

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Институт «Политехнический»
Факультет «Автотранспортный»
Кафедра «Автомобильный транспорт»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
_____ Ю.В. Рождественский
« 02 » _____ июля 2020 г.

Разработка учебно-методического комплекса по курсу «Основы трибологии»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
НИУ ЮУрГУ 23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы
профессор
_____ Е.А. Задорожная
« 02 » _____ июля _____ 2020 г.

Автор работы
студент группы П-416
_____ О.О. Дорохова
« 01 » _____ июля _____ 2020 г.

Нормоконтролер
доцент
_____ А.А. Дойкин
« ____ » _____ 2020 г.

АННОТАЦИЯ

Дорохова О.О. Разработка учебно-методического комплекса по курсу «Основы трибологии» – Челябинск: ЮУрГУ, АТ; 2020, – 91 с., библиогр. список – 45 наим., 17 слайдов презентации.

В выпускной квалификационной работе представлена характеристика дисциплины «Основы трибологии» с календарно-тематическим планом по видам занятий, количеством часов и кратким описанием лекций. Проведено обновление конспекта лекций, составлен банк вопросов для оценки знаний обучающихся по направлению 23.03.03. В дополнение к лекционному материалу созданы презентации по каждой теме. В качестве примера приведены некоторые темы из обновленного конспекта лекций и блоки контрольных вопросов. Для оценки социального эффекта проведен опрос группы студентов, изучающих данную дисциплину, с последующей обработкой результатов.

					<i>23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Дорохова О.О.</i>			<i>Разработка учебно-методического комплекса по курсу «Основы трибологии»</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Пробер.</i>		<i>Задорожная ЕА</i>				<i>В</i>	<i>4</i>	<i>91</i>
<i>Реценз.</i>						<i>ЮУрГУ</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Дойкин А.А.</i>				<i>Кафедра АВТ</i>		
<i>Чтвенд</i>		<i>Рождественский ЮВ</i>						

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОПИСАНИЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА.....	11
1.1 Цели и задачи дисциплины.....	11
1.2 Структура курса.....	12
1.3 Краткое содержание тем лекций.....	13
2 СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА.....	18
2.1 Лекция по теме «Трибологические поверхности. Контактное тело».....	18
2.2 Лекция по теме «Трение. Молекулярно-механическая теория трения».....	49
2.3 Лекция по теме «Испытания на трение и износ. Методы и средства».....	67
2.4 Лабораторные работы и практические задания.....	76
2.5 Оценка знаний студентов, полученных при освоении дисциплины.....	77
3 СОЦИАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ВКР.....	84
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	88
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	89

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

ВВЕДЕНИЕ

Трение встречается в нашей жизни повсеместно. Оно имеет важное значение для функционирования многих систем, таких как механические тормоза, сцепления, фрикционные устройства, элементарное движение колеса, а также во многих технологических процессах – зажигание, сварка трением и др. Без участия этого многогранного и сложного явления невозможна даже элементарные ходьба и движения человека. Но в то же время, оно связано с потерями энергии в машинах и с ухудшением их состояния. Известно, что у хорошо отлаженного современного реактивного авиационного двигателя на преодоление сил трения расходуется до 2% его мощности, у автомобильного двигателя – 26...44%, у локомотивов – более 50%, а у текстильных машин - более 80% от затрачиваемой ими мощности [1]. Как правило, учитывая условия реальной эксплуатации машин, вышеуказанные цифры оказываются еще больше.

Процессы трения и изнашивания, происходящие в узлах машин, во многом обуславливают надежность и долговечность транспорта, в т. ч. автомобильного. Изнашивание ведёт к нарушению герметичности узлов, потери точности взаимного расположения деталей и перемещений, возникновению заклиниваний, ударов, вибраций, приводящих к поломкам. Явления трения и изнашивания взаимно обусловлены: трение приводит к изнашиванию, а изнашивание поверхностей деталей в ходе работы приводит к изменению трения [2]. В 80...90% случаев машины выходят из строя по причинам повреждения узлов трения. Часто это происходит и в результате самого трения, и из-за его воздействия. Затраты на ремонт и обслуживание машин в несколько раз превышают их первоначальную стоимость: для автомобилей - в 6 раз, самолетов - в 5 раз, станков - до 8 раз [3].

