно изменяющих амплитуду колебаний с увеличением частоты колебаний, а также длины вылета полки, расчетная формула для определения амплитуды взаимных перемещений (A_n) бандажных полок будет иметь вид:

$$A_n = \frac{\sigma Ll}{3,515\psi_1\psi_2 Eh} \quad (1.3)$$

где $\Psi_1 = 1 + 0,293(h/L)^2$ – влияние инерции вращения элементов лопатки;

$\Psi_2 = 1/(1 + 0,514(h/L)^2)$ – влияние деформации сдвига;

l – длина вылета бандажной полки лопатки.

Очевидно, что амплитуда взаимных перемещений зависит от геометрических характеристик лопатки, нагрузок в контакте, частот колебаний и температурного режима.

Существенное влияние на протекание процессов контактного взаимодействия в трибологических соединениях (в частности, в бандажных полках рабочих лопаток турбин) оказывает характер сопряжения, изменение которого при эксплуатации зависит от газодинамических и центробежных сил.

Газодинамические силы возникают на лопатке при обтекании ее в потоке газов вследствие разности давления на вогнутой (корытце) и выпуклой (спинке) сторонах профиля. Эти силы вызывают изгиб и кручение рабочей лопатки. Вследствие действия газодинамических сил возможна раскрутка пера лопатки и появление взаимных перемещений бандажных полок в направлении газового потока. Центробежные силы, вызывающие в лопатке

напряжения растяжения и изгиба, действующие в одной и той же плоскости, возникают при вращении ротора. Суммарное напряжение от действия центробежных сил можно выразить как:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_p + \sigma_{и} \quad (1.4)$$

или

$$\sigma_{\Sigma} = k_i \omega^2 \quad (1.5)$$

где k_i – функция геометрических характеристик рабочей лопатки турбины ;

ω – угловая скорость вращения ротора.

Центробежные силы вызывают удлинение лопатки, а также появление момента сил от бандажной полки, что способствует изменению характера стыка (зазора или натяга) бандажных полок. После запуска двигателя нагрев рабочих лопаток значительно опережает нагрев более массивного диска, что ведет к уменьшению зазоров между полками по сравнению с режимами установившегося теплового состояния. При остановке же двигателя вследствие охлаждения лопаток будет иметь место увеличение зазоров между полками. В этом случае бандажные полки будут работать в режиме соударений. Соударение полок друг о друга может произойти при несовпадении фаз или частот колебаний лопаток. Сдвиг фаз вынужденных колебаний лопаток зависит от их числа и порядка гармоники возмущающей силы [3]:

$$\varphi_k = \frac{r 2\pi}{z_{пл}}, \quad (1.6)$$

где $z_{пл}$ – число лопаток;

k – порядок гармоники

Порядок низшей гармоники возмущающей силы, которая вызывает колебания с соударением, будет тем выше, чем больше рабочий зазор и число рабочих лопаток и чем меньше амплитуда колебаний.

На процессы изнашивания рабочих поверхностей трибосопряжений оказывают влияние термические напряжения, обусловленные резкими теплосменами при запусках, остановках.

Изменения в поверхностных слоях контактирующих тел, происходящие под действием температуры вне зависимости от способа ее подведения, крайне разнообразны. При нагреве и охлаждении возможны структурные изменения. Вопросы технологического обеспечения надежности деталей ГТУ неразрывно связаны с формированием качества поверхностного слоя и его влиянием на эксплуатационные характеристики. Вопросами влияния качества поверхности на износостойкость в условиях фреттинг-коррозии при нормальной температуре, а также в условиях трения скольжения уделялось относительно много внимания. Данные же по исследованию качества поверхности на трибологические характеристики материалов, и в частности жаропрочных, в условиях динамики нагружения при отрицательных температурах в литературных источниках отсутствуют.

Следует отметить, что другие детали газотурбинных установок находятся в более узких диапазонах нагруженности, чем бандажные полки и, как правило, спектры их нагрузок находятся в пределах диапазона нагруженности бандажных полок рабочих лопаток турбины. При этом особенностью контактного взаимодействия является наличие двух видов контакта поверхностей: трения в результате колебательных соударений и трения в противоположно чередующихся направлениях. Эти два вида контакта в реальных парах чаще всего накладываются друг на друга.

В мировой практике прослеживается направление развития функционально ориентированных методов исследований. Это вполне закономерно, поскольку проектирование трибоузлов на основе обычных конструктивных решений без учета специфичности условий их

эксплуатации (прежде всего изменения нагрузочных параметров во времени) зачастую приводит к тому, что такие трибосопряжения оказываются недостаточно надежными. Подтверждением сказанному является анализ статистических данных, согласно которому число отказов двигателей увеличивается с повышением времени их работы на неустановившихся динамических режимах.

1.3 Состояние исследований в области изнашивания материалов деталей трибосопряжений при многокомпонентном термомеханическом нагружении

Практикой и рядом исследований установлено влияние некоторых экстремальных условий трения на изнашивание твердых тел. Отдельными авторами проводились исследования при сочетании некоторых из выше отмеченных факторов нагружения: трении или ударе при пониженных температурах; двунаправленном трении, ударе с проскальзыванием в одном направлении [3,10-15]. Авторы этих исследований приходят в целом к одинаковым выводам: невозможность охватить процессы в условиях сложного нагружения, в рамках единой теории, что обуславливает ведущую роль эксперимента в подобных исследованиях. Пренебрежение сложностью комплексов факторов нагружения приводит к искажению результатов исследований и созданию картины процесса изнашивания, которая мало отвечает реальному процессу. С помощью современной теории удара нельзя аналитически решить задачу расчета контактной прочности и износа поверхностей при их столкновении. Поэтому при исследовании механизма и основных закономерностей изнашивания при ударе необходимо базироваться в первую очередь на экспериментальной основе. Решение задачи о поверхностной прочности пар трения при наличии нормальных вибраций будет возможно лишь тогда, когда будут выяснены основной механизм и детали контактного разрушения двух твердых тел, номинально неподвижных

друг относительно друга и подверженных одновременно влиянию вибраций [11].

Изложенное указывает на сложность процессов контактного взаимодействия твердых тел, которые происходят при наложении динамического нагружения даже одного направления. Однако сложное взаимодействие твердых тел в контактной зоне должно учитываться при построении достоверных моделей контактирования и прогнозировании поверхностной прочности материалов при динамических нагрузках. Невзирая на то, что приблизительно ясно, какой вклад может вносить в процесс поверхностного разрушения каждый из факторов комбинированного нагружения, строгие количественные зависимости, которые показывают это влияние, пока не получены. Еще сложнее является получение зависимостей, которые устанавливают взаимное влияние друг на друга каждого из факторов комбинированного нагружения [11].

Взаимодействие факторов выражается в их влиянии на микроструктуру материалов. В работах [11,16] это объясняется с точки зрения теории дислокаций.

Исследование влияния скорости деформирования на сопротивление материалов деформированию не может считаться полным, если не учитываются температурные условия испытаний. Значительный вклад в изучение температурно-скоростной зависимости сопротивления материалов контактному деформированию внесли советские исследователи школы Давиденкова, под руководством которого Ф. Ф. Витман и Н. А. Златин провели чрезвычайно важный цикл исследований [12-14] в этой области. Поскольку при испытаниях на растягивание, сжатие, изгиб и кручение, к основному полю напряжений будут добавляться местные поля напряжений, обусловленные контактом поверхностей [11].

По мнению Кеннеди [15] большинство работ по изучению одновременного циклического действия напряжения и температуры имеют чисто прикладной характер. Об основных процессах в настоящее время

существуют настолько слабое представление, что не стоит еще больше усложнять эксперименты до тех пор, пока не будет дан ответ на наиболее простые вопросы конструкторов. В настоящее время необходимо проводить эксперименты, которые позволили бы разделить отдельные механизмы и изучить их взаимодействие. Начало в этом направлении положено, но сделано еще очень мало. Это, по-видимому, со всей справедливостью можно отнести не только к исследованиям динамической пластичности в исследованиях материалов на циклическое растягивание, но и к исследованию динамической пластичности в зоне фрикционного контакта [11].

Добавление однократной или периодической ударной нагрузки может приводить к собственным контактными колебаниям как в нормальном, так и в тангенциальном направлениях. Это, в свою очередь, может приводить к снижению силы трения, что и отмечалось в ряде работ [10,17,18]. При ударе, кроме рассмотренного здесь взаимодействия в нормальном и тангенциальном направлениях, может осуществляться процесс наложения деформирования материала, как в контактной зоне, так и в объеме. Соотношение скоростей удара, размеров и материалов твердых тел, может быть таким, что за время контактирования ударная волна многократно пройдет внутри тела. Амплитуда ударной волны может быть достаточной, чтобы многократное передеформирование материала в объеме привело к подготовке процесса образования трещины и ее распространение в контактной зоне.

В работе Ко [19] исследовалось одновременное влияние на контакт тангенциальных вибраций (в диапазоне от фреттинговых амплитуд к амплитудам реверсивного трения) и повторно ударной нагрузки. Все образцы изготовлялись из циркониевого сплава. Увеличение нормальной статической нагрузки при прочих равных условиях ведет к увеличению износа. Характерным является резкое увеличение скорости износа при превышении величины амплитуды 0,2-0,25 мм. Очевидно, при амплитудах до 0,2 мм износ определяется процессами, характерными для фреттинга [20, 21], а при больших амплитудах преобладающую роль играют процессы, характерные

для реверсивного трения [22, 23]. Значительное влияние на скорость износа оказывает комбинированное нагружение. Наложение даже малых по амплитуде повторно ударных нагрузок интенсифицирует износ при фреттинге и реверсивном трении. Увеличение амплитуды повторно ударной нагрузки при комбинированном нагружении ведет к линейному повышению износа. Эти данные коррелируют с данными, полученными Райсом [24, 25], хотя в его экспериментах трение было однонаправленным, а не реверсивным.

Таким образом, исследования проведенные различными авторами указывают на существенное влияние условий динамического нагружения на износостойкость материалов трибосопряжений. Однако комплексное воздействие различных видов нагружения на долговечность эксплуатации трибоузлов при сложном динамическом нагружении требует уточнения. Экспериментальные исследования некоторых отдельных материалов при ударе в условиях низких температур [26, 27] подтверждают актуальность проблемы.

В отличие от изнашивания при ударе в условиях нормальных температур, при низкотемпературном изнашивании на износостойкость в существенной степени влияет изменение физико-механических и структурных свойств изнашиваемых материалов. В связи с отсутствием методов теоретического прогнозирования интенсивности изнашивания при ударной нагрузке в условиях низких температур в данное время используются экспериментальные методы оценки износостойкости материалов [28]. Зависимость интенсивности изнашивания от $T_k/T_{кр}$ представлена двумя экспонентами: той, которая уменьшается в интервале температур 191...300 К и растущей в интервале 320...373 К. (T_k - температура контакта, $T_{кр}$ - критическая температура смазывания). Отмечено, что при $T_k/T_{кр} = 0,7$, что соответствует области температуры приблизительно 310 К, наблюдается минимум интенсивности изнашивания всех зубчатых колес механизма [29]. Установлено, что износ образцов, которые имеют твердость HRC 40-45, уменьшается во всем диапазоне прилагаемых энергий столкновения, - (0,5-2,5

Дж) при снижении температуры испытаний с 293 до 213 К. В области твердости HRC 55-58 при малых энергиях столкновения износ со снижением температуры уменьшается: при энергиях более 1,0 Дж наблюдается рост износа. Существование минимума интенсивности изнашивания объясняется минимальным значением силы трения при данной температуре для данного типа смазочного материала и, следовательно, минимумом выделения тепла в контакте при постоянном процессе трения [27].

Известно, что в подавляющем большинстве случаев при понижении температуры прочностные свойства поликристаллических металлов повышается, в то время как пластические свойства падают, т.е. материал, как правило, охрупчивается. Изменение механических свойств металлов и сплавов при снижении температуры зависит от вида кристаллического строения, размера зерен, включений, атомов легирующих элементов, фазового состава сплавов. Особое влияние на прочность и пластичность кристаллических тел оказывают число действующих в кристаллической решетке плоскостей скольжения, количество и распределение примесей, упорядоченность дислокационной структуры.

На основании изучения физической стороны проблемы прочности материалов при низких температурах установлено, что переход в хрупкое состояние чистых моно- и поликристаллических металлов зависит от температуры, скорости деформирования, распределения внутренних напряжений, плотности дефектов кристаллической решетки. При этом существенное значение имеет как химический состав стали, так и ее структурное состояние. Глубокое охлаждение, которое увеличивает склонность к хрупкому разрушению у большинства углеродистых сталей, приводит к значительному росту прочности при сохранении пластичности вязких конструкционных сталей и сплавов. Однако разработанные физические модели и предложенные аналитические соотношения не позволяют количественно оценить влияние многочисленных факторов и пригодны в основном для решения задач синтеза новых материалов. Остается

малоизученной физической сторона сопротивления течению и разрушению конструкционных сталей и сплавов при низких температурах [28].

При проведении фрикционной обработки низкоотпущенной высокоуглеродистой стали в среде жидкого азота достигаются максимальные уровни дефектности (большая плотность дислокаций и точечных дефектов) и микротвердости нанокристаллической структуры [29]. Результаты исследований циклической прочности при низких температурах свидетельствует о том, что у большинства конструкционных материалов сопротивление усталостному разрушению с понижением температуры возрастает [30]. Вместе с тем установить общие закономерности увеличения циклической прочности материалов при снижении температуры не представляется возможным. Это связано с тем, что для одних металлов такое повышение может происходить во всем диапазоне низких температур, вплоть до гелиевых, а для других рост сопротивления усталостному разрушению ограничивается определенными температурными интервалами, вне которых циклическая прочность остается постоянной или имеет тенденцию к уменьшению [31]. Такое различие в изменении свойств может наблюдаться у материалов одного класса, поэтому при изучении усталости в низкотемпературных условиях рекомендуется проводить испытания каждого исследуемого материала [32].

На практике установлено [33], что при понижении температуры эксплуатации соединителей вплоть до $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость фреттинг-коррозии возрастает, а в диапазоне температур от $+50$ до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ практически не изменяется и остается на прежнем уровне. Возрастание скорости фреттинг-коррозии при понижении температуры окружающей среды объясняется охрупчиванием металлов покрытий, а также возрастанием адсорбции газов в поверхностных слоях покрытия, что сказывается в свою очередь на увеличении скорости химических реакций окисления.

Однако испытания одноименных металлических пар (Fe) при температурах от $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ показывают, что коэффициенты трения в

газообразном He не зависит от температуры. Для Fe коэффициенты трения при температуре жидкого азота составляет 0,9. Коэффициент трения коррозионно-стойкой стали, содержащей 18% Ni, 10%Ti при увеличении температуры значительно увеличивается [34].

Несмотря на плохие смазочные свойства криогенных жидкостей, их присутствие в зоне трения позволяет в некоторых случаях повысить долговечность узлов трения по сравнению с условиями работы в парах этих жидкостей при тех же температурах. Стабилизация процесса трения и износа и некоторое снижение коэффициента трения в среде жидкого азота наблюдается при трении твердых металлических поверхностей [35]. В то же время, как указывает И.В. Крагельский [36], в среде жидкого азота невозможно сохранение окисных пленок на поверхности трения, в результате чего очищенные в процессе трения поверхности металлов приобретают повышенную склонность к схватыванию и интенсивному износу. Другими особенностями трения в криогенных жидкостях является низкая их вязкость, обуславливающая возникновение задиров и значительное тепловыделение; возможно также образование газообразной фазы, что приводит к кавитации и разрушению поверхности трения. Тем не менее, металлы с различным электронным и кристаллическим строением по-разному ведут себя при трении в жидком азоте: пары металлов с кубическими кристаллическими решетками в отличие от металлов с гексагональными решетками интенсивно изнашиваются и имеют более высокий коэффициент трения. Для пар трения стали 304 в среде жидкого азота $f = 0,4$; стали 440С – $f = 0,34$; стали 52100 - $f = 0,34$; Fe – $f = 0,841$, сталь 30ХМЮА (азотированная) – $f = 0,897$ [37].

При трении в газообразном гелии статический и динамический коэффициент трения (скорость скольжения 0,25 мм/с и нормальное усилие 2 гс) пар чистого металла Fe составил для температуры 300К – $f_{ст} = 1,09$; $f_{д} = 0,92$; для температуры 80К – соответственно 1,04 и 0,90. Как общая закономерность прослеживается практическое постоянство коэффициента трения чистых металлов в температурном диапазоне от 20 до 300К [30].

Коэффициент трения стали 40Х по стали Г13Л при скольжении в воздухе при температурах 83 и 293 К составил 0,56 [38].

Кроме того, отмечено и повышение износостойкости сталей при отрицательных температурах. В частности при низкотемпературном точении труднообрабатываемых материалов значительно снижается интенсивность износа резцов, что объясняется возрастанием микропрочности поверхностного слоя инструментального материала вследствие снижения температуры контакта. Это приводит к увеличению сопротивления деформации контактирующего слоя резца и уменьшению адгезионного износа [39].

Анализ результатов исследования углеродистых сталей, склонных к низкотемпературному охрупчиванию, свидетельствует о низкой эффективности дислокационного механизма упрочнения, обусловленного действием напряжения Пайерлса-Набарро, с позиции изменения комплекса механических свойств (включающего показатели прочности, трещиностойкости и износостойкости в условиях трения о закрепленные частицы абразива). При выбранных параметрах изнашивания (скорости скольжения 0,35-0,8 м/с, удельном давлении 1,18 МПа, изменении температуры испытания от +20°С до -196°С с наличием в зоне трения жидкого азота) величина объемного износа исследуемых материалов уменьшилась на 5...45%. Полностью хрупкого разрушения поверхностных слоев исследуемых материалов при абразивном воздействии не происходит, что обусловлено выделением тепловой энергии в результате абразивного изнашивания. Указано, что характер разрушения поверхностных слоев при абразивном изнашивании в области отрицательных температур зависит от физико-механических свойств исследуемых материалов, их структуры и триботехнических параметров [40].

К выводу, что характер закономерностей и количественная величина интенсивности изнашивания полностью определяется механическими

свойствами материала, зависящими от его структуры, и степенью влияния на эти свойства низких температур, приходят и Тарасов Г.Ф., Горбуля А.И [41]. Они отмечают, что степень происходящих изменений свойств сталей при понижении температуры зависит от их структуры. Поэтому влияние структуры и температуры испытаний на износостойкость должны рассматриваться во взаимной связи. Эти утверждения наглядно подтверждаются зависимостями износостойкости при абразивном изнашивании с разными температурами, представленными на рисунке 1.14.

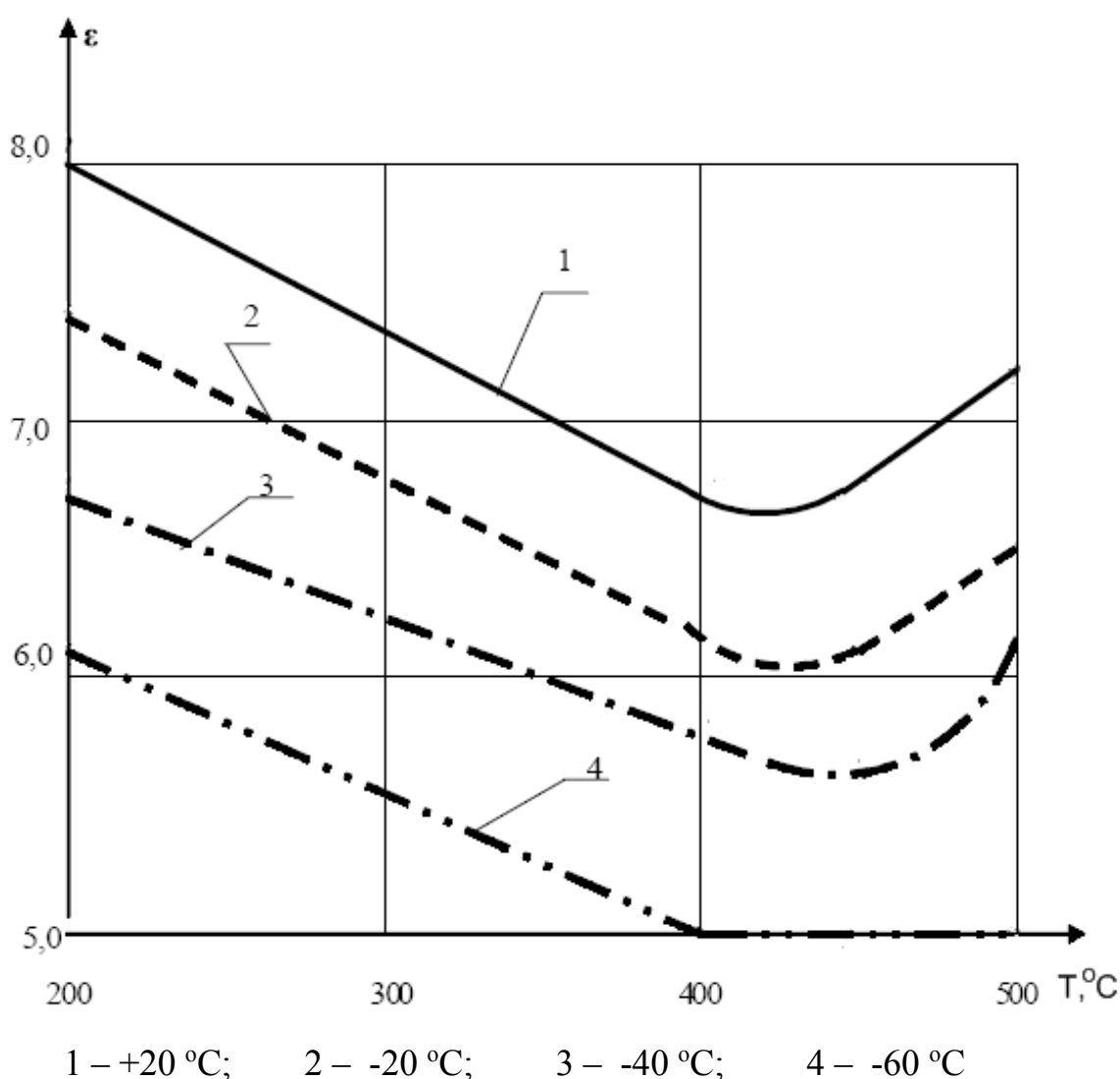


Рисунок 1.14 – Зависимость износостойкости стали X8M2Ф от температуры отпуска (закалка 1 025°С) при различных температурах испытаний.

Анализируя обзор литературных данных по вопросам изнашивания материалов в условиях повышенных температур с учетом динамики нагружения, следует отметить основательность исследований внешних механических факторов нагружения сопряженных тел, среды, температуры, природы контактирующих материалов на развитие процессов изнашивания при трении скольжения. Исследования тепловых явлений при изнашивании материалов в условиях реверсивного, однонаправленного трения и фреттинг-коррозии идут в основном по двум направлениям. В первом исследуются тепловые явления, возникающие в зоне контакта при комнатных температурах. Исследователи второго направления изучают влияние окружающей среды на закономерности изнашивания материалов. Работы в области износостойкости материалов в условиях повышенных температур проводились А. Я. Алябьевым, И. Г. Носовским, А. П. Семеновым, Л. И. Ивченко, Ю. Г. Ткаченко, В. В. Шевелей, А. В. Карасевым, М. В. Киндрачуком, Л. А. Чатыняном, И. В. Петерсоном, Дж. Гласготом, Г. Вудом, Харрисом, М. Оверсом и др.

В частности, закономерности трения и изнашивания при динамическом нагружении включающем удар с проскальзыванием и высоких циклически меняющихся температурах, полученные в работе [3], показывают, что температура контактирующих поверхностей влияет на абсолютную величину износа, интенсивность изнашивания и коэффициент трения наиболее существенно и, как правило, приводит к их уменьшению. При этом имеет место критическая температура перехода от интенсивного изнашивания к умеренному. Сопротивление изнашиванию жаропрочных дисперсионно-упрочненных сплавов, а также характер изменения коэффициента трения в основном определяется условиями образования и разрушения защитного поверхностного слоя, являющегося результатом окисления поверхности с последующим механическим уплотнением продуктов изнашивания и оксидов. При этом в условиях термоциклирования величина износа почти на порядок превышает износ, наблюдаемый при постоянной температуре. Происходит

чередование двух основных процессов в течение одного термоцикла: усталостного – при температурах ниже температур перехода от интенсивного износа к умеренному и окислительного – при температурах выше температур перехода. Основным механизмом изнашивания жаропрочных материалов является усталостное разрушение локальных объемов поверхностного слоя, инициируемое изменением морфологии упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы. При температурах выше критических преобладающими являются окислительные процессы, сопровождающиеся с увеличением амплитуды проскальзывания схватыванием материалов и их многократным переносом с одной поверхности на другую. Перенесенные объемы материала разрушаются вследствие малоциклового усталости.

Изменения в поверхностных слоях контактирующих тел, происходящее под действием теплоты, крайне разнообразны. При нагреве и охлаждении возможны структурные изменения [42,43,51]. При этом по мере увеличения температуры и напряженности узлов трения изменяется не только исходная структура, но и структура, образовавшаяся в результате сложной совокупности процессов трения [43], изменения в структуре поверхностных слоев в процессе трения при повышенных температурах происходят в результате молекулярно-механического взаимодействия, пластической деформации и диффузионных процессов. В связи с этим, структурные характеристики поверхностных слоев высокотемпературных участков следует рассматривать как фактор, существенно влияющий на износостойкость пар трения [51]. Температура поверхности приводит к возникновению термических напряжений, что вызывает упрочнение или разупрочнение материала в поверхностных слоях [52, 5, 53].

Высокие температуры способствуют аллотропическим превращениям в металлах, что вызывает изменение параметров кристаллической решетки, а, следовательно, влияет на их антифрикционные свойства [34, 47], инициируют развитие процессов изнашивания. По мнению авторов работ [55, 56], при нагреве следует различать три стадии износа: разрушение путем отрыва

частиц менее прочного металла в местах возникновения металлических связей, затем разрушение поверхностей путем отделения частиц размягченного металла и налипание их на более прочную поверхность и, наконец, разрушение происходит путем износа расплавленного металла. При скольжении износ уменьшается с увеличением теплопроводности и уменьшением теплоемкости трущихся материалов [57].

Высокие температуры, интенсифицируя диффузию и повышая химическую активность материалов, ускоряют процессы окисления в поверхностных слоях трущихся тел [34, 58]. По данным Петерсона и др. [59] образовавшиеся оксидные пленки значительно снижают коэффициент трения металлов. Антифрикционные свойства пленок, образующихся на поверхности трения, зависят от химического состава трущихся материалов и условий их испытаний. Для легированных сталей [51, 60] при трении в диапазоне температур 500 – 700°C коэффициент трения почти в 2 раза меньше, чем при комнатной температуре, что объясняется способностью сплавов образовывать защитную оксидную пленку. В условиях реверсивного трения при исследовании железо-хромистых сплавов в интервале температур 300 – 600°C авторы [60] наблюдали образование гладких защитных слоев, что приводило к низким коэффициентам трения и очень низким скоростям износа.

Снижение коэффициента трения при температурах более 600°C А.П. Семенов [61] объясняет трибохимическим взаимодействием, в результате которого при трении химические реакции проходят при значительно более низких температурах, чем в статике. При этом активирующими химическое взаимодействие факторами являются механическая активация (разрыв химических связей вследствие деформирования и разрушения при трении) и «температура вспышки» на поверхности трения. В результате химического взаимодействия происходит выделение активного атомарного кислорода, который адсорбируясь, снижает трение.

Большой интерес представляют сведения о поведении при высоких температурах металлов и сплавов в условиях динамического контактного

нагружения. Вопросы динамики нагружения рассматриваются в работах В.Е. Канарчука [62, 63]. В частности установлено, что при нестационарных режимах нагружения двигателей внутреннего сгорания износ более чем в два раза превышает величину износа при сопоставимых установившихся режимах. При этом с увеличением интенсивности изменения нагрузки, скорости нагрева и с ростом ускорений поверхности трения испытывают значительные пульсирующие нагрузки, приводящие, в конечном счете, к накоплению повреждений в поверхностных слоях металла.

На существенное повышение интенсивности изнашивания в условиях динамического нагружения, несмотря на малые амплитуды нагрузки, указывается в работе [64]. Однако выполненные в основном на конструкционных сталях и чугунах при температурах до 500°С исследования не дают полной картины взаимосвязи исследуемых параметров.

Большая часть остальных исследований при более высоких температурах выполнена различными авторами либо в условиях трения скольжения, либо при реверсивном трении или фреттинге без разрыва контакта, т.е. без учета ударных нагрузок.

Обобщая обзор литературных данных по вопросам изнашивания материалов в условиях многокомпонентной динамики нагружения с учетом высоких и отрицательных температур окружающей среды, следует отметить основательность исследования внешних механических факторов нагружения сопряженных тел, среды, температуры, природы контактирующих материалов на развитие процессов изнашивания при трении скольжении. В то же время, в литературных источниках практически отсутствуют данные по закономерностям изнашивания в условиях многокомпонентного динамического контактного нагружения, включающего в себя удар с последующим проскальзыванием во взаимно перпендикулярных направлениях. Анализ состояния исследований трения и изнашивания при трехкомпонентном динамическом нагружении свидетельствует о том, что теории, которая бы описывала закономерности трения и изнашивания при

полном комплексе этих параметров нагружения не существует. Многие исследования проведены при отдельном действии каждого из этих факторов нагружения. Закономерности трения и изнашивания при этих условиях известны.

Однако неоднозначное влияние низких температур на физико-механические характеристики металлов сопровождается отличием износостойкости в трибосопряжениях, полученных отмеченными выше авторами, что приводит к противоречивому мнению о влиянии низких температур на износостойкость. В частности, об увеличении износа при отрицательных температурах указывает И.В. Крагельский, В.В. Алисина, Сафонов А., Сафонов Л., о снижении износа – Д. Е. Буторин, С.Н. Филоненко, П.Т. Слободяник, В.И. Кулеба, И.М. Любарский, о возможном увеличении или снижении износа в зависимости от температуры и материала – Э. А. Памфилов, С. С. Грядунов, А.В. Макаров, Т.Е. Куренных, Г.Ф.Тарасов, А.И. Горбуля, о незначительном влиянии отрицательных температур на износостойкость – Ю.Н. Дроздов, И.Г. Павлов, В.Н. Пучков, Г.Н.Преснякова, И.М.Любарский, В.Ф. Удовенко, Е.И. Марьяхина, С.С. Черняк.

Кроме того, исследование влияния факторов нагружения на износостойкость трибосопряжения не может считаться полным, если не учитываются структурные изменения поверхностного слоя. В большей части исследований по оценке долговечности трибосопряжений при многокомпонентном динамическом нагружении авторами этому вопросу уделяется недостаточно внимания.

1.4 Постановка цели и задач исследования, основные этапы

Литературные источники, представленные в предыдущих разделах, и личный опыт свидетельствуют о достаточно большом внимании к проблеме повышения износостойкости трибосопряжений, которые эксплуатируются в

условиях многокомпонентного динамического нагружения и различных температурах окружающей среды. Потеря номинальной целостности подобных трибосопряжений приводит к общей разбалансировке механической системы, что влияет на точность позиционирования, возникновению шума, а в ряде случаев сопровождается поломкой машин и механизмов.

Анализ особенностей условий контактирования реальных трибосопряжений машин и механизмов указывает на наличие многокомпонентного нагружения в контакте большинства трибосопряжений (что включает проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях и удар). Для повышения ресурса деталей при таком характере нагружения проведено недостаточно исследований износостойкости. Отсутствует теория, которая бы описывала закономерности трения и изнашивания в процессе многокомпонентного нагружения. Необходимы дополнительные исследования, которые позволят описать физику процесса разрушения и обосновать выбор конструктивно технологических мероприятий. При этом необходимо расширение представлений о физико-механических явлениях в зоне контакта.

При исследованиях процессов в зоне контактного взаимодействия твердых тел обычно встречаются с трудностями, связанными с противоречивыми данными исследований износостойкости трибосопряжений и невозможности сопоставления различных методов исследования. Рядом авторов в большей мере проводились исследования износостойкости фрикционных пар с использованием стандартных или модернизированных машин трения в процессе качения или скольжения образцов. Полученные при этом результаты исследований не позволяют создать картину процесса изнашивания, отвечающую реальному процессу, так как большая часть трибосопряжений работает в условиях более многокомпонентного нагружения. Сложное взаимодействие твердых тел в контактной зоне должно

учитываться при построении моделей контактирования и прогнозирования поверхностной прочности материалов при динамических нагрузках.

Сочетание одновременного воздействия на трибопару таких факторов, как: нагрузка в контакте и ее динамический характер приложения; высокие положительные или отрицательные температуры окружающей среды; кинематика взаимного перемещения поверхностей при приложении нормальной нагрузки в условиях с разрывом контакта, в отличие от только однонаправленного тангенциального смещения, не может не внести свои коррективы в общепринятые (при раздельном влиянии факторов) механизмы разрушения поверхностных слоев материала. Кроме того, с увеличением длительности работы трибоузла происходит постепенное изменение условий изнашивания. Меняется динамический режим нагружения (как правило в сторону увеличения динамических нагрузок за счет увеличения зазоров), характера взаимодействия деталей в узле, контактирование в упругой области сменяется контактированием в упруго-пластической или пластической областях.

Под воздействием экстремальных условий эксплуатации в поверхностных слоях металла происходят изменения, которые приводят к потере работоспособности деталей. При этом основную роль имеет сложность характера распределения нагрузки в пространстве и времени. Не достаточно исследовано влияние пониженных климатических температур на изнашивание. Очевидно, климатические сниженные температуры имеют лишь не прямое влияние на износ, прямо влияя на механические свойства материалов деталей трибосопряжений и смазывание.

Возникает настоятельная необходимость в определении характера нагружения трибоузлов, диапазонов нагрузочных параметров, их эволюции в процессе эксплуатации, составлении на базе статистических данных типового комплекса нагрузочных режимов и их изменения за установленный период времени. Исследовав влияние каждого из параметров нагружения в отдельности или в совокупности на трибохарактеристики узла (детали),

можно определить эквивалентные состояния взаимодействующих поверхностей и затем моделировать эти состояния в лабораторных условиях. Такое моделирование дает возможность повысить достоверность получаемых результатов и значительно сократить сроки испытаний. С другой стороны, исследование механизма повреждаемости материалов, создание моделей изнашивания контактных поверхностей деталей, работающих в экстремальных условиях, позволяют целенаправленно создавать (или выбирать из числа существующих) износостойкие материалы, разрабатывать конструктивно-технологические мероприятия направленные на повышение долговечности изнашивающихся деталей.

Совместное действие нагрузочных факторов инициирует в поверхностном слое деформационные процессы, способствующие изменению структурного, фазового и напряженного состояний, интенсификацию диффузионных и окислительных процессов, оказывающих существенное влияние на изнашивание деталей.

Выбор тех или иных мероприятий, направленных на повышение износостойкости деталей, требует системного подхода к решению поставленных задач. Так, например, разработка или подбор материалов для трибоузлов диктует необходимость разработки механизмов изнашивания, базирующихся на основных закономерностях изнашивания поверхности в этих условиях, исследованиях деформационных, химических, термодинамических процессов в зоне контакта, выявления вклада каждого из факторов, вызывающих повреждаемость материала трущихся поверхностей. Выбор рациональной конструкции узла или оптимизация нагрузочных режимов требует исследования влияния внешних механических и тепловых факторов на величину и характер износа рабочих поверхностей. И, наконец, - проверку эффективности того или иного технического решения можно осуществить либо на реальной машине, что требует больших затрат, либо на стенде, адекватно моделирующем условия работы узла трения. В последнем случае должен ставиться вопрос о степени надежности полученных

результатов, что обеспечивается возможностью измерения параметров износа оригинала и модели, а также идентичностью топографии изношенных поверхностей.

Для реализации такого подхода необходимо осуществление физического моделирования процессов контактного взаимодействия, протекающих в парах трения, нагруженных переменными температурным и силовым полями.

Настоящая работа посвящена комплексному исследованию свойств и кинетики разрушения поверхностного слоя металлов, формирующихся при контактном взаимодействии тел в условиях многокомпонентной динамики нагружения, различных температур и повышению долговечности трибосопряжений, эксплуатирующихся в экстремальных условиях.

Основные этапы научного поиска закономерностей изнашивания и разработка мероприятий по повышению износостойкости трибосопряжений при многокомпонентном нагружении приведены на рисунке 1.15.

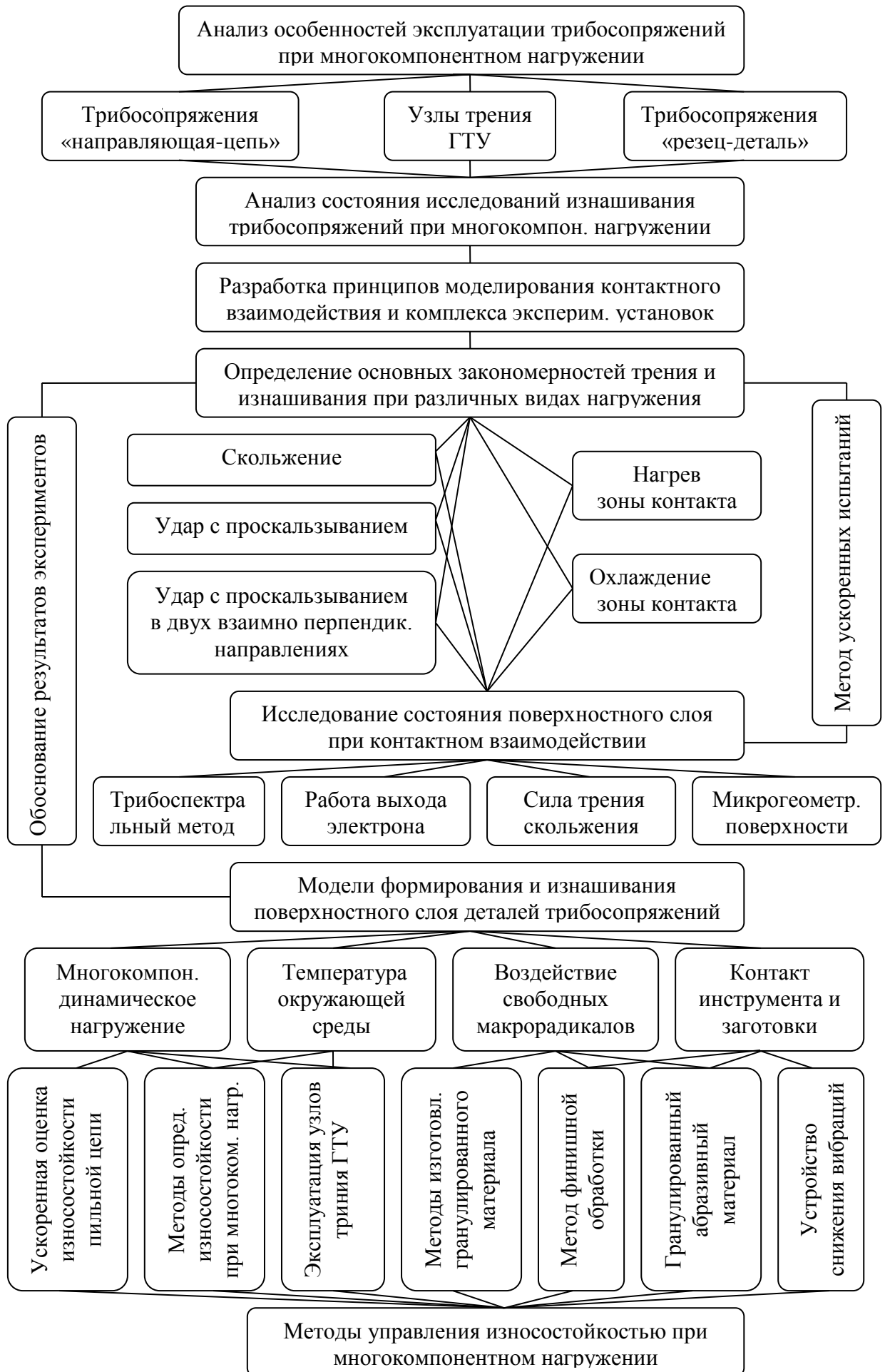


Рисунок 1.15 – Основные этапы научного поиска закономерностей изнашивания и разработка методов управления износостойкостью трибосопряжений при многокомпонентном нагружении.

РАЗДЕЛ 2

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Особенности исследований износостойкости материалов, работающих при многокомпонентном термодетактном воздействии.

Успешное решение одной из основных задач машиностроения – повышения надежности, работоспособности и долговечности машин и приборов тесно связано с проблемой износостойкости промышленных материалов, базирующейся на комплексном использовании достижений механики, физики, химии. Основной задачей триботехнологии является исследование и создание оптимальных пар трения, узлов трения, обеспечивающих заданную надежность и долговечность механических систем в установленных условиях эксплуатации. Анализ отказов узлов трения показывает, что их причины формируются на различных стадиях создания новой техники, но подавляющее большинство рождается на технологическом этапе. Решение проблемы износостойкости связано с изучением и поиском закономерностей процессов в зоне контактного взаимодействия твердых тел, необходимых для разработки новых методов снижения вредного воздействия трения и изнашивания.

При исследовании процессов в зоне контактного взаимодействия твердых тел обычно встречаются с трудностями, связанными с противоречивыми значениями износостойкости трибосопряжений и невозможностью их сопоставления, поскольку они получены различными методами. Большинство авторов проводили исследования износостойкости фрикционных пар с использованием машин трения при качении, скольжении образцов или в условиях фреттингового износа. Полученные при этом результаты не позволяют создать целостную картину процесса изнашивания, отвечающую реальному процессу, так как большая часть трибосопряжений

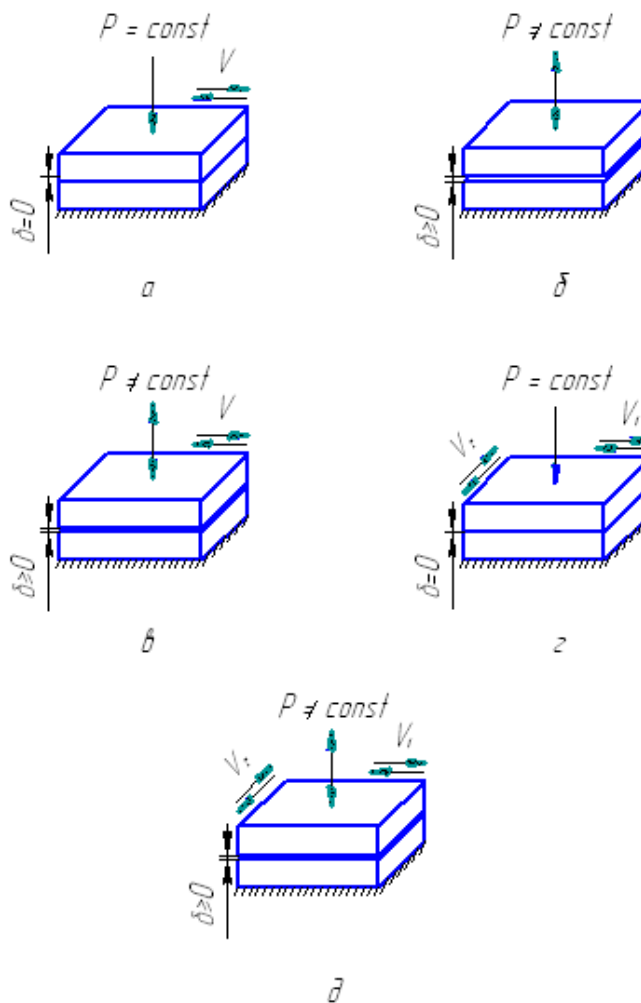
работает в условиях многокомпонентного нагружения с наличием вибраций действующих в различных направлениях.

Особенности и специфичность механизма пластической деформации при трении в условиях многокомпонентного нагружения до настоящего времени не позволили разработать физические основы и раскрыть закономерности поверхностного разрушения. Исследование структуры и свойств поверхностей деталей трибосопряжений показывают, насколько сложны и разнообразны поверхностные явления. При этом невозможно перенести достижения в области основных прикладных наук на сопредельные области, к которым относятся процессы контактного взаимодействия твердых тел. Исследования этих процессов обычно сопровождаются трудностями, связанными с неоднозначным влиянием поверхностно-активной среды, типом кристаллической структуры, распределением плотности дислокаций, различными возможностями методов исследований.

Известно, что в процессе трения максимальные напряжения возникают в микрообъемах поверхностного слоя. При этом в каждом микрообъеме проходит циклическое изменение напряжений, которое создает условия к проявлению эффекта Баушингера. В поверхностных слоях материала возникает деструкционное деформирование - накопление микроскопических повреждений. В связи с дискретностью контакта это происходит неодновременно и зависит от степени дискретности и условий трения. Одновременность деформации и диффузии элементов среды приводят к особенностям механизма пластической деформации, который определяется активацией поверхностного слоя и повышением дефектности структуры металлов [45].

Большая часть деталей трибосопряжений различных машин и механизмов в процессе эксплуатации находятся в условиях трехкомпонентного динамического нагружения (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях), в связи с функциональными взаимными перемещениями в разных направлениях, наличием вибраций или

их комбинациями (рис.2.1). Их износостойкость значительно отличается от той, которая имеет место при однонаправленном или двухкомпонентном нагружении. Во время эксплуатации в поверхностном слое металла происходят изменения, которые приводят к потере работоспособности детали.



а – однокомпонентное при осциллирующем скольжении; б – однокомпонентное с ударной нагрузкой; в – двухкомпонентное при осциллирующем скольжении с ударной нагрузкой; г – двухкомпонентное при осциллирующем скольжении; д – трехкомпонентное при осциллирующем скольжении с ударной нагрузкой

Рисунок 2.1 – Схемы нагружения трибосопряжений плоских деталей

При этом следует иметь в виду, что знакопеременное деформирование сопровождается определенным движением дислокаций. Многокомпонентный характер нагружения приводит к изменению интенсивности процесса движения дислокаций и связанного с ним развития микрповреждений металла, которое определяется структурным состоянием материала. Именно условия контактного взаимодействия при трении приводят к различному деформированию поверхностного слоя металла и формированию его структурного состояния с определенной свободной энергией, физической и химической активностью.

Существующие методы определения интенсивности изнашивания сдерживают выявление всего многообразия процессов контактных взаимодействий и поверхностного разрушения. Испытания натурального узла трения не всегда возможны из-за длительности испытаний и большой стоимости проведения эксперимента по полному циклу. Для построения общей закономерности интенсивности изнашивания от скорости относительного скольжения и удельной нагрузки только для одного материала и одной рабочей среды требуется около 300 часов работы [65]. Кроме того, при измерении интенсивности изнашивания традиционными методами наблюдается большой разброс данных (50%).

Таким образом, для повышения долговечности деталей трибосопряжений, работающих в условиях трехкомпонентного нагружения, необходимы дополнительные исследования, которые позволили бы раскрыть механизм процесса разрушения, изменения свойств поверхностного слоя, и обосновать выбор конструктивно технологических мероприятий. Необходимо определить также степень влияния состояния пластически деформированного металла, его деструкции, на степень пригодности к эксплуатации. При этом большое значение приобретают методы ускоренных испытаний пар трения, при которых необходимый объем информации об износостойкости получается в более короткий срок.

Общая схема методологии проведения исследований представлена на рисунке 2.2.

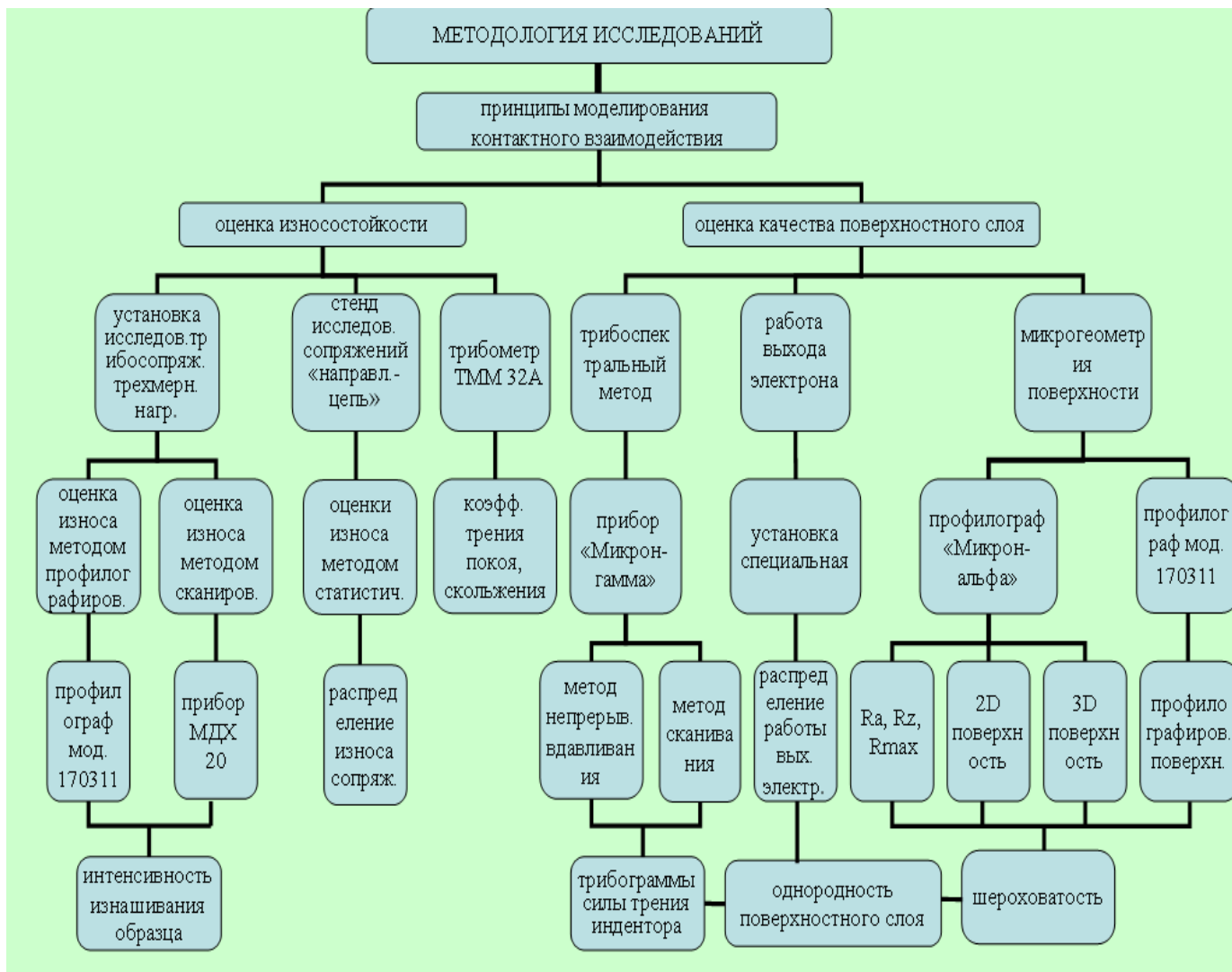


Рисунок 2.2 – Общая схема методологии исследований

2.2 Испытательные стенды и установки для оценки износостойкости трибосопряжений при многокомпонентном термодетактном воздействии.

Испытания конструктивных элементов на натуральных машинах, установках и двигателях (по эквивалентным программам) могут оказаться весьма дорогостоящими, вследствие своей трудоемкости и длительности, и в

ряде случаев не обеспечивают достаточную степень достоверности получаемых результатов. Поэтому в исследовательской практике такие испытания проводятся редко. Чаще с исследовательскими целями осуществляется подконтрольная эксплуатация машин, установок, двигателей. В этом случае, через определенные промежутки времени эксплуатации соответствующая машина выключается, производится ее разборка и обследование деталей, подверженных износу. Полученных при таких исследованиях данных оказывается недостаточно, поскольку необходимость дальнейшей эксплуатации машины исключает применение разрушающих методов исследования процессов повреждаемости деталей. Наряду с этим, сроки эксплуатации современных машин, установок, двигателей могут составлять тысячи, а иногда и десятки тысяч часов, что естественно, приведет к значительному увеличению сроков испытаний и их стоимости.

Учитывая сложность явлений, происходящих в зоне контакта трибосопряжений, необходимо проведение комплекса исследований, поэтому большое значение приобретают методы ускоренных испытаний пар трения, при которых необходимый объем информации об износостойкости получается в более короткий срок. Очевидно, наиболее приемлемым может оказаться метод испытаний, основанный на моделировании натуральных условий на динамическом стенде. При этом испытания проводятся с циклически изменяемой амплитудой перемещений, давления в контакте, температурой. Это позволяет воспроизводить условия испытаний образцов и натуральных деталей, близкие к эксплуатационным, а также выполнять программы ускоренных испытаний на износостойкость, проводя их, например, по наиболее жестким режимам, либо по режимам, соответствующим наибольшему накоплению повреждений в поверхностном слое трущихся деталей.

Наиболее приемлемой схемой трения является схема, в которой осуществляется контактное взаимодействие торцевыми поверхностями консольно закрепленных образцов. При такой схеме узел трения компактен,

удален от привода, что удобно при конструировании камеры задания температуры (нет необходимости в защите деталей привода и измерительных устройств). Все участки поверхностей трения при такой схеме находятся в одинаковых условиях (нет разницы в скоростях скольжения различных участков), контактные поверхности воспринимают равномерную нагрузку. Форма образцов должна обеспечить максимальное приближение условий испытаний к эксплуатационным и, по возможности, исключить влияние масштабного фактора.

Сформулированы основные принципы моделирования эквивалентных состояний трибологических пар, которые эксплуатируются в особых условиях, включающие трибологические, кинематические, нагрузочные, металлофизические, физико-механические критерии (рис.2.3).

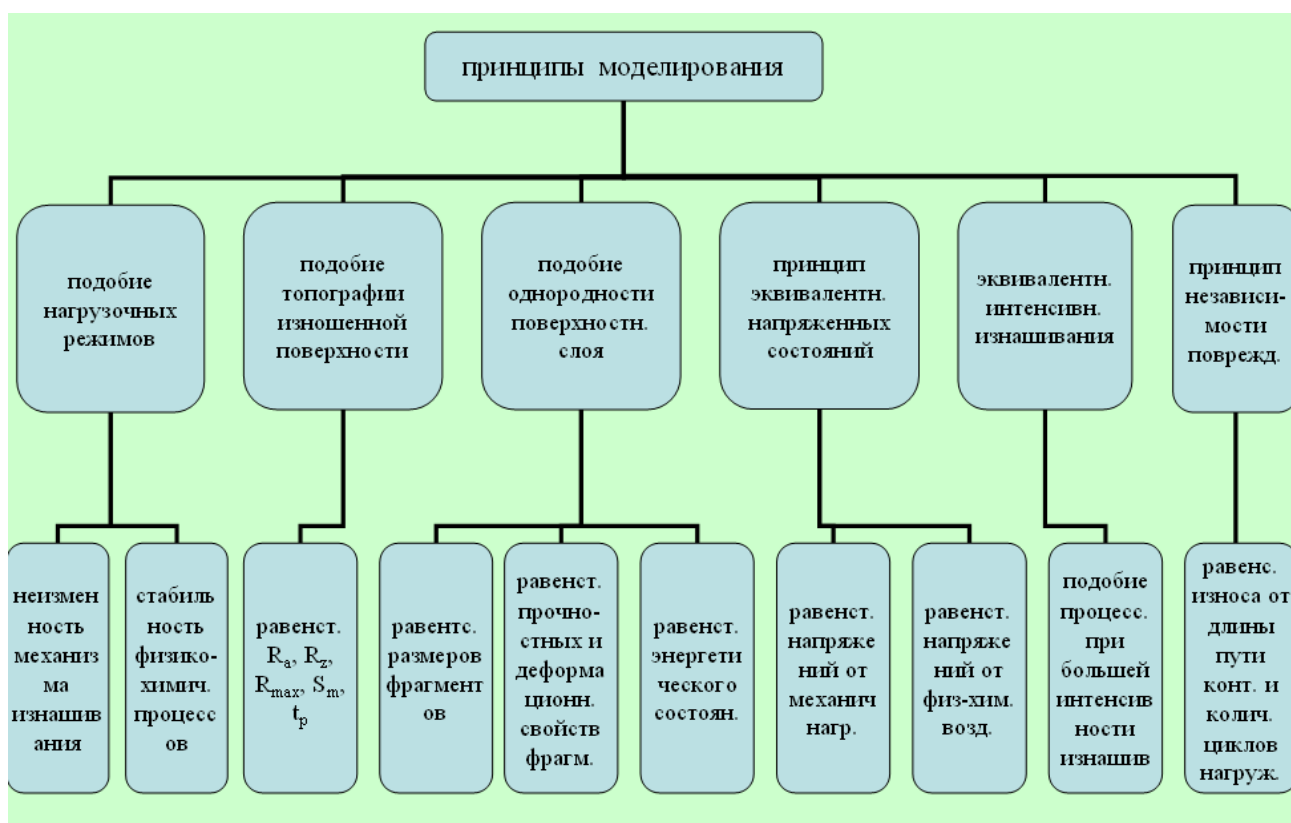


Рисунок 2.3 – Принципы моделирования трибологических пар

Выбор режимов, которые являются эквивалентны реальным, выполняют в соответствии с условиями физического моделирования процессов изнашивания, руководствуясь принципами:

- принципом геометрического подобия;
- принципом равенства структурных и фазовых превращений в поверхностном слое образца и натурной детали;
- выполнением условия по критерию подобия Гука:

$$(PA/VE)_o=(PA/VE)_m \quad (2.1)$$

где P_o , P_m - нагрузка в контакте натуральных деталей и образцов соответственно;

A_o , A_m - амплитуда проскальзываний натуральных деталей и образцов;

V_o , V_m - объем натурной детали и образца;

E_o , E_m - модули упругости материалов натурной детали и образца.

В соответствии с этим были разработаны методики и ряд специальных установок для проведения ускоренных исследований материалов на износостойкость, позволяющие реализовывать условия сложного нагружения при различных температурах окружающей среды и испытывать образцы в условиях приближенных к реальным условиям эксплуатации. При этом наиболее перспективными для исследований являются установки реализующие трение образцов в режиме однонаправленного скольжения, удара с проскальзыванием, удара с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях, схемы которых представлены на рисунках 2.3, 2.5 и 2.6.

В установке (рис. 2.4) проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях обеспечивается за счет закрутки пружинных пластинчатых держателей, появляется дополнительная степень свободы держателей [66]. При этом одновременно накладывается связь, которая согласует движения образцов с разными степенями свободы таким образом, что соотношение передаточных чисел этих движений остается постоянным.

Постоянство передаточных чисел достигается упругими свойствами пружинных держателей.

Установка содержит: узел задания амплитуды колебаний 1, узел крепления образцов 2, узел задания нагрузки 3.

Узел задания нагрузки 3 состоит из рычага 4, шарнирно соединенным со штоком 5, на котором находится упертая в упорную шайбу 6 нагрузочная пружина 7. Упорная шайба 6 соединена с шаговым двигателем 8 через передачу винт-гайка.

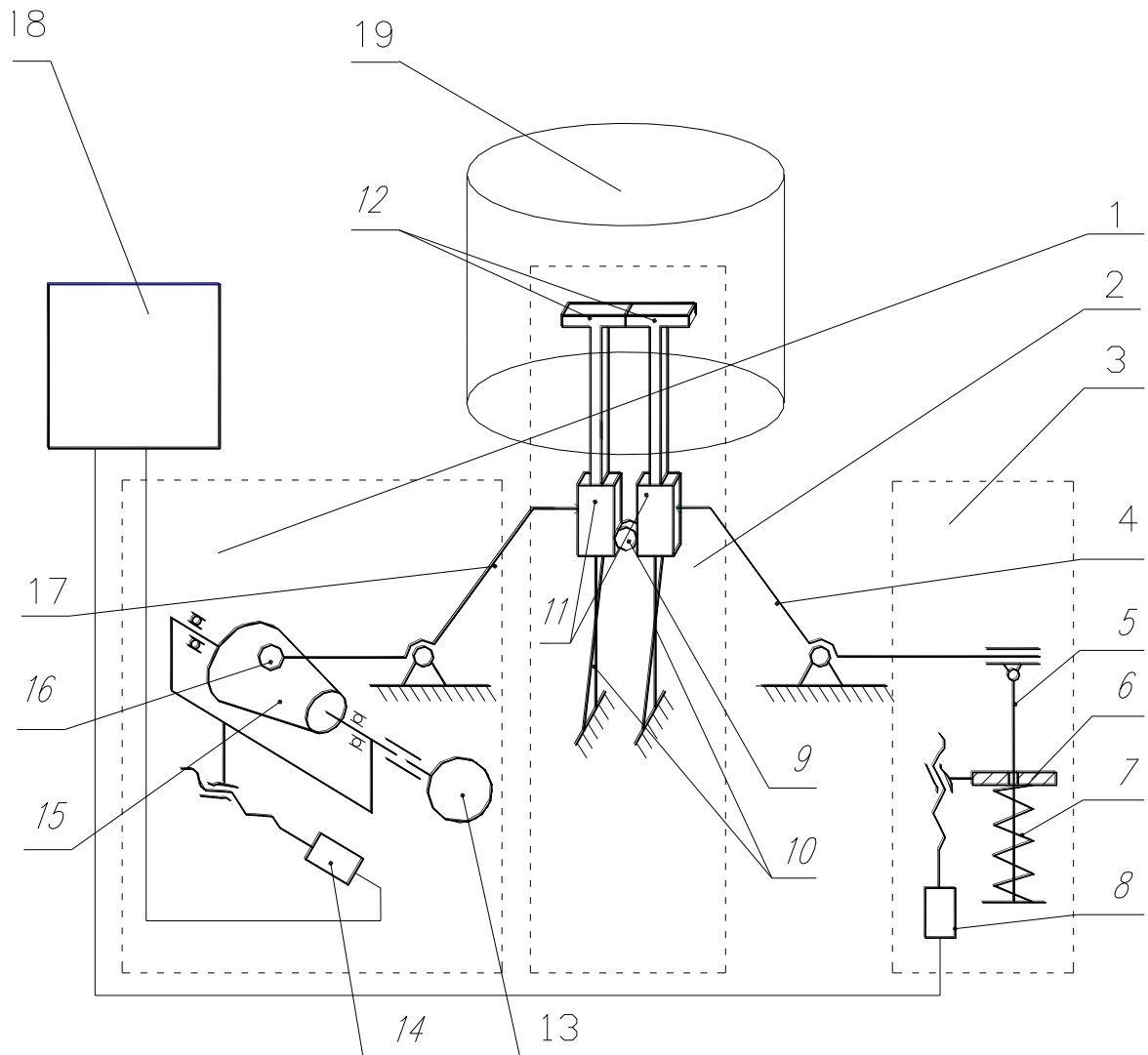
Узел крепления образцов 2 содержит консольно закрепленные пружинные пластинчатые держатели 10. Они имеют закрутку и могут содержать переменный по высоте и ширине размер поперечного сечения. На держателях размещены разделенные роликом 9 державки 11, в которых закреплены образцы 12.

Узел задания амплитуды продольных колебаний 1 состоит из кулачка 15, который соединен муфтой с электродвигателем постоянного тока 13. С помощью передачи винт-гайка шаговый двигатель 14, через ролик 16 соединен с узлом крепления образцов 2.

Также установка имеет электронный блок 18 и камеру 19 для поддержки необходимых температур.

Установка работает следующим образом. Образцы устанавливаются в державки узла крепления образцов. Постоянное расстояние между ними в подвижном и недвижимом состояниях обеспечивается роликом, который также исключает влияние прогиба пружинных пластинчатых держателей на полноту контакта рабочих поверхностей образцов.

Движение с требуемой амплитудой продольных колебаний обеспечивается узлом задания амплитуды. Вращение кулачка, осуществляемое электродвигателем, приводит к колебательному движению с требуемой амплитудой через рычаг - толкатель держателей, державок и образцов. При этом происходит соударение и проскальзывание поверхностей образцов в продольном направлении.



1 - узел задания амплитуды продольных колебаний; 2 - узел крепления образцов; 3 - узел задания нагрузки; 4 - рычаг; 5 - шток; 6 - упорная шайба; 7 - нагрузочная пружина; 8 - шаговый электродвигатель; 9 - ролик; 10 - пружинные пластинчатые держатели; 11 - державки; 12 - образцы; 13 - электродвигатель; 14 - шаговый электродвигатель; 15 - кулачок; 16 - ролик; 17 - рычаг-толкатель; 18 - электронный блок; 19 – камера узла задания температуры

Рисунок 2.4 – Схема установки с закрученными держателями.

Необходимое давление в контакте обеспечивается передачей нагрузки образцам через рычаг от нагрузочной пружины и регулируется изменением степени сжатия последней перемещением упорной шайбы вдоль штока (узел задания нагрузки). Для уменьшения износа контакт кулачка 15 и коромыслового рычага-толкателя осуществляется с помощью ролика 16.

Возможно изменение величины нагрузки и амплитуды перемещения образцов непосредственно в ходе испытаний, изменением сжатия пружины и перемещением кулачка, за счет включения шаговых электродвигателей в соответствии с программой, задаваемой устройством ЧПУ (электронный блок). Для проведения испытаний при температурах отличных от комнатной, образцы располагаются в камере, в которой поддерживается нужная температура.

Наличие закрутки и разной жесткости сечений пружинного пластинчатого держателя приводит к возникновению колебаний держателей, а, следовательно, и к проскальзыванию полок образцов в поперечном направлении. В результате реализуется трехмерное нагруженное состояние поверхностей образцов: удар с последующим проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Кроме того, на рисунке 2.5 представлен вариант крепления правого держателя, который позволяет регулировать угол закрутки пружинных пластинчатых держателей, что позволяет испытывать образцы в условиях, более приближенных к натурным условиям эксплуатации плоских и Z - образных антивибрационных полок вентиляторных лопаток авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), а также ряда других трибосопряжений. Это обеспечивается путем создания на образцах трехмерного нагруженного состояния с помощью обеспечения дополнительной степени свободы, которая имеет регулирование с одновременным наложением связи, согласовывающей движения в разных степенях свободы, так что соотношение передаточных чисел этих движений остается постоянным.

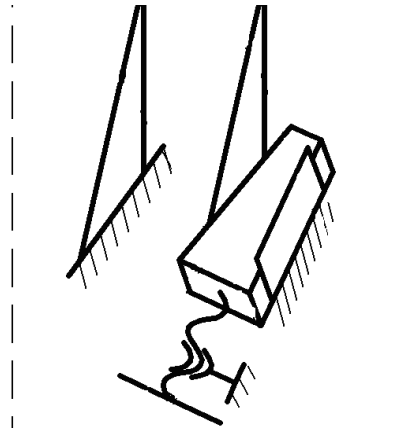


Рисунок 2.5 – Вариант крепления правого держателя.

Регулирование угла закрутки происходит за счет использования новых элементов в узле крепления образцов. В качестве таких элементов выступает винт, вращение которого приводит к перемещению клина, который в свою очередь действует на закрученный пластинчатый держатель и поворачивает его. При этом устройство для исследования трения моделирует удар и небольшой поворот, который способен регулироваться путем введенных новых элементов, со следующим проскальзыванием контактирующих пар - образцов в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Схема более многофункциональной установки, в которой проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях обеспечивается за счет соответствующих узлов, представлена на рисунках 2.6, 2.7 и 2.8. Соударение образцов при испытаниях происходит в результате вращения неуравновешенной массы [67].

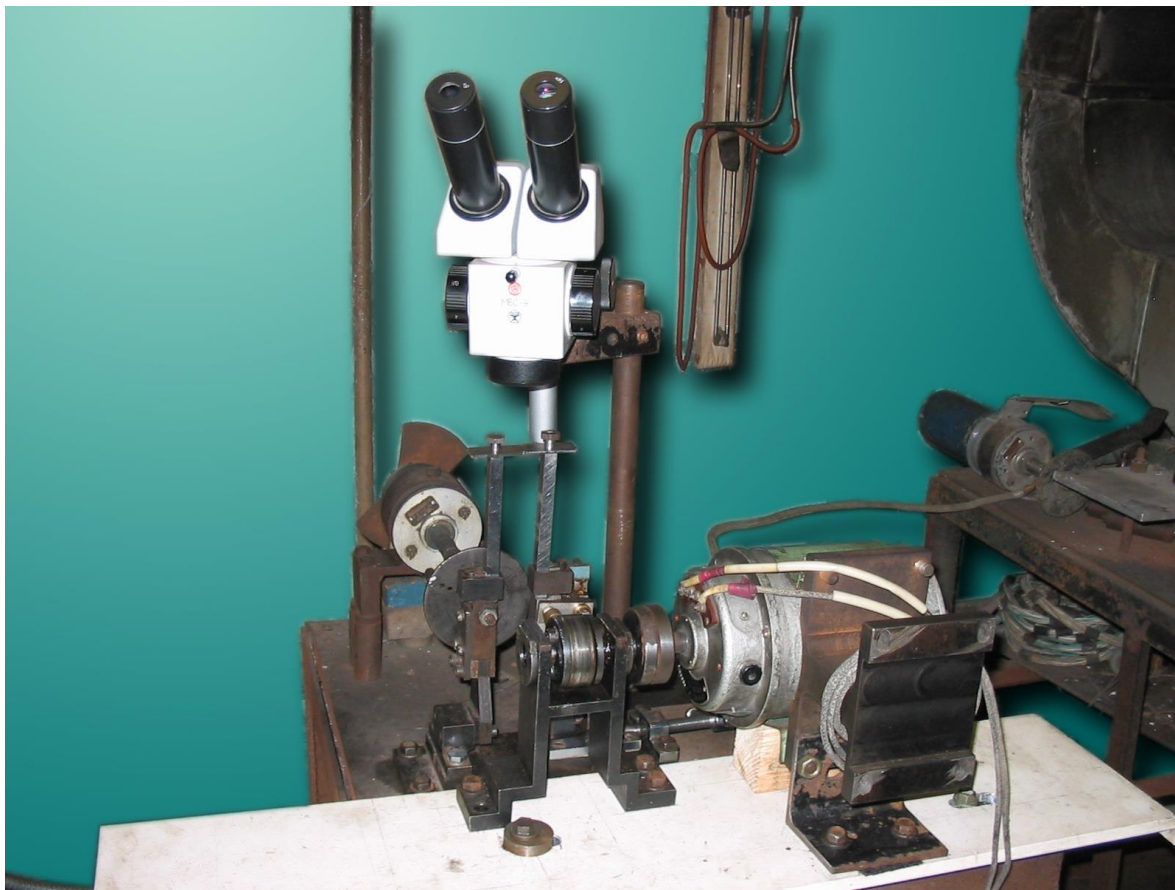


Рисунок 2.6. – Установка с неуравновешенной массой

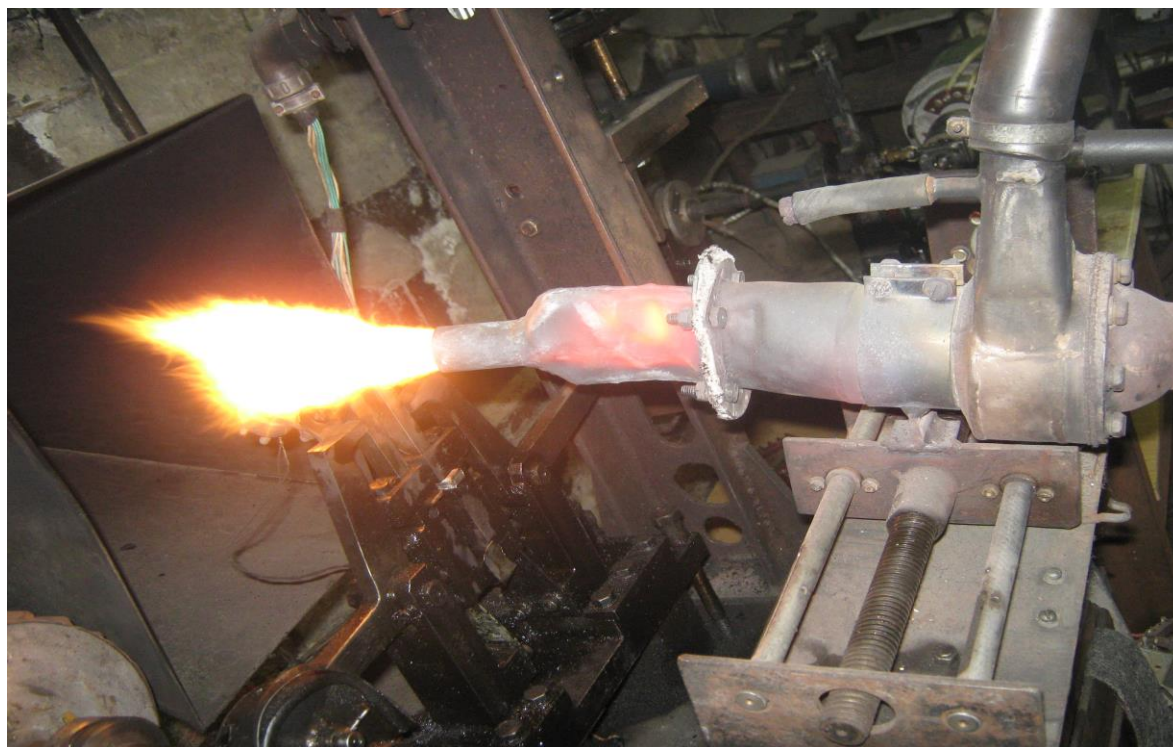
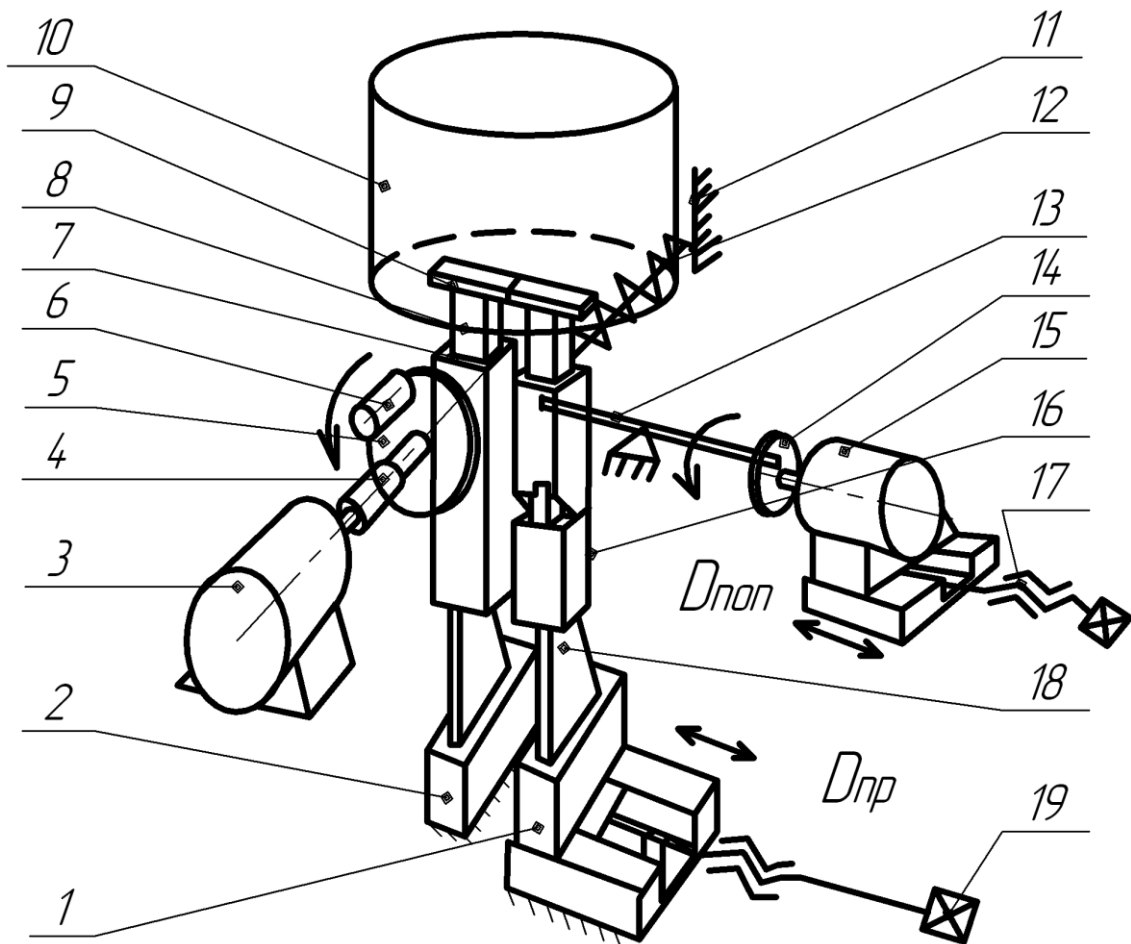


Рисунок 2.7 – Фото установки с использованием горелки в рабочем положении



1 - правая стойка; 2 - левая стойка; 3 - электродвигатель продольной амплитуды и энергии удара; 4 - гибкий вал; 5 - диск; 6 - неуравновешенная масса; 7 - державка левого образца; 8 - база образца; 9 - образцы; 10 - камера узла задания температуры; 11 - упорная поверхность; 12 - пружина; 13 - узел тонкого регулирования амплитуды поперечного проскальзывания; 14 - эксцентрик; 15 - электродвигатель узла задания поперечного проскальзывания; 16 - составная державка правого образца; 17, 19 - передача винт-гайка; 18 - пакеты плоских пружин.

Рисунок 2.8 - Схема установки с неуравновешенной массой

Эта установка является наиболее приемлемой для проведения модельных испытаний износостойкости в условиях приближенных к

натурным условиям эксплуатации большинства трибосопряжений, так как позволяет регулировать параметры нагружения по трем направлениям. Кроме того, в случае необходимости выделения процессов в «чистом виде», есть возможность проводить испытания с различным нагружением образцов с разрывом и без разрыва контакта, т.е. только с колебаниями и проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

При этом специальный узел при необходимости позволяет обеспечить контакт между образцами только при движении в одном направлении, а при движении в противоположном направлении контакт разрывается. Если колебательное движение, которое обеспечивает проскальзывание в поперечном направлении, происходит в той же фазе, что и движение в продольном направлении, то в поперечном направлении будет происходить не реверсивное, а однонаправленное проскальзывание.

Необходимо учитывать, что в условиях нормального переменного нагружения разрыв контакта ведет к изменению его значения от нуля при отсутствии контактирования до очень больших значений в момент соударения. С повышением энергии удара амплитуда нормального нагружения увеличивается.

Устройство состоит из узлов крепления образцов и задания нормальной статической нагрузки, узла задания продольной амплитуды и энергии удара, узла задания поперечной амплитуды, узла задания температуры.

Узел крепления образцов имеет державки 7 и 16 с базами 8 и образцами 9, закрепленные консольно на стойках 1 и 2 с помощью плоских пружин 18. Левая стойка 2 связана с узлом задания продольной амплитуды и энергии удара и имеет на державке закрепленный диск 5 с неуравновешенной массой 6, соединенный с электродвигателем 3 через гибкий вал 4. Узел задания поперечной амплитуды имеет тонкую регулицию 13 от электродвигателя 15 с эксцентриком 14 и передачей винт-гайка 17, связанный с правой стойкой 2, которая имеет державку 16 две половины которой

соединены с помощью шарнира и пружины 12 с упорной поверхностью 11. Пакеты плоских пружин 18 на обеих стойках узла крепления образцов и передача винт-гайка 19 позволяют регулировать статическую нормальную нагрузку. Для проведения испытаний при температурах, которые отличаются от комнатной, образцы помещают в камеру 10, в которой поддерживают нужные температуры.

Установка работает следующим образом. Диск с неуравновешенной массой 6 получает вращательное движение от электродвигателя 3 и осуществляет кинематическое возбуждение державки 7 с образцом на левой стойке 2, что приводит к соударениям образцов 9 и проскальзывание их в перпендикулярном направлении - в плоскости соударений. Кулачок узла поперечной амплитуды 14 имеет регулируемый эксцентриситет и получает вращательное движение от электродвигателя 15. Шайба кулачка вынуждает сдвигаться державку 16 с правым образцом, закрепленным шарнирно, а пружина 12 возвращает их в начальное положение. Происходит проскальзывание образцов в направлении противоположном плоскости соударений, а, следовательно, действие трехмерной нагрузки – соударения и проскальзывание в двух направлениях. Тонкая регуляция амплитуды поперечного проскальзывания возможна с помощью особенного узла в виде регулируемого рычага 13.

Контактное взаимодействие рабочих поверхностей образцов осуществляется следующим образом. При вращении диска с неуравновешенной массой возникает центробежная сила:

$$P=m\omega^2R \quad (2.2)$$

где m – неуравновешенная масса;

ω – угловая скорость диска;

R – радиус вращения неуравновешенной массы.

Вертикальная составляющая центробежной силы P уравнивается жестко закрепленной пластинчатой пружиной, а горизонтальная – возбуждает изгибные колебания пластинчатой пружины и расположенных на ней державки и образца. Вследствие колебаний в зависимости от состояния соединения образцов (зазор или натяг) и амплитуды колебаний возможно взаимное скольжение образцов или их соударение с последующим проскальзыванием.

Энергия (импульс) ударов, а также амплитуда и частота проскальзываний в плоскости соударений регулируется изменением неуравновешенной массы к оси ее вращения, а также изменением частоты вращения вала электродвигателя.

Есть возможность проводить испытания при сменном нормальном нагружении с разрывом и без разрыва контакта. Для того, чтобы разрыва контакта не происходило, правая стойка 1 имеет возможность передвигаться на полозьях с помощью передачи винт - гайка 19. Если с помощью этой передачи приблизить правую стойку 1 к левой 2, а, следовательно, установить образцы 9 с некоторым начальным натягом, а узел обеспечения однонаправленности проскальзываний демонтировать, то разрыва контакта происходить не будет, и образцы будут колебаться и скользить в обе стороны без разрыва контакта.

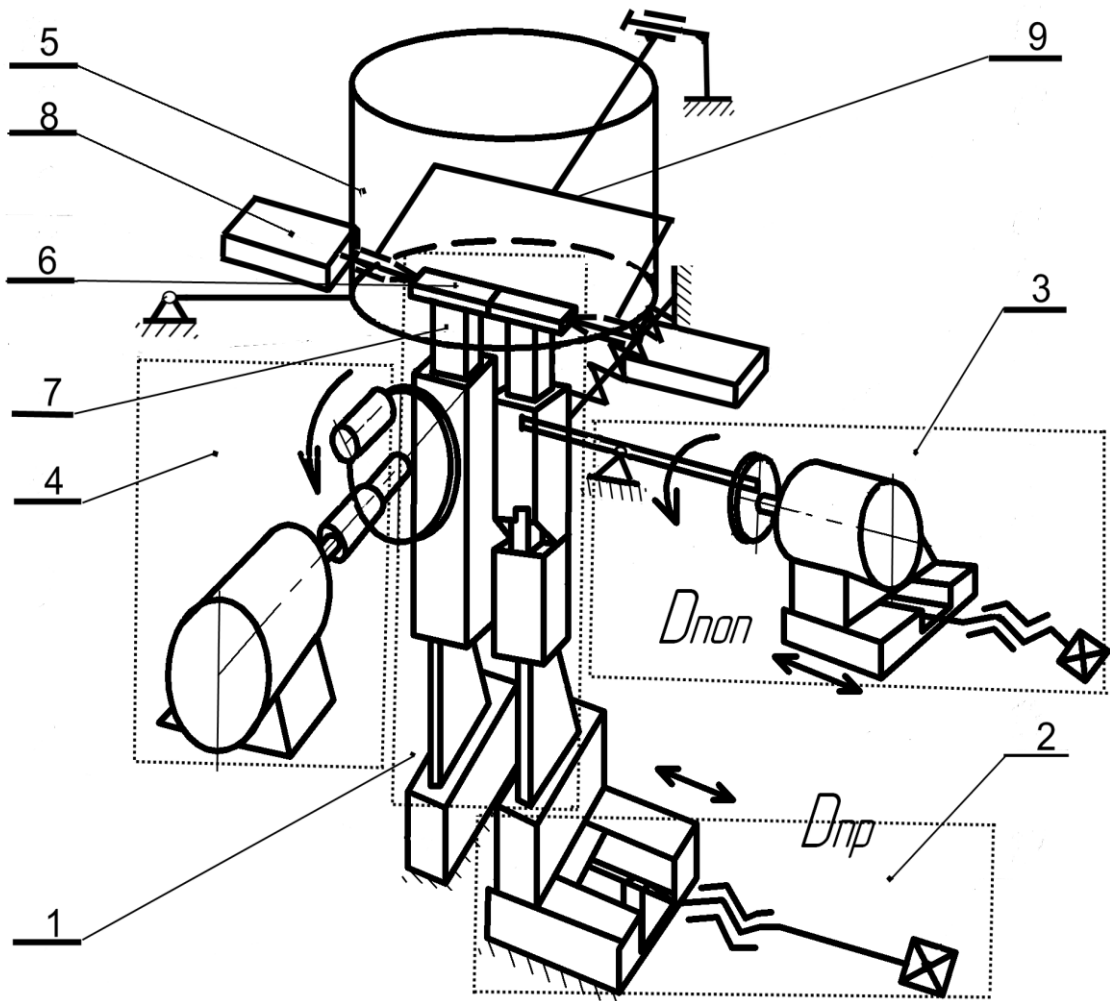
Амплитуда проскальзываний в направлении перпендикулярном плоскости соударений регулируется изменением эксцентриситета кулачка, частота (скорость) проскальзываний - изменением частоты вращения вала электродвигателя. Нормальная статическая нагрузка регулируется ступенчатым изменением количества плоских пружин в пакете.

Узел обеспечения однонаправленности проскальзываний состоит из эксцентрика (кулачка) и толкателя, который представляет собой два коромысла, которые имеют общую ось и представляют собой рычаг который действует как передвижной упор. Эксцентрик контактирует с толкателем своим наибольшим радиусом в фазе цикла когда ведущий (левый) образец с

наибольшим отклонением от положения равновесия в направлении контробразца движется к положению равновесия, и контактирует с толкателем своим наименьшим радиусом во всех других фазах цикла. Проскальзывание происходит лишь в одном направлении, когда ведущий левый образец отклоняется в сторону контробразца в контакте вместе с последним. После этого он возвращается к положению равновесия, а контробразец удерживается от движения толкателя. Когда ведущий левый образец достигает положения равновесия и начинает движение в противоположную сторону, толкатель сдвигается и контробразец быстро возвращается к положению равновесия. Контакт происходит между образцами лишь при их движении в одном направлении, а при движении в противоположном направлении толкатель разрывает контакт. Если колеблющееся движение, которое предопределяет проскальзывание в поперечном направлении происходит в той же фазе, что и движение в продольном направлении, а его частота равняется или большая и кратная частоте движения в продольном направлении, то и в поперечном направлении происходит не реверсивное, а однонаправленное проскальзывание.

В случае необходимости проведения исследований при низкой климатической температуре образцы испытывают в теплоизолированной камере, куда нагнетаются пары жидкого азота.

Для обеспечения возможности непрерывного контроля износа образцов в процессе испытаний установка была модернизирована [68]. Схема полученной установки представлена на рисунке 2.9.



1 - узел крепления образцов; 2 - узел задания нормального статического нагружения; 3 - узел задания поперечного перемещения; 4 - узел задания продольного перемещения и энергии удара; 5 - узел задания температуры; 6 - образец; 7 - державка; 8 - датчик; 9 - вилка.

Рисунок 2.9 – Схема установки для исследования износа образцов при сложном трехкомпонентном нагружении

Установка состоит из узла крепления образцов 1, узла задания нормального статического нагружения 2, узла задания продольного перемещения и энергии удара 4, узла задания поперечного перемещения 3, узла задания температуры с шарнирным креплением 5 и узла контроля износа

образцов, которые закреплены на державках. Узлы 2, 3, 4 обеспечивают трехмерность нагружения образцов - удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Узел контроля износа образцов имеет два контактных датчика 8, которые установлены на вилке 9. Датчики вводятся в контакт с образцами 6 с помощью вилки, когда необходимо осуществить замер износа.

Устройство работает следующим образом. Образцы закрепляются в узле крепления образцов 1. Нормальная статическая нагрузка на образцы обеспечивается узлом 2 и устройство приводится в действие. При этом работает устройство согласно описанию предоставленному к рисунку 2.6. Узел 4 приводит к соударению образцов и проскальзыванию их в перпендикулярном направлении - в плоскости соударений. Есть возможность проводить испытание при переменной нормальной нагрузке с разрывом и без разрыва контакта. Узел 3 обеспечивает проскальзывание образцов в направлении противоположном плоскости соударений, а, следовательно, действует трехмерная нагрузка – соударения и проскальзывание в двух направлениях.

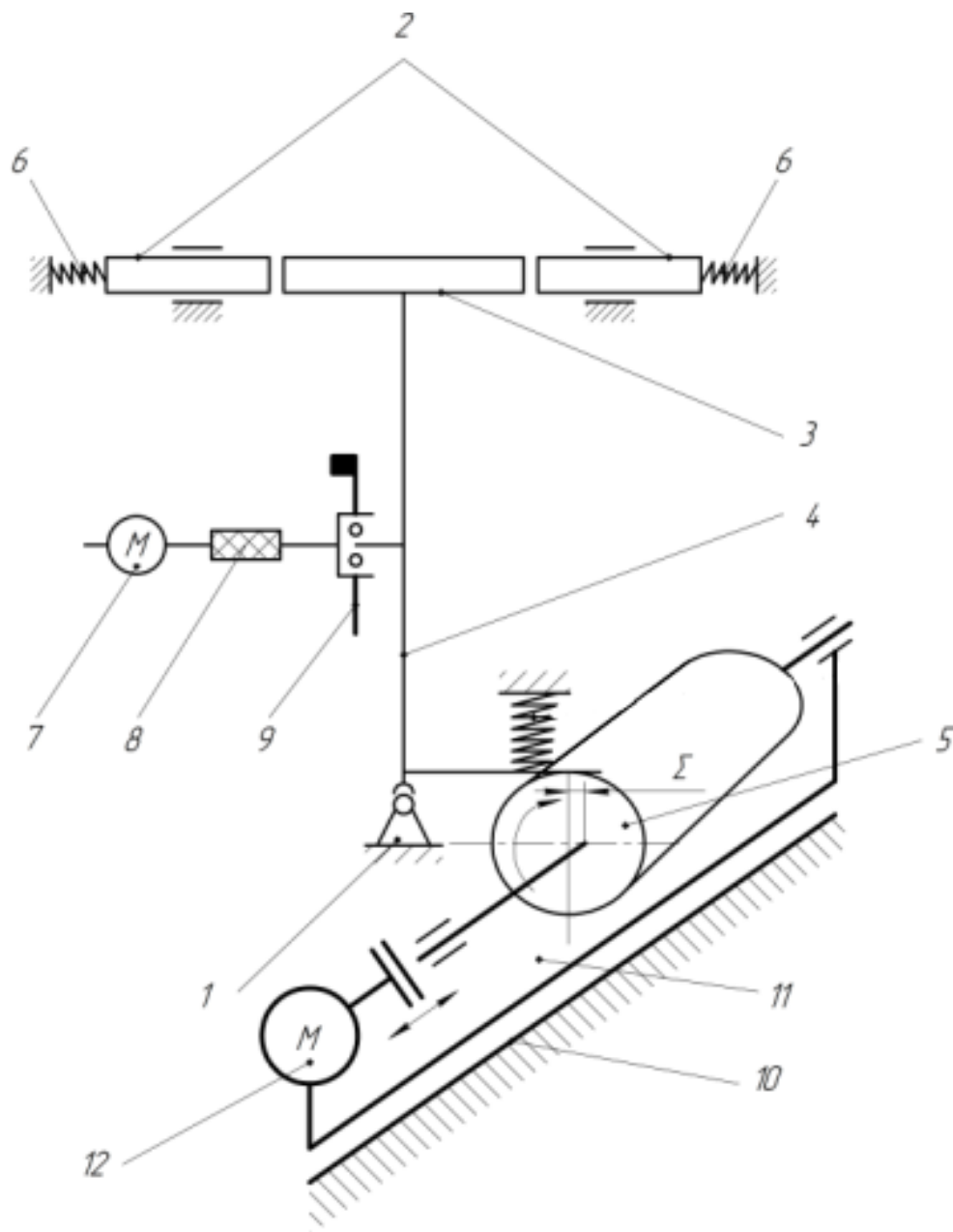
После установленного (необходимого) количества циклов нагружения в контакт с образцами вводятся одновременно два датчика, и определяется линейный износ образцов непосредственно измерением изменения линейных размеров пары образцов. Датчики соединены с помощью вилки и вводятся в контакт с образцами вращательной кинематической парой. Чтобы узел задания температуры не мешал контролю износа образцов он предварительно отводится от образцов с помощью шарнирного соединения после остановки устройства. Линейный износ образцов определяется непосредственно измерением изменения линейных размеров пары образцов контактными датчиками (индикаторными, индуктивными, емкостными и др.) как разница показаний датчиков до и после установленного (необходимого) количества циклов нагружения. Это позволяет определить величину износа в любое время без съема образцов с устройства, что повышает точность измерений за

счет исключения погрешности установки образцов, сократить длительность измерений и время опытов.

Кроме того, было разработано устройство для исследования трения с повышенной производительностью исследований т.к. позволяет испытать одновременно две контактных пары образцов в условиях трехкомпонентного нагружения с возможностью обеспечения одинаковых условий контактной нагрузки и проскальзывания в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Устройство имеет один держатель с закрепленным образцом и два подпружиненных контробразца. Держатель имеет возможность перемещения относительно шаровой опоры в двух взаимно перпендикулярных направлениях под действием узлов задания поперечного перемещения и продольного перемещения и энергии удара. Условия переменного нагружения и параметры продольного перемещения задаются с помощью конического эксцентрика (рис. 2.10).

При этом трехкомпонентность нагружения образцов (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях) обеспечивается соответствующими узлами. Энергия (импульс) ударов, а также амплитуда и частота проскальзываний в плоскости соударения регулируется с помощью конического эксцентрика, изменением частоты вращения вала электродвигателя а также пружинами контробразцов и размерами зазоров между образцом и контробразцами.



1 – опора шаровая; 2 – контрообразец; 3 – образец; 4 – держатель;
 5 – эксцентрик конический; 6 – пружина; 7 – электродвигатель;
 8 – гибкий вал; 9 – диск с неуравновешенной массой; 10 – направляющая; 11 – каретка; 12 – электродвигатель

Рисунок 2.10 – Схема установки для исследования износа образца при сложном трехкомпонентном нагружении с двумя контактными парами

Обеспечение относительного движения образца и контробразца в двух взаимно перпендикулярных направлениях осуществляется одним держателем, что упрощает конструкцию устройства и повышает постоянство условий контактирования. Использование двух контробразцов дает возможность одновременно проводить исследование износа двух контактных пар из одного, или различных материалов. Предварительно в нейтральном положении эксцентрика его конической поверхностью выставляется и в процессе исследований износа выдерживается равный зазор между образцом и контробразцом для обеспечения одинаковых условий контактирования. Амплитуда проскальзываний в направлении, перпендикулярном плоскости соударений регулируется изменением положения неуравновешенной массы относительно оси ее вращения, частота (скорость) проскальзываний – изменением частоты вращения вала электродвигателя.

Устройство состоит из узлов крепления образцов, узла задания продольной амплитуды и энергии удара, узла задания поперечной амплитуды.

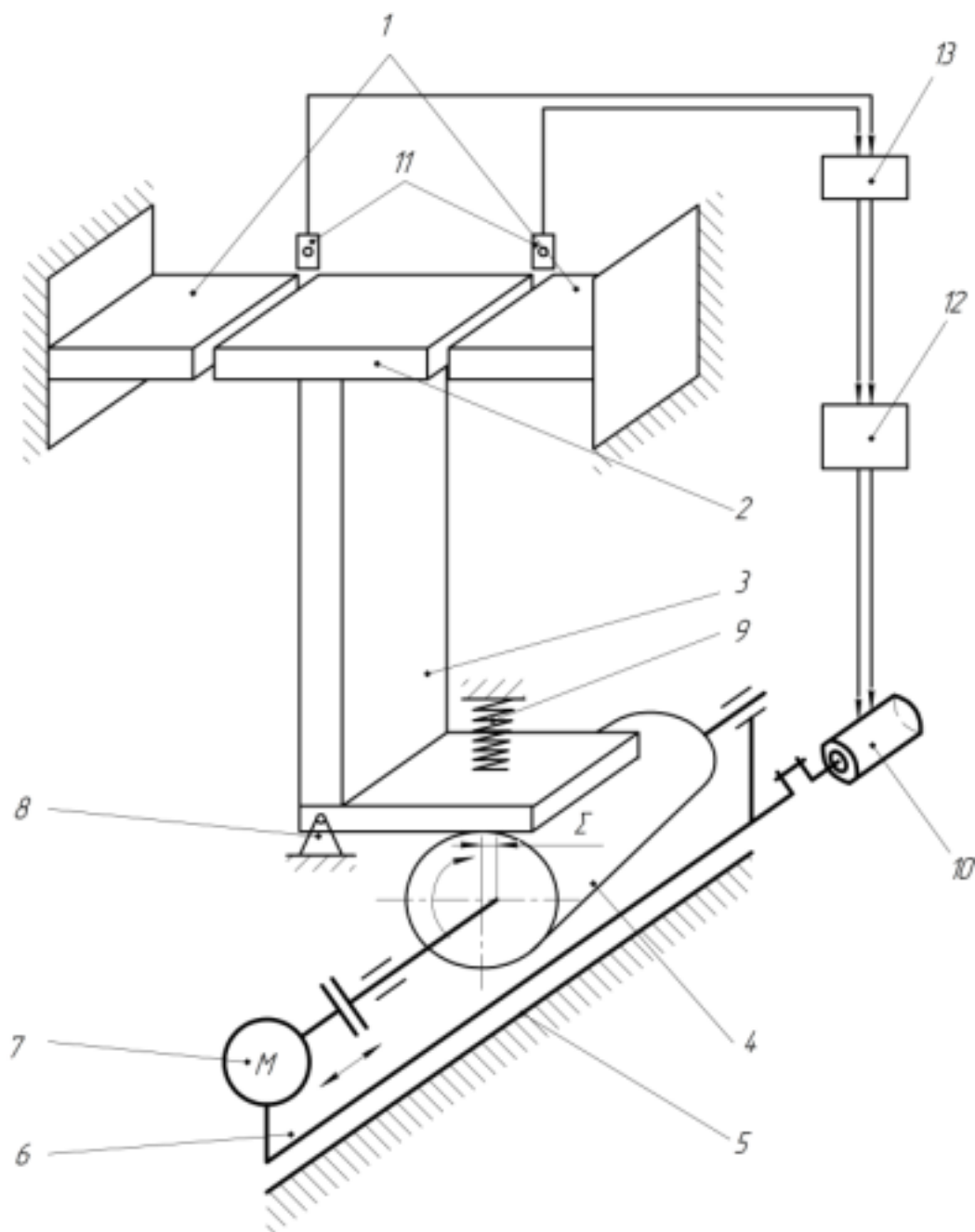
Узел крепления образцов имеет держателя 4 с образцом 3 и два подпружиненных контробразца 2. Держатель 4 базируется на шаровую опору 1 и связан с узлом задания поперечной амплитуды, который имеет диск с неуравновешенной массой 9 закрепленный на держателе и соединенный с электродвигателем 7 через гибкий вал 8. Узел задания продольной амплитуды и энергии удара имеет возможность регулирования от электродвигателя 12 и конического эксцентрика 5. Регуляция коническим эксцентриком осуществляется путем перемещения каретки 11 относительно направляющей 10.

Установка работает следующим образом. В нейтральном положении эксцентрика 5 его конической поверхностью выставляется равный зазор между образцом 3 и контробразцами 2 для обеспечения одинаковых условий контактирования. Конический эксцентрик 5 получает вращательное движение от электродвигателя 10 и осуществляет кинематическое возбуждение держателя 4 с образцом 3, что приводит к соударениям образца 3 и

контробразцов 2 и проскальзыванию их в перпендикулярном направлении к плоскости соударений вследствие сжатия пружин 6. Диск с неуравновешенной массой 9 имеет регулируемую неуравновешенную массу к оси ее вращения и получает вращательное движение от электродвигателя 7, что приводит к перемещению держателя 4 относительно шаровой опоры 1 и проскальзывание образцов в направлении противоположном плоскости соударений, а следовательно действует трехкомпонентное нагружение – соударение и проскальзывание в двух направлениях.

В случае необходимости оценки влияния на износостойкость трибосопряжений отдельно ударного нагружения была разработана специальная установка, которая позволяет испытать одновременно две контактных пары образцов в условиях ударного нагружения с обеспечением одинаковых условий контактирования. Достигается это благодаря тому, что у устройства контробразцы относительно образца устанавливаются с зазором, механизм создания нагрузки имеет конический эксцентрик, а условия переменного нагружения задаются с помощью механизма создания нагружения и системой регистрации и контроля (рис. 2.11).

Ударное нагружение обеспечивается механизмом создания нагружения в процессе качания держателя образца относительно шарнирной опоры вследствие наличия зазоров между образцом и контробразцом. Энергия (импульс) ударов, амплитуда и частота соударений регулируется с помощью конического эксцентрика и изменением частоты вращения вала электродвигателя, а также размерами зазоров между образцом и контробразцами. Предварительно в нейтральном положении эксцентрика его конической поверхностью выставляется и в процессе исследований износа выдерживается равный зазор между образцом и контробразцом для обеспечения одинаковых условий контактирования.



1 – контрообразец ; 2 – образец; 3 – держатель; 4 – эксцентрик конический; 5 – направляющая; 6 – каретка; 7 – электродвигатель; 8 – опора шарнирная; 9 – пружина; 10 – шаговый двигатель; 11 – датчик; 12 – компьютер; 13 – аналого-цифровой преобразователь.

Рисунок 2.11 – Схема установки для исследования износа образца при ударном нагружении с двумя контактными парами

Использование двух контробразцов дает возможность одновременно проводить исследование износа двух контактных пар из одного или различных материалов. При этом для обеспечения одинаковых условий контактирования в процессе исследований проводится компенсация возможного неравномерного износа контактных пар поддержанием одинакового зазора в контактных парах. Одинаковый зазор в контактных парах выдерживается системой регистрации и контроля, которая включает два датчика для измерения зазоров. Сигнал от датчиков с помощью аналого-цифрового преобразователя регистрируется компьютером. В случае получения данных по отличию величины зазоров они корректируются шаговым двигателем конического эксцентрика по программе от компьютера автоматически. Одновременно по величине зазоров в процессе исследования определяется величина суммарного износа образца и контробразца каждой контактной пары.

Устройство состоит из узла крепления образцов, узла создания нагружения, узла регистрации и контроля.

Узел крепления образцов имеет держатель 3 с образцом 2 и два контробразца 1. Держатель 3 базируется на шарнирную опору 8 и связан с узлом создания нагружения, который имеет возможность регулирования от электродвигателя 7 и конического эксцентрика 4. Регулирование коническим эксцентриком осуществляется путем перемещения каретки 6 относительно направляющей 5.

Установка работает следующим образом. В нейтральном положении эксцентрика 4 его конической поверхностью выставляется равный зазор между образцом 2 и контробразцами 1 для обеспечения одинаковых условий ударного контактирования. Конический эксцентрик 4 получает вращательное движение от электродвигателя 7 и осуществляет кинематическое возбуждение держателя 3 с образцом 2, что приводит к соударению образца 2 и контробразцов 1. В процессе исследований два датчика 11 осуществляют

измерение зазоров. Сигнал от датчиков с помощью аналого-цифрового преобразователя 13 регистрируется компьютером 12. В случае определения отличий величины зазоров они корректируются шаговым двигателем 10 конического эксцентрика.

Предложенные стенды могут быть использованы для оценки работоспособности фрикционных материалов в узлах реальных конструкций. При испытании узлов трения на стендах в широком диапазоне реализуются основные режимные параметры, обеспечивающие проведение испытаний по методу натурного моделирования и методу ускоренных испытаний на износостойкость большого числа реальных трибосопряжений. Появляется возможность обеспечить необходимый комплекс факторов механического нагружения - трехмерная динамическая нагрузка, разделять факторы нагрузки, а также объединять в разных комбинациях, регулировать и контролировать параметры нагружения, в том числе в ходе цикла испытаний (в натуральных условиях это невозможно).

Стенды могут быть рекомендованы для получения и изучения функциональных зависимостей фрикционно-износных характеристик материалов пары, сравнительной оценки фрикционных пар, физического моделирования реальных трибосопряжений. При этом реализуется подход к определению основных принципов моделирования эквивалентных состояний трибологических пар, которые эксплуатируются в сложных условиях нагружения. Проведение испытаний на предложенных установках дает возможность проследить кинетику процесса изнашивания, изменение фрикционных свойств материала, выяснить механизм повреждаемости этих материалов, определить факторы, влияющие на трибологические характеристики. Однако полученные характеристики могут рассматриваться лишь как качественные, требующие уточнения. Предложенные методы ускоренных испытаний износостойкости трибосопряжений позволят существенно снизить затраты на разработку перспективных антифрикционных материалов и конструкций новых фрикционных устройств,

значительно сократить сроки их внедрения в производство. Результаты испытаний создадут предпосылки для обоснованного выбора материалов пар трения для заданных условий эксплуатации и могут быть использованы при разработке новых износостойких материалов и покрытий.

2.3 Методика проведения исследований износостойкости трибосопряжений при сложном термоконтактном воздействии.

2.3.1 Условия проведения исследований

Исследования износостойкости турбинных лопаток [4, 5, 6], которые работают в условиях совместного действия механической нагрузки и относительных перемещений контактирующих поверхностей показывают, что при работе двигателя наблюдается существенное рассеивание по кругу ротора условий нагружения каждой из пар полок по давлению в зоне контакта, амплитуде проскальзывания, частоте колебаний. Из результатов расчета амплитуды колебаний бандажных полок рабочих лопаток турбины проведенных Л.И. Ивченко [4] видна тенденция резкого возрастания амплитуды с увеличением вибрационных напряжений и уменьшением частоты. Учитывая такой характер зависимости, испытания проводились на частотах до 200Гц, в диапазоне удельных нагрузок 0 – 100 МПа. В этом случае наиболее приемлемым может оказаться метод испытаний, основанный на моделировании натуральных условий на предложенных динамических стендах с указанными режимами нагружения.

Образцы представляли собой пластины с базовыми поверхностями отверстий для крепления на установке (рис.2.12 и 2.13). На своих поверхностях имеют вырезы, назначение которых - оставить на поверхности контрообразцов участки поверхностей, которые не находились в контакте.

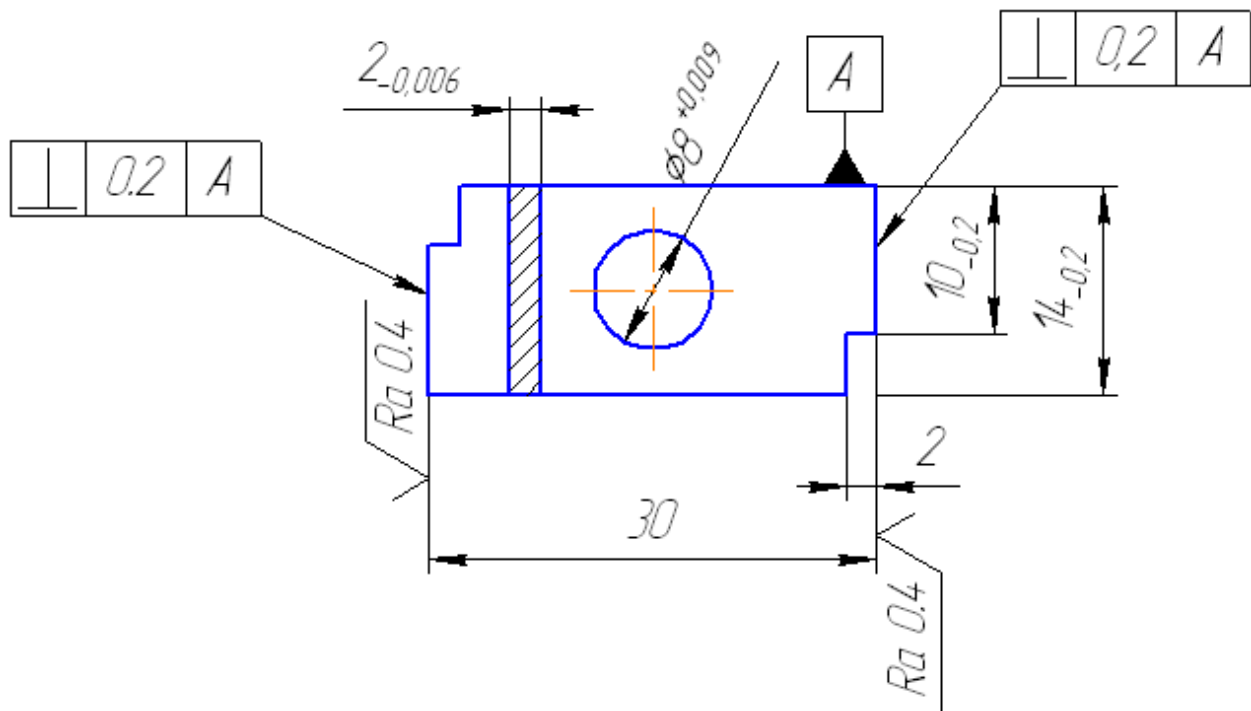


Рисунок 2.12 – Геометрические параметры образцов для испытаний на установках

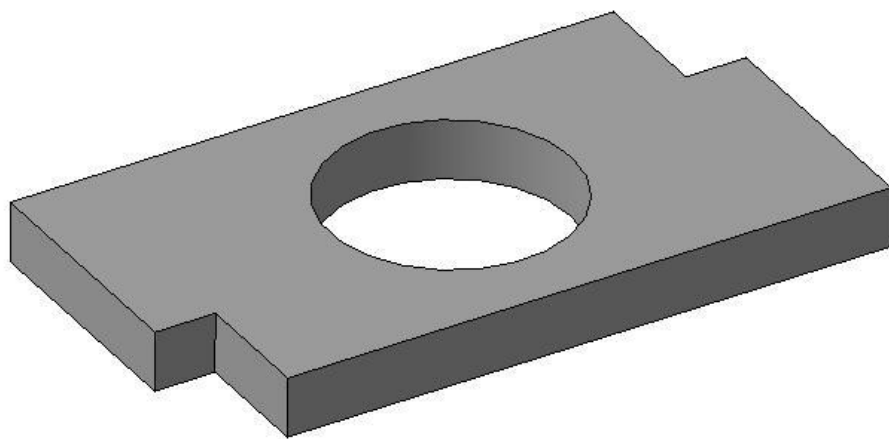


Рисунок 2.13 – Трехмерная модель образца

Схема контакта образцов представлена на рисунке 2.14

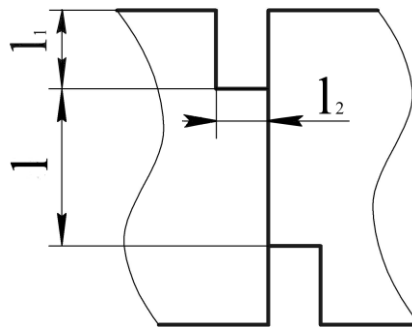


Рисунок 2.14 – Схема контакта образцов

Выборки размерами $l_1 \times l_2$ на торцевых контактирующих поверхностях образца и контробразца позволяют осуществить контактирование по всей толщине образцов на длине l . Плоскость образца с длиной l_1 , незадействованная в процессе испытаний, позволяет сохранить исходную поверхность и сравнить ее с полученной поверхностью, что дает возможность определить изменения линейных размеров, свойств поверхностных слоев и обеспечивает оценку износостойкости методами профилографирования, сканирования и другими.

Плоская форма образца и контробразца позволяет выдержать постоянные условия контактирования в процессе испытаний с различными схемами динамического нагружения, точно определить объем изношенного материала и рассчитать путь трения с минимальной трудоемкостью. При этом есть возможность проводить испытание с предоставлением образцам перемещения разного характера друг относительно друга, учитывать действие вибраций в разных направлениях (возвратно поступательное проскальзывание, возвратно поступательное проскальзывание с добавлением ударной нагрузки, возвратно поступательное проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях с добавлением ударной нагрузки).

Из анализа материалов, которые применяются для изготовления контактных пар, подверженных изнашиванию в экстремальных условиях, следует, что подбор материалов осуществляется (за редким исключением) прежде всего с целью обеспечения прочности конструкции. Применение же

покрытий производится с точки зрения повышения износостойкости при трении скольжения, что не удовлетворяет требованиям обеспечения необходимых характеристик работоспособности при динамических контактных нагрузках в условиях термоциклирования и не приводит к увеличению износостойкости в экстремальных условиях и как следствие, надежности двигателя.

Материалы образцов исследованные в данной работе те же, что и материалы натуральных деталей, с той же термообработкой и значениями твердости контактных поверхностей. Из анализа типовых соединений следует, что с позиций безотказной работы рассмотренных трибосопряжений наибольший интерес представляют детали изготовленные из сплавов типа ХТН-61, ХН77ТЮР (ЭИ437Б), 60С2А, ВТ20, ВТ 3-1, 40Х.

Справочные данные о материалах образцов приведены ниже в таблицах 2.1 - 2.7.

Таблица 2.1 – Химический состав стали 60С2А

Содержание элементов, %							
	Si	Mn	Fe	Ni	Mo	V	W
0,58	0,192-0,209	1,072-1.134	98,674-98,727	-	-	-	-

Таблица 2.2 – Механические свойства стали 60С2А

t° отпуска	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\text{пц}}$	δ	ψ	a _H	Твердость HRC
°C	Па			%			
400-420	1,85·10 ⁹	1,65·10 ⁹	160·10 ⁹	4,8 – 5	38	2,5	54-58

Таблица 2.3 – Химический состав сплава ВТ20

Содержание элемента, %									
Ti	Al	V	Mo	Fe	Zr	C	H	N	Sn
89,633	6,211	1,478	0,893	0,295	1,491	-	-	-	-

Таблица 2.4 – Химический состав сплава ВТЗ-1

Содержание элемента, %									
Ti	Al	Cr	Mo	Fe	Si	C	H	N	Sn
Основа	5,5	1,72	1,97	0,19	0,24	0,05	0,01	0,02	-

Таблица 2.5 – Химический состав в % материала 40Х

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,36-0,44	0,17-0,37	0,5-0,8	До 0,3	до 0,035	до 0,035	0,8-1,1	до 0,3

Таблица 2.6 – Химический состав в % материала на никелевой основе ХН77ТЮР

C	Si	Mn	Ti	Al	B	Cr	Fe	Cu
<0,07	<0,6	<0,4	2,4-2,8	0,6-1,0	<0,01	19-22	<1,0	<0,07

Таблица 2.7 – Химический состав в % материала на кобальтовой основе ХТН-61

Nb	Mo	W	Cr
10,0-15,0	2,0-4,0	2,0-4,0	18,0-22,0

Большую часть исследований на износостойкость проводили на установке рис.2.9. В случае необходимости обеспечения низкой климатической температуры контактирования образцов, испытания на износ производили в теплоизолированной камере, куда нагнетали пары жидкого азота.

Топографию поверхности изучали двумя методами: профилографированием и сканированием.

Профилографирование поверхностей образцов проводили на профилографе-профилемере модели 201 и мод. 170311. За базовую длину была принята ширина образца.

Сканирование изношенных поверхностей образцов проводили на приборе MDX 20.

Это настольный станок, управляемый компьютером с помощью программного обеспечения английской фирмы Delcam Plc. Рабочий орган, который имеет возможность перемещаться по командам управляющей программы в трех измерениях, имеет насадку измерительную, позволяющую сканировать поверхность по заданной программе и фрезерную – позволяет работать в режиме вертикально фрезерного станка. Режимы сканирования приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Режимы сканирования.

Сенсор	Активный пьезосенсор Roland (R.A.P.S.) Длина 60 мм, диаметр наконечника 0,08 мм.
Метод сканирования	Контактный
Разрешение сканирования	Оси X и Y – от 0,05 до 5 мм (с дискретностью по 0,05 мм) Ось Z – 0,025 мм.)
Скорость сканирования	4-15 мм/с.
Форматы файлов, которые экспортируются	DXF, VRML, STL, 3DMF, IGES, Grayscale, облако точек и BMP

Результаты сканирования передавались в виде трехмерной модели поверхности через интерфейс IGES v2.1 (точность передачи 1 мкм) в систему POWERSHAPE (г. Бирмингем, Великобритания). Полученную модель конвертировали в поверхность POWERSHAPE для конечной обработки. С помощью системы выполняли построение двух тел: первое - изношенный образец, второе - исходный образец (без износа). Для получения величины

объема использовали стандартную функцию расчета объема тела. Разница объемов давала величину объемного износа.

2.3.2 Определение величины интенсивности изнашивания

Обработка результатов экспериментов проводилась по следующей методике.

Интенсивность изнашивания находится из зависимости [6]:

$$J_v = \frac{V}{N} \quad (2.3)$$

где V - объем изношенного материала, мм^3 ;

N - количество циклов взаимного перемещения образцов, цикл.

Коэффициент интенсивности изнашивания определяется по формуле:

$$K_{J_v} = \frac{J_v}{P_{уд} \cdot A_n} \quad (2.4)$$

где J_v - интенсивность изнашивания, $\text{мм}/\text{цикл}$;

$P_{уд}$ - удельное давление в зоне контакта образцов, МПа ;

A_n - амплитуда взаимного перемещения образцов, мм

Обработка результатов экспериментов заключалась в нахождении средних данных определенных характеристик изнашивания.

В ходе статистической обработки результатов эксперимента проводилась также проверка полученных значений на достоверность (чтобы исключить ошибочно полученные значения). При этом для значений, которые наиболее отличаются от среднего значения, проводился соответствующий расчет.

Методика определения случайных и закономерных значений основывается на известных статистических закономерностях [69, 70]. Она складывается в определении статистики Стьюдента $t_{Ст\ расч}$ для данного значения и сравнении ее с табличным значением коэффициента Стьюдента ($t_{Ст\ табл}$). Если расчетное значение оказывается больше табличного, то при получении данного значения имела место погрешность и его нельзя считать достоверным.

Расчетная статистика Стьюдента для i -го значения:

$$t_{i\ расч} = \frac{|J_{vk} - \bar{J}_{vi}|}{S_i} \quad (2.5)$$

где J_{vk} - i -ое значение, для которого проводится проверка

\bar{J}_{vi} - среднее значение для i -го значения, которое проверяется:

$$\bar{J}_{vi} = \frac{\sum_{k=1}^{i-1} J_{vk} + \sum_{k=i+1}^n J_{vk}}{n-1} \quad (2.6)$$

где n -число полученных значений;

S_i - дисперсия для i -го значения:

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{i-1} (J_{vk} - \bar{J}_{vi})^2 + \sum_{k=i+1}^n (J_{vk} - \bar{J}_{vi})^2}{n-1}} \quad (2.7)$$

При этом должно выполняться условие

$$t_{Ст\ расч} < t_{Ст\ табл} \quad (2.8)$$

Объемные износ и интенсивность изнашивания определяли профилографированием (профилограф модели 201 и модели 170311) с

записью профилеграмм на персональном компьютере через аналогово-цифровой преобразователь Е14-140, суммарную площадь изношенных участков поверхности – на инструментальном микроскопе. По профилеграммам определяли среднюю (а также максимальную) глубину повреждения поверхности. При этом с исследуемой поверхности снимаются профилеграммы содержащие участки изношенной и исходной поверхностей. Определяя общее расстояние между изношенной и исходной поверхностями, получаем величину износа (рис. 2.15 и 2.16).

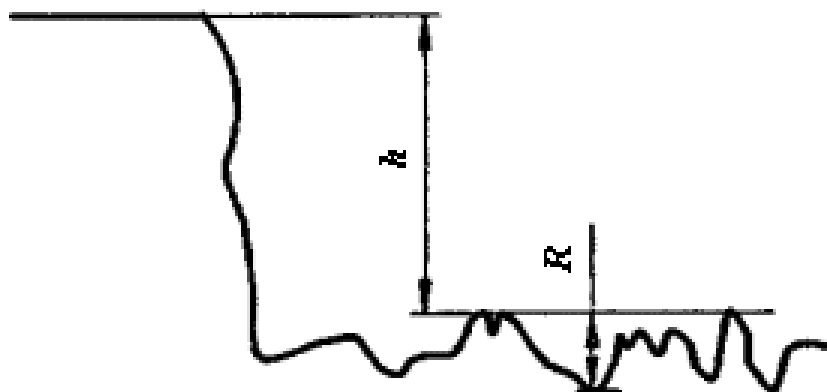


Рисунок 2.15 - Схема определения объема изношенного материала

Площадь изношенной поверхности определяется согласно рисунку 2.17 по формуле:

$$F_u = \int_0^l y(x) dx \quad (2.9)$$

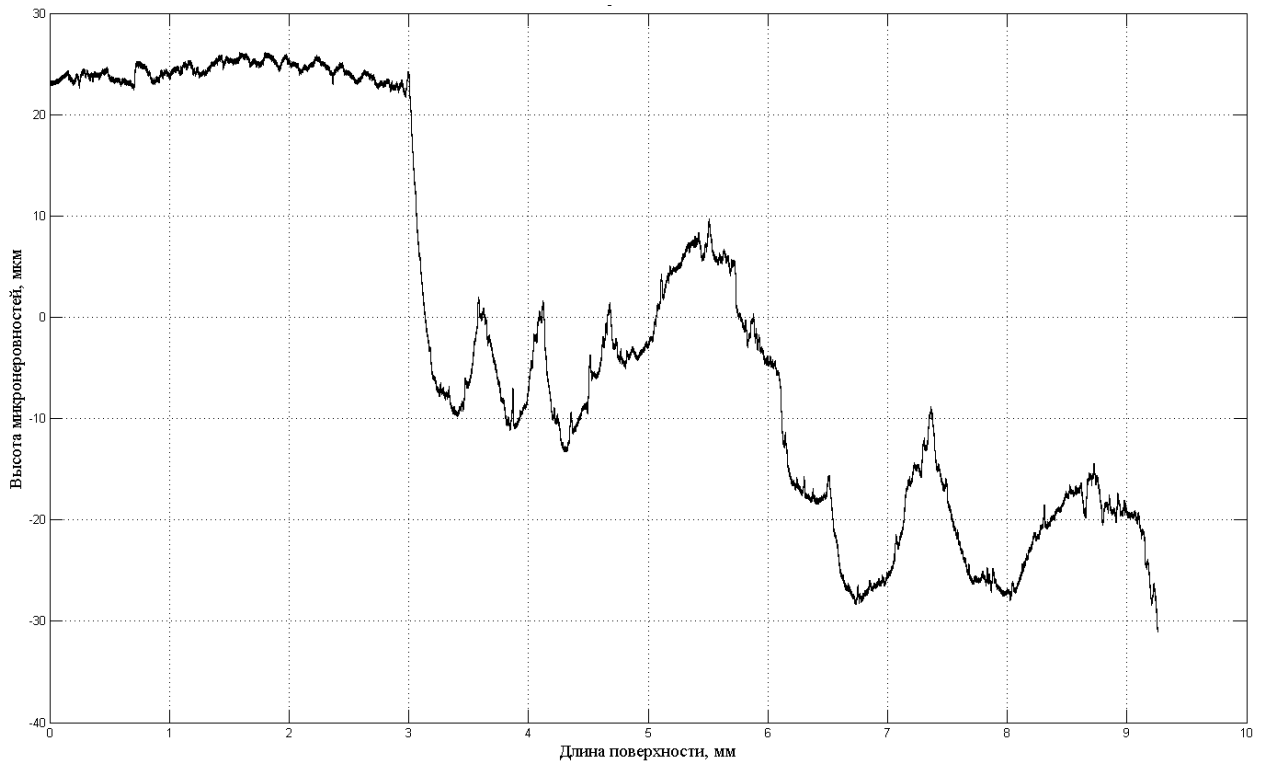


Рисунок 2.16 – Прифилограмма износа образца.

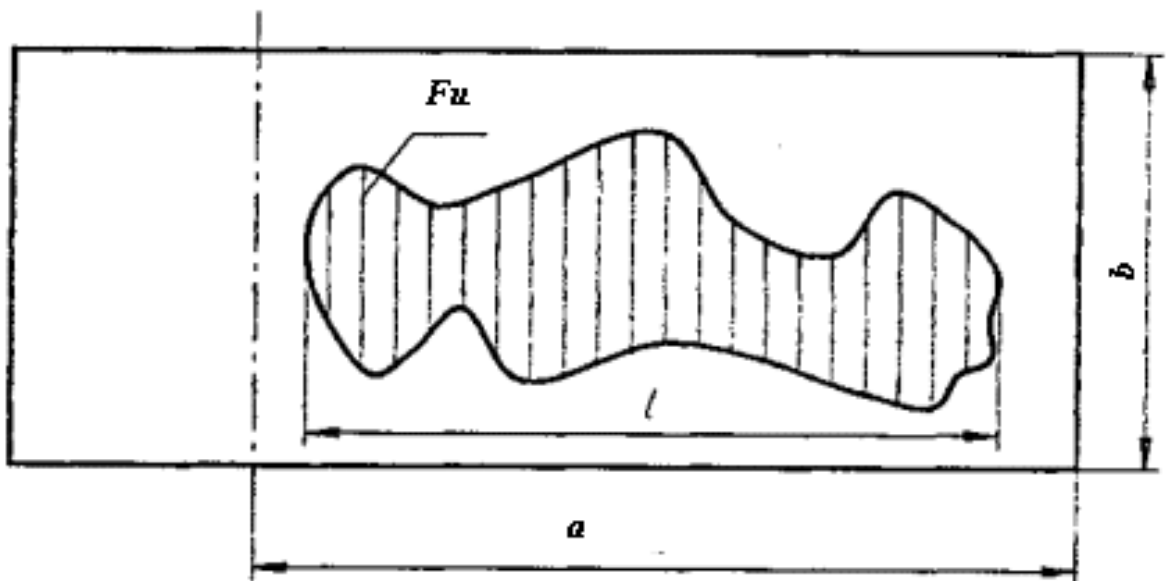


Рисунок 2.17 - Схема определения площади участков поврежденной поверхности

Номинальная площадь определяется:

$$F_u = a \cdot b \quad (2.10)$$

где a и b - длина и ширина рабочей части образца. Величина адгезионной составляющей объема изношенного материала находится из выражения:

$$V_{адз} = R \cdot F_u \cdot K, \quad (2.11)$$

где R - средняя глубина повреждений изношенной поверхности, мм (рис. 2.15)

$$R = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n R_i / M_{BY} \quad (2.12)$$

$K = (0,25-0,50)$ - коэффициент, который учитывает неравномерность повреждений по площади контакта.

Объемная интенсивность изнашивания находится из зависимости:

$$I_v = \frac{V}{L}, \quad (2.13)$$

где L - путь трения, м., Равняется амплитуде, умноженной на частоту и длительность цикла при проскальзывании в одном направлении.

При проскальзывании в двух взаимно перпендикулярных направлениях путь трения определяется по следующей методике.

Схема относительного перемещения образцов приведена на рисунке 2.18.

Из традиционной механики длина траектории движения определяется:

$$L = \int_0^l v(t) dt \quad (2.14)$$

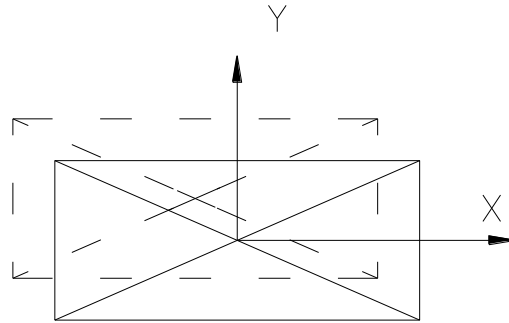


Рисунок 2.18 – Схема относительного перемещения образцов

Скорость в нашем случае имеет две составляющие:

$$\vec{v}(t) = \vec{\dot{x}}(t) + \vec{\dot{y}}(t) \quad (2.15)$$

Переходя от векторного равенства к скалярному, получаем:

$$v(t) = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (2.16)$$

Окончательно

$$L = \int_0^l \sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2} dt \quad (2.17)$$

Кроме того, предусмотрен способ непрерывного измерения суммарного износа на машине трения при перемещении обоих образцов, что позволяет повысить точность измерений и одновременно получать трехмерное (объемное) изображение образцов в реальном времени, а также данные о механике разрушения поверхностных слоев образцов с автоматическим анализом полученных результатов. При этом пару образцов нагружают, задают относительное перемещение и непрерывно фиксируют перемещение и деформацию образцов с помощью устройства с оптическим

принципом действия и обрабатывают их значение системой трехмерной цифровой корреляции, которая определяет суммарный износ и формирует трехмерное изображение образцов в реальном времени.

Использование системы трехмерной цифровой корреляции позволяет собирать полученные от устройства с оптическим принципом действия пятнистые изображения (спекл-структуры), возникающей при когерентном освещении случайно неоднородных объектов и сред. С помощью свободного программного обеспечения проводится их автоматический анализ и визуализация данных, что увеличивает производительность обработки полученной информации.

Система трехизмеримой цифровой корреляции состоит из электронной вычислительной машины и свободного программного обеспечения. Повышение точности измерения обеспечивается использованием современных устройств с оптическим принципом действия, которые воспроизводят изображения перемещений и деформации материала образцов и посылают их для обработки системой. При этом точность измерения регулируется шагом снимков и количеством расположенных устройств с оптическим принципом действия, которые работают не комбинировано, то есть каждый прибор делает отдельные снимки. Чем больше снимков тем выше полученная точность после обработки системой. Кроме этого, использование в качестве датчика износа устройства с оптическим принципом действия, позволяет определять величину износа при испытании образцов в условиях сложных нагрузок с наличием поперечного движения и при испытании тонких образцов, поскольку воспроизводится изображение сразу в трех плоскостях.

Нахождение суммарного износа системой, при взаимодействии с известными способами нахождения суммарного износа образцов на машинах трения, при которых пару нагружают и задают относительное перемещение, заключается в расчете площади образцов, определении их объемов, которые изменяются в процессе изнашивания. На протяжении испытания система

отслеживает изменение текущего объема образца и сравнивает его с первичным, что позволяет определить суммарную величину износа. Выполняется обработка данных и визуализация результатов измерений - создается САD модель, двух или трехмерный контур поверхности, на котором отображаются изменения геометрических параметров образцов.

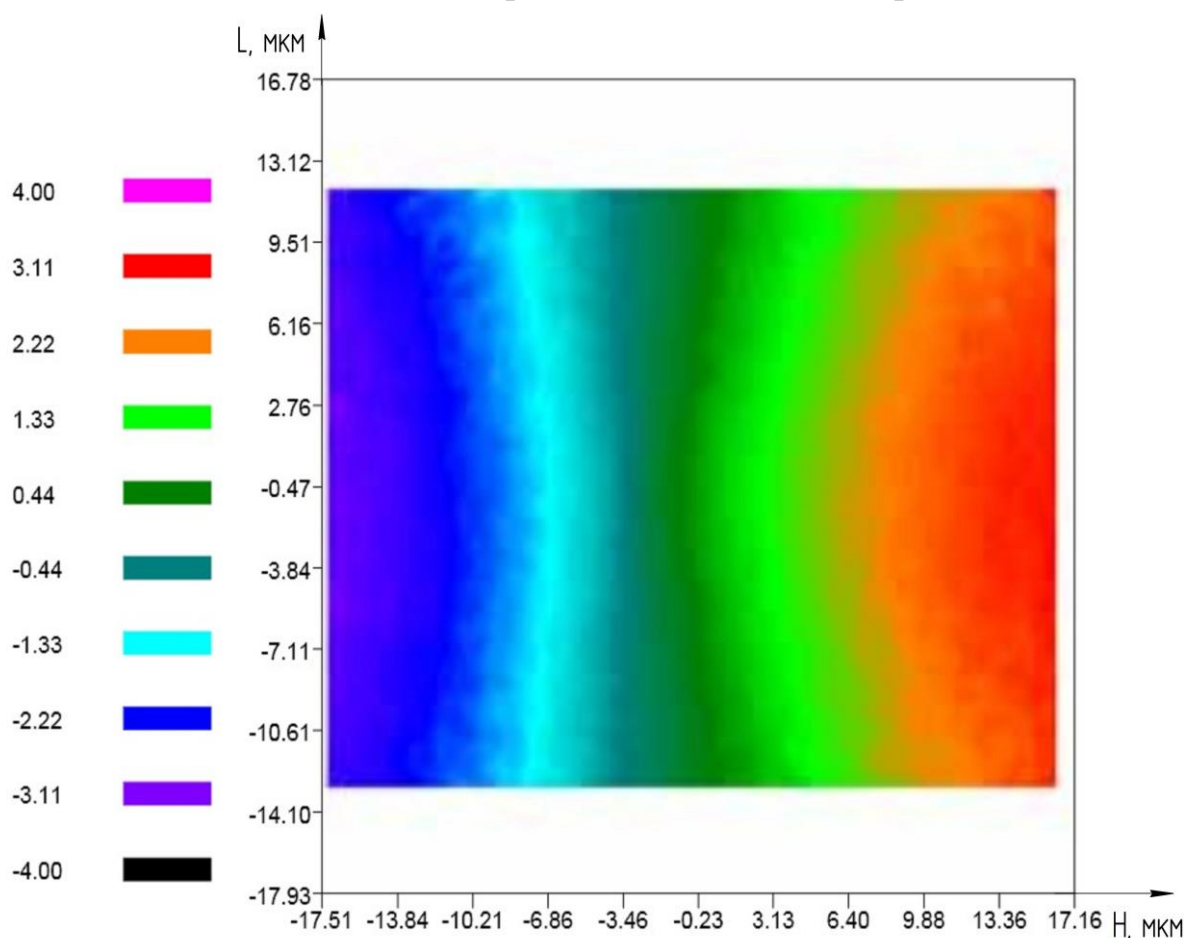
Способ непрерывного измерения износа образцов на машине трения осуществляется следующим образом.

Образец и контрообразец изготавливают из материалов эксплуатационной пары трения, закрепляют на машине трения. С помощью оптического прибора, который размещают около зоны контакта образцов, измеряют его контур. Устройство с оптическим принципом действия обеспечивает измерение разных физических характеристик методом сочетания границ контролируемого геометрического параметра и состоит из цифровых камер и подсветки. В устройстве с оптическим принципом действия используют цифровые камеры разных типов (до 16 мегапикселей с частотой кадров до 30 Гц) в зависимости от нужной точности. Каждую соответствующую точку изображения стохастической структуры идентифицируют на электронной вычислительной машине, с помощью свободного программного обеспечения "ISTRA", которая входит в состав системы. Применение подсветки позволяет осуществлять равномерное освещение образцов, что способствует повышению точности измерений.

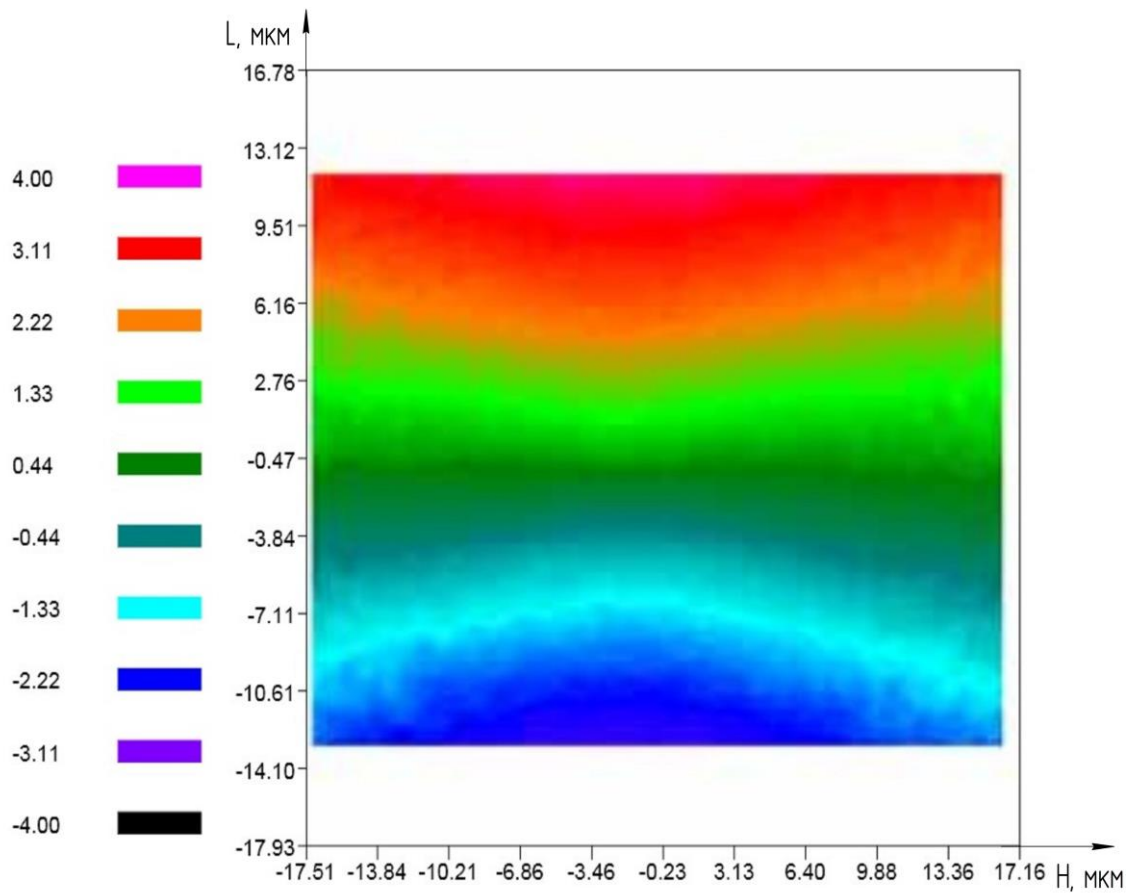
Образцы прижимают с постоянной силой и предоставляют им движение согласно условиям нагрузки исследуемого узла. В процессе испытания программное обеспечение непрерывно выполняет анализ полученных электронной вычислительной машиной изображений - корреляцию цифрового изображения и работу алгоритма электронной спекл-интерферометрии с анализом зернистой структуры изображения объекта.

В качестве примера конкретной реализации предложенного способа представлены результаты исследований при испытании образцов из стали 30 на износостойкость при постоянной нагрузке по трем плоскостям, с помощью

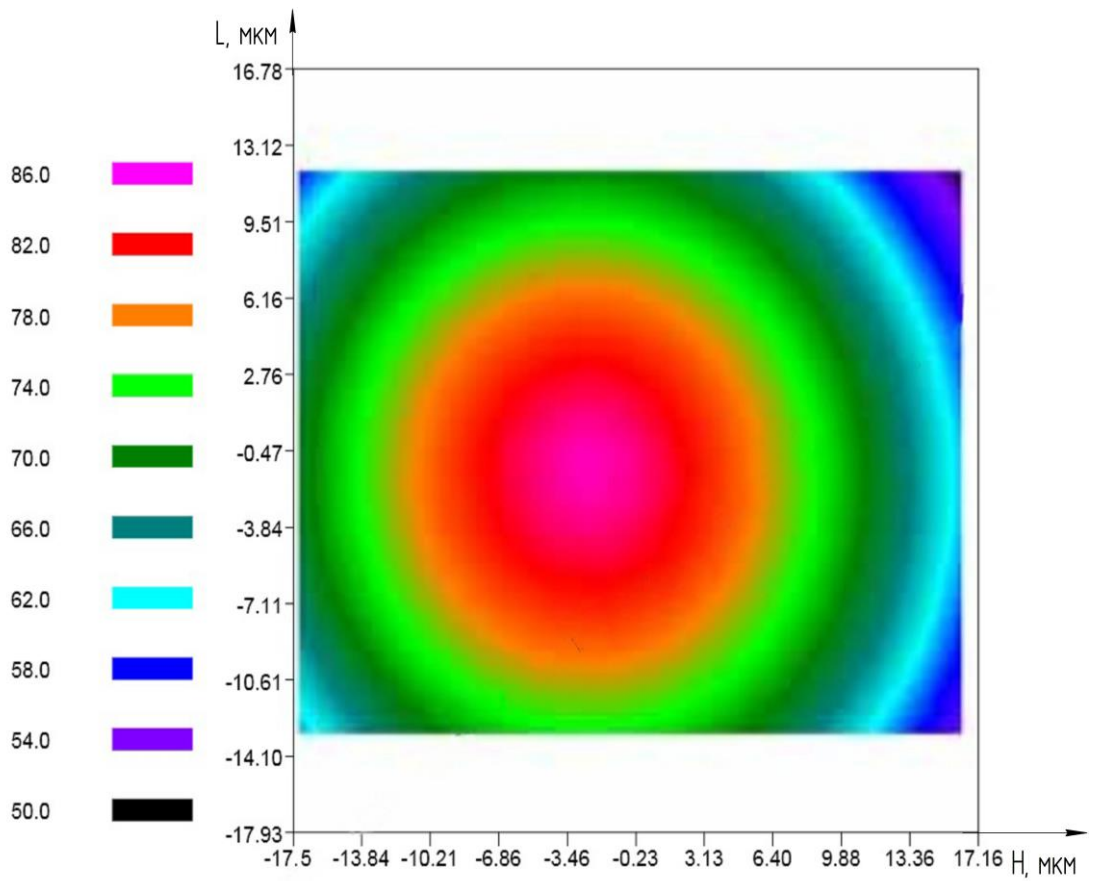
устройства с оптическим принципом действия. Непрерывно получаемое изображение величины линейного износа образца по трем осям координат – x , y и z передаются для обработки системе трехмерной цифровой корреляции. На выходе получаем цветную графику, которая представляет изменение линейного размера соответствующих плоскостей (рис. 2.19). При этом величину суммарного износа и деформации система высчитывает автоматически с разбивкой измерений на 10 отдельных шагов. Для каждого шага устройство с оптическим принципом действия делает 4 снимка с разной чувствительностью. Этот процесс происходит непрерывно в процессе испытания. При оценке системой величины изменения линейных размеров, кадры разной чувствительности складываются, учитываются геометрические изменения поверхности образцов и системой трехмерной цифровой корреляции обрабатываются с помощью свободного программного обеспечения "ISTRA" и выводятся в качестве изображений. Чувствительность измерений с использованием одного устройства с оптическим принципом действия составляет 1 мкм при величине поля зрения в 100 м



a)



б)



в)

цветные полосы слева - отклонение линейного размера, мкм

Рисунок 2.19 – Отклонения линейного размера по оси x – а);

у – б); z – в).

В рассматриваемом случае, как следует из изображений по оси x, проходящем вдоль образца (рис. 2.19 а), и поперек образца – ось у (рис. 2.19 б), отклонения линейного размера составляют: максимальное 8 мкм, минимальное 0,89 мкм при номинальном значении отклонения в 4 мкм. Отклонение линейного размера по оси z от начального имеет наибольшие показатели, максимальное значение составляет 86 мкм, минимальное 50 мкм (рис. 2.19 в). Суммарный износ образцов составил 10,99432 мм³.

2.4 Методы исследований качественных изменений поверхностного слоя в зоне контакта

Управление работоспособностью трибосопряжений невозможно без применения комплекса современных методов оценки микрогеометрии поверхности и состояния поверхностного слоя образцов после испытаний на указанной установке. Для оценки изменения состояния поверхностного слоя в работе использовался трибоспектральный метод и метод анализа электронного строения поверхностного слоя металлов на основе изменения работы выхода свободных электронов. Они позволяют оценить изменение формирования в поверхностном слое кристаллитов с различными прочностными и деформационными свойствами, структурное и энергетическое состояние поверхности, степень пластической деформации. Появляется возможность рассмотреть, как деформирование металлов при трении с различными схемами нагружения приводит к структурным преобразованиям на поверхности и соответствующему изменению энергетического рельефа поверхности, что позволит сформировать

триботехнический принцип минимизации износа и установления износостойкой способности материалов.

2.4.1 Оценка состояния поверхностного слоя трибоспектральным методом

Определение закономерностей поверхностного разрушения анализируемых материалов при трении в условиях трехмерного нагружения потребовало исследований физико-механических свойств поверхностного слоя и топографии поверхности изношенных образцов. Оценка поверхностного слоя образцов трибоспектральным методом (методом идентификации структурного состояния поверхностного слоя статистическими характеристиками при сканировании алмазным индентором) проводили на установке НАУ [164, 165]. Методология трибоспектрального метода основана на решении обратной задачи трибометрии, когда поверхностный слой представляется в виде поля со случайно изменяющимися механическими свойствами и производят определение статистических связей между сопротивлением локальных микрообъемов материала контактному деформированию [166]. При этом появляется возможность анализировать очень мелкофрагментные структуры, например так называемые вторичные [170, 171]. Динамика, модели и особенности контактного деформирования приведены в работах [71, 166, 167, 168, 169, 172].

Изменение физико-механических свойств поверхностных слоев образцов определяли в процессе непрерывного вдавливания и сканирования индентором на приборе “Микрон-гамма” (рис.2.20). Метод непрерывного вдавливания индентора, реализуемый на приборе “Микрон-гамма”, основан на автоматической регистрации глубины внедрения в зависимости от приложенной нагрузки на индентор. Метод сканирования базируется на непрерывной регистрации сопротивления движению индентора по поверхности в зависимости от приложенной нагрузки [156, 164, 165, 169, 170,

71, 72]. Определение статистических связей между сопротивлениями локальных микрообъемов материала контактному деформированию позволяет произвести комплексную оценку состояния поверхностного слоя на трассе сканирования и, в частности, позволяет оценивать относительную среднюю прочность на трассе сканирования, оценивать разброс и неоднородность прочностных свойств, моделировать элементарные акты процессов трения и износа.

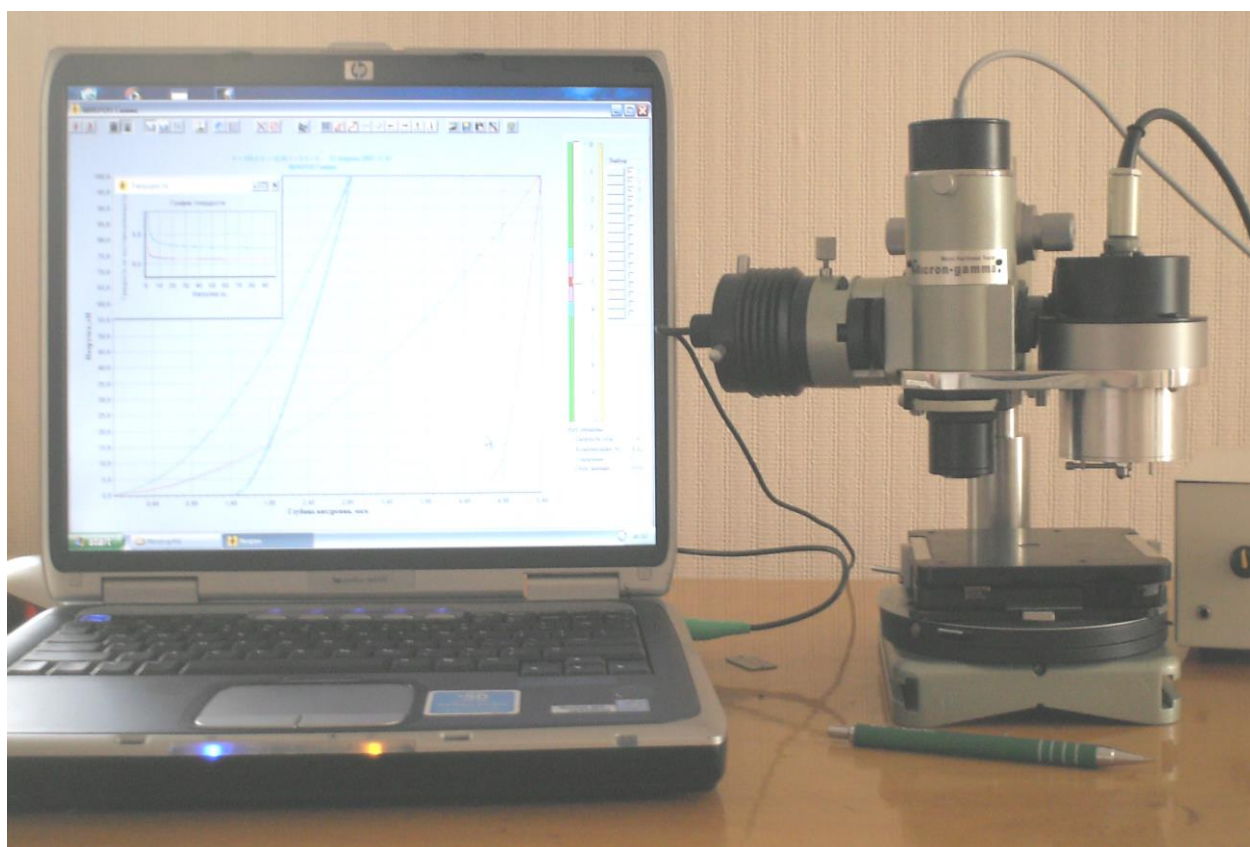


Рисунок 2.20 – Внешний вид прибора «Микрон-гамма»

Оценка состояния поверхностного слоя образцов на приборе "Микрон-гамма" осуществлялась в работе с использованием программы для управления, сбора и обработки информации методом сканирования по методике, представленной в работе [72]. Анализ значений сопротивления локальных микрообъемов при сканировании проводилось на основе расчетов по программе статистической обработки STATISTICA 10.

Для оценки состояния поверхностного слоя применяли линейный участок в пределах статистически различимой базовой длины [162].

2.4.2 Оценка состояния поверхностного слоя по изменению работы выхода электрона с поверхности образцов

Согласно исследованиям [70], процессы трения и изнашивания зависят в значительной степени от электронного строения металлов. Условием интенсивного схватывания, а, следовательно, и интенсивного изнашивания в процессе трения есть обмен электронами атомов металлов пары трения с образованием стабильных в энергетическом отношении электронных конфигураций. Интенсивность износа минимальна, если атомы металлов пары трения характеризуются большой долей нелокализованных (свободных) электронов. В этом случае прочность образованных во время трения связей небольшая, они легко разрушаются при взаимном перемещении поверхностей. Таким образом, нелокализованные электроны, которые находятся в свободном состоянии, образуют своеобразную электронную смазку и наблюдается корреляция между антифрикционными характеристиками и особенностями электронного строения металлов. Более того, величина линейного износа определяется интенсивностью электронного обмена и прочностью фрикционных связей, обусловленных энергетической стабильностью образованных в результате этого обмена электронных конфигураций.

Состояние реальной поверхности металлов связано с формированием на поверхности электрических дипольных моментов и локальных электрических зарядов, которые определяют величину электростатического барьера в работе выхода электронов. Вследствие неоднородного состояния металлической поверхности возникает соответствующий рельеф электростатического барьера, обусловленный расхождением работы выхода электрона для разных участков поверхности. Таким образом, для данной

поверхности металла характерен энергетический рельеф, обусловленный распределением работы выхода электрона по поверхности. Сравнивая исходный энергетический рельеф (до испытаний на износостойкость) с рельефом после испытаний можно определить участки поверхности, которые претерпели разную степень пластической деформации.

Одним из наиболее информативных методов определения изменения энергетического состояния поверхностного слоя материалов, которые взаимодействуют в процессе трения, является анализ распределения величины работы выхода электронов (РВЭ) по поверхности. Этот параметр необходим при расчетах поверхностной энергии твердых тел. На изменении РВЭ основано одно из направлений изучения сложных по своей природе физико-химических процессов, которые протекают в зоне контакта пар трения [74].

Величина РВЭ - одна из фундаментальных характеристик вещества в конденсируемом металлическом состоянии, физико-химических и механических свойств металлов. Эту характеристику используют при изучении явлений деформации и разрушения металлических тел, а также явлений адсорбции и десорбции. Наличие относительно простых методов и средств, которые позволяют проводить ее определение бесконтактно и без любых дополнительных действий на измеряемую поверхность, делает ее достаточно привлекательной в плане исследования поверхностей металлов и сплавов деформированных, в том числе и трением [75].

Формула, которая связывает величину работы выхода электронов с поверхностной энергией металла, имеет вид [76]:

$$\sigma \cong 1,15 \cdot 10^3 \left(z \frac{D}{A} \right)^{5/6} \Phi \quad (2.18)$$

где σ - поверхностная энергия; z - количество валентных электронов на атом; D - плотность; A - атомный вес; Φ - работа выхода.

Следовательно, измеряя величину РВЭ по поверхности металла и с помощью формулы (2.18) можно количественно оценить изменение его поверхностной энергии.

Работа выхода электрона определяется как минимальная работа, которую необходимо выполнить, чтобы удалить электрон из металла, через поверхность рассматриваемого металла в точку, которая размещена достаточно далеко от этой поверхности (больше толщины двойного электрического слоя), но достаточно близко по сравнению с размерами граней кристалла. При этом поля вне кристалла осуществляют над электроном работу, которой можно пренебречь [77]. При столкновении металлов, которые имеют разные работы выхода электронов (Φ_1 и Φ_2) между пределами их столкновения с вакуумом возникает разница потенциалов, которая равняется разнице работ выхода электронов двух металлов и называется контактной разницей потенциалов (КРП):

$$U_{\text{КРП}} = \Phi_2 - \Phi_1 \quad (2.19)$$

Из определения КРП следует, что, зная работу выхода электронов для одного из металлов, можно высчитать РВЭ второго металла. Так как явление КРП определяется перераспределением электронов между образцом и эталоном, (электроны не покидают образец через свободную поверхность) то, работа выхода электронов, которая определяется методом контактной разницей потенциалов, представляет собой характеристику данной поверхности металла, которая является средней по площади электрода сравнения (эталоны).

В качестве метода измерения работы выхода электрона в работе использовался метод динамического конденсатора Кельвина [77], в котором измерение производится по контактной разности потенциалов, возникающих между измеряемой поверхностью и поверхностью эталонного образца. При этом измеряемый и эталонный образцы формируют плоский конденсатор и не

контактируют между собой, но при этом возможным является эффективный обмен электронами под действием разницы РВЭ использованных металлов.

Измерения контактной разности потенциалов в работе выполнялись при атмосферном давлении. Частота колебаний электрода-эталоны из золота составляла 500 Гц, диаметр 1,4 мм. Распределение работы выхода электрона определяли сканированием с шагом 0,2 мм по одной линии в центре рабочей поверхности образцов с точностью до 5 мэВ. Образцы перед измерениями протирали спиртом и выдерживали одни сутки до установления термодинамического равновесного состояния поверхности.

Между поверхностью образца и эталонным электродом за счет контактной разности потенциалов формируется переменное электрическое поле. Измерение напряжения компенсации этого поля позволяет определить КРП между образцом и электродом сравнения. Неизвестную величину РВЭ определяли из соотношения:

$$\text{РВЭ}_{\text{образца}} = \text{РВЭ}_{\text{эталоны}} - \text{КРП}_{\text{образец-эталон}}, \text{ (эВ)} \quad (2.20)$$

Для РВЭ золота использовали среднее значение 4,300 эВ.

2.4.3 Оценка микрогеометрии поверхности

Микрогеометрию и топографию поверхности образцов определяли на бесконтактном 3D профилографе "Микрон-альфа" по методике Национального авиационного университета [79] и на профилометре-профилографе модели 201.

Профилограф «Микрон-альфа» (рис.2.21) предназначен для восстановления микротопографии поверхностей методом обработки последовательности интерференционных данных при частично когерентном освещении. Прибор позволяет получать значения шероховатости поверхности

одновременно в шести различных сечениях рассматриваемого участка поверхности во взаимно перпендикулярных направлениях. Кроме того, есть возможность строить 2D и 3D профили поверхности, количественно оценивать характеристики поверхности, наблюдать интерференционные картины, проводить металлографические исследования.

При этом имеется возможность производить исследования с полем сканирования (X,Y) 150x110 мкм, разрешением по горизонтали (X,Y) 0,25 мкм, максимальной измеряемой высотой рельефа (Z) 100 мкм, разрешением по вертикали (Z) 10 нм, увеличением при визуальном наблюдении 500 крат.

Проведение исследований осуществляли следующим способом.

Устанавливали испытуемый образец измеряемой поверхностью на предметный стол 1 (рис.2.21) таким образом, чтобы поверхность образца была по возможности параллельна поверхности стола.

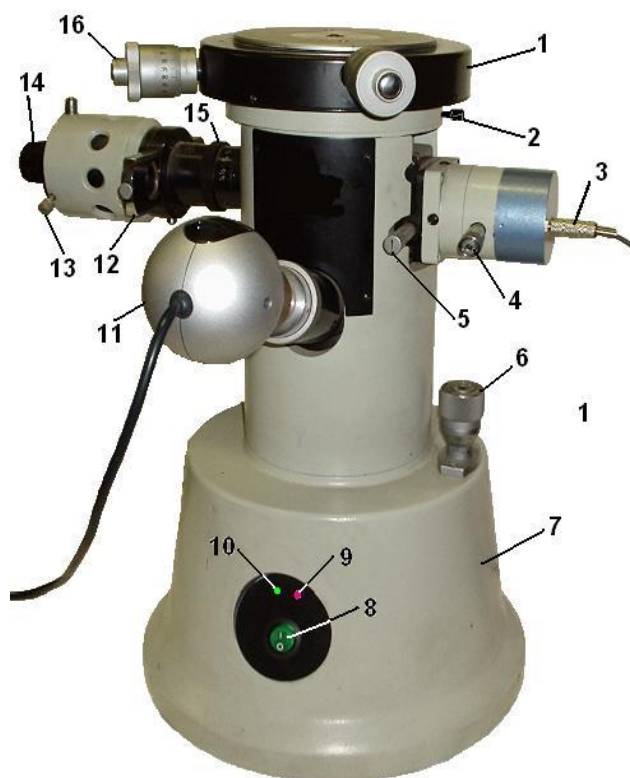


Рисунок 2.21 – Внешний вид прибора "Микрон-альфа"

С помощью рукояток продольной и поперечной настройки 16 выставляли измеряемый участок образца на объектив прибора. После запуска программного обеспечения, производили процесс регистрации состояния измеряемой поверхности. Полученные данные автоматически регистрировались, обрабатывались и сохранялись с помощью программного обеспечения.

2.5 Методы экспериментального изучения трибопроцессов в поступательных плоскостных парах IV класса с периодическим ударным разрывом контакта (типа «направляющая-цепь»)

Используемые в различных машинах и механизмах цепные передачи для защиты цепей от загрязнения закрываются кожухом, картером, чехлом. В ряде случаев, например, в конструкциях электро- и бензопилы, для стабилизации условий работы цепи применяются специальные направляющие. В процессе эксплуатации подобных конструкций неизбежно возникновение трибосопряжений типа «направляющая-цепь» с существенным износом контактирующих поверхностей. Причем, достижение технологического износа, выраженное в увеличении вибраций и ухудшении показателей резания, наступает раньше, чем фаза катастрофического износа материалов трибосопряжения. Так, продолжительность эксплуатации направляющей бензодвигательного изделия производства ОАО «Мотор Сич» не более чем в два раза превышает стойкость цепи при резании, что сопровождается значительными экономическими потерями.

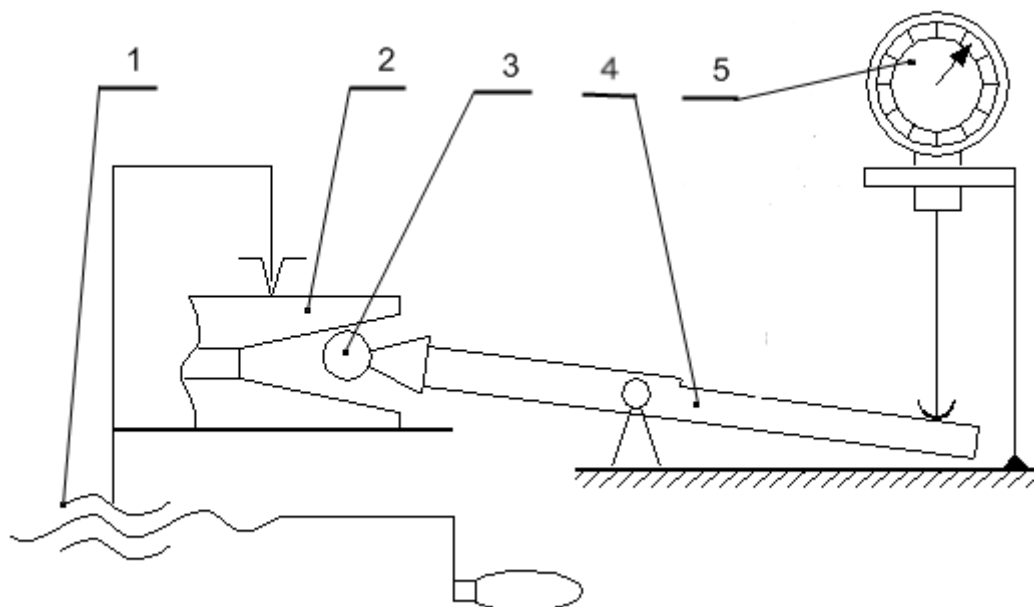
Разработка мероприятий по повышению износостойкости трибосопряжений производится на основе анализа влияния условий контактирования на механизм изнашивания и исследований закономерностей изнашивания. Изменение того или иного фактора и появление нового фактора при трении приводит к изменению физической картины механизма изнашивания. Модель процесса изнашивания должна разрабатываться на

основе полученных закономерностей динамики изменения нагрузочных параметров и эволюции физико-механических свойств контактирующих поверхностных слоев.

В случае измерения износа направляющей цепи возникают трудности связанные с контролем геометрии сложной поверхности в труднодоступных местах. Учитывая недопустимость разборки направляющей и недостаточность показаний весового метода, измерения проводили с помощью специально сконструированного прибора (рис. 2.22).

Прибор представляет собой рычаг с измерительным наконечником, который вставляется в измеряемый паз в требуемом месте направляющей и осуществляет точечный контакт с поверхностями стенок. Другим своим плечом рычаг связан с индикаторами часового типа. Ось вращения рычага закреплена в центрах.

Для получения информации об износе направляющей по длине производятся измерения в различных местах направляющей на определенной глубине паза.



1 – передача винт-гайка; 2 – направляющая цепи; 3 – измерительный наконечник; 4 – рычаг; 5 – индикаторные часы.

Рисунок 2.22 - Схема прибора для измерений износа и его распределения по длине и глубине паза направляющей

Для исследования колебательного движения цепи был создан измерительный стенд, который состоит из электродвигательного изделия "Мотор Сич", закрепленного на основе, стробоскопа и бинокулярного микроскопа с измерительной шкалой, закрепленного на стойке. (см. рисунок 2.23).

В процессе испытаний на стенде есть возможность контролировать амплитуду и частоту колебаний цепи электродвигательного изделия с разными силами натяжения цепи, износом направляющей и цепи, составом и режимами подачи масла.



Рисунок 2.23 – Стенд для исследования колебательного движения цепи

Прибор позволяет исследовать распределение износа направляющей по длине и глубине паза. Исследование кинетики изнашивания проводили на направляющей электромоторного изделия производства ОАО «Мотор Сич» с шагом по длине - 20 мм, по глубине - 0,5 мм.

Наличие сложного характера нагружения в трибосопряжении типа «направляющая-цепь» определяется следующими систематическими движениями:

а) плоскопараллельным колебательным движением цепи - изменяется при различных условиях резания, в частности, при входе в контакт с обрабатываемым материалом, а также при резке структурно неоднородных пород древесины;

б) волновыми поперечными колебаниями цепи в плоскости, параллельной плоскости цепной передачи за счет конструктивных погрешностей движущихся элементов пилы в радиальном направлении;

в) волновыми поперечными колебаниями цепи в плоскости, перпендикулярной плоскости цепной передачи за счет конструктивных погрешностей движущихся элементов пилы в осевом направлении.

В результате этих движений контактирующие поверхности перемещаются в двух взаимно перпендикулярных направлениях с добавлением нормальной ударной нагрузки, т.е. происходит трехмерное относительное контактное взаимодействие.

Такой комплекс условий нагружения неизбежно вызывает сложное объемное напряженное состояние поверхностных слоев контактирующих материалов и отражается на их износостойкости.

Управление работоспособностью подобных трибосопряжений невозможно без применения комплекса современных методов оценки состояния поверхностного слоя контактирующих материалов в процессе эксплуатации. Учет трехмерности нагружения, геометрии контакта, свойств контактирующих материалов и влияния среды усложняет картину процесса разрушения поверхностей, но является необходимым при определении их

износостойкости. При этом необходимо проведение исследований трибологических характеристик поверхностного слоя обработанной детали с учетом распределения контактной нагрузки в пространстве и времени, анализа изменения фазового равновесия, химического состава, структуры, а также деформационных и прочностных характеристик.

Вследствие сложности и многообразия процессов, сопровождающих подобное контактное взаимодействие, как по характеру протекающих физико-химических процессов, так и по взаимосвязи различных факторов, их исследование во многих случаях целесообразно проводить на специальных моделирующих установках. Испытания в реальных условиях обходятся дороже, являются длительными, трудоемкими и не всегда позволяют понять внутренние связи сложного процесса.

Для моделирования зоны контакта трибосопряжения типа «направляющая-цепь», определения закономерностей изнашивания инструментального материала и состояния контактирующих поверхностных слоев в зависимости от факторов нагружения отдельно и во взаимодействии необходим специальный стенд. При этом в наибольшей степени подходит многофункциональная установка с неуравновешенной массой описанная в разделе 2.2. Схемы установки представлены на рисунках 2.8 и 2.9.

Предлагаемый стенд полностью моделирует процесс перемещений и колебаний, которые возникают во время работы трибосопряжений типа «направляющая-цепь». При испытаниях образцы проскальзывают в двух взаимоперпендикулярных направлениях, которые моделируют процесс трения цепи по направляющей. Трехмерность нагружения и соответствие модели реальному процессу достигается благодаря добавлению удара при трении, что при эксплуатации трибосопряжения моделирует процесс вибрации, а камера задания температуры позволяет проводить испытания в условиях возможных климатических температур. Следует учесть также, что в условиях нормального переменного нагружения разрыв контакта ведет к изменению его значения от нуля при отсутствии контактирования до очень больших

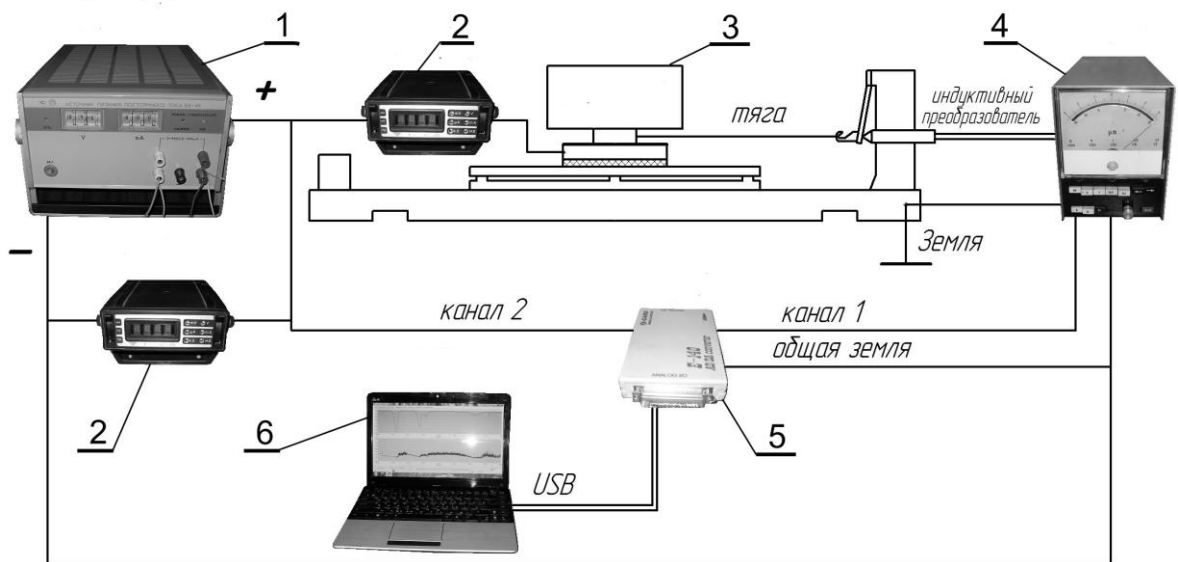
значений в момент соударения. С повышением энергии удара амплитуда нормального нагружения увеличивается. Это дает возможность за короткий промежуток времени моделировать различные типы динамического нагружения при работе исследуемых трибосопряжений.

Предложенная методика испытаний деталей трибосопряжения типа «направляющая-цепь» дает возможность на порядок снизить продолжительность испытаний, уменьшить рассеяние полученных результатов по сравнению со стендовыми эквивалентными испытаниями и обеспечить экономию при испытаниях дорогостоящих материалов.

2.6 Оценка силы трения скольжения (движения) и силы трения покоя

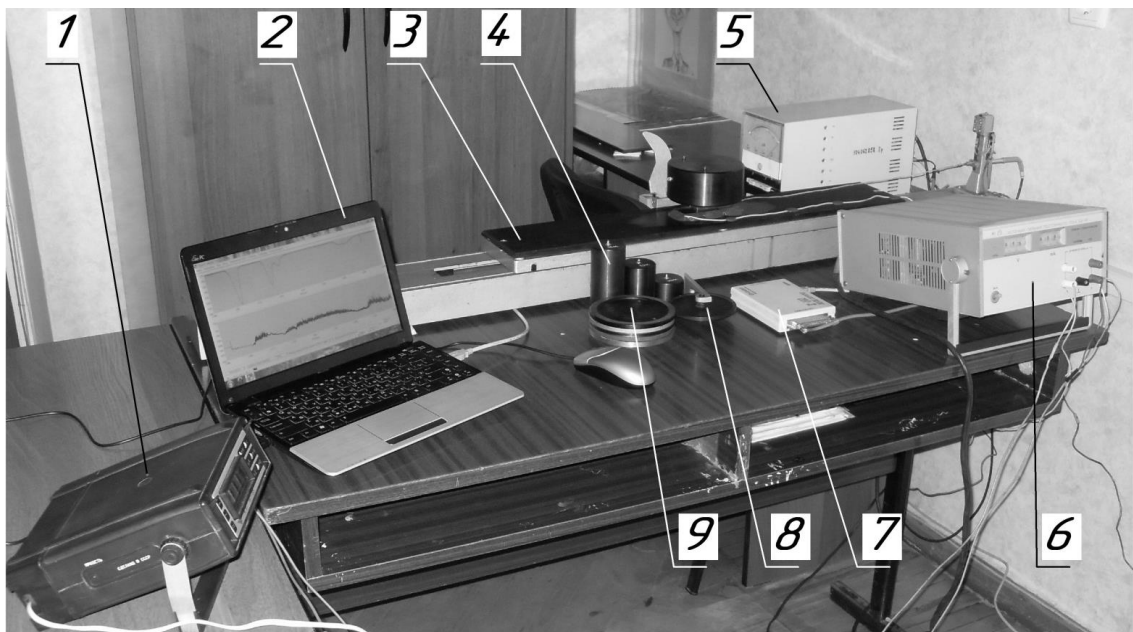
Учитывая, что разница в износостойкости поверхности образцов при различных режимах подачи СОЖ может происходить вследствие изменения величины коэффициента трения, была произведена оценка силы трения скольжения (движения) и силы трения покоя. При этом использовали модернизированный трибометр мод. ТММ 32А (рис.2.24 и 2.25) с возможностью определения электросопротивления контакта и выводом показаний на персональный компьютер. Этот прибор предназначен для определения коэффициента трения скольжения между двумя телами при равномерном движении их относительно друг друга.

Определение коэффициентов трения скольжения для пар материалов основано на измерении сил трения покоя (страгивания) и сил трения движения, возникающих при перемещении сменной плиты, установленной на тележке, относительно груза, прижимающего сменные образцы с нормальным усилием к плите.



1 – источник питания постоянного тока мод. Б5-49; 2 – вольтметр универсальный цифровой мод. В7-35; 3 – трибометр мод. ТММ 32А; 4 – прибор показывающий с индуктивными преобразователями мод. 276; 5 – аналого-цифровой преобразователь мод. Е-140; 6 – персональный компьютер

Рисунок 2.24 – Общая схема установки для оценки силы трения



1 – вольтметр универсальный цифровой мод. В7-35; 2 – персональный компьютер; 3 – трибометр мод. ТММ 32А; 5 – прибор показывающий с индуктивными преобразователями мод. 276; 6 –

источник питания постоянного тока мод. Б5-49; 7– аналого-цифровой преобразователь мод. Е-140

Рисунок 2.25 – Общая вид установки для оценки силы трения

Технические характеристики этого прибора занесены в табл. 2.9.

Таблица 2.9 – Технические данные трибометра ТММ 32А

Характеристика	Значение
Скорость перемещения образцов испытываемых материалов относительно друг друга, м/с	0,027
Испытываемые материалы: а) сменных плит б) сменных образцов	сталь, чугун, алюминий, сталь, латунь, чугун
Максимально-допустимая сила трения, кг	2,0
Максимальное относительное перемещение образцов испытываемых материалов, мм	510
Источник питания – однофазная сеть переменного тока: а) частота, Гц б) напряжение, В	50 220
Мощность двигателя, Вт	14
Габариты прибора, мм	1450x160x210
Масса прибора, кг, не более	38

Тележка, установленная в направляющие основания, перемещается возвратно-поступательно при помощи механизма электропривода. В качестве приводного электродвигателя применен асинхронный электродвигатель, который задает постоянную скорость перемещения тележки. Ход тележки ограничивается с двух сторон концевыми

выключателями. На площадку тележки устанавливаются сменные плиты, выполненные из различных материалов. На плиту устанавливается груз, который прижимает сменный образец. Груз соединяется с пружиной измерительного устройства через тягу с дополнительной пружиной или через тягу без последней. Пружина измерительного устройства (гибкая часть балочки) закреплена в стойке. Усилие пружины через индуктивный преобразователь мод. 276 и аналого-цифровой преобразователь мод. E-140 передается на компьютер.

При перемещении тележки от стойки груз, прижимающий образец к плите, стремится сдвинуться вместе с тележкой и создает усилие, которое через тягу передается на пружину измерительного устройства. Пружина начинает изгибаться и развивает усилие, которое удерживает груз вместе с образцом на месте, при этом образец начинает скользить по плите. Таким образом, сила трения, возникающая между образцом и плитой, без всяких потерь воспринимается пружиной измерительного устройства. Деформация пружины измеряется индикатором.

Прибор позволяет измерять силы трения движения и силы трения покоя. Для измерения силы трения движения применяется тяга без промежуточной пружины. Для измерения сил трения страгивания используется тяга с промежуточной пружиной. За счет небольшой жесткости промежуточной пружины нарастание силы, приложенной к грузу, происходит плавно. Груз вначале передвигается вместе с тележкой. Движение груза с образцом относительно плиты начнет происходить только тогда, когда промежуточная пружина разовьет усилие, равное усилию трения трогания. В момент трогания груза фиксируется сила страгивания груза.

Персональный компьютер служит для визуализации входного сигнала в режиме реального времени, сбора и обработки экспериментальных данных. Сбор данных осуществлялся с помощью программного обеспечения LGraph2.

Выводы

1. Предложена методология исследований, которая включает:

- исследования износостойкости методом ускоренных испытаний пар трения на основе принципов моделирования контактного взаимодействия;
- комплексные исследования качественных изменений состояния поверхностного слоя в зоне контакта, включающие применение трибоспектрального метода, оценку изменения работы выхода электрона с поверхности образцов, микрогеометрии поверхности, силы трения скольжения (движения) и силы трения покоя.

2. Сформулированы основные принципы моделирования эквивалентных состояний трибологических пар, которые эксплуатируются в особых условиях трехкомпонентного нагружения, включающие трибологические, кинематические, нагрузочные, металлофизические, физико-механические критерии.

3. Разработаны стенды и соответствующие методики ускоренных испытаний износостойкости трибосопряжений в условиях многокомпонентного термоконтактного воздействия, позволяющих оценивать работоспособность фрикционных материалов в узлах реальных конструкций, реализовать в широком диапазоне основные режимные параметры. Существует возможность обеспечить необходимый комплекс факторов механического нагружения – трехмерная динамическая нагрузка при различных температурах окружающей среды, проводить как однофакторный, так и многофакторный эксперимент, регулировать и контролировать параметры нагружения, в том числе в ходе цикла испытаний (в натуральных условиях это невозможно).

РАЗДЕЛ 3

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ИЗНАШИВАНИЕ СПЛАВОВ

Процессы изнашивания при многокомпонентном термоконтактном воздействии могут быть условно подразделены на несколько составляющих, которые будут так или иначе влиять на конечный объем износа. В нашем случае процесс контактного взаимодействия состоит из следующего ряда:

а) возвратно-поступательное скольжение поверхностей с приложением нормальной статической нагрузки без разрыва контакта (однокомпонентное нагружение);

б) взаимодействие поверхностей при их осциллирующем перемещении в направлении перпендикулярном прилагаемой динамической нагрузки в условиях с разрывом контакта (т.е. удар с проскальзыванием – двухкомпонентное нагружение);

в) возвратно-поступательное скольжение поверхностей в двух взаимно перпендикулярных направлениях с приложением динамической нагрузки в условиях с разрывом контакта (трехкомпонентное нагружение);

г) многокомпонентное динамическое нагружение поверхностей (двухкомпонентное и трехкомпонентное нагружение) при высоких и отрицательных температурах окружающей среды.

Наличие и сочетание перечисленных процессов контактного взаимодействия приводит к такому взаимодействию, при котором величины нагрузок, частот, амплитуд взаимного перемещения поверхностей изменяются во времени в условиях воздействия как нормальных, так и высоких или отрицательных температур окружающей среды. Подобные процессы контактного взаимодействия поверхностей имеют место в ряде реальных трибосопряжений, в том числе и в узлах трения ГТУ.

3.1 Определение расчетного пути трения и элементов контактного разрушения трибосопряжения при трехкомпонентном динамическом нагружении

В контактных задачах рассматривается контактное взаимодействие тел. При этом сложно оценить граничные условия для каждого из контактных тел, так как в большей степени неизвестны ни напряжения по поверхности контакта, ни перемещения точек этой поверхности. Необходимо учитывать, что в качестве контактных характеристик рассматриваются контактное давление, форма и размер области контакта, сближение тел, напряженное состояние, которые являются функцией особенностей нагружения и условий контакта.

Основным критерием износостойкости является интенсивность изнашивания, определяемая как отношение величины изношенного слоя поверхности к пути трения, на котором произошло изнашивание. При этом особое значение приобретает определение пути трения в трибосопряжении при трехкомпонентном динамическом нагружении когда действуют колебания по взаимно перпендикулярным направлениям. Колебания могут иметь нормальное к плоскости контакта направление (ось Z) и тангенциальное направление (в плоскости контакта – ось X и Y).

Траектория пути трения лежит в плоскости, ориентируемой под определенными углами к осям координат. Величины углов определяются значениями относительных перемещений поверхностей трибосопряжения. Суммарный путь трения точки, располагаемой на линии контакта, обусловлен характером изменения значений по двум осям координат и может иметь форму, отличающуюся от прямой. Однако, учитывая малые амплитуды взаимных перемещений фактом непрямолинейной траектории можно пренебречь [203]. Тогда суммарный путь трения определится исходя из известного выражения:

$$l^2 = x^2 + y^2, \quad (3.1)$$

где l – суммарный путь трения, мм;

x, y – значения смещений по осям координат, мм.

Для установления функциональной зависимости пути трения поверхностей от параметров, задающих направления движения предлагается применить метод моделирования контактного взаимодействия на основе теории физического подобия, с разложением сложного движения на элементарные простые, с последующим их анализом и математическим описанием. При этом будет учитываться комплекс физических величин, определяющих физический процесс взаимодействия контактируемых поверхностей - первая теорема подобия [204].

К физическим величинам можно отнести частоты, амплитуды колебаний поверхностей и время работы трибосопряжения. Для этого подвижный контакт поверхностей рассматривается в виде двух простых движений во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Тогда при непрерывном трении путь трения по каждой плоскости определится как

$$L_{x,y} = A_{x,y} f_{x,y} t \quad (3.2)$$

где A – амплитуда колебаний, мм;

f – частота колебаний, мин^{-1} ;

t – время работы трибосопряжения, мин.

Тогда суммарный путь трения, обусловленный двумя простыми движениями на основании выражения (3.1), может быть представлен в следующем виде:

$$L = \sqrt{L_x^2 + kL_y^2}, \quad (3.3)$$

где k – коэффициент, учитывающий асинхронность колебаний.

Коэффициент показывает, на какое количество движений по оси X приходится движений по оси Y , сопровождающихся трением и перемещением точки по линии контакта. Определяется по отношению:

$$k = \frac{f_y}{f_x}, \quad (3.4)$$

Кроме того, необходимо учитывать особенности формирования пути трения по трем осям координат при воздействии соответствующих колебаний. В частности колебания по оси Z могут сопровождаться изменением величины нормального нагружения в трибосопряжении при контакте, что сопровождается перемещениями точки контакта в упругом диапазоне или ударным нагружением при наличии зазора. При сближении деталей при вибрации фактическая площадь контакта из-за упругой деформации увеличивается. При этом сила трения в контакте возрастает. При удалении одной детали от другой фактическая площадь контакта уменьшается вплоть до нарушения контакта деталей, сила трения уменьшается, достигая нулевого значения.

Путь трения при ударном нагружении по оси Z приобретает вид:

$$l_z = tA_z f_z - 2l_0 \quad (3.5)$$

где l_0 – величина зазора в трибосопряжении, мм.

По трем осям координат путь трения:

$$\begin{cases} l_x = tA_x f_x \\ l_y = tA_y f_y \\ l_z = tA_z f_z - 2l_0 \end{cases} \quad (3.6)$$

На основании выражений (3.1-3.5) общий путь трения в трибосопряжении при трехкомпонентном нагружении

$$L = C \sqrt{[(t - t_1)A_x f_x]^2 + [k(t - t_1)A_y f_y]^2} = C(t - t_1) \sqrt{(A_x f_x)^2 + \left(\frac{f_y}{f_x} A_y\right)^2} \quad (3.7)$$

где C – коэффициент условий контактирования;

t_1 – время прерывания контакта при наличии зазора, мин.

Коэффициент условий контактирования включает три основных коэффициента:

$$C = C_1 C_2 C_3 \quad (3.8)$$

где C_1 – коэффициент фазы гармоника вибрационных смещений;

C_2 – коэффициент физико-механических свойств контактирующих материалов (упругие и пластические свойства);

C_3 – коэффициент восстановления нормального и тангенциального импульсов при ударе, который характеризует упругое восстановление деформируемого тела в нормальном и тангенциальном направлениях, является функцией параметров удара [100].

Время прерывания контакта при ударе определяется:

$$t_1 = t - t_2 \quad (3.9)$$

где t_2 – время контакта трибосопряжения при ударе, мин.

Исходя из выражений (3.2 и 3.5) время контакта трибосопряжения при ударе определяется:

$$t_2 = \frac{l_z}{A_z f_z} = \frac{t A_z f_z - 2l_0}{A_z f_z} = t - \frac{2l_0}{A_z f_z} \quad (3.10)$$

С учетом выражений (3.8-3.10) выражение (3.7) принимает окончательный вид:

$$L = C_1 C_2 C_3 \left(t - \frac{2l_0}{A_z f_z} \right) \sqrt{(A_x f_x)^2 + \left(\frac{f_y^2 A_y}{f_x} \right)^2} \quad (3.11)$$

Решение контактной задачи механики разрушения возможно в рамках трибофатики на основании модели учета взаимного влияния процессов механического (объемного) разрушения и фрикционной усталости.

Очевидно, что при контактных условиях нагружения приповерхностные слои материала повреждаются сильнее, чем глубинные. При многократном нагружении усталостные микротрещины возникают на поверхности даже при отсутствии контактных нагрузок и располагаются в активных плоскостях скольжения, в которых действуют максимальные сдвиговые напряжения [44]. Можно выделить четыре последовательные стадии процессов в материале в соответствии с особенностями деформирования и разрушения материалов при усталости: упрочнение материала из-за роста плотности дислокаций в локальных объемах до критического значения; зарождение и развитие субмикроскопических трещин; развитие микротрещин до размеров макротрещин; развитие и слияние макротрещин до выкрашивания элементов поверхности.

Накопление дефектов, приводящее к образованию микротрещины, определяется характерными особенностями основных структурных элементов материала. Под действием многократных импульсных нагрузок исходная структура деформируемого материала существенно изменяется. Подповерхностная зона (глубиной от нескольких единиц до сотен

микрометров) представляет собой пластически деформированный слой материала с определенной величиной и ориентацией кристаллитов.

Соотношение механических свойств и параметров структуры, приведенное в работе [45], показывает, что сопротивление хрупкому разрушению зависит не только от размера зерна, но и от размера блока мозаики. Причем, размер зерна не определяет однозначно механические свойства металла. Напряжение течения линейно зависит от размера субзерен – элемента субструктуры. Сделан вывод об определяющем влиянии степени разориентации на сопротивление разрушению металла.

Исследования с помощью электронного микроскопа позволили установить, что в результате пластической деформации в поверхностных слоях формируется развитая ячеистая структура, ориентированная вдоль направления трения [46]. Разрушение инициируется гранями ячеек, перпендикулярными направлению скольжения, а первоначальная трещина проходит вдоль этих граней. Поэтому при относительном скольжении поверхностей возможно зарождение различно ориентированных трещин. Особенно в случае трения с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

В общем случае образование и рост микротрещин при циклическом нагружении существенно зависит как от структурного состояния материала, так и от числа циклов нагружения N . Для описания развития микроструктурно коротких трещин применимо уравнение, представленное в работе [47]:

$$\frac{db}{dN} = C(\Delta\gamma)^m (d - b) \quad (3.12)$$

где b – глубина трещины; $\Delta\gamma$ – размах деформации сдвига; d – характерный размер элемента структуры; C и m – экспериментально определяемые константы материала.

Из этого уравнения следует, что по мере увеличения трещины до размера зерна ее скорость уменьшается вплоть до нуля. При напряжениях

выше предела выносливости трещина не останавливается, а только замедляет свой рост или может остановиться на какое-то время.

Причем, характер накопления деформаций при действии многократных импульсных и пульсирующих нагрузок примерно одинаков [48]. Так, при ударном нагружении зависимость контактной деформации от числа циклов носит нелинейный характер с тремя участками: на первом участке – стадии упрочнения (примерно до $N = 20$) происходит контактная деформация; на втором участке замедленное накопление контактной деформации с приблизительно постоянной скоростью (до $N = 10^3 \dots 10^4$); на третьем участке наблюдается значительный рост деформации и интенсивное разрушение поверхности.

Установлено [44], что износ при ударном нагружении является нелинейной функцией от числа циклов и нормального напряжения:

$$W = BN^n \sigma^m \quad (3.13)$$

где B , n , m – коэффициенты.

При этом нормальное напряжение σ и максимальное контактное давление определяются силой удара, которая в свою очередь зависит от скорости, геометрии контакта и свойств материала.

Циклические напряжения приводят к возникновению усталостного повреждения как на поверхности, так и на некоторой глубине. Явление поверхностной усталости является следствием нормальных столкновений микронеровностей, которые приводят к возникновению под неровностями касательных напряжений, действующих на глубине порядка высот выступов (микрометры). Под выступом действует максимальное касательное напряжение:

$$\tau'_m = (E' / \pi^2) \rho \quad (3.14)$$

где E' – приведенный модуль упругости; ϕ – угловой коэффициент выступа.

Очевидно, что микроскопические (второго рода) максимальные касательные напряжения действительно могут быть причиной образования зародышевых трещин под поверхностью.

Общий случай расчетной схемы вертикальных поверхностных и горизонтальных подповерхностных трещин при трении с трехкомпонентным динамическим нагружением приведен на рисунке 3.1.

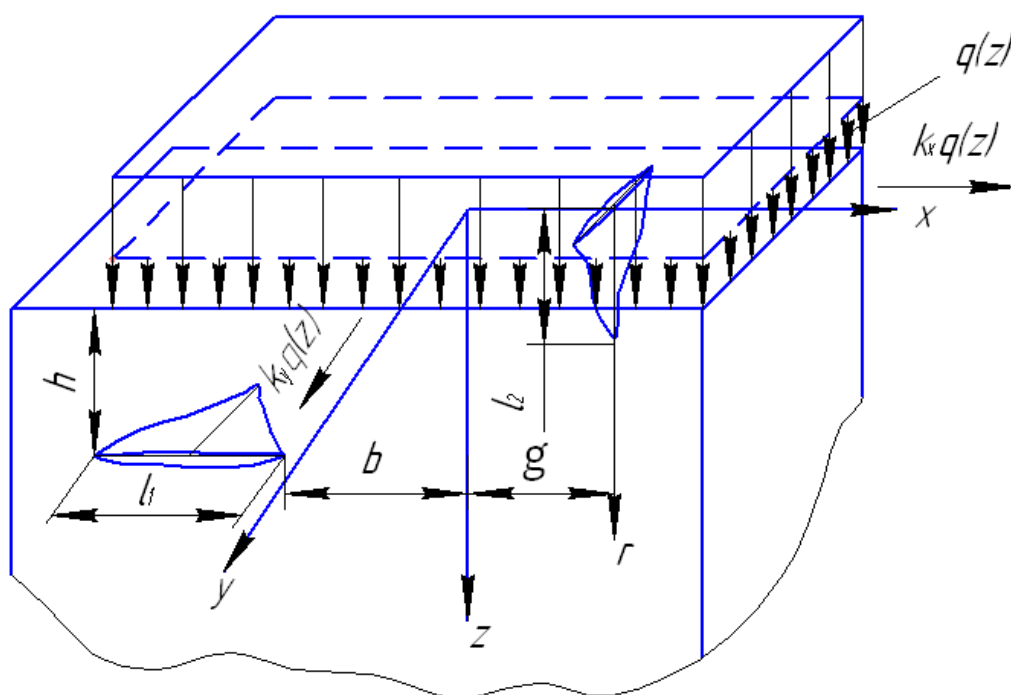


Рисунок 3.1 – Схема расположений горизонтальной и вертикальной трещин при трении с трехкомпонентным динамическим нагружением

Поверхность нагружена нормальным переменным напряжением $q(z)$ при воздействии ударного нагружения и тангенциальными напряжениями τ_x и τ_y при возвратно поступательном проскальзывании в двух взаимно перпендикулярных направлениях контробразца.

При сложном напряженном состоянии испытываемых образцов в процессе одновременного приложения к образцу сжимающей и сдвигающей нагрузок эквивалентное напряжение определяется из соотношения [205]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (3.15)$$

где σ - нормальная; τ - касательная составляющие действующих напряжений.

Тогда, учитывая вероятность существенного влияния скорости перемещения на величину коэффициента трения, площадь контакта между двумя телами определяются условиями:

$$\begin{cases} \tau_{xy} = -q(z)\sqrt{k_x^2 + k_y^2} + (E'_m / \pi^2) \rho \\ \sigma_z = -q(z) \end{cases} \quad (3.16)$$

где k_x и k_y – коэффициенты трения по оси x и y .

Материал в поверхностном слое можно рассматривать в первом приближении как упругий. В случае хрупкого разрушения необходимым и достаточным является силовой критерий – коэффициент интенсивности напряжений K , который количественно характеризует поле напряжений у вершины трещины. Когда расчетный коэффициент K достигнет своего критического значения трещина начнет распространяться. Согласно ГОСТ 25.506-85 линейная упругая механика разрушения и силовой критерий разрушения, разработанные для хрупких тел, применимы, если размер зоны пластичности не превышает 1/10 толщины образца.

Поэтому для рассматриваемого случая коэффициенты интенсивности напряжений определяются [48]:

для горизонтальной трещины

$$\begin{cases} K_I(-b-l_I) = \lim_{x \rightarrow (-b-l_I)} \sqrt{2[x - (-b-l_I)]} \sigma_z(x, h) \\ K_{II}(-b-l_I) = \lim_{x \rightarrow (-b-l_I)} \sqrt{2[x - (-b-l_I)]} \tau_{xy}(x, h) \end{cases} \quad (3.17)$$

$$\begin{cases} K_I(-b) = \lim_{x \rightarrow (-b)} \sqrt{2[x - (-b)]} \sigma_z(x, h) \\ K_{II}(-b) = \lim_{x \rightarrow (-b)} \sqrt{2[x - (-b)]} \tau_{xy}(x, h) \end{cases} \quad (3.18)$$

для вертикальной

$$\begin{cases} K_I(l_2) = \lim_{z \rightarrow l_2} \sqrt{2(z-l_2)} \sigma_x(g, z) \\ K_{II}(l_2) = \lim_{z \rightarrow l_2} \sqrt{2(z-l_2)} \tau_{xy}(g, z) \end{cases} \quad (3.19)$$

С помощью аппарата сингулярных интегральных уравнений возможно решение задачи об упругом и предельном равновесии плоских пластин, ослабленных системой произвольно ориентированных прямолинейных трещин продольного сдвига, т.е. определения напряженно-деформированного состояния поверхностей при трении. В случае наличия N прямолинейных трещин длиной $2l_k$ ($k = 1, 2, \dots, N$) в образце, отнесенном к системе (x, y, z) с осью антиплоской деформации направленной вдоль оси z , получаем схему расположения трещин, представленную на рисунке 3.2.

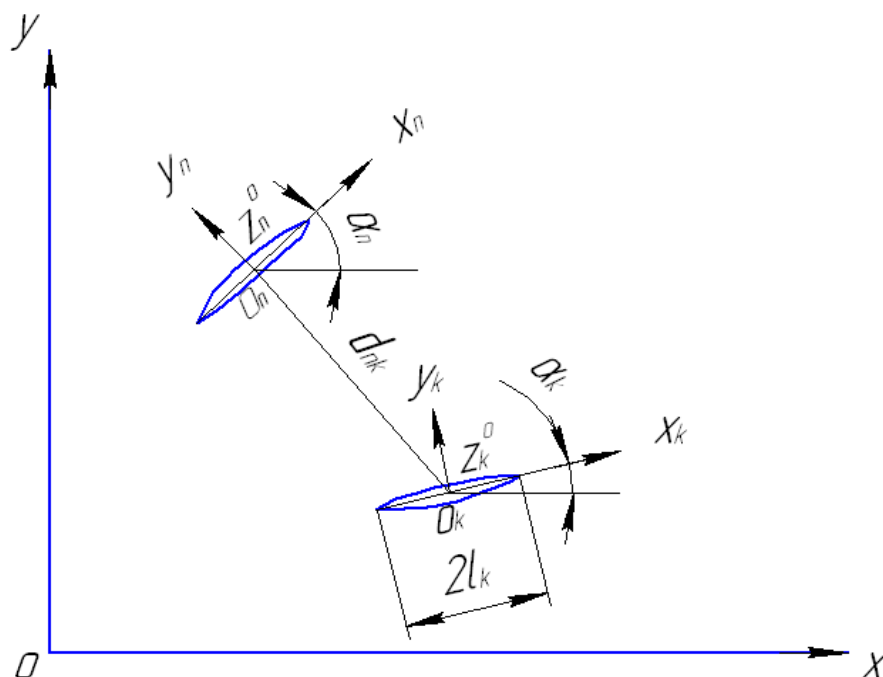


Рисунок 3.2 – Схема произвольно ориентированных трещин

Центры трещин определяются координатами

$$z_k^0 = x_k^0 + iy_k^0 \quad (3.20)$$

где $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

В точках O_k размещены начала локальных систем координат $x_k O_k y_k$. Оси x_k совпадают с линиями трещин и образуют углы α_k с осью x .

Если ось деформации направлена по оси z прямоугольной декартовой системы координат, компоненты вектора упругих смещений u , v и ω в таком теле могут быть представлены в виде

$$u = v = 0; \quad \omega = \omega(x, y)$$

Из закона Гука следует, что ненулевые компоненты тензора напряжений τ_{xz} и τ_{yz} являются функциями двух переменных x и y и выражаются через смещение $\omega(x, y)$ следующим образом:

$$\begin{cases} \tau_{xz} = \mu \frac{d\omega}{dx} \\ \tau_{yz} = \mu \frac{d\omega}{dy} \end{cases} \quad (3.21)$$

где μ – модуль сдвига.

Система уравнений равновесия сводится к одному уравнению, которое в случае отсутствия массовых сил принимает форму

$$\frac{d\tau_{xz}}{dx} + \frac{d\tau_{yz}}{dy} = \mu \left(\frac{d^2\omega}{dx^2} + \frac{d^2\omega}{dy^2} \right) = 0 \quad (3.22)$$

Примем, что

$$\tau_{xz} - i\tau_{yz} = F(z)$$

где $F(z)$ – аналитическая функция или функция напряжений, которая характеризует напряженное состояние тела, вызванное разрывами смещений $\mu_k(x_k)$ на N трещинах.

Тогда для системы произвольно ориентированных прямолинейных трещин продольного сдвига функция напряжений принимает вид [49]:

$$F(z) = \frac{1}{\pi i} \sum_{k=1}^N \int_{-l_k}^{l_k} \mu'_k(t) \left(\frac{1}{te^{i\alpha_k} - z + z_k^0} - \frac{1}{te^{-i\alpha_k} - z + z_k^{-0}} \right) dt \quad (3.23)$$

На основании напряжений в плоскостях трещин и заданной нагрузки $\tau_k(x_k)$ получим систему N сингулярных интегральных уравнений рассматриваемой задачи для определения неизвестных функций $\mu_k(x)$:

$$\int_{-l_n}^{l_n} \frac{\mu'_n(t) dt}{t-x} + \sum_{k=1}^N \int_{-l_k}^{l_k} Q_{nk}(t,x) \mu'_k(t) dt = \pi \tau_n(x) \quad (3.24)$$

($n = 1, 2, 3, \dots, N$), $|x| < l_n$

где ядра $Q_{nk}(t,x)$ определяются соотношением

$$Q_{nk}(t,x) = (1 - \delta_{nk}) P_{nk}(t,x) + \operatorname{Re} \left(\frac{e^{i\alpha_n}}{X_n - \bar{T}_k} \right) \quad (3.25)$$

где δ_{nk} – символ Кронекера, t – точки рассматриваемого контура, а величины $P_{nk}(t,x)$; X_n и T_k находятся на основании равенств:

$$P_{nk}(t,x) = \operatorname{Re} \frac{e^{i\alpha_n}}{T_k - X_n} \quad (3.26)$$

$$T_k = t e^{i\alpha_k} + z_k^0 \quad (3.27)$$

$$z_k = e^{-i\alpha_k} (z - z_k^0) \quad (3.28)$$

$$X_n = x e^{i\alpha_n} + z_n^0 \quad (3.29)$$

В случае необходимости решения задачи о распределении температурного поля в теле с системой произвольно ориентированных прямолинейных трещин будем считать, что температура тела не зависит от координаты z . Тогда в теле имеется плоское температурное поле $T(x, y)$, которое будет удовлетворять уравнению Лапласа:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} = 0 \quad (3.30)$$

При этом функция $T(x, y)$ должна удовлетворять трем видам граничных условий когда: на поверхности тела известна температура, известна плотность теплового потока и известна температура окружающей среды. Граничное условие третьего рода выражается в виде:

$$\frac{dT}{dn} + HT = HT_c \quad (3.31)$$

где n – внешняя нормаль к исследуемой области; H – коэффициент теплообмена; T_c – температура окружающей среды, теплообмен с которой совершается по закону Ньютона.

Тогда функция напряжений принимает вид [49]:

$$F(z) = \frac{1}{\pi i} \sum_{k=1}^N \int_{-l_k}^{l_k} \gamma'_k(t) \left(\frac{1}{T_k - z} - \frac{1}{\bar{T}_k - z} \right) dt \quad (3.32)$$

а система N сингулярных интегральных уравнений относительно неизвестной функции $\gamma'_k(x)$:

$$\int_{-l_n}^{l_n} \frac{\gamma'_n(t) dt}{t - x} + \sum_{k=1}^N \int_{-l_k}^{l_k} \gamma'_k(t) Q_{nk}(t, x) dt = \pi q_n(x) \quad (3.33)$$

$$|x| < l_n \quad (n = 1, 2, \dots, N)$$

Здесь

$$Q_{nk}(t, x) = \operatorname{Re} e^{i\alpha_n} \left\{ \frac{1 - \delta_{nk}}{T_k - X_n} - \frac{1}{\bar{T}_k - X_n} - 2bi \int_0^{\infty} \frac{\exp[is(\bar{T}_k - X_n)]}{as + b} ds \right\} \quad (3.34)$$

Графической интерпретацией модели фрикционной усталости может являться функция плотности вероятности отказов, которую при сложном динамическом нагружении необходимо строить в нескольких координатах. В качестве примера на рисунке 3.3 представлено распределение плотности вероятности отказов трибосопряжения комбинированного процесса при трении образцов сплава ХН77ТЮР. Исходными данными для расчета послужили результаты соответствующих испытаний износостойкости этого сплава, представленные в работе [4].

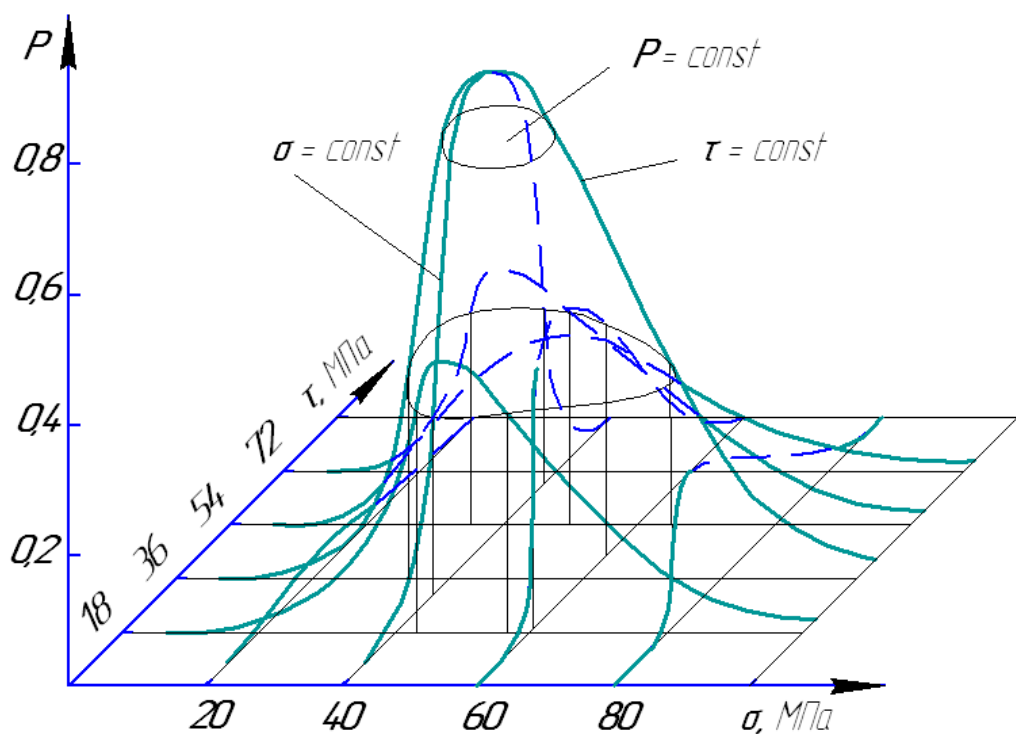


Рисунок 3.3 – Распределение плотности вероятности отказов трибосопряжения сплава ХН77ТЮР

Отмечается прямой и обратный эффекты взаимовлияния двух процессов: прямой эффект – изменение характеристик сопротивления усталостному разрушению из-за влияния процессов изнашивания; обратный эффект – интенсификация процесса изнашивания обоих элементов силовой системы, обусловленная циклическими деформациями одного из них. Для оценки долговечности трибосопряжений предлагается использовать деформационно-кинетический критерий малоциклового усталости [50]:

$$\int_0^{N_f} \frac{dN}{N_f(t, T)} + \int_0^{e_f} \frac{de}{\varepsilon_f(t, T)} + \int_0^{\Omega} \frac{d\omega^*}{\Omega_w(t, T)} = D \quad (3.35)$$

где N – число циклов нагружения; N_f – число циклов до разрушения; t – время эксплуатации узла трения; T – температура; e – односторонне накопленная в процессе пластического нагружения деформация; ε_f – односторонне накопленная в процессе пластического нагружения деформация в момент разрушения; ω^* – удельная работа разрушения единицы объема материала; Ω – плотность энергии; Ω_w – отношение всей выделившейся энергии за ресурс к объему слоя материала, износ которого допустим; $D = 0,2 \dots 5$ – константа.

Однако, кроме сложности расчетов, при этом возникает ряд трудностей: кроме температуры и частоты колебаний прямо определить другие параметры не представляется возможным, сложно оценить влияние изменения нормального нагружения во времени, а, учитывая многофакторность процесса разрушения, ряд коэффициентов и показателей степеней возможно выяснить только в процессе соответствующих исследований. Поэтому на основе принципов моделирования контактного взаимодействия пришлось проводить исследования в двух направлениях: оценки износостойкости и оценки качества поверхностного слоя с применением соответствующих установок, приборов и оборудования.