Считается, что в настоящее время в нашей стране потери от трения и связанных с этим явлений составляют порядка 40 млрд. руб., при этом установлено, что они растут в среднем на 1 млрд. руб. ежегодного. В США те же самые потери еще выше и составляют порядка 46 млрд. долларов, причем половина из них приходится на автомобили. В других странах отмечается схожая

										Лист
										6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ					

ситуация, и в большинстве случаев потери составляют 1,5...5% их национального дохода [1, 4].

Поэтому вопросы снижения потерь на трение, борьбы с изнашиванием, повышением долговечности и работоспособности машин и др. не теряют актуальности.

Основные факторы, влияющие на механизмы процессов трения и изнашивания, можно условно разделить на четыре основные группы:

– динамические факторы (внешние возмущения) трибосистемы: величина и направление относительной скорости скольжения, величина и распределение нагрузки, наличие ударов, вибраций и т.д.;

– характеристики поверхностных слоев контактирующих тел: природа, структура, физико-механические свойства (твердость, модуль упругости, исходная микрогеометрия) и т. д.;

– характеристики контакта в трибосистеме: вид контакта (точка, линия, плоскость), коэффициент перекрытия, фактическая площадь контакта, размер и распределение контактного давления, температура, наличие и свойства смазочного материала, наличие частиц износа, частиц разложения смазочного материала, присутствие воды и химических агрессивных компонентов и т. д.;

– воздействие на окружающую среду: состав и температура.

Проблемы трения, износа и смазки в машинах изучаются в трибологии. Её прикладная часть – триботехника – направлена на решение задачи повышения износостойкости и долговечности механизмов и машин.

Большой вклад в комплексное развитие трибологии внесли отечественные ученые П.А. Ребиндер [5], И.В. Крагельский [6-10], В.С. Комбалов [11, 12], А.В. Чичинадзе [4, 13], Д.Н. Гаркунов [3, 14-16], Н.Б. Демкин [17-19], Б.В. Дерягин [20], А.С. Ахматов [21] и многие другие.

Обширная информация о строении и свойствах поверхностных слоев, контактировании тел, теории и процессах трения также представлена в трудах Д.Г. Громаковского с соавторами [2], Н.К. Мышкина [22], Г.М. Бартенева и В.В. Лаврентьева [23], А.А. Силина [24], Ю.К. Машкова [25], Ю.М. Лужнова [1] и др.

Различным вопросам изнашивания, методам повышения износостойкости,

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

долговечности и работоспособности машин уделено большое внимание в работах А.С. Проникова [26], М.М. Хрущева [27], Н.А. Буше [28], М.М. Тененбаума [29, 30], В.А. Зорина и А.П. Павлова [31, 32], Б.М. Силаева [33] и др.

Создание учебно-методического комплекса «Основы трибологии» необходимо для систематизации и обобщения теоретических основ и сведений об их практическом применении с ориентацией на специальность «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

Актуальность практического использования трибологии и ее инженерного приложения – триботехники – обусловлена тем, что ежегодно в мире теряется более миллиона тонн стали из-за износа деталей машин; при изнашивании деталей значительно ухудшается качество продукции и показатели надежности, повышается расход энергии [34]. По экспертным оценкам ведущих в мире специалистов по трибологии, только благодаря использованию достигнутых результатов в этой области повреждаемость машин может быть снижена на 25...30%. К тому же для 10...15% из них почти не требуются никакие капиталовложения, необходимо лишь более квалифицировано подходить к обслуживанию машин и применению уже известных смазочных материалов и технологий.