3.2 Влияние многокомпонентного динамического нагружения на износостойкость трибосопряжений

На современном этапе многие вопросы, связанные с повышением износостойкости и уменьшением потерь на трение, остаются невыясненными, несмотря на значительный прогресс, который достигнут в науке о трении и износе. Это обусловлено тем, что в зоне фрикционного контакта одновременно действует целый комплекс механических и физико-химических явлений, каждое из которых оказывает влияние на процесс трения и изнашивания.

Известно, что изнашивание может происходить по нескольким различным механизмам. Изменение того или иного фактора нагружения и появление нового фактора приводит к изменению механизма изнашивания, его физической картины. Отдельными авторами [10, 11] проводились исследования при суммарном действии некоторых факторов нагружения. Авторы этих исследований приходят к выводам о невозможности охватить закономерности процессов трения в условиях сложного нагружения в рамках единой теории. Обосновывается ведущая роль эксперимента в подобных исследованиях.

Дополнительное нагружение однократной или периодической ударной нагрузкой может привести к собственным контактными колебаниям, как в нормальном, так и в тангенциальном направлениях. Это, в свою очередь, может привести к снижению силы трения, которое и отмечалось в ряде работ [10, 17, 18]. Однако при этом может произойти многократное передислоцирование материала в объеме, что приведет к подготовке процесса образования трещины и ее распространению в контактной зоне.

Все это указывает на сложность процессов контактного взаимодействия твердых тел, которые происходят при наложении динамических нагрузок даже действующих в одном направлении. Однако сложное взаимодействие твердых тел в контактной зоне должно учитываться для построения

достоверных моделей контактирования и прогнозирования поверхностной прочности материалов при динамических нагрузках. Невзирая на то, что приблизительно ясно, какой вклад может вносить в процесс поверхностного разрушения каждый из факторов комбинированного нагружения, строгие количественные зависимости, которые показывают это влияние, пока не получены. Еще сложнее является получение зависимостей, которые устанавливают взаимное влияние друг на друга каждого из факторов комбинированного нагружения [11].

Тем не менее, многие детали трибосопряжений различных машин и механизмов в процессе эксплуатации находятся в условиях трехкомпонентного нагружения. При этом процессы трения и изнашивания, а также разрушение поверхностных слоев деталей определяются динамичностью нагружения в контакте (амплитудами взаимного перемещения в двух взаимно перпендикулярных направлениях при наличии переменной нормальной нагрузки). Подобные специфические условия контактного взаимодействия приводят к сложному напряженному состоянию, изменению свойств поверхностного слоя в зависимости от условий в контакте деталей трибосопряжения, что мешает, а в ряде случаев делает невозможным использование результатов исследований, приведенных разными авторами.

Повышение долговечности деталей трибосопряжений, которые работают в условиях трехкомпонентного нагружения возможно на основе исследований, которые позволяют описать физику процесса разрушения, изменения свойств поверхностного слоя и обоснования выбора конструктивно технологических мероприятий. Потеря работоспособности деталей происходит под воздействием экстремальных условий эксплуатации за счет изменений в поверхностных слоях металла. При этом установлено, что в исследованных поверхностных слоях изменений фазового состава не наблюдается, но заметны следы интенсивной пластической деформации.

Исследования по определению степени влияния условий динамического нагружения на интенсивность изнашивания различных сталей и сплавов: ВТ20, ВТ3-1, 40Х, ХН77ТЮР(ЭИ437Б), ХТН61, 60С2А были проведены на установке, схема которой изображена на рисунке 2.5. Оценивали интенсивность изнашивания при однокомпонентном нагружении (проскальзывании продольном), двухкомпонентном (удар с последующим продольным проскальзыванием) и трехкомпонентном (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях).

Условия проведения испытаний: амплитуда поперечных проскальзываний 0,05 мм; амплитуда продольных проскальзываний 0,1 мм; частота поперечных проскальзываний 30 Гц; частота продольных проскальзываний 66 Гц; нормальная нагрузка 20 Н, время испытаний до 4 часов. Режим одномерного безударного трения обеспечивался отключением механизма поперечных проскальзываний и снижением частоты продольных проскальзываний до 16,7 Гц и амплитуды продольных проскальзываний – до 0,05 мм. Результаты испытаний представлены в таблице 3.1 и на рисунках 3.4 и 3.5.

Испытания, проведенные в условиях трехкомпонентного нагружения, происходили с разрывом контакта, а, следовательно, контактное взаимодействие образцов носило ударный характер. В условиях переменного нормального нагружения разрыв контакта ведет к изменению его значения от нуля при отсутствии контактирования до очень больших значений в момент столкновения. С повышением энергии удара амплитуда нормального нагружения увеличивалась.

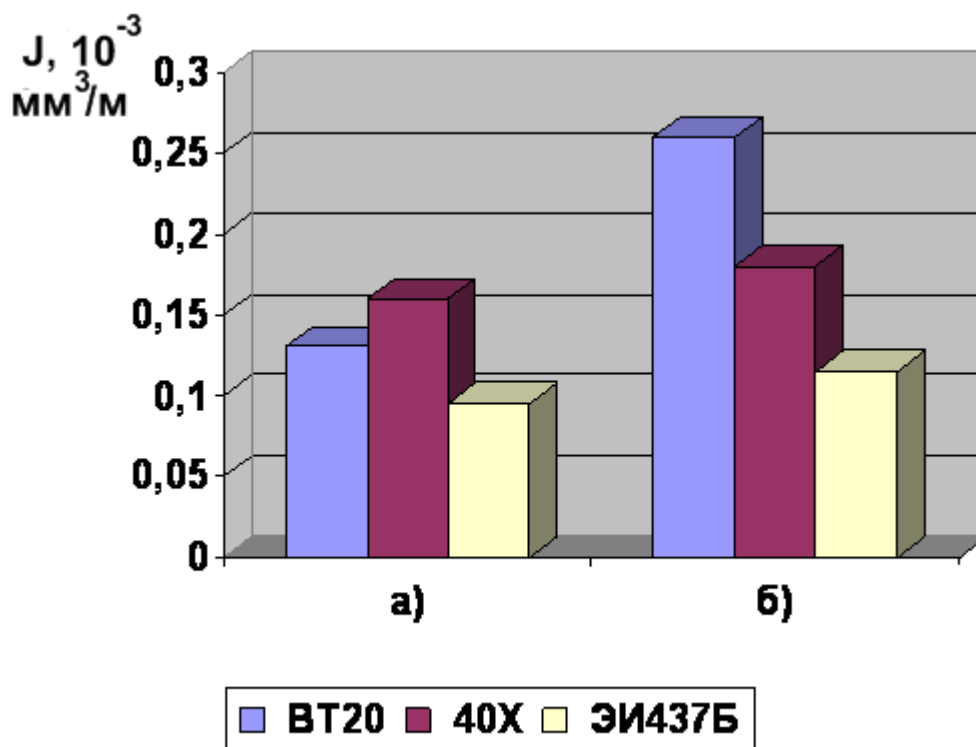
Как следует из полученных результатов, независимо от физико-химических свойств исследованных сталей и сплавов увеличение многокомпонентности динамического нагружения в контакте трибосопряжения приводит к снижению износостойкости металлов. Добавление ударной нагрузки (двухкомпонентное нагружение) в рассматриваемых условиях трения скольжения сопровождается повышением

интенсивности изнашивания образцов из титанового сплава ВТ20 в 2,2 раза, сплава ЭИ437Б – в 1,2 раза, стали 40Х – в 1,1 раза (рис. 3.4). Добавление к двухкомпонентному нагружению дополнительного проскальзывания в направлении перпендикулярном к первоначальному проскальзыванию (трехкомпонентное нагружение), сопровождается еще большим увеличением интенсивности изнашивания. Для указанных металлов отмечено увеличение интенсивности изнашивания в 1,3 – 1,4 раза (рис. 3.5) Соответствующие исследования на сплавах ХТН61 и 60С2А показали еще большее увеличение интенсивности изнашивания при трении с трехкомпонентным нагружением в сравнении с двухкомпонентным нагружением – в 2,5 и 1,7 раза.

Таблица 3.1 – Результаты испытаний влияния вида нагружения на интенсивность изнашивания

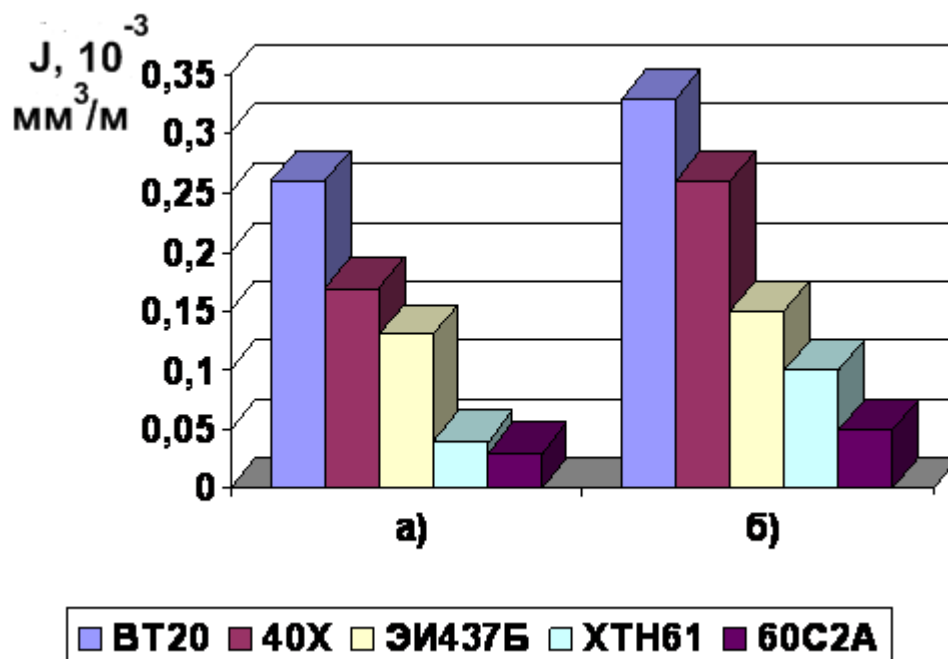
Матер. образца	Вид нагруж.	h, мм	F, мм ²	V, мм ³	R _z , мкм	R _{max} , мкм	L, м	I _v ·10 ⁻³ , мм ³ /м
ВТ20	однокомп	0,016	6,49	0,057	4,0	7,0	480	0,12
	двухкомп	0,047	9,8	0,250	5,0	10,0	960	0,26
	трехкомп	0,036	30,64	0,585	6,0	14,0	1776	0,33
40Х	однокомп	0,024	10,95	0,080	9,92	19,25	480	0,16
	двухкомп	0,046	12,46	0,176	14,5	14,5	960	0,18
	трехкомп	0,062	18,54	0,349	14,7	14,7	1368	0,25
ХН77ТЮР	однокомп	0,014	6,06	0,045	4,0	7,1	480	0,096
	двухкомп	0,017	6,38	0,111	4,9	11,5	960	0,115
	трехкомп	0,022	8,69	0,203	6,0	12,0	1368	0,15
ХТН61	двухкомп	0,028	2,64	0,041	6,5	11,0	960	0,04
	трехкомп	0,024	7,10	0,139	8,5	16,0	1368	0,10
60С2А	двухкомп	0,007	13,64	0,052	3,0	9,7	1920	0,03
	трехкомп	0,005	24,06	0,033	3,0	4,0	960	0,05

Примечание: h - суммарная глубина повреждения; R_{\max} , R_z - параметры шероховатости; F - средняя суммарная площадь поврежденных участков контактных поверхностей образцов; V -объемный износ; L - путь трения; J_v - объемная интенсивность изнашивания



а) – однокомпонентное (проскальзывание); б) – двухкомпонентное (удар с последующим проскальзыванием)

Рисунок 3.4 - Диаграмма изменения интенсивности изнашивания различных сплавов при однокомпонентном и двухкомпонентном нагружении



- а) - двухкомпонентное (удар с последующим проскальзыванием);
 б) - трехкомпонентное (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях)

Рисунок 3.5 - Диаграмма изменения интенсивности изнашивания различных сплавов при двухкомпонентном и трехкомпонентном нагружении

Существенное отличие в характере влияния вида нагружения на износостойкость различных металлов указывает на существенную разницу в физико-химических явлениях сопровождающих процесс формирования поверхностных слоев образцов при трении. Возникает необходимость комплексной оценки роли составляющих факторов сложного динамического нагружения в диссипативном механизме разрушения металлов при трении.

В связи с этим, для оценки усилия нагружения на интенсивность изнашивания было проведено 5 серий испытаний на износ образцов из сплавов ВТЗ-1 при трехкомпонентном нагружении с различным нормальным усилием нагружения на установке (рис.2.5.). Условия проведения испытаний приведены в таблице 3.2, результаты испытаний приведены в таблице. 3.3.

Как свидетельствуют полученные данные, при нагружении от 0 до 40 Н наблюдается повышение интенсивности изнашивания, при нагружении более 40 Н интенсивность изнашивания уменьшается. Снижение интенсивности изнашивания при нагрузках, больших критического значения, может быть результатом изменения механизма изнашивания.

Таблица 3.2 - Условия проведения испытаний при трехкомпонентном нагружении сплава ВТЗ-1

№	Амплит. продольн. проскальз мм	Частота продольн. проскальз. Гц	Амплит. поперечн. проскальз мм	Частота поперечн. проскальз. Гц	Норм. нагруж., Н
1	0,1	68	0,1	28,3	20
2	0,1	67,5	0,1	28,7	40
3	0,1	68,0	0,2	29,0	40
4	0,1	67,1	0,33	28,3	40
5	0,1	67,8	0,1	29,5	80

Таблица 3.3 - Результаты испытаний при трехкомпонентном нагружении сплава ВТЗ-1

№	h, мм	F, мм ²	V, мм ³	R _z , мм	R _{max} , мм	L · 10 ³ , м	$\bar{I}_v \cdot 10^{-4}, \frac{\ddot{i}}{i}^3$
1	0,04	25,19	0,503/1,068	0,004	0,008	2,21	2,28 /4,83
2	0,09	29,98	1,355/1,615	0,004	0,008	2,20	6,15 /7,33
3	0,06	27,57	0,827/ –	0,006	0,015	2,75	3,01/ –
4	0,054	29,12	0,786/–	0,007	0,012	3,51	2,24/ –
5	0,012	24,3	0,145/ –	0,004	0,006	2,22	6,54/ –

Примечания: 1. В числителе приведены данные измерений с помощью микроскопа и профилографа-профилометра, в знаменателе - с помощью прибора фирмы Delcam Plc.

2. h - суммарная глубина повреждения; R_{max} , R_z - параметры шероховатости; F – средняя суммарная площадь поврежденных участков контактных поверхностей образцов; V -объемный износ; L - путь трения; J_v - объемная интенсивность изнашивания

Для оценки влияния амплитуды проскальзываний на интенсивность изнашивания были проведены соответствующие исследования на образцах сплавов ВТ20, ХТН-61, 60С2А, 40Х при двухкомпонентном (ударе с проскальзыванием) и трехкомпонентном нагружении (проскальзывании в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и ударе) по методике, представленной в главе 2.3 на установке (рис.2.5). Условия проведения испытаний: амплитуда поперечных проскальзываний от 0 до 0,2 мм; амплитуда продольных проскальзываний 0,1 мм; частота поперечных проскальзываний 30 Гц; частота продольных проскальзываний 66 Гц; нормальная нагрузка 20 Н, время испытаний до 4 часов (табл.3.4).

Таблица 3.4 - Условия проведения испытаний

№	Матер. образца	Амплит. продольн. проск. , мм	Частота продольн. проск., Гц	Амплит. поперечн. проск. , мм	Частота поперечн. проск. , Гц	Норм. нагр., Н
1	Вт20	0,1	66	0,06 – 0,20	33	20
2				0 – 0,12	28	
3	ХТН-61	0,1	66	0 – 0,10	28,3	20
4	60С2А	0,1	66	0 – 0,08	33	20
5	40Х	0,1	66	0 – 0,20	33	20

Как показали опыты, для всех исследуемых сплавов ВТ20, ХТН-61, 60С2А, 40Х с повышением амплитуды поперечных проскальзываний возрастает износ образцов, что является результатом большего пути трения

при едином времени испытаний. Но повышение при этом и объемной интенсивности изнашивания указывает на изменение условий трения и состояния поверхностного слоя образцов. Объемная интенсивность изнашивания находилась как отношение объема изношенного материала к пути трения.

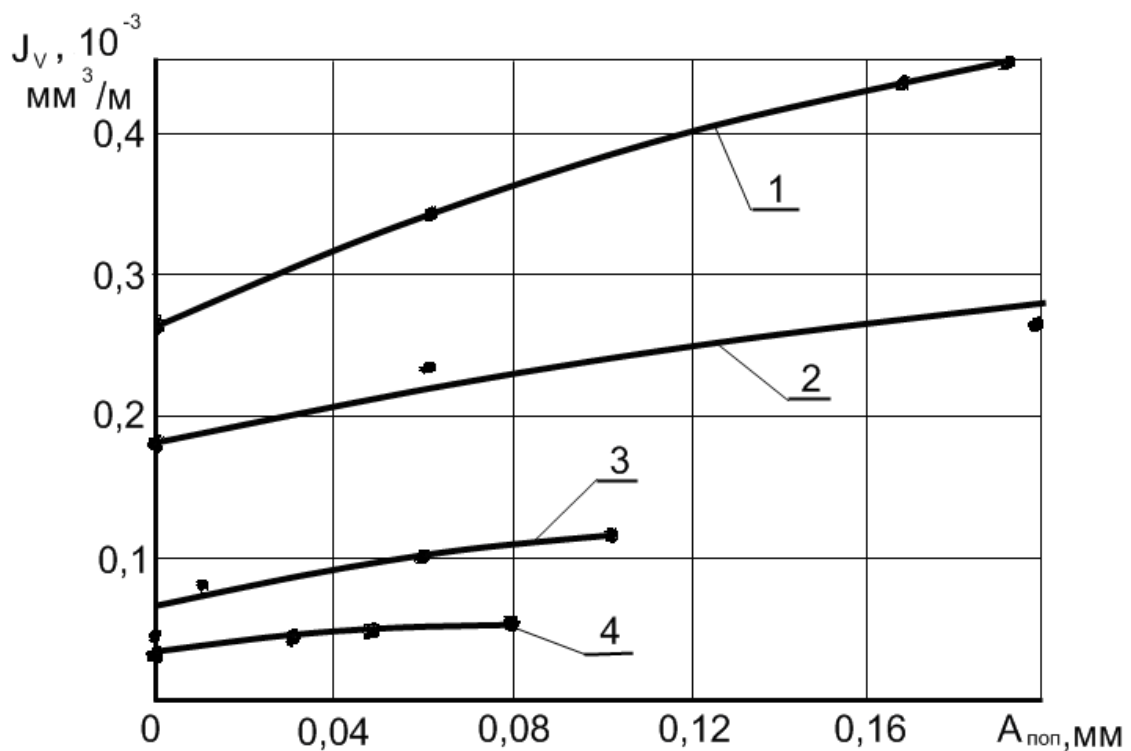
Наибольший износ и интенсивность изнашивания наблюдаются в процессе испытаний образцов из сплава ВТ20 и далее по мере убывания – 40Х, ХТН-61, 60С2А. При использованных условиях испытаний интенсивность изнашивания титанового сплава ВТ20 в 3,5 раза превышает этот показатель для исследованных марок сплавов (таблица 3.5, рисунок 3.6).

Таблица 3.5 - Результаты испытаний влияния амплитуды поперечных проскальзываний на интенсивность изнашивания при многокомпонентном динамическом нагружении

Матер. образца	$A_{\text{поп}}$, мм	h , мм	F , мм ²	V , мм ³	Rz , мкм	R_{max} , мкм	L , м	$I_v \cdot 10^{-3}$, мм ³ /м
ВТ20	0,06	0,036	30,64	0,585	6,0	14,0	1776	0,33
	0,17	0,068	30,29	1,074	4,5	12,0	2496	0,43
	0,20	0,054	33,31	0,949	6,0	10,5	1920	0,49
	0	0,032	17,89	0,312	11,5	36,5	960	0,33
	0,12	0,090	30,56	1,520	15,0	45,0	1450	1,05
ХТН-61	0	0,028	2,64	0,041	6,5	11,0	960	0,04
	0,01	0,028	6,94	0,099	10,0	26,0	1164	0,09
	0,05	0,024	7,10	0,139	8,5	16,0	1368	0,10
	0,10	0,048	5,28	0,112	8,0	11,0	1056	0,11
60С2А	0	0,007	13,64	0,052	3,0	9,7	1920	0,03
	0,03	0,007	9,11	0,090	5,0	9,5	2496	0,04
	0,05	0,005	24,06	0,033	3,0	4,0	960	0,05
	0,08	0,007	22,11	0,071	1,0	1,5	1220	0,06
40Х	0	0,046	12,46	0,176	14,5	14,5	960	0,18

	0,05	0,062	18,54	0,349	14,7	14,7	1368	0,25
	0,20	0,083	20,38	0,515	20,65	26,15	1920	0,27

Примечание: В таблице обозначены буквами: h - суммарная глубина повреждения; Rmax, Rz - параметры шероховатости; F – суммарная площадь поврежденных участков контактных поверхностей образцов; V - объемный износ; L - путь трения; I_v - объемная интенсивность изнашивания.



1 - сплав ВТ 20; 2 – сталь 40Х; 3 – сплав ХТН-61; 4 - сталь 60С2А

Рисунок 3.6 – Зависимость интенсивности изнашивания от амплитуды поперечных проскальзываний при износе образцов различных материалов.

Наличие поперечных проскальзываний при трении существенно повышает интенсивность изнашивания образцов в сравнении с износом при двухкомпонентном нагружении ($A_{\text{поп}} = 0$). Сообщение образцам поперечных проскальзываний с амплитудой до 0,08 мм приводит к увеличению объемной

интенсивности изнашивания для сплава ВТ 20 в 1,38 раз, 60С2А – 1,7 раз, ХТН-61 – 2,6 раз по сравнению с объемной интенсивностью изнашивания при двухкомпонентном нагружении.

При этом зависимость объемной интенсивности изнашивания от амплитуды поперечных проскальзываний является нелинейной и ее характер для различных металлов существенно отличается. Увеличение амплитуды поперечных проскальзываний более определенного предельного значения не приводит к росту объемной интенсивности изнашивания. Для сплава ХТН-61 эта величина составляет 0,1 мм, для стали 60С2А – 0,06 мм, для сплава ВТ20 и стали 40Х - около 0,3 мм. Как следует из представленных результатов, чем более износостойким в условиях опытов является материал, тем меньше величина предельного значения амплитуды поперечных проскальзываний, т.е. тем быстрее материал «приспосабливается» к изменению поперечных проскальзываний при трении в условиях сложного трехкомпонентного нагружения.

Повреждение поверхностей образцов происходит в результате смятия и пластического оттеснения металла во все стороны. Однако сложный и неоднозначный характер зависимостей износостойкости исследуемых материалов от амплитуды поперечных проскальзываний указывает на существенную разницу в физико-химических явлениях сопровождающих процесс формирования поверхностных слоев образцов при трении.

3.3 Процессы изнашивания трибосопряжений при многокомпонентном динамическом нагружении и высоких температурах

Большая часть трибосопряжений, в частности, авиационных ГТД, работает в условиях многокомпонентного динамического нагружения. При этом возникает комбинированное воздействие высоких температур, свойств газовой среды и взаимного перемещения деталей с наличием вибраций, действующих в различных направлениях, в том числе присутствия ударной

нагрузки. Без учета всего комплекса факторов нагружения происходит искажение результатов исследования и создание картины процесса изнашивания мало отвечающей реальной.

В настоящее время одним из наиболее перспективных материалов для деталей, которые эксплуатируются в экстремальных условиях, является сплав ХТН-61. Этот сплав имеет заэвтектическую структуру с первичными зёрнами карбида $(\text{Ti}, \text{Nb})\text{C}$ и эвтектикой $\text{Co}+(\text{Ti}, \text{Nb})\text{C}$, характеризуется двухфазностью, одна фаза матричная, вторая – карбидная. Высокая износостойкость этого сплава достигается равномерным распределением высокопрочной матричной фазы твердого раствора на основе кобальта, что позволяет, в частности, эффективно использовать его для напаяк на бандажные полки лопаток ГТД. Сложный химический состав сплава ХТН-61 предполагает всестороннее изучение его износостойкости в условиях наиболее приближенных к эксплуатационным.

В общем случае физико-химическое взаимодействие твердых тел при контактировании характеризуется протеканием пластической деформации поверхностей. Условия нагружения в большей степени определяют состояние поверхностного слоя и износостойкость контактирующих деталей, а высокие температуры, являющиеся фактором, активизирующим диффузные процессы в зоне трения, снижают показатели механической прочности.

Кроме того, температура также влияет на степень протекания поверхностных реакций и, особенно, на межкристаллитное взаимодействие. Для определенных температур может наблюдаться гомогенизация хрупких выделений второй фазы, укрупнение или растворение упрочняющей γ' -фазы и сфероидизация охрупчивающих прослоек MeC [83]. С другой стороны, повышение температуры способствует интенсификации окислительных процессов, что не может не сказаться на интенсивности изнашивания.

Известно, что изнашивание жаропрочных сплавов [84, 85, 86] может происходить по нескольким различным механизмам. Различный характер износа в зависимости от температуры имеет место как для жаропрочных

сплавов на основе Ni и Co, так и для мягких сталей на основе Fe. Изменение того или иного фактора нагружения и появление нового фактора приводят к изменению механизма изнашивания, его физической картины.

Для исследований износостойкости подобных трибосопряжений были разработаны специальные устройства и методики испытаний, которые позволяют реализовать условия различных видов сложного нагружения при трении с высокими температурами окружающей среды [87]. При этом появляется возможность получать и изучать функциональные зависимости фрикционно-износных характеристик материалов пары, осуществлять сравнительную оценку фрикционных пар, производить физическое моделирование процессов в реальных трибосопряжениях.

Как показали результаты предварительно проведенных исследований, величина и распределение износа по контактной поверхности при трении зависит от распределения нормальной динамической нагрузки. Многокомпонентный характер нагружения приводит к напряженному состоянию поверхностных слоев материала, что сопровождается повышенным износом. Изменение характера нагружения при трении приводит к изменению состояния поверхностного слоя и, как следствие, изменению износостойкости трибосопряжения [88].

С целью выявления особенностей износостойкости сплава ХТН-61 в условиях высоких температур и сложного нагружения проводились испытания на стенде [87] при температурах 20, 500, 900 и 1000°C в воздушной среде. Контактное взаимодействие двух плоских образцов моделировалось в режиме соударения с последующим проскальзыванием. Нормальная удельная ударная нагрузка составляла от 0 до 0,6 Н/мм², взаимное перемещение образцов происходило с амплитудой 0,1 мм и частотой 66 Гц, время испытаний – 2 часа. Результаты испытаний получены аналогичные данным, представленным в работе [3].

Графики интенсивности изнашивания в зависимости от температуры испытаний приведены на рисунке 3.7.

Снижение износа при температурах до 600...700 °С объясняется образованием прочно сцепленной с металлом оксидной пленки, действующей наподобие твердой смазки [85, 86]. Происходит трение оксида по оксиду и повышение температуры способствует более быстрому образованию оксидной пленки. Дальнейшее повышение температуры сопровождается увеличением интенсивности изнашивания вследствие потери несущей способности поверхностного слоя.

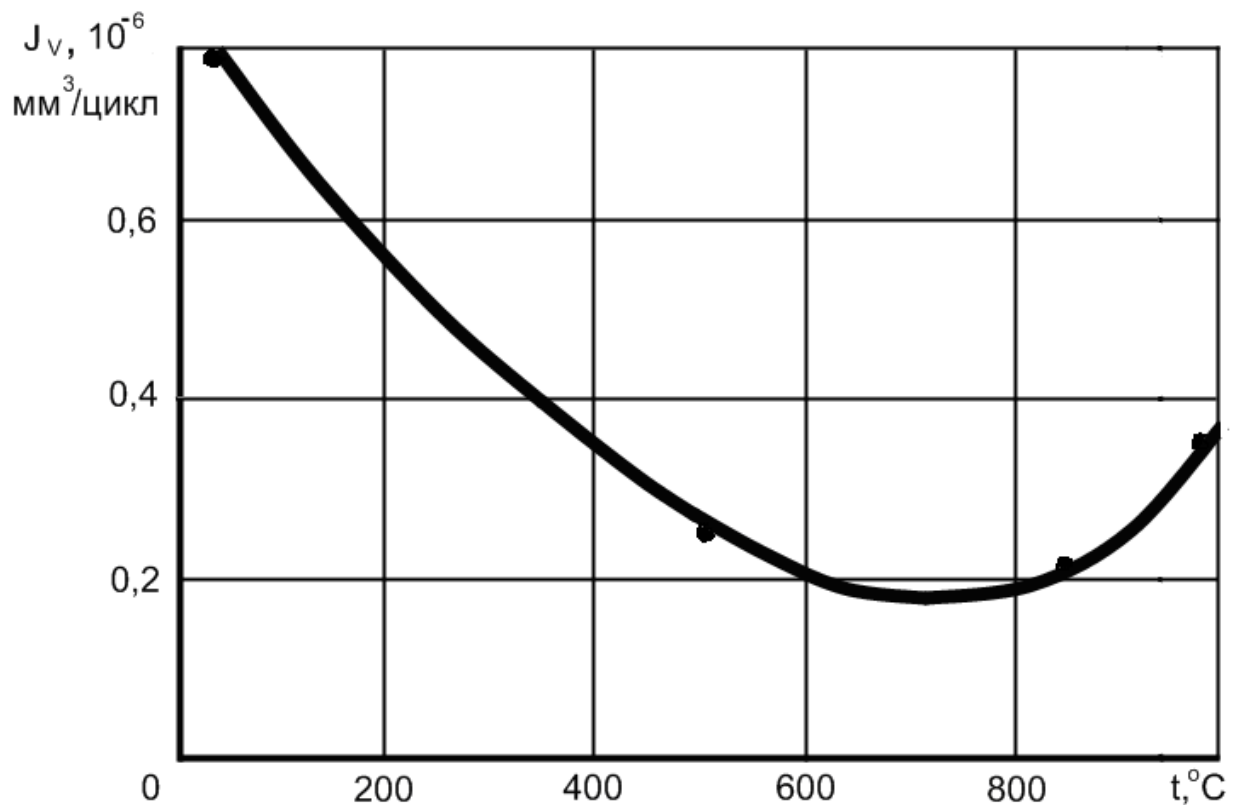


Рис. 3.7 – Зависимость изменения интенсивности изнашивания сплава ХТН-61 от температуры испытаний [3].

Полученный характер зависимостей, по-видимому, может свидетельствовать о смене механизма деформации в поверхностных слоях контактируемых материалов. При повышенных температурах (выше 0,4 – 0,5 $T_{пл}$) пластичность дисперсионно-упрочненных никелевых сплавов быстро уменьшается, что в свою очередь связано с переходом характера разрушения от транскристаллитного к интеркристаллитному в результате увеличения

степени зернограничного проскальзывания [83]. Приложение динамической нагрузки при контактном взаимодействии усиливает этот процесс.

Появлению переходной зоны также способствуют окислительные процессы. При этом более толстый слой образуется во впадинах неровностей поверхности, так как по вершинам оксидный слой под действием нормальной нагрузки постоянно дробится и частично уносится, способствуя тем самым увеличению фактической площади контакта и снижению удельной нагрузки в контакте, а, следовательно, снижению интенсивности изнашивания. С повышением температуры уменьшается время перехода от пластической к упругой деформации, формированию равновесной шероховатости и быстрее наступает период установившегося износа.

И если при нормальных температурах ведущим является усталостный вид изнашивания, то при повышенных температурах происходит его замедление, так как имеющиеся на поверхности микротрещины снимаются в процессе изнашивания, не давая возможности им развиваться. Вместе с тем образование защитного слоя не исключает процессов передеформирования металла, а лишь замедляет их [3]. При этом для обеспечения высокой износостойкости необходимо, чтобы отношение скоростей образования и истирания защитного слоя стремилось к единице. Если же это отношение будет больше единицы, то при увеличении толщины слоя прочность его сцепления с основным металлом снижается, повышается вероятность его разрушения и перехода к катастрофическому изнашиванию.

Экспериментально [89] установлено, что отношение твердости образовавшейся пленки на поверхности трения к твердости основного материала характеризует износостойкость материалов при высоких температурах. Однако при высокой твердости поверхностного защитного слоя вероятность охрупчивания и разрушения последнего значительно увеличивается, способствуя тем самым переходу к другому виду изнашивания, например, к абразивному.

3.4 Процессы изнашивания трибосопряжений при многокомпонентном динамическом нагружении и отрицательных температурах

Как было отмечено в главе 1.3, не наблюдается общих закономерностей увеличения циклической прочности материалов при снижении температуры. Для одних металлов такое повышение может происходить во всем диапазоне низких температур, а для других рост сопротивления усталостному разрушению ограничивается определенными температурными интервалами, вне которых циклическая прочность остается постоянной или имеет тенденцию к уменьшению [31]. При изучении усталости в низкотемпературных условиях рекомендуется проводить испытания каждого исследуемого материала [32].

Учитывая, что большая часть трибосопряжений эксплуатируется в условиях низких климатических температур (до -60°C), представляют интерес процессы изнашивания рассматриваемых материалов при условиях включающих наложение отрицательных температур и различных видов динамического нагружения.

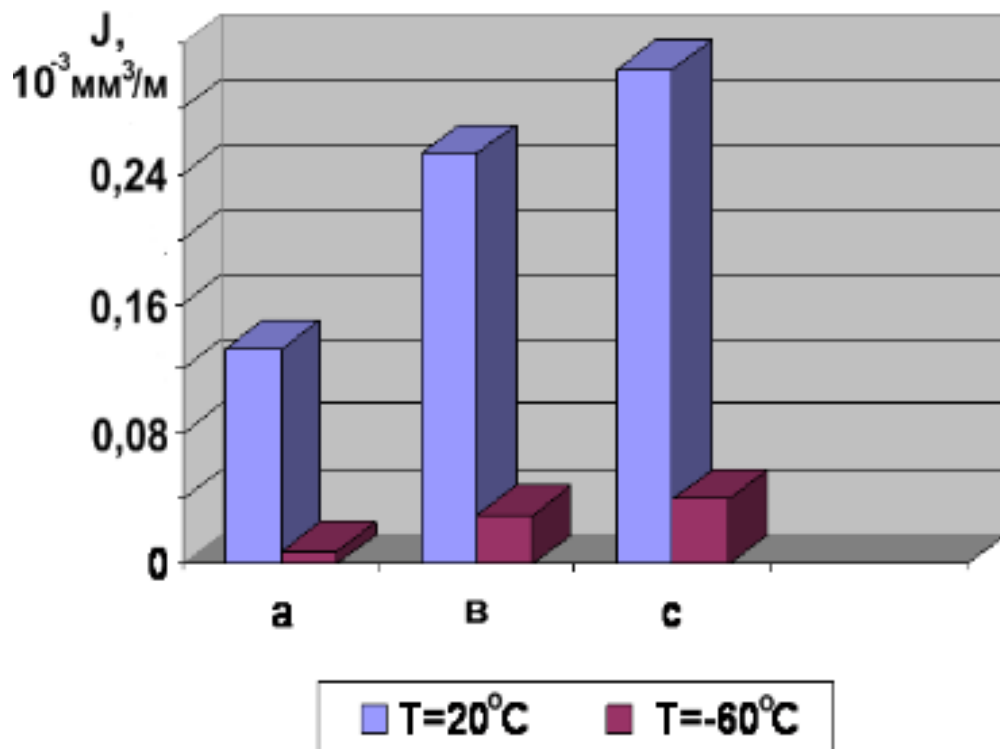
Был проведен ряд испытаний на износ при нормальной и отрицательной температуре образцов из сплавов ВТ20, ХН77ТЮР, ХТН-61 при однокомпонентном нагружении (проскальзывании), двухкомпонентном (удар с последующим проскальзыванием) и трехкомпонентном (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях) на установке рис.2.5. Нормальная удельная ударная нагрузка составляла от 0 до $0,6 \text{ Н/мм}^2$, взаимное перемещение образцов в продольном направлении происходило с амплитудой $0,17 \text{ мм}$ и частотой 66 Гц , в поперечном направлении – $0,05 \text{ мм}$ и частотой 33 Гц , время испытаний – от 2 до 4 часов. Отрицательная температура при испытаниях достигалась за счет нагнетания жидкого азота в камеру узла задания температуры.

Результаты испытаний приведены в таблице 3.6 и на рисунках 3.8 – 3.10.

Таблица 3.6 - Результаты испытаний при различных видах нагружения и температурах.

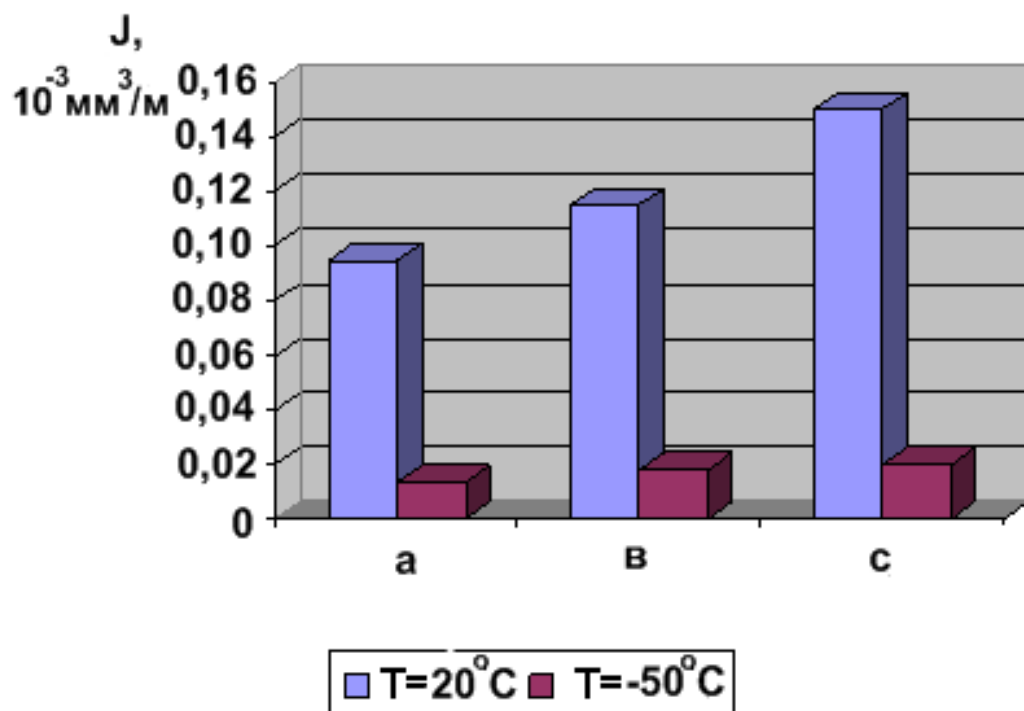
Матер. образца	Вид нагруж.	T, °C	h, мм	F, мм ²	V, мм ³	L, м	I _v ·10 ⁻³ , мм ³ /м
BT20	однокомп	20	0,008	6,87	0,063	480	0,13
		-60	0,0005	6,00	0,003	480	0,008
	двухкомп	20	0,024	9,8	0,242	960	0,255
		-60	0,005	6,2	0,032	960	0,03
	трехкомп	20	0,036	11,63	0,417	1368	0,305
		-60	0,004	9,75	0,052	1368	0,04
ХТН-61	однокомп	20	0,0032	5,94	0,019	480	0,039
		-20	0,008	2,34	0,023	960	0,024
		-40	0,007	3,25	0,024	1080	0,021
		-50	0,006	3,91	0,025	1200	0,020
	двухкомп	20	0,028	2,64	0,041	960	0,04
		-50	0,005	6,82	0,047	1920	0,024
	трехкомп	20	0,024	7,10	0,139	1368	0,10
		-50	0,004	7,28	0,040	490	0,08
ХН77ТЮР	однокомп	20	0,007	6,06	0,045	480	0,096
		-50	0,003	3,14	0,017	1360	0,013
	двухкомп	20	0,017	6,38	0,111	960	0,115
		-50	0,008	4,80	0,049	2680	0,018
	трехкомп	20	0,022	8,69	0,203	1368	0,15
		-50	0,008	5,47	0,055	2730	0,020

Примечание: В таблице обозначены буквами: h - глубина повреждения; F - суммарная площадь поврежденных участков контактных поверхностей образцов; V - объемный износ; L - путь трения; I_v - объемная интенсивность изнашивания, T – температура испытаний.



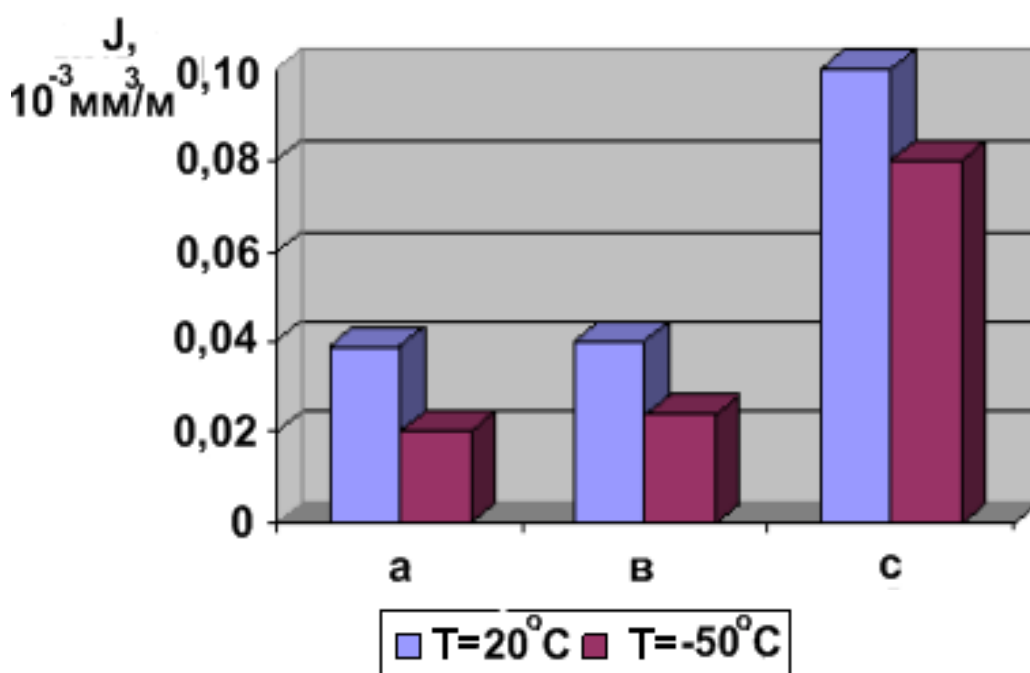
а – однокомпонентное (проскальзывание); в – двухкомпонентное (удар с последующим проскальзыванием); с - трехкомпонентное (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях)

Рисунок 3.8 – Диаграмма изменения интенсивности изнашивания сплава ВТ20 при различных видах нагружения



а – однокомпонентное (проскальзывание); в – двухкомпонентное (удар с последующим проскальзыванием); с - трехкомпонентное (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях)

Рисунок 3.9 – Диаграмма изменения интенсивности изнашивания сплава ХН77ТЮР при различных видах нагружения



а – однокомпонентное (проскальзывание); в – двухкомпонентное (удар с последующим проскальзыванием); с - трехкомпонентное (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях)

Рисунок 3.10 – Диаграмма изменения интенсивности изнашивания сплава ХТН-61 при различных видах нагружения

Как следует из представленных результатов, износостойкость исследуемых материалов при рассматриваемых условиях трения и отрицательных температурах выше, чем при положительных температурах независимо от вида нагружения. При этом физико-химические свойства

контактирующего материала определяют величину изменения интенсивности изнашивания. Чем более износостойким является материал, тем в меньшей степени влияет температура на изменение интенсивности изнашивания.

Так, для сплава ВТ20 (рис. 3.8) трение с однокомпонентным нагружением при отрицательной температуре (-60°C) в сравнении с трением при $T=20^{\circ}\text{C}$ характеризуется снижением интенсивности изнашивания в 16 раз, с двухкомпонентным и трехкомпонентным нагружением – соответственно в 8,5 и 7,6 раз. Как было отмечено в разделе 3.1, сплавы ХН77ТЮР и ХТН-61 более износостойкие независимо от вида нагружения в рассматриваемых условиях трения (рис. 3.5). Повышение износостойкости этих сплавов при отрицательных температурах (-50°C) происходит соответственно при однокомпонентном нагружении в 6,3 и 1,95 раза, при двухкомпонентном нагружении – в 6,3 и 1,6 раза и при трехкомпонентном нагружении – в 7,5 и 1,25 раза.

Усложнение характера нагружения образцов при трении приводит к увеличению износа, как при положительных, так и при отрицательных температурах. В частности сообщение образцам поперечных проскальзываний с амплитудой до 0,05 мм (трехкомпонентное нагружение) приводит к увеличению объемной интенсивности изнашивания сплава ХН77ТЮР в 1,3 раза при положительной и отрицательной температурах по сравнению с объемной интенсивностью изнашивания при двухкомпонентном нагружении. Для сплавов ХТН-61 и ВТ20 эти изменения составляют соответственно в 2,5 раза и в 1,2 раза при положительной температуре, в 3,2 раза и в 1,3 раза – при отрицательной температуре.

Для исключения влияния многокомпонентного характера нагружения на взаимосвязь отрицательной температуры и износостойкости сплава ХТН-61 были проведены дополнительные испытания при трении в условиях наиболее простого однокомпонентного нагружения с различными температурами. Результаты исследований представлены на рисунке 3.11. Полученная зависимость нелинейная и указывает на то, что при

однокомпонентном нагружении и температурах ниже минус 50°C износостойкость сплава существенно не меняется. Учитывая отмеченное ранее уменьшение степени влияния отрицательной температуры на интенсивность изнашивания при повышении компонентности характера нагружения можно предположить, что стабилизация интенсивности изнашивания при температурах ниже минус 50°C будет характерна независимо от компонентности нагружения.

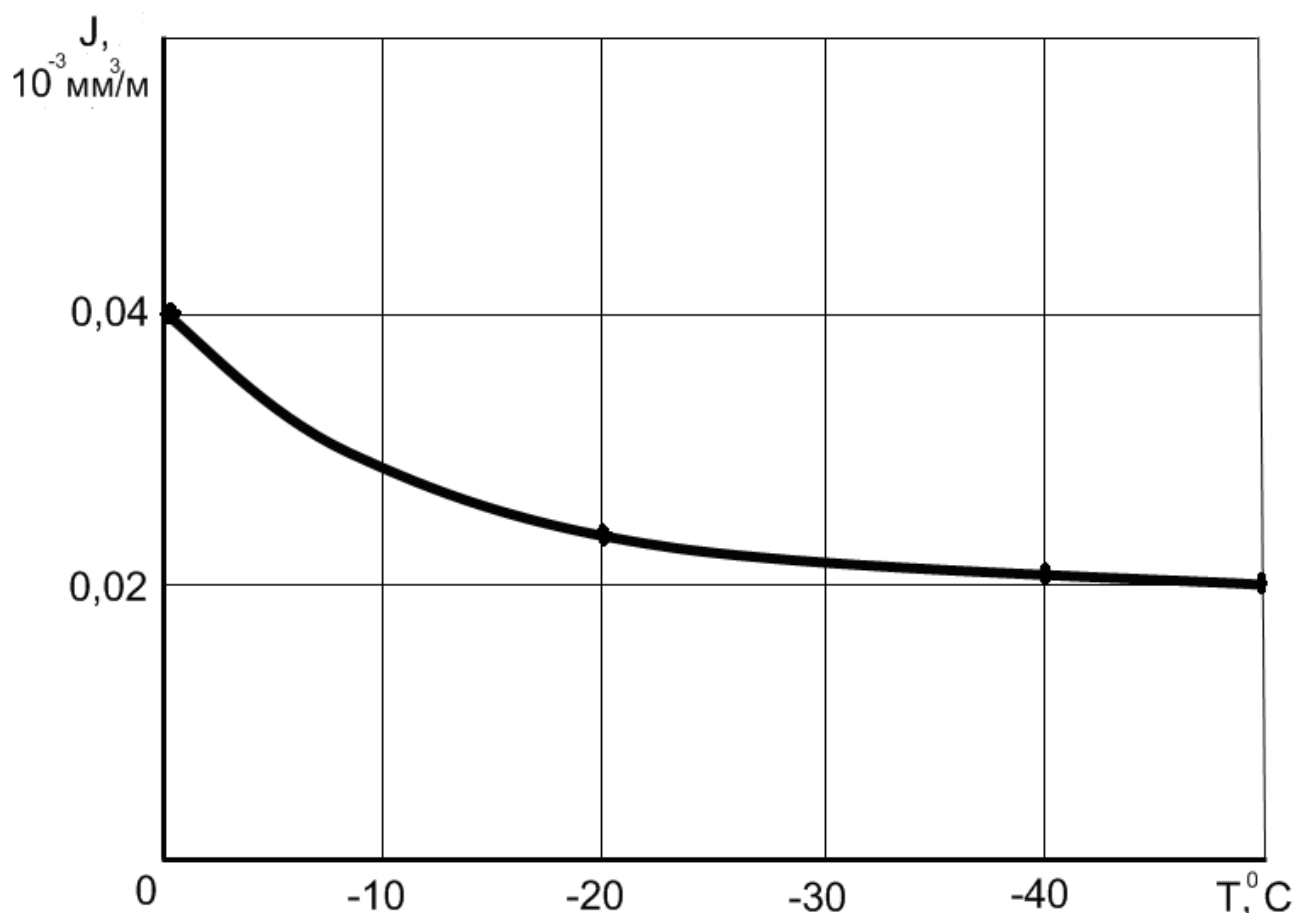


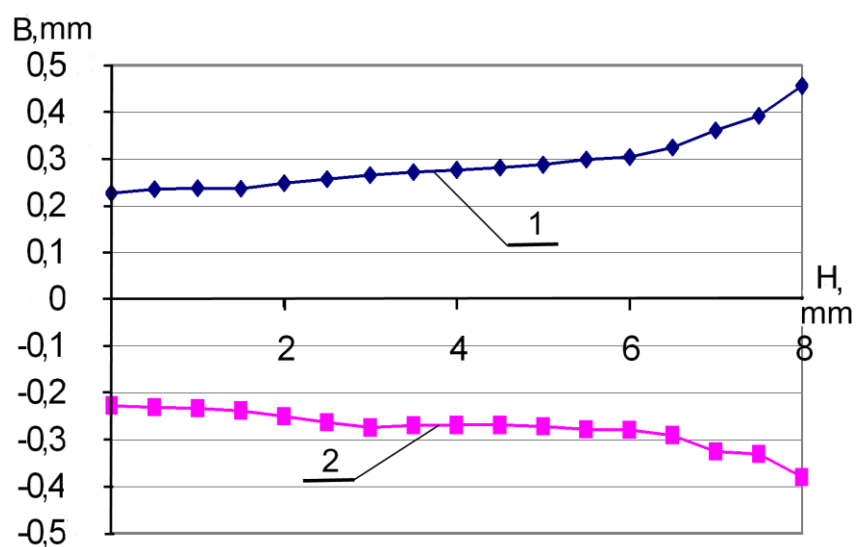
Рисунок 3.11 – Изменение интенсивности изнашивания сплава ХТН-61 при однокомпонентном нагружении и различных температурах

Неравномерность влияния вида динамического контактного нагружения на изменение интенсивности изнашивания исследуемых материалов при отрицательных температурах указывает на сложный характер их взаимосвязи. Для рассмотрения физико-механических процессов при

низкотемпературном трении необходима оценка и анализ модификации состояния поверхностного слоя. Как указывают различные авторы [40 - 43] характер закономерностей и количественная величина интенсивности изнашивания полностью определяются механическими свойствами материала, зависящими от его структуры, и степенью влияния на эти свойства низких температур.

3.4 Оценка износа поступательных плоскостных пар IV класса с периодическим ударным разрывом контакта (типа «направляющая-цепь»)

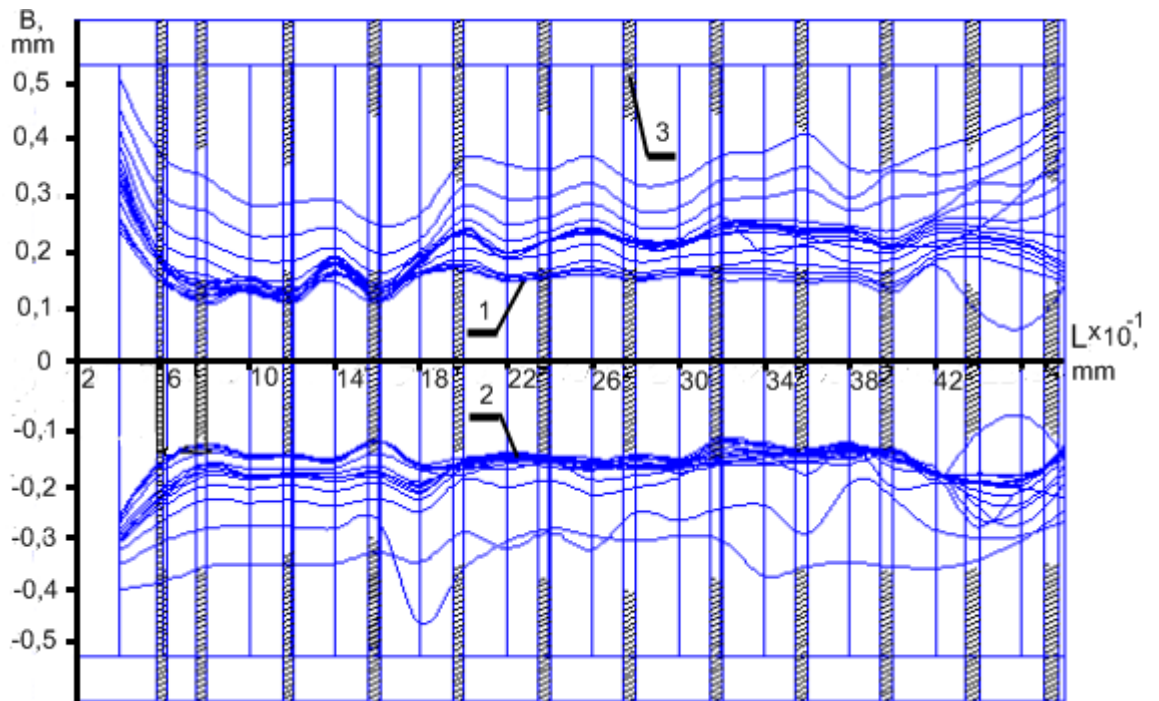
Результаты эксплуатации трибосопряжений типа «направляющая-цепь» показывают, что в процессе износа ширина паза направляющей увеличивается. Проведенными измерениями установлено, что паз в поперечном сечении приобретает форму криволинейной трапеции, т.е. имеет место нелинейность увеличения ширины паза при уменьшении глубины (рис.3.12). В ходе подконтрольной эксплуатации в результате износа ширина паза в среднем увеличилась за первые 138 мин на 0,081 мм, а за следующие 168 мин – еще на 0,135 мм.



1 – первая сторона паза; 2 – вторая сторона паза.

Рисунок 3.12 - Распределение износа по глубине паза направляющей

Вдоль паза направляющей наблюдается волнообразное распределение износа (рис.3.13). Оно характеризуется наличием многих, приблизительно одинаковых, максимумов и минимумов не связанных с местами размещения контактной сварки. Волнообразный характер износа может свидетельствовать о наличии поперечных колебаний при контакте с цепью в плоскости, перпендикулярной плоскости передачи (между стенками паза), наличии стоячих волн.



1 – первая сторона паза; 2 – вторая сторона паза;
3 – места контактной сварки.

Рисунок 3.13 - Распределение износа по длине паза направляющей с учетом размещения мест контактной сварки.

Неравномерное изнашивание противоположных стенок паза направляющей сопровождающееся изменением зазора и увеличением при этом вибраций, волнообразный характер износа по длине паза направляющей указывают на сложный характер взаимодействия цепи и направляющей.

Наличие поперечных колебаний цепи наблюдается визуально в стробоскопическом освещении. При этом с помощью бинокулярного микроскопа измерили амплитуду колебаний, которая составила по длине направляющей в первой трети от конца направляющей - 6,3 мм, во второй трети - 6,6 мм; в третьей - 6,6 мм. Частота поперечных колебаний цепи составила 84,2...90 Гц.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно заключить, что износ трибосопряжения типа «направляющая-цепь» происходит в условиях сложного взаимодействия в контактной зоне, что должно учитываться при построении моделей контактирования и прогнозирования поверхностной прочности материалов при рассматриваемых динамических нагрузках.

Выводы

1. Трехкомпонентное нагружение с наличием поперечных проскальзываний существенно повышает интенсивность изнашивания образцов при исследованных условиях по сравнению с износом в процессе двухкомпонентного нагружения (удар и продольное проскальзывание). Сообщение образцам поперечных проскальзываний с амплитудой до 0,08 мм приводит к увеличению объемной интенсивности изнашивания для сплава ВТ 20 в 1,38 раз, 60С2А – 1,7 раз, ХТН-61 – 2,6 раз по сравнению с объемной интенсивностью изнашивания при двухкомпонентном нагружении. С увеличением амплитуды поперечных проскальзываний интенсивность изнашивания увеличивается. При этом увеличение усилия нормального нагружения может приводить как к увеличению, так и снижению интенсивности изнашивания.

2. Зависимость объемной интенсивности изнашивания от амплитуды поперечных проскальзываний является нелинейной и ее характер для различных металлов существенно отличается. Увеличение амплитуды поперечных проскальзываний более определенного предельного значения не приводит к росту объемной интенсивности изнашивания. Чем более

износостойким в условиях опытов является материал, тем меньше величина предельного значения амплитуды поперечных проскальзываний. Для сплава ХТН-61 эта величина составляет 0,1 мм, для стали 60С2А – 0,06 мм, для сплава ВТ20 - около 0,3 мм.

3. Износостойкость исследуемых материалов при рассматриваемых условиях трения и отрицательных температурах выше, чем при положительных температурах независимо от вида нагружения. При этом физико-химические свойства контактирующего материала определяют величину изменения интенсивности изнашивания. Чем более износостойким является материал, тем в меньшей степени влияет температура на изменение интенсивности изнашивания.

4. Износ трибосопряжения типа «направляющая-цепь» и формирование поверхностного слоя контактирующих деталей происходит при реализации структурной приспособляемости в условиях сложного нагружения. При этом реализуется комплекс явлений, связанных с деформацией тончайших поверхностных слоев металла, их взаимодействием с химически активными компонентами смазочно-охлаждающей технологической среды.

РАЗДЕЛ 4

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СОПРЯЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ТЕРМОКОНТАКТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Рассматриваемые процессы контактного взаимодействия, как уже отмечалось ранее, весьма сложны и многообразны и от их раскрытия зависит насколько эффективным будет применение тех или иных способов по управлению изнашиванием материалов в специфических условиях. Для более полного изучения названных процессов необходимо оценить состояние поверхностного слоя, влияние нагрузочных параметров и, прежде всего, таких как амплитуда продольного и поперечного проскальзываний на это состояние при воздействии нормальных, повышенных и пониженных температур с использованием достаточно информативных современных средств и методик исследования.

4.1 Влияние нагрузочных параметров на состояние поверхностного слоя различных материалов.

4.1.1 Анализ состояния поверхностного слоя трибоспектральным методом

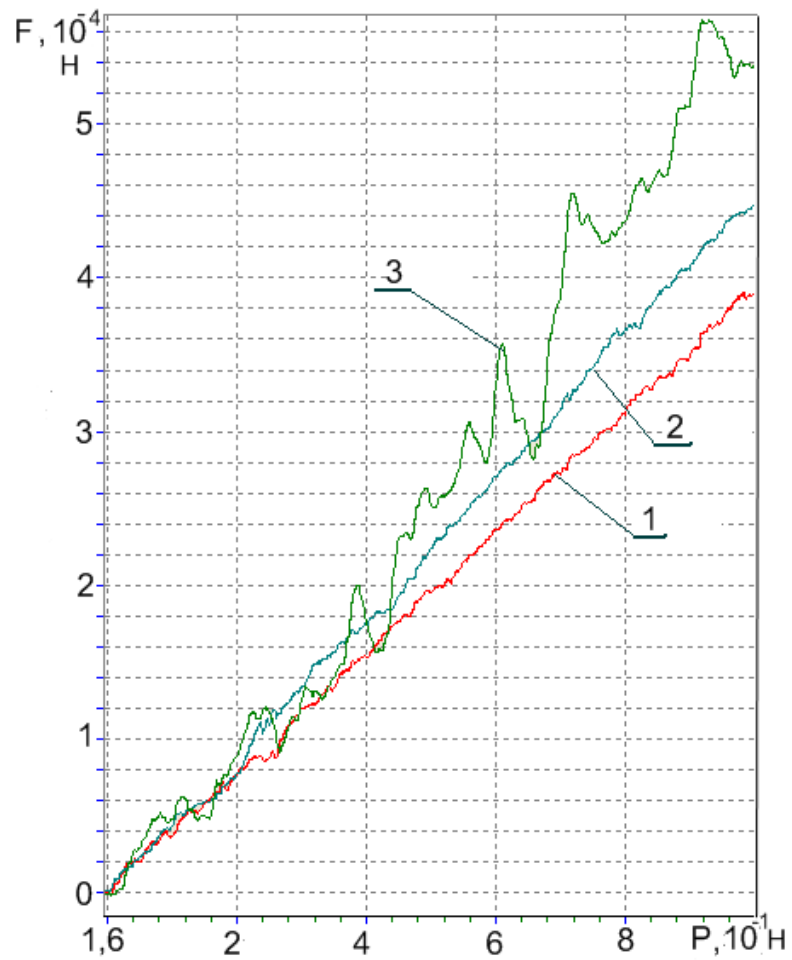
Определение закономерностей поверхностного разрушения анализируемых материалов при трении в условиях многокомпонентного нагружения потребовало исследований физико-механических свойств поверхностного слоя и топографии поверхности изношенных образцов. Физико-механические свойства поверхностного слоя образцов определяли методами непрерывного вдавливания и сканирования индентором на

специальном приборе "Микрон-гамма", а также на основании изменения значений работы выхода электрона на специально сконструированной установке. Топографию поверхности изношенных образцов - на бесконтактном 3D профилографе "Микрон-альфа" по методике, представленной в главе 2.4.

Режимы сканирования: величина нагрузки на индентор – 0,1 Н; скорость нагружения – 0,01 Н/с; скорость сканирования - 40 мкм/с.

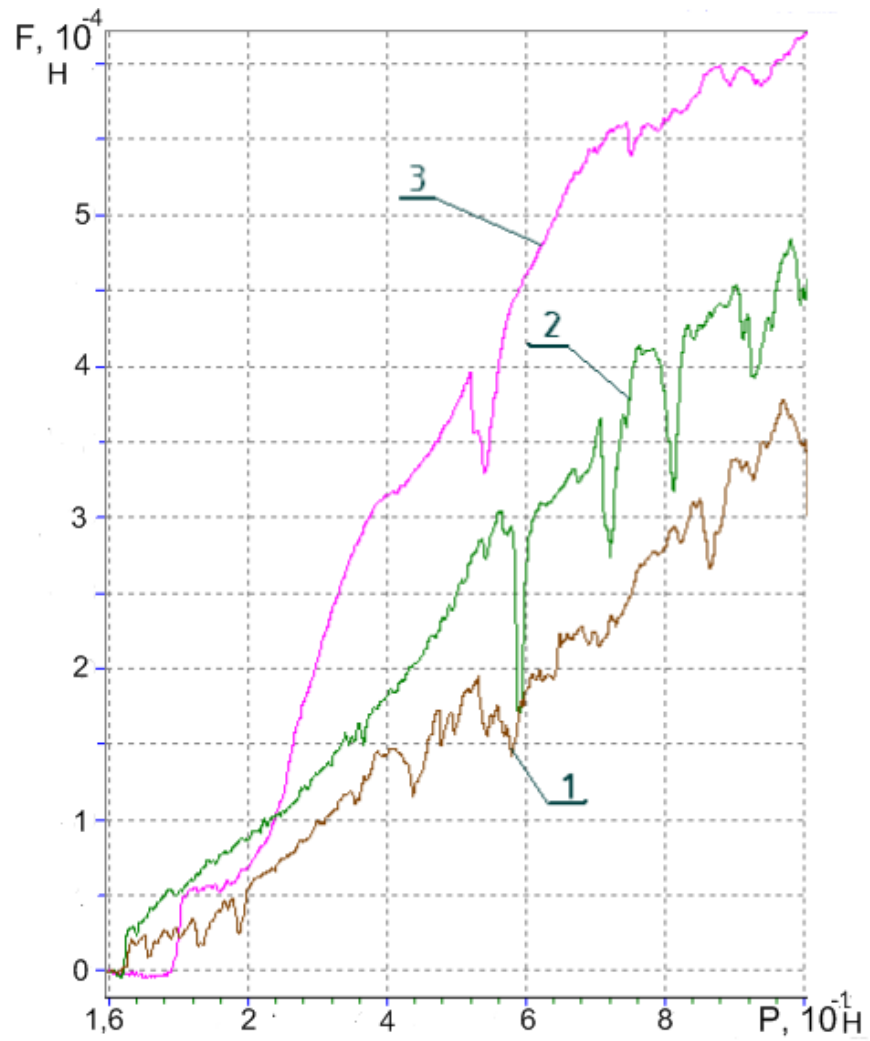
Результаты исследований, проведенные на приборе "Микрон-гамма", указывают на то, что износостойкость деталей трибосопряжений в значительной мере зависит от состояния поверхностного слоя контактирующих деталей. Как свидетельствуют показатели износа (рис. 3.5) и анализ полученных трибограмм (рис.4.1 – 4.3), трехкомпонентное нагружение и повышение амплитуды поперечных колебаний приводят к выравниванию прочностных и деформационных свойств поверхностного слоя, что сопровождается уменьшением разброса силы трения при сканировании соответствующих образцов. Повышенный износ происходит у деталей с равнопрочным поверхностным слоем. Этому способствует повышение сложности нагружения в трибосоединении.

Наиболее наглядно отмеченное положение можно наблюдать по изменению показателей поверхностного слоя образцов стали 60С2А (рис.4.1). Двухкомпонентное нагружение в процессе испытаний (трибограмма 3), в отличие от трехкомпонентного (трибограммы 1 и 2), приводит к образованию поверхностного слоя, имеющего фрагменты различной величины с увеличенным разбросом прочности. При этом изменение прочности поверхностного слоя составило до 35%.



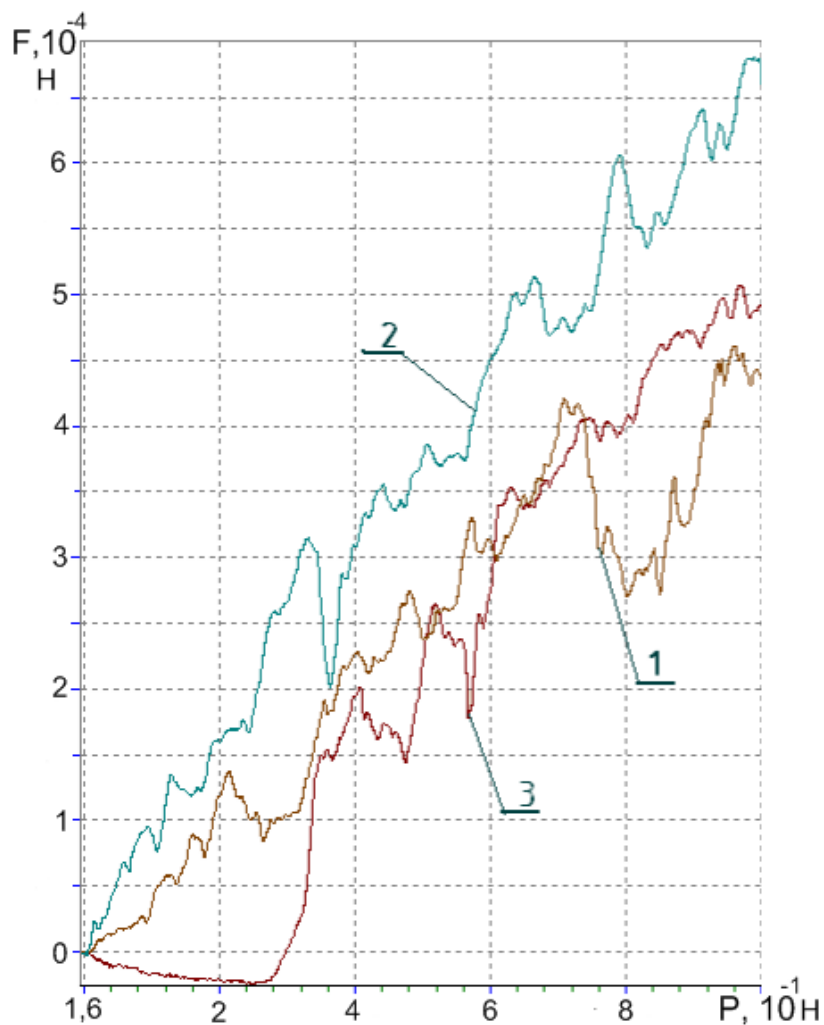
- 1 - амплитуда поперечных проскальзываний 0,08 мм;
- 2 - амплитуда поперечных проскальзываний 0,06 мм;
- 3 - амплитуда поперечных проскальзываний 0 мм

Рисунок 4.1 - Трибограммы при сканировании образцов из стали 60С2А после испытаний с различными амплитудами поперечных проскальзываний (P – нагрузка на индентор).



- 1 - амплитуда поперечных проскальзываний 0,05 мм;
- 2 - амплитуда поперечных проскальзываний 0,01 мм;
- 3 - амплитуда поперечных проскальзываний 0 мм

Рисунок 4.2 - Трибограммы при сканировании образцов из сплава ХТН-61 после испытаний с различными амплитудами поперечных проскальзываний (P – нагрузка на индентор).



- 1 - амплитуда поперечных проскальзываний 0,20 мм;
- 2 - амплитуда поперечных проскальзываний 0,17 мм;
- 3 - амплитуда поперечных проскальзываний 0,06 мм

Рисунок 4.3 - Трибограммы при сканировании образцов из сплава ВТ20 после испытаний с различными амплитудами поперечных проскальзываний (Р – нагрузка на индентор).

Такое состояние поверхностного слоя сопровождается увеличением и резкими изменениями силы трения индентора при сканировании образцов и уменьшением износа. Результаты статистической обработки величины силы трения индентора при сканировании показывают, что дисперсия силы трения составляет 0,082 (таблица В5, В6). При этом динамический коэффициент,

который отображает кинетику процесса, можно считать структурно чувствительным. В данном случае он изменяется от $5,6 \cdot 10^{-3}$ до 4,3984 согласно уравнению 6-й степени зависимости силы трения от времени полученного по интерполяции Лагранжа:

$$F = 0,0056t^6 - 0,1033t^5 + 0,7362t^4 - 2,5507t^3 + 4,3984t^2 - 2,3943t + 0,6162 \quad (4.1)$$

В соответствии с методикой представленной в работе [163, 162] подобный поверхностный слой можно охарактеризовать как крупнофрагментный.

Поперечные проскальзывания приводят к получению мелкофрагментного поверхностного слоя (трибограммы 1 и 2). Причем, повышение амплитуды поперечных проскальзываний приводит к снижению прочности, повышению равнопрочности и однородности поверхностного слоя, что сопровождается снижением величины и разброса трения индентора. Дисперсия силы трения снижается и составляет соответственно $2,9 \cdot 10^{-3}$ и $3,5 \cdot 10^{-3}$, динамический коэффициент также снижается и находится в пределах соответственно $0,5 \cdot 10^{-3} \dots 0,5394$ и $4,1 \cdot 10^{-3} \dots 2,329$ (уравнение 4.2, 4.3). При этом снижается износостойкость.

$$F = -0,0005t^6 + 0,0044t^5 + 0,01t^4 - 0,191t^3 + 0,5394t^2 + 0,3351t + 0,0053 \quad (4.2)$$

$$F = -0,0041t^6 + 0,0711t^5 - 0,4698t^4 + 1,4685t^3 - 2,2134t^2 + 2,329t - 0,4167 \quad (4.3)$$

Изменение структурно чувствительного динамического коэффициента для сплава ХТН-61 происходит согласно уравнению 6-й степени зависимости силы трения от времени (таблицы В1 – В4):

$$F = 0,0008t^6 - 0,0241t^5 + 0,2506t^4 - 1,1511t^3 + 2,4475t^2 - 1,5727t + 0,5175 \quad (4.4)$$

$$F = 0,0058t^6 - 0,103t^5 + 0,7284t^4 - 2,5639t^3 + 4,5624t^2 - 2,7692t + 0,8565 \quad (4.5)$$

$$F = 0,0152t^6 - 0,2714t^5 + 1,8931t^4 - 6,52t^3 + 11,311t^2 - 7,1707t + 1,4703 \quad (4.6)$$

Для сплава ВТ20 (таблицы В7 – В8):

$$F = 0,0013t^6 - 0,027t^5 + 0,2057t^4 - 0,7110t^3 + 1,0940t^2 + 0,3797t - 0,0558 \quad (4.7)$$

$$F = -0,003t^6 + 0,0571t^5 - 0,4163t^4 + 1,4616t^3 - 2,7118t^2 + 3,9804t - 0,8881 \quad (4.8)$$

$$F = -0,0034t^6 + 0,0597t^5 - 0,3175t^4 + 0,2546t^3 + 2,0742t^2 - 3,2395t + 0,891 \quad (4.9)$$

Существующие модели разрушения металлов при трении основаны на предположении что в зарождении трещины участвуют дислокации, которые создают скопления с высокими локальными напряжениями, релаксирующими путем зарождения микротрещины. Знакопеременное деформирование сопровождается возвратно-поступательным движением дислокаций. Мелкофрагментный однородный поверхностный слой способствует интенсивности процесса движения дислокаций, т.к. отсутствуют препятствия, ограничивающие их продвижение. С этим связано развитие микрповреждений металла и повышение износа.

Полученные результаты согласуются с экспериментами по оценке соотношения механических свойств и параметров структуры, приведенными в работе [45], где показано, что сопротивление хрупкому разрушению зависит не только от размера зерна, но и от размера блока мозаики - термина, характеризующего элемент субструктуры [45, 90, 91]. Напряжение течения линейно зависит от размера этих блоков. Более высокую твердость и предел текучести имеет крупнозернистый металл с сильно развитой субструктурой (углом разориентации элементов субструктуры, измеряемой градусами). На основании данных изменения прочности и разориентации блоков сделан

вывод об определяющем влиянии степени разориентации на сопротивление разрушению металла [90]. Причем, характер зависимости напряжения течения от размера зерна, а также размера элемента структуры при данном размере зерна свидетельствует об аддитивном влиянии двух структурных параметров. С ростом пластической деформации соотношение размеров зерен и блоков мозаики уменьшается [91].

Указанные положения характерны в меньшей степени и для состояния поверхностных слоев на образцах сплава ХТН-61 (рис.4.2.). Однако трибограммы тангенциальной составляющей силы трения индентора в процессе сканирования образцов сплава ВТ20 после испытаний с разной амплитудой поперечных проскальзываний указывают на то, что при износе титанового сплава действует другой механизм изнашивания, чем у сталей (рис.4.3). Показано [92, 93], что при изнашивании данного материала на воздухе, при комнатной температуре на поверхности трения образуются наноструктурные пленки, которые выполняют роль твердой смазки. В состав пленки входят оксиды, гидроксиды, нитриды, гидриды хрома, титана. В частности, влияние пленок на свойства поверхностного слоя сплава ВТ20 проявляется в начальный период внедрения индентора при минимальной амплитуде поперечных проскальзываний (0,06 мм). Как следует из трибограммы 3 (рис. 4.3), происходит падение тангенциальной составляющей силы трения. Исходя из вида соответствующих трибограмм 1 и 2, можно предположить, что поперечные перемещения с большими амплитудами препятствуют образованию таких пленок при трении.

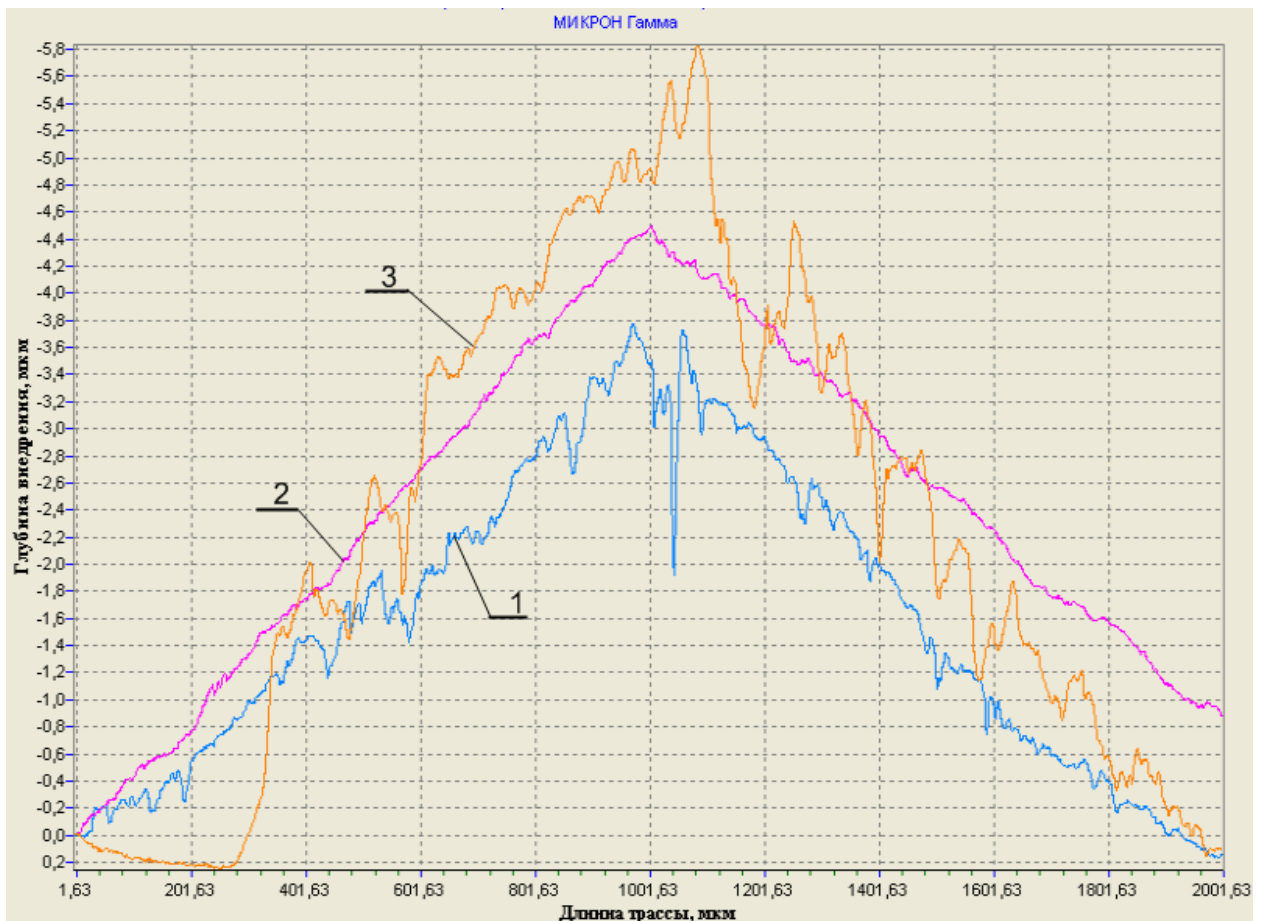
Повышение амплитуды поперечных проскальзываний с 0,06 до 0,20 мм не приводит к существенному изменению прочностных и деформационных свойств поверхностного слоя, его равнопрочности, что, возможно, есть результатом большого расхождения в прочности фрагментов поверхностного слоя и большей неоднородности титанового сплава. Было показано [94], что характерной особенностью структуры поверхностного слоя холоднокатаного титана повышенной износостойкости является наличие полосовой

дислокационной субструктуры в виде параллельных дислокационных субграниц. Создается так называемый барьерный подслой, препятствующей проникновению дефектов с поверхности в объем нагружаемого материала [95]. Тем не менее, на необходимость получения ультрамелкозернистой структуры титанового сплава для обеспечения повышенной износостойкости указывается в работе [96].

Повышение амплитуды поперечных проскальзываний при трении с трехкомпонентным нагружением образцов из сплавов ХТН-61 и ВТ20 в большей мере приводит к изменению прочности поверхностного слоя, чем к повышению его равнопрочности. Однако, учитывая многофакторность процесса изнашивания, это утверждение является предварительным и требует дополнительного изучения.

Сила трения в процессе сканирования образцов после износа может выступать и как мера износостойкости. Как свидетельствуют результаты исследований, представленные на рисунке 4.4, сила трения в процессе сканирования образцов из разных материалов, которая оценивается по глубине внедрения индентора, изменяется в тех же пропорциях, что и их износостойкость. Однако величина корреляции между износостойкостью и степенью однородности поверхностного слоя существенно отличается и зависит не только от динамики нагружения, свойств материала, но и от температуры окружающей среды, что значительно усложняет управление синергетическими процессами.

Как было отмечено в разделе 3.2, зависимость объемной интенсивности изнашивания от амплитуды поперечных проскальзываний является нелинейной и ее характер для различных металлов существенно отличается. Увеличение амплитуды поперечных проскальзываний более определенного предельного значения не приводит к росту объемной интенсивности изнашивания.



1 - сплав ХТН-61; 2 - сталь 60С2А; 3 - сплав ВТ20

Рисунок 4.4 – Изменение глубины внедрения индентора при непрерывном вдавливании по длине трассы сканирования образцов после износа с амплитудой поперечных проскальзываний 0,05 мм .

Из трибограмм представленных на рисунках 4.1 – 4.3 следует, что трение с трехкомпонентным нагружением при амплитудах поперечных проскальзываний близких к предельным приводит к перестройке структуры поверхностного слоя в энергетически выгодную для данных условий нагружения.

Наиболее наглядно это можно наблюдать на образцах стали 60С2А. Учитывая сравнительно высокую износостойкость стали и меньшее влияние амплитуды поперечных проскальзываний на величину интенсивности изнашивания, применяемые в испытаниях амплитуды поперечных проскальзываний оказались близки к предельным, что привело к

существенному изменению структурного состояния поверхностного слоя образцов. При трении с $A_{\text{поп}}=0,06$ мм и $A_{\text{поп}}=0,08$ мм образовался менее прочный, чем при двухкомпонентном нагружении с $A_{\text{поп}}=0$, однородный равнопрочный поверхностный слой. На рисунке 4.1 соответствующие трибограммы, а на рисунке 4.5 дисперсия силы трения указывают на меньшую величину и разброс этой силы.

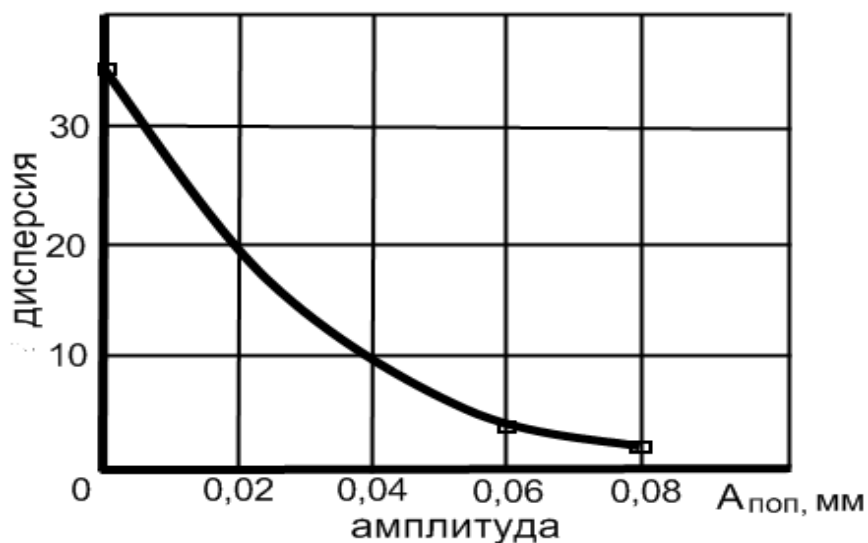
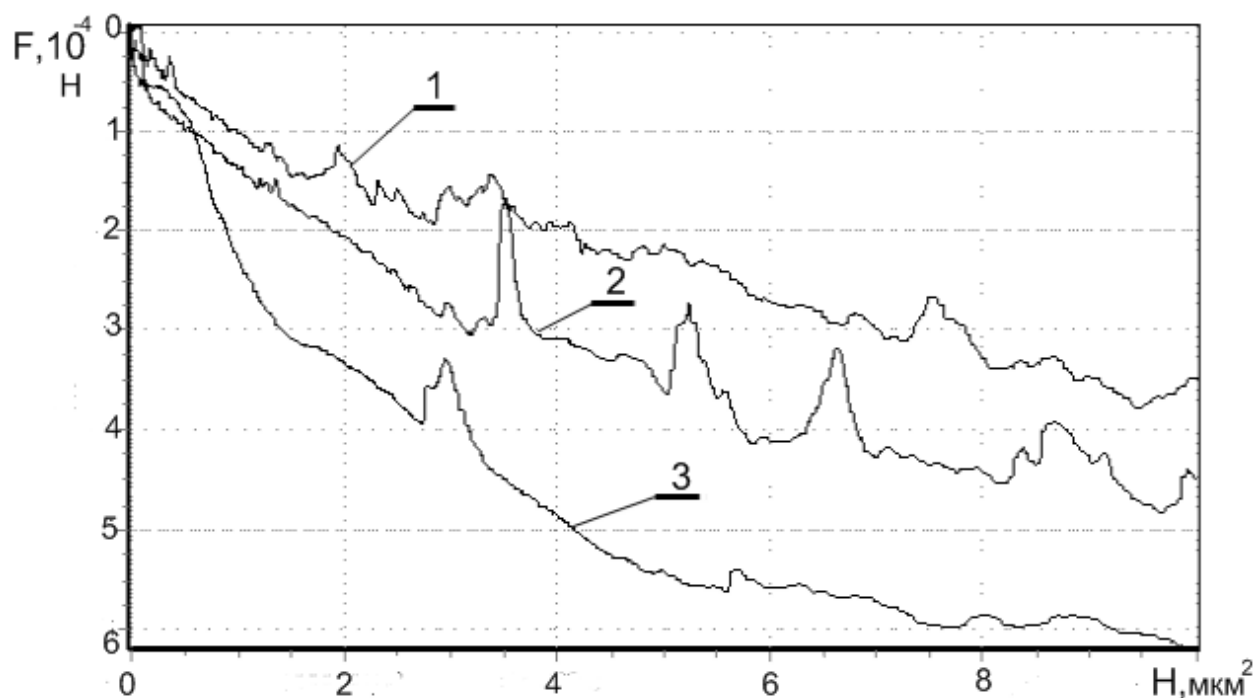


Рисунок 4.5 – Дисперсия силы трения при сканировании образцов из стали 60С2А после испытаний с различными амплитудами поперечных проскальзываний

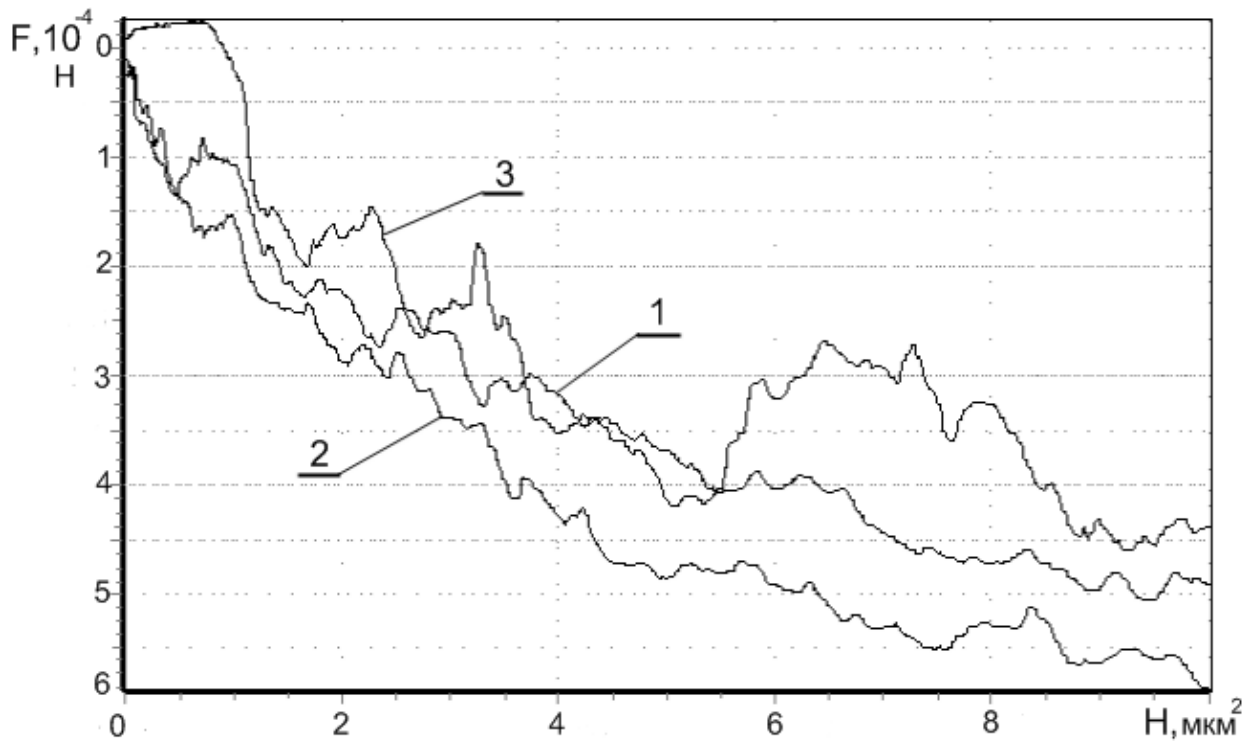
Для других исследованных материалов эти изменения менее существенны, т.к. применяемые при испытаниях амплитуды поперечных проскальзываний далеки от предельных. Однако при обработке результатов сканирования поверхностей с получением зависимостей сила трения – глубина внедрения индентора в квадрате более наглядно проявляется тенденция повышения однородности поверхностного слоя с увеличением амплитуды поперечных проскальзываний (рис. 4.6 и 4.7). Причем, в большей степени для более износостойкого сплава ХТН-61 – при наибольшей амплитуде получен наиболее равнопрочный поверхностный слой, что

подтверждается трибограммой 1 (рис. 4.6). Для сплава ВТ20 прочностные свойства поверхностного слоя по трассе сканирования изменяются незначительно при близких значениях амплитуды поперечных проскальзываний (0,17 мм и 0,20 мм) – трибограммы 1 и 2, но существенно отличаются от свойств поверхностного слоя при низкой амплитуде (0,06 мм) – трибограмма 3 (рис. 4.7).



1 – $A_{\text{поп}}=0,05$ мм; 2 - $A_{\text{поп}}= 0,01$ мм; 3 - $A_{\text{поп}}= 0$ мм

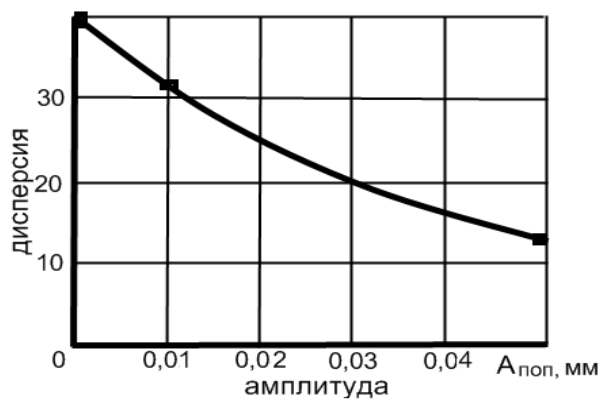
Рисунок 4.6 – Трибограммы в процессе сканирования образцов сплава ХТН-61 после испытаний с различными амплитудами поперечных проскальзываний (H – глубина внедрения индентора в квадрате)



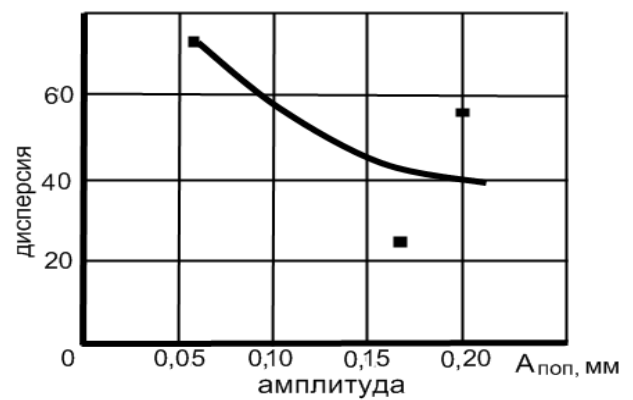
1 – $A_{\text{поп}}=0,20$ мм; 2 - $A_{\text{поп}}= 0,17$ мм; 3 - $A_{\text{поп}}= 0,06$ мм

Рисунок 4.7 – Трибограммы в процессе сканирования образцов сплава ВТ20 после испытаний с различными амплитудами поперечных проскальзываний (H – глубина внедрения индентора в квадрате)

Снижение дисперсии силы трения при сканировании (рис.4.8) также указывает на отмеченную зависимость, причем в большей степени она проявляется на более износостойком материале.



а)



б)

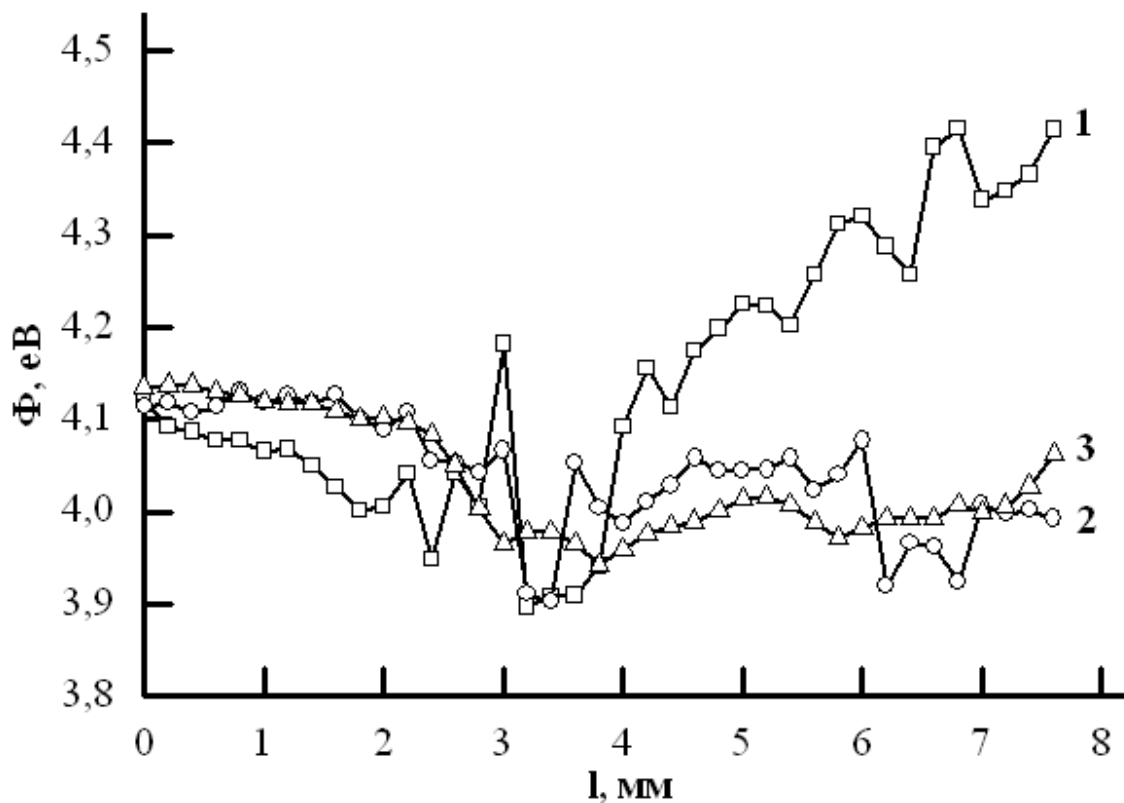
Рисунок 4.8 – Дисперсия силы трения при сканировании образцов из сплава ХТН-61 – а) и ВТ20 – б) после испытаний с различными амплитудами поперечных проскальзываний.

4.1.2 Анализ состояния поверхностного слоя по изменению работы выхода свободного электрона

Чтобы проверить полученные положения о влиянии состояния поверхностного слоя на износостойкость материалов при сложном динамическом нагружении были проведены исследования по определению изменения работы выхода электрона (РВЭ) с поверхности образцов.

Полученное распределение работы выхода электрона вдоль образца стали ХТН-61 после износа при двухкомпонентном и трехкомпонентном нагружении с амплитудами поперечного проскальзывания представлены в приложении А и на рисунках 4.9-4.10.

В процессе деформации трением происходит структурная эволюция поверхности металлов, которая отображается в изменении распределения РВЭ по поверхности. Как следует из рисунка 4.9, состояние поверхностного слоя образцов со сплава ХТН-61 до трения приблизительно одинаковое и определяется РВЭ около 4,1 эВ. В результате трения с различной амплитудой поперечных проскальзываний состояние поверхностного слоя образцов изменялось. Трение с двухкомпонентным нагружением ($A_{\text{поп}} = 0$) приводит к получению поверхностного слоя с повышенным и большим разбросом РВЭ от 3,90 до 4,40 эВ. Можно предположить, что возникает новое структурное состояние поверхности, близкое к аморфному, сопровождающееся увеличением РВЭ.

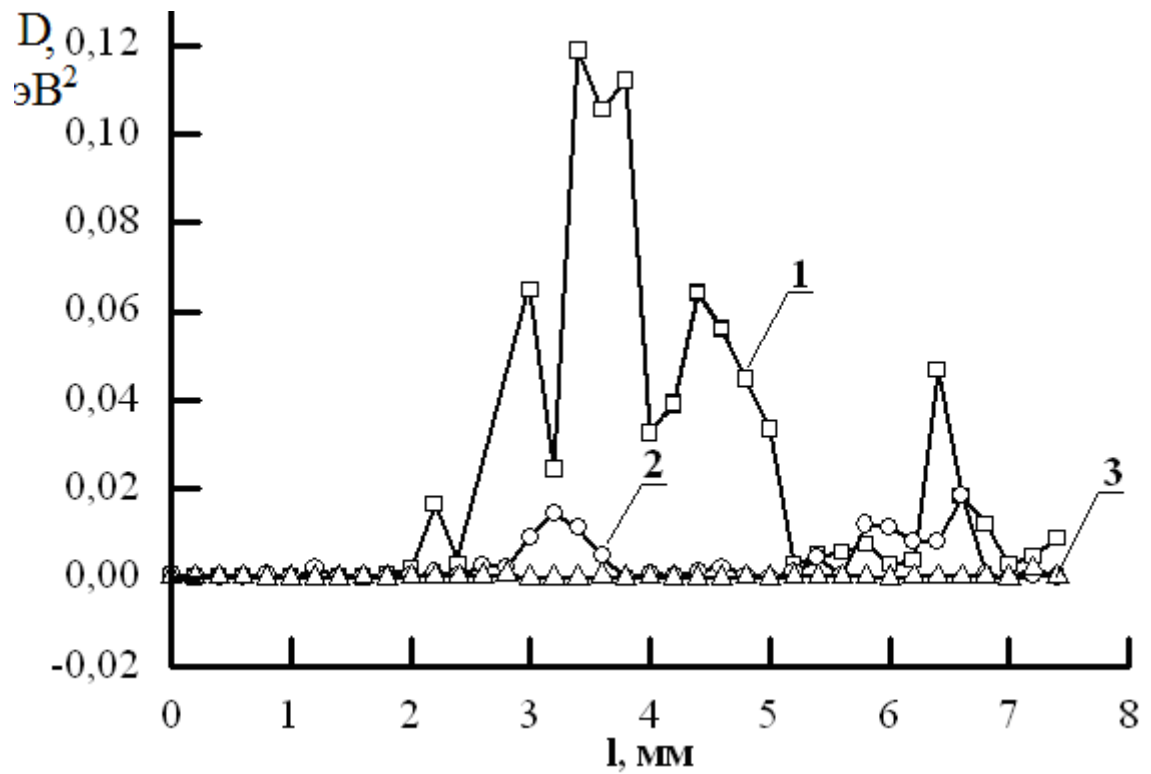


1 – $A_{\text{поп}}=0$ мм; 2 – $A_{\text{поп}}=0,05$ мм; 3 – $A_{\text{поп}}=0,10$ мм

Рисунок 4.9 - Распределение работы выхода электрона вдоль поверхности образцов из сплава ХТН-61 после износа с различной амплитудой поперечных проскальзываний

Наличие и повышение амплитуды поперечных проскальзываний приводит к уменьшению величины и разброса РВЭ. При испытаниях на трение с $A_{\text{поп}}=0,05$ мм РВЭ монотонно уменьшается от 4,10 до 4,00 эВ, разброс в значениях РВЭ при этом составляет интервал 3,90...4,10 эВ. Поверхностный слой образцов после трения с трехкомпонентным нагружением с $A_{\text{поп}}=0,1$ мм обеспечивает РВЭ от 3,95 до 4,05 эВ (рисунок 4.9).

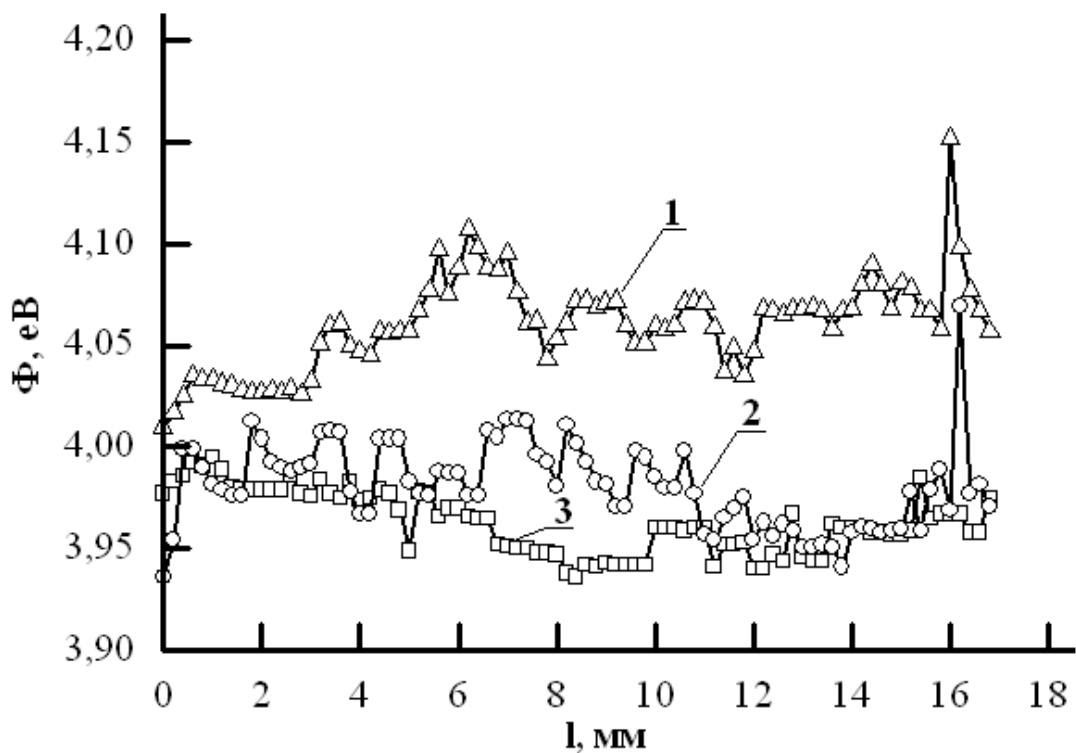
Увеличение амплитуды поперечных проскальзываний приводит к уменьшению дисперсии РВЭ (рисунок 4.10). Уменьшение разброса в значениях РВЭ указывает на повышение при этом однородности структуры поверхностного слоя.



1 - $A_{\text{поп}}=0$ мм; 2 - $A_{\text{поп}}=0,05$ мм; 3 - $A_{\text{поп}}=0,1$ мм

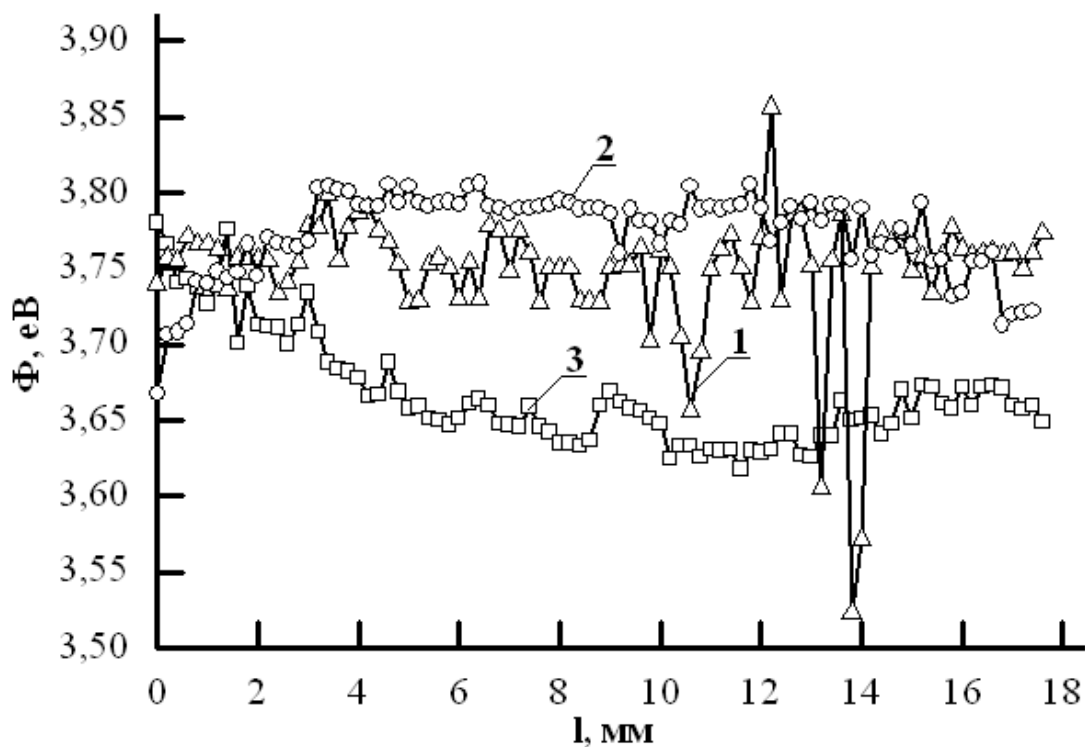
Рисунок 4.10 - Дисперсия РВЭ вдоль поверхности образцов из сплава ХТН-61 после износа с различной амплитудой поперечных проскальзываний.

Аналогичные результаты были получены для образцов из стали марки 60С2А и титанового сплава ВТ20 (рис. 4.11 и 4.12).



1 - $A_{\text{поп}}=0$ мм; 2 - $A_{\text{поп}}=0,06$ мм; 3 - $A_{\text{поп}}=0,20$ мм

Рисунок 4.11 - Распределение РВЭ вдоль поверхности образцов из стали 60С2А после износа с различной амплитудой поперечных проскальзываний.



1 - $A_{\text{поп}}=0$; 2 - $A_{\text{поп}}=0,06$ мм; 3 - $A_{\text{поп}}=0,20$ мм

Рисунок 4.12 - Распределение РВЭ вдоль поверхности образцов из титанового сплава ВТ20 после износа с различной амплитудой поперечных проскальзываний:

Известно, что окисление и адсорбция существенно влияют на измеряемое значение РВЭ. Однако наши измерения РВЭ были проведены при одинаковых условиях и показывают относительные изменения состояния поверхности после износа с различной амплитудой поперечных проскальзываний. Измерения распределения РВЭ по исследуемой поверхности выполнялись на изношенной и не изношенной поверхностях в одинаковых условиях. Поэтому имеются все основания считать, что изменения, которые наблюдаются в РВЭ, вызваны явлением трения и состоянием структуры поверхностного слоя.

При трении скольжения, характеризующимся значительными упругими и пластическими сдвиговыми деформациями, образованием дефектов решетки и диспергированием металла, слабосвязанные электроны в возбужденных атомах забрасываются на более высокие энергетические уровни, а кинетическая энергия свободных электронов при этом увеличивается. Таким образом, процесс трения, повышая энергию решетки, должен снижать РВЭ. При реверсивном трении в отличие от одностороннего происходит постоянная разориентация блоков и зерен металла, их более сильное искажение и раздробление. С увеличением числа разнообразных дефектов поверхности металла при реверсивном трении, вероятно, в большей степени, чем при одностороннем, повышается свободная поверхностная энергия и снижается РВЭ. Поэтому при реверсивном трении предполагается более интенсивная экзоэлектронная эмиссия с металлической поверхности и ее зависимость от прочих режимов трения и среды [22, 23].

Как показали результаты исследований [97], деформирование металла при трении с разными схемами нагружения приводит к структурным перестройкам поверхностного слоя и соответственно изменению энергетического рельефа поверхности. Наличие и увеличение амплитуды поперечных проскальзываний в процессе трения с трехкомпонентным нагружением приводит к повышению износа образцов и сопровождается повышением однородности поверхностного слоя, уменьшением величины и разброса работы выхода электрона.

Большое значение при этом имеет увеличение числа дислокаций и дислокационных ступенек с ростом пластической деформации. Как известно, дислокационные ступеньки несут электрический заряд, т.е. образуют электрические диполи [98].

Снижение работы выхода свободного электрона при увеличении амплитуды поперечных проскальзываний возможно потому, что в процессе испытаний на трение под воздействием внешних переменных напряжений происходит зарождение дислокаций, которые двигаются по плоскостям скольжения. Часть из них выходит на поверхность металла. В результате выхода дислокаций на поверхность образуются дислокационные ступеньки. Известно, что эти ступеньки несут электрический заряд и, следовательно, образуют электрические диполи [98]. Рост количества заряженных микроскопических дислокационных ступенек и электрических диполей приводит к уменьшению РВЭ и способствует снижению износостойкости исследуемых поверхностей. Причем, уменьшение разброса в значениях работы выхода электрона указывает на повышение при этом однородности поверхностного слоя.

Повышение однородности микрогеометрии поверхности и повышение при этом площади контакта образцов в процессе трения с трехкомпонентным нагружением, а также состояние структурной однородности поверхностного слоя, определяемое размером кристаллитов и их прочностными и деформационными свойствами, являются наиболее вероятной причиной

расхождения полученных результатов исследований и приведенных в работе [73] выводов, отмеченных в главе 2.4.2. Определение четкой зависимости между величиной РВЭ и износостойкостью металлов нуждается в дополнительных исследованиях с учетом условий нагружения в процессе трения и изменения при этом однородности поверхностного слоя. В этом случае величина РВЭ сможет выступать мерой структурной однородности поверхностного слоя.

Зависимость величины РВЭ от шероховатости поверхности также нелинейна [99] и определяется размером зерен, условиями воздействия на поверхность и механическими свойствами поверхностного слоя. Но в процессе трения с трехкомпонентным нагружением повышение амплитуды поперечных проскальзываний приводит к снижению шероховатости и повышению однородности микрогеометрии поверхности (как будет отмечено ниже). При этом уменьшается величина и разброс РВЭ по поверхности. Можно допустить, что уменьшение РВЭ происходит в результате дезориентации и размельчения блоков и зерен металла, интенсивным образованием дефектов и новых поверхностей. Однако при большой плотности дислокаций усиливается их взаимодействие, происходит их закрепление, которое в свою очередь усложняет выход на поверхность металла новых дислокаций и сопутствующих дефектов. Количество активных центров на поверхности с малой РВЭ перестает нарастать, при достижении насыщения и величина РВЭ стабилизируется.

Как отмечено в работах В.Д. Евдокимова [22, 23], адсорбционное пластифицирование тонких поверхностных слоев металла приводит к облегченному выходу дислокаций, что имеет место и при трении скольжения, поэтому приведенные опытные данные могут быть объяснены тесной взаимосвязью экзоэлектронной эмиссии с микродефектностью структуры. Причем, субмикрорельеф поверхности трения, который образуется на основе дислокационных реакций, складывается из совокупности ступенек выхода дислокаций и вакансий на поверхность металла и мало зависит от

микрошероховатости, является основным источником эмиссионных центров. Измерение эмиссии и шероховатости поверхности на образцах имеющих равновесную и почти постоянную концентрацию дефектов показало незначительное изменение экзоэлектронной эмиссии при большом перепаде шероховатости поверхности.

4.1.3 Анализ микрогеометрии поверхности

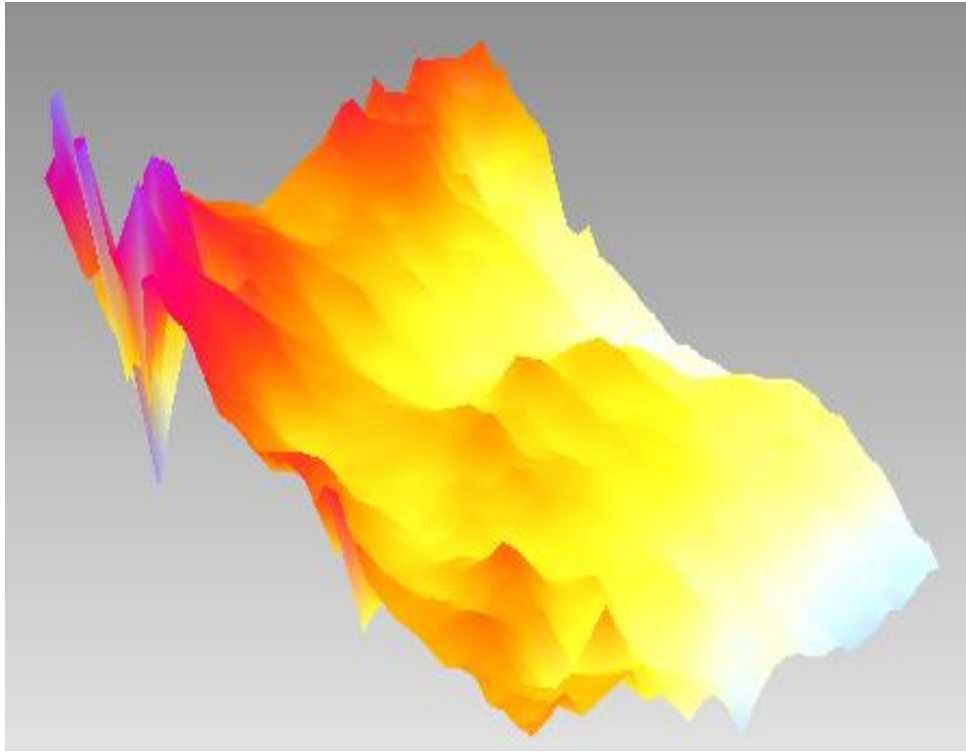
Физическая картина поверхностного разрушения анализируемых материалов при трении в условиях трехмерного нагружения будет не полной без анализа изменений микрогеометрии получаемой поверхности. Изменение прочности и структурная однородность поверхностного слоя, получаемая при различных условиях трения, неизбежно приводит к изменению шероховатости контактируемой поверхности. При изнашивании воспроизводится постоянная равновесная шероховатость, представляющая устойчивую систему, допускающую в данных условиях минимальную диссипацию энергии. Для установившегося процесса эта шероховатость соответствует минимальному значению сил трения при прочих неизменных условиях [100]. При рассмотрении трения как диссипативного процесса установлена связь между физико-механическими свойствами, теплофизическими характеристиками пары трения и шероховатостью приработанных поверхностей. Перестройка микрорельефа происходит путем избирательного разрушения энергетически перегруженных микронеровностей с сохранением тех из них, геометрические параметры которых обеспечивают минимум диссипации энергии [101].

В связи с тем, что однородность равновесной шероховатости может являться показателем состояния поверхностного слоя, однородности его прочностных и деформационных свойств, определяли топографию поверхности образцов на бесконтактном 3D профилографе "Микрон-альфа" [79].

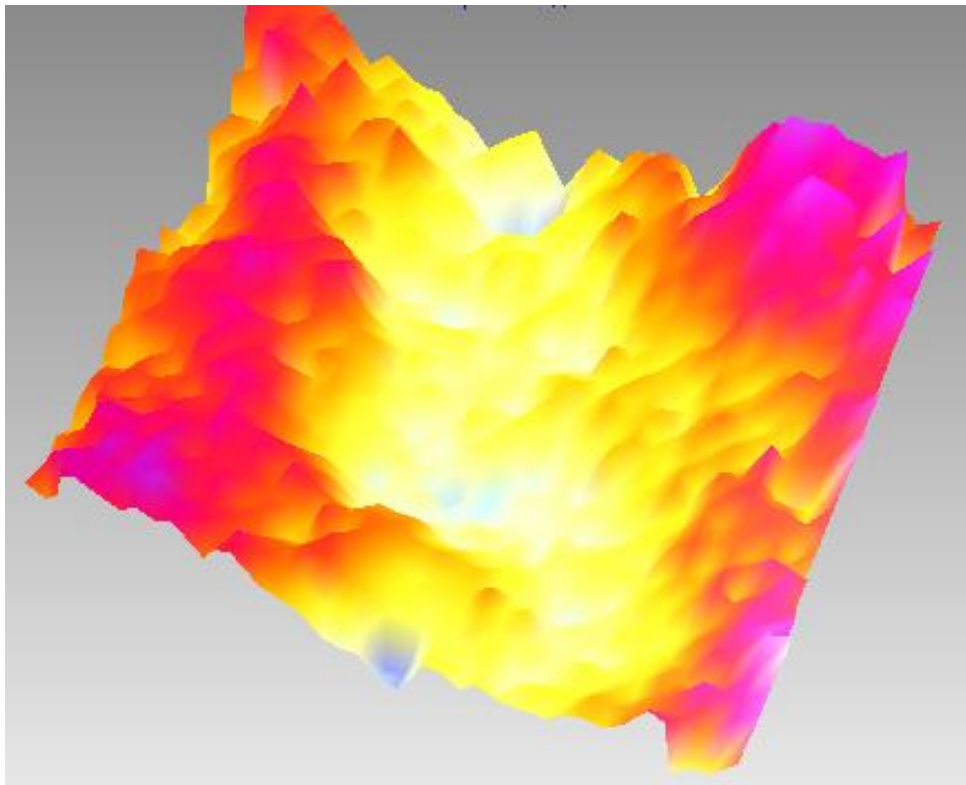
Как свидетельствуют результаты исследований представленные в приложении Б, поверхность износа образцов, полученных в процессе трения с двухкомпонентным и трехкомпонентным нагружением, существенно отличается. С повышением амплитуды поперечных проскальзываний от 0 до 0,2 мм, шероховатость поверхности снижается в поперечном направлении в 1,3 - 10 раз; в продольном направлении - в 1,3 - 2 раза для всех исследованных материалов 60С2А, ХТН-61, ВТ20.

Наличие и увеличение амплитуды поперечных проскальзываний сопровождается повышением однородности микрогеометрии поверхности, что указывает на получение более однородного равнопрочного поверхностного слоя образцов. Наличие поперечных проскальзываний при трехкомпонентном нагружении приводит к образованию поверхности меньшей шероховатости без явных продольных рисок, которые наглядно можно увидеть на 3D моделях поверхностей (рис.Б 1г - 4г). В качестве примера на рисунке 4.13 представлены 3D модели изношенных поверхностей сплава ХТН-61 при двухкомпонентном и трехкомпонентном нагружениях.

На это указывают и параметры шероховатости в продольном и поперечном направлениях. Для образцов из стали 60С2А после износа с двухкомпонентным нагружением среднее по шести сечениям значение R_a в продольном направлении составляет 0,18 мкм, в поперечном - 0,45 мкм а после износа с трехкомпонентным нагружением - соответственно $R_a = 0,09$ мкм и $R_a = 0,15$ мкм. То есть, при снижении шероховатости в два раза в продольном направлении трехкомпонентное нагружение привело к снижению шероховатости в поперечном направлении в три раза. Причем, при двухкомпонентном нагружении разность в шероховатости поверхности образцов в продольном и поперечном направлениях отличается в 2,5 раза, а при трехкомпонентном нагружении - в 1,7 раз (рис.Б 1б, в и 2б, в).



а)



б)

Рис. 4.13 – 3D модели изношенных поверхностей сплава ХТН-61 при двухкомпонентном – а) и трехкомпонентном – б) нагружении

Аналогичная картина наблюдается и при анализе состояния поверхности после износа на образцах из сплава ХТН-61. При двухкомпонентном нагружении средняя по шести сечениям шероховатость поверхности в продольном и поперечном направлениях составляет соответственно $Ra = 0,53$ мкм и $Ra = 1,53$ мкм, а при трехкомпонентном - $Ra = 0,35$ мкм и $Ra = 0,16$ мкм. То есть, при трехкомпонентном нагружении шероховатость поверхности в поперечном направлении не только уменьшилась в 10 раз, но и стала меньше, чем шероховатость поверхности в продольном направлении (рис.Б 3б, в и 4б, в).

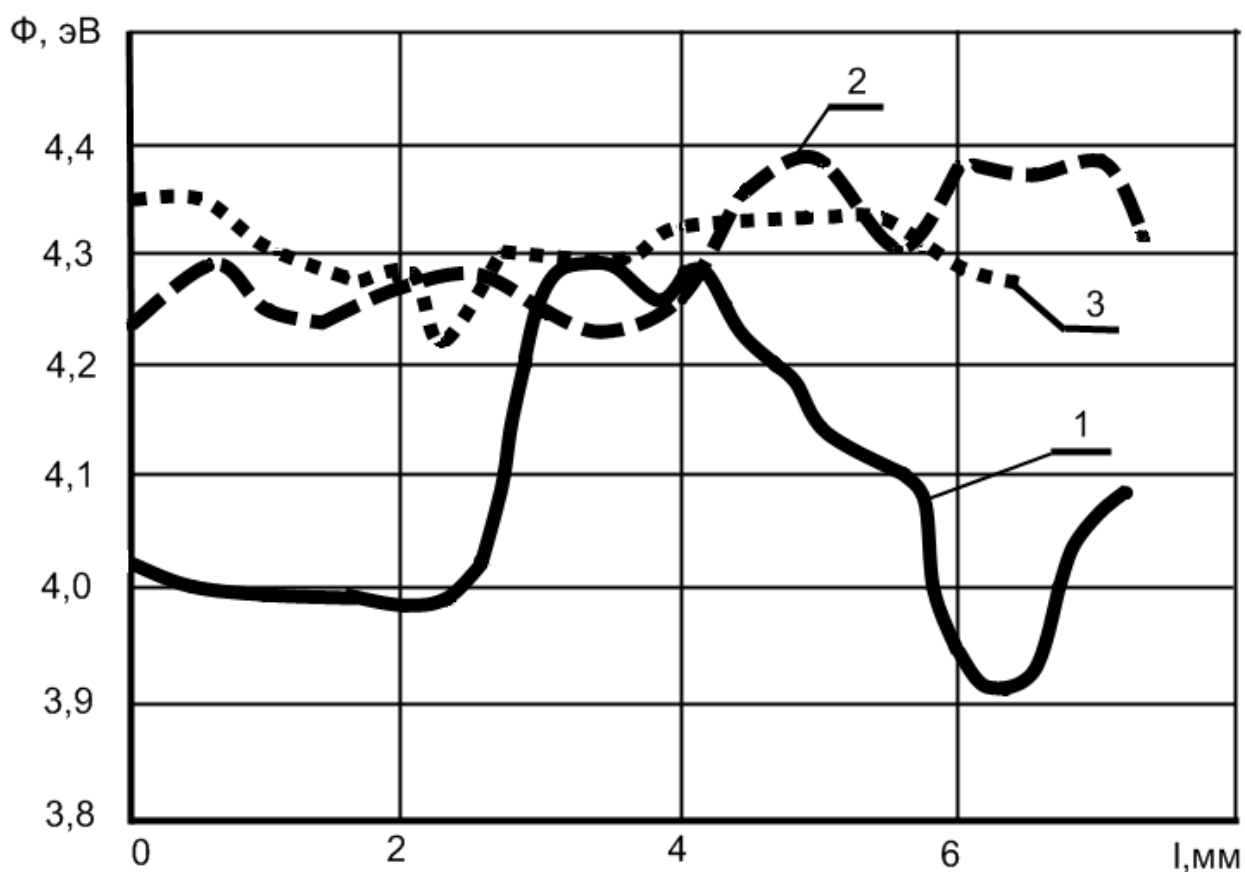
Увеличение амплитуды поперечных проскальзываний при трении с трехкомпонентным нагружением образцов из титанового сплава ВТ20 также приводит к уменьшению шероховатости поверхности. При $A_{\text{поп}} = 0,06$ мм средняя по шести сечениям шероховатость поверхности в продольном и поперечном направлениях составляет соответственно $Ra = 0,75$ мкм и $Ra = 0,88$ мкм, а при $A_{\text{поп}} = 0,17$ мм - $Ra = 0,67$ мкм и $Ra = 0,59$ мкм, что также указывает на повышение однородности микрогеометрии поверхности (рис.Б 5б, в и 6б, в).

4.2 Состояние поверхностного слоя образцов при многокомпонентном динамическом нагружении и высоких температурах

Для оценки влияния высоких температур на состояние поверхностного слоя и взаимосвязь с износостойкостью образцов при трении в условиях сложного динамического нагружения были проведены исследования по определению изменения работы выхода электрона с поверхности образцов сплава ХТН-61 после трения при температурах $500^{\circ}\text{C} \dots 1000^{\circ}\text{C}$. Результаты измерений работы выхода электрона с поверхности исследуемых образцов представлены на рис. 4.14. Измерить распределение работы выхода электрона образца после испытаний при температуре 1000°C не удалось из-за плохой

компенсации сигнала в процессе измерений, вследствие образования на поверхности сложных вторичных структур.

Как следует из представленных результатов, высокая температура при трении сплава ХТН-61 приводит к изменению состояния поверхностного слоя – получением поверхности с большим значением величины и уменьшенным разбросом работы выхода электрона. Структурная перестройка поверхностного слоя сопровождается изменением энергетического рельефа поверхности. Повышение износа образцов при нормальных температурах характеризуется уменьшением величины работы выхода электрона (кривая 1). Близкой величине износостойкости сплава ХТН-61 при температурах 500 и 900°C (рис. 3.7) соответствует близкий энергетический рельеф поверхности – кривые 2 и 3 (рис. 4.14).



1 – T = 20 °C; 2 – T = 500 °C; 3 – T = 900 °C;

Рис. 4.14 – Распределение работы выхода электрона вдоль поверхности образцов из сплава ХТН-61 после изнашивания при различной температуре

Меньшее значение величины работы выхода свободного электрона при нормальных температурах вызвано ростом количества заряженных микроскопических дислокационных ступенек, которые формируются на поверхности в процессе трения под влиянием внешних сменных напряжений и способствуют уменьшению износостойкости исследуемых поверхностей. Уменьшение разброса в значениях работы выхода электрона при высоких температурах указывает на повышение однородности поверхностного слоя. Однако наличие однородного поверхностного слоя в данном случае не приводит к снижению износостойкости, как наблюдается при нормальных температурах. Это подтверждает образование при повышенных температурах на поверхности трения однородного защитного износостойкого слоя, как было отмечено в разделе 3.2.

Можно предположить, что отмеченная ранее нелинейность зависимости объемной интенсивности изнашивания при различных температурах и увеличение износа при температурах более 700°C, связаны с количеством дислокаций в поверхностном слое. При большой плотности дислокаций усиливается их взаимодействие, происходит их закрепление, которое в свою очередь затрудняет выход на поверхность металла новых дислокаций и сопутствующих дефектов. Количество активных центров на поверхности перестает нарастать, достигнув насыщения, что сопровождается снижением износа при увеличении температуры до предельного значения и стабилизацией работы выхода электрона.

Таким образом, для анализа износостойкости трибосопряжений из сплава ХТН-61 при многокомпонентном нагружении и высоких температурах целесообразно использование комплексного подхода определения взаимосвязи триботехнических и структурных свойств контактирующих

материалов при различных видах нагружения. При этом пластически-деструкционный характер поведения металла при трении должен рассматриваться как физико-химический, т.е. процесс который сопровождается комплексом структурных, физических и физико-химических изменений поверхностного слоя деформируемого металла.

Аналогичные выводы сделаны в результате анализа контактного деформирования сплава ХТН-61 при трении с разными схемами нагружения: двухкомпонентным (удар с проскальзыванием в плоскости перпендикулярной направлению удара) и трехкомпонентным (удар с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях) при температуре 20°C [97].

4.3 Влияние отрицательных температур на трибологические свойства и состояние поверхностного слоя деталей трибосопряжений при многокомпонентном нагружении

Совместное действие динамических и температурных нагрузочных факторов инициирует в поверхностном слое деформационные процессы, способствующие изменению структурного, фазового и напряженного состояний, интенсификацию диффузионных и окислительных процессов, оказывающих существенное влияние на изнашивание деталей. Полученные результаты состояния поверхностного слоя образцов после трения с различными условиями динамического нагружения при отрицательных температурах согласуются с экспериментами по оценке соотношения механических свойств, параметров структуры и износостойкости при нормальных условиях.

Наиболее наглядно это можно видеть по изменению показателей поверхностного слоя образцов из сплава ХТН-61. Как следует из анализа изменения силы трения вследствие различной глубины внедрения индентора в процессе сканирования сплава ХТН-61 после испытаний с отрицательными температурами (-50°C) при различных видах нагружения повышение

сложности нагружения в трибосопряжении сопровождается уменьшением разброса силы трения при сканировании соответствующих образцов и, как следствие, повышением износа (рис. 4.15). Наименьший износ наблюдается при однокомпонентном нагружении с образованием наиболее неравномерного поверхностного слоя (график 1). Трехкомпонентное нагружение, которое сопровождается наибольшей величиной износа, приводит к выравниванию прочностных и деформационных свойств и повышению равнопрочности поверхностного слоя, что характеризуется уменьшением разброса силы трения при сканировании (график 3).

Дисперсия глубины внедрения индентора при сканировании с однокомпонентным, двухкомпонентным и трехкомпонентным нагружением составляет соответственно 2,5; 0,72 и 0,4 (таблица В13). Структурно чувствительный динамический коэффициент отражающий кинетику процесса выражается соответствующими уравнениями 6-й степени зависимости глубины внедрения от времени:

$$H = -0,0001t^6 - 0,0022t^5 + 0,1175t^4 - 1,3646t^3 + 6,5638t^2 - 13,401t - 1,3734 \quad (4.10)$$

$$H = -0,0004t^6 + 0,0123t^5 - 0,1299t^4 + 0,5868t^3 - 0,8226t^2 - 1,2519t - 7,6108 \quad (4.11)$$

$$H = -0,0004t^6 + 0,0117t^5 - 0,1415t^4 + 0,878t^3 - 2,8888t^2 + 4,4981t - 12,855 \quad (4.12)$$

Для сплавов ВТ20 и ЭИ437Б отличие в состоянии поверхностного слоя образцов после трения в аналогичных условиях менее существенно. В качестве примера на рисунке 4.16 представлены трибограммы силы трения при сканировании образцов из сплава ЭИ437Б после испытаний с отрицательными температурами при различных видах нагружения. Наиболее вероятно отсутствие существенной корреляции между износостойкостью этих сплавов и состоянием поверхностного слоя связано с особенностями механизма изнашивания сплава ВТ-20 и меньшей чувствительностью

износостойкости сплава ЭИ437Б к воздействию характера динамического нагружения при отрицательных температурах в сравнении со сплавом ХТН-61. Так, для сплава ХТН-61 при отрицательных температурах объемная интенсивность изнашивания изменяется при трехкомпонентном нагружении в сравнении с однокомпонентным нагружением на 75%, а для сплава ЭИ437Б – только на 25% (рис.3.7 и 3.8).

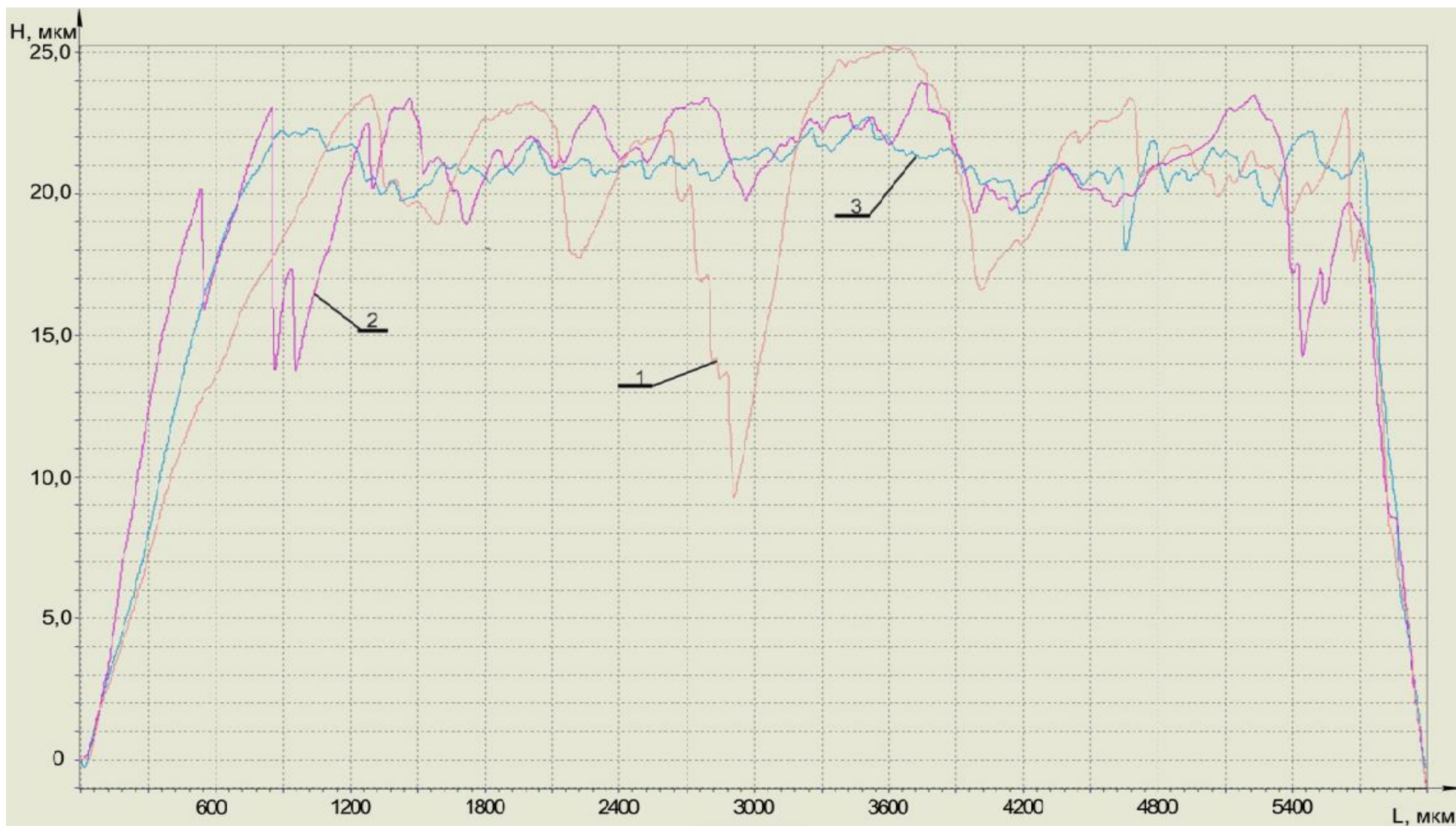
Причем, неизменный характер трибограмм при сканировании по всей глубине вдавливания сплава ХТН-61 (рис. 4.17) указывает на отсутствие существенного изменения прочностных и деформационных свойств материала по глубине поверхностного слоя. Это позволяет пренебречь возможным влиянием на износостойкость незначительного азотирования поверхности, которое может возникнуть вследствие подачи в зону контакта паров жидкого азота.

При этом, как показывают результаты статистической обработки изменения глубины внедрения (табл. В.12), дисперсия сигнала при сканировании образцов с однокомпонентным, двухкомпонентным и трехкомпонентным нагружением снижается и составляет соответственно 1,17; 0,26 и 0,22. Структурно чувствительный динамический коэффициент отражающий кинетику процесса с учетом знака составляет соответственно 1,47; 1,02 и 1,07 согласно уравнениям 6-й степени зависимости глубины внедрения от времени:

$$H = 0,0009t^6 - 0,034t^5 + 0,4619t^4 - 2,8578t^3 + 8,0991t^2 - 11,115t + 3,9688 \quad (4.13)$$

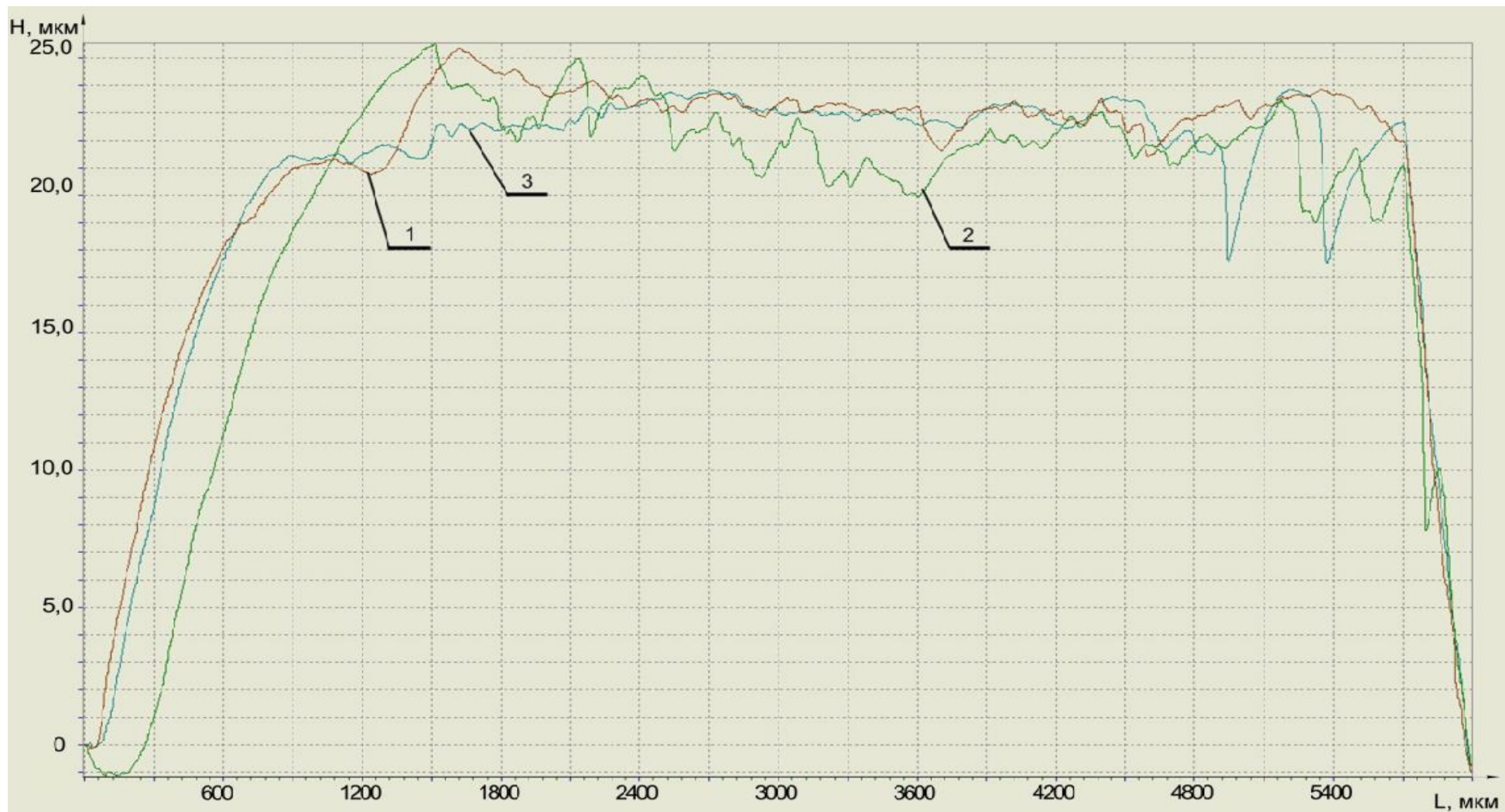
$$H = 0,0002t^6 - 0,0077t^5 + 0,1222t^4 - 0,8372t^3 + 2,7023t^2 - 5,8371t + 2,8428 \quad (4.14)$$

$$H = 0,0006t^6 - 0,0226t^5 + 0,2971t^4 - 1,7576t^3 + 4,7965t^2 - 7,6371t + 3,2554 \quad (4.15)$$



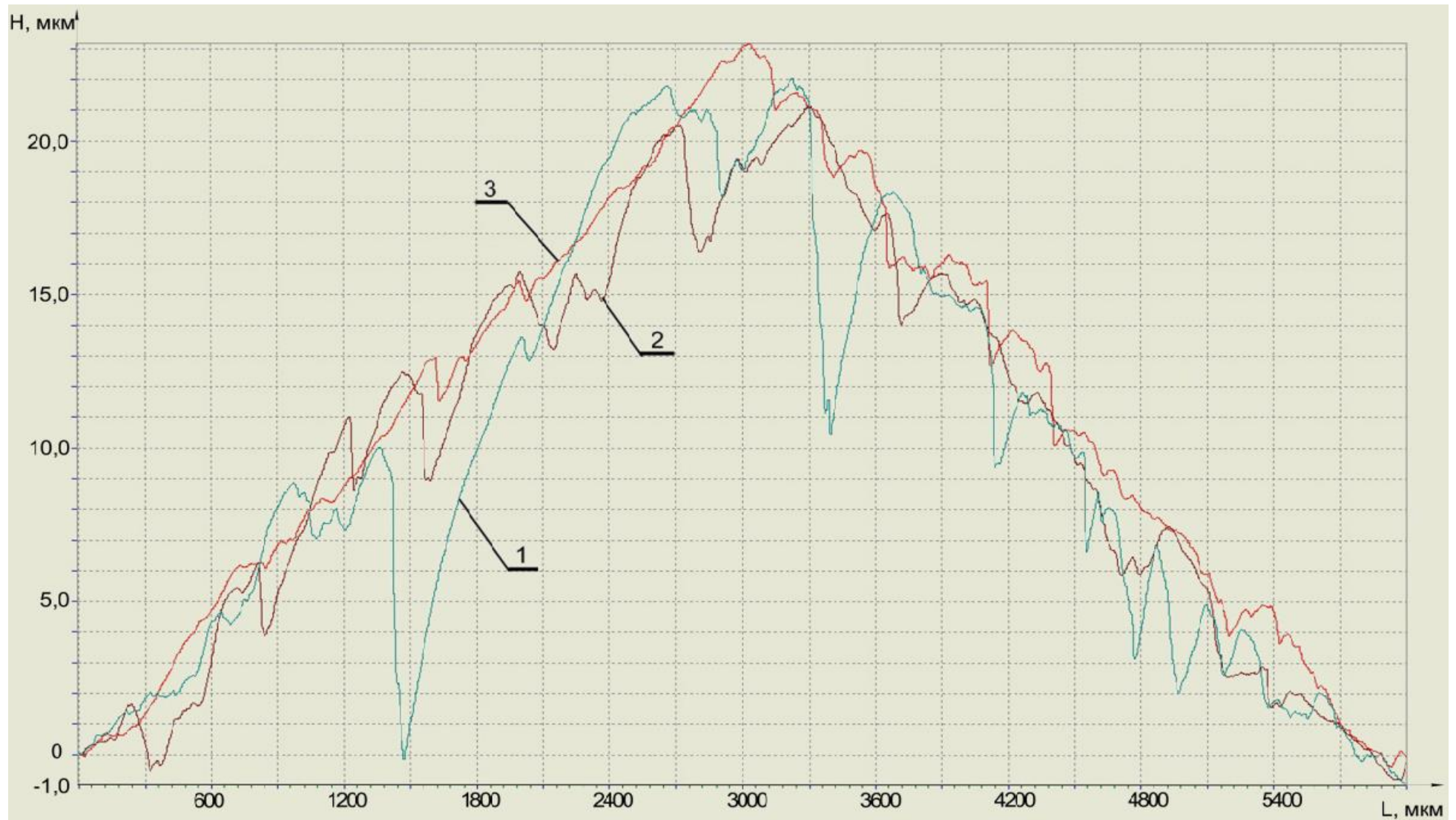
1 – однокомпонентное; 2 – двухкомпонентное; 3 – трехкомпонентное

Рисунок 4.15 - Изменение глубины внедрения индентора при длине сканирования L образцов из сплава ХТН-61 после испытаний с отрицательными температурами при различных видах нагружения



1 – однокомпонентное; 2 – двухкомпонентное; 3 – трехкомпонентное

Рисунок 4.16 - Изменение глубины внедрения индентора по длине сканирования L образцов из сплава ЭИ437Б после испытаний с отрицательными температурами при различных видах нагружения

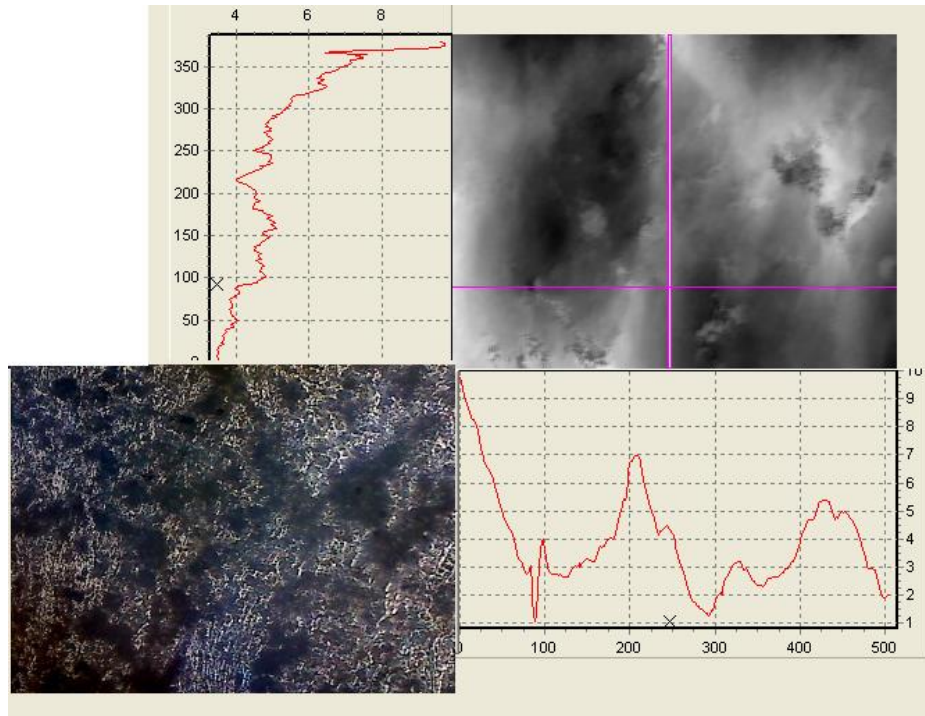


1 – однокомпонентное; 2 – двухкомпонентное; 3 – трехкомпонентное

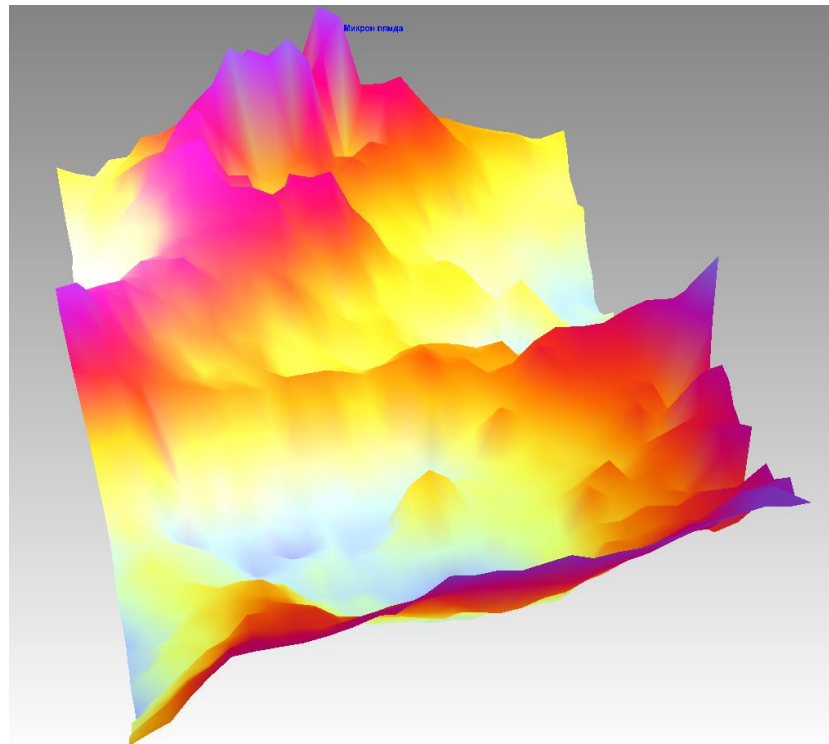
Рисунок 4.17 - Изменение глубины внедрения индентора по длине сканирования L методом непрерывного вдавливания сплава ХТН-61 после трения с отрицательными температурами при различных видах нагружения

Как свидетельствуют результаты исследований, поверхность износа образцов, полученных в процессе трения с различным характером динамического нагружения при отрицательных температурах, отличается не существенно. Увеличение сложности нагружения при трении за счет наложения амплитуды поперечных проскальзываний и ударного нагружения сопровождается некоторым повышением однородности микрогеометрии поверхности, что связано с получением более однородного равнопрочного поверхностного слоя образцов. Однако сплав ХТН-61 характеризуется двухфазностью с наличием матричной фазы, представляющей собой твердый раствор на основе кобальта, и второй фазы – кристаллов твердой карбидной фазы. Подобная сложная структура сплава способствует обеспечению его удовлетворительной износостойкости при трении с отрицательными температурами, но сопровождается неравномерностью износа по поверхности. Можно предположить, что при износе происходит выкрашивание твердых частиц и пластическое деформирование мягких составляющих. В итоге, независимо от рассмотренных видов динамического нагружения при трении на поверхности образцов образуется равновесная шероховатость без явных продольных рисок и не существенным отличием значений продольной шероховатости, что наглядно можно увидеть на 3D моделях поверхностей (рис.4.18б, 4.19б и 4.20б).

Однако значения шероховатости поверхности в поперечном направлении образца указывают на повышение однородности микрогеометрии поверхности при трении с увеличением сложности динамического нагружения. Так, трение с однокомпонентным нагружением сопровождается поперечной равновесной шероховатостью с $R_z = 3,599$ мкм; $R_a = 1,702$ мкм, двухкомпонентным и трехкомпонентным нагружением – соответственно $R_z = 3,005$ мкм; $R_a = 1,125$ мкм и $R_z = 2,423$ мкм; $R_a = 1,039$ мкм.



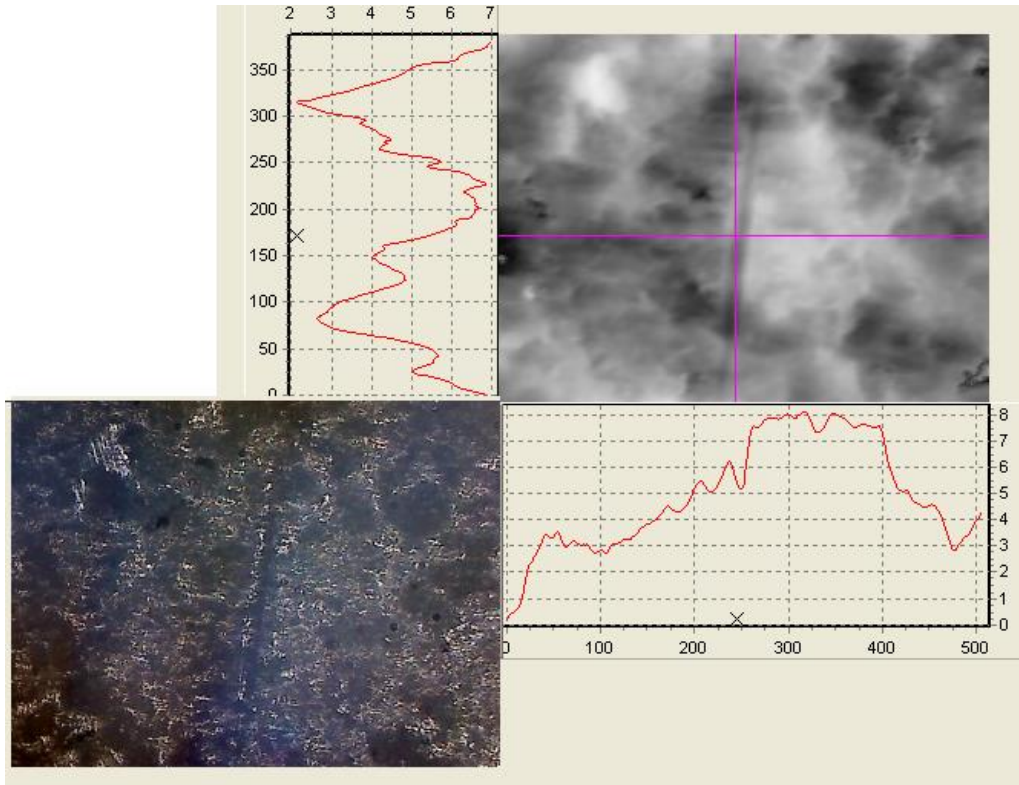
а)



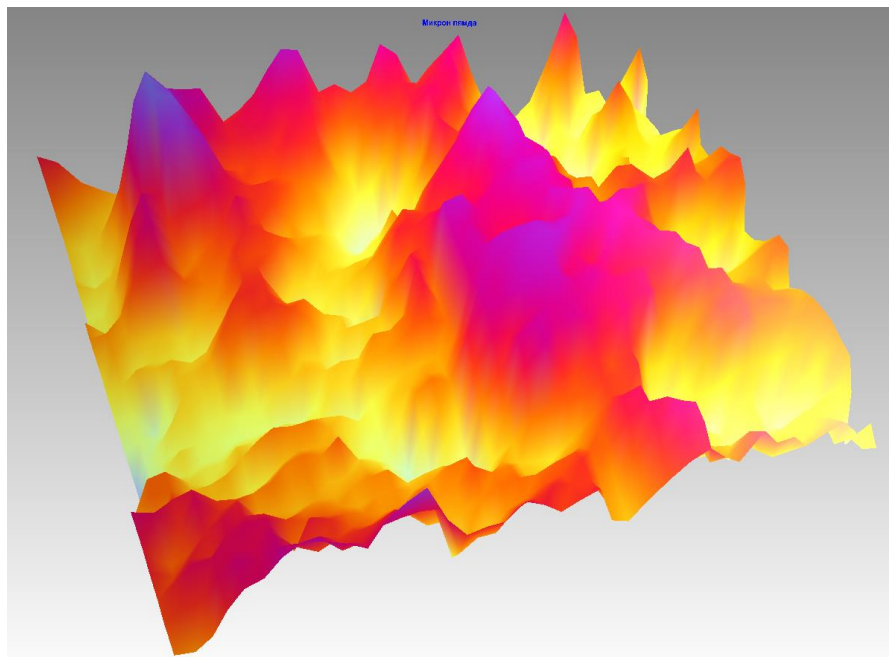
б)

а) – 2D поверхность при различном освещении с продольной и поперечной профилограммами; б) – 3D модель поверхности

Рисунок 4.18 - Топография поверхности образца сплава ХТН-61 после износа с трехкомпонентным нагружением при отрицательных температурах



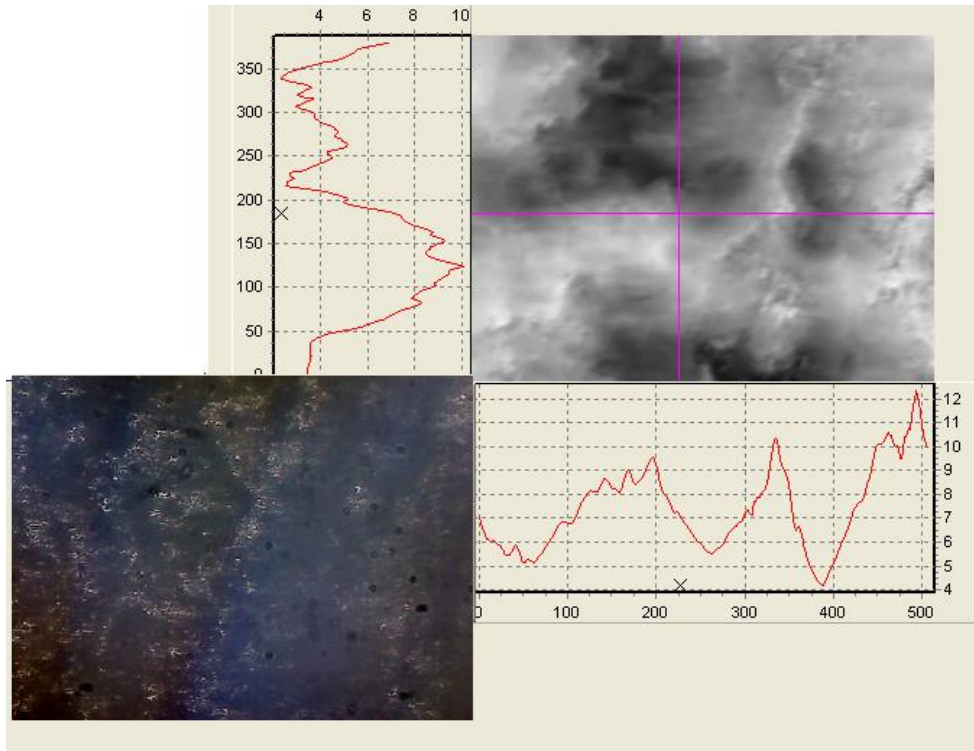
а)



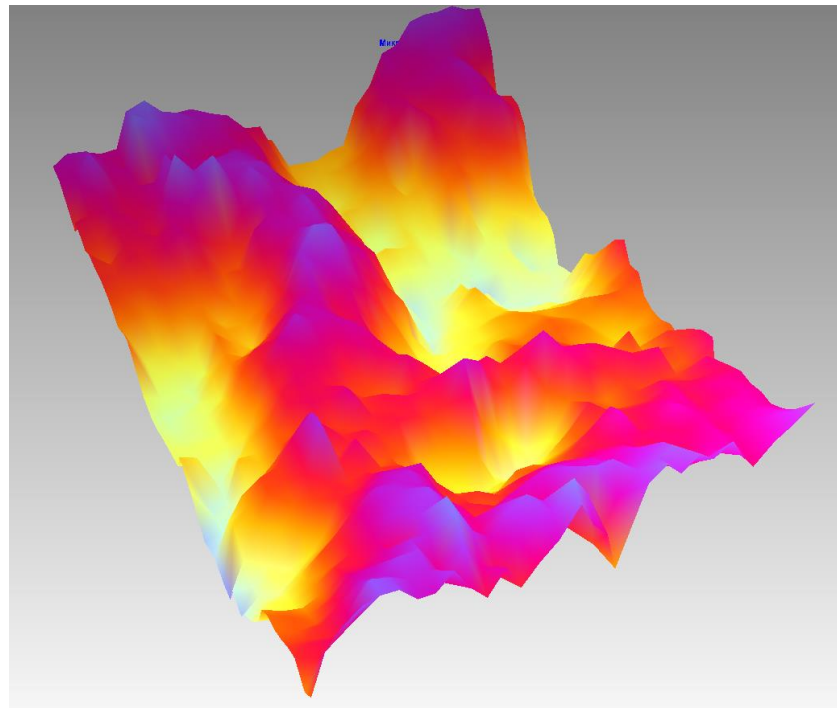
б)

а) – 2D поверхность при различном освещении с продольной и поперечной профилограммами; б) – 3D модель поверхности

Рисунок 4.19 - Топография поверхности образца сплава ХТН-61 после износа с двухкомпонентным нагружением при отрицательных температурах



а)



б)

а) – 2D поверхность при различном освещении с продольной и поперечной профилограммами; б) – 3D модель поверхности

Рисунок 4.20 - Топография поверхности образца сплава ХТН-61 после износа с однокомпонентным нагружением при отрицательных температурах

Подобная взаимосвязь топографии поверхности и структурного состояния поверхностного слоя образцов сплава ХТН-61 после трения в условиях двухкомпонентного и трехкомпонентного нагружения отмечена и при нормальной температуре.

Выводы

1. Соместное действие динамических и температурных нагрузочных факторов при многокомпонентном термоконтактном воздействии инициирует в поверхностном слое деформационные процессы, способствующие изменению структурного и напряженного состояний с оказанием существенного влияния на изнашивание деталей. Так, при трении образцов стали 60С2А с двухкомпонентным нагружением образуется крупнофрагментный поверхностный слой (дисперсия силы трения при сканировании составляет 0,082, динамический коэффициент изменяется от $5,6 \cdot 10^{-3}$ до 4,3984), трехкомпонентное нагружение приводит к получению более однородного равнопрочного поверхностного слоя (дисперсия силы трения – $2,9 \cdot 10^{-3}$, динамический коэффициент – в пределах $0,5 \cdot 10^{-3} \dots 0,5394$).

2. Увеличение поперечных проскальзываний при трении с трехкомпонентным нагружением способствует образованию более однородного поверхностного слоя (снижение дисперсии силы трения и динамического коэффициента при сканировании до 10 раз), снижению его прочности до 1,8 раз, что сопровождается повышением однородности микрогеометрии поверхности (шероховатость поверхности снижается в поперечном направлении в 1,3 - 10 раз; в продольном направлении - в 1,3 - 2 раза) и снижением величины и разброса РВЭ по поверхности на 7%. Повышение износостойкости трибосопряжений возможно за счет создания таких условий контактирования, когда формируется поверхностный слой с неоднородным структурным состоянием повышенной прочности. Это

позволяет сформулировать триботехнический принцип минимизации износа и износной способности материалов.

3. Рассмотренный механизм формирования поверхностного слоя деталей трибосопряжений при многокомпонентном термоконтактном воздействии носит достаточно общий характер, дает возможность рассмотреть физические основы пластически-деструкционных явлений в зоне контакта, разработать рекомендации по обеспечению износостойкого поверхностного слоя контактирующих деталей и может быть основой для целенаправленного формирования износостойкой структуры поверхности деталей узлов трения при их изготовлении в процессе финишной обработки или путем приработки в специально подобранных режимах и средах.

РАЗДЕЛ 5

Трибологические принципы повышения износостойкости
деталей сопряжений при многокомпонентном
термоконтактном воздействии

Проведенные ранее (см. разделы 3, 4) направленные исследования закономерностей изнашивания разных материалов в различных условиях термоконтактного воздействия является основанием для установления природы разрушения деталей трибосопряжений. В свою очередь, это дает возможность раскрыть механизмы повреждаемости деталей и оценить наиболее приемлемые, на наш взгляд, способы обеспечения износостойкости контактных поверхностей, как в процессе эксплуатации, так и на стадии изготовления деталей при финишных операциях. В данном разделе предпринята попытка решения данных вопросов.

5.1 Модель формирования и разрушения поверхностного слоя деталей
трибосопряжений при многокомпонентном динамическом нагружении5.1.1 Наноструктурные преобразования в поверхностном слое деталей
трибосопряжений при многокомпонентном динамическом нагружении

Многие детали машин и механизмов работают в условиях трения, возникающего при относительном перемещении контактирующих тел. Причем, большая часть этих деталей в процессе эксплуатации находятся в условиях многокомпонентного нагружения в связи с функциональными взаимными перемещениями в различных направлениях, наличием вибраций или их комбинациями. Степень повреждаемости и характер изношенных поверхностей сплавов при таких видах нагружения свидетельствует о своеобразии процессов, протекающих в зоне контакта.

Как известно, в результате диссипативных процессов при трении, работа внешних сил сопровождается поглощением энергии поверхностным слоем материала и образованием теплоты. Поэтому в современной трибологии все шире рассматриваются процессы самоорганизации материала в поверхностных слоях при трении на основе синергетических принципов. В соответствии с этими принципами в результате контактного взаимодействия формируются особые диссипативные структуры, способные преобразовывать внешнюю механическую энергию во внутреннюю энергию деформационных процессов, что сопровождается уменьшением вероятности разрушения и дает возможность повысить износостойкость трибосопряжений. При этом упругопластическая деформация поверхностных слоев металла зависит от условий контакта в трибосопряжении.

Тем не менее, особенности и специфичность механизма пластической деформации при трении в условиях многокомпонентного нагружения до настоящего времени не позволили разработать физические основы и раскрыть закономерности поверхностного разрушения. Исследование структуры и свойств поверхностей деталей трибосопряжений показывают, насколько сложны и разнообразны поверхностные явления. При этом невозможно перенести достижения в области основных прикладных наук на сопредельные области, к которым относятся процессы контактного взаимодействия. Исследования процессов в зоне контактного взаимодействия твердых тел обычно сопровождаются трудностями, связанными с неоднозначным влиянием поверхностно-активной среды, типом кристаллической структуры, распределением плотности дислокаций, различными возможностями методов исследований.

Основные трибологические характеристики (интенсивность изнашивания и коэффициент трения и др.) зависят от физико-химического состояния контактирующих материалов и условий их работы. Для всех материалов существует диапазон величин нагрузки, скорости перемещения, рабочей температуры, свойств рабочей среды, в котором значения этих

характеристик ниже, чем вне этого диапазона. При структурной приспособляемости, как отмечал Б.И. Костецкий [102, 103], вся работа диссипации превращается в тепло и термическая нагруженность поверхности существенно зависит от диссипативной способности основного материала. Этот фактор вместе с прочностью вторичных структур при нагружении трением определяет износостойкость материала. В процессе структурной приспособляемости материалов происходит перестройка структуры поверхностного слоя в энергетически выгодную для данных условий нагружения.

Сочетая в едином подходе критерии физики разрушения и механику напряженно-деформированного состояния, возникающих в процессе трения при сложном нагружении, можно основываться на представлениях о том, что материал пары трения является сложной самоорганизующейся системой. В местах непосредственного контакта происходит направленная деформация – текстурирование поверхностных объемов металла, связанное с изменением формы зерен и их кристаллографической ориентации под действием внешней нагрузки. Происходит приспособляемость металла зоны взаимодействия тел к условиям нагружения. Тип и характеристики текстуры зависят от вида деформации, температуры и структурно-фазового состояния металла, в частности, от типа его решетки.

В главных системах скольжения различно ориентированных зерен поликристаллического тела действуют различные касательные напряжения [104]:

$$\tau = \sigma \sin x_1 \cos \lambda_1 \quad (5.1)$$

где σ – напряжение, приложенное к телу; x_1 и λ_1 – соответственно углы между осью, вдоль которой приложено напряжение, и плоскостью и направлением скольжения.

Наличие фактора Шмида указывает на зависимость величины пластического деформирования от ориентации зерен в поликристалле.

Соотношение механических свойств и параметров структуры, приведенное в работе [45], показывает, что сопротивление хрупкому разрушению зависит не только от размера зерна, но и от размера блока мозаики. Причем, размер зерна не определяет однозначно механические свойства металла. Напряжение течения линейно зависит от размера субзерен – элемента субструктуры. Сделан вывод об определяющем влиянии степени разориентации на сопротивление разрушению металла [45, 90,91].

Например, трение с возвратно-поступательным движением низкоуглеродистой стали (0,08% C), стали 45 и У8 приводит к формированию в поверхностном слое развитой ячеистой структуры [105]. Ячейки ориентированы вдоль направлений трения и имеют вытянутую обтекаемую форму. Средние размеры ячеек в направлении трения составляют 0,6 мкм при давлении 0,3 Мн/м². Плотность дислокаций в стенках ячеек превышает 10¹² см⁻², в теле ячеек не высока и приближается к 10⁹ см⁻². На расстоянии 5мкм от поверхности средние размеры ячеек возрастают и достигают 1-3 мкм. Границы ячеек образованы менее плотными скоплениями дислокаций, а плотность дислокаций внутри ячеек этого слоя выше, чем в поверхностном слое. На глубине 10-15 мкм структура состоит из дислокационных сгущений, окружающих области в 0,5-3 мкм, внутри которых наблюдаются развитые сетки дислокаций. Эти области, по-видимому, являются начальными стадиями формирования ячеек. На расстоянии ~20мкм от поверхности, наблюдается статически равномерное распределение дислокаций. На глубине 30-45 мкм структура вновь характеризуется неравномерным распределением дислокаций. При дальнейшем увеличении расстояния от поверхности распределение дислокаций становится более равномерным, а их плотность уменьшается. Причем, степень фрагментации структуры поверхностных слоев исследованных сталей зависит от их исходной твердости и при равных величинах нагрузки наименьшая для сталей с большей твердостью.

При реверсивном трении в отличие от одностороннего происходит постоянная разориентация блоков и зерен металла, их более сильное искажение и раздробление [22]. Текстура является результатом вытягивания металлических зерен поверхностного слоя в направлении скольжения. При этом оси главных напряжений ориентируются вдоль направления трения, что обуславливает анизотропию механических свойств материала поверхностного слоя. Известно [106, 107], что прочность, долговечность анизотропных материалов существенно зависят от направления приложения нагрузки, однако в трибологических исследованиях этот факт чаще всего игнорируется.

Таким образом, можно предположить, что в результате контактного взаимодействия при рассматриваемом многокомпонентном термоконтактном воздействии в соответствии с синергетическими принципами на контактирующих поверхностях формируются особые диссипативные структуры. Они способны преобразовывать внешнюю механическую энергию во внутреннюю энергию деформационных процессов, что сопровождается определенной величиной разрушения в зоне контакта. Это дает возможность регулировать износостойкость трибосопряжений изменением структурного состояния поверхностного слоя, его прочностных и деформационных свойств.

5.1.2 Разрушение поверхностного слоя в условиях циклического трибонагружения

Как известно, границы зерен обладают рядом особенностей по сравнению с внутренними их областями. Границы зерен вследствие более высокой энергии атомов легче вытравливаются при химическом взаимодействии с реактивами. Коэффициент диффузии по границам зерен во много раз выше, чем по объему зерен. При высоких температурах границы зерен быстро переходят в вязкое состояние, наблюдается межзеренное скольжение, по ним распространяются трещины и т. д. [104].

При динамическом контактном нагружении взаимодействующие поверхности испытывают циклически меняющиеся ударные нагрузки, сопровождающиеся сдвигом. С увеличением числа циклов нагружения, как указывалось в работе [3], локальные объемы, находящиеся ранее в разупрочненном состоянии, упрочняются, и, наоборот упрочненные – разупрочняются.

Известны три стадии циклического деформирования металла, каждая из которых характеризуется определенными особенностями и структурными изменениями. На первой стадии происходит дробление субструктуры и накопление дислокаций, на второй стадии развиваются нарушения сплошности (деструкция материала) и на третьей – локальное развитие процесса разрушения образца от поверхности вглубь по сечению [45].

При этом следует иметь в виду, что знакопеременное деформирование сопровождается возвратно-поступательными напряжениями поверхностного слоя. Поэтому наибольший интерес представляет первая стадия деформирования металла как определяющая физико-механические свойства поверхностного слоя и механизм разрушения материала при трении. Сложный характер нагружения приводит к изменению напряженности и связанного с ним развития микрповреждений металла, которое определяется структурным состоянием материала. Именно условия контактного взаимодействия при трении приводят к различному деформированию поверхностного слоя металла и формированию его структурного состояния с определенной свободной энергией, физической и химической активностью.

Локализованная вблизи поверхности трения интенсивная пластическая деформация (первичный процесс), фрикционный нагрев, воздействие окружающей среды обуславливают образование в зоне фрикционного металлического контакта специфических, весьма неоднородных по глубине активного слоя структур. Важнейшим свойством указанных структур является их высокая прочность (в том числе микротвердость), которую в общем случае связывают с экстремально большой плотностью дефектов кристаллического

строения (дислокаций, дефектов упаковки, точечных дефектов и др.), текстурованностью, а также присутствием упрочняющих фаз (карбидов, нитридов, окислов и др.) [108]. Обнаружено наличие фрагментов ультрадисперсных наноструктур [109, 110, 111].

Существует взаимосвязь между величиной деформаций, напряжениями и структурными изменениями, определяющими свойства металла в процессе деформирования. Величина размера субзерен – элемента субструктуры неразрывно связана с микронапряжениями кристаллической решетки металла. Экспериментально показано, что произведение величины размера субзерна на величину неоднородности межплоскостного расстояния есть величина постоянная. Причем, величина размера субзерна уменьшается с увеличением остаточной деформации, приближаясь к нижнему пределу размера кристаллитов [45].

В рамках представлений, существующих в физике открытых систем, образование вторичной структуры при трении и других схемах деформирования металлических материалов, можно, по-видимому, рассматривать как неравновесный фазовый переход [112]. Данный фазовый переход происходит при достижении в деформируемых материалах экстремально высокой средней плотности дислокаций $\rho \approx 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и характеризуется возникновением новой диссипативной структуры. Рассматриваемые структуры, возникающие в поверхностных слоях различных металлов и сплавов, часто характеризуются сравнительно близкими средними значениями размеров фрагментов, степени их разориентировки, средней плотности дислокаций. Вследствие этого электронно-микроскопические изображения структуры у разных материалов могут выглядеть почти одинаково. Однако морфологически однотипные структуры, как правило, обладают различными трибологическими свойствами [110, 111]. В этой связи, приобретает большое значение вопрос взаимосвязи между исходной структурой контактирующих материалов и трибологическими свойствами структур, возникающих в их поверхностном слое.

Необходимо учитывать, что величина линейного износа определяется интенсивностью электронного обмена и прочностью фрикционных связей, обусловленной энергетической устойчивостью образующихся в результате этого обмена электронных конфигураций. Интенсивность износа минимальна, если атомы металлов трущихся пар характеризуются высокой долей нелокализованных (свободных) электронов. В этом случае прочность образованных во время трения связей небольшая, они легко разрушаются при взаимном перемещении поверхностей. Нелокализованные электроны, находясь в свободном состоянии, образуют своеобразную электронную смазку [73].

Однако сближение атомов контактирующих материалов на расстояние межатомных взаимодействий и обмен электронами приводит к образованию узлов схватывания, возникновению прочных химических связей. Развитие процессов рекристаллизации, диффузии, релаксации напряжений влияет на механические свойства узлов схватывания (мостиков сварки). Рекристаллизация вызывает образование общих зерен в местах контакта, диффузионные процессы приводят к упрочнениям, разупрочнениям, охрупчиванию, способствуют схватыванию. При пластической деформации происходит активация поверхностей трения, при этом возникает неравновесное электронное состояние, активированное состояние атомов поверхности [34].

Физико-механические параметры поверхностного слоя, его структура и напряженное состояние, как правило, сильно отличаются от свойств всего объема материала, т. к. у атомов поверхностного слоя остаются свободные связи и чтобы при таком несимметричном силовом поле атом кристалла находился в равновесии, необходимо иное, чем внутри кристалла расположение атомов самого верхнего слоя. Атомы, которые находятся у поверхности, имеют только односторонние связи – в объем тела, поэтому металл поверхностного слоя находится в нестабильном состоянии. Атомы этой зоны имеют избыточную энергию по сравнению с атомами,

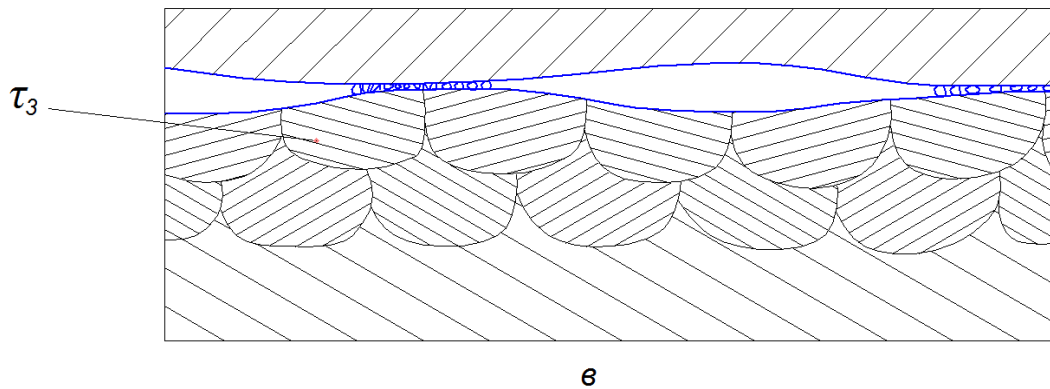
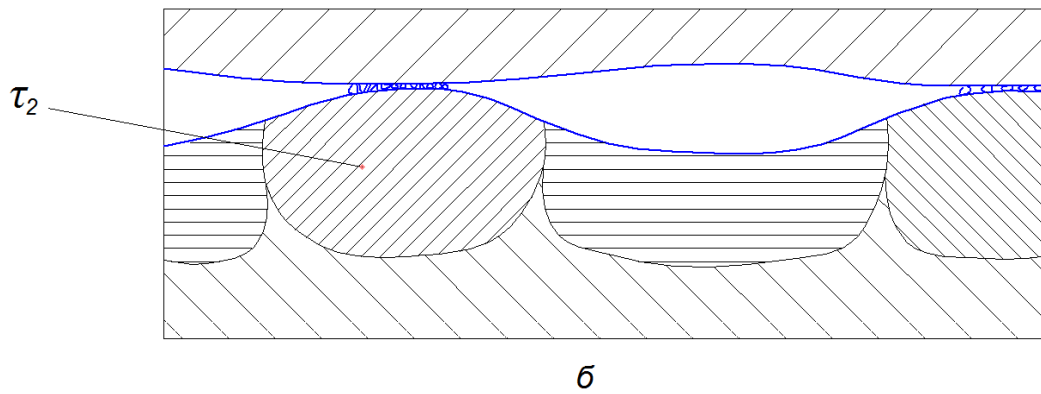
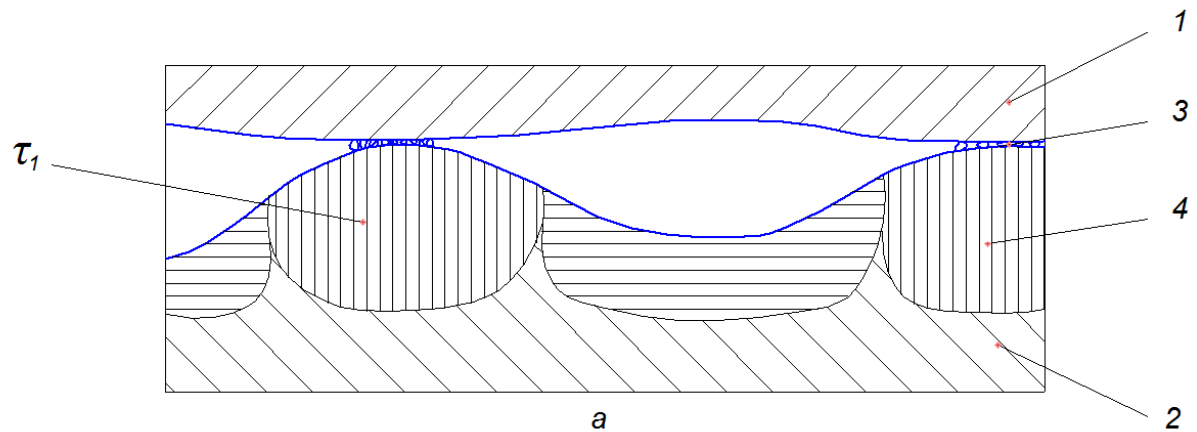
находящимися в объеме, что сопровождается повышенной химической активностью поверхности металла. В реальных условиях это сопровождается не только адсорбцией атомов элементов окружающей среды, но и диффузией, химическими соединениями с основным материалом и перераспределением легирующих элементов в поверхностном слое. При этом неизбежна неравномерность химико-физического взаимодействия поверхности металла с окружающей средой на отдельных ее участках вследствие неоднородности структурного состояния поверхностного слоя. Физико-химическая активность отдельных фрагментов зависит от величины остаточных напряжений (микронапряжений), степени пластической деформации.

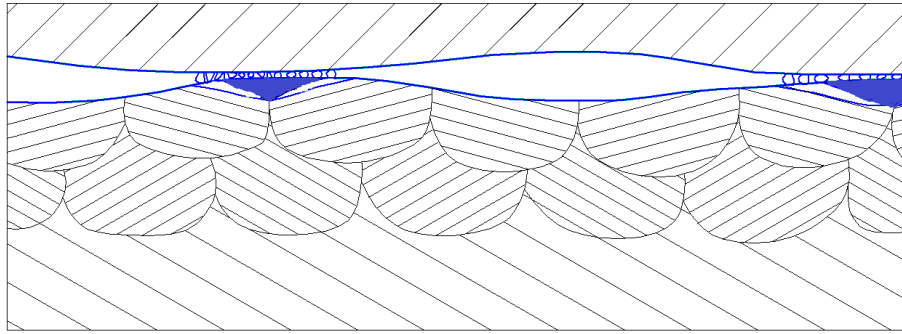
Таким образом, можно предположить, что циклическое трибонагружение сопровождается значительной структурной перестройкой поверхностных слоев материалов трибосопряжений, что согласуется, в частности, с результатами исследований представленных в работах В. В. Запорожца и его школы [71, 156-158, 163, 166-170, 172].

На основании комплексного анализа кинетики структурных изменений и изнашивания поверхностного слоя контактирующих поверхностей при трении, представленных в разделах 3 и 4, установлено существование четырех основных стадий развития повреждений поверхности: разрушение оксидных пленок; снижение прочности фрагментов; уменьшение размеров фрагментов; усталостное разрушение. Соответствующая модель структурной организации и разрушения поверхностного слоя при трении представлена на рисунке 5.1.

На первой стадии контактирования наблюдаются явления аналогичные первой стадии фреттинг-коррозии и сопровождаются схватыванием ювенильного металла после разрушения естественных оксидных пленок. Разрушающиеся вследствие усталости выступы и срезавшиеся узлы схватывания создают первичные продукты разрушения [20]. При этом необходимо учитывать связь выступов фактического контакта со структурным состоянием поверхностного слоя и возникновением структурной

шероховатости, связанной с неравномерной выработкой фрагментов, образованием микроступенек, их разориентировкой [81]. Модель поверхностного слоя представляется в виде случайно расположенных фрагментов (кристаллитов), обладающих определенным уровнем прочности отличающихся направлением плоскостей скольжения условно показанных различным направлением штриховки участков. Соответственно фрагмент максимальной прочности обозначен через τ_1 (рис. 5.1 а).





г

1 – сопряженная поверхность; 2 – основной слой; 3 – окислы;

4 – фрагменты поверхностного слоя

Рисунок 5.1 – Модель структурной организации и разрушения поверхностного слоя при трении: а) разрушение оксидных пленок; б) снижение прочности фрагментов; в) уменьшение размеров фрагментов; г) усталостное разрушение.

На второй стадии контактирования происходит снижение прочности фрагментов поверхностного слоя под действием циклических контактных напряжений за счет изменения направлений плоскостей скольжения. При этом происходит уменьшение прочности фрагментов ($\tau_2 < \tau_1$), что приводит к некоторому повышению скорости изнашивания и сопровождается снижением равновесной шероховатости, увеличением площади контактирования (рис. 5.1 б). Однако, скорость износа на этой стадии невелика вследствие наличия крупных фрагментов поверхностного слоя.

Третья стадия контактирования связана с диспергированием фрагментов поверхностного слоя и, соответственно, снижением их прочности ($\tau_3 < \tau_2 < \tau_1$), что сопровождается повышением скорости изнашивания, еще большим снижением равновесной шероховатости и увеличением площади контактирования (рис. 5.1 в). На этой стадии заканчивается структурная адаптация поверхностного слоя к условиям контактирования и происходит переход к стадии усталостного разрушения (рис. 5.1г), которая характеризуется образованием частиц износа вследствие межфрагментного разрушения.

Представленная модель предполагает наличие трех видов разрушения: в большей степени окислительного на первой стадии контактирования, фрагментного – на второй и третьей стадиях и межфрагментного на четвертой стадии. Образующиеся при этом продукты изнашивания имеют различную величину, но, как следует из модели разрушения, величина износа определяется не размерами частиц разрушаемого металла, а интенсивностью их удаления, обусловленной структурным состоянием поверхностного слоя.

Учет особенностей структурной организации и разрушения поверхностного слоя в процессе трения необходим для детализации конкретных механизмов обеспечения повышенной износостойкости. Однако разработка соответствующих методик должна производиться с учетом условий эксплуатации трибоузлов, поскольку большая часть деталей трибосопряжений работает в условиях многокомпонентного динамического нагружения связанного с вибрациями, действующими в разных направлениях, а также с влиянием различных температур окружающей среды и это влияет на нестойкие синергетические процессы.

5.1.3 Изнашивание материалов при трении в условиях многокомпонентного динамического нагружения

Существующие модели разрушения металлов при трении основаны на предположении, что в зарождении трещины участвуют дислокации, которые создают скопления с высокими локальными напряжениями, релаксирующими путем зарождения микротрещины. Границы зерен препятствуют скольжению дислокаций и «передаче» деформации из зерна в зерно. Измельчение зерна является тем способом управления структурой, который приводит обычно к одновременному повышению прочности и вязкости металла, т. е. к увеличению сопротивления хрупкому разрушению.

Известно, что для разориентированной ячеистой структуры металлов с ОЦК - решеткой предел текучести σ_s определяется по формуле, аналогичной уравнению Холла-Петча

$$\sigma_s = \sigma_0 + kD^{-1/2} \quad (5.2)$$

где σ_0 – постоянная, характеризующая внутреннее трение при движении дислокаций;

k – постоянная;

D – средний размер зерна.

Формула Болла [34] устанавливает зависимость предела текучести металла от размера блока мозаики:

$$\sigma_s = \alpha\varepsilon^{-1/2} \quad (5.3)$$

где ε – размер субзерна (элемента субструктуры, ячейки).

Плоскости скольжения зерен произвольно ориентированны в пространстве, поэтому под влиянием внешних сил напряжения в плоскостях скольжения отдельных зерен будут различны. Деформация начинается в отдельных зернах, в плоскостях скольжения которых возникают максимальные касательные напряжения. Соседние зерна будут разворачиваться и постепенно вовлекаться в процесс деформации. Деформация приводит к изменению формы зерен: зерна получают форму, вытянутую в направлении наиболее интенсивного течения металла.

Таким образом, при трении оси главных напряжений металлических зерен вытягиваются вдоль направления скольжения. При этом оценка энергии активации разрушения приработанной поверхности вдоль и поперек направления скольжения показывает, что прочность материала поверхностного слоя при деформировании вдоль текстуры выше, чем при

поперечном деформировании. Различие в значениях энергии активации может составлять от 15% до 70% [114].

Можно предположить, что возвратно-поступательные движения во взаимно перпендикулярных направлениях приводит к формированию в поверхностном слое ячеистой структуры с не столь вытянутыми ячейками, а при равной амплитуде и частоте колебаний – к отсутствию вытяжки фрагментов. Это приводит к повышению интенсивности изнашивания.

Исследованиями установлено, что пластическая деформация рассматриваемых структур при контактном нагружении осуществляется ротационным механизмом - посредством относительных разворотов фрагментов [109]. Развороты фрагментов происходят преимущественно вокруг одной оси, перпендикулярной направлению трения и параллельной поверхности трения. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что ротации фрагментов осуществляются под действием внешней тангенциальной силы и, следовательно, эффективное сопротивление фрагментов относительно проскальзыванию (ротации) в значительной степени определяет величину силы (коэффициента) трения металлических материалов [110]. Можно сделать вывод о том, что различный коэффициент трения анализируемых структур обусловлен различным эффективным сопротивлением проскальзыванию (ротации) их фрагментов.

Известны модели ротационной пластичности материалов, согласно которым ротации фрагментов рассматриваемых структур осуществляются за счет движения частичных дисклинаций, находящихся в границах нанокристаллов [115]. Движение дисклинаций связано с эмиссией или поглощением ими дислокаций и предполагает необходимость перемещения дислокаций внутри фрагментов.

Добавление ударной нагрузки при трении повышает многоцикловую усталость в результате пластической деформации и ускоряет отделение частиц. Упорядоченная последовательность скоростей износа при переходе от трения к ударным нагрузкам полностью нарушается. Учитывая волновое

воздействие ударного нагружения и наличие больших контактных нагрузок при ударе из-за малого времени воздействия, нельзя ожидать аналогии между закономерностями изнашивания при ударе и скольжении. А поскольку, в соударяющихся деталях в промежутках между ударами сохраняется до 30% первоначальной энергии в виде сложного спектра и достаточно высокой амплитуды [116], то материал находится в постоянном напряжении, что не может не сказаться на сопротивлении изнашиванию. При ударе изменяются первоначальные механические свойства поверхностного слоя, определяемые энергией удара, поверхностью изнашивания, упругим и пластическим деформированием, развитием усталостных процессов [117, 118].

При работе в условиях циклического нагружения в поверхностном слое деталей происходят интенсивные структурные изменения, обусловленные деформационным упрочнением с последующим разупрочнением. При этом подповерхностные участки, структура которых менее деформирована, становясь поверхностью трения, испытывают пластическую деформацию. В процессе установившегося изнашивания упругопластическая деформация реализуется в виде преимущественно упругого взаимодействия сформировавшихся участков поверхностного слоя и пластической деформации вновь образующихся участков поверхности. Соотношение количеств этих участков для каждого материала зависит от режимов трения. При увеличении ударной нагрузки возрастает доля участков, претерпевающих пластическую деформацию, что вызывает увеличение интенсивности изнашивания.

В последние несколько десятилетий необычайно вырос интерес к задачам, где смещения атомов от решеточных положений значительны и требуется учет нелинейных слагаемых в разложении сил межатомных взаимодействий. Нелинейные дискретные системы, по сравнению с линейными, проявляют целый ряд качественно новых физических свойств, среди которых одним из важнейших является возможность существования в них волн солитонного типа (ВСТ). ВСТ необычайно устойчивы по

отношению к возмущениям и, в случаях близких к интегрируемым, взаимодействуют друг с другом почти упруго, то есть восстанавливают свои свойства после столкновения. Таким образом, ВСТ способны эффективно осуществлять перенос энергии, импульса, вещества, электрического заряда и др., что и делает их исключительно важными для физики конденсированного состояния. Такого рода волны возможны и в континуальных нелинейных системах, но дискретность среды вносит заметные корректировки в их свойства и даже может приводить к появлению качественно новых свойств. С математической точки зрения, дискретизация приводит к потере трансляционной симметрии системы, а в физическом плане это проявляется в появлении периодического потенциала, который ВСТ вынуждена преодолевать при движении вдоль кристалла от одной ячейки периодичности к другой, что нашло отражение в теории дислокаций в виде потенциала Пайерлса-Набарро [119].

Таким образом, неизбежно возникновение ситуации при сложном динамическом нагружении, когда в результате наложения волнового ударного нагружения и волн солитонного типа возникает резонанс с резким увеличением разрушения металла и снижением износостойкости трибосопряжения.

Наблюдаемое при испытаниях увеличение износа при многокомпонентном нагружении с наличием ударной нагрузки является, видимо, результатом комплексного воздействия удара на состояние поверхностного слоя. Во-первых, ударная нагрузка приводит к увеличению дислокаций в поверхностном слое, а во-вторых, приводит к возникновению пульсирующей, циклически изменяющейся силы трения в процессе скольжения при сложном нагружении.

Согласно волновой теории деформации в деформируемом теле возникает целый спектр волн пластической деформации различной длины, которые определяют иерархию структурных уровней деформации. Простейшим видом объемных волн являются плоские волны, которые

состоят из продольных (расширения - сжатия) и поперечных (сдвиговых).

Примером автоволновой природы пластической деформации является эффект Портевина-Ле-Шателье (прерывистое течение).

Специфика ударных волн заключается в том, что в ее фронте реализуются более высокие сдвиговые напряжения, чем при обработке материала относительно плавной волной (не ударной). Структура и профиль ударной волны напрямую связаны с вопросом ее затухания. После выхода на свободную поверхность ударная волна отражается волной разряжения (разгрузки), которая, в частности, может привести к отколу. Затухание объясняется взаимодействием волны сжатия с волной разряжения. Пластическое деформирование приводит к изменению величины внутренней энергии материала за счет изменения его структуры. Основная диссипация за счет образования дефектов происходит на фронте ударной волны. Фронт волны плотности подвижных дислокаций растет четко коррелируя с волнами нагрузки и разгрузки [120].

Таким образом, наличие ударной нагрузки при трении с трехкомпонентным нагружением приводит к изменению волновой картины деформируемого тела. Взаимодействуя с волнами деформаций от продольного и поперечного скольжений, ударная волна способствует изменению напряжений и структурного состояния поверхностного слоя. Фронт волны, доходя до любой акустической границы (поверхности, межзеренной границы, скопления дефектов), частично отражается от нее. Отражения между границами фрагментов и дефектами решетки, приводят к рассеянию волновой энергии в зернах и на дефектах, генерируют спектр затухающих колебаний. Можно предположить, что наложение перечисленных волн, а, следовательно, и волн плотности дислокаций, приводит к получению равнопрочного поверхностного слоя образцов за счет более равномерного распределения дислокаций.

Сложное трехкомпонентное нагружение (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях) создает условия для

формирования фрагментов поверхностного слоя с относительно легким прохождением дислокаций через данные кристаллиты к их границам. Это способствует снижению уровня внешних напряжений, необходимых для действия механизма ротационной пластичности в анализируемых структурах. В результате образуется поверхностный слой с более равномерной текстурой, что сопровождается повышенным износом. Изменение характера нагружения приводит к изменению состояния поверхностного слоя и, как следствие, изменению износостойкости трибосопряжения.

Повышенный износ происходит у деталей с однородным равнопрочным поверхностным слоем. Увеличение поперечных проскальзываний при трении с трехкомпонентным нагружением способствует образованию более однородного поверхностного слоя, снижению его прочности, получению более равномерной микрогеометрии поверхности, которая сопровождается снижением величины и разброса работы выхода электрона по поверхности. Степень этих изменений существенно зависит от химико-физических свойств материалов и условий трения.

В общем случае процесс многоциклового усталости в условиях сложного трехкомпонентного нагружения можно разделить на несколько стадий, аналогичных представленным в работе [104]. На первой стадии начинается размножение и движение дислокаций преимущественно в поверхностном слое. Взаимодействие дислокаций приводит к формированию дислокационных скоплений, ячеистой структуры. На поверхности образца образуются линии скольжения, которые объединяются и формируют полосы скольжения. Внутри устойчивых полос скольжения наблюдается интенсивное необратимое разупрочнение (динамический возврат). Поэтому предельно упрочненному до начала испытаний материалу при приложении циклических нагрузок свойственно разупрочнение. Вторая стадия характеризуется образованием субмикротрещины в поверхностном слое образца. Этому предшествует локализация пластического деформирования и появление вблизи поверхности, в районе пересечения ее с областями повышенного

деформирования, локальных источников внутренних напряжений. Третья стадия – устойчивого роста усталостных трещин.

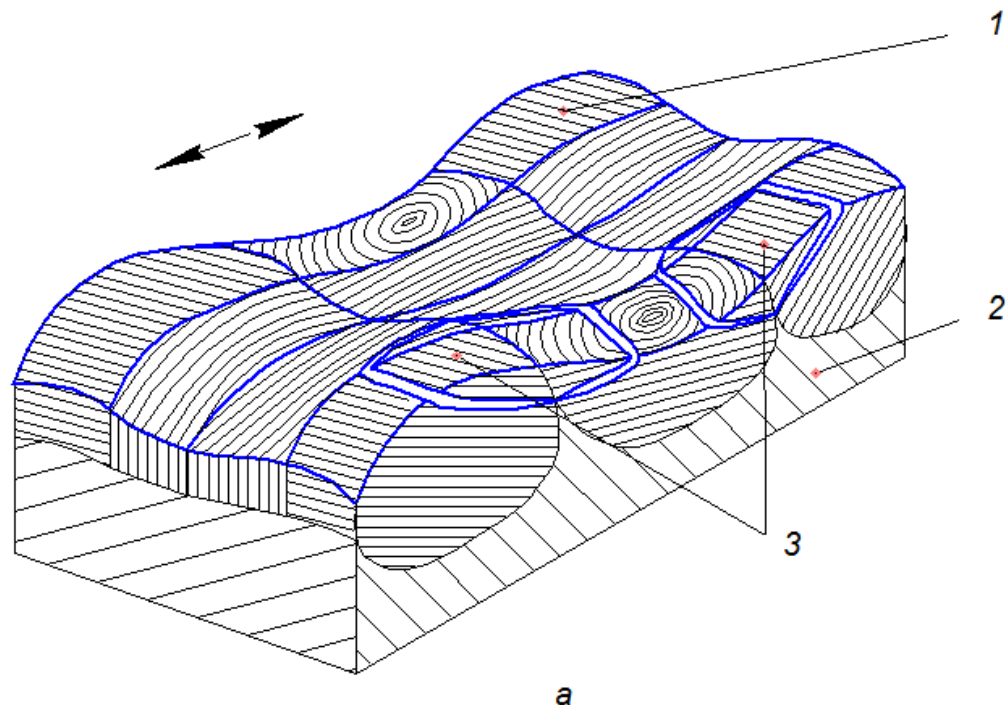
Можно предположить, что отмеченная ранее нелинейность зависимости объемной интенсивности изнашивания от амплитуды поперечных проскальзываний и замедление роста износа при увеличении амплитуды поперечных проскальзываний больше определенного предельного значения, связаны с количеством дислокаций в поверхностном слое. Увеличение амплитуды поперечных проскальзываний в условиях многокомпонентного характера динамического нагружения неизбежно приводит к увеличению количества дислокаций. При большой плотности дислокаций усиливается их взаимодействие, происходит их закрепление, которое в свою очередь затрудняет выход на поверхность металла новых дислокаций и сопутствующих дефектов. Количество активных центров на поверхности перестает нарастать, достигнув насыщения, что сопровождается отсутствием роста износа при увеличении амплитуды поперечных проскальзываний больше предельного значения и стабилизацией работы выхода электрона.

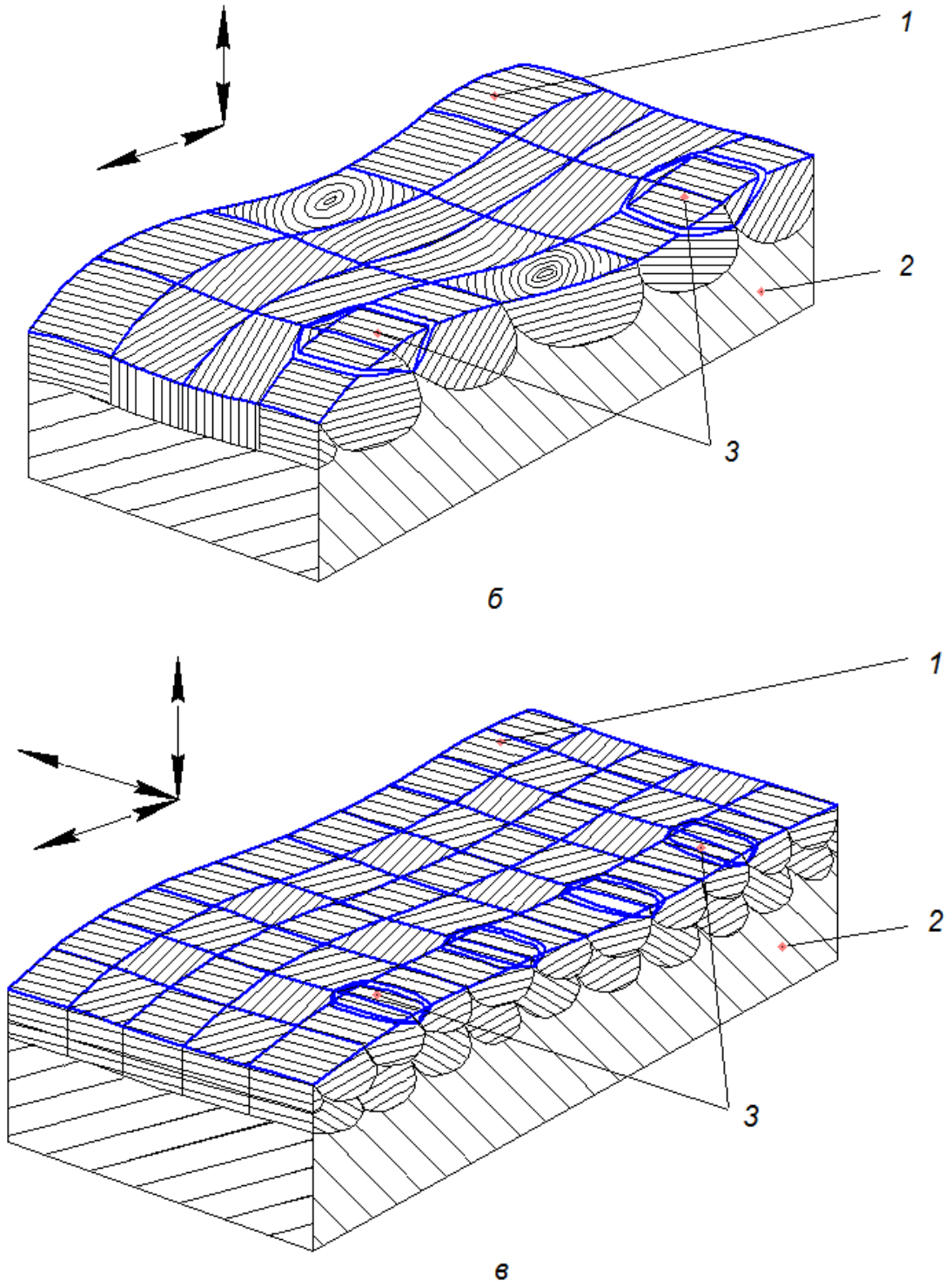
Проведенные в разделах 3 и 4 исследования закономерностей износа различных материалов, трансформации структуры и особенностей структурного состояния, деформированных при трении поверхностных слоев металла при многокомпонентном динамическом нагружении, позволяет установить связь между структурой и свойствами, в том числе износостойкостью материала. Таким образом, можно предположить, что износостойкость материала при многокомпонентном динамическом нагружении в большой степени определяется способностью адаптироваться к условиям нагружения, которая выражается в изменении структурного состояния поверхностного слоя, однородности его прочностных и деформационных характеристик. Это объясняет приведенные выше данные исследований о том, что чем более износостойким в условиях опытов является материал, тем меньше величина предельной амплитуды поперечных

проскальзываний при трехкомпонентном нагружении и меньше влияние амплитуды поперечных проскальзываний на величину интенсивности изнашивания.

Соответствующая модель структурной организации и разрушения поверхностного слоя при трении с многокомпонентным динамическим нагружением представлена на рисунке 5.2.

В дополнение к модели структурной организации и разрушения поверхностного слоя при трении, описанной в разделе 5.1.2 и представленной на рисунке 5.1, реверсное скольжение (однокомпонентное динамическое нагружение) приводит к вытягиванию фрагментов. Учитывая формирование при этом сравнительно больших по величине фрагментов получаемые частицы износа крупные. Для их отделения требуется повышенная энергия, что сопровождается незначительной скоростью износа (рис. 5.2а). Получаемая равновесная шероховатость значительна и характеризуется наличием продольных царапин.





1 – фрагменты поверхностного слоя; 2 – основной слой;
3 – частицы износа

Рисунок 5.2 – Модель разрушения поверхности при трении с многокомпонентным динамическим нагружением: а) однокомпонентное; б) двухкомпонентное; в) трехкомпонентное.

Добавление к реверсному скольжению ударного нагружения (двухкомпонентное нагружение) приводит к уменьшению величины фрагментов и их прочности, повышению равнопрочности поверхностного слоя, что способствует уменьшению частиц износа и снижению равновесной шероховатости (рис. 5.2б). Скорость износа при этом возрастает.

Трехкомпонентное нагружение характеризуется диспергированием фрагментов поверхностного слоя, высокой равнопрочностью и однородностью (рис. 5.2в). Измельчение фрагментации поверхностного слоя и снижение их прочности облегчает отделение частиц износа. Мелкие частицы износа, образующиеся в большом количестве, приводят к высокой скорости износа. При этом формируется низкая равновесная шероховатость, как в продольном, так и в поперечном направлениях.