Развитие трибологии в ближайшие десятилетия связано с решением проблем и задач в машинах, механизмах и технологическом оборудовании нового поколения, которые отвечают экологическим требованиям, а именно [2]:

- разработка и применение смазочных материалов нового поколения с менее токсичными или нетоксичными присадками, обеспечивающими значительное снижение потерь на трение и износ;
- разработка и применение экологически чистых триботехнических конструкционных материалов и технологий для повышения износостойкости и несущей способности контактных соединений различного класса и назначения;
- совершенствование конструкций антифрикционных составов на основе учета конкретных эксплуатационных факторов – нагрузки, скорости, вибрации, удара, режимов трения;

					<i>23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>8</i>

- разработка и использование ускоренных методов и рациональных циклов испытаний для выбора комбинаций оптимальных смазочных материалов и конструкционных материалов для узлов трения в машинах и механизмах;
- использование оптимальных режимов работы машин, транспортных средств и технологического оборудования с учетом минимальных вредных выбросов в окружающую среду;
- ускорение настройки (адаптации) механизмов и машин для использования в экологически чистых источниках энергии (солнечной, водной, электрической);
- получение новых научных результатов о механизмах трения и износа в состоянии самоорганизации трибосистемы;
- повышение знаний инженеров и персонала технической поддержки в области трибологии и взаимосвязи трибологических процессов с экономикой и экологией.

Таким образом, проблема трения, износа и смазки машин и оборудования, сочетая в себе технические, экономические и экологические аспекты, является комплексной проблемой государственного уровня. Эксперты утверждают, что столь большие потери от трения обусловлены отсутствием прочной связи между трибологией и развитием промышленности и транспорта. Ведь решения актуальных задач требуют проведения ряда мероприятий различного характера, а это невозможно без хорошо подготовленных исполнителей, которых сейчас не хватает – грамотных специалистов, владеющих теорией и практикой, с развитым техническим мышлением и способностью решать сложные вопросы. И, несомненно, высшие учебные заведения имеют большое значение в обеспечении различных отраслей науки и техники такими кадрами.

Как и любая наука, трибология развивается. Продолжают вестись различные исследования явлений трения и износа, совершаются открытия, в результате чего появляются новые сведения о свойствах, характеристиках трения и износа, методах снижения и повышения долговечности и работоспособности узлов и деталей и т.д.

Для обеспечения эффективного изучения студентами трибологии, обобщения информации как о незыблемых теоретических основах, так и о последних

					<i>23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						9
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

практических достижениях в данной области, необходимо периодически обновлять лекционный материал и совершенствовать учебно-методические комплексы, используемые в учебном процессе.

Цель выпускной квалификационной работы состоит в разработке учебно-методического комплекса для освоения дисциплины «Основы трибологии» студентами-бакалаврами, обучающимися по направлению подготовки 23.03.03.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи работы:

- совершенствование рабочей программы «Основы трибологии»;
- обновление конспекта лекций;
- разработка презентаций по девяти темам лекций, способствующих легкости восприятия студентами лекционного материала;
- разработка банка вопросов для контрольного тестирования на основе лекционного материала.

					<i>23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						<i>10</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

1 ОПИСАНИЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

1.1 Цели и задачи дисциплины

Трибология, являясь междисциплинарной наукой, изучает взаимодействия рабочих поверхностей твердых тел при наличии их относительного движения и исследует связанные с этим процессы трения, смазки, изнашивания, а также тепловые, химические и другие явления, происходящие в зоне контакта поверхностей.

Цель: формирование у студентов системы знаний и навыков по фундаментальным вопросам контактирования рабочих поверхностей, теории трения и изнашивания твердых тел, способность их использования в практике, в частности, обеспечить будущих специалистов как теоретическими знаниями, так и практическими навыками, необходимыми для грамотной эксплуатации автомобильного транспорта и анализа причин изнашивания основных трибосопряжений автомобиля.