Рассмотренная модель разрушения поверхности при трении с многокомпонентным динамическим нагружением согласуется и наглядно подтверждается результатами исследований изменения износостойкости различных металлов (раздел 3.2) и структурного состояния поверхностного слоя, микрогеометрии получаемой поверхности, отмеченными в разделе 4.1 (рис. 4.1, 4.2, 4.5 – 4.11, 4.13).

Изучение структуры, формирующейся при конкретных условиях трения, открывает возможности выбора материалов и оптимальных режимов их эксплуатации, создает предпосылки для разработки новых износостойких материалов и покрытий. Определение закономерностей и разработка условий формирования износостойкого поверхностного слоя деталей трибосопряжений возможно на основе анализа величины износа и состояния поверхности с учетом реального вида нагружения. Одним из основных факторов, определяющих условия контактирования в трибосопряжениях, выступает температура окружающей среды.

5.2 Влияние температуры окружающей среды на формирование и разрушение поверхностного слоя деталей трибосопряжений в условиях многокомпонентного динамического нагружения.

Известно, что в подавляющем большинстве случаев при понижении температуры прочностные свойства поликристаллических металлов повышается, в то время как пластические свойства падают, т.е. материал, как правило, охрупчивается. Изменение механических свойств металлов и сплавов при снижении температуры зависит от вида кристаллического строения, размера зерен, включений, атомов легирующих элементов, фазового состава сплавов. Особое влияние на прочность и пластичность кристаллических тел оказывают число действующих в кристаллической решетке плоскостей скольжения, количество и распределение примесей, упорядоченность дислокационной структуры.

На основании изучения физической стороны проблемы прочности материалов при низких температурах установлено, что переход в хрупкое состояние чистых моно- и поликристаллических металлов зависит от температуры, скорости деформирования, распределения внутренних напряжений, плотности дефектов кристаллической решетки. Однако разработанные физические модели и предложенные аналитические соотношения не позволяют количественно оценить влияние многочисленных факторов и пригодны в основном для решения задач синтеза новых материалов. Остается малоизученной физическая сторона сопротивления течению и разрушению конструкционных сталей и сплавов при низких температурах [28].

Можно предположить, что отмеченная ранее в разделе 3.4 нелинейность зависимости объемной интенсивности изнашивания при отрицательных температурах в условиях многокомпонентного характера динамического нагружения, связана с количеством дислокаций в поверхностном слое. При большой плотности дислокаций усиливается их

взаимодействие, происходит закрепление, которое в свою очередь затрудняет выход на поверхность металла новых дислокаций и сопутствующих дефектов. Количество активных центров на поверхности перестает нарастать, достигнув насыщения, что сопровождается отсутствием изменения износостойкости при понижении температуры.

Обобщить полученные данные можно в следующей феноменологической модели разрушения поверхностного слоя. Общее действие факторов не сводится к их сумме, а приводит к их синергизму. Удары и реверсивное трение повышают температурный порог хладноломкости. Взаимодействие факторов выражается в их влиянии на микроструктуру материалов. Учитывая работы [11, 16] это можно объяснить с точки зрения позиций теории дислокаций. При динамическом нагружении дислокации перемещаются, образуя в плоскости скольжения скопления около препятствий. Происходит микропластичная деформация, при которой скопления дислокаций могут рассасываться (распыляться) под действием температурных флуктуаций. Со снижением температуры уменьшается возможность температурных флуктуаций и растет сопротивление движения дислокаций. При действии только ударной нагрузки в циклический недеформированном слое (под действием реверсивного трения) число дислокаций в скоплениях сравнительно мало, и для разрушения оно должно сначала увеличиться до критического. За это время происходит и обратный процесс - частичное распыление (рассасывание) скоплений. Под действием же ударной нагрузки в циклический деформированном материале сразу может быть достигнуто разрушительное напряжение, потому что в результате увеличения плотности дислокаций число задержанных у препятствий дислокаций будет достаточным для этого. В циклический деформированном материале в отличие от исходного в зернах, которые окружают скопление дислокаций, действует другой механизм блокировки пластичного течения, где основную роль играет взаимодействие дислокаций, образующихся при ударной нагрузке, с дислокациями, образующихся в результате циклического

деформирования, что приводит к затруднению пластической деформации.

Таким образом, создаются условия, при которых облегчается зарождение хрупкой трещины.

5.3 Моделирование трибопроцессов в зоне контакта инструмента и заготовки при обработке металлов резанием

В процессе обработки металлов резанием наблюдаются элементы трехкомпонентного нагружения, которые вызваны тремя факторами: вращением детали, продольным движением инструмента и вибрациями. Вследствие вибраций при обработке в реальных условиях резания, величина нагрузки является переменной, что указывает на сложный характер нагружения при взаимодействии инструмента и заготовки. При этом остро стоит проблема обеспечения высокой износостойкости режущего инструмента.

В трибосопряжении типа «инструмент-деталь» величина нагрузки, действующая на режущую кромку, определяется скольжением стружки и обрабатываемой поверхности заготовки по рабочим поверхностям инструмента, которое происходит при больших скоростях, высоких температурах и давлениях. Действие этих факторов вызывает износ рабочих поверхностей инструмента, а также создает сложное объемное напряженное состояние режущего клина, переменное во времени. Изменяется форма режущих кромок в результате износа, появляются микротрещины и внутренние напряжения, колебания значений усилий и температур при врезании и выходе инструмента. Поэтому стойкость инструмента зависит от двух постоянно действующих и тесно связанных между собой процессов - износа при трении рабочих поверхностей инструмента о стружку и обрабатываемую поверхность заготовки и разрушения их под действием нагрузок, которые возникают в процессе резания.

Процесс резания сопровождается большой скоростью деформации.

При этом резко меняются физико-механические свойства материала – возрастает число плоскостей скольжения, изменяется соотношение между его пределом текучести и временным сопротивлением, возрастает химическая активность материала и т.д. Явления, сопровождающие процесс резания, приводят к изменению физико-механических и химических свойств поверхностного слоя как обрабатываемого, так и инструментального материала, влияют не только на эффективность резания, но и на долговечность детали. Важно получить такое качество поверхности при изготовлении деталей машин, которое было бы в условиях эксплуатации близким к рабочему состоянию поверхностных слоев и сопровождалось высоким комплексом прочностных свойств.

В настоящее время существуют реальные возможности управления формированием параметров поверхностного слоя детали в процессе ее изготовления. Эта возможность может быть реализована рациональным выбором методов и режимов предварительной и окончательной обработки рабочих поверхностей детали. При этом используют различные технологические методы обеспечения параметров поверхностного слоя деталей с учетом условий их эксплуатации. Параметры поверхностного слоя нормируются с учетом заданных условий эксплуатации и технологического обеспечения. Технолог, выбрав возможные методы обработки, анализируя физико-химические процессы, протекающие при резании, и зная зависимости изменения параметров поверхностного слоя от условий обработки, должен рассчитать режимы обработки для каждого из выбранных методов, а также технологическую себестоимость, обеспечивающие требуемые параметры поверхностного слоя для рассматриваемой поверхности детали [104].

Что касается износостойкости металлорежущего инструмента, то она также зависит от условий резания и физико-химических свойств инструментального и обрабатываемого материалов. Условия резания, влияющие на износостойкость, можно свести к основным параметрам:

величине нагрузки, скорости перемещения инструмента относительно заготовки, температуре и свойствам среды в зоне резания. Причем, скорость перемещения в большинстве случаев складывается из скорости резания и скорости подачи, определяемых главным и вспомогательным движениями инструмента или заготовки. Вследствие вибраций при обработке в реальных условиях резания, величина нагрузки является переменной, что указывает на сложный характер нагружения при взаимодействии инструмента и заготовки. Износ режущего инструмента и формирование качества обработанной поверхности происходит в основном при контактном взаимодействии в условиях трехкомпонентного нагружения: проскальзывании в двух взаимоперпендикулярных направлениях и переменной нагрузке с возможностью возникновения удара.

Несмотря на то, что износ инструмента является важным показателем его работоспособности, физическая природа изнашивания изучена еще не достаточно для принятия практических решений, повышающих эффективность резания, вследствие исключительной сложности контактных процессов, протекающих на передней и задней поверхностях инструмента. Существует ряд причин, приводящих к изнашиванию контактных поверхностей инструмента, что сопровождается различными видами изнашивания. Режущий инструмент может подвергаться адгезионному, абразивному, диффузионному, химическому, окислительному и другим видам изнашивания. При этом изменение поверхностей трения в основном обусловлено тремя группами явлений: деформациями, повышением температуры и действием окружающей среды.

Как известно, в результате диссипативных процессов при трении работа внешних сил сопровождается поглощением энергии поверхностным слоем материала и образованием теплоты. При этом упруго-пластическая деформация поверхностных слоев металла зависит от условий контакта в трибосоединении. Пластически-деструкционный характер изнашивания поверхностного слоя определяется числом циклов растяжения и сжатия,

образованием и разрушением структур, которые формируются в поверхностном слое. Изменение характера нагружения приводит к разной интенсивности изнашивания не только за счет изменения состояния поверхностного слоя, но и разной продолжительности пребывания в зоне контакта продуктов изнашивания, характера действия этих продуктов на трибосопряжение.

С позиций науки о трении и изнашивании для всех материалов существует диапазон величин параметров условий резания, в котором значения интенсивности изнашивания и коэффициента трения намного ниже, чем вне этого диапазона. Данное явление – результат структурной приспособляемости материалов, заключающейся в перестройке структуры поверхностного слоя в энергетически выгодную для данных условий нагружения. При этом взаимодействие трущихся тел локализуется в тонком слое, характеризующимся особым структурно-фазовым состоянием (слой вторичных структур). Этот слой защищает основной материал от разрушения. Внешние механические воздействия неизбежно разрушают слой вторичных структур, но параллельно идет процесс его восстановления. Наблюдается динамическое равновесие процессов разрушения и восстановления вторичных структур. Явление структурной приспособляемости нашло объяснение в рамках структурно-энергетической теории трения, разработанной на основе термодинамики необратимых процессов [103].

Несмотря на высокие скорости деформации, присущие процессу резания, только за счет образования новой поверхности в пределах площадки контакта стружки с передней поверхностью лезвия возникает около 10^{15} свободных связей в секунду. И хотя продолжительность их существования в несвязанном состоянии 10^{-12} с, на передней поверхности лезвия успевает образоваться граничный слой (белый слой). Возникает он благодаря мгновенному процессу схватывания двух разнородных материалов и сопровождающих его явлений адгезии и диффузии. Граничный слой состоит из нескольких слоев и формируется в результате перенесения одного

материала на поверхность другого при твердофазном взаимодействии. Для него характерны неоднородность рельефа контактной поверхности вследствие различных скоростей схватывания и разрушения пары инструментальный - обрабатываемый материалы на различных участках контакта; фазовые превращения, обусловленные взаимодействием данной пары между собой и внешней средой; наличие текстуры; образование различных микро- и субмикроструктур и др. [121].

Таким образом, учет трехкомпонентности нагружения, геометрии контакта, свойств обрабатываемого и инструментального материала и влияния среды усложняет картину процесса разрушения контактирующих поверхностей, но является необходимым при определении износостойкости режущего инструмента. При этом необходимо проведение исследований трибологических характеристик поверхностного слоя обработанной детали с учетом распределения контактной нагрузки в пространстве и времени, анализа изменения фазового равновесия, химического состава, структуры, а также деформационных и прочностных характеристик.

Сложные физико-механические и химические процессы, протекающие в зоне резания, приводят к противоречивым данным исследований трибологических характеристик и невозможности сопоставления различных методов исследования. Полученные при этом результаты исследований не позволяют воссоздать картину процесса изнашивания, отвечающую реальному из-за сложности нагружения в контакте, а используемые исследователями модели образования поверхностного слоя при резании не отвечают реальной картине его возникновения.

Так, например, в модели образования макронапряжений обработанной поверхности является условность в раздельном рассмотрении действий механического и теплового факторов, а также то, что она не учитывает направление силовой нагрузки, действующей на поверхностный слой при обработке детали. В зависимости от направления силового поля в

поверхностном слое детали могут создаваться как растягивающие, так и сжимающие напряжения [104].

Определенную аналогию резанию представляет процесс сухого внешнего трения, при котором взаимодействие трущихся тел происходит также по их поверхностям с существенным влиянием свойств поверхностного слоя. Явления, наблюдающиеся при износе деталей машин, имеют место и при резании металлов. При этом имеется сходство по таким основным показателям: 1) закономерности проявления металлами характерных физико-механических свойств, которые присутствуют только в поверхностном слое; 2) изменение изнашивания инструментальных материалов в сопоставимых режимных условиях по силовым, температурным и кинематическим параметрам.

Например, количественное влияние адгезии (межмолекулярного взаимодействия) как активного фактора в механизме износа режущего инструмента может быть оценено общими закономерностями усталостного износа (при малоциклового усталости) [122]. Природа явлений схватывания и переноса как в трении узлов деталей машин, так и в трении при резании металлов одина, и, с современных позиций, эти явления представляют определенный тип химических реакций – твердофазные реакции. При этом фрикционный контакт характеризуется самоорганизацией, саморегулированием и структурной приспособляемостью [123].

Вследствие сложности и многообразия процессов, сопровождающих контактное взаимодействие инструмента и заготовки при резании, как по характеру протекающих физико-химических процессов, так и по взаимосвязи различных факторов, их исследование во многих случаях целесообразно проводить на специальных моделирующих установках. Испытания в реальных условиях обходятся дороже, являются длительными, трудоемкими и не всегда позволяют понять внутренние связи сложного процесса.

В настоящее время для исследований явлений, возникающих в зоне контакта инструмента и заготовки при резании, широко применяются

моделирующие трибоустановки различных конструкций. Однако исследования трения на этих установках не позволяют получить рекомендации по оптимальным условиям резания различных материалов, так как условия трения на моделирующих установках резко отличаются от условий трения при резании [124, 125]. При этом одним из основных отличий является упрощенная схема нагружения образцов в процессе испытаний.

Известны методики испытания сложнонагруженных деталей трибосопряжений, которые позволяют получать и изучать функциональные зависимости фрикционно-износных характеристик материалов пары, осуществлять сравнительную оценку фрикционных пар, производить физическое моделирование процессов в реальных трибосопряжениях [87]. Для моделирования зоны контакта при резании, определения закономерностей изнашивания инструментального материала и состояния контактирующих поверхностных слоев в зависимости от факторов нагружения отдельно и во взаимодействии необходим специальный стенд. При этом в наибольшей степени подходит многофункциональная установка с неуравновешенной массой [67]. Схема установки представлена на рисунке 2.5.

С учетом этих условий испытаний предлагаемый стенд полностью моделирует процесс перемещений и колебаний, которые возникают во время обработки в зоне резания. При испытаниях образцы проскальзывают в двух взаимоперпендикулярных направлениях, которые моделирует процесс трения при обработке по задней или передней поверхности. Трехкомпонентность нагружения и соответствие модели реальному процессу достигается благодаря добавлению удара при трении, что при резании моделирует процесс вибрации или ударного воздействия на заготовку зубьев многолезвийного инструмента, а камера задания температуры позволяет проводить испытания в условиях температур резания. Следует учесть также, что в условиях нормального переменного нагружения разрыв контакта ведет к изменению его значения от нуля при отсутствии контактирования до очень больших значений в момент соударения. С повышением энергии удара амплитуда нормального

нагружения увеличивается. Это дает возможность за короткий промежуток времени моделировать различные типы обработки разными материалами.

Испытания проводятся на двух образцах, которые изготовлены из инструментального и обрабатываемого материала. В процессе испытаний интенсивность изнашивания определяется из зависимости 2.3 и 2.4.

При испытаниях на данной установке необходимо учитывать, что явления трения и изнашивания при резании металлов происходят при повышенных температурах, скоростях и нормальных контактных нагрузках. Давление на контактные площадки лезвий разных видов инструментов может колебаться в широких пределах и на два – три порядка превышает давление на трущихся поверхностях большинства сопряженных деталей машин. Работа сил трения, количество выделенного тепла и температура при резании металлов будут во много раз больше еще и потому, что величины контактных поверхностей при резании металлов минимальны. Для контакта характерны достаточно высокая ювенильность, неравномерность распределения действующих напряжений и температуры, неидентичность условий на рабочих поверхностях инструмента.

В связи с этим, предложенное моделирование дает качественную оценку проявлений пластической деформации в тонком поверхностном слое контробразца из обрабатываемого материала и образца из инструментального материала. Не давая сопоставимой количественной оценки, условия данного моделирования позволяют максимально приблизиться к реальным условиям резания, выяснить закономерности формирования поверхностного слоя контактирующих поверхностей, уменьшить объем исследований по выбору лучшей марки инструментального материала.

При этом реализуются основные принципы моделирования эквивалентных состояний трибологических пар при обработке металлов резанием:

- подобие нагрузочных режимов в натуральных и модельных условиях.

Этот принцип подразумевает назначение таких режимов, которые не

превышали бы по своей величине имеющих место при резании, а если бы и превышали то настолько, чтобы не нарушались физико-химические процессы в поверхностном слое материала, и тем более не происходила смена ведущего механизма изнашивания;

- подобие топографии изношенных поверхностей (особенно инструментального материала). Предполагает равенство усредненных значений максимальных глубин повреждаемости (R_{max}), равенство усредненных значений шага неровностей (S_m), равенство количества повреждений на единицу площади контакта (R/F_k), подобие относительных опорных длин профиля изношенных поверхностей (t_p);

- подобие структурных и фазовых изменений в поверхностном слое. Предполагает равенство размеров, прочностных и деформационных свойств фрагментов поверхностного слоя, его энергетического состояния как обрабатываемого, так и инструментального материалов в модельных условиях и при резании;

- принцип эквивалентности напряженных состояний. В общем случае напряженное состояние в зоне контакта определяется суммой напряжений от механического приложения нагрузки и напряжений, возникающих в результате физико-химического воздействия (в первую очередь, температурного). В модельных условиях возможно изменение условий образования оксидного слоя вследствие различной длительностью цикла нагрева и прекращения его в тот момент, когда температура образца (модели) достигнет уровня, соответствующего реальному. Прекращение нагрева приведет к тому, что начальные условия в процессе охлаждения изменятся, т.е. появится неравномерность температур по поверхности контакта и на некоторой глубине;

- эквивалентность интенсивностей изнашивания. Если испытания проводить так, чтобы интенсивность изнашивания в модельных условиях (J_{Vm}) была больше интенсивности в натуральных (J_{Vo}) и предположить, что $J_{Vm} = K J_{Vo}$, где коэффициент эквивалентности $K > 1$, то можно получить подобие

исследуемых процессов при условии, что ведущие механизмы изнашивания оригинала и модели будут идентичными;

- принцип суммирования повреждений. В случае справедливости линейных гипотез суммирования повреждений суммарный износ инструмента при резании определяется длиной пути контакта с обрабатываемым материалом, а в модельных условиях количеством циклов взаимного перемещения образцов.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно заключить, что износ металлорежущего инструмента и формирование поверхностного слоя детали при резании происходит при реализации структурной приспособляемости в условиях сложного нагружения. Оценка эффективности процесса резания должна производиться с учетом анализа состояния поверхностного слоя как обрабатываемого, так и инструментального материала. Изнашивание инструментального материала и получение обработанной поверхности определенного качества включает комплекс явлений, связанных с деформацией тончайших поверхностных слоев металла, их взаимодействием с химически активными компонентами смазочно-охлаждающей технологической среды. Предложенная методика испытаний деталей трибосопряжения "инструмент-деталь" дает возможность на порядок снизить продолжительность испытаний, уменьшить рассеяние полученных результатов по сравнению со стендовыми эквивалентными испытаниями и обеспечить экономию при испытаниях дорогостоящих материалов

5.4 Прогнозирование влияния свободных макрорадикалов в зоне контакта трибосопряжений на износостойкость деталей

5.4.1 Трибодиагностика эффективности разрушения поверхности металла при воздействии свободных макрорадикалов

Как показали исследования, представленные в разделе 4.1, деформирование металла при трении с разными схемами нагружения приводит к структурным перестройкам поверхностного слоя, изменению энергетического рельефа поверхности. При трехмерном нагружении повышенный износ происходит у деталей с однородным равнопрочным поверхностным слоем. Повышение сложности нагружения в трибосоединении способствует образованию более однородного поверхностного слоя, снижению его прочности, получению более равномерной микрогеометрии поверхности. Степень этих изменений существенно зависит от физико-химических свойств материалов и условий трения.

Можно предположить, что для повышения производительности резания необходимо стремиться к обеспечению в процессе обработки однородного равнопрочного поверхностного слоя обрабатываемой детали. Для повышения износостойкости металлорежущего инструмента изготовленного из инструментальной стали необходимо, чтобы при резании его поверхностный слой формировался неоднородным с наличием крупных и мелких фрагментов различной прочности. Таким образом, решая обратную задачу трибометрии, для управления процессами обработки и повышения ее эффективности целесообразно использовать трибодиагностику поверхностного слоя обрабатываемой детали и инструмента.

Требуемое структурное состояние поверхностного слоя контактирующих поверхностей заготовки и инструмента при обработке должно формироваться за счет изменения условий нагружения в зоне контакта. При этом в большинстве случаев нерационально изменять режимы

резания с учетом того, что их оптимизация, в основном, ограничивается технологическими параметрами. Более перспективным направлением изменения условий нагружения в зоне контакта является применение в процессе резания смазочно-охлаждающих технологических сред различных характеристик.

Известны различные эффекты, производимые смазочной средой на трущихся поверхностях, которые могут привести как к повышению стойкости материала к разрушению, так и к разупрочнению материала. Упрочняющее действие может быть обусловлено диффузией элементов внешней среды в материал поверхностного слоя, что приводит к торможению дислокаций, а также барьерным эффектам граничного слоя смазки, препятствующим выходу дислокаций наружу и способствующим упрочнению материала поверхностного слоя во время его деформирования. Разупрочнение может происходить в результате действия эффектов Ребиндера [107]. Оба свойства широко применяются на практике: первое – для повышения износостойкости поверхностных слоев, второе – для облегчения приработки поверхностей и снижения сил резания при технологической обработке.

Как известно [114], с физической точки зрения, поверхность металлов представляет собой атомную плоскость с незавершенной кристаллической решеткой, что приводит к высокой сорбционной активности поверхностного слоя. Это, в частности, приводит к эффекту Ребиндера (внешнему и внутреннему), заключающемся в адсорбционных процессах, в первую очередь пластифицировании металла в зоне контакта с переносом пластических деформаций в тонкий поверхностный слой и расклинивающим действием поверхностно активных веществ при их попадании в полость поверхностных трещин [174].

В частности, установлена важная особенность взаимного воздействия реверсирования и поверхностно-активной среды на свойства поверхностных слоев пар трения, которая заключается в интенсификации реверсом эффекта Ребиндера. Как установлено В.Д. Евдокимовым [22], реверсивное трение по

сравнению с односторонним значительно усиливает пластифицирующий эффект, что в свою очередь, облегчает условия реверсивного трения и экранирует трущиеся поверхности от дальнейшего разрушения. Показано, что отрицательный эффект реверса – повышенный по сравнению с односторонним трением износ рабочих поверхностей можно устранить с помощью определенного подбора поверхностно-активных присадок к маслам. Так, при реверсивном трении обезжиренных образцов и образцов, покрытых слоем смазки без поверхностно-активной присадки, сила трения и деформации поверхностных слоев вне зоны контакта больше, чем при идентичных условиях одностороннего трения. Применение олеиновой кислоты в качестве присадки к маслу уменьшает силы трения и деформации. Однако, если 0,5%-ная добавка олеиновой кислоты еще сохраняет повышенными силу трения и деформации при реверсивном трении, то увеличение процентного содержания кислоты до 2% нивелирует это различие.

Как уже упоминалось, часто процесс резания металлов производится без подачи смазочно-охлаждающей жидкости. В этом случае большое значение приобретают заменители поверхностно активных веществ, повышающие эффективность обработки. Согласно литературным данным [127] аналогично низкомолекулярным поверхностно активным веществам активизируют разрушение частиц железа деструктурируемые полимеры. При обработке с применением полимеров наблюдается повышенное разрушение металлов вследствие образования продуктов механического разрушения молекулярных цепей полимеров – свободных макрорадикалов.

Чем ниже энергия активации деструкции полимера, тем выше степень разрушения металла. Так, феноло-формальдегидная смола обладает трехмерной структурой, поэтому энергия активации деструкции у нее выше, чем, например, у полиэтилена – полимера линейной структуры и, тем более, у полиметилметакрилата. Энергия активации полиэтилена 60-70ккал/моль, полиметилметакрилата – 27ккал/моль.

Модель разрушения: а) механическая деструкция полимерных цепей, образование макрорадикалов; б) адсорбция макрорадикалов на ювенильной поверхности металла; в) пластифицирование, охрупчивание и разрушение металла. При адсорбции макрорадикалов на ювенильных поверхностях деформированного активного металла поверхностная энергия металла уменьшается. В связи с этим в поверхностных слоях металла создаются благоприятные условия для пластифицирования – движения, зарождения и взаимодействия дислокаций. Резкое увеличение плотности несовершенств охрупчивает металл [127].

Можно предположить, что миграция радикалов вглубь поверхностного слоя осуществляется за счет собственной избыточной свободной энергии радикалов, ядер дислокаций, границ зерен и протекает самопроизвольно согласно принципу минимума свободной энергии [114]. Причем, для облегчения разрушения металла процесс диффузии радикалов должен проходить совместно с окислением поверхности.

Однако при этом необходимо учитывать, что физико-химическое действие высокоактивных радикалов на металл интенсифицируется знакопеременностью трения так же, как и действие поверхностно-активных присадок в жидкой смазке. Как отмечается В.Д. Евдокимовым [22], на этапе приработки пар трения знакопеременные деформации и расклинивающий эффект вызывают интенсивное разрушение поверхностных слоев, которое по мере адсорбционного пластифицирования, химосорбционных реакций и переноса сдвиговых деформаций от трения в тончайший поверхностный слой подавляется и сменяется облагороженными свойствами поверхностей трения с рациональной микрогеометрией и повышенной износостойкостью. При этом отмечается увеличение плотности дислокаций при трении в поверхностно-активной среде. Знакопеременные деформации при реверсивном трении вызывают дополнительное генерирование микродефектов структуры, образование новых свободных поверхностей и радикалов. В этих условиях активизируется взаимодействие поверхностно-активных веществ с

поверхностями трения, что приводит к увеличению износостойкости пары трения.

Практическое применение предложенной в разделе 3.1 методики моделирования зарождения, развития системы трещин и процессов контактного разрушения поверхностей при трении в условиях сложного термомеханического нагружения возможно на примере модели учета взаимного влияния процессов механического (объемного) разрушения и фрикционной усталости в случае наличия в зоне контакта свободных макрорадикалов.

Для разработки модели целесообразно использовать современную трактовку гипотезы слабого звена с применением концепции опасного объема для объемной усталости и опасной площади для изнашивания, термofлуктуационной теории прочности. Функция вероятности отказов силовой системы за установленный срок службы имеет вид [50]:

$$P(\sigma, q) = a_c \left\langle 1 - \exp \left\{ - C_V (V_{P_y} / V_O) \left[(T_M / T_O)^{m_T} (\sigma - \sigma_{V_{\min}}) \sigma_W \right]^{m_V} - \left[- C_S (S_q / S_O) (q_f^1 T_P)^{m_S} / (q_d - q)^{m_S} \right] \right\} \right\rangle \quad (5.4)$$

где $\hat{a}_{\bar{n}}$ – эмпирический коэффициент, учитывающий статическую взаимосвязь событий повреждения при одновременном действии циклических напряжений σ и контактного давления q ; C_V и C_S – коэффициенты, определяющие схему усталостных испытаний и контактного нагружения; V_{P_y} / V_O – относительный опасный объем циклически деформируемого тела (вероятностный критерий подобия усталостного разрушения по сравнению с некоторым стандартным объемом V_O); S_q / S_O – относительный опасный объем, интенсивно деформируемый при трении тела (прилежащий к площади контактирования); T_M и T_P – температура металла и полимера в зоне контакта в процессе трения и циклического нагружения (модель построена для металл-

полимерной пары трения); T_0 – начальная температура в зоне трения; m_T – параметр температурной активации процессов усталостного повреждения металла; σ_{Vmin} , σ_W , m_V – параметры функции распределения пределов выносливости σ_V в форме закона Вейбула; $q_f^1 = k/\gamma_q$ – единичное термофлуктуационное напряжение соответствующее изменению температуры полимера на 1 К (γ_q – структурно чувствительный коэффициент, k – коэффициент Больцмана); $q_d = U_0/\gamma_q$ – предел деструкции полимера (U_0 – начальная энергия активации процесса разрушения – энергия разрыва межатомной связи).

5.4.2 Разработка специального гранулированного абразивного материала

Одним из наиболее эффективных методов образования радикалов на обработанной поверхности является подача полимера в зону резания одновременно с режущим инструментом. При этом будет происходить инициирование деструкции длинных молекул органических соединений в результате механического и термического воздействия: за счет механического перетирания молекул и их термического разложения.

Обеспечить требуемую подачу полимера в зону резания с наименьшими трудозатратами возможно в случае применения специального абразивного материала при шлифовании и полировании. Использование неметаллического инструментального материала позволит исключить на первом этапе исследований существенное влияние макрорадикалов на износостойкость инструмента. В связи с этим был разработан специальный абразивный материал в виде сплошных сферических гранул, содержащих абразивные зерна и связующее из термопластичного полимера – полиакрилата (рис. 5.3). Причем, абразивные зерна внедрены ориентированно в поверхность гранул в процессе полимеризации мономера [80, 81].

Шлифовальная шкурка изготовленная из этого материала представлена на рисунке 5.4.

Использование в качестве термопластичного связующего вещества гранул полиакрилатов (полиметилметакрилата, полибутилметакрилата, полиметакрилата, полибутилакрилата) позволяет не только обеспечить наличие макрорадикалов на обработанной поверхности, но и изменять твердость связывающего вещества в зависимости от степени полимеризации, обусловленной условиями полимеризации. Это подтверждается примером



Рисунок 5.3 – Гранулированный абразивный материал



Рисунок 5.4 – Шлифовальная шкурка из гранулированного абразивного материала

изменения свойств абразивного материала в зависимости от условий полимеризации, приведенных в табл. 5.1 [80, 81].

Как свидетельствуют приведенные данные, микротвердость полимерной связки абразивного материала изменяется в зависимости от времени полимеризации (опыт 1 и 3), температуры (опыт 1 и 2), количества инициатора полимеризации (опыт 1 и 4).

В качестве связки гранулированного абразивного материала наиболее целесообразно применение полиметилметакрилата (ПММА). Он один из немногих распространенных полимеров, который полностью распадается до мономера. У других полимеров выход мономера варьируется от нуля до значительной доли в общем выходе летучих продуктов.

Таблица 5.1 - Свойства и условия полимеризации гранулированного абразивного материала

№	Компоненты			Режим полимеризации			Характеристика	
	гранул, вес. %						гранул	
	Инициатор	Мономер	Абразив	Время, мин	Температура, °С	Скорость перемешивания, об/мин	Диаметр гранул, мм	Микротвердость полимерной связки, кг/мм ²
1	3,4	51,1	45,5	40	75	400-500	0,3-0,5	11,6
2	3,4	51,1	45,5	40	80	400-500	0,3-0,5	13,9
3	3,4	51,1	45,5	50	75	400-500	0,3-0,5	12,2
4	4,5	50,6	44,9	40	75	400-500	0,3-0,5	13,4

Примечания: 1. Суммарный вес компонентов составлял 23% от веса среды.

2. В качестве компонентов использовали следующие материалы:

- мономер – метиловый эфир метакриловой кислоты (метилметакрилат) $C_5H_8O_2$ по ТУ 8П-156-68;
- инициатор полимеризации - перекись лаурила $C_{24}H_{46}O_4$ по ТУ 6-01-464-80;
- вода дистиллированная;
- поверхностно-активное вещество - желатин по ТУ 4821-77

3. Температура полимеризации – 75°С, время полимеризации – 40 мин

Необходимо учитывать, что большая концентрация свободных макрорадикалов достигается при механической деструкции полимеров с малой энергией активации. Однако ПММА не используется в виде связки серийных абразивных инструментов, что ограничивает возможность оценки влияния свободных макрорадикалов на эффективность финишной абразивной обработки.

Сплошные массы гранул в качестве термопластичного связующего вещества, которых используются полиакрилат в количестве по весу больше 50%, позволяет повысить эффективность резания материалом в связи с

максимальной площадью контакта связующего вещества с обрабатываемой поверхностью. При этом осуществляется дополнительное смазочное действие связующего вещества в процессе контакта разработанного материала с обрабатываемой поверхностью.

Как показали результаты предварительно проведенных исследований [81], обработка лентами с гранулированным абразивным материалом в сравнении с обработкой серийными лентами характеризуется снижением шероховатости обрабатываемой поверхности при относительной стабильности производительности шлифования. При обработке лентами с гранулированным абразивным материалом в течение первых 10 мин наблюдается увеличение производительности шлифования, что, вероятно, является результатом увеличения числа режущих зерен по мере износа сферической поверхности гранул. В дальнейшем число режущих зерен стабилизируется и наблюдается постепенное падение режущей способности по мере их износа. Шлифование серийными лентами характеризуется быстрым падением режущей способности за первые минуты эксплуатации. При этом характер кривой изменения шероховатости поверхности обработанной опытными и серийными лентами подобен. Однако, шлифование лентами с гранулированным абразивным материалом в сравнении с обработкой серийными лентами приводит к снижению шероховатости обработанной поверхности в среднем на 10% .

Данный абразивный материал рекомендован для чистового шлифования и полирования в связи с возможностью повышения эффективности обработки введением в зону резания свободных макрорадикалов, уменьшением влияния неоднородности зернового состава абразивных зерен, варьированием размерами и жесткостью гранул. При этом появляется возможность, изменяя состояние обрабатываемого поверхностного слоя, регулировать степень его разрушения при резании, обеспечить более высокое качество обработанной поверхности и уменьшить трудозатраты при полировании. Одним из основных достоинств предложенного материала

является возможность изготовления гранул различных размеров с использованием для их покрытия абразивных зерен любой зернистости. Это имеет большое значение при ленточном шлифовании и полировании, т.к. шлифовальная шкурка на тканевой основе зернистостью менее М28 не выпускается из-за ограничений структуры основы [81].

Причем, обработка лентами с гранулированным абразивным материалом обеспечивает получение равнопрочного поверхностного слоя в среде водной эмульсии и крупнофрагментного слоя при шлифовании без подачи СОЖ [81].

Таким образом, проведенный анализ показывает на отличие сравнительных эксплуатационных показателей шлифования лентами с гранулированным абразивным материалом и серийными лентами при обработке без СОЖ и с подачей СОЖ в зону резания. Можно предположить, что причина этого явления состоит в наличии свободных радикалов в зоне контакта гранулированного абразивного материала и обрабатываемой поверхности. Причем мера их воздействия более существенна при обработке в среде используемой водоэмульсионной СОЖ. Влияние макрорадикалов на повышение производительности резания в этом случае проявляется в меньшей степени, что, возможно, связано с совместным действием явления диффузии активных радикалов и окисления поверхности.

Внедрение в зону резания активных макрорадикалов при обработке рассматриваемым гранулированным абразивным материалом является перспективным направлением регулирования эффективности процесса шлифования, получения деталей с требуемым структурным состоянием поверхностного слоя. Необходимо проведение дополнительных исследований по оценке химико-физических явлений протекающих в зоне контакта инструмента и заготовки, оптимизации условий возникновения и воздействия макрорадикалов на обрабатываемый поверхностный слой. Уникальность этого материала требует определения оптимальных условий его эксплуатации,

особенно в плане оценки влияния на эффективность резания образующихся при обработке свободных макрорадикалов.

5.4.3 Способы изготовления и пути повышения эффективности трибологическими методами специального гранулированного абразивного материала

Известны способы изготовления абразивного материала, когда гранулы являются продуктом вспенивания термопластичного полимера или диспергирования при перемешивании в органическом растворителе. На поверхности гранул наплавлены абразивные зерна [129, 130, 131]. Однако при этом получают гранулы с внутренней полостью, порами. Кроме того, нанесение абразивных зерен на поверхность гранул методом наплавления ограничивает возможность варьирования мерой полимеризации, величиной жесткости связующего вещества, а в ряде случаев повышает стоимость гранул.

Разработанный способ изготовления абразивного материала позволяет получать сплошные сферические гранулы покрытые абразивными зёрнами. Сплошная масса гранул обеспечивается благодаря нанесению абразива в процессе суспензионной радикальной полимеризации связывающего вещества при перемешивании со скоростью 100-900 об/мин в неорганической среде с введением поверхностно-активного вещества (ПАВ), в качестве неорганической среды используется дистиллированная вода, а поверхностно-активного вещества – желатин при следующем соотношении компонентов, вес. %: вода дистиллированная – 98-100; желатин – 0-2 [81, 82].

Суспензионная радикальная полимеризация мономера с абразивом позволяет получать гранулы термопластичного полимера равномерно покрытых абразивными зёрнами. Размер гранул и плотность расположения абразивных зерен на их поверхности зависит, в основном, от зернистости использованного абразива и скорости перемешивания компонентов среды и

материала. Влияние скорости перемешивания компонентов среды и материала на характеристики гранул [82] приведено в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Характеристика гранулированного абразивного материала полученного с разной скоростью перемешивания в процессе полимеризации

№	Скорость перем. об/мин	Диаметр гранул, мм	Покрытие гранулы абраз. зернами зернист., %			Среда полимеризации гранул з абразивными зернами зернистостью, вес. %					
			14АМ28	14А8П	14А25П	14АМ28		14А8П		14А25П	
						Вода	ПАВ	Вода	ПАВ	Вода	ПАВ
1	50	Отсутств дисперг.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	100	2-3	70	60	50	99,0	1,0	98,5	1,5	98,5	1,5
3	500	0,3-0,5	90	80	70	99,5	0,5	99,0	1,0	99,0	1,0
4	900	0,1-0,2	30	10	1	98,5	1,5	98,0	2,0	98,0	2,0
5	950	0,01-0,1	0	0	0	-	-	-	-	-	-

Примечание: Условия полимеризации аналогичные таблице 5.1

Снижение скорости перемешивания до 100 об/мин сопровождается увеличением диаметра гранул до 2-3мм. При скорости перемешивания ниже предельной (100 об/мин) диспергирование мономера с абразивными зернами не происходит из-за недостаточной энергии перемешивания. Скорость перемешивания более предельной (900 об/мин) приводит к появлению микрочастиц мономера диаметром 0,01-0,1мм не связанных с абразивными зернами.

В результате перемешивания при оптимальных скоростях (100-900об/мин) при полимеризации уменьшается влияние неоднородности

зернового состава на режущую способность гранул вследствие внедрения абразивных зерен игольчатой и мечевидной формы в поверхность гранул большими поверхностями. Это сопровождается повышением равномерности режущей способности гранул и уменьшения разнородности шлифовальных царапин (рисок) на обработанной поверхности.

Количество вводимого поверхностно-активного вещества зависит от необходимой величины покрытия гранулы абразивными зёрнами и, следовательно, как указано выше, от скорости перемешивания компонентов среды и материала. Абразивные зёрна на поверхности гранул препятствуют слипанию гранул в процессе суспензионной полимеризации и позволяют получать абразивный материал с покрытием зёрнами на 100% без введения в среду ПАВ. Максимальное количество ПАВ (желатина до 2% от веса среды) определяется из условия стойкого получения свободных гранул полимера без внедрённых абразивных зёрен. Конкретное количество ПАВ, необходимое для получения гранулированного материала на основе полиметилметакрилата с абразивными зёрнами разной зёрнистости в зависимости от скорости перемешивания среды и материала, приведено в таблице 5.2.

В связи со сложностью физико-механических явлений, протекающих при контактном взаимодействии гранулированного абразивного материала и обрабатываемой поверхности, образование свободных макрорадикалов в результате деструкции полимера может проходить по различным механизмам. Изменяя условия резания при обработке гранульным абразивным материалом, возможно активизировать и инициировать эти механизмы.

Наибольшее значение приобретает механическая деструкция, протекающая при трении полимерной связки и металла. Механическая деструкция полимерной связки гранульного абразивного материала начинается, когда в процессе резания механические напряжения от усилий трения связующего материала гранул с обрабатываемой поверхностью превышают энергию связей атомов в полимере. Происходит разрыв макромолекулы в поле механических сил с возникновением свободной пары

макрорадикалов, способных взаимодействовать с поверхностью металла.

Как известно, с физической точки зрения, поверхность металлов представляет собой атомную плоскость с незавершенной кристаллической решеткой, что приводит к высокой сорбционной активности поверхностного слоя.

Механодеструкция, как разрыв макромолекулы в поле механических сил, сопровождается значительным изменением всего комплекса физико-химических свойств полимера — уменьшением молекулярной массы, появлением новых функциональных групп, изменением растворимости, возникновением системы пространственных связей и т.д. Такой разрыв в присутствии кислорода воздуха способствует возникновению свободных радикалов, которые инициируют цепной процесс окислительной деструкции. Это вызывает еще более глубокие изменения и разрушения полимеров.

Кроме того, при нагревании полимеров протекает термическая деструкция, которая в значительной степени зависит от их химического строения. Этот процесс идет по радикальному механизму и сопровождается разрывом связей, а также снижением молекулярной массы полимера. Термическая деструкция ускоряется в присутствии соединений, легко распадающихся на свободные радикалы. При повышенной температуре скорость деструкции возрастает.

Необходимо учитывать, что полимеризация характерна для соединений с кратными связями, число и характер которых в молекуле мономера могут быть различными. Деполимеризация характеризуется разрывами связей полимера с возникновением пары распадающихся радикалов. Соответственно количество макрорадикалов при деструкции полимера зависит от числа молекул, т.е. от их молекулярной массы.

Таким образом, для увеличения количества макрорадикалов в зоне контакта трибосопряжения «абразивная гранула – обрабатываемый металл» в результате деструкции полимера необходимо проведение полимеризации гранул с обеспечением максимального числа молекул, снижения их молекулярной массы.

Полимеризация всегда сопровождается понижением степени насыщенности реагирующих веществ, уменьшением общего числа молекул и увеличением их средней молекулярной массы. Подбором подходящих условий полимеризации можно изменять среднюю молекулярную массу и связанные с ней свойства полимеров. Так, при радикальной полимеризации повышение температуры реакции или содержания инициатора увеличивает число растущих радикалов. При введении до начала полимеризации инициатора полимеризации (в количестве менее 1% от массы мономера) возникают свободные радикалы во время распада инициатора, которые становятся активными центрами и инициируют полимеризацию мономера. Повышение концентрации инициатора полимеризации (напр., пероксидов, гидропероксидов, азосоединений) уменьшает молекулярную массу образующегося полимера но увеличивает скорость полимеризации [133]. Но не все свободные радикалы, которые образуются при распаде инициатора, вызывают реакцию полимеризации потому, что часть радикалов рекомбинирует или вступает в побочные реакции [134].

Так как скорость реакции цепи имеет первый порядок по концентрации растущих радикалов, а скорость реакции обрыва — второй порядок, то средняя молекулярная масса понижается при повышении скорости полимеризации. Снижение концентрации мономера также приводит к получению полимеров с небольшой молекулярной массой, но при этом скорость полимеризации тоже снижается.

Таким образом, снижение молекулярной массы полимера изменением условий полимеризации не всегда целесообразно вследствие возможности протекания побочных реакций при высоких температурах и высоких концентрациях инициаторов. Более перспективным направлением снижения молекулярной массы является добавление регуляторов — веществ, через которые легко осуществляется передача цепи, что сопровождается отрывом растущего радикального атома или группы атомов от молекулы. В результате этого радикал превращается в молекулу с образованием нового радикала

способного к продолжению кинетической цепи. Уже при малых концентрациях эти вещества сильно снижают среднюю молекулярную массу. Скорость полимеризации при этом существенно не увеличивается.

Используя последние достижения исследований в области синтеза высокомолекулярных соединений, в качестве регуляторов могут быть рекомендованы различные материалы. В последние годы активно развивается новая концепция контролируемых процессов - псевдоживая радикальная полимеризация. Важнейшей особенностью её является чередование периодов роста, обрыва и реинициирования полимерных цепей за счет незначительных количеств активных добавок особого типа (стабильных радикалов и их источников, соединений металлов переменной валентности и др.), способных к обратимому взаимодействию с ведущими цепь активными радикалами. При этом открываются возможности проведения синтеза полимеров с регулируемой полидисперсностью, т.е. в целом моделирования макромолекулярного дизайна синтезируемых материалов.

Для регулирования роста полимерной цепи виниловых мономеров (к которым относится рекомендованный выше метилметакрилат) в условиях контролируемой полимеризации могут использоваться бинарные инициаторы в виде органических окситриазенов и металлосодержащие мономеры. Образование стабильных радикалов происходит при введении этих добавок в количествах, соизмеримых с концентрацией инициатора полимеризации. Становится возможным проведение процесса без автоускорения и получение полимера с равномерно нарастающей молекулярной массой, невысокими значениями коэффициента полидисперсности при температурах ниже 100°C. Установлено, что за счет варьирования условий проведения контролируемой полимеризации с участием предложенных соединений (температура, концентрация добавки, инициатор) возможно получать полимеры в широком диапазоне молекулярных масс. В частности, при полимеризации метилметакрилата получено изменение молекулярной массы до трех раз [135].

Кроме того, для регулирования строения и молекулярно-массовых характеристик ПММА при контролируемом синтезе, протекающем в условиях обратимой передачи цепи, могут использоваться низко- и высокомолекулярные дитиобензоаты и тритиокарбонаты. Даже при самой низкой концентрации (1×10^{-3} моль/л) какого-либо из этих агентов полимеризации достигается снижение молекулярной массы полимера в два-три раза [136].

Увеличению скорости полимеризации метилметакрилата и снижению молекулярного веса полимера способствует и добавки окисей металлов. Наличие TiO_2 и Cu_2O при концентрации 9 гр/л воды привело к увеличению скорости полимеризации соответственно в 1,5 и 3,5 раза. Среднее значение молекулярного веса снижается постепенно при введении TiO_2 и резко уменьшается при введении Cu_2O [137].

Более перспективным передатчиком цепи при радикальной полимеризации метакрилата могут выступать кремнийорганические гидриды. Введение активных гидридов позволяет проводить полимеризацию без автоускорения до глубокой конверсии при умеренных температурах ($60^\circ C$) и без существенного снижения скорости процесса полимеризации, синтезировать полимеры заданной молекулярной массы и снижать степень полидисперсности полимера до величин соответствующих предыдущим материалам. При этом отмечено снижение плотности ПММА с 1,19 до 1,17 г/см³ при увеличении концентрации передатчика до 2 мас.%. Уменьшение плотности полимеров обусловлено снижением плотности упаковки макромолекул и возрастанием доли свободного объема в ПММА, т.е. модифицированные полимеры имеют более рыхлую структуру по сравнению с немодифицированными. Кроме того, установлено увеличение скорости термодеструкции этих полимеров с уменьшением их молекулярной массы [138].

Возможность изменения свойств полимера в процессе псевдоживой радикальной полимеризации: плотности, температуры стеклования,

микроструктуры, термостабильности, прочности открывает дополнительные перспективы повышения эффективности гранулированного абразивного материала.

В частности, получение более рыхлой структуры полимера способствует при резании уменьшению площади контакта полимерной связки гранул и металла, увеличению удельной нагрузки на макромолекулу и степени ее механодеструкции. Соответственно, увеличение механодеструкции и термодеструкции приведет к увеличению содержания свободных макрорадикалов в зоне контакта абразивной гранулы и обрабатываемого материала.

Придание полимерным материалам ряда целевых, в т. ч. уникальных свойств отмечается и в случае применения сульфоксидов и сульфоксидных комплексов солей металлов в качестве регулирующих и функциональных добавок в процессах радикальной полимеризации виниловых мономеров. Присутствие сульфоксидов в полимеризационных системах при концентрациях $10^{-3} \div 10^{-2}$ моль/л отражается на молекулярных массах синтезированного ПММА. Установлено, что сульфоксидные комплексы с явно выраженным переносом заряда являются сильными ингибиторами полимеризации, а без переноса заряда – слабыми передатчиками цепи. При этом обнаружено внедрение серусодержащих фрагментов сульфоксида в полимер, а средняя степень полимеризации снижается в среднем в 1,3 раза [139].

Таким образом, повышение эффективности обработки гранульным абразивным материалом может осуществляться путем создания условий по увеличению содержания свободных макрорадикалов в трибосопряжении «абразивная гранула – обрабатываемый металл» и их воздействия на поверхностный слой заготовки. Добавка различных веществ при радикальной суспензионной полимеризации метилметакрилата дает возможность регулировать степень полимеризации и величину получаемых молекул полимера. Наряду с варьированием режимами полимеризации и условиями в

зоне трения абразивной гранулы и обрабатываемого металла в процессе шлифования, это открывает дополнительные возможности в обеспечении зоны контакта свободными макрорадикалами при деструкции полимера [132]. Оптимальный регулятор полимеризации должен определяться в ходе эксплуатационных испытаний гранулированного абразивного материала с учетом конкретных условий шлифования.

Перспективным направлением применения регуляторов полимеризации является не только их влияние на кинетические параметры синтеза и молекулярно-массовые характеристики макромолекул, но и изменение при этом структуры и физико-механических свойств полимера и, соответственно, абразивной гранулы, что расширяет технологические возможности гранулированного материала. Кроме того, целесообразно проведение дополнительных исследований по адсорбции макромолекул на обрабатываемой поверхности, способности свободных радикалов активизировать и инициировать химические процессы в зоне обработки и, в частности, степени окисления атома металла.

Выводы

На основании общих закономерностей изнашивания, а также состояния поверхностного слоя материалов разработаны трибологические основы формирования износостойкого неоднородного поверхностного слоя изменением условий сложного термоконтантного воздействия. Оценены возможности технологических способов повышения работоспособности трибосопряжений в процессе изготовления и эксплуатации деталей трибосопряжений.

1. Сложное взаимодействие твердых тел в контактной зоне должно учитываться при построении моделей контактирования и прогнозирования поверхностной прочности материалов при динамических нагрузках. Установление закономерностей формирования износостойкого

поверхностного слоя деталей трибосопряжений возможно на основе анализа износа и состояния поверхности с учетом реального вида динамического нагружения. Это дает возможность рассмотреть физические основы пластически-деструкционных явлений в зоне контакта с учетом действия продуктов изнашивания и разработать рекомендации по формированию износостойкого поверхностного слоя контактирующих деталей.

2. Обобщить полученные данные можно в следующей феноменологической модели разрушения поверхностного слоя. Общее действие факторов нагрузки не сводится к их сумме, а приводит к их взаимному усилению. Взаимодействие факторов выражается в их влиянии на микроструктуру материалов.

3. Согласно представленной модели и результатам опытов состояние реальной поверхности металлов связано с формированием в поверхностном слое кристаллитов с различными прочностными и деформационными свойствами, в результате разной плотности дислокаций. Это сопровождается наличием на поверхности определенных электрических дипольных моментов и локальных электрических зарядов, которые определяют величину электростатического барьера в работе выхода электронов.

4. Износ металлорежущего инструмента и формирование поверхностного слоя детали при резании происходит при реализации структурной приспособляемости в условиях сложного нагружения. Оценка эффективности процесса резания должна производиться с учетом анализа состояния поверхностного слоя как обрабатываемого, так и инструментального материала. Изнашивание инструментального материала и получение обработанной поверхности определенного качества включает комплекс явлений, связанных с деформацией тончайших поверхностных слоев металла, их взаимодействием с химически активными компонентами смазочно-охлаждающей технологической среды. Предложенная методика испытаний деталей трибосопряжения "деталь-режущий инструмент" дает

возможность на порядок снизить продолжительность испытаний, уменьшить рассеяние полученных результатов по сравнению со стендовыми эквивалентными испытаниями и обеспечить экономию при испытаниях дорогостоящих материалов.

5 Перспективным направлением регулирования износостойкости трибосопряжений при сложном динамическом нагружении является введение в зону контакта свободных макрорадикалов. Достижение определенного структурного состояния поверхностного слоя поверхностей различной износостойкости возможно за счет изменения условий воздействия свободных макрорадикалов.

6 Разработанный специальный гранулированный абразивный материал позволяет повысить эффективность финишной обработки в связи с возможностью введения в зону резания свободных макрорадикалов и при определенных условиях шлифования обеспечивает получение износостойкого поверхностного слоя обрабатываемой детали.

7 Разработанные способы изготовления абразивного материала позволяет получать сплошные сферические гранулы покрытые абразивными зёрнами с различными физико-механическими свойствами полимерной связки, уровнем деструкции и обеспечением различного количества свободных макрорадикалов в зоне контакта с обрабатываемой поверхностью. Добавка различных веществ при радикальной суспензионной полимеризации гранул из метилметакрилата дает возможность регулировать степень полимеризации, величину получаемых молекул полимера и эффективность трибологического воздействия абразивного материала на обрабатываемый поверхностный слой.

МЕТОДОЛОГИЯ ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ ПРИ МНОГОКОМПОНЕНТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Надежность машин и механизмов в значительной степени зависит от работоспособности трибосопряжений которые эксплуатируются в условиях сложного термоконтантного воздействия. Повышение надежности возможно путем создания благоприятных условий нагружения и формирования поверхностного слоя максимальной износостойкости у деталей трибосопряжений. Это дает возможность целенаправленно разрабатывать (или выбирать из числа существующих) высокоэффективные конструктивно-технологические способы повышения работоспособности деталей в экстремальных условиях. Формирование оптимальных внешних параметров нагружения в процессе эксплуатации и изготовления деталей некоторых трибосопряжений будут рассмотрены ниже.

6.1 Рекомендации по условиям эксплуатации узлов трения, работающих при многокомпонентном нагружении и различных температурах окружающей среды.

Ресурс работы машин и механизмов в значительной мере определяется долговечностью трибосопряжений отдельных узлов. Например, узел соединения лопаток турбины ГТУ, где в результате действия высоких циклических и возможных отрицательных климатических температур, приложения динамической нагрузки интенсивно изнашиваются контактные поверхности деталей. Под воздействием экстремальных условий эксплуатации в поверхностных слоях металла происходят изменения, которые приводят к потере работоспособности деталей. При этом основную роль играет сложный характер распределения нагрузки в пространстве и времени. Закономерность распределения различных материалов по износостойкости значительно изменяется в процессе приложения в трибосопряжении третьего

фактора нагружения в сравнении с однонаправленным или двухкомпонентным нагружением. Таким фактором является приложение дополнительного нагружения (наряду с ударом и последующим проскальзыванием) в направлении, перпендикулярном проскальзыванию в той же плоскости. Повышение долговечности деталей трибосопряжений, которые работают в условиях трехкомпонентного нагружения, связано с необходимостью распространения представлений о физико-механических явлениях в зоне контакта.

Этим объясняются ограниченные возможности использования общих положений теорий трения для деталей трибосопряжений, а также большинства результатов экспериментальных исследований сделанных, как в нашей стране, так и за рубежом. Изменение того или иного фактора, а также появление нового фактора приводит к изменению механизма изнашивания. Как следует из результатов исследований, представленных в главах 3 и 4, трехкомпонентное нагружение уменьшает долговечность контактирующих деталей узлов машин и механизмов в связи с образованием поверхностного слоя с определенными свойствами. Однако за счет изменения условий нагружения возможно получение поверхностных слоев с оптимальной структурной однородностью, что приведет к уменьшению износа. Это позволяет сформулировать триботехнический принцип минимизации износа и износостойкой способности материалов.

Решение проблемы надежности в связи с изнашиванием ведется в основном двумя путями: конструктивным и технологическим. И если повышение износостойкости путем изменения конструкции сопряжено со значительными трудностями, а в некоторых случаях даже невозможно, то технологическое обеспечение надежности такого узла является единственно возможным решением.

Вопросы технологического обеспечения надежности деталей неразрывно связаны с формированием качества поверхностного слоя и его влиянием на эксплуатационные характеристики. Выработка научно-

обоснованных принципов формирования устойчивых нанокристаллических слоев возможно большей толщины с максимально высоким комплексом физико-механических характеристик должна производиться на основании решение ряда задач по оптимизации химического и фазового состава, а также уровня дефектности нанокристаллического слоя. Это осуществляется за счет оптимального легирования металлической основы, оптимизации исходной структуры материалов, среды и режимов фрикционной обработки.

Таким образом, триботехнические основы повышения износостойкости деталей трибосопряжений при многокомпонентном термоконтантном воздействии состоят в создании износостойкого поверхностного слоя при изготовлении и эксплуатации за счет учета и управления рассмотренными технологическими и эксплуатационными факторами (рис.6.1). Износостойкий поверхностный слой характеризуется неоднородным по прочностным и деформационным свойствам структурным состоянием.

На основании предложенной модели изнашивания, которая учитывает взаимное влияние факторов нагружения при их совместном действии и объясняет неравномерность износа деталей трибосопряжений за счет различной однородности поверхностного слоя, были разработаны следующие конструкторско-технологические рекомендации по повышению износостойкости деталей машин и механизмов:

- конструкторские, направленные на изменение параметров нагружения в трибосопряжении:

- 1) уменьшение нормального нагружения;
- 2) исключение ударного нагружения;
- 3) уменьшение амплитуды поперечных проскальзываний;
- 4) уменьшение амплитуды продольных проскальзываний;

- технологические, направленные на применение условий контактирования обеспечивающих формирование поверхностного слоя повышенной износостойкости:

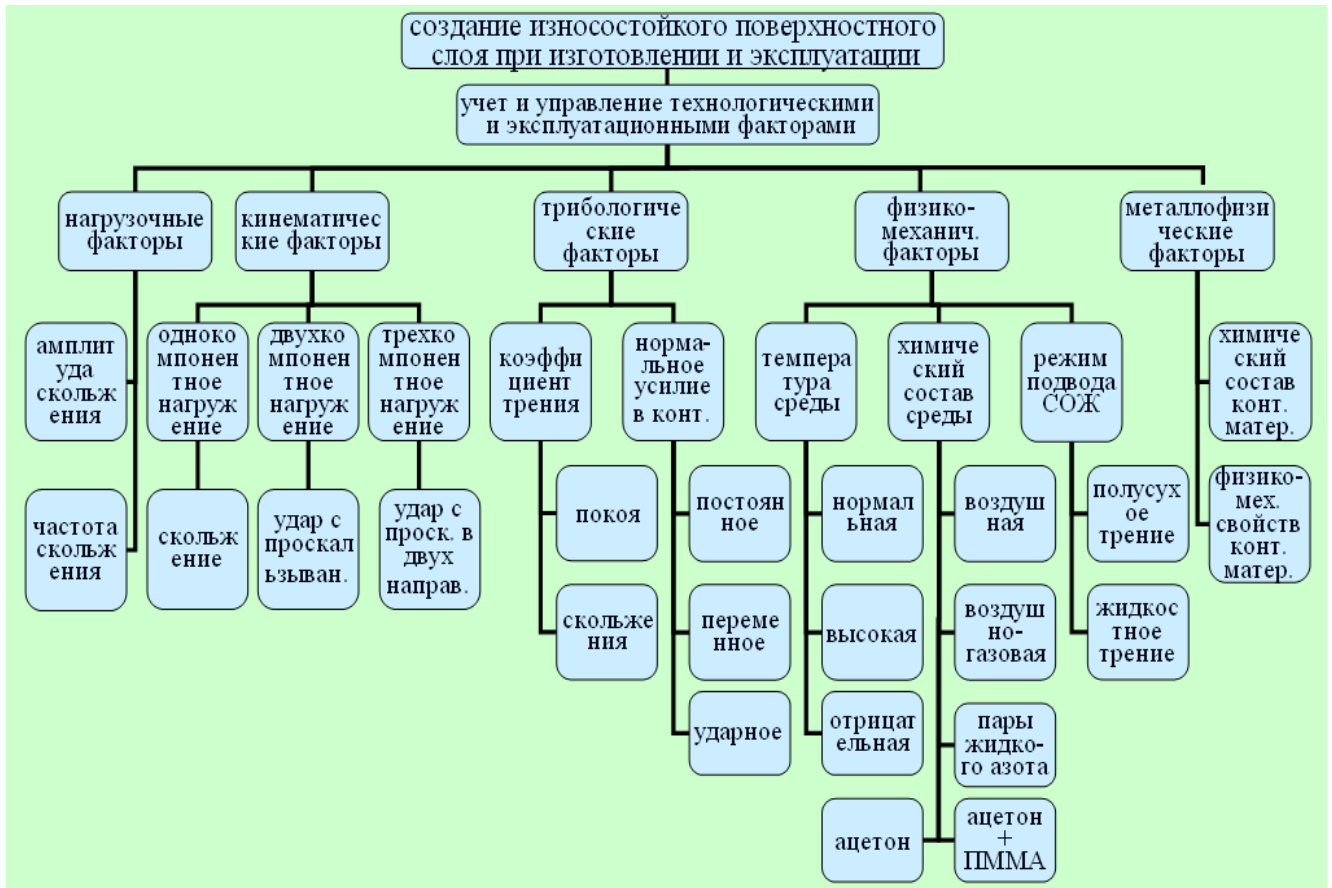


Рисунок 6.1 – Триботехнические основы повышения износостойкости деталей трибосопряжений при многокомпонентном термомоментном воздействии

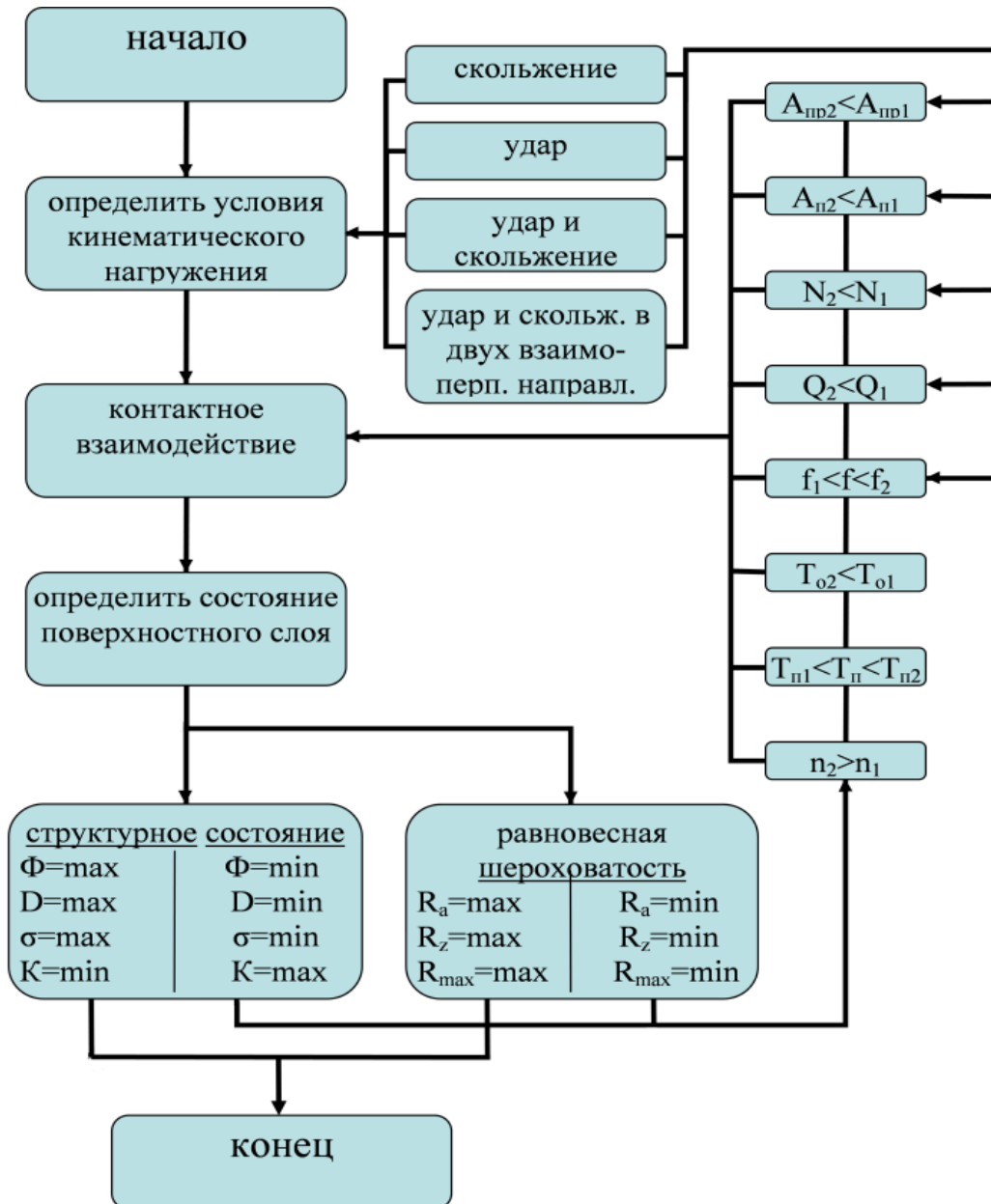
- 1) создание поверхностного слоя с неоднородным структурным состоянием;
- 2) обеспечение повышенной равновесной шероховатости поверхности;
- 3) внедрение в зону контакта свободных макроадикалов без подачи СОЖ;
- 4) обеспечение в зоне контакта отрицательных температур окружающей среды;
- 5) обеспечение для жаропрочных сплавов повышенных температур окружающей среды около $0,4 - 0,5 T_{пл}$.

Для обеспечения повышенной износостойкости трибосопряжений при сложном нагружении необходимо использование комплексного подхода

определения взаимосвязи триботехнических и структурных свойств контактирующих материалов при различных видах нагружения. Изменение параметров нагружения достигается уменьшением зазоров в трибосопряжении или путем демпфирования колебаний. Выбор конкретных конструктивно-технологических мероприятий должен производиться с учетом реальных условий эксплуатации трибосопряжения и физики процесса разрушения на основании свойств поверхностного слоя.

Разработанный алгоритм управления износостойкостью трибосопряжения позволяет формализовать процедуру интерпретации полученных результатов величины износа и состояния поверхностного слоя, сравнить полученные данные с эталонными (экспериментальными или теоретическими), по логическому результату сравнения вычислить логические функции для оценки износостойкости и условий дальнейшей эксплуатации трибосопряжения. Для изображения алгоритма использовано графическое представление в виде структурной схемы (рис. 6.2).

При этом до исследований задаются оптимальными условно неизменными факторами, определенными на основании предварительных исследований (физико-химические свойства материала деталей трибосопряжения, наличие СОЖ в контакте). Начинаются исследования с оценивания условий кинематического нагружения в трибосопряжении (скольжение, удар, удар и скольжение, удар и скольжение в двух взаимно перпендикулярных направлениях). В процессе исследований производится оценка возможного изменения условий кинематического нагружения в контакте трибосопряжения вследствие износа контактирующих поверхностей при длительных исследованиях. Постоянство условий нагружения обеспечивается корректировкой динамических показателей (амплитудой и частотой продольных перемещений, амплитудой и частотой поперечных перемещений, усилием нормального нагружения, энергией удара).



$A_{пр}$ – амплитуда продольных перемещений; $A_{п}$ – амплитуда поперечных перемещений; N – нормальное нагружение; Q – энергия удара; f – частота перемещений; T_o – отрицательная температура; $T_{п}$ – повышенная температура; n – количество свободных макрорадикалов (без СОЖ); Φ – работа выхода электрона по поверхности; D – дисперсия работы выхода электрона по поверхности; σ – прочность; K – однородность поверхностного слоя.

Рисунок 6.2 – Алгоритм управления износостойкостью трибосопряжения

Кроме того, в процессе исследований производится оценка состояния поверхностного слоя контактирующих поверхностей по трибоспектральному

методу или по изменению работы выхода электрона по поверхности, а также величины равновесной шероховатости и при необходимости производится поочередная корректировка условий контактирования (уменьшается амплитуда продольных перемещений, уменьшается амплитуда поперечных перемещений, уменьшается усилие нормального нагружения и энергия удара, оптимизируются величина частоты перемещений и повышенной температуры среды, снижается отрицательная температура среды, повышается количество свободных макрорадикалов при отсутствии СОЖ). Достижение минимальной однородности и максимальной прочности поверхностного слоя с максимальной работой и дисперсией работы выхода электрона по поверхности, максимальной равновесной шероховатостью подтверждает оптимальность принятых условий контактирования для получения максимальной износостойкости.

6.2 Способы определения износостойкости трибосопряжений при многокомпонентном динамическом нагружении

Существующие в настоящее время способы сравнительной оценки износостойкости металлов [140, 141, 142] характеризуются сложностью, трудоемкостью, не позволяют определить и сопоставить изменение структурного состояния поверхностного слоя деталей трибосопряжений, особенно в условиях многокомпонентного динамического нагружения с наличием вибраций, действующих в различных направлениях.

6.2.1 Основы оценки инженерии поверхности трибосопряжений трибоспектральным методом [143]

На основании результатов исследований представленных в разделах 3.2 и 4.1.1 был предложен способ определения износостойкости сталей и сплавов, который позволяет по оценке одного из параметров материала и по полученной ранее зависимости этого параметра от износостойкости эталонного материала определять износостойкость. При этом в качестве параметра материала выступает величина силы сопротивления поверхностного слоя, которая возникает при контактной деформации в процессе сканирования индентором поверхности исследуемого материала.

Изменение величины силы сопротивления поверхностного слоя, возникающей при контактной деформации индентором, указывает на разницу в сопротивлении локальных микрообъемов материала вдоль трассы сканирования, позволяет оценить среднюю прочность поверхностного слоя, разброс и неоднородность прочностных свойств. Условия сложного нагружения в трибосопряжениях приводят к образованию определенного структурного состояния поверхностного слоя контактирующих деталей и уровню его износостойкости.

Испытание необходимо проводить на приборе для склерометрических исследований материалов где сила трения алмазного индентора в процессе сканирования модулируется с частотой расположения кристаллитов, характеризуется близкими по значению амплитудами в результате изменения прочности на границах и внутри локальных областей. По изменению структурного состояния поверхностного слоя определяют износостойкость. При этом в качестве эталонного материала может выступать образец исследуемой стали или сплава с известной износостойкостью, состоянием поверхностного слоя и условиями нагружения в трибосопряжении.

Идея предложенного способа оценки износостойкости объясняется на примере конкретной реализации.

Для реализации предлагаемого способа использовали образцы из стали 60С2А при двухкомпонентном (ударе с проскальзыванием) и

трехкомпонентном нагружении (проскальзывании в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и ударе). Как показали исследования, с повышением амплитуды поперечных проскальзываний растет износ образцов (раздел 3.2).

При сканировании полученных поверхностей образуются трибограммы силы трения индентора, представленные на рисунке 4.1. Двухкомпонентное нагружение в процессе испытаний в отличие от трехкомпонентного приводит к поверхностному слою со структурой большей прочности и неоднородности, которая имеет фрагменты различной величины с увеличенным разбросом прочности, что сопровождается уменьшением износа. Повышение амплитуды поперечных проскальзываний приводит к уменьшению прочности поверхностного слоя, что сопровождается снижением величины силы трения индентора и снижением износостойкости.

6.2.2 Основы оценки инженерии поверхности трибосопряжений по изменению величины работы выхода электрона по поверхности деталей [144]

На основании результатов исследований представленных в разделах 3.2 и 4.1.2 был предложен способ определения износостойкости сталей и сплавов, который позволяет по оценке одного из параметров материала и по полученной ранее зависимости этого параметра от износостойкости эталонного материала определяется износостойкость. При этом в качестве параметра материала выступает величина структурной однородности поверхностного слоя, которая определяется по изменению величины или распределения работы выхода электрона (РВЭ) по поверхности деталей.

Как было отмечено в разделе 4.1.2, состояние реальной поверхности металлов связано с формированием на поверхности электрических дипольных моментов, которые определяют величину электростатического барьера в работе выхода электронов. Вследствие неоднородного состояния

металлической поверхности возникает соответствующий рельеф электростатического барьера, определяет расхождение работы выхода электрона для разных участков поверхности. Таким образом, для данной поверхности металла возникает характерный энергетический рельеф, обусловленный распределением работы выхода электрона по поверхности. Сравнивая энергетический рельеф эталонного материала с рельефом испытуемого материала можно оценить изменение структурного состояния поверхностного слоя. Условия сложного нагружения в трибосопряжениях приводят к образованию определенного структурного состояния поверхностного слоя контактирующих деталей и уровню его износостойкости. По изменению структурного состояния поверхностного слоя определяют износостойкость. При этом в качестве эталонного материала может выступать образец исследуемой стали или сплава с известной износостойкостью, состоянием поверхностного слоя и условиями нагружения в трибоспряжении.

Измерения работы выхода электрона можно производить, используя метод динамического конденсатора Кельвина [78] по методике представленной в разделе 2.4.2.

Идея предложенного способа оценки износостойкости объясняется на примере конкретной реализации (рис 4.9 и 4.10).

Для реализации предлагаемого способа использовали образцы из сплава ХТН-61 при двухкомпонентном (ударе с проскальзыванием) и трехкомпонентном нагружении (проскальзывании в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и ударе). Состояние поверхностного слоя образцов из сплава ХТН-61 до трения приблизительно одинаковое и определяется РВЭ около 4,1 эВ. В результате трения с различной амплитудой поперечных проскальзываний состояние поверхностного слоя образцов изменялось. Трение с двухкомпонентным нагружением ($A_{\text{поп}} = 0$) приводит к получению поверхностного слоя с повышенным и большим разбросом РВЭ от

3,90 до 4,40 эВ. Это связано с тем, что возникает новое структурное состояние поверхности, близкое к аморфному, потому РВЭ увеличивается.

Наличие и повышение амплитуды поперечных проскальзываний приводит к уменьшению величины и разброса РВЭ и увеличению износа. При испытаниях на трение с $A_{\text{поп}} = 0,05$ мм РВЭ монотонно уменьшается от 4,10 до 4,00 эВ, разброс в значениях РВЭ при этом составляет интервал 3,90...4,10 эВ. Поверхностный слой образцов после трения с трехмерной нагрузкой с $A_{\text{поп}} = 0,1$ мм обеспечивает РВЭ от 3,95 эВ до 4,05 эВ. Увеличение амплитуды поперечных проскальзываний приводит к уменьшению дисперсии РВЭ (рис. 4.10). Уменьшение разброса в значениях РВЭ указывает на повышение при этом однородности структуры поверхностного слоя и снижения износостойкости.

Сравнивая исходный энергетический рельеф (до исследований на деформирование) с рельефом после деформирования можно определить участки поверхности, которые получили разную степень пластической деформации.

6.3 Предложения по ускоренной оценке износостойкости

поступательных плоскостных пар IV класса с периодическим ударным разрывом контакта (типа «направляющая-цепь»)

6.3.1 Оценка износостойкости трибосопряжения типа «направляющая-цепь» по натурным испытаниям

Важнейшим показателем для принятия решений о качестве режущего инструмента, области применения инструментальных материалов и конструкции инструмента, а также оценки оптимальных условий его эксплуатации является износостойкость инструмента. Наиболее широко стойкостные испытания инструмента производится ускоренными методами, что позволяет сократить время испытаний, расход инструментального и

обрабатываемого материалов. При этом используются принципы физического прогнозирования (моделирования); экстраполяции по нагрузке (форсирование режимов испытаний) и времени (статистическое прогнозирование), двойной экстраполяции. В частности, принцип физического прогнозирования реализуется, в основном, путем создания методов моделирования изнашивания инструмента на основе изменения физической характеристики процесса.

В настоящее время актуальной является проблема повышения длительности эксплуатации пильной цепи бензо- и электромоторных пил. Основной причиной выхода из рабочего состояния пилы является износ режущих звеньев и удлинение пильной цепи. Причем, удлинение пильной цепи сопровождается увеличением уровня колебаний цепи, что приводит к повышенному износу контактирующих поверхностей трибосопряжения «направляющая-цепь» и частой смене направляющей.

В процессе эксплуатации пила неизбежно теряет свое первоначальное качество. Трение в узлах и сопряжениях, вибрация, действие окружающей среды, нагрев и т.д. являются причинами износа, поломок, пластических деформаций и других явлений, снижающих работоспособность пилы. В зависимости от назначения, качества материалов, технологии сборки узла, условий эксплуатации и качества технического обслуживания эти процессы могут протекать быстрее или медленнее, но они происходят непрерывно. Поэтому повышение срока службы цепи позволит снизить эксплуатационные затраты и повысить объем выработки пилы [145].

Основной причиной выхода из рабочего состояния пилы является износ режущих звеньев и удлинение пильной цепи. Причем, удлинение пильной цепи сопровождается увеличением уровня колебаний цепи, что приводит к повышенному износу контактирующих поверхностей трибосопряжения «направляющая-цепь» и частой смене направляющей.

Как показали исследования, удлинение пильной цепи существенно зависит от износа режущих элементов, режущая способность которых

определяется своевременностью переточек и, соответственно, их количеством. Проверка эксплуатационных характеристик пильных цепей проводилась на предприятии ОАО «Мотор Сич» согласно программе и методике периодических испытаний при раскряжёвке клёна, берёзы и дуба с различной степенью засорённости и влажности, на диаметрах реза от 180 до 350 мм. Результаты испытаний представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты проверки эксплуатационных характеристик пильных цепей.

№ п/п	Средняя межзаточная наработка для мягких пород, м ³		Кол-во переточек	Общая наработка, м ³	Ресурсная наработка по ТУ для мягких пород, м ³ (для 10 переточек)	Исходный шаг цепи, мм	Шаг цепи после испытаний, мм	Удлинение, %	
	по ТУ	факт						по ТУ мах	факт
1	35-40	100	4	400	400	18,72	18,88	5	0,85
2	35-40	40	10	398,5	400	18,68	18,8	5	0,64
3	35-40	103,7	3	311,3	400	18,72	18,8	5	0,85
4	35-40	107	3	351	400	18,76	18,96	5	1,00

Согласно эксплуатационным испытаниям увеличение шага цепи, а, соответственно, и удлинение пильной цепи возрастает при увеличении средней межзаточной наработки. При общей наработке на одну пильную цепь от 300 м³ до 400 м³ максимальное удлинение цепей составляет около 1%. Чем чаще перетачивать режущие звенья пильной цепи, т.е. восстанавливать их режущую способность, тем меньше будет удлиняться цепь за счет снижения усилия воспринимаемого цепью в процессе эксплуатации.

Таким образом, при общей наработке пильной цепи в 400 м³ целесообразно производить от 4 до 7 переточек режущих звеньев, независимо от исходного шага цепи. Это позволит снизить удлинение цепи в процессе работы, и, как следствие, увеличит срок эксплуатации пилы,

улучшит качество распиловки древесины. Однако необходимость переточки и точное количество переточек пильной цепи определяется величиной износа режущих звеньев.

В результате анализа этапов проектирования, изготовления и эксплуатации пильных цепей были определены основные факторы, влияющие на износ и стойкость пильной цепи, представленные на рисунке 6.3.

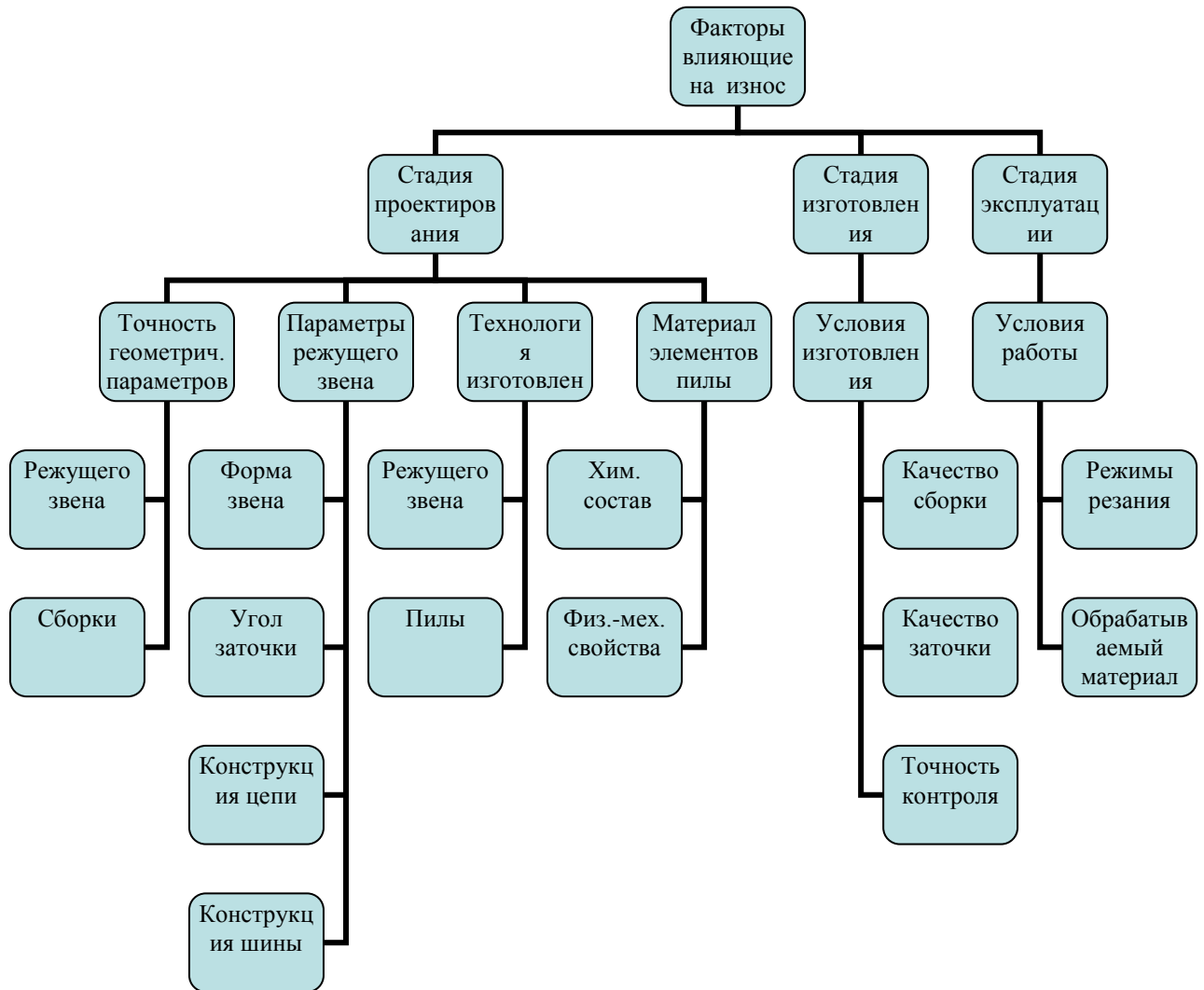


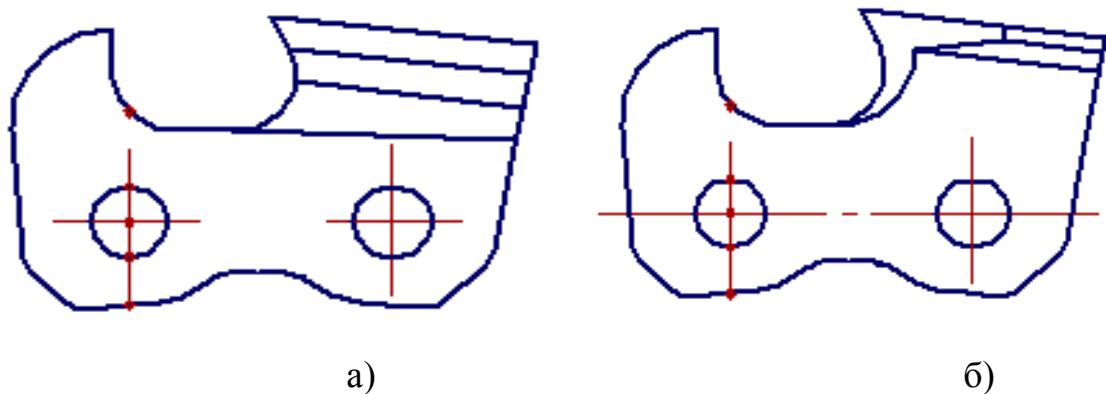
Рисунок 6.3 – Факторы, влияющие на износ пильной цепи

Для оценки степени их влияния на износ пильной цепи необходимо проведения большого количества испытаний с определением износостойкости режущих элементов. Наиболее широко на практике

проводятся испытания, направленные на определение оптимальных геометрических параметров режущего звена и сборки пильной цепи, материала элементов пилы, технологии изготовления режущего звена и пилы, режимов работы инструмента.

В настоящий момент оценка стойкости режущих звеньев пильной цепи производится в процессе производственных испытаний в реальных условиях работы пилы до достижения полного износа рабочего инструмента. При этом средняя наработка до заточки составляет 87,7 м³, а среднее количество переточек – 5. Подобные испытания являются продолжительными, сопровождаются повышенными трудозатратами, высокой себестоимостью из-за расхода инструментального и обрабатываемого материалов, что ведет к необходимости разработки ускоренных методов оценки износостойкости режущих элементов пилы.

Роль режущего элемента в пильной цепи выполняют режущие звенья, которые являются основной сборочной единицей цепи. Внешний вид режущего звена представлен на рисунке 6.4. Изготавливается режущее звено массой 18 г из инструментальной стали 5ХНМ2 по ГОСТ 5950 – 2000.



а – звено режущее правое; б – звено режущее левое

Рисунок 6.4 – Режущие звенья цепи пильной.

6.3.2 Ускоренные испытания режущих звеньев пильной цепи на износостойкость

Исходя из анализа существующих видов и методов проведения стойкостных испытаний, для ускоренных испытаний режущих звеньев пильной цепи выбран метод, основанный на принципе физического прогнозирования (моделирования). При моделированных испытаниях режущего инструмента могут заменяться процесс резания, вид процесса резания, схема резания, отдельные элементы инструмента, заготовка.

Моделированные стойкостные испытания применяются на разных стадиях жизненного цикла инструмента. Они позволяют оценить соответствие уровня стойкости инструмента требованиям НТД на основе установленных зависимостей между выходными параметрами моделированных испытаний и стойкостью инструмента при натурных испытаниях [146].

Инструмент, используемый для ускоренных испытаний режущих звеньев пильной цепи на износостойкость должен соответствовать следующим требованиям:

- инструмент должен быть спроектирован таким образом, чтобы картины износа у режущих звеньев в процессе испытаний и в реальных условиях работы пилы совпадали (или были максимально приближены);
- инструмент должен быть сборным и обеспечивать многократную замену режущих звеньев, при этом сохраняя точность установки режущего звена и обеспечивая достаточную силу зажима режущего звена;
- режимы резания при испытаниях должны максимально соответствовать реальным режимам работы пилы;
- конструкция инструмента должна быть такой, чтобы режущие звенья при работе чаще входили в контакт с обрабатываемой заготовкой.

Для проведения ускоренных испытаний на износостойкость режущего звена пильной цепи предложены две специальные конструкции инструмента – дискового и стержневого типа [147, 148].

Схема инструмента дискового типа изображена на рисунке 6.5. Сборная дисковая фреза имеет корпус, состоящий из двух одинаковых размеров и геометрической конструкции дисков 1,2 жёстко соединённых

между собой при помощи винтов. Каждый диск имеет радиально (симметрично) размещённые гнёзда 3 и глухие отверстия 4 для штифтов. В гнёзда диска 1 устанавливаются правые режущие звенья 6, а в гнёзда диска 2 - левые режущие звенья 7 пильной цепи.

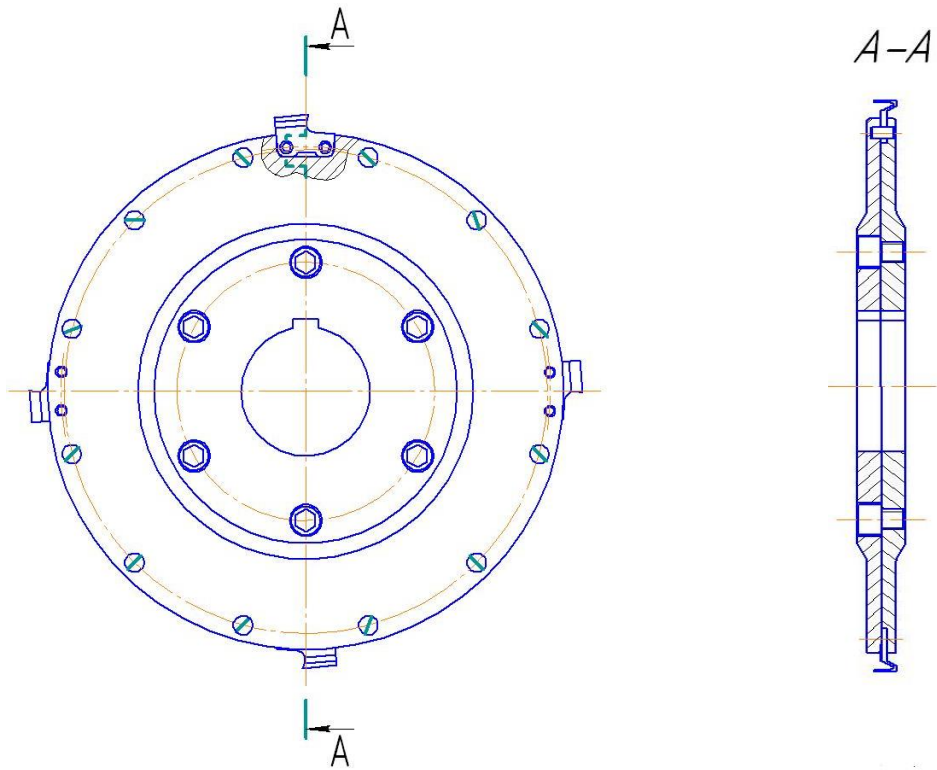
При этом в качестве режущего элемента используются режущие звенья пильной цепи бензо- или электромоторной пилы у которых срезан направляющий буртик. Надежность закрепления режущих звеньев обеспечивается за счет фиксации звеньев в дисках штифтами. Кроме того, для большей жесткости конструкции инструмента предусмотрено увеличение толщины дисков ближе к основному базовому отверстию.

Сборка инструмента дискового типа выполняется следующим образом.

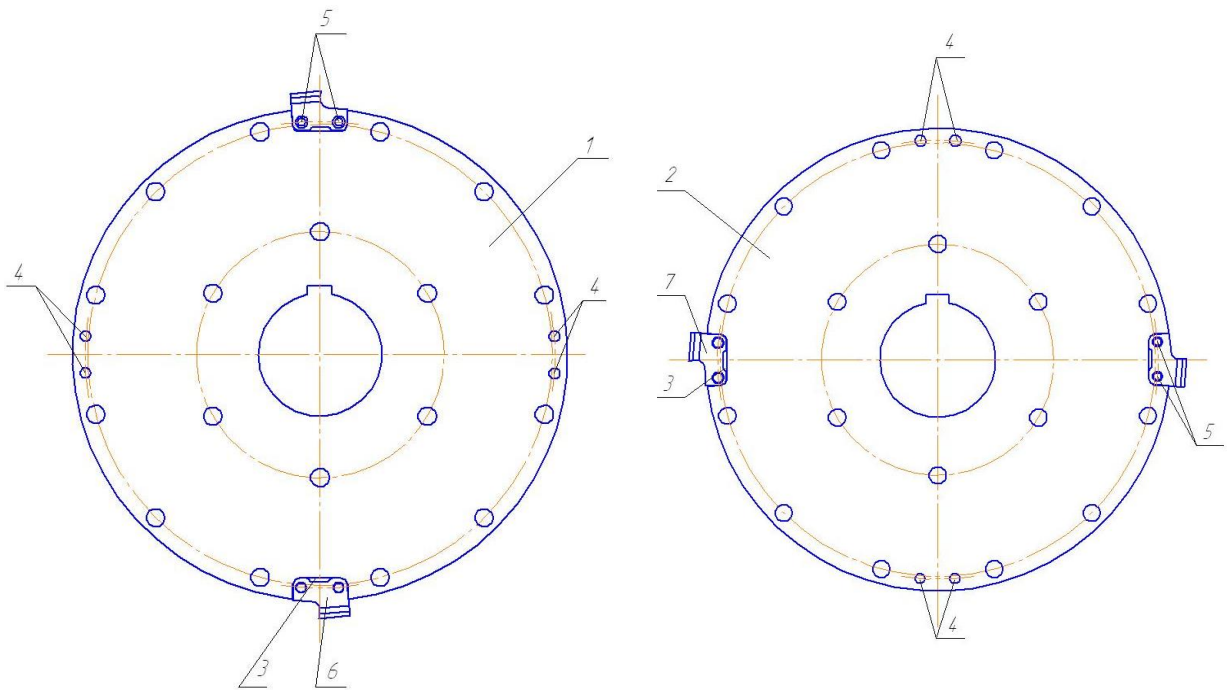
В отверстия 5, которые размещены в гнездах 3 дисков 1 и 2, устанавливаются штифты. Режущие звенья 6 и 7 с помощью отверстий базируются на штифты и устанавливаются в гнезда. На диске 1 в гнезда 3 устанавливаются правые режущие звенья 6 в диске 2 – левые режущие звенья 7. После этого диски 1 и 2 налагаются друг на друга таким образом, чтобы глухие отверстия 4 выполненные на одном диске совпадали со штифтами на другом. Крепление дисков 1 и 2 выполняется механически с помощью винтов, которые прижимают их друг к другу и обеспечивают надежное закрепление режущего звена пильной цепи.

Схема инструмента стержневого типа изображена на рисунке 6.6.

Инструмент состоит из корпуса 1, в котором выполнен паз и отверстия для крепёжных элементов, винтов 5, в паз устанавливается пластина 2, на которую с помощью болтов 6 и гайки 7 закрепляются правое 3 и левое 4 режущие звенья.



а)



б)

в)

а) – внешний вид инструмента; б) – диск с правыми режущими звеньями; в) – диск с левыми режущими звеньями

Рисунок 6.5 – Схема инструмента дискового типа для ускоренных испытаний режущих звеньев пильной цепи на износостойкость

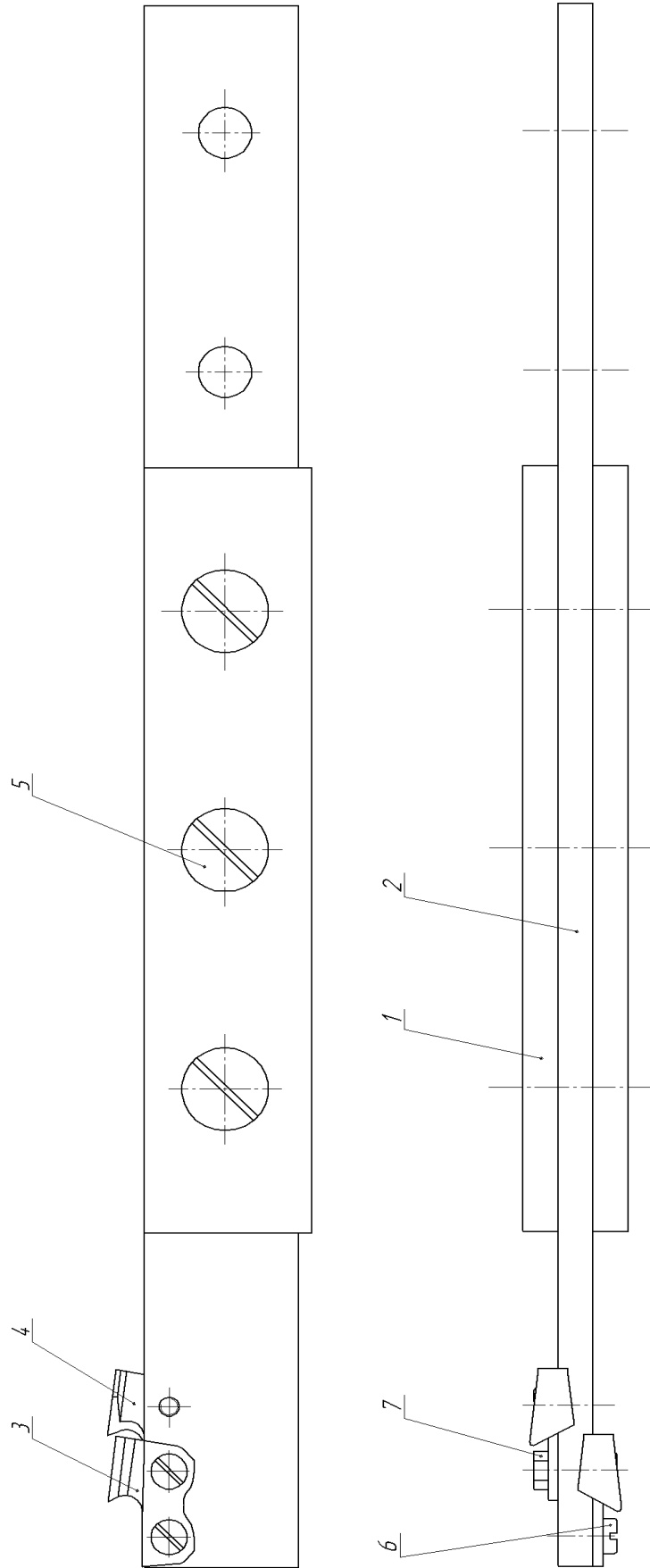


Рисунок 6.6 – Схема инструмента стержневого типа для ускоренных испытаний режущих звеньев пильной цепи на износостойкость

Данная конструкция инструмента для испытания режущих звеньев пильной цепи на износостойкость обеспечивает достаточную точность позиционирования режущих элементов за счёт того, что режущие элементы закрепляются с помощью винтов и гайки. Это даёт возможность быстрой смены изношенных режущих звеньев. В корпусе и в пластине выполнены отверстия, которые размещены на определенных расстояниях, что позволяет регулировать вылет пластины из корпуса и обеспечивает возможность обработки заготовки разных диаметров.

Сборка инструмента стержневого типа выполняется следующим образом.

На пластину 2 закрепляются правое 3 и левое 4 режущие звенья таким образом, чтобы второе отверстие правого и первое отверстие левого режущего звена совпадали. Режущие звенья 3 и 4 закрепляются болтами 6 и гайками 7. Пластина 2 устанавливается в корпус 1 и крепится в нем при помощи винтов 5.

Регулировка вылета пластины производится следующим образом: из корпуса 1 выкручиваются винты 5, пластина 2 освобождается, вылет пластины увеличивается или уменьшается на определенную величину и снова закрепляется в корпусе 1 с помощью винтов 5.

Для проведения ускоренных испытаний режущих элементов пил на износостойкость дисковый инструмент необходимо установить на оправку фрезерного станка, а стержневой инструмент - в резцедержатель токарного станка и назначить режимы резания максимально приближенные к паспортным данным испытуемой пилы. При этом методика проведения испытаний соответствует методике обработки дисковой фрезой и токарным отрезным резцом.

Например, при использовании разработанного дискового инструмента диаметром 100 мм с 4 режущими звеньями время испытания на стойкость уменьшается в семь раз в сравнении с испытаниями реальной цепи длиной 1165,6 мм имеющей 28 режущих звеньев в результате того, что

режущие звенья чаще входят в контакт с обрабатываемой поверхностью. При использовании предлагаемого инструмента стержневого типа время испытания на стойкость уменьшается до двадцати раз за счёт того, что реальная цепь имеет 28 режущих звеньев, а предлагаемый инструмент - 2 режущих звена постоянно находящихся в контакте с обрабатываемой поверхностью. Причём поверхность износа у зубцов предлагаемого инструмента как дискового, так и стержневого типа полностью отвечает реальной поверхности износа цепи.

Необходимо учитывать, что при использовании разработанных инструментов сокращается не только время на проведение испытаний, но и расход инструментального и обрабатываемого материалов. Причем, происходит экономия материальных средств и трудовых ресурсов, т.е. появляется возможность получить информацию о свойствах режущего инструмента в более короткие сроки, в необходимом объёме при меньшей стоимости испытаний.

Существенное сокращение затрат на испытания пильной цепи даёт возможность своевременно оценивать ее качество, осуществлять мероприятия по оптимизации технологических процессов изготовления и условий эксплуатации, а также решать другие производственные проблемы, требующие проведения испытаний. В частности, определять обрабатываемость материалов резанием, оценивать новые материалы режущих звеньев и различные способы повышения их прочности, методов финишной и термической обработки.

Предложенная методика испытаний деталей трибосопряжения типа «направляющая-цепь» даёт возможность на порядок снизить продолжительность испытаний, уменьшить рассеяние полученных результатов по сравнению со стендовыми эквивалентными испытаниями и обеспечить экономию при испытаниях дорогостоящих материалов. При этом реализуется подход к определению основных принципов моделирования эквивалентных состояний трибологических пар, которые эксплуатируются в

сложных условиях нагружения. Предложенные методы ускоренных испытаний износостойкости трибосопряжений позволят существенно снизить затраты на разработку перспективных антифрикционных материалов и конструкций новых фрикционных устройств, значительно сократить сроки их внедрения в производство. Результаты испытаний создадут предпосылки для обоснованного выбора материалов пар трения для заданных условий эксплуатации и могут быть использованы при разработке новых износостойких материалов и покрытий.

6.4 Рекомендации по повышению износостойкости металлорежущего инструмента.

6.4.1 Особенности многокомпонентного динамического нагружения трибосопряжения «деталь-режущий инструмент»

Установление оптимальных методов и режимов обработки, обеспечивающих требуемую точность, параметры поверхностного слоя и устойчивую работу технологической системы, является одним из важных этапов технологической подготовки производства. Эффективность процесса резания в большей степени определяется себестоимостью и производительностью обработки, качеством обработанной поверхности и износостойкостью металлорежущего инструмента. Эти показатели в значительной степени определяются условиями нагружения в зоне контакта инструмента и заготовки.

При этом необходимо учитывать, что процесс резания происходит в основном при контактном взаимодействии в условиях трехкомпонентного нагружения: проскальзывании в двух взаимно перпендикулярных направлениях из-за наличия скорости резания и скорости подачи и переменной нагрузке с возможностью возникновения удара вследствие наличия вибраций и врезания зубьев многолезвийного инструмента. Подобное

сложное нагружение неизбежно приводит к многообразию физико-химических явлений сопровождающих обработку металлов резанием с изменением свойств поверхностного слоя как обрабатываемого, так и инструментального материалов.

Изучение возможностей обеспечения оптимальных параметров поверхностного слоя деталей технологическими методами показывает, что в зависимости от используемых методов обработки можно изготовить детали машин с требуемыми свойствами поверхностного слоя. Пластическая деформация поверхностного слоя обрабатываемого и инструментального материалов при обработке на металлорежущих станках приводит к резкому изменению структуры: фрагментации зерен, возникновению микроискажений, на несколько порядков увеличивается плотность дислокаций. Структурные концентраторы напряжений более интенсивно влияют на предел выносливости и износостойкость деталей машин, чем, например, геометрические параметры. Структурные неоднородности вызывают появление локальных концентраторов напряжений. Поэтому изменение микроструктуры поверхностного слоя после различных технологических вариантов обработки на металлорежущих станках является важным для прогнозирования долговечности деталей машин [149].

Особенно остро стоит проблема вибрационной стойкости и износа инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов. Например, анализ конструкции энергетических установок показал, что 85% материалов деталей составляют труднообрабатываемые жаропрочные стали и при их изготовлении 90-95% всех технологических операций производится обработкой резанием, в большой мере сопровождающимися вибрациями.

Известно, что при обработке жаропрочных и трудно обрабатываемых материалов всегда возникают более интенсивные (с большей амплитудой) автоколебания технологических систем. Это объясняется, во-первых, большими силами резания и во-вторых тем, что при резании этих материалов наблюдаются повышенные коэффициенты усадки стружки ($k_a=2\dots3$ и выше),

что приводит к увеличению фазовой характеристики силы резания (отставания по времени изменения силы резания от изменения толщины среза; касательное напряжение) до критических значений и к резкому увеличению амплитуды автоколебаний. Амплитуда колебаний связана четкой зависимостью со стойкостью инструмента [150]. Циклическое нагружение инструмента при увеличении интенсивности автоколебаний, начиная с определенного предела, вызывает усталостное разрушение участков материала инструмента, находящегося в контакте с изделием и сходящей стружкой. Поэтому, по достижении некоторого уровня автоколебаний, стойкость инструмента начинает резко снижаться.

При этом только за счет уменьшения виброактивности обработки достигается существенное увеличение производительности резания и стойкости металлорежущего инструмента. Так, путем управления уровнем вибраций при токарной обработке достигается увеличение стойкости резцов на 20 - 39% , производительности обработки на 36% и площади обработанной резцом поверхности детали до затупления на 35% [151].

6.4.2 Устройство для уменьшения вибраций режущего инструмента [152]

В настоящее время наиболее широко используются следующие направления борьбы с вибрациями при резании:

- повышение виброустойчивости и динамических характеристик металлорежущих станков и их механизмов;
- разработка для конкретных условий производства виброгасящих устройств ударного действия, фрикционных, гидравлических;
- разработка прогрессивного виброустойчивого режущего инструмента и оснастки;
- разработка методов и средств управления уровнем интенсивности автоколебаний.

Гашение вибраций инструмента при обработке деталей с разной сложностью обрабатываемых поверхностей возможно при использовании специальных устройств. Наиболее простым и применимым к широкому спектру режущего инструмента является демпфирующее устройство, представленное на рисунке 6.7.

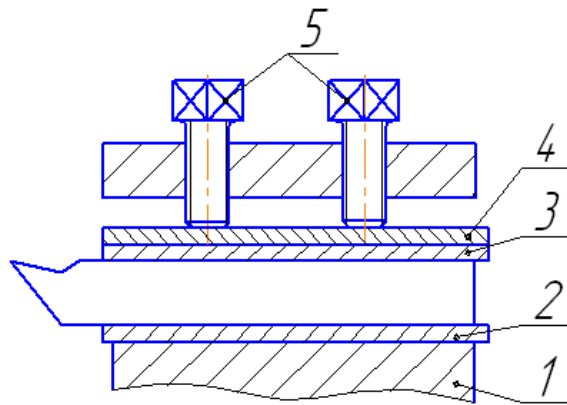


Рис 6.7 - Схема устройства для уменьшения вибраций режущего инструмента

Резец устанавливается в корпусе 1 на опорный элемент 2 и прижимается через пластину 3 и стальную пластину 4 зажимными болтами 5. Поставленная задача достигается тем, что поверхность резца размещается на накладной элемент, состоящий из двух пластин одинаковой длины и ширины. Пластина, которая размещается непосредственно над инструментом выполнена со сплава с высокими демпфирующими свойствами, а другая из конструкционной стали. Применение стальной пластины приводит к увеличению жесткости крепления за счет распределения зажимной силы на всю площадь металлической пластины.

В процессе обработки изменение силы резания приводит к возникновению вибрации режущего инструмента, которые передаются опорному и накладному элементам с повышенными демпфирующими свойствами. За счет микропластической деформации металла этих элементов происходит рассеяние и гашение энергии упругих колебаний. При этом

приобретает наибольшее значение материал пластин, его демпфирующие свойства.

6.4.3 Оптимизация условий нагружения в контакте методом вибродемпфирования

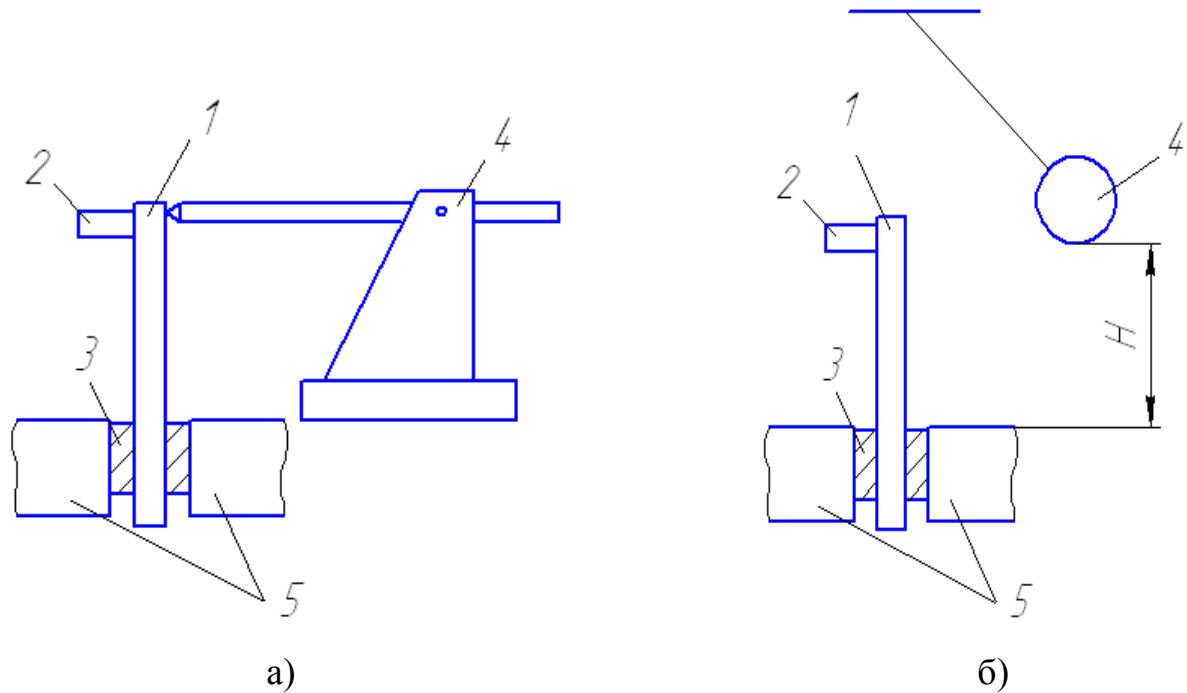
Характеристикой демпфирующих свойств упругой системы является относительное рассеяние энергии, которое может быть определено по затуханию свободных колебаний образца. При этом темп затухания свободных колебаний определяется логарифмическим декрементом затухания. Существует ряд методов, по которым определяются характеристики рассеяния энергии при колебаниях. Наиболее распространенным является метод затухающих колебаний, который состоит в записи виброграмм свободных затухающих колебаний образца с определением логарифмического декремента колебаний [153].

Данный метод был использован для определения демпфирующих свойств образцов из различных материалов. Обеспечение образцам колебательного движения осуществлялось независимо с помощью двух стендов (рис.6.8).

Спецификой первого стенда (рис.6.8а) является то, что образец с установленным датчиком закрепляется консольно в устройстве. Начальная амплитуда колебательного движения задается через коромысло, которое и является спусковым элементом. Подвижным конусом коромысла задается начальная амплитуда. Возбуждение свободных колебаний происходит при резком выводе из контакта конуса коромысла.

Особенностью работы второго стенда (рис. 6.8б) является то, что возбуждение колебательного движения закрепленного консольно образца проводили путем удара шариком массой 50г, закрепленного на нити, в результате движения свободного падения с постоянной высоты 200мм.

Применение замка дает возможность точно установить длину свободной части образца.



1 - образец; 2 - вибродатчик;
3 - замок; 4 - коромысло;
5 - фиксирующее устройство;

1 - образец; 2 - вибродатчик;
3 - замок; 4 - шарик;
5 - фиксирующее устройство;

Рисунок 6.8 - Схемы устройств для задания колебаний образцу через амплитуду а) и с помощью шарика б).

В качестве экспериментальных образцов использовали пластины размером 600x18x3 из наиболее распространенных конструкционных материалов: Ст 3, Д16, ВТ-3, АЛ9, псевдосплав железо-медь. Во время опытов по двум методикам запись виброграмм проводили с помощью прибора АЦП Е14-140 и ПК. Обработку сигнала проводили по программе Winпос.

Анализ демпфирующих свойств материалов проводили по логарифмическому декременту затухания, полученному из виброграмм свободных колебаний по формуле:

$$\delta = \frac{1}{z} \cdot \ln \frac{a_k}{a_{k+2}} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

где - δ величина декремента колебаний (в процентах) при среднем переменном напряжении в материале;

a_k и a_{k+2} - начальная и конечная амплитуды напряжений на рассматриваемом участке виброграммы;

z - число циклов на рассматриваемом участке виброграммы с начальной амплитудой a_k и конечной a_{k+2} .

Результаты проведенных испытаний представленные в таблице 6.2.

Таблица 6.2 - Результаты определения логарифмического декремента затухания

Материал	δ , %
Ст3	4,8
ВТ3	4,7
Д16	11,13
АЛ9	6,45
Псевдосплав	10

Согласно полученным результатам наименьшее количество энергии рассеивает Ст3 и титановый сплав ВТ3. Темп затухания свободных колебаний этих материалов составляет 4,8% и 4,7% соответственно. Наилучшие показатели у псевдосплава железо-медь - 10% и алюминиевого сплава Д16 - 11,13%.

Д16 относится к дуралюмину, который упрочняется термической обработкой. Его отрицательной стороной является высокая деформируемость в горячем и холодном состоянии. Железомедный образец, полученный методом порошковой металлургии, более интересен при использовании его в

качестве вибродемпфирующего элемента. Демпфирующие свойства порошковых материалов могут корректироваться химическим составом, пористостью и термической обработкой. В связи с этим возможности по созданию материала с высокими демпфирующими и механическими свойствами у порошковых материалов выше.

Кроме того, демпфирующие свойства железомедного образца обеспечиваются использованием в псевдосплаве меди, которая имеет высокий коэффициент рассеяния энергии. Эффект диссипации энергии усиливается за счет пористости в самой пластине [153]. Изменение плотности дает возможность регулировать виброгасящие свойства за счет изменения площади контакта зерен в материале.

Для оценки эффективности использования вибродемпфирующих пластин из железомедного псевдосплава при уменьшении уровня вибраций в процессе резания были проведены исследования при черновой токарной обработке детали типа диск из сплава ЭП-724 на станке МК6713. Диаметр обрабатываемой детали 345 мм, скорость резания $V = 9,75$ м/мин, глубина резания $t = 2,5$ мм и $0,7$ мм, подача $S = 0,2$ мм/об. Резец с режущей частью ВК 15 крепился между двумя вибродемпфирующими пластинами размерами $600 \times 18 \times 3$ мм. Запись виброграмм проводилась во время обработки с помощью цифрового регистратор-анализатора динамических процессов МИС-200. Вибродатчики устройства устанавливали на резце и резцедержателе.

В результате исследований установлено, что использование вибродемпфирующих пластин при обработке жаропрочного материала ЭП-724 привело к существенному изменению параметров колебательного процесса (частоты и амплитуды). При резании с глубиной $2,5$ мм амплитуда колебаний с вибродемпфирующими пластинами уменьшилась на 20% и составила $3,74$ мкм. Разность частот колебаний с использованием и без использования демпфирующих пластин составила 36 Гц, а разность амплитуд - $0,93$ мкм. Использование пластин при резании с глубиной $0,7$ мм на амплитудную составляющую практически не повлияло, но частотная

характеристика с использованием демпфирующих пластин уменьшилась на 64 Гц и составила 1109 Гц.

Таким образом, использование вибродемпфирующих элементов при отмеченных условиях и режимах обработки приводит к снижению как амплитудной, так и частотной составляющей вибрационного процесса. При больших глубинах резания в большей степени уменьшилась амплитуда колебаний, а при малых – частота колебаний. В качестве демпфирующих элементов с достаточной эффективностью могут применяться пластины из железомедного порошкового псевдосплава. Предложенное устройство и мероприятия по повышению демпфирующих свойств резцедержателя будут способствовать повышению износостойкости режущего инструмента, качества обрабатываемой детали и могут быть рекомендованы для применения широкого спектра режущего инструмента.

6.5 Применение методов инженерии поверхности для повышения износостойкости трибосопряжений многокомпонентного контактного нагружения

6.5.1 Использование свободных макрорадикалов в трибосопряжениях

6.5.1.1 Метод финишной обработки с применением гранулированного абразивного материала [154].

Большинство деталей машин и механизмов в процессе изготовления подвергаются финишной обработке, при которой формируется требуемая точность и качество обработанной поверхности изделий. Одним из наиболее перспективных способов финишной обработки металлов, включающей предварительную обработку для удаления припуска и чистовую абразивную обработку, является использование при операциях чистового шлифования и полирования гранулированного абразивного материала, как в свободном виде, так и в качестве составной части абразивного инструмента. В настоящее время

разработаны и рекомендованы к использованию при абразивной обработке металлов различные виды гранулированного абразивного материала, что расширяет технологические возможности его применения [130, 131].

Разновидности гранулированного материала определяются способами изготовления и физико-химическими свойствами составляющих материалов. В частности, абразивный материал, получаемый путем смешивания абразива и связующего в форме с последующей полимеризацией в этом состоянии, позволяет получать гранулы с режущими свойствами, подобными обычному жесткому абразивному инструменту, особенно в случае применения терморезактивного связующего. Поэтому этот материал может быть рекомендован для использования в большей мере при обдирочном шлифовании.

Интересным направлением применения абразивного материала является получение пористого или полого гранулированного материала. Эти гранулы с наплавленными на их поверхность абразивными зёрнами являются продуктом вспенивания полимера. При обработке такими гранулами появляется возможность снизить температуру в зоне шлифования, улучшить условия удаления продуктов шлифования, более эффективно подводить смазочно-охлаждающую жидкость в зону резания [129, 130]. Однако необходимо учитывать неизбежное снижение прочности подобного гранулированного материала. Кроме того, регулирование жесткости связующего вещества полых гранул возможно введением специальных наполнителей, что приводит к изменению физико-химических свойств и повышает стоимость материала.

Наиболее перспективным для чистового шлифования и полирования является гранулированный абразивный материал, получаемый в процессе радикальной суспензионной полимеризации мономера при перемешивании с абразивными зёрнами в инертной неорганической среде, представленный в главе 5.4.

Как было показано в разделе 5.4.2 сплошные гранулы более предпочтительны при чистовой обработке т.к. позволяют увеличить площадь контакта связывающего вещества с обрабатываемой поверхностью и обеспечить дополнительное смазывающее действие в зоне резания. Особенно это актуально при использовании в качестве связывающего вещества термопластичного полимера. В частности, использование в качестве термопластичного связывающего вещества гранул полиакрилата (полиметилметакрилата, полибутил метакрилата, полиметакрилата, полибутилакрилата) позволяет изменять жесткость связывающего вещества в зависимости от степени полимеризации, обусловленной условиями полимеризации и регулировать шероховатость обработанной поверхности.

Кроме того, в процессе обработки обеспечивается повышенное разрушение металлов в результате взаимодействия с обрабатываемой поверхностью свободных макрорадикалов, которые образуются в результате термомеханического разрушения полимера - его деструкции. Повышение площади контакта связующего вещества гранулированного материала с обрабатываемой поверхностью сопровождается уменьшением усилия микрорезания абразивных зерен. Механически деструктируемые полимеры активируют разрушение частиц металла так же, как и низкомолекулярные поверхностно-активные вещества [155].

Вышеуказанные положения позволили разработать метод финишной обработки с применением гранулированного абразивного материала. Данный способ финишной обработки может быть рекомендован для чистового шлифования и полирования в связи с возможностью повышения эффективности обработки введением в зону резания свободных макрорадикалов, уменьшения влияния неоднородности зернового состава абразивных зерен, варьированием размерами и жесткостью гранул. При этом появляется возможность, изменяя состояние обрабатываемого поверхностного слоя, регулировать степень его разрушения при резании, обеспечить высокое

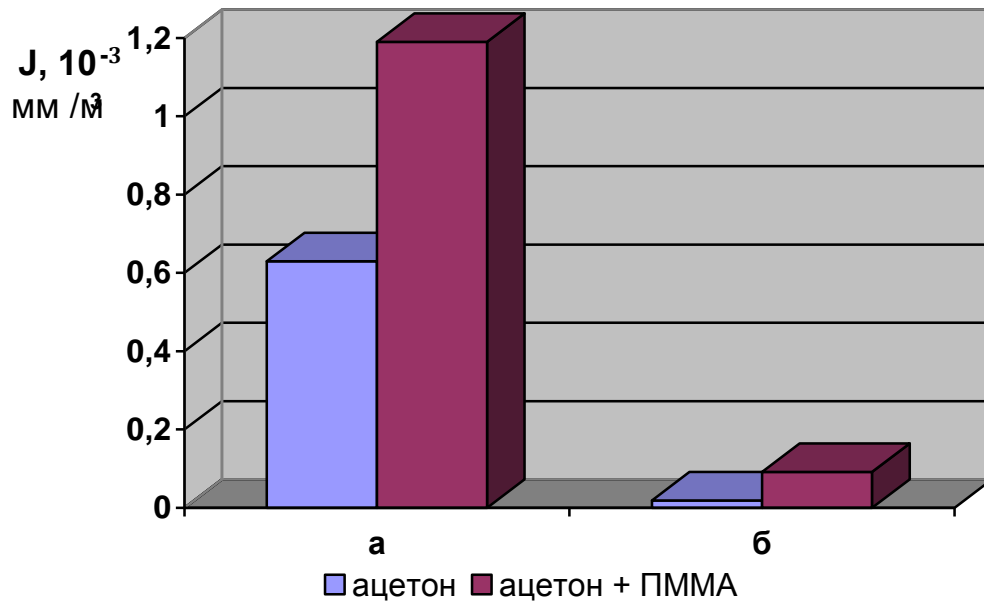
качество обработанной поверхности и уменьшить трудозатраты при полировании.

6.5.2.2 Управление трибологическими свойствами зоны контакта сопряжений воздействием свободных макрорадикалов

Как было отмечено в разделе 5.4.2, поверхностный слой повышенной износостойкости образуется на обработанной поверхности в процессе шлифования без СОЖ лентами из специального гранульного абразивного материала, а с подачей СОЖ на заготовке образуется поверхностный слой повышенной обрабатываемости. Для уточнения степени влияния свободных макрорадикалов на износостойкость трибосопряжений была проведена сравнительная оценка изменения интенсивности изнашивания для образцов стали 40Х в условиях трехкомпонентного нагружения (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях) с подачей в зону контакта полиметилметакрилата (ПММА) на установке, представленной на рисунке 2.7. Учитывая сложность обеспечения постоянного наличия ПММА в зоне контакта образцов при испытаниях в сухом виде, применяли раствор ПММА.

Испытания проводились в режиме граничного и полужидкостного трения с подачей в зону контакта исследуемых образцов ацетона и раствора ПММА в ацетоне (1гр порошка ПММА на 200мл ацетона). При этом предварительное растирание полимера до порошкового состояния способствовало дополнительному инициированию механодеструкции и повышенному содержанию свободных макрорадикалов в растворе.

Условия проведения испытаний: амплитуда поперечных проскальзываний 0,25 мм; продольных проскальзываний 0,15 мм; частота поперечных проскальзываний 30 Гц; частота продольных проскальзываний 66 Гц; нормальная нагрузка 20 Н, время испытаний 4 часа. Результаты испытаний представлены на рисунке 6.9.



а – граничное трение; б – полужидкостное трение

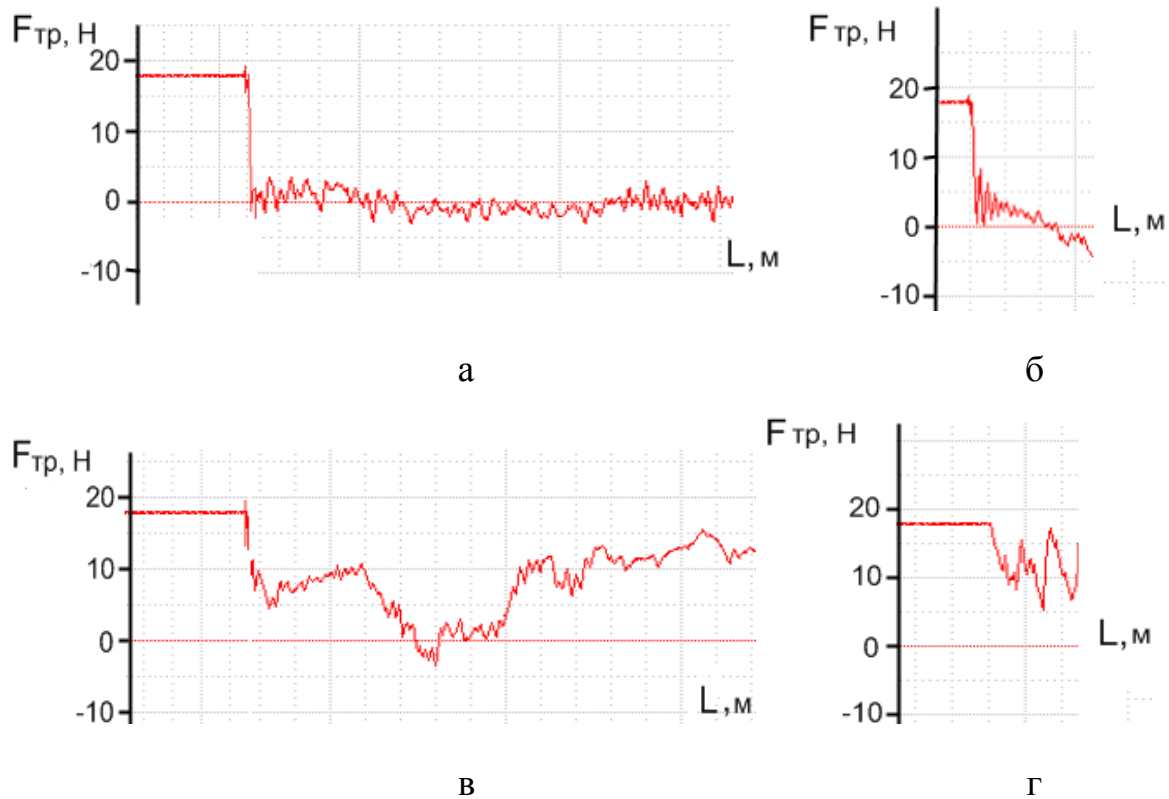
Рисунок 6.9 – Интенсивность изнашивания образцов с подачей в зону контакта ацетона и раствора ацетона с ПММА

Как следует из полученных результатов, внедрение в зону контакта ПММА приводит к существенному увеличению интенсивности изнашивания стали. Причем, чем больше подается раствора, а соответственно, и большее количество ПММА попадает в зону контакта, тем в большей степени наблюдается изменение интенсивности изнашивания.

Учитывая, что отмеченная разница в износостойкости поверхности образцов может происходить вследствие изменения величины коэффициента трения, была произведена оценка влияния содержания растворенного ПММА в зоне контакта на силу трения скольжения (движения) и силу трения покоя. При этом использовали модернизированный трибометр мод. ТММ 32А с возможностью определения электросопротивления контакта и выводом показаний на персональный компьютер.

Сравнительные исследования производили в условиях сталь по стали с применением стандартной методики и кольцевого образца весом 0,39 кг. Наличие ацетона и раствора ацетона с ПММА в зоне контакта образца и плиты осуществлялось путем предварительного обильного смазывания плиты и

образца при определении силы трения покоя и обильного смазывания плиты перед движущимся образцом при определении силы трения скольжения. Чтобы не произошло искажения результатов, в связи с интенсивным испарением исследуемых жидкостей, регистрацию силы трения покоя и скольжения производили отдельными экспериментами. Полученное изменение силы трения представлено на рисунке 6.10.



а - сила трения скольжения с ацетоном; б - сила трения покоя с ацетоном; в - сила трения скольжения с раствором ацетон + ПММА; г - сила трения покоя с раствором ацетон + ПММА

Рисунок 6.10 – Изменение силы трения скольжения и покоя:

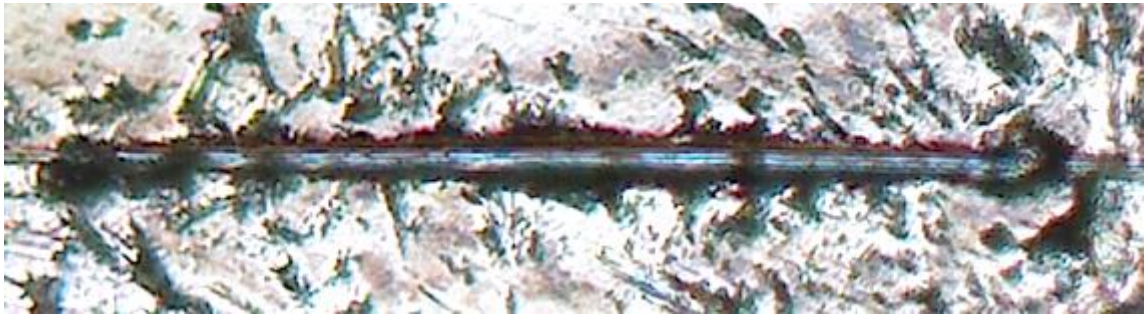
Анализ трибограмм позволяет констатировать, что введение ПММА в ацетон в рассматриваемых пропорциях сопровождается существенным изменением как силы трения скольжения, так и покоя. При общем снижении почти в два раза сил трения наблюдается увеличенный разброс их значений по длине трассы скольжения. Это указывает на неравномерность физико-

химических явлений в зоне контакта при трении с наличием ПММА и может быть результатом неравномерной кинетики механохимических реакций на поверхности стали, источником которых является деструкция полимера.

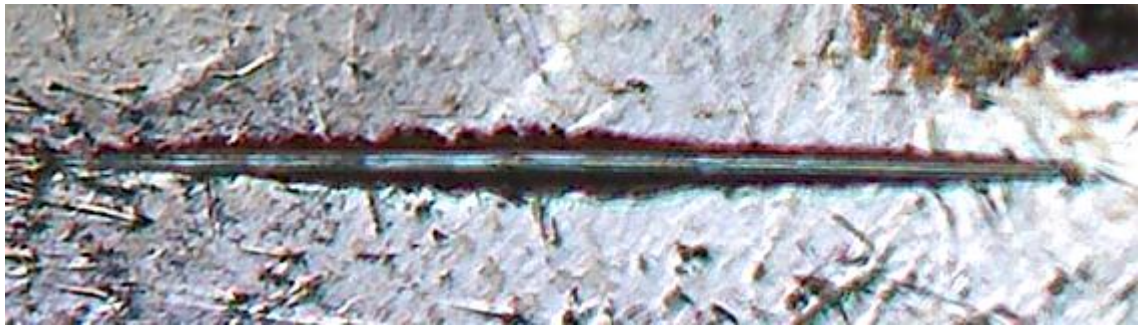
Согласно литературным данным [160, 161] многокомпонентное нагружение инициирует механохимические явления в зоне контакта трибосопряжения. Механохимические превращения отличаются от других химических реакций, инициированных физическими методами тем, что они могут развиваться при сравнительно невысоком среднем уровне энергии в единице объема вещества. В переменных механических полях эффективность механохимического процесса резко увеличивается с ростом интенсивности воздействия и имеет наибольшую величину в условиях максимальной концентрации механической энергии на единицу объема вещества в единицу времени.

Для уточнения степени влияния механохимических превращений на трибологические явления в зоне контакта была проведена сравнительная оценка изменения физико-механических свойств поверхностного слоя образцов методами непрерывного вдавливания и сканирования индентором на приборе "Микрон-гамма" разработанном в Национальном авиационном университете. Режимы сканирования: величина нагрузки на индентор - 50 сН; скорость нагружения - 5 сН/с; скорость сканирования - 40 мкм/с. Длина трассы 455 мкм, индентор R=10 мкм.

Как следует из внешнего вида поверхностей образцов после трения и рисков сканирования (рис. 6.11), внедрение в зону контакта деталей полимерной составляющей СОЖ приводит к снижению равновесной шероховатости и повышению однородности контактирующей поверхности. Полученная поверхность содержит меньше задиров и раковин, а ширина риски характеризуется большей равномерностью с более четким формированием зон постепенного вхождения и выхода индентора при сканировании.



а)



б)

Рисунок 6.11 – Риска при сканировании образца работавшего в режиме граничного трения с подачей в зону контакта ацетона – а) и раствора ацетона с ПММА – б)

Более наглядно оценить однородность поверхностного слоя возможно по трибограммам сканирования поверхностей, используя элементы трибо-спектрального анализа [162, 163]. Согласно трибо-спектральному методу в процессе перемещения образца индентор осуществляет вынужденные колебания, характер которых обусловлен различным физическим сопротивлением структуры поверхностного слоя материала. В результате равномерного перемещения процесс изменения тангенциальной и нормальной реакции нагружающей силы представляет собой совокупность колебаний, зависящими от размеров фрагментов, блоков и других структурных составляющих материала, обладающих разным сопротивлением контактному деформированию.

Как следует из рисунка 6.12, изменение деформационно-прочностных свойств поверхностного слоя образцов для рассматриваемых случаев существенно отличается. Особенно вдоль участков ограниченных

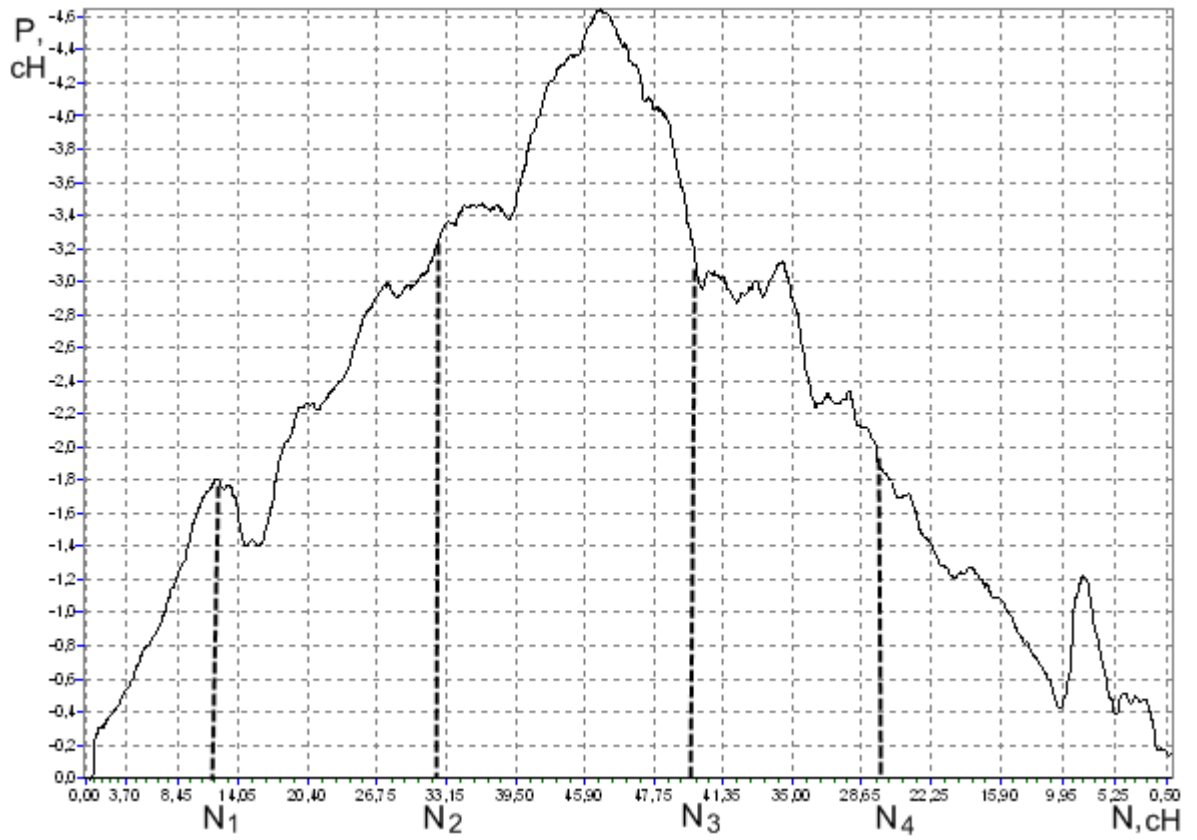
нормальным нагружением $[N_1 - N_2]$ и $[N_3 - N_4]$. Фрагменты поверхностного слоя образца а) более мелкие, чем образца б). В первом случае (рис. 6.12а) наблюдается наличие структурных элементов различных размеров, что выражается в наличии нескольких характерных амплитуд процесса. Во втором случае (рис. 6.12б) характер изменения тангенциальной составляющей силы трения $P(t)$ указывает на однородную крупнофрагментную структуру.

Дисперсия силы трения снижается и составляет соответственно 0,029 и 0,022. При этом снижается износостойкость. Структурно чувствительный динамический коэффициент также снижается и находится в пределах соответственно $0,4 \cdot 10^{-3} \dots 4,7685$ и $0,2 \cdot 10^{-3} \dots 1,8419$ согласно уравнениям 6-й степени зависимости силы трения от времени (таблицы В9, В10):

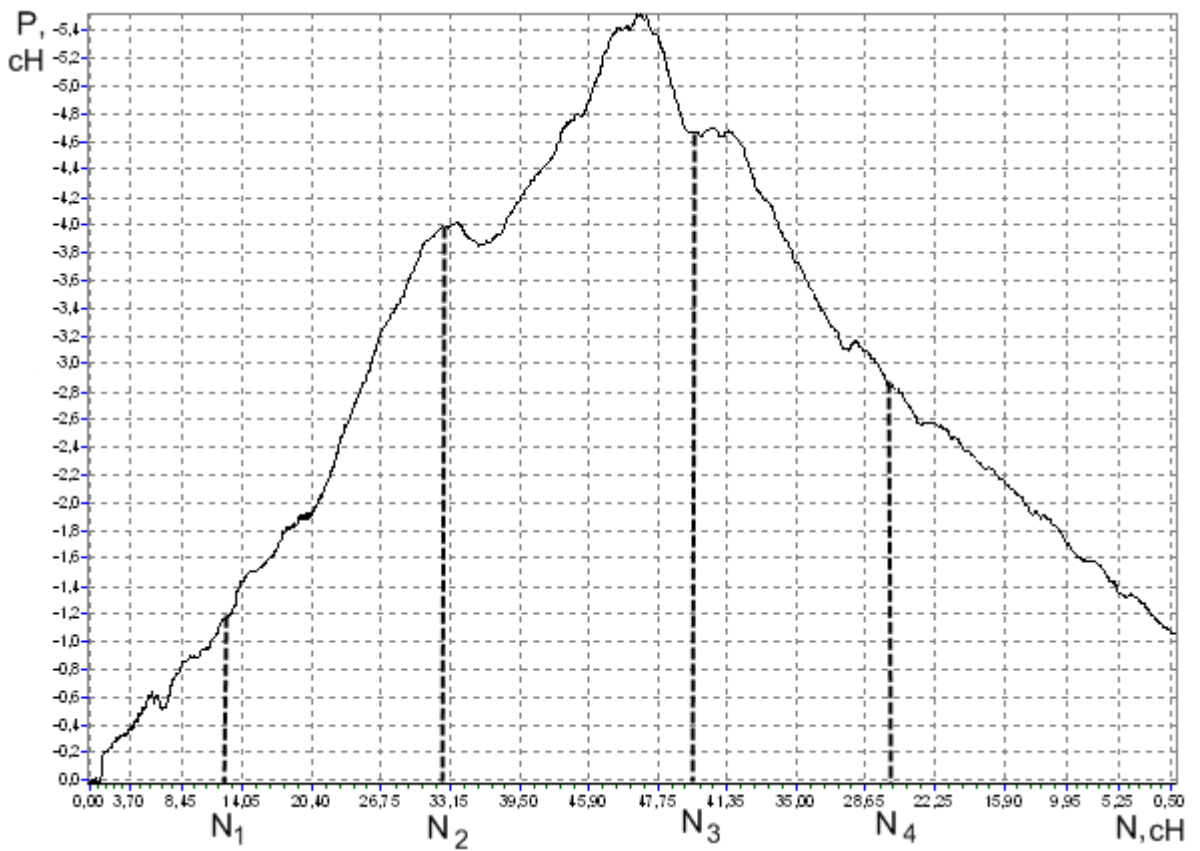
$$P = 0,0004t^6 - 0,013t^5 + 0,1748t^4 - 1,0781t^3 + 3,1534t^2 - 4,7685t + 1,6611 \quad (6.2)$$

$$P = 0,0002t^6 - 0,0058t^5 + 0,0792t^4 - 0,4629t^3 + 1,1367t^2 - 1,8419t + 0,5139 \quad (6.3)$$

Кроме того, основываясь на том, что изменение силы сопротивления деформированию $P(t)$ обуславливает изменение глубины внедрения индентора $H(t)$ мгновенное изменение глубины внедрения индентора $H(L)$ может выступать мерой нанотвердости (твердости фрагментов). Полученные при исследованиях данные изменения глубины внедрения индентора по трассе сканирования наглядно показывают влияние наличия полимерной составляющей в СОЖ на твердость поверхностного слоя образцов при трении. В частности, представленные на рисунке 6.13 изменения глубины внедрения индентора по длине трассы сканирования образцов после граничного трения с подачей в зону контакта ацетона и раствора ацетона с ПММА, позволяют отметить уменьшение твердости поверхностного слоя вследствие воздействия полимера до 20%.



a)



б)

Рисунок 6.12 –Трибограммы сканирования поверхностей образца после граничного трения с подачей в зону контакта ацетона – а) и раствора ацетона с ПММА – б)

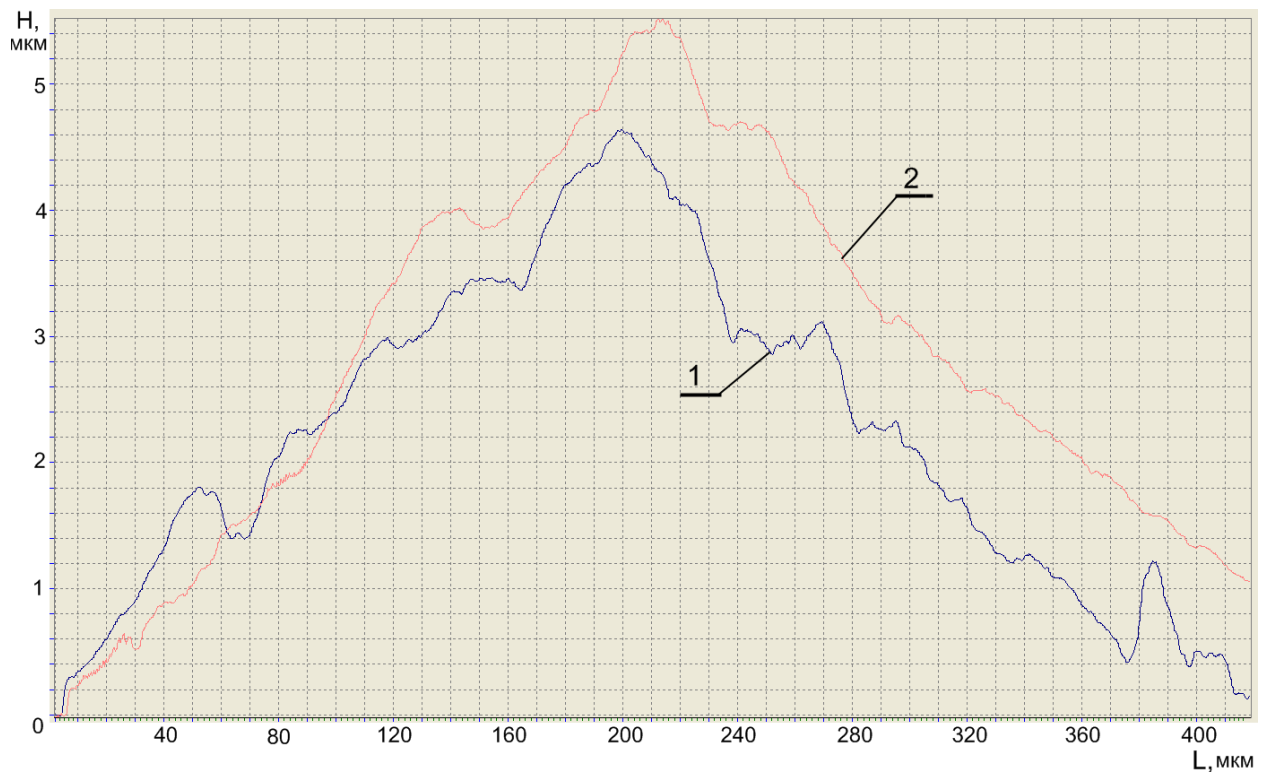


Рисунок 6.13 – Изменение глубины внедрения индентора по длине трассы сканирования образца после граничного трения с подачей в зону контакта ацетона – 1 и раствора ацетона с ПММА – 2

Отмеченные явления характерны и при более интенсивной подаче СОЖ в зону контакта трибосопряжения. Изменение глубины внедрения индентора по длине трассы сканирования образца после полужидкостного трения с подачей в зону контакта ацетона и раствора ацетона с ПММА, представленные на рисунке 6.14, указывает на уменьшение твердости поверхностного слоя при наличии полимера. При этом увеличение глубины внедрения индентора составило до 53%. Можно предположить, что наблюдаемые изменения являются результатом воздействия большего количества свободных макрорадикалов.

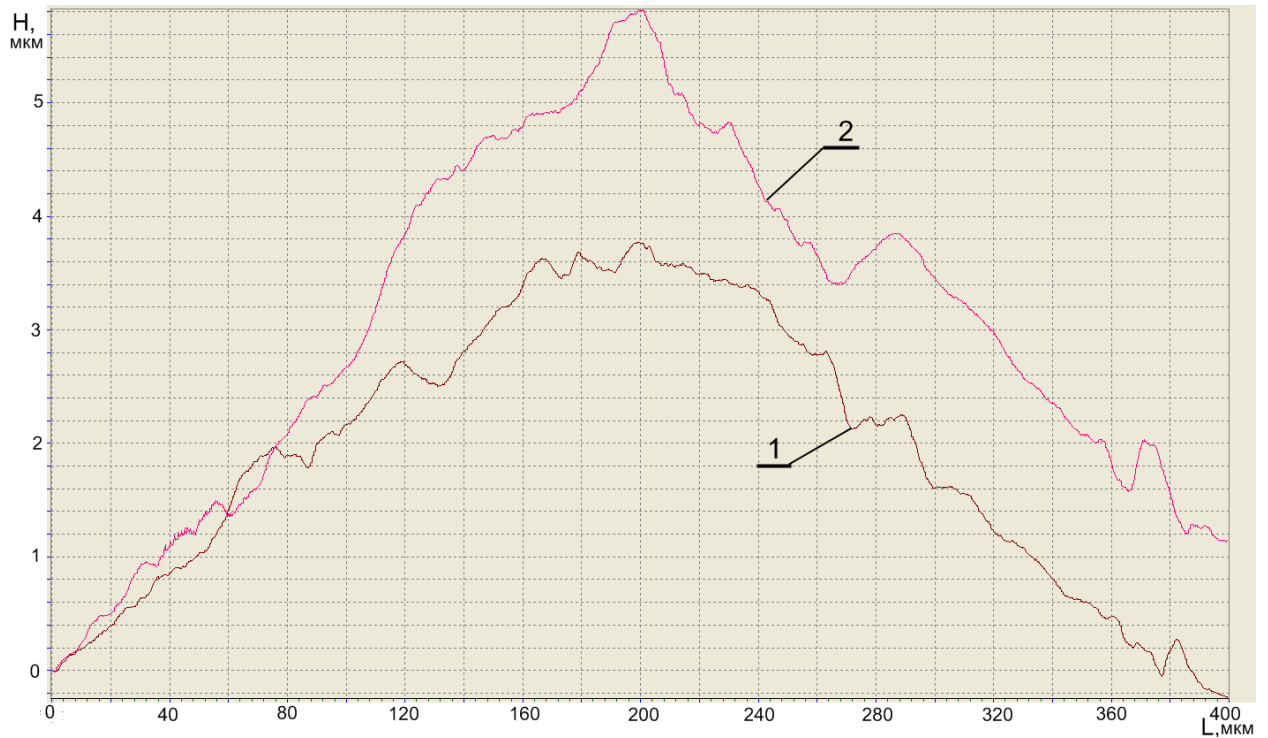


Рисунок 6.14 – Изменение глубины внедрения индентора по длине трассы сканирования образца после полужидкостного трения с подачей в зону контакта ацетона – 1 и раствора ацетона с ПММА – 2

При этом, как показывают результаты статистической обработки изменения глубины внедрения (табл. В.11), дисперсия сигнала составляет соответственно 0,014 и 0,024. Структурно чувствительный динамический коэффициент снижается и находится в пределах соответственно $0,3 \cdot 10^{-3} \dots 7,5601$ и $0,2 \cdot 10^{-3} \dots 3,4744$ согласно уравнениям 6-й степени зависимости глубины внедрения от времени:

$$H = -0,0003t^6 + 0,0099t^5 - 0,148t^4 + 1,0739t^3 - 3,9955t^2 + 7,5601t - 3,2119 \quad (6.4)$$

$$H = -0,0002t^6 + 0,0075t^5 - 0,084t^4 + 0,435t^3 - 1,2904t^2 + 3,4744t - 1,1794 \quad (6.5)$$

Таким образом, представленные результаты исследований показывают на существенное изменение состояния поверхностного слоя контактирующих деталей трибосопряжений под воздействием свободных макрорадикалов, образующихся при деструкции полимера. В рассмотренных условиях трения сформировался поверхностный слой, который характеризуется как

однородный крупно-фрагментный пониженной твердости, что может служить причиной отмеченного ранее увеличения износа. Можно заключить, что увеличение интенсивности изнашивания стали при трении в рассматриваемых условиях с наличием в зоне контакта ПММА происходит не в результате адгезионного изнашивания вследствие увеличения силы трения и коэффициента трения, а является следствием воздействия образующихся при деструкции полимера свободных макрорадикалов. Существенное снижение износостойкости является положительным фактором для облегчения приработки поверхностей и снижения сил резания при технологической обработке.

Учитывая совпадение результатов исследований по износостойкости трибосопряжений с наличием в зоне контакта ПММА при обработке гранулированным абразивным материалом и при трении образцов, возможно получение различной износостойкости контактирующих деталей при определенных условиях воздействия свободных макрорадикалов в зоне контакта трибосопряжения. Как было отмечено в разделе 5.4.2 контакт ПММА с обработанной поверхностью при подаче СОЖ приводит к образованию однородного поверхностного слоя на заготовке. Адсорбция свободных макрорадикалов на подобной поверхности должна происходить в большей степени, что сопровождается повышением эффективности их воздействия на износостойкость трибосопряжения. Отмеченное существенное снижение износостойкости является положительным фактором для облегчения приработки поверхностей и снижения сил резания при технологической обработке.

Однако наличие свободных радикалов в зоне контакта трибосопряжения может способствовать повышению его износостойкости. Для этого необходимо создать условия по формированию износостойкого неоднородного структурного состояния поверхностного слоя контактирующей детали с наличием крупных и мелких фрагментов различной прочности. Получение подобного структурного состояния отмечено в

процессе абразивной обработки без подачи СОЖ специальным гранулированным шлифовальным материалом, изготовленным на основе ПММА и абразивного зерна (раздел 5.4.2). При этом обеспечивается контакт режущего инструмента и обрабатываемого материала с наличием полимера в условиях многокомпонентного динамического нагружения. Обработка всухую изменила кинетику механохимических реакций макрорадикалов и процесс разрушения контактирующих поверхностей, но механизм этих изменений требует дополнительного изучения.

Таким образом, варьирование условиями протекания механохимических реакций в зоне контакта трибосопряжения при наличии свободных макрорадикалов открывает большие перспективы управления износостойкостью контактирующих деталей. Оптимизация этих условий с учетом динамики нагружения и образующегося структурного состояния поверхностного слоя позволяет расширить технологические возможности обеспечения долговечности трибосопряжений как в процессе изготовления деталей машин и механизмов, так и при их эксплуатации.

6.5.2 Методологические принципы инженерии поверхности деталей сложного динамического контактного нагружения

В настоящее время коммерческий и исследовательский интерес в области совершенствования износостойких материалов направлен на разработку композиционных материалов в которых варьирование структурными эффектами и выбор фазовых составляющих позволяет конструировать покрытие-материал так, чтобы комбинировать свойства, необходимые для условий эксплуатации детали. При этом сочетаются высокие физико-химические свойства поверхностного слоя и необходимые свойства основы (высокая прочность, ударная вязкость, трещиностойкость и т.д.). Механическая прочность деталей и конструкций обеспечивается одним материалом, а специальные свойства – другим, т.е. материалом покрытия

или нового структурного состояния поверхностных слоев материала детали. Эти задачи решаются методами инженерии поверхности.

Одним из перспективных направлений является создание на поверхности детали материала слоистой структуры с градиентным распределением свойств по глубине. Анализ работ по созданию износостойких композиционных материалов с покрытиями показал, что на современном этапе работы направлены на разработку и совершенствование покрытий, приведших к созданию многослойных покрытий на основе карбидов, нитридов, боридов и других соединений тугоплавких металлов, в том числе с подслоями из чистых металлов. Такое покрытие состоит из нескольких промежуточных слоев, каждое из которых имеет собственное функциональное назначение. Однако возможность создания новых покрытий за счет изменения их фазового и химического состава в основном исчерпана. Дальнейшим перспективным направлением в разработке новых износостойких материалов является создание требуемой структуры материала (например, образование на поверхности детали слоистой структуры).

Особую актуальность имеют вопросы создания износостойких покрытий для деталей трибосопряжений, которые работают в условиях сложного динамического нагружения.

В частности, в изделиях авиационной техники практически на все металлические детали и узлы наносятся те или иные покрытия в целях защиты их от коррозии, действия высоких температур и придания требуемого декоративного вида. К применяемым в производстве летательных аппаратах покрытиям предъявляются требования: высокая износостойкость, способность к многоцикловому динамическому воздействию (сопротивлению динамическим нагрузкам), высокая трещино-коррозионная стойкость [175].

Покрытия триботехнического назначения должны обеспечивать, с одной стороны, низкий коэффициент трения, определяемый малым значением сдвигового сопротивления, а с другой – достаточно высокую твердость и прочность поверхностного слоя, которые определяют сопротивление

механическим видам разрушения и изнашивания. Износостойкий материал с идеальными свойствами должен обладать сбалансированным сочетанием высокой твердости и вязкости, иметь химическую инертность относительно материала сопряженной детали и сохранять свойства при повышении температуры. Более твердые и более износостойкие материалы обладают меньшей вязкостью и стабильностью свойств при циклических нагрузках, также как при нестабильных условиях или при прерывистом резании. Материалы, которые лучше сопротивляются различным механическим и термическим нагрузкам часто хуже сопротивляются изнашиванию. Таким образом, твердость и вязкость являются противоположными свойствами и в настоящее время не существует материала, который бы интегрировал все указанные свойства одновременно [176-178]. Для преодоления двойственности противоречий свойств производят различные износостойкие материалы композиционного типа.

Например, разработаны слоистые инструментальные материалы, в которых комбинируются слои из вязких и прочных твердых сплавов и высокотвердой и теплостойкой керамики [179]. Эффективность и надежность покрытий для режущего инструмента в значительной степени определяется адекватным критериальным подходом к оценке их прочностной надежности, которая является основой для оптимизации структурных типов. Являясь механической характеристикой сопротивления материала пластической деформации, микротвердость, однако, не содержит информации о разрушении, которое, как известно, является основной причиной преждевременного выхода хрупких износостойких покрытий из строя.

В реальных условиях, чтобы повысить сопротивление деформированию необходимо создать на пути движения дислокаций барьеры. Анализ механизмов разрушения и изнашивания показал, что необходим материал с плавным изменением физико-механических свойств от поверхности к объемам, с высокими триботехническими свойствами поверхностей. Получение объемных субмикроструктурных и нанокристаллических

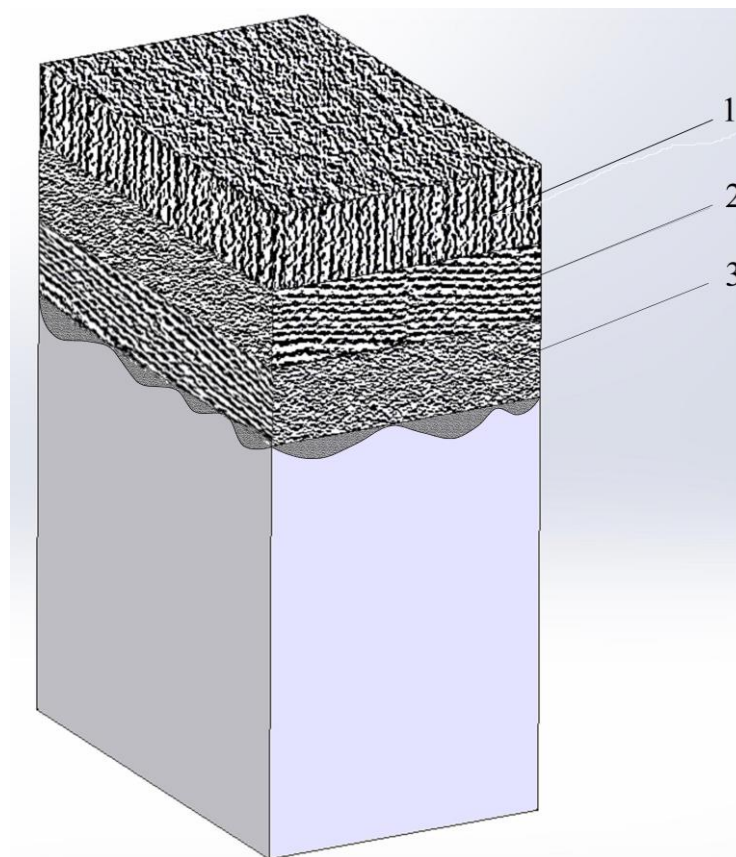
материалов, обладающих уникальными эксплуатационными и физико-механическими характеристиками, становится одной из важнейших задач. В этой связи разработка износостойкого материала в виде слоистого композита является актуальной научной проблемой, рассматриваемой в настоящей статье.

Оценка закономерностей формирования структурно-фазового и упруго-напряжённого состояния таких композиций на основе вариации состава и условий создания позволяют, как сформировать многофазную систему, так и целенаправленно менять величины параметров структурного состояния по толщине покрытия, регулируя эффективность его функциональных слоёв. При этом в условиях переменных нагрузок в зоне контактирования большие перспективы имеют наноструктурированные покрытия. Ультрадисперсные материалы с увеличенной площадью межзеренных границ имеют более сбалансированное соотношение между твердостью, оказывающей определяющее положительное влияние на износостойкость и прочностными характеристиками материала, в том числе и в условиях действия циклических термомеханических напряжений. Известно, что первопричиной разрушения материалов стандартной (микрометрической) структуры с размерами зерен свыше $d > 1$ мкм является формирование трещин, возникающих вследствие концентрации дислокаций у различных дефектов. В наноструктурированных материалах с размерами зерен менее $d < 80...100$ нм проявляется иной механизм разрушения. Для подобных материалов превалирующей причиной разрушения являются процессы на межзеренных границах, что связано с меньшим или сравнимым количеством атомов в зернах по сравнению с их количеством на границах.

Как показали результаты проведенных исследований, представленных в разделе 4.1, состояние поверхностного слоя деталей трибосопряжений изменяется в процессе структурной приспособляемости материала при трении. Повышенный износ происходит у деталей с однородным по величине кристаллитов (фрагментов) равнопрочным поверхностным слоем, который

характеризуется снижением прочности, более равномерной микрогеометрией поверхности, низкими значениями величины и разброса работы выхода электрона по поверхности.

С учетом тяжелых условий термомеханического нагружения деталей рассматриваемых трибосопряжений была сформулирована концепция градиентного износостойкого материала со сбалансированным сочетанием основных свойств, способного противостоять нагружению в виде соударения с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис.6.15).



1 – ударостойкий слой; 2 – слой противостояния продольному проскальзыванию; 3 – слой противостояния поперечному проскальзыванию

Рисунок 6.15 – Архитектура градиентного слоисто-композиционного материала с нанодисперсным многослойным покрытием износостойчивого при трехкомпонентном нагружении

Материал имеет трехслойную нанодисперсную архитектуру различной твердости, включающую ударостойкий слой столбчатой или игольчатой структуры и двух текстурированных слоев с противоположно направленным расположением кристаллитов для противостояния изнашиванию при проскальзывании деталей в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При этом верхний и третий слой должны иметь повышенную твердость, а более мягкий средний слой будет способствовать релаксации контактных нагрузок.

Под действием направленного внешнего воздействия система концентраций напряжений эволюционирует, стремясь к равновесию. Происходит постоянная конкуренция процессов деформационного упрочнения в локальных областях деформируемой среды, с одной стороны, и релаксации напряжений, с другой. Наличие предложенного слоистого покрытия позволит исключить затраты энергии на проведение процесса структурной организации поверхностного слоя контактирующих деталей и будет способствовать повышению его износостойкости.

Установлено, что границы раздела слоевой структуры и нанокристаллический поверхностный слой являются местами преимущественного торможения радиальных трещин вдоль границ столбчатых кристаллов и распространения наклонных трещин, интенсивное ветвление которых наблюдается в нанокристаллическом слое. Факторами, способствующими повышению прочности (вязкости разрушения) покрытий при переходе от однослойных к градиентно-слоистым покрытиям являются: упрочнение поверхностного слоя за счёт перевода его в нанокристаллическое состояние; ветвление мелкодисперсных трещин в поверхностном слое; градиентно-слоистая структура с протяжёнными границами раздела, тормозящими распространение трещин вглубь материала; развитие полос локализованной деформации в градиентно-слоистом нанокристаллическом покрытии [181].

Различные условия нанесения и химический состав покрытий позволяют варьировать дисперсность и структурное состояние градиентного слоистого материала. Характерное трансформирование текстуры формируемого покрытия, которое сопровождается изменением твердости и износостойкости, дает возможность получать оптимальные структуры с соответствующим комплексом свойств. В том числе получение анизотропной (столбчатой) структуры, что соответствует возрастанию прочности и твердости, но снижению пластичности [182, 183]. Высокопрочная игольчатая структура может быть достигнута в процессе диффузионного барирования [184]. Наличие игольчатой структуры, пророщенной в стальную подложку, предотвращает отслоение покрытия. Чем выше скорость нагружения, тем выше текущее напряжение течения стальной основы, тем меньше разница в механических свойствах между упругим покрытием и пластичной подложкой, тем меньше концентрация напряжений и, соответственно, тем позднее происходит разрушение покрытия.

Для покрытий столбчатой структуры характерно расположение зерен перпендикулярно границе раздела «покрытие – основа». Разрушение таких покрытий происходит именно в этом направлении. Учитывая, что развитие трещины в покрытии происходит перпендикулярно границе раздела «покрытие – инструментальная основа» (в направлении роста зерен), разрушение покрытия будут определять напряжения, которые действуют в покрытии вдоль этой границы [185]. Изменяя конструкцию многослойного покрытия, можно влиять на его структурные параметры, механические свойства и управлять интенсивностью износа, динамикой разрушения покрытия в процессе эксплуатации детали.

Согласно работе [186] возникновение адгезионного взаимодействия между поверхностями возможно при образовании общих связей за счет электронного обмена, что приводит к уменьшению общей энергии системы. Это является следствием увеличения локализации элементов в стабильные конфигурации, повышение доли конфигураций промежуточного спектра

[187]. Поэтому для реализации предлагаемой концепции архитектуры нано-дисперсного многослойно-композиционного покрытия текстурирование второго и третьего слоев должно осуществляться с ориентацией кристаллитов по направлению перпендикулярном проскальзыванию поверхностей контактирования. Преимущественная ориентация кристаллитов в одинаковом направлении способствует анизотропии свойств материала покрытия, что может благоприятно влиять на эксплуатационные параметры, приводя, например, к росту микротвердости и износостойкости.

Требуемая направленность кристаллитов второго и третьего слоя предлагаемого нанодисперсного композиционного материала может быть достигнута за счет определенных условий нанесения [175, 182-184]. При этом возможно формирование в пленках сильной аксиальной текстуры в направлении нормали к поверхности, росту количества дефектов кристаллического строения и увеличению сжимающих остаточных напряжений. Высокая твердость обусловлена крайне дефектной кристаллической решеткой и высоким уровнем сжимающих остаточных напряжений, которые препятствуют движению дислокаций и развитию пластической деформации [188]. Например, в электроэрозионностойких покрытиях всех систем выявлены дислокационные субструктуры различных типов – ячеистая, полосовая, фрагментированная, хаотическая и сетчатая. Основным типом является полосовая субструктура. Ячеистая, полосовая, фрагментированная, субзеренная структуры являются разориентированными – от 2,7 до 4,7 град, что имеет существенное значение, т.к источниками полей напряжений в покрытиях являются границы раздела: внутрифазные (границы раздела зерен, субзерен, полосовой субструктуры) и межфазные (границы раздела частица/матрица) [189]. Следует отметить, что границы субзерен или ячеек, создающие лишь слабую разориентировку соседних областей кристалла (порядка 1°), легко преодолеваются дислокациями и поэтому не являются эффективными барьерами, приводящими к зарождению микротрещин [185].

Кроме того, в случае послойного получения требуемого покрытия перспективными средствами формирования направленных текстурированных субмикроструктурных и нанокристаллических материалов на сегодня, являются методы интенсивной пластической деформации. При этом могут быть использованы механизмы образования и трансформирования вторичных структур, возникающих в процессе структурной приспособляемости материалов при трении. Определенная величина, однородность и направленность кристаллитов поверхностного слоя достигается за счет изменения условий нагружения при трении [180, 190, 191].

Причем, необходимо учитывать, что эффективное повышение износостойкости рассматриваемых трибосопряжений с наличием слоистых покрытий возможно в случае восприятия трехкомпонентного динамического контактного нагружения одновременно всеми слоями покрытия, т.е. покрытие должно функционировать как целостный материал. В связи с этим одним из перспективных направлений создания подобного покрытия является совмещение второго и третьего слоев в единый слой, состоящий из нанокристаллитов разного размера и противоположной ориентации (рис. 6.16).

Ввиду структурной неоднородности материала его пластическая деформация как целого может осуществляться лишь путем совместной деформации отдельных структурных элементов, под которыми мы понимаем однородные участки кристаллитов. По мере деформации материала происходит блокирование сдвигов в пределах структурных элементов, в результате чего растут внутренние микронапряжения, которые являются основной причиной деформационного упрочнения при относительно малых пластических деформациях.

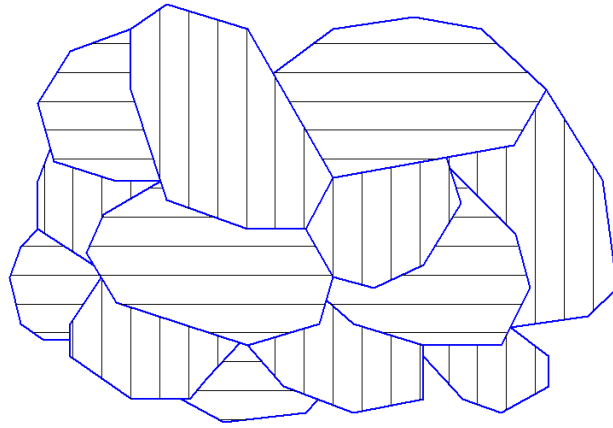


Рисунок 6.16 – Схематическое изображение нанокристаллитов разного размера и противоположной ориентации.

Возможность получения подобных структур была подтверждена экспериментально [192]. Повышенную твердость могут образовывать покрытия, состоящие из смеси нанозерен одного и того же материала, но различных кристаллографических ориентаций и решетчатых структур. Как отмечено в работе [193], для увеличения твердости подобных материалов важным является два фактора: размер кристаллитов должен в общем случае быть меньше 10нм в направлении деформации, чтобы помешать движению дислокаций, а среднее расстояние между зернами не должно превышать 0,5нм, чтобы препятствовать зарождению и развитию трещин. Тем не менее, зависимость твердости и предела текучести от размера зерен имеет сложный и неоднозначный характер, что связывают с особенностями деформирования наноструктурных материалов – взаимным проскальзыванием зерен по границам (иногда называемом ротационным разупрочнением). Кроме того, для больших зерен рост прочности и твердости при уменьшении их размера обусловлен введением дополнительных границ зерен, которые являются препятствием для движения дислокаций. При малых наноразмерных зернах рост прочности происходит благодаря низкой плотности имеющихся дислокаций и трудности образования новых.

Существуют различные способы получения поверхностного слоя с разноориентированными кристаллитами [194]: метод шаблонов (темплатный метод), получение наноструктур в нанореакторах, литографически индуцированная самосборка наноструктур, интенсивная пластическая деформация.

В частности, большие деформации (например, кручение при сжатии, равноканальное угловое прессование) приводят к фрагментированию и разориентированию структуры. Основной особенностью наноструктур, полученных под действием пластической деформации, является наличие неравновесных границ, которые служат источником больших упругих напряжений. Это приводит к возникновению большого количества дислокаций, которые, в основном, сосредоточены на поверхности нанокластеров, и сохранению избыточной энергии наноструктуры. При этом формируются наноструктуры с нанокристаллитами разного размера и ориентации [195, 196]. Однако степень деформации и даже скорость деформации не являются определяющими факторами размера зерна. Наиболее важна схема деформации, обеспечивающая как можно большее количество изменений направлений максимальных сдвигающих напряжений, как это имеет место, например, в винтовой экструзии [197].

На примере винтовой экструзии и прокатки со сдвигом показано, что данные схемы деформации приводят к измельчению структуры, однородному распределению зерен, формированию преимущественно высокоугловых границ зерен [198]. В частности винтовая экструзия приводит к снижению текстурированности в поперечном сечении, формированию мелкодисперсной структуры с преимущественно равноосными зёрнами и выраженной разнотекстурностью. При этом наблюдается неоднородность структуры в продольном сечении – преобладают вытянутые зёрна [199].

Причем, как указано в работе [200], поля остаточных упругих напряжений, локализованные в таких слоях, влияют на морфологические и фазовые изменения структуры, что приводит к изменению свойств материалов

не только на их поверхностях, но и в объеме. Очевидно, что приповерхностная структура должна зависеть от ориентации зерна исходной фазы относительно направления внешней действующей силы. Показано, что для него характерна существенная неоднородность микроструктуры, обусловленная высокой локальной неоднородностью полей внутренних напряжений, вызванной, главным образом, несовместностью деформации различно ориентированных зерен.

Существенное значение на эффективность эксплуатации износостойкого градиентного слоисто-композиционного материала оказывает толщина каждого слоя нанодисперсного многослойного покрытия. Согласно рекомендациям большинства авторов толщина слоев композиционного материала с реализацией эффекта дисперсного упрочнения должна быть до 60 нм. Причем, чем меньше толщина слоя покрытия, тем выше значение критической нагрузки его разрушения. При этом прочность нанокompозита увеличивается путем предотвращения сдвига границ зерен (проскальзывания) [201]. Оптимальной является толщина покрытия в 2...2,5 раза превышающая характерный размер неровностей границы раздела «покрытие-подложка». Неровность границы раздела может быть связана с шероховатостью поверхности изделия, на которое наносится покрытие [202].

Таким образом, создание износостойких покрытий наиболее эффективно осуществлять при использовании инновационной концепции многослойно-композиционных архитектуры с нанометрической структурой и чередующимися слоями наноразмерной толщины различного композиционного состава и функционального назначения. При этом могут использоваться различные методы инженерии поверхности позволяющие получать поверхностный слой с разноориентированными кристаллитами.

Основываясь на приведенных материалах исследований, методология инженерии поверхности трибосопряжений многокомпонентного нагружения может базироваться на методах, сведенных в диаграмму представленную на рисунке 6.17.

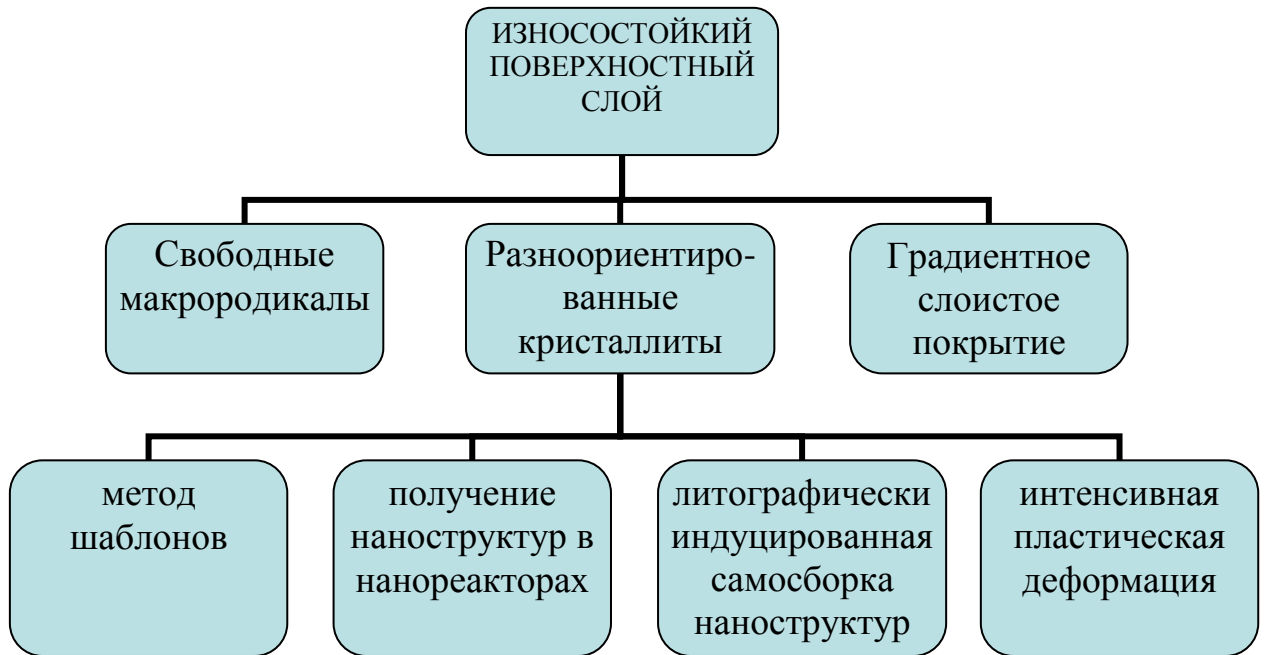


Рисунок 6.17 – Методы инженерии поверхности трибосопряжений многокомпонентного нагружения

Выводы

На основании результатов исследований износостойкости трибосопряжений, работающих в условиях многокомпонентного термодинамического контактного нагружения разработаны конструкторско-технологические мероприятия повышения их работоспособности.

1. Рекомендации по условиям эксплуатации узлов трения, работающих при многокомпонентном нагружении и различных температурах окружающей среды позволяют создать такие условия контактирования, когда формируется поверхностный слой повышенной износостойкости с неоднородным структурным состоянием. Обеспечение неоднородности структурного состояния возможно за счет исключения или уменьшения ударного нагружения в трибосопряжении, уменьшения амплитуды поперечных и продольных проскальзываний.

2. Предложены эффективные способы определения износостойкости деталей трибосопряжений, которые эксплуатируются при

многокомпонентном динамическом нагружении с наличием вибраций на основе оценки структурной однородности поверхностного слоя трибоспектральным методом и в результате анализа изменения величины или распределения работы выхода электрона по поверхности деталей.

3. На основе анализа условий сложного динамического нагружения и характера износа трибосопряжения типа «направляющая-цепь» установлена максимальное количество переточек режущих звеньев пильной цепи – до 7шт. Разработаны методики и предложены конструкции специальных инструментов стержневого и дискового типа для ускоренных испытаний износостойкости режущих звеньев пильной цепи, которые позволяют уменьшить время испытаний от 7 до 20 раз.

4. Исследования колебаний в процессе резания подтверждают наличие трехкомпонентного относительного движения и характер сложного контактного взаимодействия работы составляющих трибосопряжения «режущий инструмент - обрабатываемая деталь». Предложенная методика ускоренных испытаний деталей этих трибосопряжений дает возможность на порядок снизить длительность испытаний и уменьшить рассеивание полученных результатов в сравнении со стендовыми эквивалентными испытаниями. Предложен метод повышения износостойкости режущего инструмента за счет уменьшения как амплитудной, так и частотной составляющей вибрационного процесса путем использования вибродемпфирующих материалов, в процессе обработки труднообрабатываемых материалов.

5. Разработанный метод финишной обработки с применением гранулированного абразивного материала может быть рекомендован для чистового шлифования и полирования в связи с возможностью повышения эффективности обработки введением в зону резания свободных макрорадикалиев.

6. Перспективным направлением управления износостойкостью контактирующих деталей является варьирование условиями протекания

механохимических реакций в зоне контакта трибосопряжения при наличии свободных макрорадикалов. При этом расширяются технологические возможности обеспечения долговечности трибосопряжений как в процессе изготовления деталей машин и механизмов, так и при их эксплуатации.

7. Разработана концепция износостойкого материала в форме слоистой композиционной структуры. Предложена и обоснована физическая модель строения износостойкого материала слоистой структуры с градиентом свойств по глубине поверхностного слоя, состоящая из трех основных слоев различной текстуры при сочетании твердой и мягкой фазы для придания покрытию упругопластических свойств. Применение рекомендованного градиентно-слоистого покрытия позволит противостоять воздействию нагружения в виде удара с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При этом могут использоваться различные методы инженерии поверхности позволяющие получать поверхностный слой с разноориентированными кристаллитами.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Сформулированы основные принципы повышения долговечности трибосопряжений, эксплуатирующихся в условиях многокомпонентного динамического контактного воздействия и различных эксплуатационных температур. Показано, что оценка износостойкости трибосистем должна производиться на основе использования принципов структурно-энергетической адаптации материалов при трении с различными видами термомеханического нагружения, что позволяет сформулировать триботехнический принцип минимизации износа и износостойкой способности материалов, состоящий в создании таких условий контактирования, когда формируется поверхностный слой более прочный с повышенной неоднородностью по прочности и величине фрагментов структурным состоянием в пределах статистически различимой базовой длины.

2. Впервые обнаружено и исследовано явление взаимосвязи износостойкости и структурного состояния поверхности трибосопряжений при многокомпонентном термоконтактном воздействии, заключающейся в том, что повышенный износ происходит у деталей с однородным по величине фрагментов равнопрочным поверхностным слоем в пределах статистически различимой базовой длины, который характеризуется снижением прочности, более равномерной микрогеометрией поверхности, низкими значениями величины и разброса работы выхода электрона по поверхности.

3. Сформированная в процессе многокомпонентного термоконтактного трения дисперсная структура выполняет функцию диссипативной структуры в рамках синергетического подхода, которая самоорганизуется в условиях сложного динамического контактирования с получением износостойкого состояния. При этом пластически-деструкционный характер поведения металла при трении должен рассматриваться как физико-химический, т.е. процесс который

сопровождается комплексом структурных, физических и физико-химических изменений поверхностного слоя деформируемого металла.

4. Получили дальнейшее развитие принципы моделирования эквивалентных состояний трибологичных пар, которые эксплуатируются в особых условиях многокомпонентного термоконтактного воздействия. Эти принципы включают трибологические, кинематические, нагрузочные, металлофизические и физико-механические критерии. Предложена модель изнашивания, которая учитывает взаимное влияние факторов нагружения при их совместном действии и объясняет неравномерность износа деталей трибосопряжений за счет различной однородности поверхностного слоя и его прочности.

5. Разработанные методики исследований износостойкости деталей трибосопряжений при многокомпонентном нагружении позволяют исследовать:

- влияние на изнашивание факторов трехкомпонентного нагружения при их отдельном и совместном действии, создано соответствующее оборудование для ускоренных испытаний;

- износ режущего инструмента на основе действия закономерностей изнашивания трибосопряжений при трехкомпонентном нагружении, предложен метод повышения износостойкости режущего инструмента за счет уменьшения вибраций путем использования вибродемпфирующих материалов;

- износ поступательных плоскостных пар IV класса с периодическим ударным разрывом контакта (типа «направляющая-цепь»), предложены конструкции специальных инструментов для ускоренных испытаний износостойкости режущих звеньев пильной цепи, которые позволяют уменьшить время испытаний от 7 до 20 раз.

6. Проведенными исследованиями износостойкости установлено:

- сообщение образцам поперечных проскальзываний с амплитудой до 0,08 мм приводит к увеличению объемной интенсивности изнашивания

для сплава ВТ 20 в 1,38 раз, 60С2А - 1,7 раз, ХТН-61 - 2,6 раз по сравнению с объемной интенсивностью изнашивания при двухкомпонентном нагружении, что обусловлено разными химико-физическими свойствами сплавов и состояний поверхностных слоев со снижением прочности, повышением однородности поверхностного слоя (равнопрочности и размера фрагментов) в пределах статистически различимой базовой длины;

- при исследованных условиях изнашивания интенсивность изнашивания титанового сплава ВТ20 в 3,5 раза превышает этот показатель для марок ХТН-61 и 60С2А;

- увеличение амплитуды поперечных проскальзываний от 0 до 0,1мм в процессе трения с трехкомпонентным нагружением приводит к получению поверхностного слоя образцов сплава ХТН -61 со снижением РВЭ с 4300 до 4000 эВ и уменьшением разброса в значениях РВЭ;

- исследования изменения топографии поверхностей указывают на то, что трехкомпонентное нагружение приводит к снижению шероховатости поверхности в поперечном направлении от 1,3 до 10 раз; в продольном направлении - от 1,3 до 2 раз для всех исследованных материалов (60С2А, ХТН-61, ВТ20). При этом однородность топографии поверхностей повышается;

- чем более износостойким в условиях опытов является материал, тем меньше величина предельной амплитуды поперечных проскальзываний при трехкомпонентном нагружении, меньше влияние амплитуды поперечных проскальзываний и температуры окружающей среды на величину интенсивности изнашивания;

- износостойкость исследуемых материалов при рассматриваемых условиях трения и отрицательных температурах выше, чем при положительных температурах независимо от вида нагружения. При этом физико-химические свойства контактирующего материала определяют величину изменения интенсивности изнашивания.

7. Разработаны метод регулирования износостойкости трибосопряжений при многокомпонентном динамическом нагружении введением в зону контакта свободных макрорадикалов и модели изнашивания трибосопряжений с наличием в зоне контакта свободных макрорадикалов и СОЖ. Предложены научно обоснованные методы инженерии поверхности для управления износостойкостью трибосопряжений при многокомпонентном термомеханическом нагружении путем введения в зону контакта свободных макрорадикалов, создания поверхностного слоя с разнориентированными кристаллитами, градиентным слоистым покрытием.

8. Предложена концепция изменения эффективности резания металлов на основе оценки износостойкости трибосистемы «инструмент-деталь», принципов структурно-энергетической адаптации материалов при трении в условиях многокомпонентного нагружения на примере использования гранулированного абразивного материала. Усовершенствован специальный гранулированный абразивный материал, который позволяет осуществлять регулируемое введение свободных макрорадикалов в зону контакта шлифовального инструмента и заготовки в результате деструкции полимерной связки при резании, что позволяет осуществлять различную трансформацию состояния поверхностного слоя. Проведена трибодиагностика роли свободных макрорадикалов в процессах обработки гранулированным абразивным материалом.

9. Предложены эффективные способы определения износостойкости деталей трибосопряжений, которые эксплуатируются при многокомпонентном динамическом нагружении на основе оценки наноструктурной однородности поверхностного слоя трибоспектральным методом и в результате анализа изменения величины или распределения работы выхода электрона по поверхности деталей.

10. Научно-теоретические результаты работы по уменьшению напряженного состояния поверхностных слоев конструкторскими методами (уменьшения ударной и нормальной нагрузки, уменьшения амплитуды

поперечных и продольных проскальзываний) внедрены в производственных условиях, чем подтверждена эффективность научных основ получения износостойкого ультрадисперсного поверхностного слоя деталей трибосопряжений в зависимости от особенностей многокомпонентного термоконтактного воздействия. На основе использования соответствующих технологических рекомендаций (создание поверхностного слоя с повышенным неоднородным структурным состоянием, обеспечение повышенной равновесной шероховатости поверхности и отрицательных температур окружающей среды в зоне контакта) отмечено повышение износостойкости трибосопряжений на 30% с обеспечением социального, технического, организационного и экономического эффекта.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Жарков, Г.И. Вибрации при обработке лезвийным инструментом /Г.И. Жарков; Ленинград: Машиностроение Ленингр. Отделение, 1986. – 184с.
2. К.М. Шпилев, А.Б. Круглов Самолет и природно-климатические условия. Изд. Мин. обороны СССР – Москва 1972, 176с
3. Ивченко Л.И. Процессы контактного взаимодействия в трибосопряжениях и износостойкость жаропрочных материалов в экстремальных условиях: дис. д-ра. техн. наук. – Хмельницкий, 1999, 381с.
4. Ивченко Л.И. Моделирование процессов контактного взаимодействия деталей, работающих в экстремальных условиях /Л.И. Ивченко, С.Г. Саксонов //Нові матеріали і технології в машинобудуванні.- ЗДТУ, Запоріжжя. – 1997. - №1-2, С.102-104.
5. Крагельский И.В. Трение и износ /И.В. Крагельский - М.: Машиностроение, 1968.-480 с.
6. Несущая способность лопаток газовых турбин при нестационарном тепловом и силовом воздействии /Третьяченко Г.Н., Кравчук С.В., Куриат Р.И., Волощенко А.П. – К.: Наукова думка, 1975.- 295с.
7. Кольцун Ю.И. Влияние частоты и нагрузки на волновые деформационные процессы при многоциклового усталости /Ю.И. Кольцун , Б.Е. Мельников, Т.А. Хибник, А.А. Прохоров //Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. -2009. - №3(19), С.274-282.
8. Любарский И.М. Теория смазочного действия и новые материалы.-М.-Наука,1965.- 235с.
9. Сулима А.М., Серебрянников Г.З. Технологические пути повышения надежности авиадвигателей //Тр.ин-та /Московский авиационный институт.- 1967.- Вып.193.- С.141-148
10. Алексеев Ю.Н. К вопросу о влиянии мгновенного изменения нормального давления на величину силы контактного трения /Ю.Н. Алексеев,

Г.В. Гонский, Д.Л. Лучика. – Самолетостроение и техника воздушного флота. – 1972. – Вып. 29. – С. 99-104.

11. Рыжов Э.В. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках /Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1988. – 250 с.

12. Витман Ф.Ф. Сопротивление деформированию металлов при скоростях 10^{-6} — 10^2 м/с. /Ф.Ф. Витман Н.А. Златин //Журн. техн. физики, 1949, 19, Вып. 3, с. 315—326.

13. Витман Ф.Ф. Сопротивление деформированию металлов при скоростях 10^{-6} - 10^2 м/с /Ф.Ф. Витман, Н.А. Златин //Журн. техн. физики.- 1950.- Вып. 10.- с. 1267—1272.

14. Витман Ф.Ф.Сопротивление деформированию металлов при скоростях 10^{-6} — 10^2 м/с. /Ф.Ф. Витман, Н.А. Златин, Б.С. Иоффе //Журн. техн. физики.- 1949.- Вып. 3.- с. 300—314.

15. Кеннеди А.Д. Ползучесть и усталость в металлах.—М.: Металлургиздат, 1965.— 312 с.

16. Григорьев Р.С. Хладостойкость сталей при статическом и циклическом нагружениях /Р.С. Григорьев, В.П. Ларионов, Г.А. Новиков, П.Г. Яковлев.— М.: Наука, 1969.-196 с.

17 Гонский Г. В. О влиянии пульсирующего нагружения на величину силы трения /Г.В. Гонский, Н. А.Луника //Самолетостроение и техника воздушного флота.- 1972.- Вып. 29.- с. 105—108.

18. Gaylord E, W. Coefficient of static friction under static and dynamic applied loads /E. W. Gaylord., H. Shu //Wear.-1961, 4, N5, p. 401— 412

19 Ко Р. L. Wear of zirconium alloys due to fretting and periodic impacting. //Wear, 1979, 55, N 2.- p. 369—384.

20. Голего Н. Л. Фреттинг-коррозия /Н. Л. Голего, А. Я. Алябьев, В. В. Шевеля — Киев: Техніка, 1974.— 270 с.

21. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия.— Л.: Машиностроение, 1976— 271 с.

22. Евдокимов В. Д. Реверсивность трения и качество машин.-К.: Техніка, 1977—147 с.
23. Евдокимов В. Д. Экзоэлектронная эмиссия при трении /В. Д. Евдокимов, Ю. И. Семов —М.: Наука, 1973.—182 с
24. Rice S. L. The role of microstructure in the impact wear of two aluminium alloys //Wear, 1979, 54, N2, p. 291—301.
25. Rice S. L. Variation in wear resistance due to microstructural condition in high strength steel under repetitive impact //Tribology, 1979, 12, N 1, p. 25—29.
26. Нажесткин Б. П. Прогнозирование долговечности зубчатых механизмов, работающих с пластическим смазочным материалом /Б. П. Нажесткин, О. Г. Ромашкин, В. А. Беженарь //Трение и износ ,1991 г., № 1, с.72-80
27. Памфилов Э. А. Метод испытания на изнашивание при ударе в условиях низких температур /Э. А. Памфилов, С. С. Грядунцов //Проблемы трения и изнашивания- Сб. научн. работ.- К.: Техника, 1986, С. 23-28.
28. Прочность металлов и элементов конструкций в экстремальных условиях. Под ред. Г.С. Писаренко Киев, «Наукова думка» 1980 Т1 С.532
29. Макаров А.В., Куренных Т.Е. Низкотемпературное модифицирование нанокристаллического поверхностного слоя высокоуглеродистой стали при трении в жидком азоте //Материалы VI Российской научно-технической конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (электронный ресурс), Екатеринбург, 24-28 мая, Электрон. оптич. диск, Статья № 153. Екатеринбург, 2010. 15 с.
30. Вигли Д.А. Механические свойства материалов при низких температурах- М.: Мир, 1974.-374с.
31. Веркин Б.И., Любарский И.М., Гринберг Н.М., Яковенко Л.Ф. Проблема долговечности металлов при низких температурах //Космич. Исслед. на Украине .- 1973.- Вып.1.- С.14-22

32. Прочность материалов и конструкций при криогенных температурах /Стрижало В.А., Филин Н.В., Куранов Б.А. и др. – Киев: Наукова думка, 1988.- 240с.

33. Александр Сафонов, Леонид Сафонов Прямоугольные электрические соединители. Фреттинг-коррозия в электрических контактах //Технологии в электронной промышленности.– 2009.– № 3.– с.48-54.

34. Дроздов, Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях /Ю.Н. Дроздов, И.Г. Павлов, В.Н. Пучков. - М.: Машиностроение, 1986.- 224 с.

35. Кулеба В.И. Любарский И.М. Исследование процесса трения и изнашивания материалов в среде жидкого азота.- «Проблемы трения и изнашивания».- 1976.– №9. – с.71-75.

36. Трение, изнашивание и смазка : Справочник. В 2-х кн. /Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина.- М.: Машиностроение, - Кн. 1. 1978.- 400с.

37. Самсонов Г.В., Запорожец А.А. Развитие электронных представлений о процессе изнашивания переходных металлов в среде жидкого азота – «Физико-химическая механика материалов» 1970, №6, с.43-48.

38. Преснякова Г.Н. Трение и износ при низких температурах /Г.Н. Преснякова, И.М. Любарский, В.Ф. Удовенко, Е.И. Марьяхина, С.С. Черняк //Металловедение и термическая обработка металлов. - 1971, №3, с.9 – 12.

39.Филоненко С.Н. Особенности низкотемпературного течения труднообрабатываемых материалов /С.Н. Филоненко, П.Т. Слободяник //Современная обработка металлов и неметаллов резанием: материалы семинара. – М., 1973, С.42-46.

40. 03.03-48.57Д. Связь дислокационных механизмов упрочнения с показателями прочности, трещиностойкости и износостойкости углеродистых сталей. канд. техн. наук /Буторин Д. Е. - Новосиб. гос. техн. ун-т, Новосибирск, 2002. - 19 с. : ил. - Рус.

41. Тарасов Г.Ф. Термическая обработка сталей как фактор повышения их износостойкости при низких температурах /Г.Ф.Тарасов, А.И. Горбуля

//Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Академика М.Ф. Решетнева. - 2005, №3, с.253-257

42. Любарский И.М. Теория смазочного действия и новые материалы – М.: Наука, 1965. – 235с.

43. Костецкий Б.И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания //Трение и износ. – 1980. – Т.1. - №4. – С.622-638.

44. Морозов Е.М. Контактные задачи механики разрушения /Е.М. Морозов, М.В. Зернин.– М.: Машиностроение, 1999.– 544 с

45. Рыбакова Л.М. Структура и износостойкость металла /Л.М. Рыбакова, Л.И. Куксенова. – М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.

46. Гарбар И.И. Образование продуктов изнашивания при трении скольжения /И.И. Гарбар, В.П. Северденко, Ю.Н. Скорынин //ДАН СССР.– 1975.– Т. 225, №3.–С.82-85.

47. Miller K.J. The behaviour of shot fatigue cracks and their initiation /K.J. Miller //Faticue on Eng. Mat. and Struct. Part 1. A revier of the two recent books.– 1987.–Vol.10, N3.–P.75-91.

48. Колесников Ю.В. Механика контактного разрушения /Ю.В. Колесников, Е.М. Морозов. – М.: Наука, 1988.– 224с.

49. Панасюк В.В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках /В.В. Панасюк, М.П. Саврук, А.П. Дацышин. – К.: Наукова думка, 1976.– 444с.

50. Сосновский Л.А. Контактно-механическая усталость: основные закономерности (обобщающая статья) /Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов, В.А. Шуринов //Заводская лаборатория. – 1992. – №11. – С.44-61.

51. Чатынян Л.А. Влияние химического и фазового состава на износостойкость образцов из никелевого сплава при высоких температурах /Л.А. Чатынян, Н.Ф. Лашко, Е.В. Бабурина //Машиностроение. – 1972.- № 2.- С.33-38.

52. Костецкий Б.И. Сопротивление изнашиванию деталей машин – М.: Машгиз, 1950. – 168с.
53. Ивахненко А.Г. Принятие решений на основе самоорганизации – М.: Сов. Радио, 1976.- 280с.
54. Назаренко П.В. Трение, смазка, износ деталей машин /П.В.Назаренко, Б.И.Костецкий //Тр. ин-та Киевский ин-т гражд. возд. флотилии. – К.: Редиздат, 1964.- Вып.4. – 178с.
55. Костецкий Б.И. Износостойкость и антифрикционность деталей машин /Б.И. Костецкий, И.Г.Носовский . – К.: Техника, 1965.- 206с.
56. Костецкий Б.И. Сопротивление изнашиванию деталей машин – М.: Машгиз, 1959. – 478с.
57. Sibley L.V., Allen C.M. //Wear. – 1962. – Vol.4,5. – P. 312-321.
58. Носовский И.Г. Трение, смазка, износ деталей машин //Тр. ин-та Киевский ин-т гражд. возд. флота. – К.: Редиздат, 1961.- Вып.11. – С. 174-179.
59. Peterson M.V., Florek I.I., Lee R.E. //ASLE Trans. – 1960. –Vol.3.- №1. – P.102-112.
60. Чатынян Л.А. Влияние структуры и фазового состава на износостойкость никелевого сплава /Л.А. Чатынян, Н.Ф. Лашко //Металловедение и термич. обработка металлов.- 1962. - №7.- С.20-23.
61. Семенов А.П. Трение и контактное взаимодействие при высоких температурах //Износостойкость. – М.: Наука,1975. –С.37-51.
62. Канарчук В.Е. Долговечность и износ двигателей при динамических режимах работы – К.: Наукова думка, 1978. – 256с.
63. Канарчук В.Е. Адаптация материалов к динамическим воздействиям – К.: Наукова думка, 1986. – 264с.
64. Лапшин С.А. Роль динамических нагрузок в развитии процесса изнашивания //Zesz. nauk. AGH im.Stanislawa Staszica. Mech. – 1990.- №9, №2. – P.53-59.
- 65.Костецкий Б.И. Исследование общих закономерностей поверхностного разрушения с помощью метода контактного

електросопротивлення /Б.И. Костецкий, Б.В. Гупка, А.Р. Мшенеш, А.И. Гупка //Проблемы трения и изнашивания. – 1987. – Вып. № 31. – С. 19-22.

66. Пристрій для дослідження тертя: пат. 15276 Україна: МПК G01N3/56 /Івченко Л.Й., Замковий В.Є., Афонін В.О., Циганов В.В.; заявник та патентовласник Запорізький нац.-техн. унів.- №и200600110; заявл. 03.01.06; опубл. 15.06.06, Бюл.№6. – 3с.

67. Пат. 39986 Україна, МПК G01N3/56. Пристрій для дослідження тертя /Івченко Л.Й., Циганов В.В. Чорний В.И.; Запорізький національний технічний університет. - №и200810724; Заявл.2008.28.08; Опубл.2009.25.03.

68. Пат. 53587 Україна, МПК G01N3/56. Пристрій для дослідження тертя /Івченко Л.Й., Циганов В.В.; заявник та патентовласник Запорізький нац.-техн. унів. – № и201004585; заявл. 19.04.2010; опубл. 11.10.2010, Бюл.№19. – 2 с.

69. ІвченкоЛ.Й. Метод трибологічних випробувань за умов циклічного силового та температурного навантаження /Л.Й. Івченко, А.Г. Андрієнко //Металознавство та обробка металів, 1993, №3.-С.62-65.

70. Касандрова О.Н. Обработка результатов измерений /О.Н. Касандрова, В.В. Лебедев.- М.: 1970.-275с.

71. Запорожец, В.В. Динамические характеристики прочности поверхностных слоев и их оценка /В.В. Запорожец //Трение и износ.-1980.- Т.1, №4. - С.602-609.

72. Игнатович, С.Р. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклических нагружениях методами наноиндентирования и наносклерометрии /С.Р.Игнатович, И.М. Закиев, Д.И. Борисов //Проблемы прочности.- 2006. - N4.- С. 132-139.

73. Самсонов, Г.В. Антифрикционные характеристики и электронное строение металлов /Г.В. Самсонов, А.А. Запорожец – В кн.: Проблемы трения и изнашивания. – Киев: Техника, 1971. – №1 – С.48.

74. Марков, А.А. Измерение работы выхода электрона при трении /А.А. Марков – В кн.: Электрические явления при трении, резании и смазке твердых тел. – М.: Наука, 1973. – С.28.
75. Жарин А.Л. Влияние контактных деформаций на величину работы выхода электрона поверхностей /А.Л. Жарин, Е.И. Фишбейн, Н.А. Шипица //Трение и износ. – 1995. – 7, № 3. – С. 488-504
76. Задумкин, С.Н. Работа выхода и поверхностная энергия металлов /С.Н. Задумкин, В.Г. Егиев //Физика металлов и металловедение. – 1966. – Т. 1, № 2. – С. 121-122
77. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твёрдого тела: в 2 т. /Н.Ашкрофт, Н.Мермин. - М.: Мир, 1979
78. Вудраф, Д. Современные методы исследования поверхности Пер. с англ. /Д. Вудраф, Т. Делчар. – М.: Мир, 1989. – 564 с.
79. Игнатович, С.Р. Контроль качества поверхности с использованием интерференционного профилометра /С.Р.Игнатович, И.М. Закиев //Винахідник и раціоналізатор. - 2007. - №6. - С. 8-11.
80. Гранульований абразивний матеріал: пат. 60756 Україна: МПК В24D 3/00 /Цыганов В.В.; заявник та патентовласник Запорізький нац.-техн. унів.- №и2010 15127; заявл. 15.12.10; опубл. 25.06.11, Бюл.№12. – 2с
81. Цыганов В.В. Трибодиагностика качества поверхности нержавеющей сталей при отделочной абразивной обработке: дис. канд. техн. наук./ В.В.Цыганов. – Киев, 1989. –152с.
82. Спосіб виготовлення гранульованого абразивного матеріалу: пат. 60755 Україна: МПК С08J 5/14, В24D 3/00 /Цыганов В.В.; заявник та патентовласник Запорізький нац.-техн. унів.- №и2010 15126; заявл. 15.12.10; опубл. 25.06.11, Бюл.№12. – 3с.
83. Симс, И. Жаропрочные сплавы / И. Симс, В. Хагель. – М.: Metallurgia, 1976. – 568 с.

84. Wang, Dao-Juan. Effect of microstructure and properties on the high temperature wear characteristics of 3Cr2W8V (H21) steel /Dao-Juan Wang, De-Lin Sku, Xin-Cheng Gua. – Wear. – 1987. – P. 101-117.
85. Stott, F.N. The influence of oxides on the friction and wear of alloys /F.N.Stott, G.C. Wood. – Tribology Inst. – 1978. – № 4. – P. 211-218.
86. Iwabuchi, A. Fretting wear of Inconel 625 at high temperature and high L vacuum /A. Iwabuchi. – Wear. – 1985. – № 1-3. – P. 163-175.
87. Ивченко, Л.И. Ускоренные испытания сложнонагруженных деталей трибосопряжений /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов, В.И. Черный //Вісник двигунобудування. – 2009.- №1.- С.150-154.
88. Ивченко Л.И. Особенности изнашивания трибосопряжений в условиях трехмерного нагружения /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов, И.М. Закиев //Трение и износ. – 2011. – Том 32, № 1. С. 500-509.
89. Чатынян, Л.А. Новые материалы и покрытия для работы с трением в вакууме при высоких температурах /Л.А. Чатынян // Трение и изнашивание при высоких температурах. – М.: Наука, 1973. – С. 44-48.
90. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел /В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский.- М.: Наука, 1974.- 560 с.
91. Белякина, А.В. Взаимосвязь структурных и механических характеристик /А.В. Белякина, Ю.И. Созин: кн. //Физика прочности, пластичности металлов и электродинамические явления в веществе.- Куйбышев: КуАИ, 1977.- Вып.5.- 90 с.
92. Petrova A.M., Polotai V.V. Effect of the chromium contents on the tribotechnical characteristics of titanium – chromium alloys, Powder Metallurgy, 1987, № 5. 51 – 56.
93. Petrova A.M., Shtern M.B. The influence of Nanostructural oxide films on wear – resistance of titanium materials, Proctding of the NATO Advanced Research Workhop on Using Carbon Nanomaterials in Clean – Energy Hydrogen Systems, 2008, p. 851 – 856.

94. Панин А.В., Панин В.Е., Почивалов Ю.И. и др. Особенности локализации деформации и механического поведения титана ВТ1-0 в различных структурных состояниях // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 4. – С. 73–84.

95. Панин В.Е., Панин Л.Е. Масштабные уровни гомеостаза в деформируемом твердом теле // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – № 4. – С. 5–23.

96. Дыбленко Ю.М. Исследование гидроабразивного износа образцов из титанового сплава ВТ-6 с наноструктурированными защитными покрытиями /Ю.М. Дыбленко, К.С. Силиванов, Р.Р. Валиев, И.В. Скрыбин //Вестник УГАТУ – Уфа: УГАТУ, 2011. – Т.15, №1. С.83-86.

97. Івченко, Л.Й. Стан поверхневого шару деталей трибоз'єднань за різних схем контактування /Л.Й. Івченко, В.В Циганов, С.В. Лоскутов, С.В. Сейдаметов: сб. науч. тр. //Проблеми тертя та зношування.- Київ: НАУ, 2008.- Вип.49, том 1.- С.72-83.

98. Алёхин, В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоёв материалов / В.П. Алёхин. – М.: Наука, 1983. – 280 с.

99. Лоскутов, С.В. Влияние механических обработок металлической поверхности на формирование энергетического рельефа / С.В. Лоскутов // Вісник двигунобудування. – Запоріжжя: ОАО „Мотор січ”, 2006. – №2. – С.109-112.

100. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ /И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977.- 526 с.

101. Протасов, Б.В. Явление оптимизации поверхностей трения /Б.В.Протасов: сб. науч. тр. //Надежность приборов точной механики.- Саратов: СПИ, 1972.- Вып.55.- 24 с.

102. Костецкий, Б.И. Структура и поверхностная прочность материалов при трении / Б.И.Костецкий //Проблемы прочности.- 1981. №3. – С. 90-93

103. Костецкий, Б.И. Качество поверхности и трение в машинах / Б.И. Костецкий, Н.Ф. Колесниченко. – Киев: Техніка, 1969. – 145с.
104. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. - М.: Машиностроение, 1988. – 240с.
105. Гарбар, И.И. Исследования формирования структуры металла при трении скольжения под воздействием различных нагрузок: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.05.78 /И.И. Гарбар. – Киев, 1978.- 20с.
106. Арышенский, Ю.М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.
107. Дроздов, Ю.Н. Ключевые инварианты в расчетах интенсивности изнашивания при трении /Ю.Н. Дроздов //Машиноведение.– 1980. –№2. – С.93-99.
108. Hirth I.P. and Rigney D.A. The application of dislocation concepts in friction and wear. -Dislocation in Solids. Edited by F.R.N. Nabarro, 1983, v. 6, chapter 25, p. 3 – 54.
109. Heilmann I., Clark W.A., Rigney D.A. Orientation determination of subsurface cells generated by sliding. – Acta Metallurgica, 1983, v. 31, N 8, p. 1293 – 1305.
110. Коршунов Л.Г., Черненко Н.Л. Структурные превращения при трении и износостойкость сплавов системы Fe-Mn, содержащих ϵ -мартенсит. - ФММ, 1987, Т. 63, Вып. 2, с. 319 – 328.
111. Коршунов Л.Г., Макаров А.В., Черненко Н.Л., Насонов С.П. Структура, прочность и теплостойкость мартенсита стали У8, деформированной трением. – ФММ, 1996, т. 82, вып. 2, с. 38 – 48
112. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. - М.: Мир, 1979. -300 с.