Задачи:

- формирование представления о процессах, протекающих в зоне фрикционного контакта, их механизмах и условиях осуществления;
- изучение закономерностей трения и изнашивания поверхностей при различных условиях и режимах нагружения твердых тел;
- ознакомление с методами и средствами проведения триботехнических испытаний, определения свойств смазочных и конструкционных материалов, а также способами управления параметрами контактного взаимодействия твердых тел;
- обучение навыкам использования теоретических знаний при решении практических вопросов касательно выбора комплекса мероприятий, направленных на повышение износостойкости деталей машин;
- способствование выработке у обучающихся инженерного мышления, развитие у них подхода к решению технических проблем.

										<i>23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
											<i>11</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>							

1.2 Структура курса

Длительность изучения дисциплины составляет один семестр.

Учебно-методический комплекс «Основы трибологии» содержит лекционные материалы, практические задания, лабораторные работы, на освоение и проведение которых отведено фиксированное количество часов.

После завершения курса в качестве итогового контроля знаний студентов проводится контрольный тест. Тестирование состоит из 40 вопросов по каждой теме и имеет ограничение по времени выполнения – 1 час.

Дисциплина «Основы трибологии» преподается в восьмом семестре. Трудоемкость дисциплины общая и по каждому виду работ представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Трудоемкость дисциплины

Вид учебной работы	Количество часов
Общая трудоемкость дисциплины	144
Аудиторные занятия	72
Лекции (Л)	24
Практические занятия, семинары и/или другие виды аудиторных занятий (ПЗ)	24
Лабораторные работы (ЛР)	24
Самостоятельная работа (СРС)	72
Подготовка и оформление лабораторных работ	40
Подготовка и оформление практических заданий	24
Подготовка реферата и презентации по тематике предмета	8

Распределение часов дисциплины по темам и видам занятий представлено в таблице 1.2.

Таблица 1.2 — Содержание дисциплины по темам

№ темы	Наименование темы дисциплины	Объем аудиторных занятий по видам (ч.)			
		Всего	Л	ПЗ	ЛР
1	Введение в трибологию	2	2	0	0
2	Работоспособность узлов трения машин	2	2	0	0
3	Трибологические поверхности. Контактное тело	10	4	0	6
4	Трение. Молекулярно-механическая теория трения	2	2	0	0
5	Изнашивание в трибосистемах	16	2	8	6
6	Характерные узлы трения транспортных машин	2	2	0	0
7	Смазочные материалы. Смазка трибосопряжений	18	4	8	6
8	Гидродинамические опоры (ГДО)	18	4	8	6
9	Испытания на трение и износ. Методы и средства	2	2	0	0

Календарно-тематический план лекционных занятий представлен в таблице 1.3.

Таблица 1.3 — План лекционных занятий

№ лекции	№ темы	Наименование лекционного занятия	Кол-во часов
1	1	Введение в трибологию	2
2	2	Работоспособность узлов трения машин	2
3	3	Трибологические поверхности	2
4	3	Трибологические поверхности. Контактное тело	2
5	4	Трение. Молекулярно-механическая теория трения	2
6	5	Изнашивание в трибосистемах	2
7	6	Характерные узлы трения транспортных машин	2
8	7	Смазочные материалы	2
9	7	Смазка трибосопряжений	2
10	8	Гидродинамические опоры (ГДО)	2
11	8	Гидродинамические опоры (ГДО)	2
12	9	Испытания на трение и износ. Методы и средства	2

1.3 Краткое содержание тем лекций

Тема 1. Введение в трибологию

Содержание темы. Появление трибологии как научного феномена. Значимость трибологических процессов. Четыре группы основных факторов, влияющих на механизмы процессов трения и износа. Три основных подхода к борьбе с износом. Актуальные проблемы и задачи в трибологии. Понятие трения. Условия наличия

									Лист
									13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ

трения. Количественные характеристики трения. Виды трения. Режимы трения. Некоторые основные понятия и термины в трибологии.