113.Трефилов, В.И. Физические основы прочности тугоплавких металлов / В.И. Трефилов, Ю.В.Мильман, С.А.Фирстов. – Киев: Наукова думка, 1975.- 315с.

114.Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.: ил

115. Лихачев В.А., Панин В.Е., Зосимчук Е.Э. и др. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации. - Киев: Наукова думка, 1989. -320 с.

116.Хоукс, Н. Поведение волн деформации в штангах станков ударного бурения /Н. Хоукс, Т.К. Чакраварти // Разрушение и механика горных пород.- М.: Госгортехиздат, 1962. – 169с.

117.Виноградов, В.Н. Изнашивание при ударе / В.Н.Виноградов, Г.М.Сорокин, А.Ю. Албагачиев.- М.: Машиностроение, 1982.- 192с.

118.Rice, S.L. A review of wear mechanisms and related topics / S.L.Rice // Proc. Int. Conf on the Fundamentals of Tribology. 1978. Massachusetts Institute of Technology Press. – Cambridge, MA, 1978. – P.469-476.

119.Бибихов Ю.В. Волны солитонного типа в одномерных дискретных системах свободных от потенциала Пайерлса-Набарро: автореф. дис. ...канд. физ.-мет. наук: 01.04.07 /Ю.В. Бибихов. – Барнаул, 2010.- 23с

120. Артемьев В.А. Формирование, затухание и взаимодействие ударного импульса конечной протяженности со свободной поверхностью упругопластического тела /В.А.Артемьев, В.А.Баскаков, Е.В.Палканов, А.Е.Чернов //Вестник ВГУ, серия: Физика, математика. – 2004. – № 2. – С. 103-116

121.Мишин В.А. Фазовый состав поверхностей трения при точении стали 20ХН3А резцом из Т5К10 с применением специальных присадок к СОЖ /В.А. Мишин, Л.А. Листопад //Теория трения, смазки и обрабатываемости материалов. - Чебоксары, 1984. – С.47 - 51

122. Роль сил трения в износе режущих инструментов /под ред. А.Д.Макарова; Труды УАИ.- Уфа, 1974.- 104с.
123. Щепов В.Б. Исследование трибосистем «обрабатываемое изделие – режущий инструмент – технологическая среда» /В.Б. Щепов, Н.Б. Мельникова //Теория и практика создания, испытания и эксплуатации триботехнических систем: матер. науч.-практ. конф.,(Андропов, 28-30 мая 1986) ; отв. ред. Ю.П.Замятина. – Москва: КМС ВСНТО, 1986. – 248с.
124. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов /А.Д.Макаров. – М.: Машиностроение, 1966. – 264с.
125. Розенберг А.М. Элементы теории процесса резания металлов /А.М.Розенберг, А.Н. Яремин. – М.: Машгиз, 1956. – 320с.
126. Андреев Ф.Ю. Сопротивление деформированию металлов при скоростях 10^{-6} — 10^2 м/с. /Ф.Ю. Андреев //Журн. техн. физики. - 1949, - №3, - с.56-58.
127. Гороховский Г.А. Полимеры в технологии обработки металлов. – К.: Наукова думка, 1975. – 224 с.
128. Фрейдберг В.З. Шлифование абразивными лентами //Резание металлов, станки и инструмент. – М., 1972. – Т. 2. – С. 6-71.
129. Пат. 4132533 United States, B24D 3/32. Process for the production of spherical bonded abrasive from abrasive grain /Lohmer; Wilfried (Solingen, DE1), Schotten; Josef (Dusseldorf-Benrath, DE1); assignee the Carborundum Company (Niagara Falls, NY); appl. №05/852651, filed 18.11.77; published 2.01.79.
130. Пат. 2516008 ФРГ, B24D 3/00, B24D 11/00. Kugelförmiger Schleifkörper aus Schleifkörnern und Verfahren zu seiner Herstellung / Löhmer, Wilfried, 5650 Solingen; Schotten, Josef, Dipl.-Chem. Dr., 4000 Düsseldorf; anmelder Carborundum-Werke GmbH, 4000 Düsseldorf-Reisholz; anmeldetag 12.04.75, offenlegungstag 21.10.76.
131. Пат. 2608273 ФРГ, B24D 11/00. Blatt- oder bandförmiges Schleifwerkzeug, Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen des Schleifwerkzeugs / Löhmer, Wilfried, 5650 Solingen; anmelder Carborundum-Werke GmbH, 4000

Düsseldorf; anmeldetag 28.02.76, offenlegungstag 8.09.76, bekanntmachungstag 22.12.77

132. Спосіб виготовлення гранульованого абразивного матеріалу: пат. 70445 Україна: МПК C08J 5/14, B24D 3/00 /Циганов В.В.; заявник та патентовласник Запорізький нац.-техн. унів.- №и2011 14365; заявл. 05.12.11; опубл. 11.06.12, Бюл.№11. – 3с.

133. Воробьев, В.А. Технология полимеров: учебник для вузов /В.А. Воробьев, Р.А. Андрианов. – 2-е изд., перераб. – М. Высшая школа, 1980. – 303 с.: ил.

134. Гармонов, И.В. Синтетический каучук /И.В.Гармонов. – Л.: – Химия, 1976. – 753 с

135. Семенычева, Л.Л. Контролируемый синтез полимеров на основе виниловых мономеров в присутствии добавок, образующих стабильные радикалы непосредственно в полимеризующейся массе: автореф. дис....д-ра хим. наук: 02.00.06, 02.00.03 /Л.Л. Семенычева; [Нижегор. гос. ун-т].- Н.,2008. - 40с.

136. Черникова, Е.В. Псевдоживая радикальная гомо- и сополимеризация по механизму обратимой передачи цепи: автореф. дис....д-ра хим. наук: 02.00.06 /Е.В.Черникова; [Моск. гос. ун-т].-М., 2010.- 47с.

137. Moustafa, A.B. Polymerization of Methyl Methacrylate in water in Presence of the Metal Oxides TiO_2 and Cu_2O /A.B. Moustafa, N.A.Ghanem, A.A. ABD-El-Nakim //Journal of applied polymer science.- 1976, vol. 20, 2643-2652.

138. Булгакова, С.А. Радикальная (со)полимеризация виниловых мономеров в присутствии кремнийорганических гидридов и свойства (со)полимеров: автореф. дис....д-ра хим. наук: 02.00.06 /С.А. Булгакова; [Нижегор. гос. ун-т].- Н.,2008. - 44с.

139. Баталов, Э.М. Радикальная полимеризация виниловых мономеров в присутствии сульфоксидов и их комплексов с солями металлов: автореф. дис....д-ра хим. наук: 02.00.06 /Э.М. Баталов; [Инс-т орг. химии УНЦ РАН].- Уфа, 2008. - 47с.

140. Пат. 2029943 Российская Федерация, МКГ01N21/67 Способ определения абразивной износостойкости гетерогенных материалов /Твердохлебова С.В.; заявитель Днепроп. Гос. ун-т им.300-летия воссоед. Украины с Россией (UA); патентообладатель Твердохлебова С.В. – № 4937769/25; заявл. 08.04.1991; опубл. 27.02.1995.

141. Пат. 2069343 Российская Федерация, МКГ01N3/58 Способ определения износостойкости стали и сплавов /Горкунов Э.С., Макаров А.В., Коршунов Л.Г., Тартачная М.В., Сомова В.М; заявитель и патентообладатель Ин-т физики металлов Уральского отд. РАН. – № 5058965/28; заявл.18.08.1992; опубл. 20.11.1996.

142. Пат. 13900 Україна, МПК G01N 3/56. Спосіб прогнозування зносостійкості металевих деталей /Лоскутов С.В., Манько В.К.; заявник та патентовласник Запорізький нац.-техн. унів.- опубл. 17.04.2006, Бюл.№4. – 3с.

143. Пат. 13900 Україна, МПК G01N 3/56. Спосіб визначення зносостійкості сталей і сплавів /Івченко Л.Й., Циганов В.В.; заявник та патентовласник Запорізький нац.-техн. унів.- №u2011 14367 заявл.05.12.2011; опубл. 11.06.2012, Бюл.№11. – 2с.

144. Пат. 75194 Україна, МПК G01N 3/58. Спосіб визначення зносостійкості сталей і сплавів /Івченко Л.Й., Циганов В.В., Лоскутов С.В.; заявник та патентовласник Запорізький нац.-техн. унів.- №u2012 05338 заявл.28.04.2012; опубл. 26.11.2012, Бюл.№22. – 4с.

145. Амалицкий В.В., Комаров Г.А. Монтаж и эксплуатация деревообрабатывающего оборудования: учебник для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лесная пром-сть, 1989. – 400 с.

146. Башков, В.М. Испытания режущего инструмента на стойкость /В. М. Башков, П. Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1985.—136 с.

147. Пат. 31816 Україна, МПК В23С 5/00. Інструмент для прискорених випробувань різальних ланок пиляльного ланцюга на зносостійкість /Івченко Л.Й., Циганов В.В., Чорний В.І, Штанкевич В.С., Докутович А.М.; заявник та

патентовласник Запорізький нац.-техн. унів.- №и200713247; заявл. 28.11.07; опубл. 25.04.08, Бюл.№8. – 3с.

148. Пат. 35872 Україна, МПК В23В 27/00. Інструмент для прискорених випробувань різальних ланок пиляльного ланцюга на зносостійкість /Лвщенко Л.Й., Циганов В.В., Чорний В.І, Штанкевич В.С., Докутович А.М.; заявник та патентовласник Запорізький нац.-техн. унів.- №и200805119; заявл. 21.04.08; опубл. 10.10.08, Бюл.№19. – 3с.

149. Макаров, А.Д. Оптимизация процесса резания /А.Д.Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. -278 с.

150. Жарков, И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом /И.Г. Жарков, – Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с.

151. Степчин, Я.А. Раціональне використання ресурса стійкості токарних різців в умовах віброактивності технологічної обробної системи: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01 /Я.А.Степчин; [Нац. техн. ун-т України]. Київ, 2006. - 20 с.

152. Пат. 33682 Україна, МПК В23В 27/00, В23В 29/00. Пристрій для кріплення різального інструменту /Лвщенко Л.Й., Циганов В.В., Глушко П.В., Дубров Г.Л.; заявник та патентовласник Запорізький держ.-техн. унів. - № 200801592; заявл. 07.02.08; опубл.10.07.08, Бюл.№12.- 2с.

153. Писаренко, Г.С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов /Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев; - К.: Наукова думка, 1971. - 374с.

154. Спосіб фінішної обробки: пат. 62893 Україна: МПК В24В 1/00 /Циганов В.В.; заявник та патентовласник Запорізький нац.-техн. унів.- №и2010 15744; заявл. 27.12.10; опубл. 26.09.11, Бюл.№18. – 2с.

155. Гороховский Г.А. Поверхностная активация полимеров и ее влияние на износ металлов //Применение материалов на основе пластмасс для опор скольжения и уплотнений в машинах: сб. науч. тр. – М.: Наука, 1968. – С. 30-33.

156. Запорожец В.В., Варюхно В.В. Трибологическая идентификация тонкой структуры поверхностного слоя //Проблемы трения и изнашивания: науч.-техн. сб. – 1984. – Вып. 25. – С. 26-29.

157. А.с. 1714473 СССР, МКИ С 01 21/55. Способ определения отражательной способности поверхности материалов /В.В. Запорожец, В.В. Цыганов, В.В. Варюхно (СССР); заявитель Киевский ин-т инж. гражд. ав. – № 4353757/40-25/000922; заявл. 04.01.88; опубл. 23.02.92, Бюл. № 7. – 2 с.

158. Запорожец, В.В. Однородность состояния поверхностного слоя нержавеющей стали после ленточной абразивной обработки / В.В. Запорожец, В.В. Цыганов //Проблемы трения и изнашивания: науч.-техн. сб. – 1987. – Вып. 32. – С. 43-47.

159. Цыганов, В.В. Моделирование трибопроцессов в зоне контакта инструмента и заготовки при обработке металлов резанием /В.В. Цыганов, Л.И. Ивченко //Оптимизация производственных процессов.- Севастополь: СевГТУ, 2010.- №12. С. 62-65.

160. Александров, И. А. Процессы образования металлоорганических комплексов при импульсном механическом воздействии: дисс ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.17.- Москва, 2001.- 118 с.

161. Бутягин, П.Ю. Кинетика и природа механохимических реакций // Успехи химии.- 1971. – Т. XL, Вып. 11.- С. 1935-1959.

162. Никитин, Ю.А. Теоретические и экспериментальные основы микромеханических испытаний материалов сверхнизкой плотности (часть 2) /Ю.А. Никитин, В.В. Запорожец //Технологические системы.- 2010.- №4.- С. 63-69.

163. Запорожец, В.В. Деформационно-спектральный метод исследования однородности поверхностного слоя металлов /В.В. Запорожец, Х.Б. Кордонский, О.В. Оре //Надежность и долговечность машин и сооружений.-1990. - №17.- С. 57-65.

164. А. с. 1793294 СССР, МКИЗ G01n 3/42. Прибор для испытаний материалов на микротвердость /В.В. Запорожец, И.М. Закиев, Ю.А. Никитин (СССР). – 1993. – Бюл. №5. – 3с.

165. А.с. 676908 СССР, МКИЗ G01 3/46. Прибор для измерения твердости царапанием / Н.Л. Голего, В.В. Запорожец, В.А. Бердинских, Е.Г. Исаак (СССР). – Оpubл. 30.07.79.– Бюл. № 28. – 3с.

166. Бердинских, В.А. Стохастическое решение обратной задачи трибометрии / В.А. Бердинских, В.В. Запорожец //Трение и износ. – 1980.– Т.1, №6.– С. 976–997.

167. Запорожец, В.В. Статистические характеристики элементарных процессов трения качения. Сообщ. 1 / В.В. Запорожец, С.В. Гордеев //Трение и износ.– 1986.– Т. 7, №3.– С. 422–429.

168. Запорожец, В.В. Статистические характеристики элементарных процессов трения качения. Сообщ. 2 / В.В. Запорожец, С.В. Гордеев //Трение и износ.– 1986.– Т. 7, №4.– С. 634–641.

169. Запорожец, В.В. Основные принципы и аппаратура для корреляционной оценки поверхностных слоев деталей машин /В.В. Запорожец, В.А. Бердинских, Х.Б. Кордонский, А.К. Пегов //Новые физические методы неразрушающего контроля качества продукции.– М.: МДНТИ, 1977.– С. 94–98.

170. Запорожец, В.В. Взаимосвязь силы трения и свойства вторичных структур /В.В. Запорожец, В.В. Варюхно //Трение и износ.– 1983.– Т. 4, №1.– С. 59–67.

171. Рыжов Э.В. Влияние электромеханической обработки на однородность состояния поверхностного слоя и износостойкость образцов /Э.В. Рыжов, В.В. Запорожец, В.В. Варюхно, Ю.Н.Гончаренко //Трение и износ.– 1984.– Т. 5, №1.– С. 27–33.

172. Запорожец, В.В. Динамика и численная оценка процессов контактного взаимодействия твердых тел /В.В. Запорожец, В.А. Бердинских,

В.В. Варюхно //Тр. международной научной конференции «Трение, износ и смазочные материалы 21–25.05.85».– М. :АН СССР, 1985.– Т.1.– С. 71–76.

173. Власов, В.И. Кривошипные кузнечно–прессовые машины /В.И. Власов, А.Я. Борзыкин, И.К. Букин-Батырев и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 424с.

174. Лихтман, В.И. Физико-химическая механика металлов /В.И. Лихтман, Е.Д. Щукин, П.А. Ребиндер. – М.: АН СССР, 1962. – 303с

175. Андреев, А.А., Костюк Г.И., Минаев Н.А. Эффективные наноструктурные многослойные покрытия для режущих инструментов и деталей медицинского назначения, работающих в динамическом режиме /Авиационно-космическая техника и технология. – 2012.– № 2 (89).– с.28-33.

176. Верещака, А.А. Слоистый композиционный инструментальный материал с нано-дисперсным покрытием [Текст] / А.А. Верещака // Сборники научных работ НТУ "ХПИ" : Високі технології в машинобудуванні №1 - НТУ "ХПИ", 2012.–с.34-44.

177. Елютин А.В., Аникин В.Н., Блинков И.В., Верещака А.С. Методологические принципы создания высокопрочной градиентно-слоистой керамики с покрытием для скоростной лезвийной обработки без применения СОТС. Труды конгресса “Конструкторско-технологическая информатика 2000.Том 1. –М.: МГТУ “СТАНКИН”, 2000, с.180 – 182.

178. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойким покрытием – М.; Машиностроение,1993.С.368

179. Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П. Методические принципы создания функциональных покрытий нового поколения в инструментальном производстве //Инженерный журнал. Справочник, –2011.– №12 (177).– С.13 – 22.

180. Ивченко, Л.И. Структурная самоорганизация деталей трибосопряжений в условиях сложного термодинамического нагружения /Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов, М.В. Фролов //Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки». – 2012. – №3(59) – С.5–11.

181. Овчинников, С.В. Структурные особенности деформации наноструктурированных легированных покрытий на основе нитрида титана / С.В. Овчинников, А.Д. Коротаев, Ю.П. Пинжин // Материалы 55-й Междунар. конф. Актуальные проблемы прочности. 9-13 июня 2014 года. Харьков, Украина: Сборник материалов.–Харьков: ННЦ ХФТИ. –2014. – С.99.

182. Андреев, А.А. Исследование фазового состава, структуры и свойств многослойных вакуумно-дуговых нанокристаллических покрытий Ti-Mo-N /А.А. Андреев, О.В. Соболев, В.Ф. Горбань, В.А. Столбовой, В.В. Мамон //ФП ФИП PSE.– 2010.– т. 8, № 1. – С.28-35.

183. Гречанюк, Н.И. Современное состояние и перспективы применения технологии высокоскоростного электронно-лучевого испарения и последующей конденсации в вакууме металлов и неметаллов для получения материалов электрических контактов и электродов / Н.И. Гречанюк, Р.В. Минакова, О.П. Василега, Г.Е. Копылова, И.Н. Гречанюк, Б. Медзинский // Электрические контакты и электроды. — К.: ИПМ НАН України, 2010. — С. 54-67.

184. Балохонов, Р.Р. Численный анализ механизмов деформации и разрушения материалов с покрытиями на мезоуровне / Р.Р.Балохонов, В.А. Романова, Р.А. Бакеев, Е.А. Шваб //Междунар. конф.

Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика, Новосибирск, Россия, 30.05-04.06.2011. – Новосибирск, 2011.–С.1-6.

185. Табаков, В. П. Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающего в –условиях непрерывного резания / В. П. Табаков, А. В. Чихранов. –Ульяновск: УлГТУ,2007.– 255 с.

186. Мацевитый В.М., Удовенко Е.С., Казак И.Б и др. Влияние износостойких покрытий на контактное взаимодействие режущих инструментов с обрабатываемым материалом// Сб. науч. трудов “Физика износостойкости поверхности металлов”. – Ленинград: ФТИ им.А.Ф.Иоффе. – 1989. – С. 201-205.

187. Самсонов Г.В., Прядко И.Ф., Прядко Л.Ф. Конфигурационная модель вещества. – К.: Нукова думка, 1971. – 229 с.
188. Васильев, В.В. Структура и твердость Ti-N- и Ti-Si-N- покрытий, осажденных из фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы /В.В. Васильев, А.А. Лучанинов, Е.Н. Решетняк, В.Е. Стрельницкий, Г.Н. Толмачева, М.В. Решетняк //Вопросы атомной науки и техники.– 2009.– №2.– С. 173-180.
189. Романов, Д.А. Исследование дислокационной субструктуры, формирующейся в электроэрозионных покрытиях / Д.А. Романов, О.В. Олесюк, Е.А. Будовских, Е.А. Громов //Тезисы докл. Междун. конф. Физическая мезомеханика многоуровневых систем-2014. Моделирование, эксперимент, приложения.– 3-5 сентября 2014 г., Томск, Россия. – Томск: ИФПМ СО РАН.– 2014. – С.290-292.
190. Костецкий, Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении /Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов, Л.И. Бершадский, Н.Б. Костецкая, В.А. Ляшко, М.Ф. Сагач . – Киев: Техніка, 1976.– 296 с.
191. Ивченко, Л.И. Структурная организация материалов сложнонагруженных трибосопряжений / Л.И. Ивченко, В.В. Цыганов // Вестник двигателестроения. – 2014. – №1. – С.28–33.
192. Brazkin, V.V. Harder than diamond: Dreams and realiti / V.V. Brazkin, A.G. Laupin, R.J. Nemely //Philos. Mag. – 2002.– Vol. A82. No. 2.– P.231-253.
193. Азаренков, Н.А. Наноматериалы, нанопокрyтия, нанотехнологии: учеб. пособие / Н.А. Азаренков, В.М. Береснев, А.Д. Погребняк, Л.В. Маликов, П.В. Турбин.– Х.: ХНУ.– 2009.– 209с.
194. Минько, Н.И. Методы получения и свойства нанообъектов : учеб. пособие / Н.И. Минько, В.В. Строкова, И.В. Жерновский, В.М. Нарцев. - М.: Флинта: Наука, 2009. - 168 с.
195. Birringer, R. Nanocrystalline Materials / R. Birringer, H. Gleiter //Clusters of Atoms and Molecules II / Ed. H. Haberland. Berlin: Springer-Verlag.– 1994.– P. 384.

196. Суздаев, И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов /И.П. Суздаев. –М.: КомКнига.– 2006.– 592с.
197. Константинова, Т.Е. Эволюция дислокационной структуры металлических систем в условиях высоких давлений / Т.Е. Константинова //Физика и техника высоких давлений.– 2009. – том 19, № 1.– С.7-29.
198. Варюхин, В.Н. Применение метода ДОЭ для анализа структуры малоуглеродистой стали при различных деформационных обработках, включающих простой сдвиг/ В.Н. Варюхин, А.В. Завдовеев, Е.Г. Пашинская, В.М. Ткаченко, Ф.И. Глазунов // Наноразмерные системы: строение, свойства, технологии (НАНСИС–2013): Тезисы IV Междунар. науч. конф. (Киев, 19–22 нояб. 2013 г.). — Киев,— 2013.– С.108.
199. Пашинская, Е.Г. Винтовая экструзия малоуглеродистой стали 20Г2С: структура и свойства / Е.Г. Пашинская, С.В. Добаткин, А.В. Завдовеев, Н.Н. Белоусов, А.В. Макарова, А.А. Максакова // Материалы 55-й Междун. конф. Актуальные проблемы прочности 9-13 июня 2014 года, Харьков, Украина: Сборник материалов / Харьков: ННЦ ХФТИ. 2014. – С.176.
200. Мейснер Л.Л. Механизмы фрагментации структуры приповерхностного слоя никелида титана в результате воздействия на него ионными пучками /Л.Л. Мейснер, Т.М. Полетика, С.Н. Мейснер, А.В. Твердохлебова, С.Л. Гирсова //Тезисы докл. Междун. конф. Физическая мезомеханика многоуровневых систем-2014. Моделирование, эксперимент, приложения.– 3-5 сентября 2014 г., Томск, Россия. – Томск: ИФПМ СО РАН.– 2014. – С. 387-388.
201. Погребняк А.Д. Влияние толщины наноразмерного слоя на структуру и свойства многослойных покрытий TiN/MoN /А.Д. Погребняк, В.М. Береснев, О.В. Бондар, G. Abadias, P. Chartier, Б.А. Постольный, А.А. Андреев, О.В. Соболев //Письма в ЖТФ.– 2014.– Т. 40, вып. 5.– С.59-66
202. R. R. Balokhonov, V. A. Romanova Influence of the coating thickness on strength of the coating–base material composite. Numerical simulation. Composites: Mechanics, Computations, Applications.– 2010.– 1. – P.1–13.

203. Кубич, В.И. К методике определения пути трения в трибосопряжениях со сложным плоско-параллельным движением / В.И. Кубич, А.О. Щаднев, Л.И. Ивченко //Проблеми трибології , – 2012, – №1, – С. 45-51.

204. Браун, Э.Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе – М.: Машиностроение, 1982. – 192 с.

205. Беркович, И.И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов /И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; Под ред. Д.Г. Громаковского – Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2000. – 268 с.

Приложение А

Распределение работы выхода электрона вдоль образца стали ХТН-61
при двухкомпонентном и трехкомпонентном нагружении

Таблица А 1 - Распределение работы выхода электрона вдоль образца
стали ХТН-61 после износа с $A_{\text{пот}} = 0$

№	l, мм	первое измерение		второе измерение		третье измерение	
		U, В	Φ, эВ	U, В	Φ, эВ	U, В	Φ, эВ
1	0,0	0,1630	4,137	0,194	4,106	0,1830	4,1170
2	0,2	0,2040	4,096	0,216	4,084	0,2050	4,0950
3	0,4	0,1970	4,103	0,232	4,068	0,2110	4,0890
4	0,6	0,2120	4,093	0,221	4,079	0,2380	4,0620
5	0,8	0,2070	4,091	0,228	4,072	0,2300	4,0700
6	1,0	0,2090	4,085	0,249	4,051	0,2390	4,0610
7	1,2	0,2150	4,091	0,238	4,062	0,2480	4,0520
8	1,4	0,2090	4,060	0,254	4,046	0,2570	4,0430
9	1,6	0,2400	4,039	0,283	4,017	0,2750	4,0250
10	1,8	0,2610	4,035	0,32	3,98	0,3100	3,9900
11	2,0	0,2650	4,059	0,33	3,97	0,3120	3,9880
12	2,2	0,2410	4,190	0,325	3,975	0,3390	3,9610
13	2,4			0,389	3,911	0,3130	3,9870
14	2,6					0,2580	4,0420
15	2,8	0,1100	4,005				
16	3,0	0,2130	4,002			-0,0620	4,3620
17	3,2	0,2760	4,001	0,327	3,973	0,5830	3,7170
18	3,4	0,2950	4,037	0,783	3,517	0,1310	4,1690
19	3,6	0,2980	4,108	0,766	3,534	0,2150	4,0850
20	3,8	0,2990	4,182	0,741	3,559	0,2170	4,0830
21	4,0	0,2630	4,293	0,353	3,947	0,2630	4,0370

Продолжение таблицы А 1							
22	4,2	0,1920	4,342	0,351	3,949	0,1220	4,1780
23	4,4	0,1180	4,393	0,399	3,901	0,2540	4,0460
24	4,6	0,0070	4,446	0,287	4,013	0,2350	4,0650
25	4,8	-0,0420	4,443	0,231	4,069	0,2150	4,0850
26	5,0	-0,0930	4,436	0,176	4,124	0,1850	4,1150
27	5,2	-0,1460	4,281	0,081	4,219	0,1280	4,1720
28	5,4	-0,1430	4,172	0,017	4,283	0,1480	4,1520
29	5,6	-0,1360	4,170	0	4,3	0,0000	4,3000
30	5,8	0,0190	4,214	-0,078	4,378	-0,0430	4,3430
31	6,0	0,1280	4,280	0	4,3	-0,0820	4,3820
32	6,2	0,1300	4,344	0,081	4,219	0,0000	4,3000
33	6,4	0,0860	4,410	0,196	4,104		
34	6,6	0,0200	4,491	0	4,3		
35	6,8	-0,0440	4,493	-0,038	4,338		
36	7,0	-0,1100	4,300	-0,077	4,377		
37	7,2	-0,1910	4,300	-0,097	4,397		
38	7,4	-0,1930	4,300	-0,133	4,433		
39	7,6			-0,115	4,415		
40	7,8			-0,059	4,359		

Таблица А 2 - Распределение работы выхода электрона вдоль образца стали ХТН-61 после износа с $A_{\text{пот}} = 0,05\text{мм}$

№	l, мм	первое измерение		второе измерение		третье измерение	
		U, В	Ф, эВ	U, В	Ф, эВ	U, В	Ф, эВ
1	0,0	0,1710	4,129	0,167	4,133	0,2190	4,0810
2	0,2	0,1700	4,130	0,168	4,132	0,2080	4,0920
3	0,4	0,1910	4,109	0,195	4,105	0,1900	4,1100
4	0,6	0,1910	4,109	0,178	4,122	0,1890	4,1110

Продолжение таблицы А 2

5	0,8	0,1710	4,129	0,14	4,16	0,1960	4,1040
6	1,0	0,1780	4,122	0,177	4,123	0,1900	4,1100
7	1,2	0,2080	4,092	0,12	4,18	0,1940	4,1060
8	1,4	0,1710	4,129	0,187	4,113	0,1880	4,1120
9	1,6	0,1830	4,117	0,158	4,142	0,1780	4,1220
10	1,8	0,1900	4,110	0,215	4,085	0,1900	4,1100
11	2,0	0,1890	4,111	0,224	4,076	0,2190	4,0810
12	2,2	0,1900	4,110	0,158	4,142	0,2280	4,0720
13	2,4	0,262	4,038	0,224	4,076	0,2470	4,0530
14	2,6	0,281	4,019	0,185	4,115	0,2740	4,0260
15	2,8	0,2180	4,082	0,242	4,058	0,3120	3,9880
16	3,0	0,1260	4,174	0,26	4,04	0,3130	3,9870
17	3,2	0,5280	3,772	0,324	3,976	0,3140	3,9860
18	3,4	0,5200	3,780	0,342	3,958	0,3310	3,9690
19	3,6	0,1820	4,118	0,24	4,06	0,3210	3,9790
20	3,8	0,3010	3,999	0,288	4,012	0,2950	4,0050
21	4,0	0,3190	3,981	0,343	3,957	0,2760	4,0240
22	4,2	0,2650	4,035	0,297	4,003	0,3040	3,9960
23	4,4	0,2300	4,070	0,306	3,994	0,2780	4,0220
24	4,6	0,1850	4,115	0,27	4,03	0,2700	4,0300
25	4,8	0,2290	4,071	0,261	4,039	0,2780	4,0220
26	5,0	0,2400	4,060	0,262	4,038	0,2620	4,0380
27	5,2	0,2130	4,087	0,272	4,028	0,2780	4,0220
28	5,4	0,1660	4,134	0,291	4,009	0,2680	4,0320
29	5,6	0,2500	4,050	0,3	4	0,2780	4,0220
30	5,8	0,1370	4,163	0,347	3,953	0,2970	4,0030
31	6,0	0,0990	4,201	0,29	4,01	0,2780	4,0220
32	6,2	0,4510	3,849	0,412	3,888	0,2790	4,0210

Продолжение таблицы А 2

33	6,4	0,3690	3,931	0,403	3,897	0,2310	4,0690
34	6,6	0,4630	3,837	0,355	3,945	0,1930	4,1070
35	6,8	0,3500	3,950	0,374	3,926	0,4050	3,8950
36	7,0	0,2860	4,014	0,291	4,009	0,3000	4,0000
37	7,2	0,3160	3,984	0,311	3,989	0,2810	4,0190
38	7,4	0,3040	3,996	0,311	3,989	0,2790	4,0210
39	7,6	0,2860	4,014	0,312	3,988	0,323	3,9770

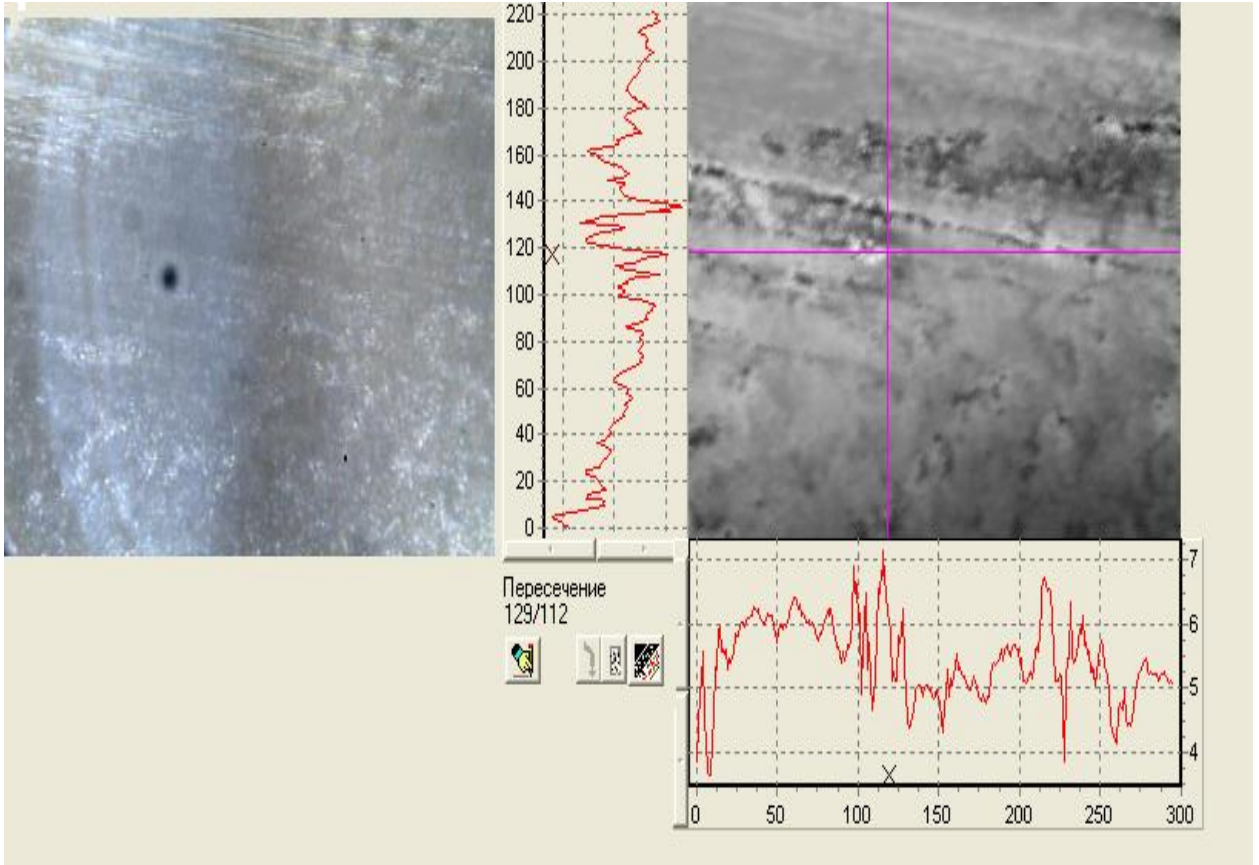
Таблица А 3 - Распределение работы выхода электрона вдоль образца стали ХТН-61 после износа с $A_{\text{пол}} = 0,1\text{мм}$

№	l, мм	первое измерение		второе измерение		третье измерение	
		U, В	Ф, эВ	U, В	Ф, эВ	U, В	Ф, эВ
1	0,0	0,1740	4,126	0,147	4,153	0,1730	4,1270
2	0,2	0,1790	4,121	0,146	4,154	0,1630	4,1370
3	0,4	0,1780	4,122	0,147	4,153	0,1630	4,1370
4	0,6	0,1900	4,110	0,148	4,152	0,1730	4,1270
5	0,8	0,1790	4,121	0,167	4,133	0,1760	4,1240
6	1,0	0,1890	4,111	0,175	4,125	0,1760	4,1240
7	1,2	0,1910	4,109	0,182	4,118	0,1740	4,1260
8	1,4	0,1920	4,108	0,181	4,119	0,1740	4,1260
9	1,6	0,2000	4,100	0,18	4,12	0,1940	4,1060
10	1,8	0,2000	4,101	0,206	4,094	0,1950	4,1050
11	2,0	0,1990	4,082	0,178	4,122	0,1960	4,1040
12	2,2	0,2180	4,085	0,188	4,112	0,2090	4,0910
13	2,4	0,2150	4,070	0,205	4,095	0,2160	4,0840
14	2,6	0,23	4,033	0,224	4,076	0,2560	4,0440
15	2,8	0,267	3,999	0,263	4,037	0,3240	3,9760

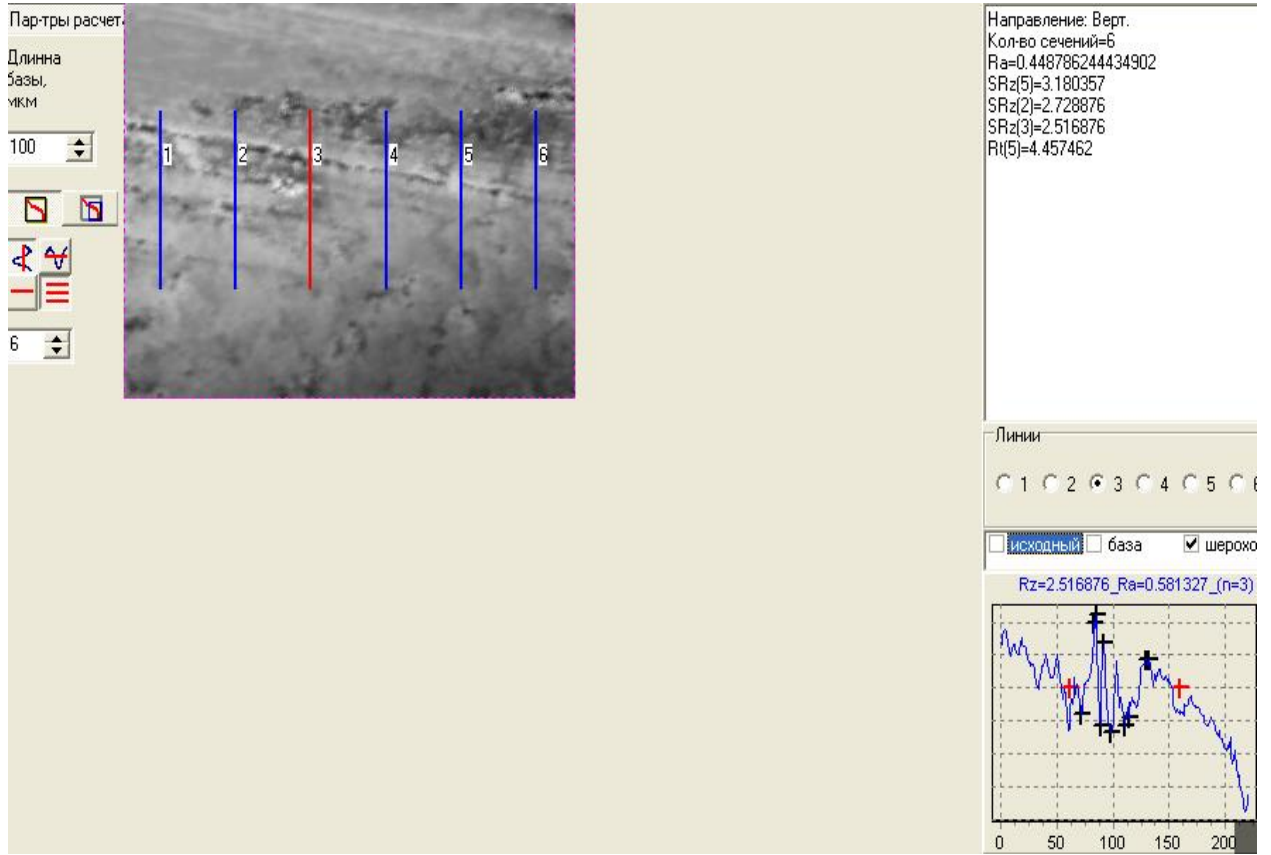
Продолжение таблицы А 3							
16	3,0	0,3010	3,971	0,329	3,971	0,3450	3,9550
17	3,2	0,3290	3,979	0,319	3,981	0,3250	3,9750
18	3,4	0,3210	3,978	0,319	3,981	0,3250	3,9750
19	3,6	0,3220	3,949	0,311	3,989	0,3440	3,9560
20	3,8	0,3510	3,934	0,354	3,946	0,3530	3,9470
21	4,0	0,3660	3,979	0,352	3,948	0,3510	3,9490
22	4,2	0,3210	3,977	0,326	3,974	0,3230	3,9770
23	4,4	0,3230	3,982	0,315	3,985	0,3130	3,9870
24	4,6	0,3180	3,988	0,314	3,986	0,3050	3,9950
25	4,8	0,3120	4,006	0,315	3,985	0,2860	4,0140
26	5,0	0,2940	4,023	0,295	4,005	0,2850	4,0150
27	5,2	0,2770	4,005	0,269	4,031	0,2860	4,0140
28	5,4	0,2950	3,986	0,277	4,023	0,2860	4,0140
29	5,6	0,3140	3,986	0,297	4,003	0,3240	3,9760
30	5,8	0,3140	3,958	0,317	3,983	0,3250	3,9750
31	6,0	0,3420	3,987	0,315	3,985	0,3260	3,9740
32	6,2	0,3130	4,004	0,317	3,983	0,3070	3,9930
33	6,4	0,2960	4,003	0,319	3,981	0,3070	3,9930
34	6,6	0,2970	4,004	0,316	3,984	0,3080	3,9920
35	6,8	0,2960	4,023	0,315	3,985	0,2880	4,0120
36	7,0	0,2770	4,004	0,299	4,001	0,3080	3,9920
37	7,2	0,2960	4,041	0,344	3,956	0,2780	4,0220

Приложение Б.

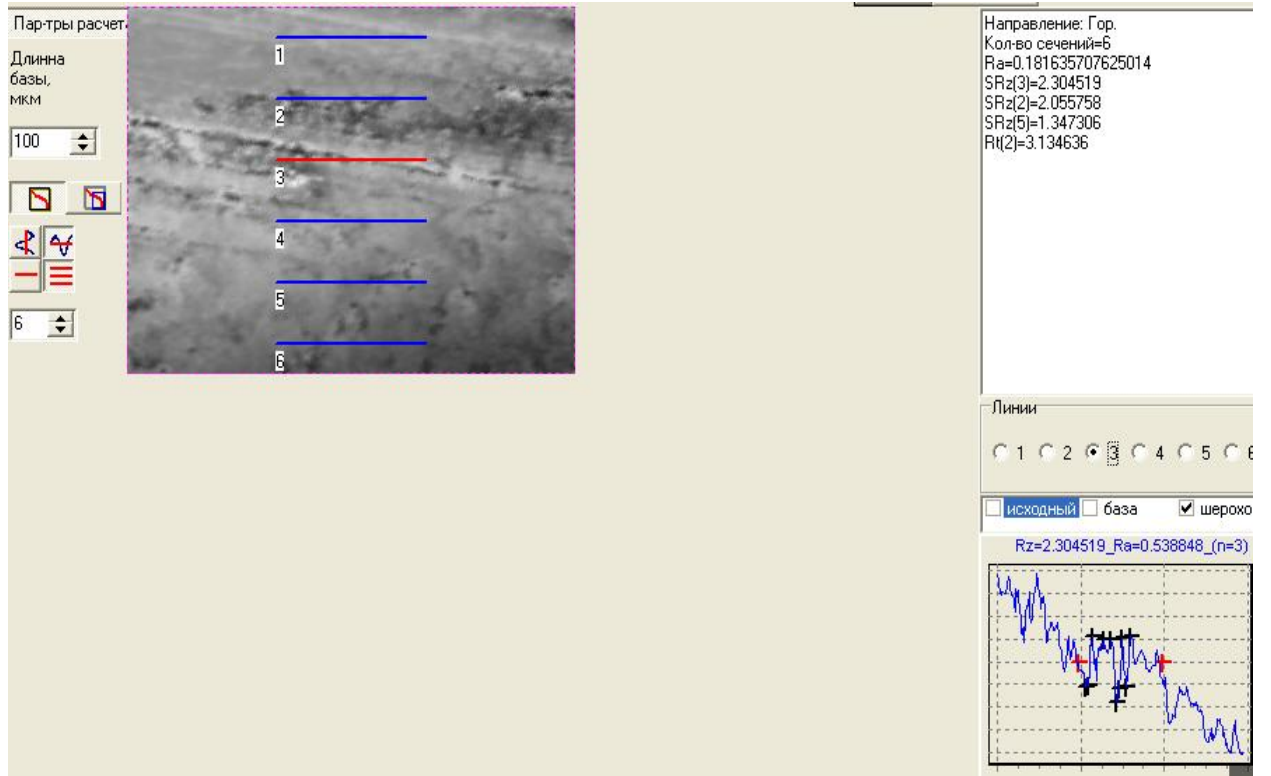
Топография поверхности образцов различных материалов после износа при двухкомпонентном и трехкомпонентном нагружении



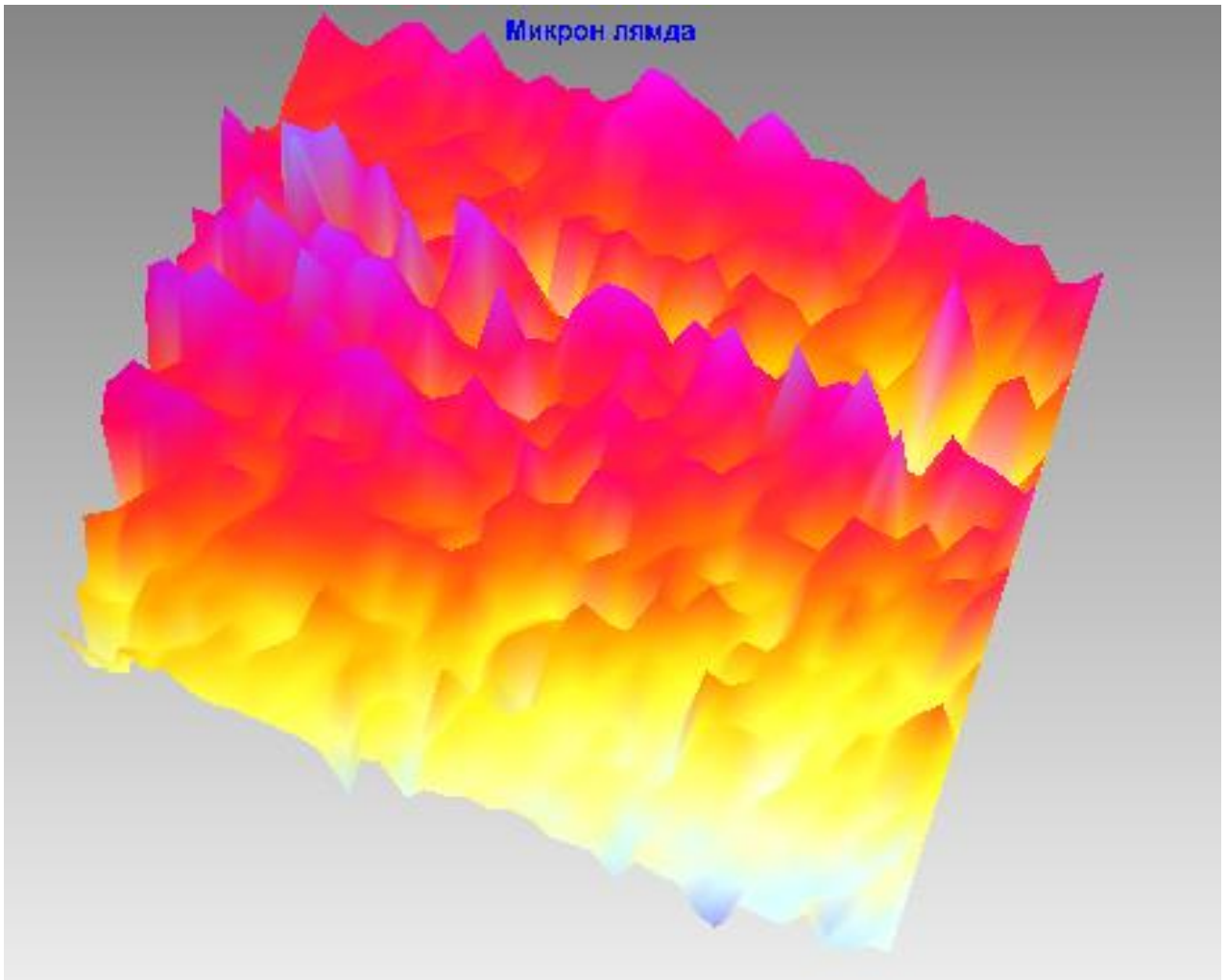
a)



б)



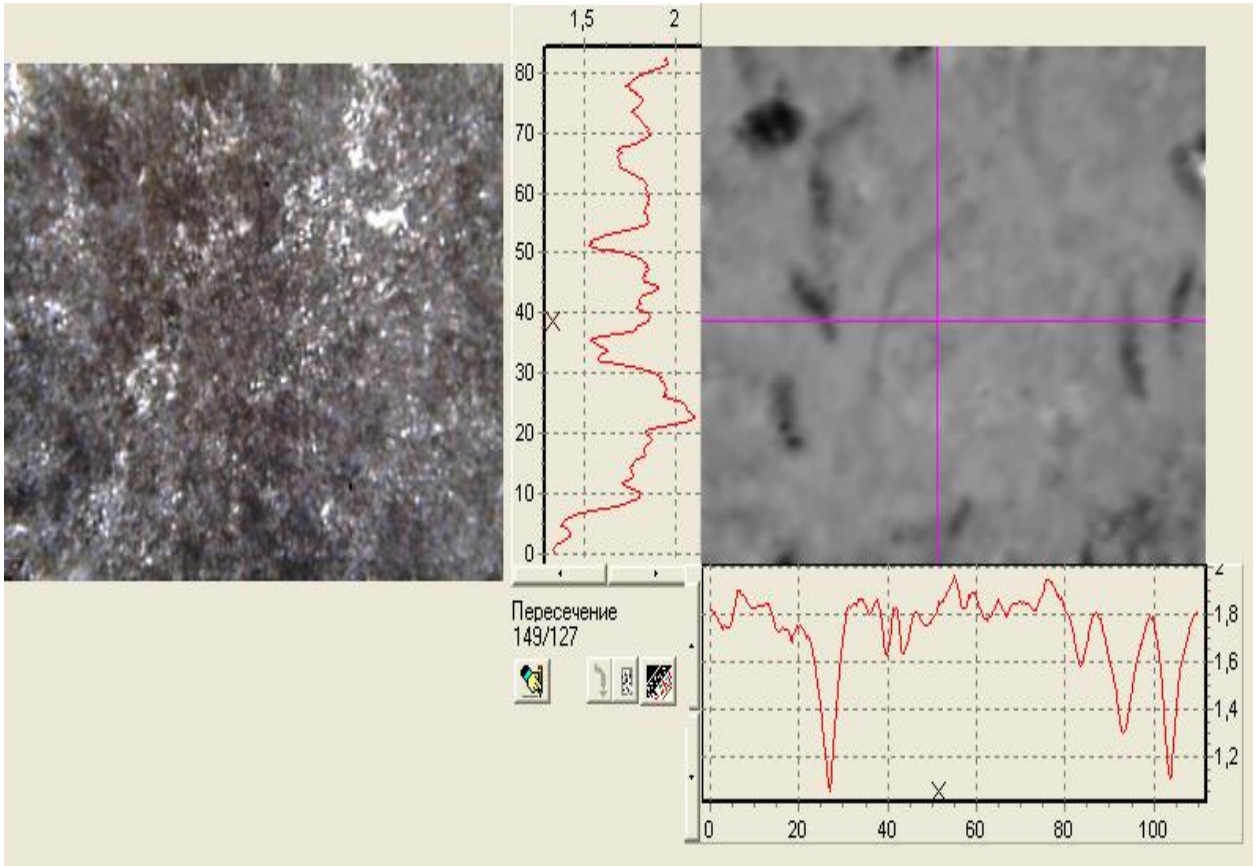
в)



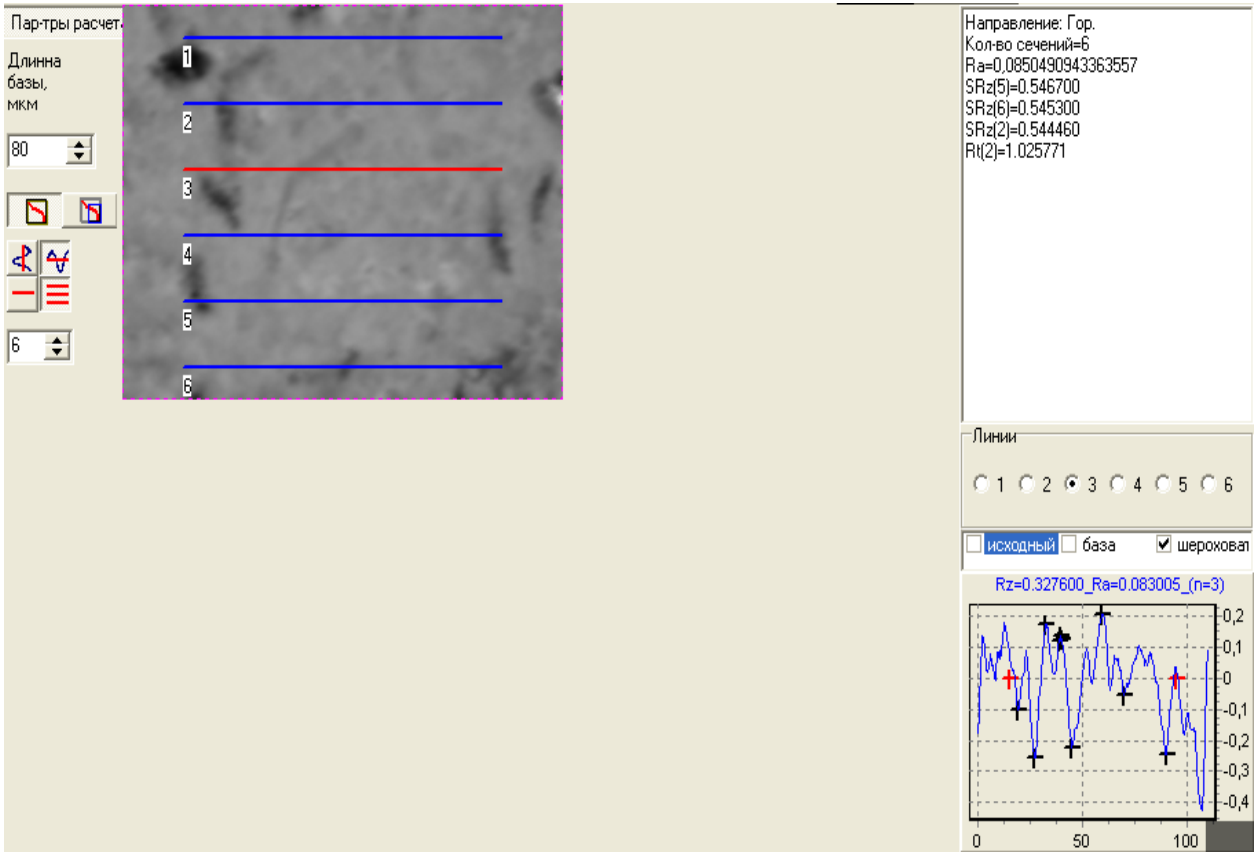
г)

а - состояние поверхности; б - шероховатость в поперечном направлении; в – шероховатость в продольном направлении;
г – 3D модель поверхности.

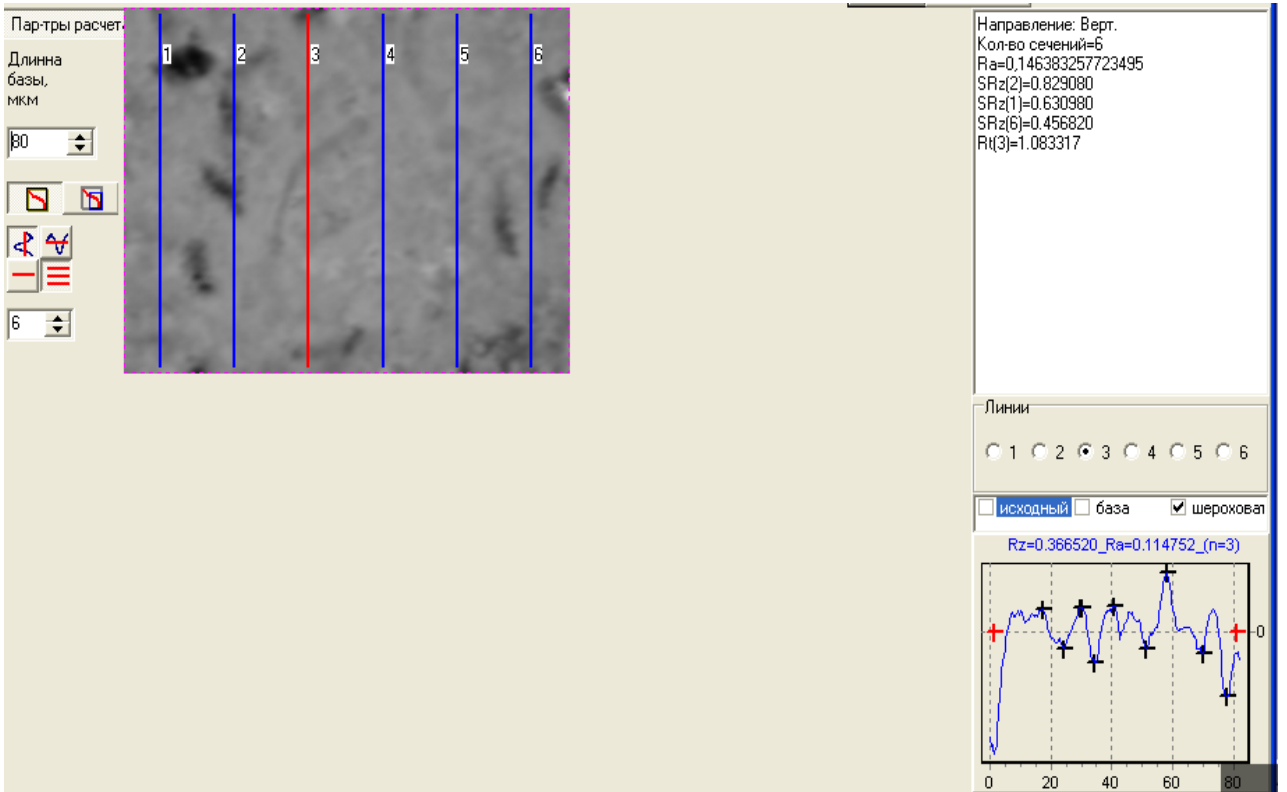
Рисунок Б 1 - Топография поверхности образца стали 60С2А после износа с двухкомпонентным нагружением ($A_{\text{поп}}=0$);



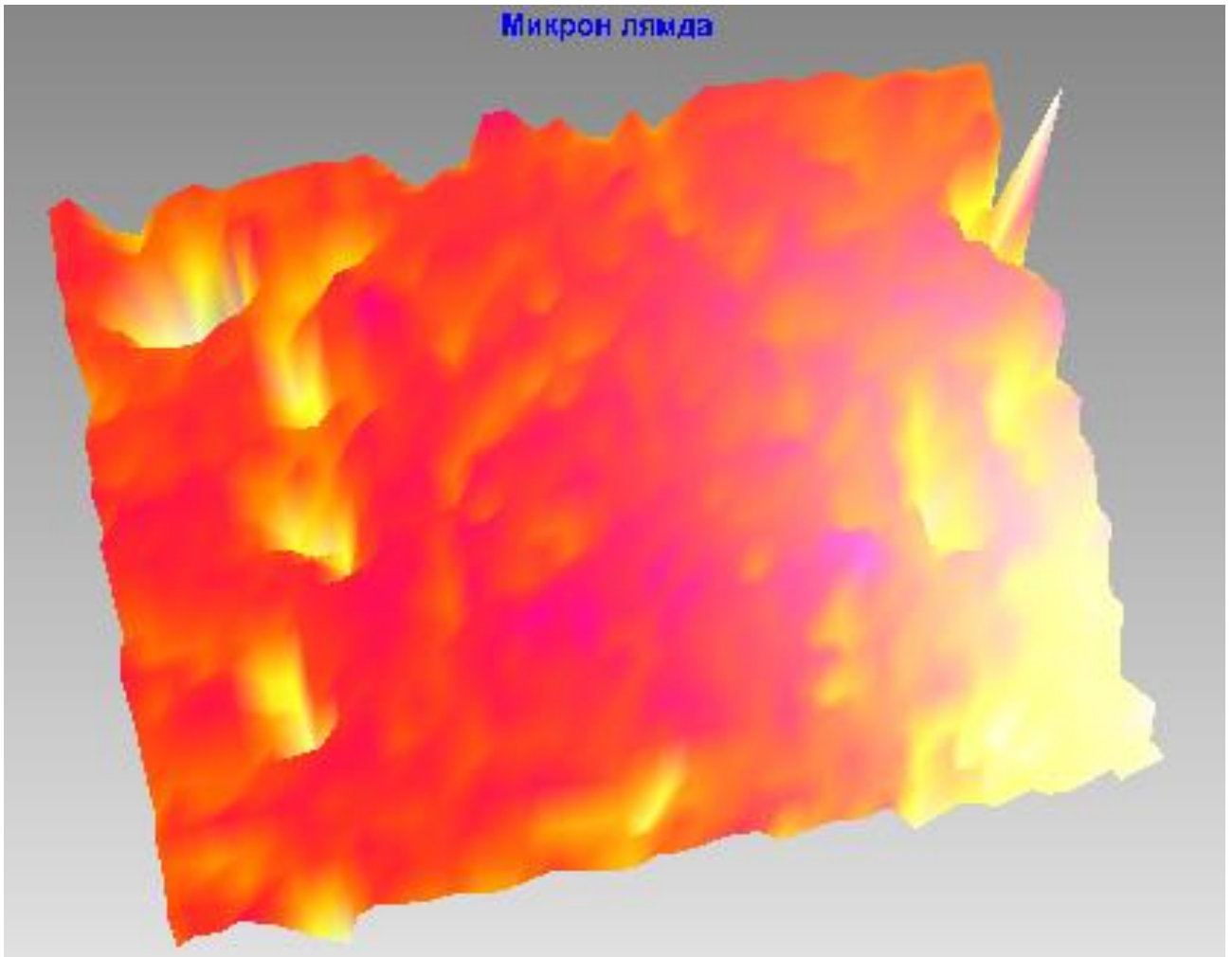
а)



б)



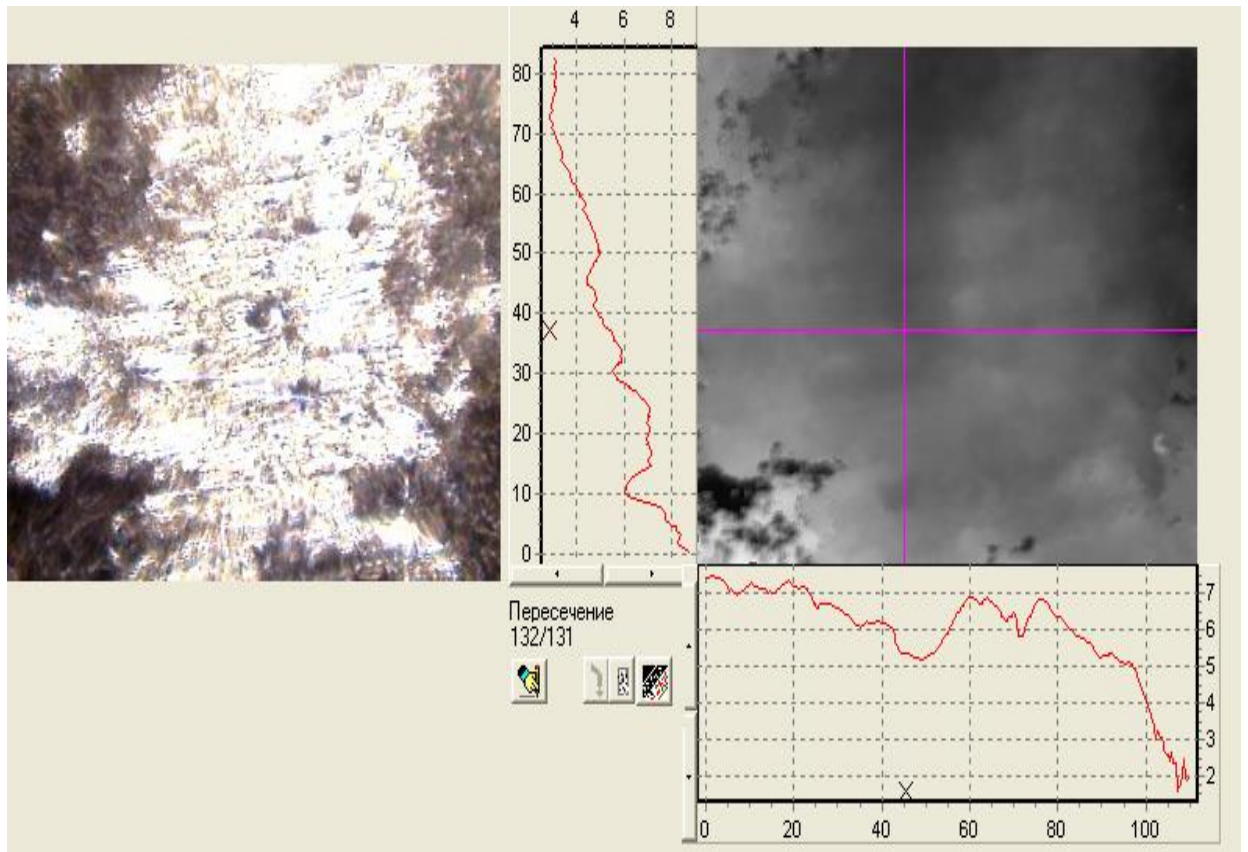
в)



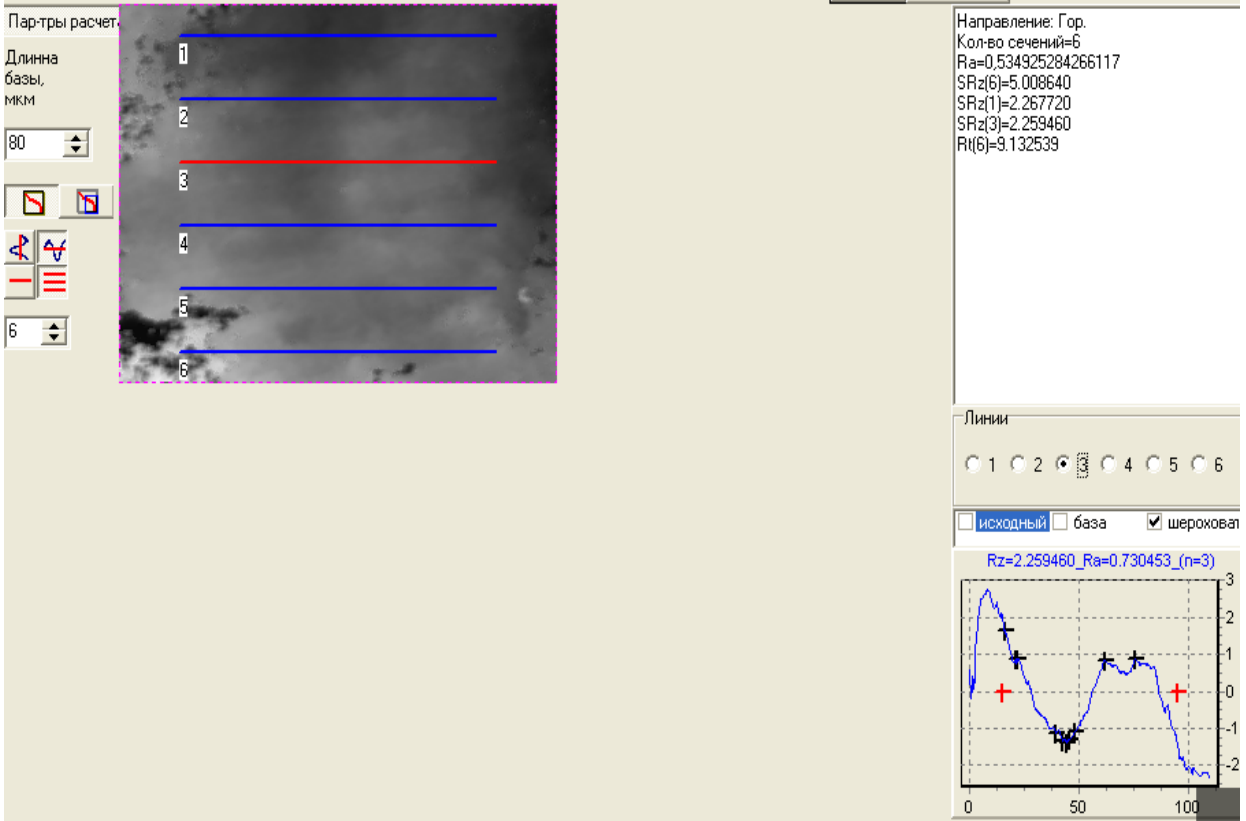
г)

а - состояние поверхности; б - шероховатость в продольном направлении в- шероховатость в поперечном направлении;
г – 3D модель поверхности

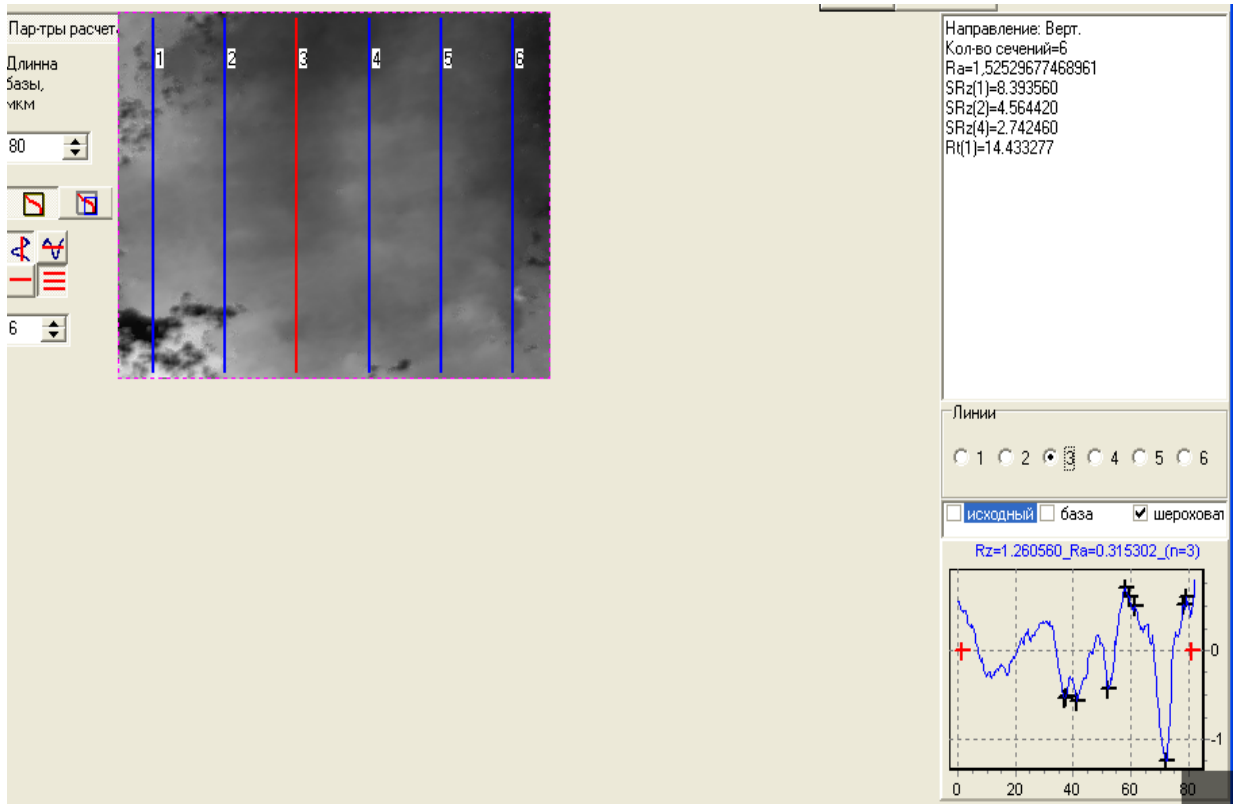
Рисунок Б 2 - Топография поверхности образца стали 60С2А после износа с трехкомпонентным нагружением ($A_{\text{поп}}=0,08\text{мм}$).



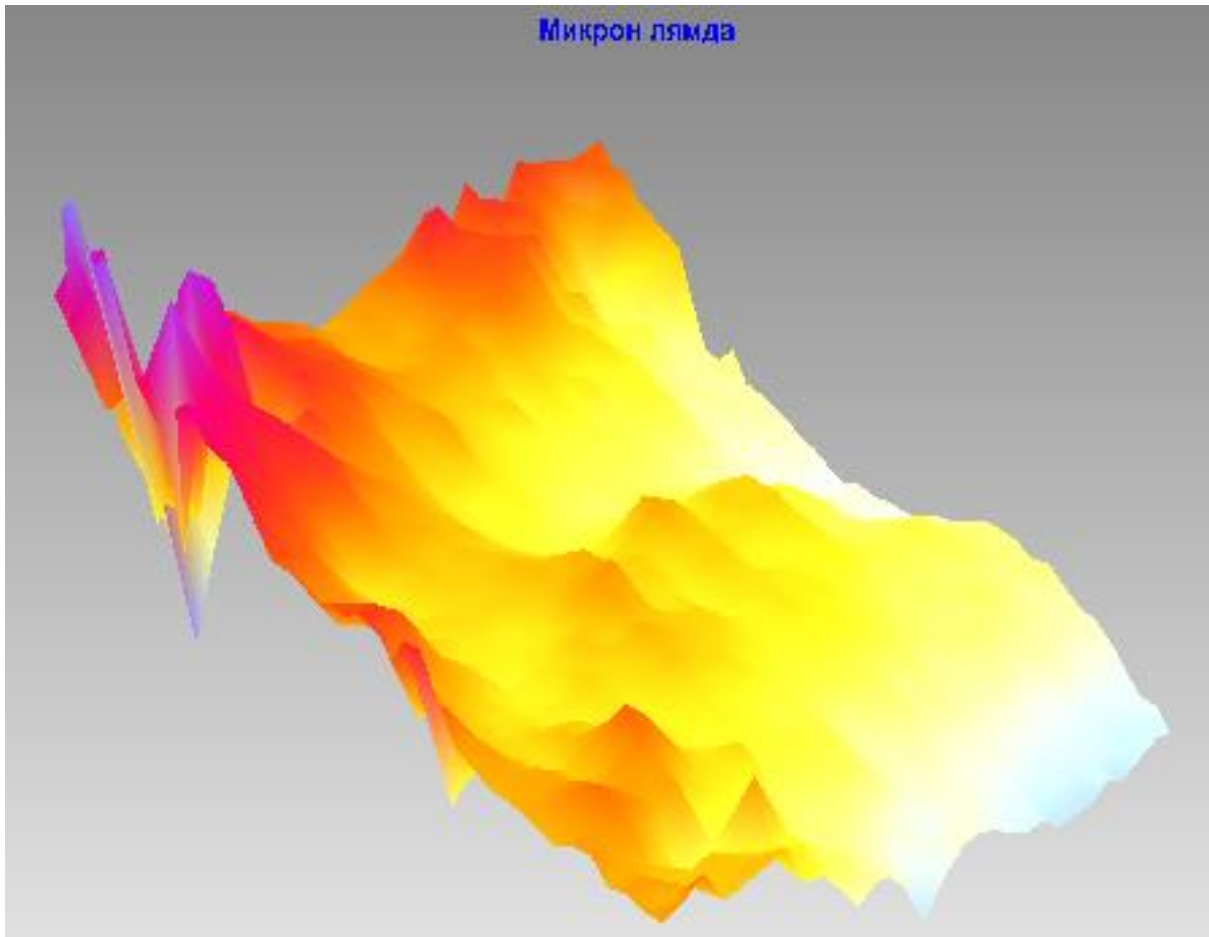
а)



б)



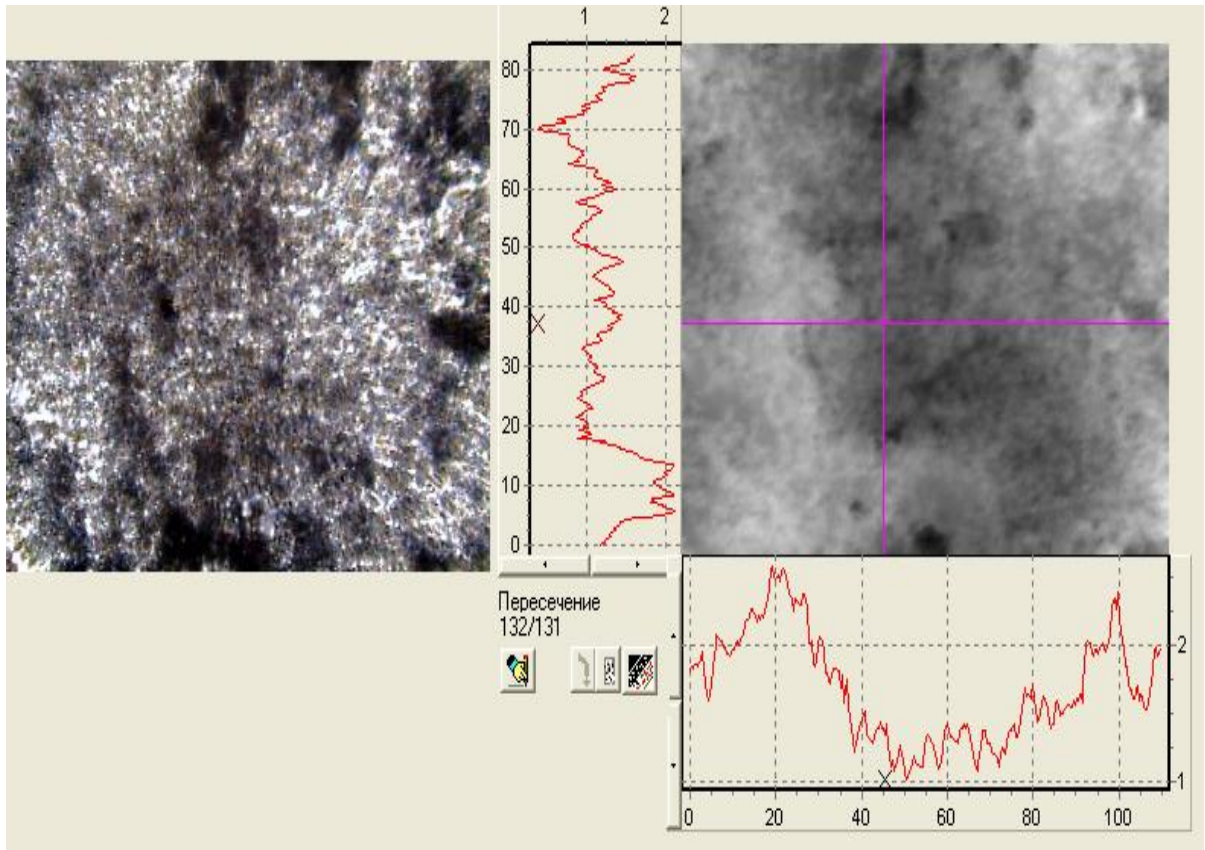
в)



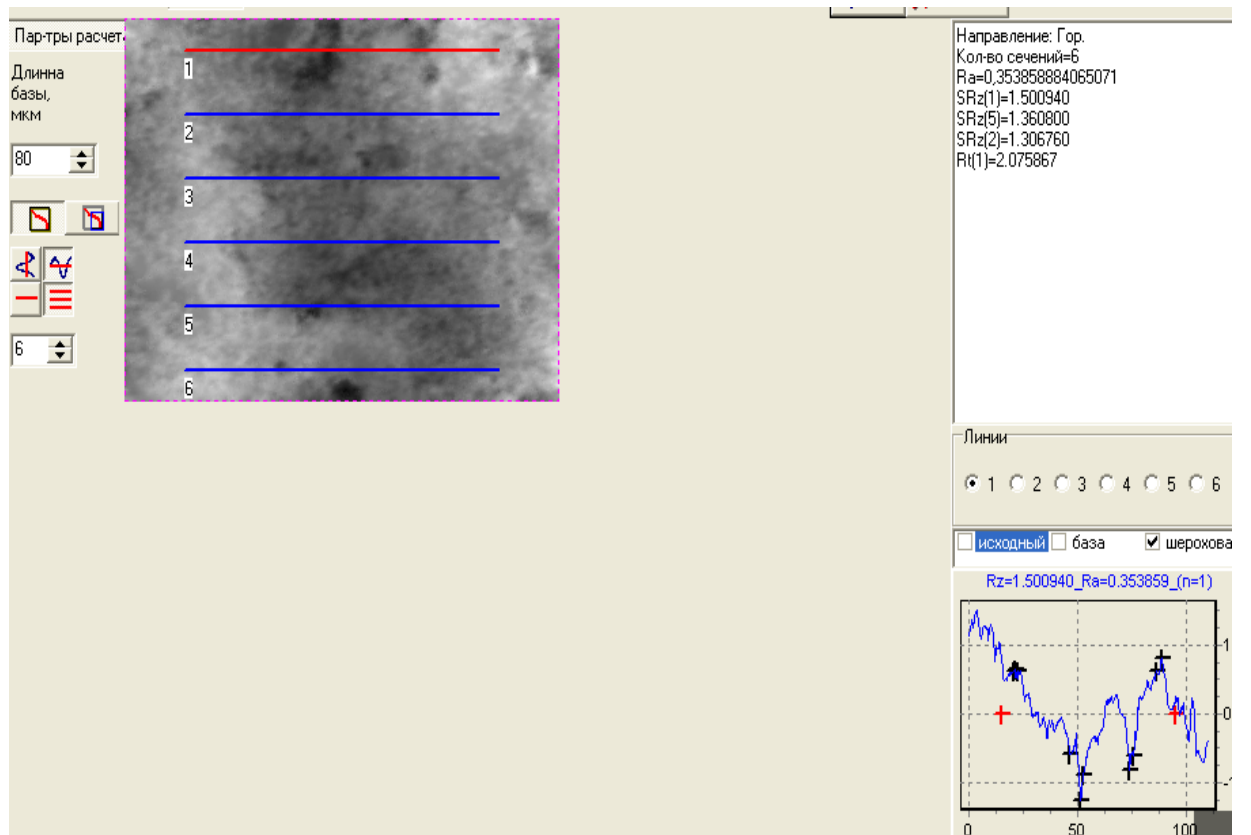
г)

а - состояние поверхности; б - шероховатость в продольном направлении; в – шероховатость в поперечном направлении;
г – 3D модель поверхности

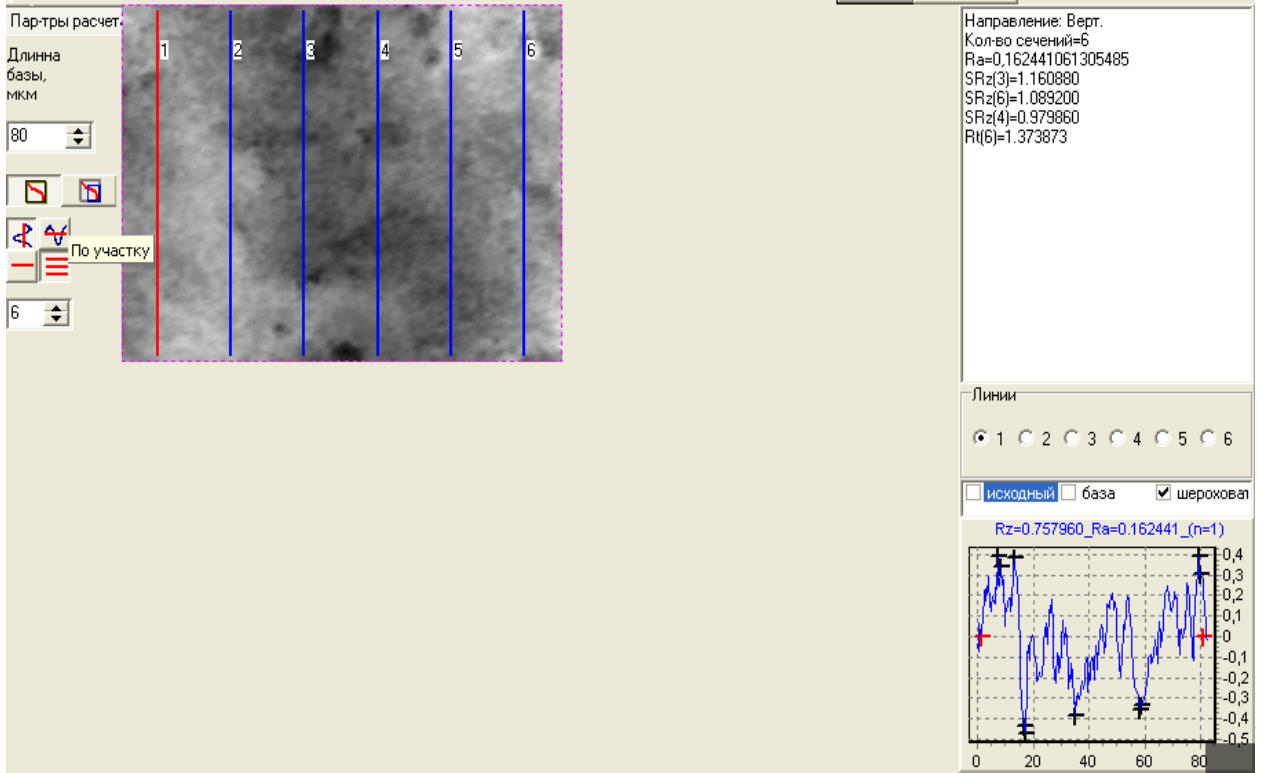
Рисунок Б 3 - Топография поверхности образца стали ХТН-61 после износа с двухкомпонентным нагружением ($A_{\text{поп}}=0$);



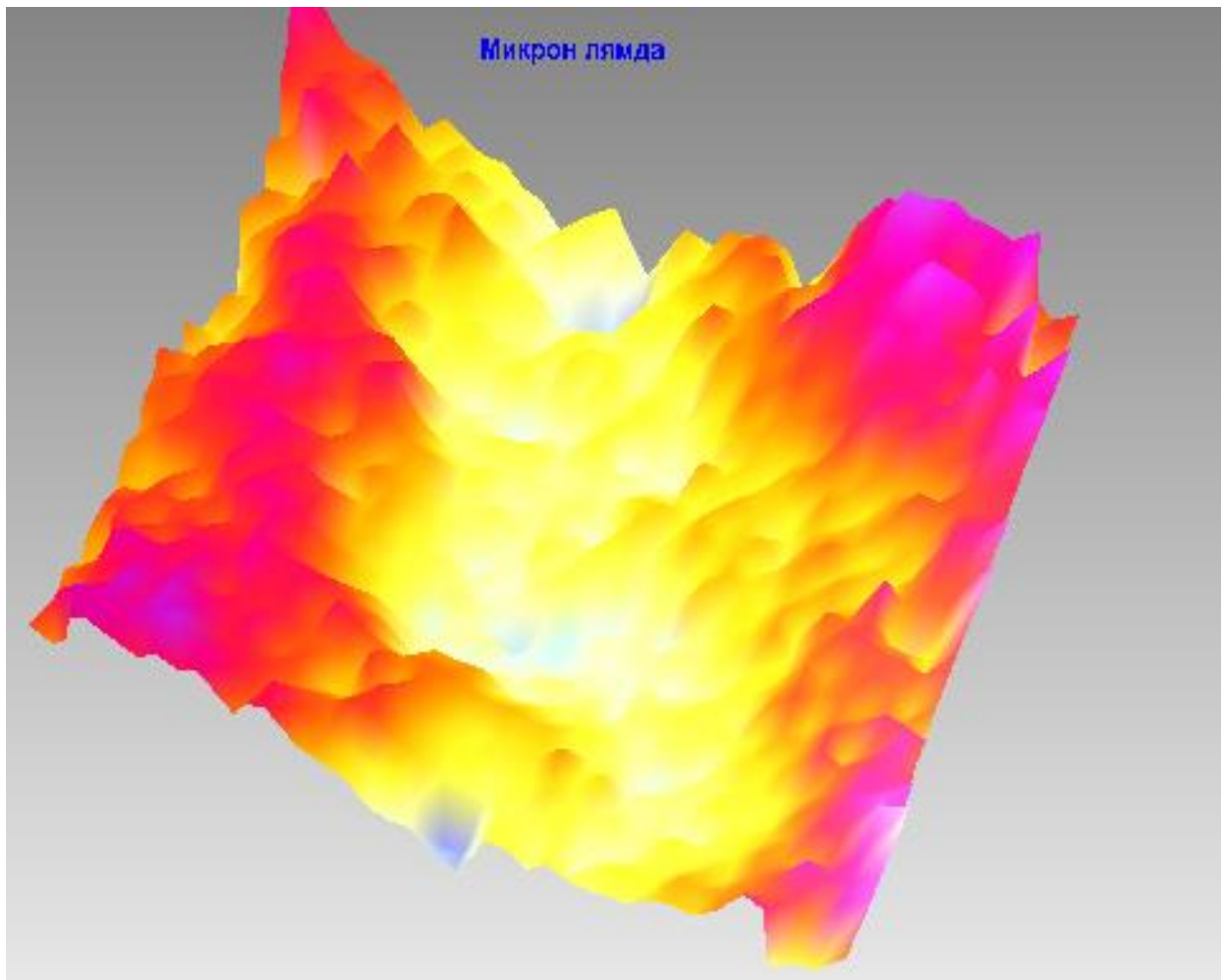
a)



б)



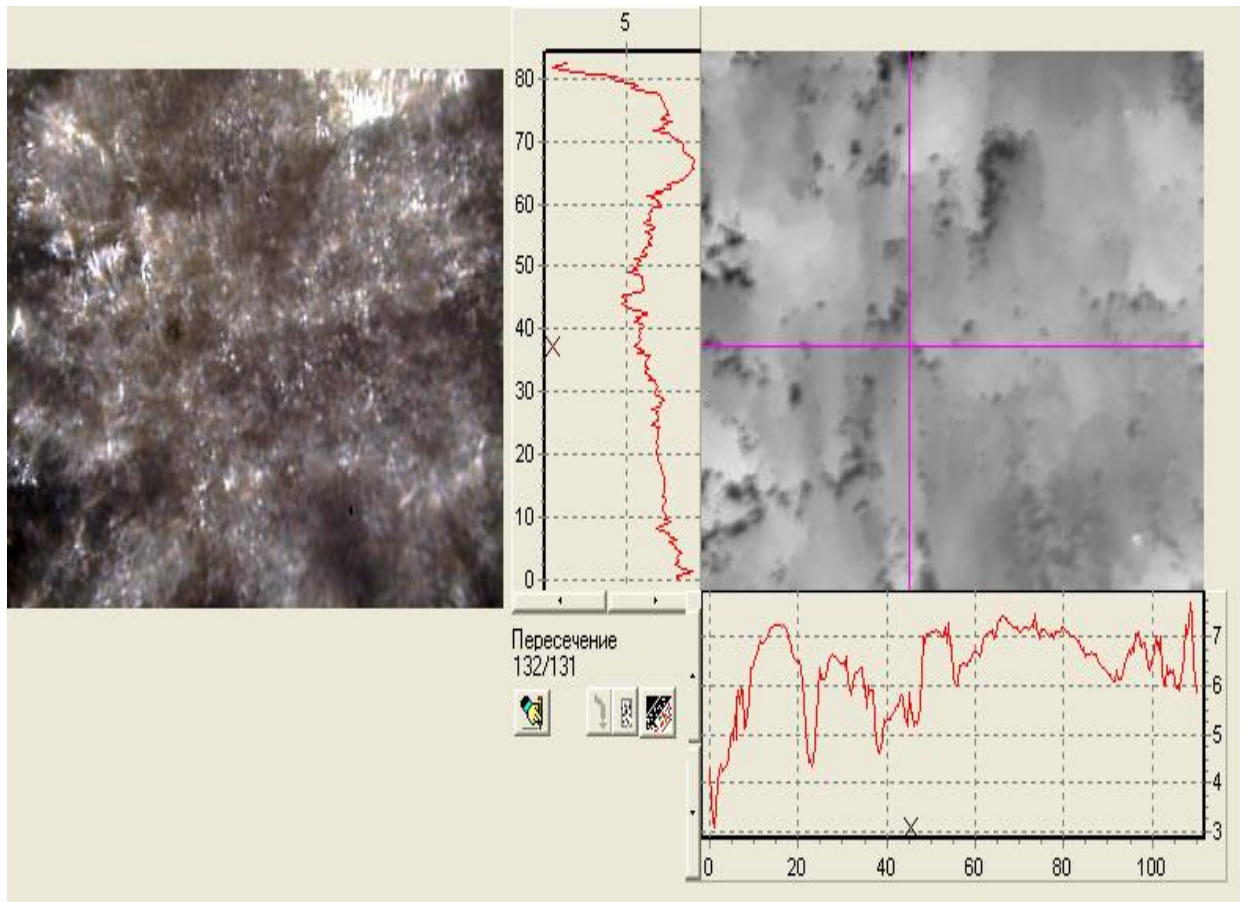
в)



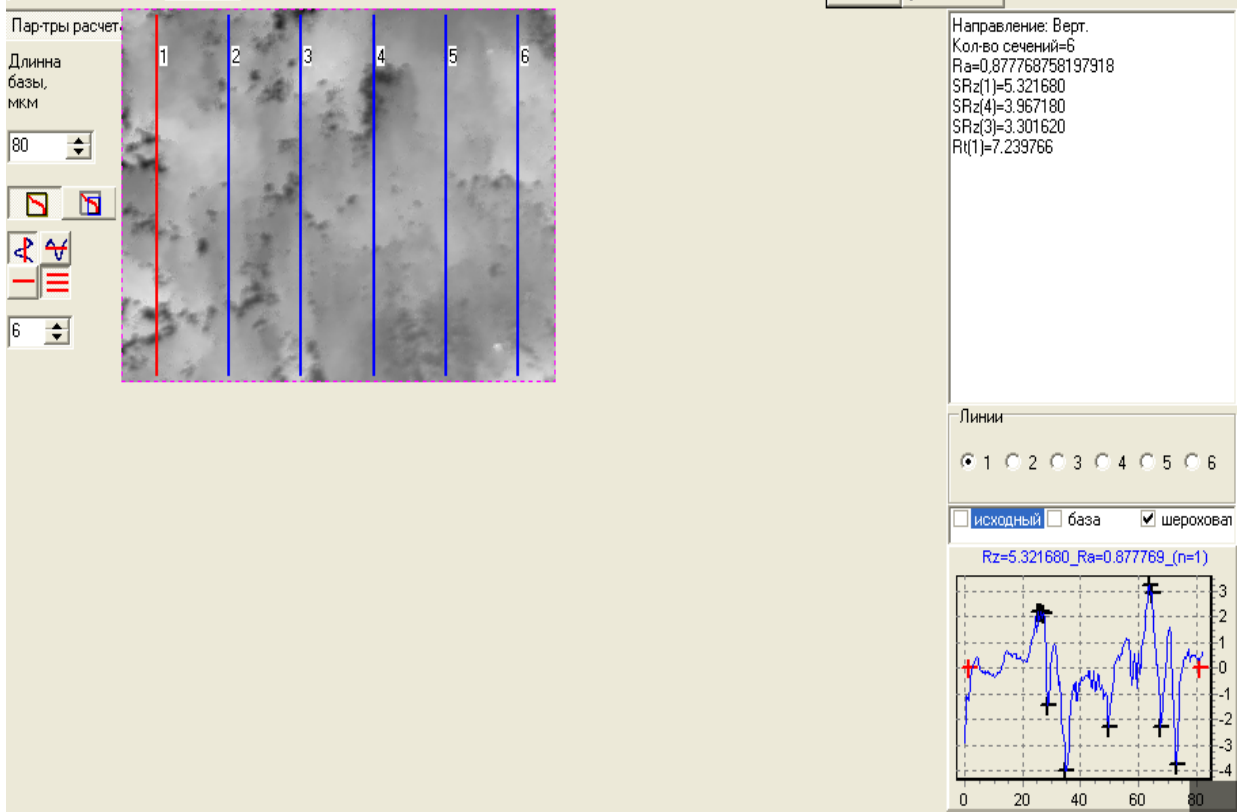
г)

а - состояние поверхности; б - шероховатость в продольном направлении; в- шероховатость в поперечном направлении; г – 3D модель поверхности

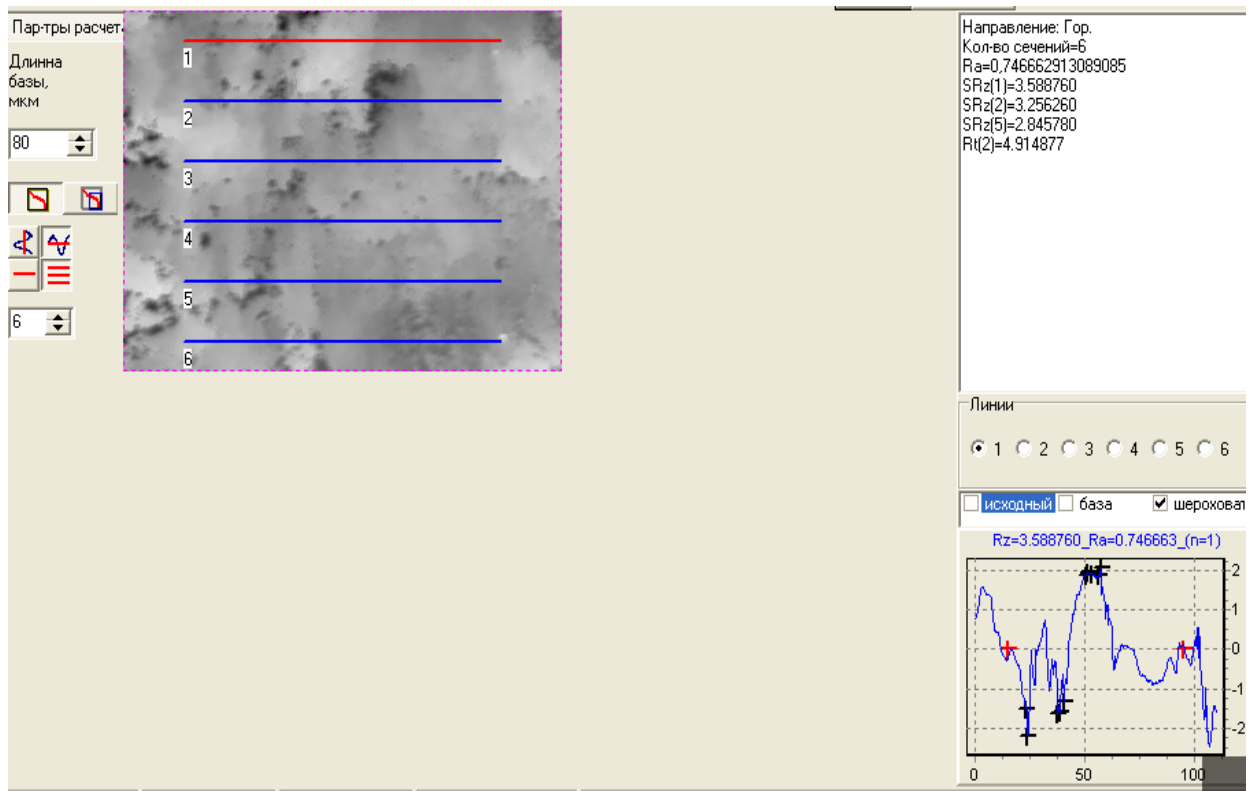
Рисунок Б 4 - Топография поверхности образца стали ХТН-61 после износа с трехкомпонентным нагружением ($A_{\text{поп}}=0,05\text{мм}$).