Тема 2. Работоспособность узлов трения машин

Содержание темы. Технический прогресс и надежность машин. Понятие и свойства надежности. Триботехника и работоспособность машин и механизмов. Значение триботехники для обеспечения работоспособности узлов трения машин. Мероприятия по повышению долговечности машин. Триботехнические характеристики конструкционных материалов. Виды вязкости. Единицы измерения вязкости. Индекс вязкости. Факторы, определяющие работоспособность трибосопряжений.

Тема 3. Трибологические поверхности. Контактное тело

Содержание темы. Поверхности трения как объект исследования. Поверхностная энергия жидкостей. Поверхностная энергия твердых тел. Микроконтактные взаимодействия. Геометрия и микрогеометрия твердых поверхностей. Волнистость и шероховатость. Основные параметры шероховатости. Строение и физико-механические свойства поверхностных слоев. Элементарная контактная система. Основные функции трибосистем. Альтернативные тела в трибосистемах. Структура поверхностного слоя твердого тела. Характеристики и свойства контактного тела. Дискретность контакта. Площади контакта. Контактное взаимодействие между шероховатыми поверхностями. Контактные деформации. Деформации шероховатости. Деформации в контактах. Закон нормальной контактной деформации. Деформация контактной системы.

Тема 4. Трение. Молекулярно-механическая теория трения

Содержание темы. Трение при предварительном смещении (трение покоя). Аналитическое определение коэффициента трения покоя. Трение скольжения. Коэффициент трения скольжения. Молекулярно-механическая теория трения. Молекулярная составляющая силы трения. Механическая составляющая силы трения. Влияние эксплуатационных факторов на коэффициент трения. Трение качения. Микроскользвания по Рейнольдсу и по Хизкоуту. Эффект П.А. Ребиндера.

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

Тема 5. Изнашивание в трибосистемах

Содержание темы. Понятие и режимы изнашивания. Механические и молекулярные взаимодействия. Типы изменений в поверхностных слоях. Изменения, связанные с контактной деформацией. Изменения, связанные с нагревом поверхностей. Изменения, связанные с химическим действием поверхностей. Элементарные процессы разрушения при изнашивании. Микрорезание. Царапание. Отслаивание. Выкрашивание. Глубинное вырывание. Продукты износа и их характеристики. Характеристики изнашивания. Абсолютные и относительные параметры изнашивания. Массовый, линейный и объемный износ. Интенсивность и скорость изнашивания. Кинетика изнашивания. Кривая изнашивания. Факторы, влияющие на износ. Классификации видов изнашивания. Механическое изнашивание. Коррозионно-механическое изнашивание. Абразивное изнашивание. Влияние твердости абразивных частиц на абразивное изнашивание. Влияние размера абразивных частиц. Влияние формы абразивных частиц. Кавитационное изнашивание. Механизм кавитационного изнашивания. Относительная стойкость материала при кавитационном изнашивании. Эрозионное изнашивание. Механизм эрозионного изнашивания. Факторы, влияющие на эрозионное изнашивание. Кинетика эрозионного изнашивания. Сущность и механизмы водородного изнашивания. Контактные процессы при водородном изнашивании. Источники водорода. Различия между водородным изнашиванием и водородным разрушением. Виды водородного изнашивания. Фреттинг-коррозия. Методы борьбы с фреттинг-коррозией.

Тема 6. Характерные узлы трения транспортных машин

Содержание темы. Основные узлы трения и изнашивание в двигателях внутреннего сгорания. Цилиндро-поршневая группа. Узлы трения шатунов и подшипников коленчатых валов. Газораспределительный механизм. Принципы подбора материалов для узлов трения. Классификация узлов трения по функциональному признаку. Требования к материалам узлов трения покоя с частичным проскальзыванием контактирующих элементов. Требования к материалам подвижных сопряжений.