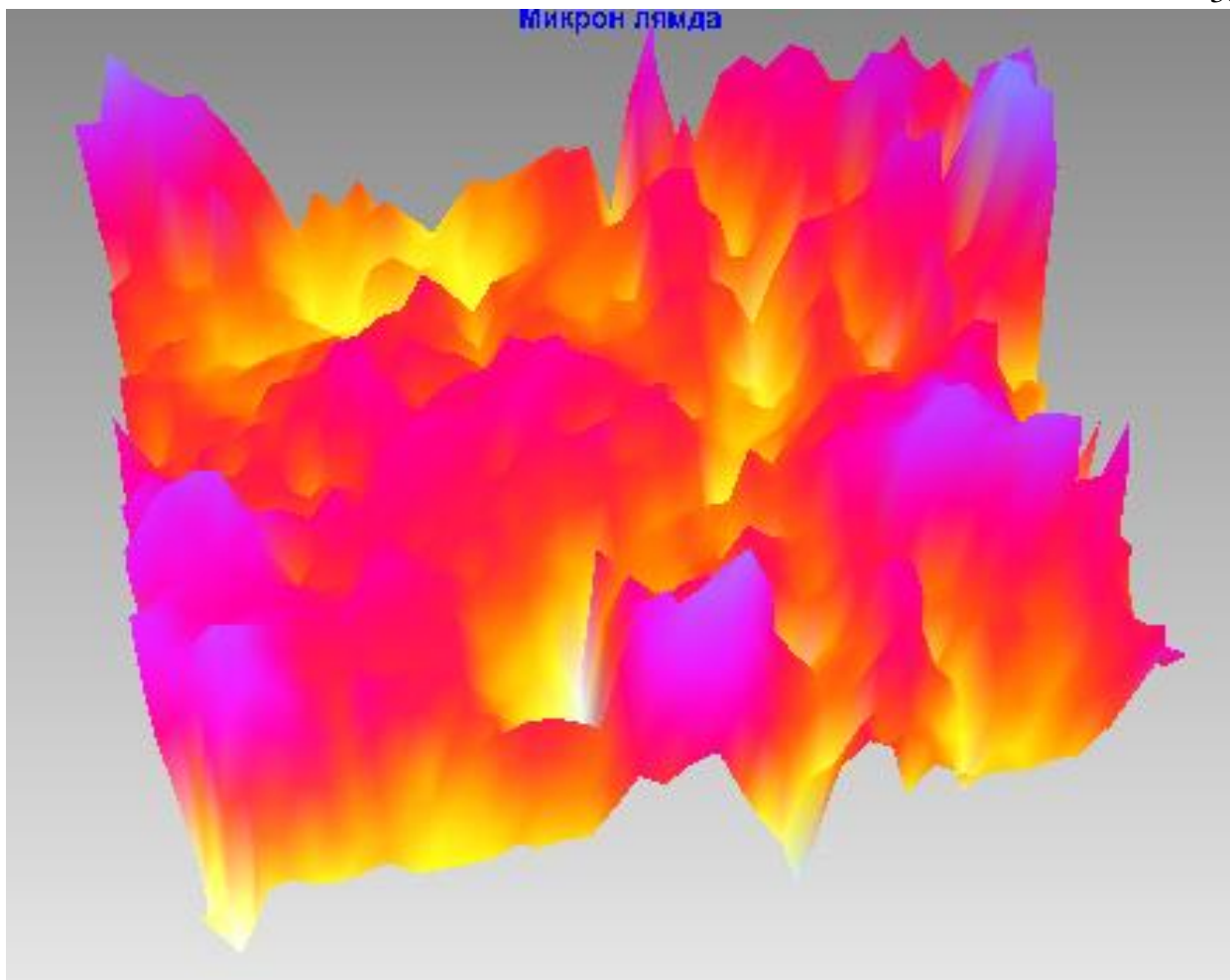
а)



б)



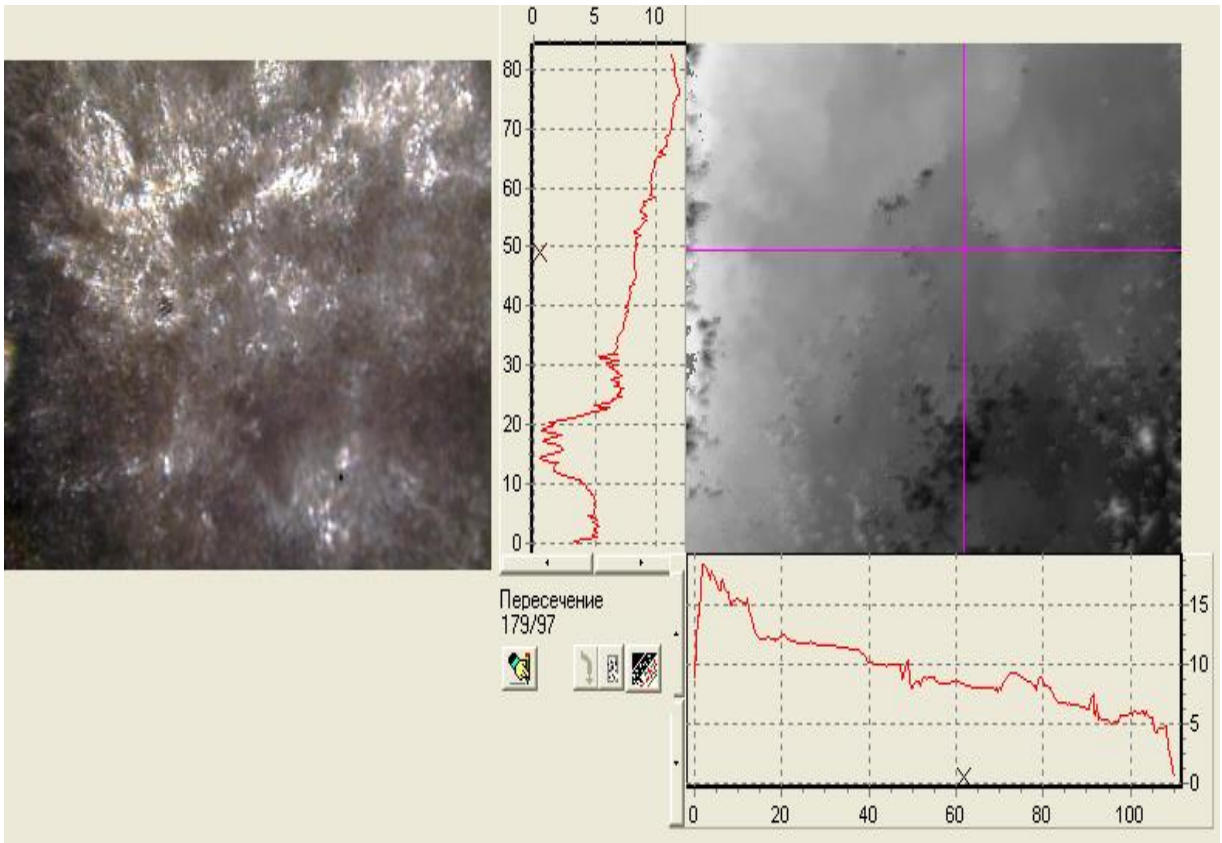
в)



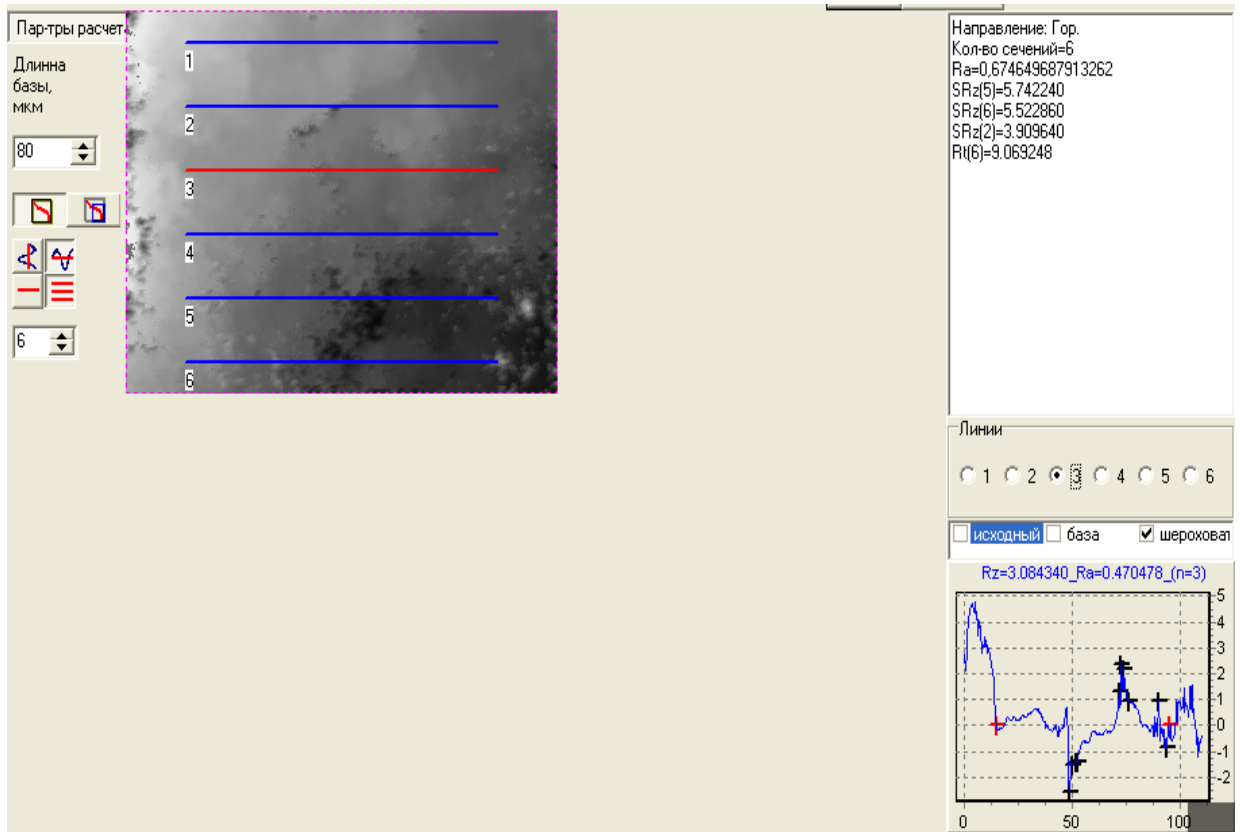
г)

а - состояние поверхности; б - шероховатость в продольном направлении; в- шероховатость в поперечном направлении;
г – 3D модель поверхности

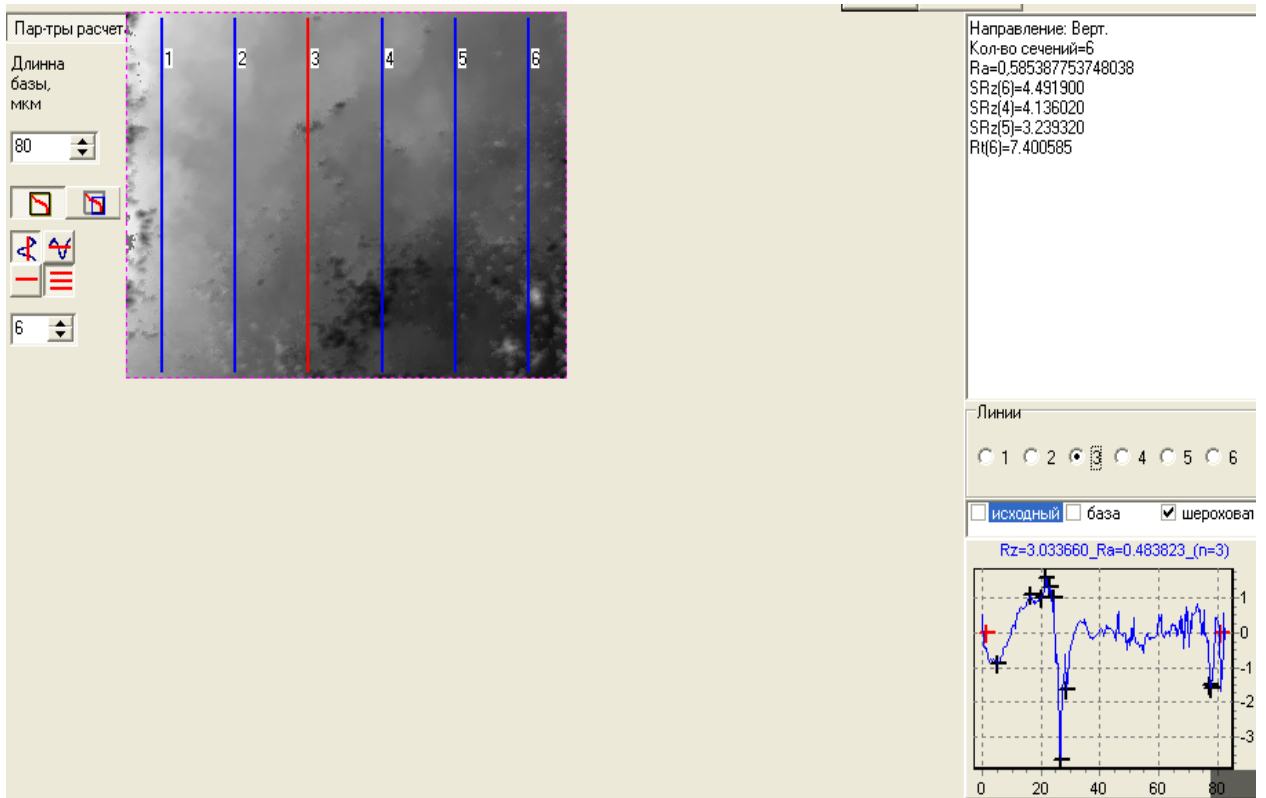
Рисунок Б 5 - Топография поверхности образца стали ВТ-20 после износа с трехкомпонентным нагружением ($A_{\text{поп}}=0,06\text{мм}$).



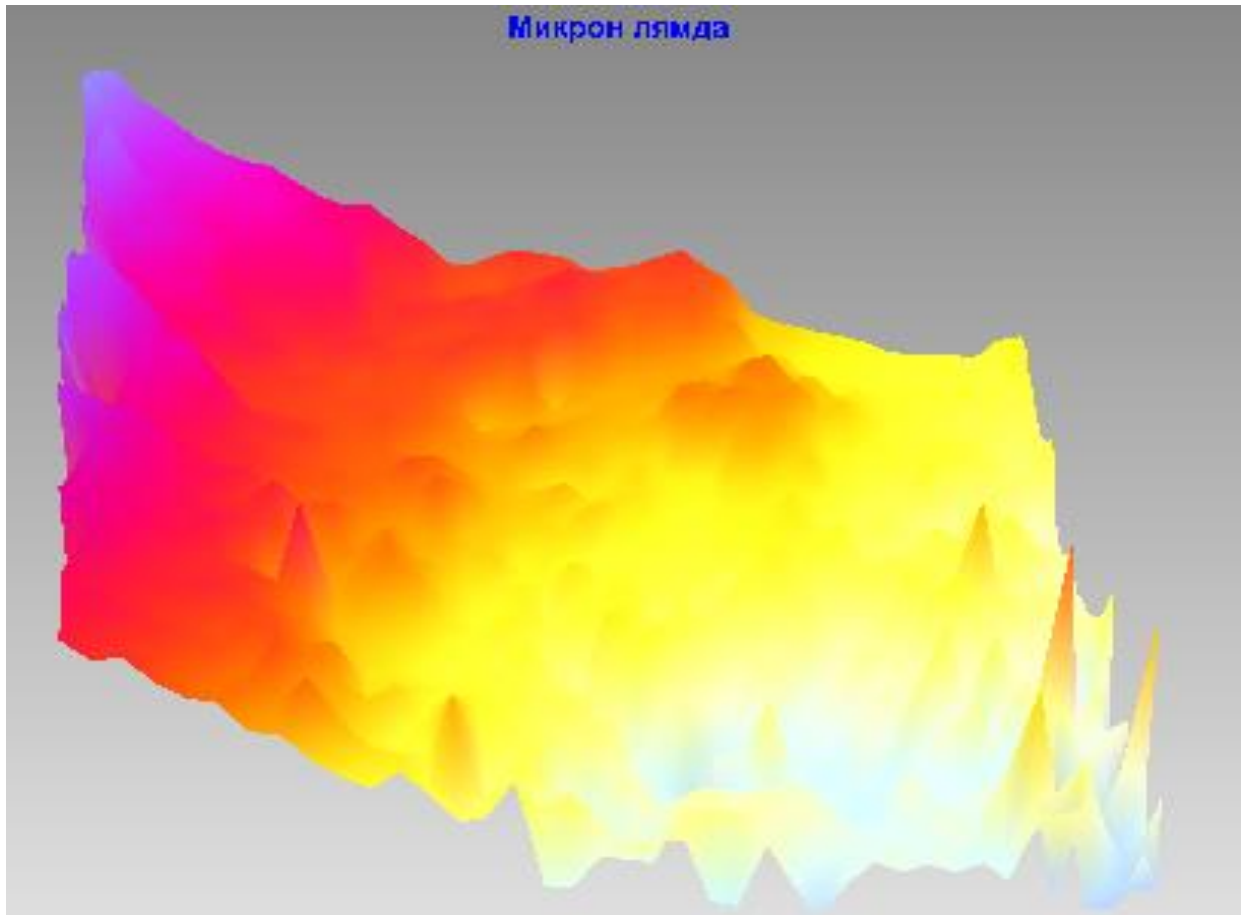
a)



б)



в)



г)

а - состояние поверхности; б - шероховатость в продольном направлении; в – шероховатость в поперечном направлении; г – 3D модель поверхности

Рисунок Б 6 - Топография поверхности образца стали ВТ-20 после износа с трехкомпонентным нагружением ($A_{\text{поп}} = 0,17\text{мм}$).

Приложение В

Результаты статистической обработки силы трения
индентора при сканировании поверхностного слоя

Таблица В 1. Изменение силы трения рисунка 4.2

График 2		График 3		График 1	
F, Н	P, Н	F, Н	P, Н	F, Н	P, Н
0,05	1,65	0	1,65	-0,05	1,65
0	1,8	-0,035	1,8	-0,02	1,8
-0,01	2	-0,02	2	-0,05	2
0	2,3	-0,05	2,3	-0,02	2,3
-0,01	3,75	0,28	3,75	0	3,75
0	4,25	0,3	4,25	-0,1	4,25
$0 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$0 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$
0,2	5,5	0,1	5,5	0	5,5
0,4	6	0,6	6	-0,1	6
-0,75	7	0,75	7	-0,15	7
-0,4	7,75	0,75	7,75	-0,01	7,75
0,5	7,85	0,6	7,85	-0,1	7,85
0,5	8,25	0,4	8,25	0,1	8,25
-0,25	9	0	9	0,15	9
0,3	9,85	0	9,85	0,4	9,85

Таблица В 2. Описательная статистика для графика 2:

	F, Н		P, Н
Среднее	0,035333333	Среднее	5,46333333
Стандартная ошибка	0,086160795	Стандартная ошибка	0,71606509
Медиана	0	Медиана	5,5
Мода	0	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонен	0,333699323	Стандартное отклон	2,77330815
Дисперсия выборки	0,111355238	Дисперсия выборки	7,6912381
Эксцесс	1,011902542	Эксцесс	-1,3563625
Асимметричность	-0,705954454	Асимметричность	-0,0197122
Интервал	1,25	Интервал	8,2
Минимум	-0,75	Минимум	1,65
Максимум	0,5	Максимум	9,85
Сумма	0,53	Сумма	81,95
Счет	15	Счет	15

Корреляционный анализ

	F, Н	P, Н
F, Н	1	
P, Н	0,07984	1

Коэффициент вариации

9,44432

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

	F, Н	P, Н
Среднее	0,0033333	5,4633333
Дисперсия	0,01791	7,691238
Наблюдения	15	15
df	14	14
F	0,002329	
P(F<=f) одностороннее	6,66E-16	
F критическое одностороннее	0,402621	

Таблица В 3 Описательная статистика для графика 3:

F, Н		P, Н	
Среднее	0,0033333333	Среднее	5,463333333
Стандартная ошибка	0,034553846	Стандартная ошибка	0,71606509
Медиана	-0,02	Медиана	5,5
Мода	0	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	0,133826469	Стандартное отклонение	2,77330815
Дисперсия выборки	0,017909524	Дисперсия выборки	7,6912381
Эксцесс	5,213445198	Эксцесс	-1,3563625
Асимметричность	2,036571666	Асимметричность	-0,0197122
Интервал	0,55	Интервал	8,2
Минимум	-0,15	Минимум	1,65
Максимум	0,4	Максимум	9,85
Сумма	0,05	Сумма	81,95
Счет	15	Счет	15

Корреляционный анализ

	F, Н	P, Н
F, Н	1	
P, Н	0,508052	1

Коэффициент вариации

40,14794

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

	F, Н	P, Н
Среднее	0,271667	5,4633333
Дисперсия	0,088606	7,691238
Наблюдения	15	15
df	14	14
F	0,01152	
P(F<=f) одностороннее	4,02E-11	
F критическое одностороннее	0,402621	

Таблица В 4 Описательная статистика для графика 1:

F, Н		P, Н	
Среднее	0,319	Среднее	5,463333333
Стандартная ошибка	0,025167061	Стандартная ошибка	0,71606509
Медиана	0,29	Медиана	5,5
Мода	#Н/Д	Мода	#Н/Д

Стандартное отклонение	0,097471608	Стандартное отклонение	2,77330815
Дисперсия выборки	0,009500714	Дисперсия выборки	7,6912381
Эксцесс	0,200802304	Эксцесс	-1,3563625
Асимметричность	0,969571034	Асимметричность	-0,0197122
Интервал	0,32	Интервал	8,2
Минимум	0,2	Минимум	1,65
Максимум	0,52	Максимум	9,85
Сумма	4,785	Сумма	81,95
Счет	15	Счет	15

Корреляционный анализ		Коэффициент вариации
F, Н	P, Н	
F, Н	1	0,305554
P, Н	0,932748	1

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

	F, Н	P, Н
Среднее	0,319	5,463333
Дисперсия	0,009501	7,691238
Наблюдения	15	15
df	14	14
F	0,001235	
P(F<=f) одностороннее	0	
F критическое одностороннее	0,402621	

Изменение силы трения во времени:

F, Н 10^{-4}	t, сек.		F, Н 10^{-4}	t, сек.		F, Н 10^{-4}	t, сек.	
0,3	0,37	2	-0,008	0,37	3	0,2	0,37	1
0,55	0,74		0,52	0,74		0,35	0,74	
0,9	1,11		0,7	1,11		0,53	1,11	
1,1	1,48		1,65	1,48		0,8	1,48	
1,55	1,85		2,75	1,85		1,2	1,85	
2	2,22		3,25	2,22		1,3	2,22	
2,5	2,59		3,85	2,59		1,7	2,59	
3	2,96		3,6	2,96		1,71	2,96	
1,75	3,33		4,6	3,33		1,75	3,33	
3,25	3,7		5,4	3,7		2,25	3,7	
4,1	4,07		5,6	4,07		2,35	4,07	
2,9	4,44		5,48	4,44		2,75	4,44	
4,25	4,81		5,75	4,81		3,15	4,81	
3,995	5,18		5,9	5,18		3,45	5,18	
4,8	5,5		6,2	5,5		3,8	5,5	

График 1

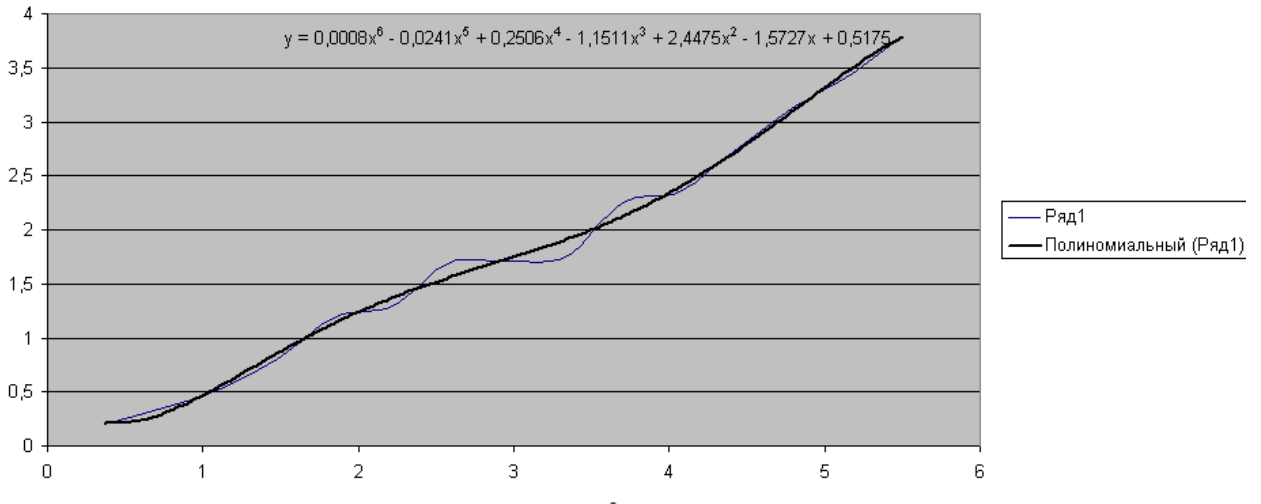


График 2

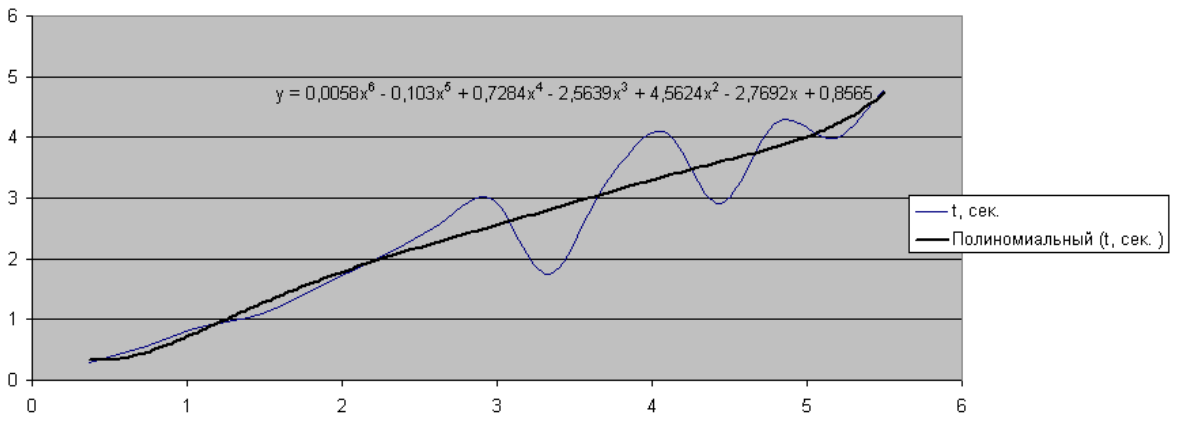


График 3

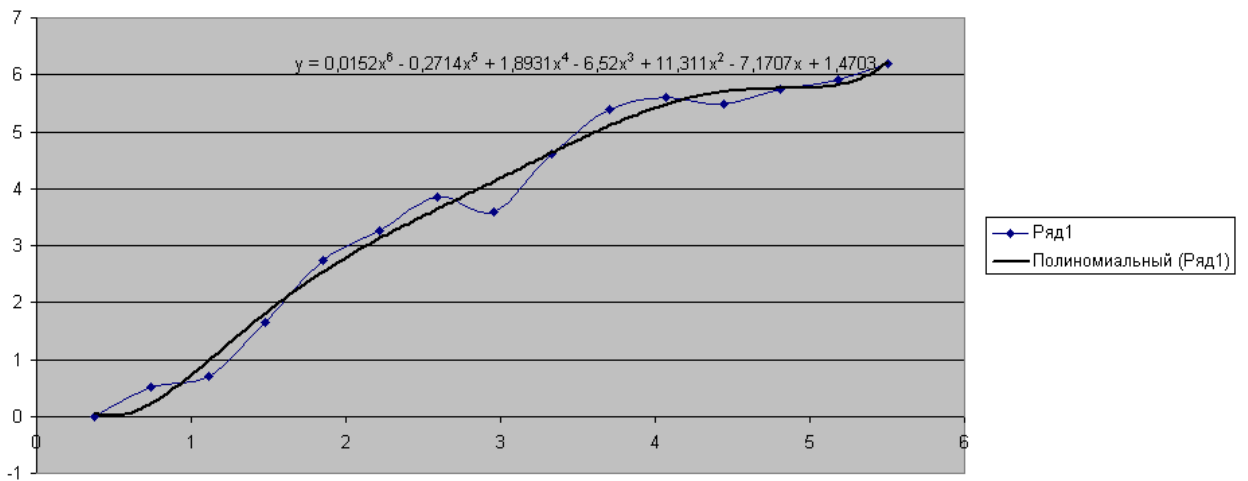


Таблица В 5. Изменение силы трения рисунка 4.1

График 1		График 2		График 3	
F, Н 10^{-4}	P, Н 10^{-2}	F, Н 10^{-4}	P, Н 10^{-2}	F, Н 10^{-4}	P, Н 10^{-2}
0,1	1,65	0	1,65	0	1,65
0,15	1,8	0	1,8	0	1,8
0	2	0	2	-0,1	2
0	2,75	0	2,75	-0,15	2,75
0	3,75	0	3,75	-0,15	3,75
0	4,25	0	4,25	-0,1	4,25
0	5	-0,2	5	-0,08	5
0	5,5	0	5,5	-0,04	5,5
0	6	0	6	-0,5	6
0	7	-0,1	7	0,6	7
0	7,75	0	7,75	0	7,75
0	7,85	0,05	7,85	0,05	7,85
0	8,25	0	8,25	0,3	8,25
-0,1	9	0	9	0,4	9
0	9,85	0	9,85	0,5	9,85

Таблица В 6 Описательная статистика для графиков рисунка 4.1

График 1

F, Н		P, Н	
Среднее	0,01	Среднее	5,493333
Стандартная ошибка	0,013972763	Стандартная ошибка	0,707172
Медиана	0	Медиана	5,5
Мода	0	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонен.	0,054116277	Стандартное отклон.	2,738865
Дисперсия выборки	0,002928571	Дисперсия выборки	7,501381
Эксцесс	3,871093214	Эксцесс	-1,32281
Асимметричность	1,107683644	Асимметричность	-0,01153
Интервал	0,25	Интервал	8,2
Минимум	-0,1	Минимум	1,65
Максимум	0,15	Максимум	9,85
Сумма	0,15	Сумма	82,4
Счет	15	Счет	15

График 2

F, Н		P, Н	
Среднее	-0,016666667	Среднее	5,493333
Стандартная ошибка	0,015170983	Стандартная ошибка	0,707172
Медиана	0	Медиана	5,5
Мода	0	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	0,058756965	Стандартное отклонение	2,738865
Дисперсия выборки	0,003452381	Дисперсия выборки	7,501381
Эксцесс	7,281715906	Эксцесс	-1,32281
Асимметричность	-2,595775557	Асимметричность	-0,01153
Интервал	0,25	Интервал	8,2
Минимум	-0,2	Минимум	1,65
Максимум	0,05	Максимум	9,85
Сумма	-0,25	Сумма	82,4
Счет	15	Счет	15

График 3

F, Н		P, Н	
Среднее	0,048667	Среднее	5,493333
Стандартная ошибка	0,074	Стандартная ошибка	0,707172
Медиана	0	Медиана	5,5
Мода	0	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	0,286602	Стандартное отклонение	2,738865
Дисперсия выборки	0,082141	Дисперсия выборки	7,501381
Эксцесс	0,272941	Эксцесс	-1,32281
Асимметричность	0,448725	Асимметричность	-0,01153
Интервал	1,1	Интервал	8,2
Минимум	-0,5	Минимум	1,65
Максимум	0,6	Максимум	9,85
Сумма	0,73	Сумма	82,4
Счет	15	Счет	15

Корреляционный анализ 1-го графика

	F, Н	P, Н
F, Н	1	
P, Н	-0,621192724	1

Корреляционный анализ 2-го графика

	F, Н	P, Н
F, Н	1	
P, Н	0,029220513	1

Корреляционный анализ 3-го графика

	F, Н	P, Н
F, Н	1	
P, Н	0,578949	1

Коэффициент вариации граф. 1 - 5,411627693

Коэффициент вариации граф.2 -3,525417908

Коэффициент вариации граф.3- 5,889091009

Двухвыборочный F-тест для дисперсии графика1

	F, Н	P, Н
Среднее	0,01	5,493333333
Дисперсия	0,002928571	7,501380952
Наблюдения	15	15
df	14	14
F	0,000390404	
P(F<=f) одностороннее	0	
F критическое односторонн	0,402620943	

Двухвыборочный F-тест для дисперсии графика 2

	F, Н	P, Н
Среднее	-0,016666667	5,493333
Дисперсия	0,003452381	7,501381
Наблюдения	15	15
df	14	14
F	0,000460233	
P(F<=f) одностороннее	0	
F критическое односторонн	0,402620943	

Двухвыборочный F-тест для дисперсии графика 3

	F, Н	P, Н
Среднее	0,048667	5,493333333
Дисперсия	0,082141	7,501380952
Наблюдения	15	15
df	14	14
F	0,01095	
P(F<=f) одностороннее	2,83E-11	
F критическое односторон	0,402621	

Изменение силы трения во времени:

1		2		3	
F, Н	t, сек.	F, Н	t, сек.	F, Н10 ⁻⁴	t, сек.
10 ⁻⁴	0,37	10 ⁻⁴	0,37	0,2	0,37
0,46	0,74	0,6	0,74	0,46	0,74
0,79	1,11	0,79	1,11	0,85	1,11
1,2	1,48	1,2	1,48	1,25	1,48
1,4	1,85	1,45	1,85	1,6	1,85
1,75	2,22	1,85	2,22	2,18	2,22
2	2,59	2,25	2,59	2,5	2,59
2,18	2,96	2,45	2,96	2,61	2,96
2,38	3,33	2,75	3,33	3,2	3,33
2,65	3,7	3	3,7	3,1	3,7
2,82	4,07	3,35	4,07	4,55	4,07
3	4,44	3,45	4,44	4,21	4,44
3,3	4,81	3,8	4,81	4,61	4,81
3,6	5,18	4,1	5,18	5,3	5,18
3,75	5,5	4,21	5,5	5,6	5,5

График 1

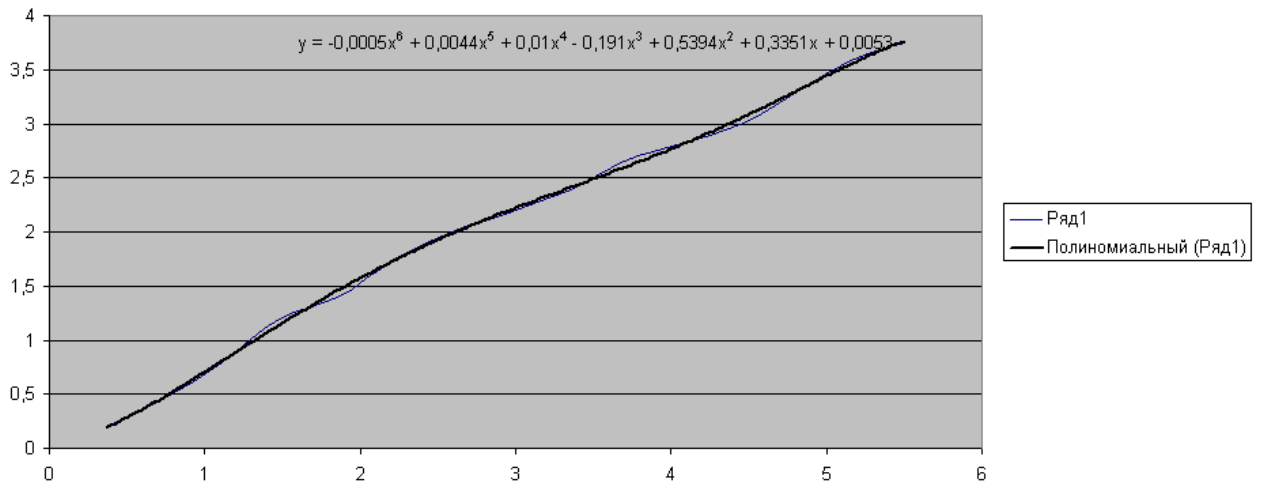


График 2

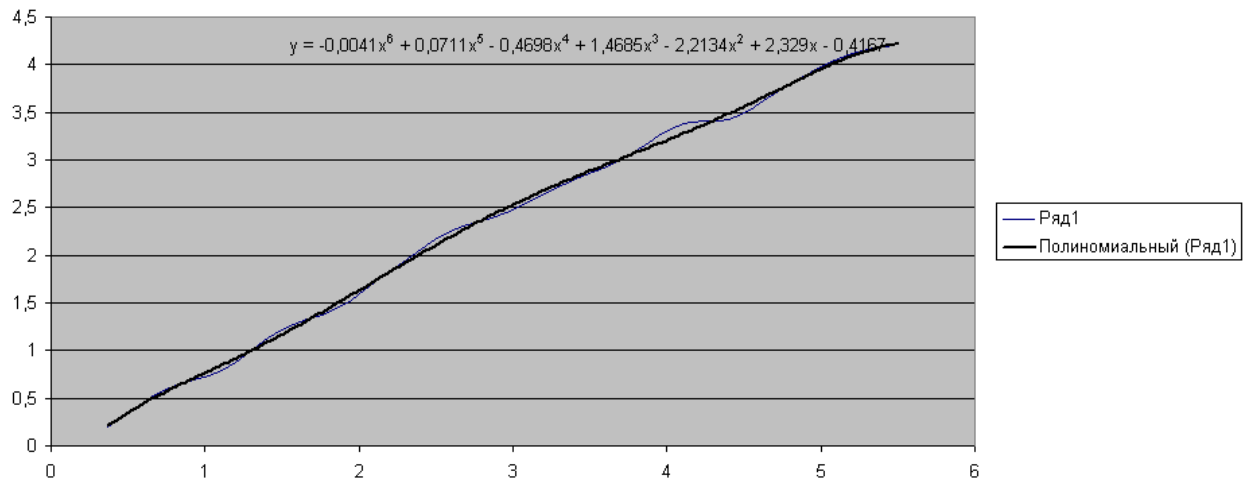


График 3

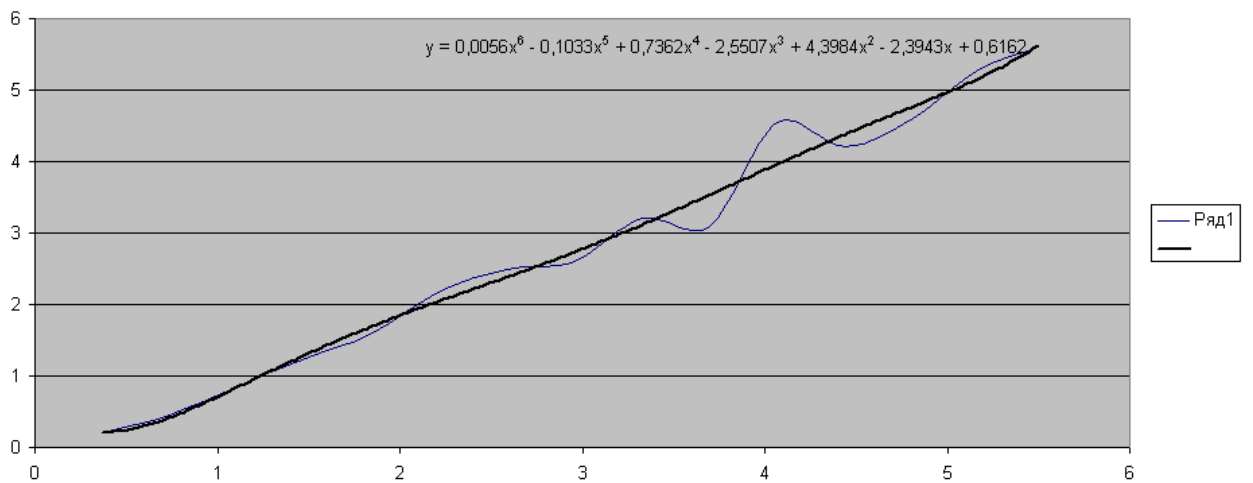


Таблица В 7. Изменение силы трения рисунка 4.3

График 1		График 2		График 3	
F, Н	P, Н	F, Н	P, Н	F, Н	P, Н
$0 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$0,10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$-0,10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$
0	1,8	0,2	1,8	-0,5	1,8
0	2	0,3	2	-0,8	2
0,2	2,75	0,4	2,75	-1,1	2,75
0,15	3,75	-0,1	3,75	0,05	3,75
0,1	4,25	0,3	4,25	-0,2	4,25
-0,02	5	0,4	5	0,4	5
0	5,5	0,1	5,5	0,05	5,5
0,1	6	0,45	6	0,5	6
0,16	7	0,5	7	0,1	7
0,18	7,75	0,2	7,75	0,6	7,75
0,1	7,85	0,3	7,85	0,6	7,85
0,35	8,25	0,05	8,25	0,9	8,25
0,25	9	0,25	9	0,8	9
0,25	9,85	0,15	9,85	0,8	9,85

Таблица В 8. Описательная статистика для графиков рисунка 4.3

График 1			
F, Н		P, Н	
Среднее	0,121333333	Среднее	5,493333333
Стандартная ошибка	0,029078984	Стандартная ошибка	0,707171877
Медиана	0,1	Медиана	5,5
Мода	0	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	0,11262242	Стандартное отклонение	2,738864902
Дисперсия выборки	0,01268381	Дисперсия выборки	7,501380952
Эксцесс	-0,62590402	Эксцесс	-1,322812647
Асимметричность	0,403275692	Асимметричность	-0,011534535
Интервал	0,37	Интервал	8,2
Минимум	-0,02	Минимум	1,65
Максимум	0,35	Максимум	9,85
Сумма	1,82	Сумма	82,4
Счет	15	Счет	15

График 2			
F, Н		P, Н	
Среднее	0,236667	Среднее	5,493333
Стандартная ошибка	0,043223	Стандартная ошибка	0,707172
Медиана	0,25	Медиана	5,5
Мода	0,3	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	0,167403	Стандартное отклонение	2,738865
Дисперсия выборки	0,028024	Дисперсия выборки	7,501381
Эксцесс	-0,40596	Эксцесс	-1,32281
Асимметричность	-0,29903	Асимметричность	-0,01153
Интервал	0,6	Интервал	8,2
Минимум	-0,1	Минимум	1,65
Максимум	0,5	Максимум	9,85
Сумма	3,55	Сумма	82,4
Счет	15	Счет	15

График 3			
F, Н		P, Н	
Среднее	0,14	Среднее	5,493333
Стандартная ошибка	0,155701	Стандартная ошибка	0,707172
Медиана	0,1	Медиана	5,5
Мода	0,05	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	0,603028	Стандартное отклонение	2,738865
Дисперсия выборки	0,363643	Дисперсия выборки	7,501381
Эксцесс	-0,31755	Эксцесс	-1,32281
Асимметричность	-0,66943	Асимметричность	-0,01153
Интервал	2	Интервал	8,2
Минимум	-1,1	Минимум	1,65
Максимум	0,9	Максимум	9,85
Сумма	2,1	Сумма	82,4
Счет	15	Счет	15

	F, Н	P, Н
F, Н	1	
P, Н	0,680721803	1
графика 2		
	F, Н	P, Н
F, Н	1	
P, Н	0,052371	1
графика 3		
		P, Н
	1	
P, Н	0,862858	1

Коэффициент вариации граф. 1 Коэффиц. вариации граф. 2 Коэфф. вариации граф. 3
0,92820676 0,707337189 4,307343

Двухвыборочный F-тест для дисперсии графика 1

	F, Н	P, Н
Среднее	0,121333333	5,493333333
Дисперсия	0,01268381	7,501380952
Наблюдения	15	15
df	14	14
F	0,001690863	
P(F<=f) одностороннее	1,11022E-16	
F критическое одностороннее	0,402620943	

Двухвыборочный F-тест для дисперсии графика 2

	F, Н	P, Н
Среднее	0,236667	5,493333333
Дисперсия	0,028024	7,501380952
Наблюдения	15	15
df	14	14
F	0,003736	
P(F<=f) одностороннее	1,67E-14	
F критическое одностороннее	0,402621	

Двухвыборочный F-тест для дисперсии графика 3

	F, Н	P, Н
Среднее	0,14	5,493333
Дисперсия	0,363643	7,501381
Наблюдения	15	15
df	14	14
F	0,048477	
P(F<=f) одностороннее	6,05E-07	
F критическое одностороннее	0,402621	

Изменение силы трения во времени:

1		2		3	
F, Н 10^{-4}	t, сек.	F, Н 10^{-4}	t, сек.	F, Н 10^{-4}	t, сек.
0,2	0,37	0,3	0,37	-0,08	0,37
0,55	0,74	1	0,74	-0,15	0,74
1,25	1,11	1,6	1,11	-0,2	1,11
1	1,48	2,5	1,48	-0,22	1,48
1,9	1,85	2,2	1,85	1,6	1,85
2,3	2,22	3,5	2,22	1,75	2,22
2,45	2,59	3,8	2,59	2,65	2,59
2,4	2,96	3,7	2,96	2,7	2,96
3,1	3,33	4,4	3,33	3,2	3,33
3,6	3,7	5,2	3,7	3,5	3,7
4	4,07	4,8	4,07	3,75	4,07
3,85	4,44	5,3	4,44	3,25	4,44
4,75	4,81	5,75	4,81	3,45	4,81
4,8	5,18	6,3	5,18	4,1	5,18
5	5,5	6,7	5,5	4,6	5,5

График 2

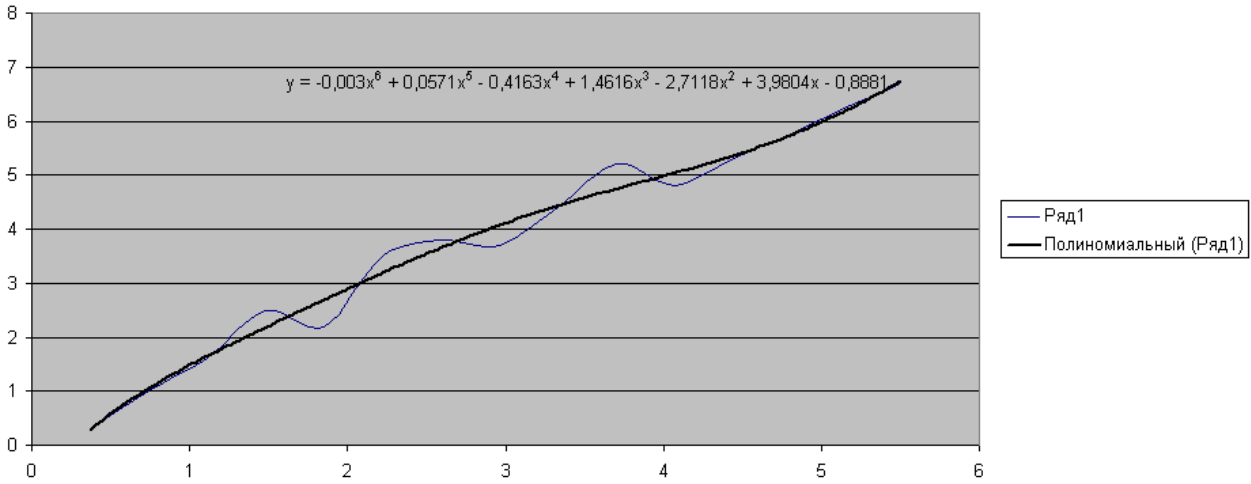


График 3

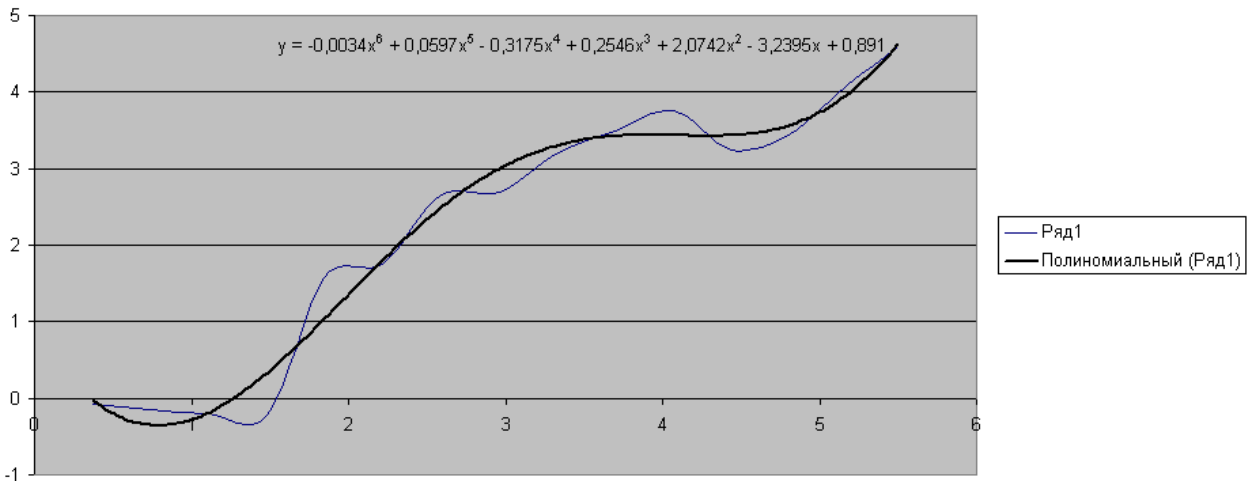


График 1

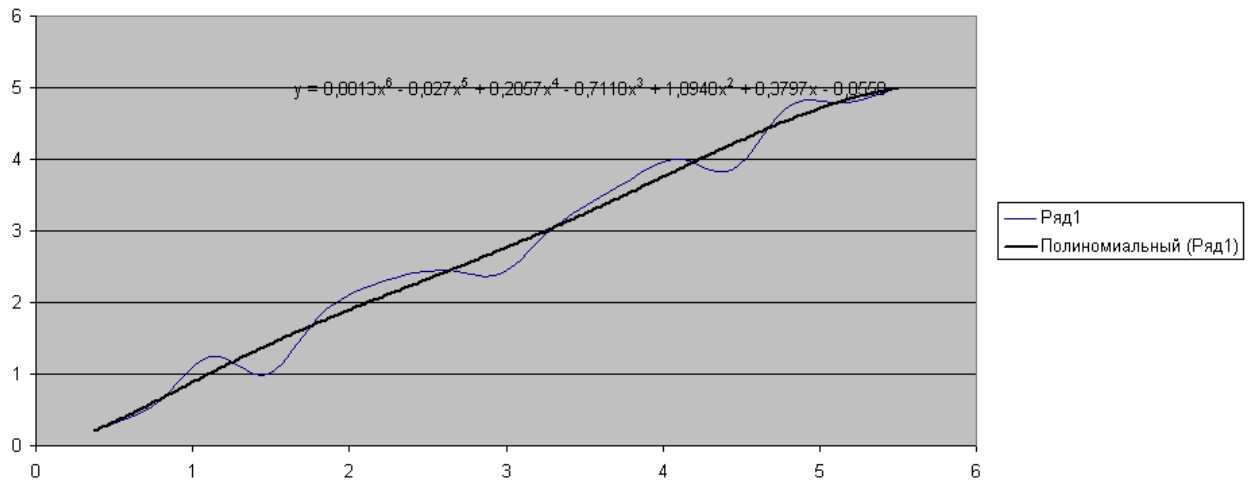


Таблица В 9. Изменение силы трения и описательная статистика для графика рисунка 6.12 а)

P, сН	N, сН
-0,1	3,7
-0,15	8,45
-0,05	14,05
-0,1	20,4
-0,1	26,75
-0,02	33,15
0,3	39,5
0,1	45,9
0,02	47,75
0,4	41,35
-0,02	35
0,1	28,65
0,15	22,25
0	9,25
-0,25	5,25

P, сН		N, сН	
Среднее	0,018667	Среднее	25,42667
Стандартная ошибка	0,043968	Стандартная ошибка	3,858426
Медиана	-0,02	Медиана	26,75
Мода	-0,1	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	0,170288	Стандартное отклонен.	14,94362
Дисперсия выборки	0,028998	Дисперсия выборки	223,3117
Эксцесс	0,731014	Эксцесс	-1,35142
Асимметричность	0,85805	Асимметричность	-0,03267
Интервал	0,65	Интервал	44,05
Минимум	-0,25	Минимум	3,7
Максимум	0,4	Максимум	47,75
Сумма	0,28	Сумма	381,4
Счет	15	Счет	15

Корреляционный анализ

	P, сН	N, сН
P, сН	1	
N, сН	0,653665	1

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

	P, сН	N, сН
Среднее	0,018667	25,42667
Дисперсия	0,028998	223,3117
Наблюдения	15	15
df	14	14
F	0,00013	
P(F<=f) одностороннее	0	
F критическое одностороннее	0,402621	

Изменение силы трения во времени:

P, сН	t, сек.
-0,55	0,74
-1,2	1,48
-1,5	2,22
-2,22	2,96
-2,9	3,7
-3,4	4,44
-3,5	5,18
-4,4	5,92
-4,1	6,66
-3	7,4
-1,9	8,14
-1,4	8,88
-1	9,62
-0,4	10,36
-0,3	11

График 1

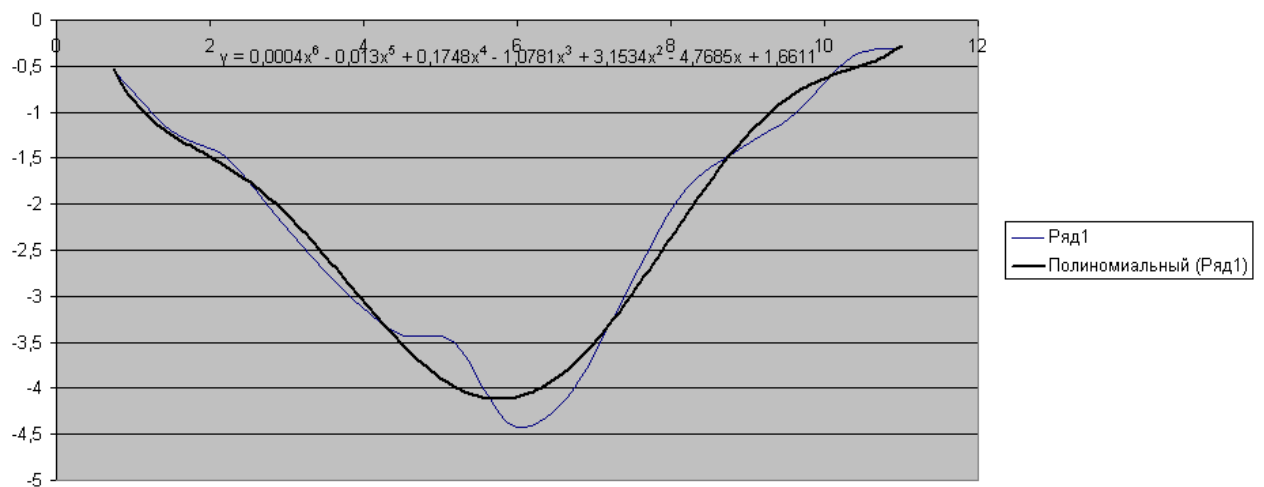


Таблица В 10. Изменение силы трения и описательная статистика для графика рисунка 6.12 б)

P, сН	N, сН
0	3,7
0,1	8,45
0,1	14,05
0,18	20,4
-0,2	26,75
-0,2	33,15
0,1	39,5
0,1	45,9
0	47,75
0,05	41,35
0,2	35
0,21	28,65
0,1	22,25
-0,1	9,25
-0,25	5,25

P, сН	N, сН	Среднее	Стандартная
Среднее	0,026	Среднее	25,42667
Стандартная ошибка	0,038505	Стандартная ошибка	3,858426
Медиана	0,1	Медиана	26,75
Мода	0,1	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	0,149131	Стандартное отклон.	14,94362
Дисперсия выборки	0,02224	Дисперсия выборки	223,3117
Эксцесс	-0,64797	Эксцесс	-1,35142
Асимметричность	-0,71956	Асимметричность	-0,03267
Интервал	0,46	Интервал	44,05
Минимум	-0,25	Минимум	3,7
Максимум	0,21	Максимум	47,75
Сумма	0,39	Сумма	381,4
Счет	15	Счет	15

	P, сН	N, сН
P, сН	1	
N, сН	0,244781	1

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

	P, сН	N, сН
Среднее	0,026	25,42667
Дисперсия	0,02224	223,3117
Наблюдения	15	15
df	14	14
F	9,96E-05	
P(F<=f) одностороннее	0	
F критическое одностороннее	0,402621	

Изменение силы трения во времени:

P, сН t, сек.

-0,4	0,74
-0,85	1,48
-1,5	2,22
-1,9	2,96
-3,2	3,7
-4	4,44
-4,2	5,18
-4,8	5,92
-5,4	6,66
-4,6	7,4
-3,8	8,14
-3,1	8,88
-2,6	9,62
-1,7	10,36
-1,4	11

График 1

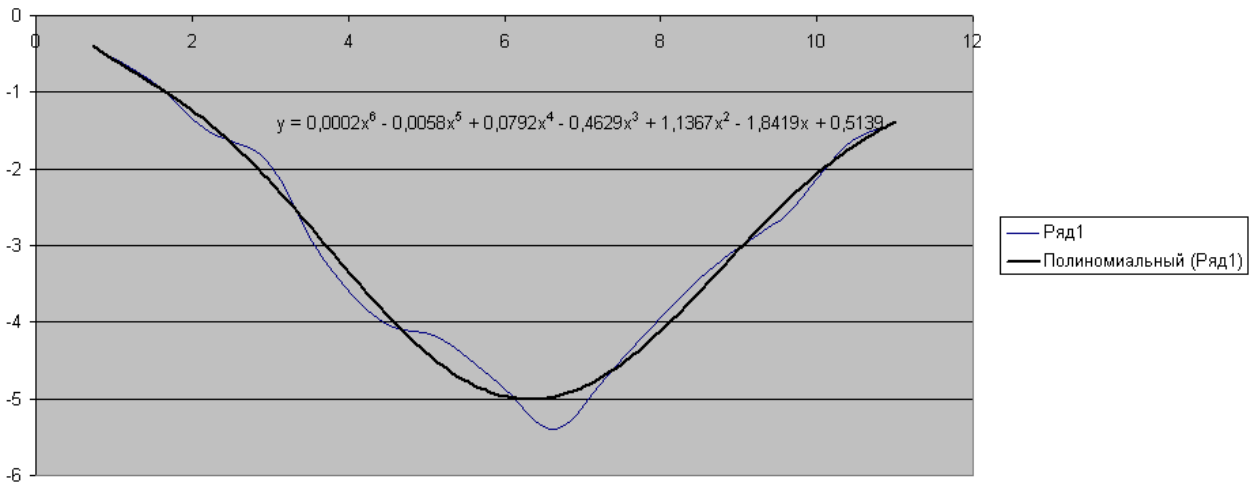


Таблица В 11. Изменение силы трения и описательная статистика для графика рисунка 6.14

график 1		график 2	
Н, мкм	L, мкм	Н, мкм	L, мкм
0	40	-0,1	40
0,2	80	-0,15	80
0,2	120	0,25	120
0	140	0,2	140
0,2	160	0,08	160
0	180	-0,1	180
-0,2	200	0	200
0	220	-0,2	220
0,1	240	-0,2	240
0,15	260	-0,3	260
-0,08	280	0	280
0	320	0,05	320
-0,06	360	0,05	360
0	400	0	400

график 1	
Н, мкм	L, мкм

график 2	
Н, мкм	L, мкм

Среднее	0,03642	Среднее	214,285
Стандартн ошибка	0,03178	Стандартн ошибка	27,8479
Медиана	0	Медиана	210
Мода	0	Мода	#Н/Д
Стандартн отклонение	0,11894	Стандартн отклонение	104,197
Дисперсия выборки	0,01414	Дисперсия выборки	10857,1
Эксцесс	-0,3341	Эксцесс	-0,5642
Асиммет ричность	-0,0602	Асиммет ричность	0,15153
Интервал	0,4	Интервал	360
Минимум	-0,2	Минимум	40
Максимум	0,2	Максимум	400
Сумма	0,51	Сумма	3000
Счет	14	Счет	14

Среднее	-0,03	Среднее	214,285
Стандартн ошибка	0,04152	Стандартн ошибка	27,8479
Медиана	0	Медиана	210
Мода	0	Мода	#Н/Д
Стандартн отклонение	0,15536	Стандартн отклонение	104,197
Дисперсия выборки	0,02413	Дисперсия выборки	10857,1
Эксцесс	-0,3930	Эксцесс	-0,5642
Асиммет ричность	0,11084	Асиммет ричность	0,15153
Интервал	0,55	Интервал	360
Минимум	-0,3	Минимум	40
Максимум	0,25	Максимум	400
Сумма	-0,42	Сумма	3000
Счет	14	Счет	14

	Н, мкм	L, мкм
Н, мкм	1	
L, мкм	-0,36176	1

	Н, мкм	L, мкм
Н, мкм	1	
L, мкм	-0,0437	1

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

	Н, мкм	L, мкм
Среднее	0,0364	214,2857
Дисперсия	0,0141	10857,14
Наблюдения	14	14
df	13	13
	1,3E-	
F	06	
P(F<=f)		
одностор.	0	
F кр.		
одностор.	0,3880	

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

	Н, мкм	L, мкм
Среднее	-0,03	214,2857
Дисперсия	0,02413	10857,14
Наблюдения	14	14
df	13	13
	2,22E-	
F	06	
P(F<=f)		
одностор.	0	
F кр.		
одностор.	0,38805	

Изменение силы трения во времени:

Н, мкм	t, сек.	Н, мкм	t, сек.
0,8	0,79	1	0,79
1,9	1,58	2,1	1,58
3	2,37	3,8	2,37
2,6	3,16	4,4	3,16
2,9	3,95	4,8	3,95
3,4	4,74	5,15	4,74
3,6	5,53	5,8	5,53
3,5	6,32	4,8	6,32
3,35	7,11	4,4	7,11
2,8	7,9	3,6	7,9
2,2	8,69	3,8	8,69
1,6	9,48	3,4	9,48
1,2	10,27	3	10,27
0,6	11	1,8	11

График 1

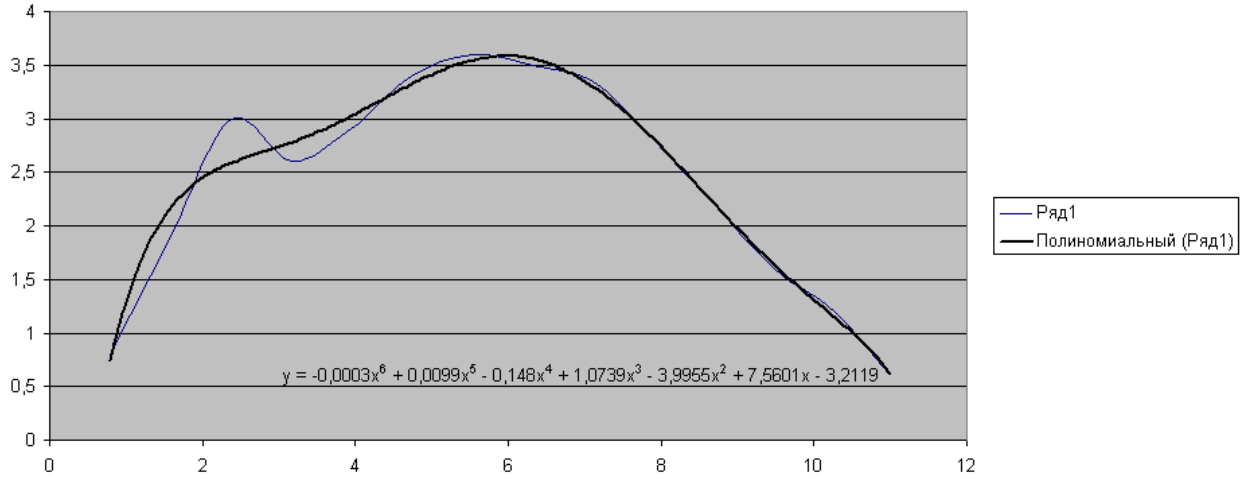


График 2

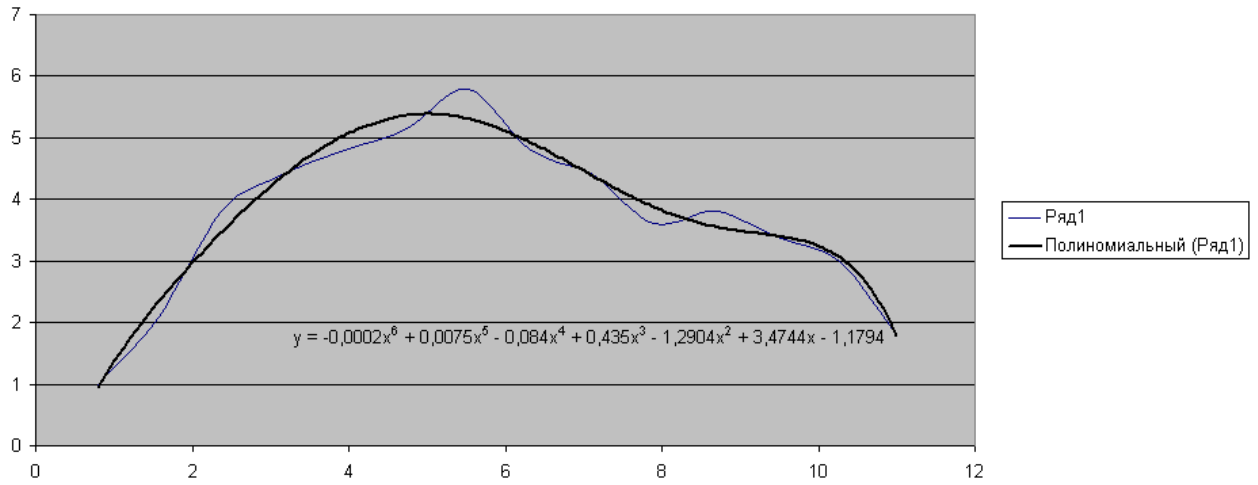


Таблица В 12. Изменение силы трения и описательная статистика для графика рисунка 4.17

график 1	
Глубина внедрения, мкм	Длина трассы, мкм
0,9	0,51
0,3	100,51
-1	200,51
0	300,51
3,7	400,51
0,4	500,51
-0,3	600,51
0,1	700,51
-1,5	800,51
-0,2	900,51
1	1000,51
-0,6	1100,51
-1	1200,51
0,1	1300,51
0,05	1400,51
0	1500,51
0,3	1600,51

1,5	1700,51
-0,1	1800,51
0	1900,51

		Длина трассы, мкм	
Среднее	0,1825	Среднее	950,51
Стандартная ошибка	0,241685	Стандартная ошибка	132,2876
Медиана	0,025	Медиана	950,51
Мода	0	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	1,080847	Стандартное отклон.	591,608
Дисперсия выборки	1,16823	Дисперсия выборки	350000
Эксцесс	5,416766	Эксцесс	-1,2
Асимметричность	1,758818	Асимметричность	-1E-16
Интервал	5,2	Интервал	1900
Минимум	-1,5	Минимум	0,51
Максимум	3,7	Максимум	1900,51
Сумма	3,65	Сумма	19010,2
Счет	20	Счет	20

Корреляционный анализ

		Длина трассы, мкм	
	1		
Длина трассы, мкм	-0,1035	1	

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

		Длина трассы, мкм	
Среднее	0,1825	950,51	
Дисперсия	1,16823	350000	
Наблюдения	20	20	
df	19	19	
F	3,34E-06		
P(F<=f) одностороннее	0		
F критическое одностороннее	0,461201		

график 2

Глубина внедрения, мкм	Длина трассы, мкм
0,4	0,51
0	100,51
0	200,51
0,1	300,51
-0,45	400,51
0	500,51
0,6	600,51
1	700,51
-0,1	800,51
1,2	900,51
-0,8	1000,51
-0,5	1100,51
-0,4	1200,51
-0,6	1300,51
0	1400,51
0	1500,51

-0,2	1600,51
0,1	1700,51
0,6	1800,51
0	1900,51

		Длина трассы, мкм	
Среднее	0,0475	Среднее	950,51
Стандартная ошибка	0,114218	Стандартная ошибка	132,2876
Медиана	0	Медиана	950,51
Мода	0	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	0,510798	Стандартное отклон.	591,608
Дисперсия выборки	0,260914	Дисперсия выборки	350000
Эксцесс	0,361938	Эксцесс	-1,2
Асимметричность	0,658319	Асимметричность	-1E-16
Интервал	2	Интервал	1900
Минимум	-0,8	Минимум	0,51
Максимум	1,2	Максимум	1900,51
Сумма	0,95	Сумма	19010,2
Счет	20	Счет	20

		Длина трассы, мкм	
	1		
Длина трассы, мкм	-0,11713	1	

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

		Длина трассы, мкм	
Среднее	0,0475	950,51	
Дисперсия	0,260914	350000	
Наблюдения	20	20	
df	19	19	
F	7,45E-07		
P(F<=f) одностороннее	0		
F кр. одностороннее	0,461201		

график 3

Глубина внедрения, мкм	Длина трассы, мкм
0	0,51
-0,1	100,51
-0,5	200,51
-0,6	300,51
-0,3	400,51
-0,1	500,51
0	600,51
-0,1	700,51
-0,25	800,51
-2	900,51
-0,8	1000,51
-0,6	1100,51
-0,55	1200,51
-0,7	1300,51
-0,5	1400,51
-0,1	1500,51
0	1600,51

0	1700,51
-0,7	1800,51
0	1900,51

Длина трассы, мкм			
Среднее	-0,395	Среднее	950,51
Стандартная ошибка	0,105313	Стандартная ошибка	132,2876
Медиана	-0,275	Медиана	950,51
Мода	0	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	0,470973	Стандартное отклон.	591,608
Дисперсия выборки	0,221816	Дисперсия выборки	350000
Эксцесс	6,49897	Эксцесс	-1,2
Асимметричность	-2,16422	Асимметричность	-1E-16
Интервал	2	Интервал	1900
Минимум	-2	Минимум	0,51
Максимум	0	Максимум	1900,51
Сумма	-7,9	Сумма	19010,2
Счет	20	Счет	20

Длина трассы, мкм		
	1	
Длина трассы, мкм	-0,03117	1

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

Длина трассы, мкм		
Среднее	-0,395	950,51
Дисперсия	0,221816	350000
Наблюдения	20	20
df	19	19
F	6,34E-07	
P(F<=f) одностороннее	0	
F кр одностороннее	0,461201	

Изменение силы трения во времени:

Глубина внедрения, мкм	t, сек.	Глубина внедрения, мкм	t, сек.	Глубина внедрения, мкм	t, сек.
0	0,55	0	0,55	0	0,55
-1,6	1,1	-0,6	1,1	-0,8	1,1
-3,5	1,65	-2,2	1,65	-2,4	1,65
-0,5	2,2	-4	2,2	-2,6	2,2
-3,7	2,75	-4,2	2,75	-5,3	2,75
-5	3,3	-5,8	3,3	-6,2	3,3
-6,4	3,85	-6,6	3,85	-6,9	3,85
-7,1	4,4	-7	4,4	-7,6	4,4
-9,6	4,95	-7,7	4,95	-9	4,95
-10,5	5,5	-8,7	5,5	-10,5	5,5
-9,5	6,05	-9,5	6,05	-11,5	6,05
-10,5	6,6	-10,5	6,6	-10,5	6,6
-9,3	7,15	-8,7	7,15	-9	7,15
-7,5	7,7	-7,7	7,7	-8	7,7
-6	8,25	-5,2	8,25	-6,7	8,25
-5	8,8	-5	8,8	-5,3	8,8
-1,9	9,35	-3	9,35	-4	9,35

-2,5	9,9	-2,3	9,9	-3	9,9
-0,8	10,45	-0,8	10,45	-2,4	10,45
-0,5	11	-0,5	11	-0,5	11

График 1

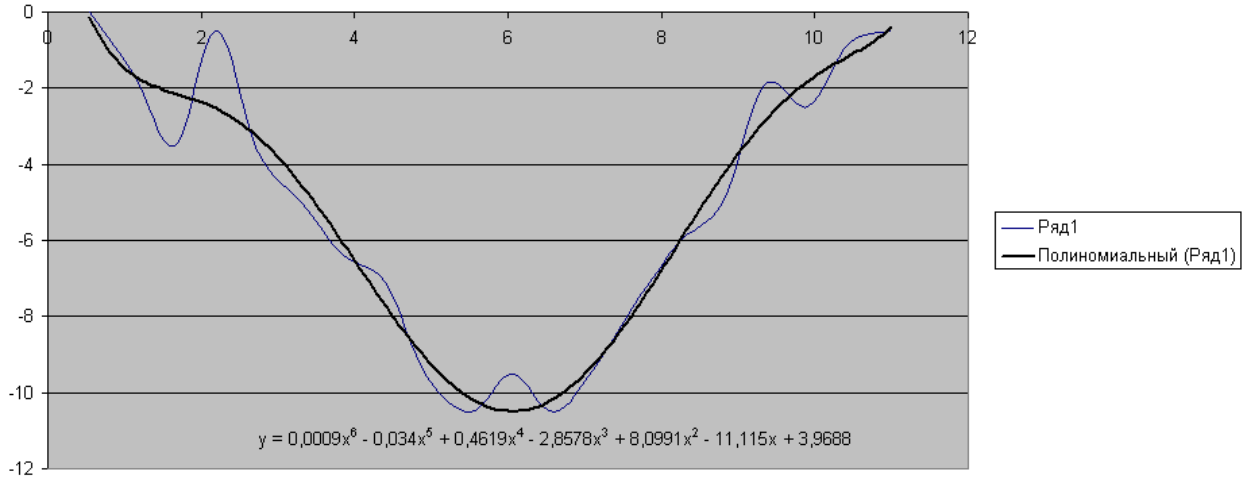


График 2

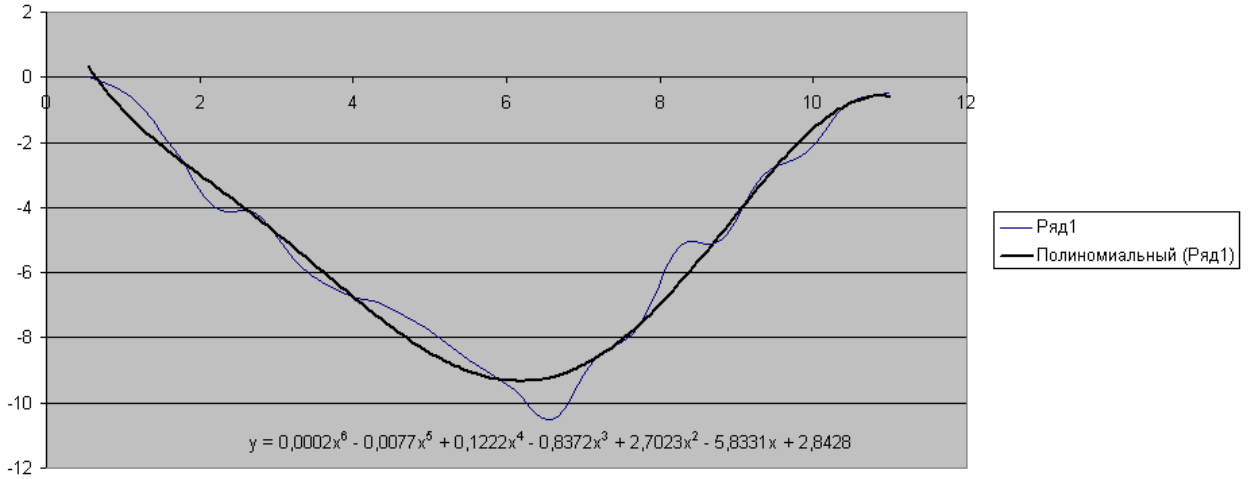


График 3

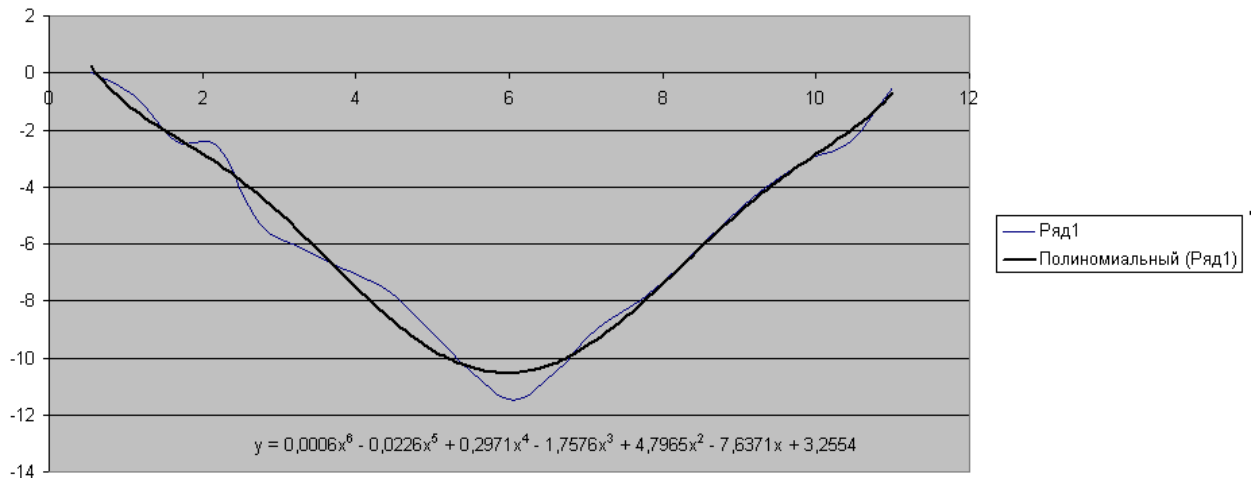


Таблица В 13. Изменение силы трения и описательная статистика для графика рисунка 4.15

график 1

Глубина внедрения, мкм	Длина трассы, мкм
-9,1	300,51
-11,5	400,51
-9,8	500,51
-11,3	600,51
-11,2	700,51
-10,5	800,51
-10	900,51
-6,5	1000,51
-11,9	1100,51
-12,5	1200,51
-10,5	1300,51
-9,2	1400,51
-11,2	1500,51
-10,5	1600,51
-10,2	1700,51
-9,7	1800,51
-9,3	1900,51

		Длина трассы, мкм	
Среднее	-10,0889	Среднее	1050,51
Стандартная ошибка	0,372844	Стандартная ошибка	125,8306
Медиана	-10,35	Медиана	1050,51
Мода	-10,5	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	1,581841	Стандартное отклон.	533,8539
Дисперсия выборки	2,502222	Дисперсия выборки	285000
Эксцесс	1,121438	Эксцесс	-1,2
Асимметричность	1,001346	Асимметричность	-1,8E-16
Интервал	6	Интервал	1700
Минимум	-12,5	Минимум	200,51
Максимум	-6,5	Максимум	1900,51
Сумма	-181,6	Сумма	18909,18
Счет	18	Счет	18

Корреляционный анализ

		Длина трассы, мкм	
	1		
Длина трассы, мкм	-0,14628	1	

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

		Длина трассы, мкм	
Среднее	-10,0889	1050,51	
Дисперсия	2,502222	285000	
Наблюдения	18	18	
df	17	17	
F	8,78E-06		
P(F<=f) одностороннее	0		
F критическое одностороннее	0,440162		

график 2

Глубина внедрения, мкм	Длина трассы, мкм
-8,2	300,51

-10,7	400,51
-11,2	500,51
-10,3	600,51
-10,4	700,51
-10,6	800,51
-10,5	900,51
-10,3	1000,51
-11,2	1100,51
-10,5	1200,51
-10,4	1300,51
-9,7	1400,51
-10	1500,51
-10,5	1600,51
-10,7	1700,51
-8,7	1800,51
-9,3	1900,51

Длина трассы, мкм			
Среднее	-10,0944	Среднее	1050,51
Стандартная ошибка	0,20024	Стандартная ошибка	125,8306
Медиана	-10,4	Медиана	1050,51
Мода	-10,5	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	0,849548	Стандартное отклон.	533,8539
Дисперсия выборки	0,721732	Дисперсия выборки	285000
Эксцесс	0,278863	Эксцесс	-1,2
Асимметричность	1,013511	Асимметричность	-1,8E-16
Интервал	3	Интервал	1700
Минимум	-11,2	Минимум	200,51
Максимум	-8,2	Максимум	1900,51
Сумма	-181,7	Сумма	18909,18
Счет	18	Счет	18

Длина трассы, мкм		
	1	
Длина трассы, мкм	-0,03178	1

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

Длина трассы, мкм		
Среднее	-10,0944	1050,51
Дисперсия	0,721732	285000
Наблюдения	18	18
df	17	17
F	2,53E-06	
P(F<=f) одностороннее	0	
F кр. одностороннее	0,440162	

график 3

Глубина внедрения, мкм	Длина трассы, мкм
-11,1	300,51
-10,5	400,51
-10	500,51
-10,3	600,51

-10,5	700,51
-10,4	800,51
-11,5	900,51
-10,6	1000,51
-10,8	1100,51
-11	1200,51
-10,6	1300,51
-10	1400,51
-10,3	1500,51
-11,5	1600,51
-11	1700,51
-8,7	1800,51
-10,7	1900,51

		Длина трассы, мкм	
Среднее	-10,5667	Среднее	1050,51
Стандартная ошибка	0,149071	Стандартная ошибка	125,8306
Медиана	-10,6	Медиана	1050,51
Мода	-10,7	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	0,632456	Стандартное отклон.	533,8539
Дисперсия выборки	0,4	Дисперсия выборки	285000
Эксцесс	3,738404	Эксцесс	-1,2
Асимметричность	1,29572	Асимметричность	-1,8E-16
Интервал	2,8	Интервал	1700
Минимум	-11,5	Минимум	200,51
Максимум	-8,7	Максимум	1900,51
Сумма	-190,2	Сумма	18909,18
Счет	18	Счет	18

		Длина трассы, мкм	
	1		
Длина трассы, мкм	0,153314	1	

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

		Длина трассы, мкм	
Среднее	-10,5667	1050,51	
Дисперсия	0,4	285000	
Наблюдения	18	18	
df	17	17	
F	1,4E-06		
P(F<=f) одностороннее	0		
F кр. одностороннее	0,440162		

Изменение силы трения во времени:

Глубина внедрения, мкм	t, сек.	Глубина внедрения, мкм	t, сек.	Глубина внедрения, мкм	t, сек.
-6,7	0,5	-8,7	0,5	-11,1	0,5
-9,1	1	-8,2	1	-10,7	1

-11,5	1,5	-10,5	1,5	-10,5	1,5
-9,8	2	-11,2	2	-10	2
-11,3	2,5	-10,3	2,5	-10,3	2,5
-11,2	3	-10,4	3	-10,5	3
-10,5	3,5	-10,6	3,5	-10,4	3,5
-10	4	-10,5	4	-11,5	4
-6,5	4,5	-10,3	4,5	-10,6	4,5
-11,9	5	-11,2	5	-10,8	5
-12,5	5,5	-10,5	5,5	-11	5,5
-10,5	6	-10,4	6	-10,6	6
-9,2	6,5	-9,7	6,5	-10	6,5
-11,2	7	-10	7	-10,3	7
-10,5	7,5	-10,5	7,5	-11,5	7,5
-10,2	8	-10,7	8	-11	8
-9,7	8,5	-8,7	8,5	-8,7	8,5
-9,3	9	-9,3	9	-10,7	9

График 2

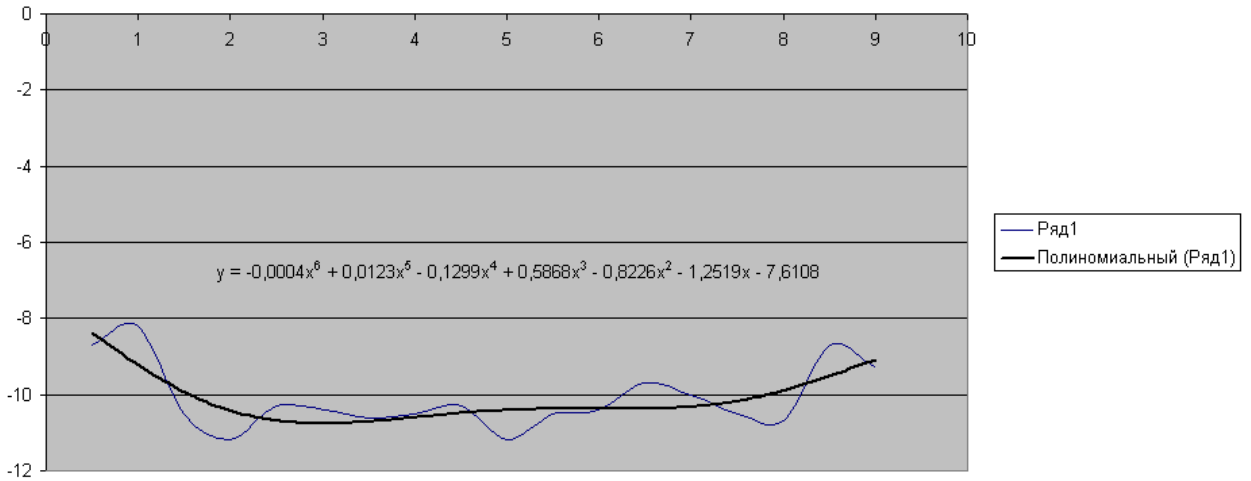


График 3

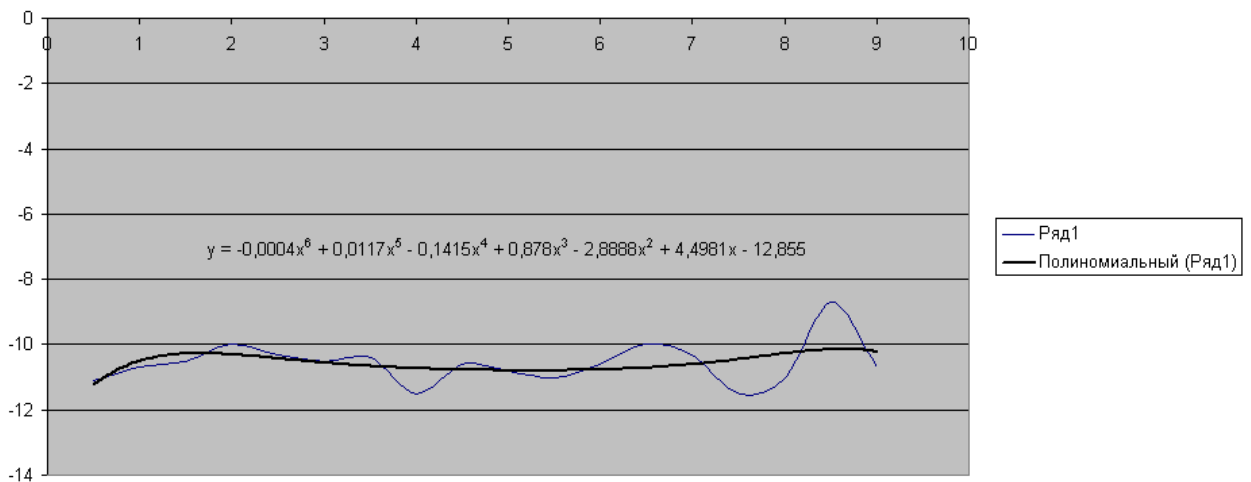


График 1

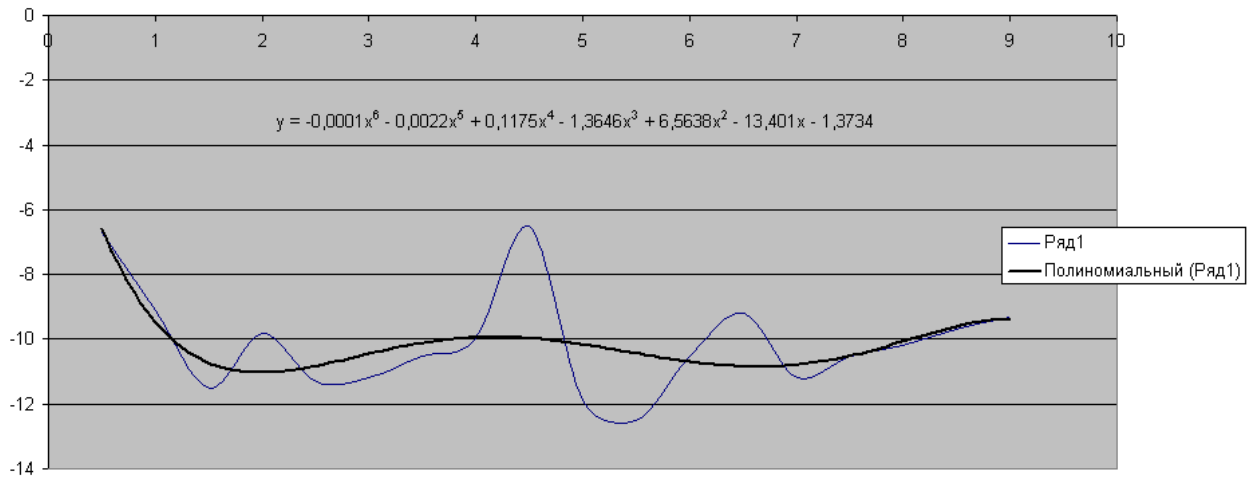


Таблица В 14. Изменение силы трения и описательная статистика для графика рисунка 4.16

график 1	
Глубина внедрения, мкм	Длина трассы, мкм
-10,5	300,51
-10,45	400,51
-12	500,51
-12,2	600,51
-11,8	700,51
-11,6	800,51
-11,5	900,51
-11,7	1000,51
-11,5	1100,51
-11,6	1200,51
-11,5	1300,51
-11,7	1400,51
-11,5	1500,51
-11,4	1600,51
-11,5	1700,51
-11,8	1800,51
-11	1900,51

		Длина трассы, мкм	
Среднее	-11,3472	Среднее	1050,51
Стандартная ошибка	0,17351	Стандартная ошибка	125,8306
Медиана	-11,5	Медиана	1050,51
Мода	-11,5	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	0,736141	Стандартное отклон.	533,8539
Дисперсия выборки	0,541904	Дисперсия выборки	285000
Эксцесс	5,626835	Эксцесс	-1,2
Асимметричность	2,170192	Асимметричность	-1,8E-16
Интервал	3,2	Интервал	1700
Минимум	-12,2	Минимум	200,51
Максимум	-9	Максимум	1900,51
Сумма	-204,25	Сумма	18909,18

Счет	18	Счет	18
------	----	------	----

Корреляционный анализ

	Длина трассы, мкм	
	1	
Длина трассы, мкм	-0,39778	1

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

	Длина трассы, мкм	
Среднее	-11,3472	1050,51
Дисперсия	0,541904	285000
Наблюдения	18	18
df	17	17
F	1,9E-06	
P(F<=f) одностороннее	0	
F кр. одностороннее	0,440162	

		график 2	
Глубина внедрения, мкм		Длина трассы, мкм	
-9,3		300,51	
-11,5		400,51	
-12,7		500,51	
-11,3		600,51	
-12,5		700,51	
-12,2		800,51	
-11,3		900,51	
-10,9		1000,51	
-10,3		1100,51	
-10		1200,51	
-11,2		1300,51	
-11,3		1400,51	
-11,35		1500,51	
-10,8		1600,51	
-11,4		1700,51	
-9		1800,51	
-11		1900,51	

		Длина трассы, мкм	
Среднее	-10,7528	Среднее	1050,51
Стандартная ошибка	0,383493	Стандартная ошибка	125,8306
Медиана	-11,25	Медиана	1050,51
Мода	-11,3	Мода	#Н/Д
Стандартное отклонение	1,627021	Стандартное отклон.	533,8539
Дисперсия выборки	2,647198	Дисперсия выборки	285000
Эксцесс	6,0115	Эксцесс	-1,2
Асимметричность	2,099654	Асимметричность	-1,8E-16
Интервал	7,2	Интервал	1700
Минимум	-12,7	Минимум	200,51
Максимум	-5,5	Максимум	1900,51
Сумма	-193,55	Сумма	18909,18
Счет	18	Счет	18

		Длина трассы, мкм	
--	--	-------------------	--

	1	
Длина трассы, мкм	-0,16711	1

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

		Длина трассы, мкм
Среднее	-10,7528	1050,51
Дисперсия	2,647198	285000
Наблюдения	18	18
df	17	17
F	9,29E-06	
P(F<=f) одностороннее	0	
F кр. одностороннее	0,440162	

график 3

Глубина внедрения, мкм	Длина трассы, мкм
-10,7	300,51
-10,7	400,51
-11	500,51
-11,2	600,51
-11,3	700,51
-11,6	800,51
-11,8	900,51
-11,6	1000,51
-11,7	1100,51
-11,4	1200,51
-11,6	1300,51
-11,3	1400,51
-11,7	1500,51
-11,4	1600,51
-11,6	1700,51
-10,2	1800,51
-10,5	1900,51

		Длина трассы, мкм		Длина трассы, мкм
Среднее	-11,1167	Среднее		1050,51
Стандартная ошибка	0,174005	Стандартная ошибка		125,8306
Медиана	-11,35	Медиана		1050,51
Мода	-11,6	Мода		#Н/Д
Стандартное отклонение	0,738241	Стандартное отклон.		533,8539
Дисперсия выборки	0,545	Дисперсия выборки		285000
Эксцесс	4,966228	Эксцесс		-1,2
Асимметричность	2,032679	Асимметричность		-1,8E-16
Интервал	3	Интервал		1700
Минимум	-11,8	Минимум		200,51
Максимум	-8,8	Максимум		1900,51
Сумма	-200,1	Сумма		18909,18
Счет	18	Счет		18

		Длина трассы, мкм
	1	
Длина трассы, мкм	-0,30523	1

Двухвыборочный F-тест для дисперсии

		Длина трассы, мкм
Среднее	-11,1167	1050,51
Дисперсия	0,545	285000
Наблюдения	18	18
df	17	17
F	1,91E-06	
P(F<=f) одностороннее	0	
F кр. одностороннее	0,440162	

Изменение силы трения во времени:

Глубина внедрения, мкм	t, сек.	Глубина внедрения, мкм	t, сек.	Глубина внедрения, мкм	t, сек.
-9	0,5	-5,5	0,5	-8,8	0,5
-10,5	1	-9,3	1	-10,7	1
-10,45	1,5	-11,5	1,5	-10,7	1,5
-12	2	-12,7	2	-11	2
-12,2	2,5	-11,3	2,5	-11,2	2,5
-11,8	3	-12,5	3	-11,3	3
-11,6	3,5	-12,2	3,5	-11,6	3,5
-11,5	4	-11,3	4	-11,8	4
-11,7	4,5	-10,9	4,5	-11,6	4,5
-11,5	5	-10,3	5	-11,7	5
-11,6	5,5	-10	5,5	-11,4	5,5
-11,5	6	-11,2	6	-11,6	6
-11,7	6,5	-11,3	6,5	-11,3	6,5
-11,5	7	-11,35	7	-11,7	7
-11,4	7,5	-10,8	7,5	-11,4	7,5
-11,5	8	-11,4	8	-11,6	8
-11,8	8,5	-9	8,5	-10,2	8,5
-11	9	-11	9	-10,5	9

График 1

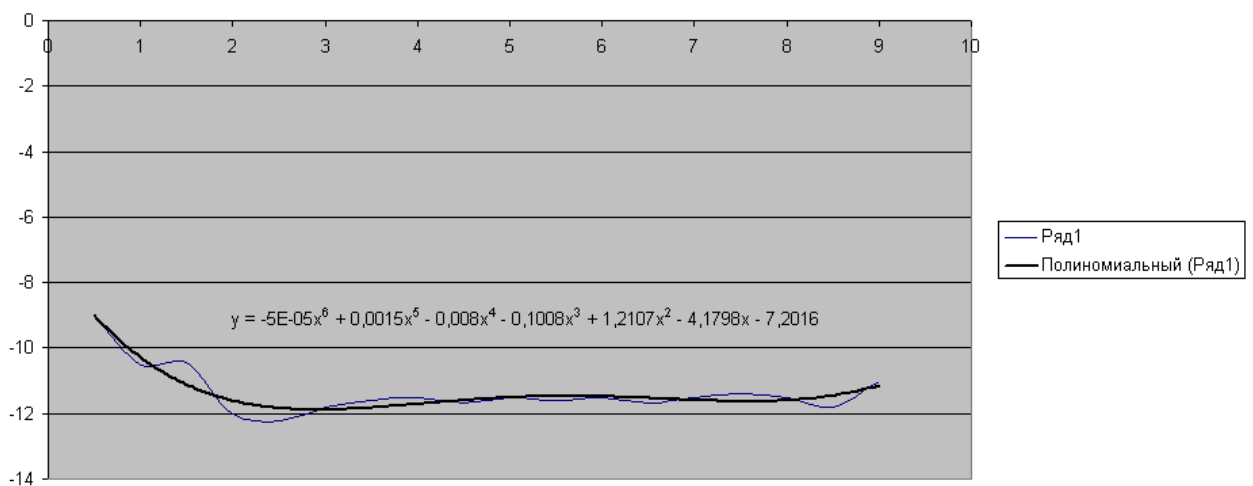


График 2

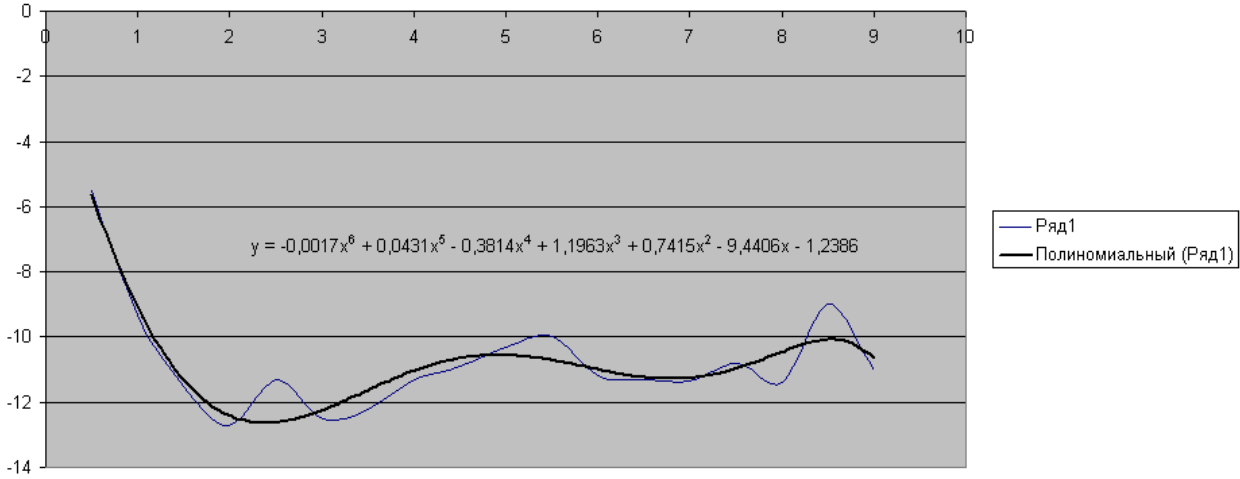
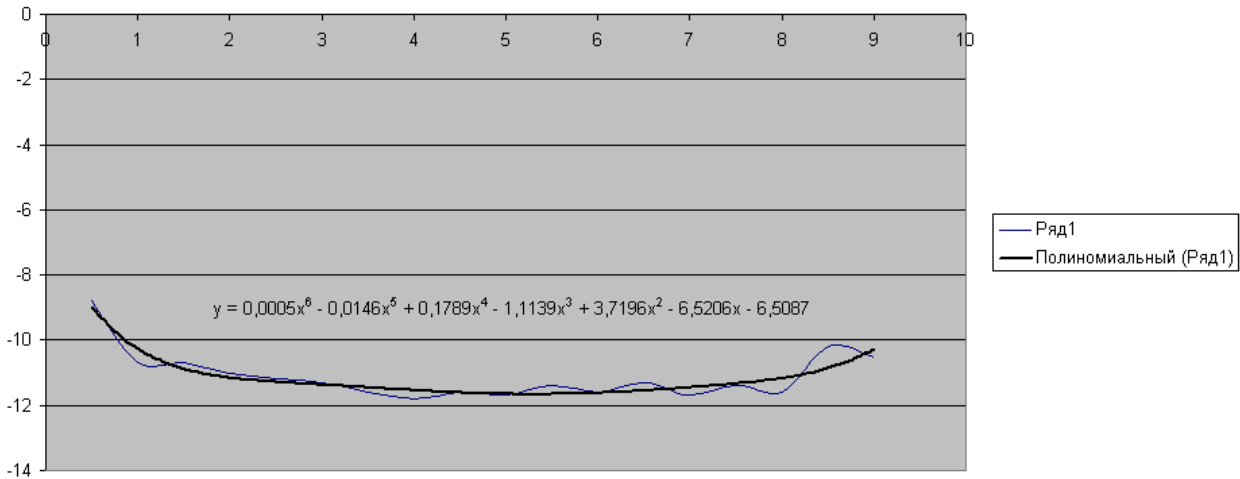


График 3



Приложение Г
Акты внедрения результатов работы

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший заступник
керівника підприємства
ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес»
Г.І.Пейчев
_____ 2014 р.



АКТ

прийняття до впровадження результатів науково-дослідної роботи

Ми, представники Запорізького національного технічного університету, науковий керівник Івченко Л.Й., відповідальний виконавець Циганов В.В. та підприємства ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес», перший заступник керівника підприємства Пейчев Г.І., головний металург Милосердов О.Б., склали цей акт в тому, що в результаті кваліфікаційної науково-дослідної роботи розроблені та прийняті до впровадження технологічні рекомендації отримання зносостійкого ультрадисперсного наноструктурного поверхневого шару деталей трибоз'єднань жаростійких сплавів в залежності від умов контактування та виготовлення.

<p>Представники ЗНТУ</p> <p> Л.Й. Івченко</p> <p> В.В. Циганов</p>	<p>Головний металург ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес»</p> <p> О.Б. Милосердов</p>
--	--

«УТВЕРЖДАЮ»

Технический директор

АО «Мотор Сич»

П.Д. Жеманюк

2014 г.

АКТ



о передаче научно-исследовательских разработок по повышению износостойкости трибосопряжений

Мы, представители Запорожского национального технического университета, научный руководитель Ищенко Л.И., ответственный исполнитель Цыганов В.В., и от АО «Мотор Сич» технический директор Жеманюк В.Д., заместитель технического директора Коцюба В.Ю., начальник опытно-экспериментального цеха № 20 Пахолка С.Н., составили настоящий акт о следующем:

ЗНТУ разработаны технологические рекомендации получения износостойкого ультрадисперсного наноструктурного поверхностного слоя деталей трибосопряжений в зависимости от условий контактирования и изготовления с возможным повышением износостойкости трибосопряжений до 30%. Представленная методика может быть использована в производственных условиях АО «Мотор Сич» с обеспечением социального, технического, организационного и экономического эффекта.

Представители ЗНТУ

Л.И. Ищенко

В.В. Цыганов

Зам. Технического директора

В.Ю. Коцюба

Начальник опытно-экспериментального цеха №20

С.Н. Пахолка

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Технічний директор
 КО «Запорізький завод
 високовольтної апаратури»
 для В.В. Андрющенко
 ДИКУМЕНТИ
 2013р.




АКТ
впровадження результатів науково-дослідної роботи

Ми, представники Запорізького національного технічного університету, науковий керівник Івченко Л.Й., відповідальний виконавець Циганов В.В. та підприємства КО «Запорізький завод високовольтної апаратури» технічний директор Андрющенко В.В., головний технолог Горобченко О.І. склали цей акт в тому, що результати кваліфікаційної науково-дослідної роботи «Основи підвищення зносостійкості трибоз'єднань за рахунок оптимізації характеру складного термомеханічного навантаження» прийняті до впровадження в виробництво на КО «Запорізький завод високовольтної апаратури».


На основі використання розроблених в ЗНТУ технологічних рекомендацій отримання зносостійкого ультрадисперсного наноструктурного поверхневого шару деталей трибоз'єднань в залежності від умов контактування та виготовлення, відмічено підвищення зносостійкості трибоз'єднань у промислових умовах заводу високовольтної апаратури до 30%. Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів науково-дослідної роботи на підприємстві складає біля 140 тис. грн. на рік.

Представники ЗНТУ

 Л.Й. Івченко

 В.В.Циганов

Головний технолог
 КО «Запорізький завод
 високовольтної апаратури»

 О.І. Горобченко
 18 09 2013

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор із наукової роботи ЗНТУ
д-р техн. наук, профЮ.М. Внуков

р.

АКТ

впровадження результатів
дисертаційної роботи Циганова В.В.

« 02 » 02 2016 р.

м. Запоріжжя

Складено комісією у складі:

директора машинобудівного інституту Івценка Л.Й.

зав. кафедрою металорізальні верстати та інструменти Фролова М.В.

Комісія провела роботу по визначенню фактичного впровадження результатів дисертаційної роботи Циганова В.В. «Науково-методологічні засади формування зносостійких поверхонь деталей при багатоконпонентній термодотактній дії» виконаної згідно рішення Вченої ради Запорізького національного технічного університету 28 січня 2013 р., протокол №1 та установила, що результати вказаної роботи впроваджені у навчальному процесі на кафедрі «Металорізальні верстати та інструмент» ЗНТУ в оновлених курсах лекцій дисциплін: «Трибологія», «Теорія різання», «Абразивний інструмент та інструмент з надтвердих матеріалів», при виконанні магістерських робіт в якості доповнення відомостей стосовно проблеми підвищення надійності та довговічності об'єктів машинобудування.

Члени комісії

Л. Й. Івченко

М. В. Фролов