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		15

Тема 7. Смазочные материалы. Смазка трибосопряжений

Содержание темы. Динамическая вязкость. Кинематическая вязкость. Относительная (условная) вязкость. Зависимость вязкости от температуры и давления масла. Смазочное действие масел в условиях граничного трения. Две формы проявления эффекта Ребиндера. Изменение свойств масел при эксплуатации контактных соединений. Окисление и его влияние на свойства масла. Механизм термического старения масла. Гидролиз. Аэрация масла. Вода в масле. Влияние воды на трибологические свойства масла. Загрязнение масла антифризом. Образование лаков и шлама. Контактные взаимодействия. Три группы загустителей. Трение при наличии смазки. Бесконтактное трение. Главные различия между внешним и внутренним трением. Гидростатическая смазка. Гидродинамическая смазка. Классическая теория смазки. Трение при упругогидродинамической смазке. Трение при полужидкостном (смешанном) режиме смазки. Трение при газодинамической смазке. Трение при граничном режиме смазки. Основные факторы, влияющие на эффективность смазки.

Тема 8. Гидродинамические опоры (ГДО)

Содержание темы. Понятие, плюсы и минусы ГДО. Основные геометрические параметры ГДО. Установочный зазор в ГДО. Гидродинамическое давление и гидродинамическая реакция смазочного слоя. Несущая способность. Границы несущей области смазочного слоя. Три гипотезы для выбора координаты конца несущего слоя. Коэффициент жидкостного трения. Температурный диапазон надежной работы ГДО. Режимы работы ГДО. Свойство саморегулируемости. Кривая Герси-Штрибека. Критическая толщина смазочного слоя. Источники и распределители смазки в опоре. Выбор их расположения. Диаграммы износа.

Тема 9. Испытания на трение и износ. Методы и средства

Содержание темы. Методы исследования фактической площади контакта. Электрический метод. Оптические методы Швецово́й и Мехау. Метод Н. Б. Демкина. Акустический метод Н. Манолова. Методы и приборы для исследования контактной деформации. Измерение контактной деформации с помощью интерференционного микроскопа. Измерение контактной деформации по Н. Б. Демкину. Методика А. С. Ахматова. Метод Н. Манолова и Е. Петровой.

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

Определение свойств пластичных смазок. Реологические свойства. Пенетрация. Коэффициент тиксотропии и предел пластичности. Термостойкость. Коллоидная стабильность. Механическая стабильность. Поглощаемость воздуха (воздухоустойчивость). Водостойкость. Коррозионное действие. Трибологические свойства. Методы определения вязкости масел. Определение динамической вязкости с помощью вискозиметра ВН-2 по методу Геплера. Определение кинематической вязкости с помощью капиллярного вискозиметра ВПЖ-1.

Выводы по разделу один

Таким образом, в учебной программе определены цели и задачи, а также общая структура курса, распределены отведенные на изучение дисциплины «Основы трибологии» часы с учетом изменений в тематических планах каждого вида работ, кратко представлены вопросы, рассматриваемые в каждой теме лекционных занятий.

					<i>23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						17
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

2 СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

2.1 Лекция по теме «Трибологические поверхности. Контактное тело»

2.1.1 Поверхности трения как объект исследования

Все реальные тела имеют ограниченные размеры и, следовательно, поверхности, которые очерчивают и ограничивают их.

Интерес к фактическим поверхностям тел обусловлен их влиянием на эксплуатационные свойства тел. От качества технических поверхностей деталей существенно зависит прочность, функциональность и надежность механизмов и машин. Например, большинство аварий и отказов на Земле и в космосе вызваны ограниченными ресурсами и плохим эксплуатационным обслуживанием поверхностей систем, их недостаточными отражающей способностью, прочностью, герметизацией и т.д.

Трибология изучает поверхности как физически образованные тела и как обязательный элемент при соприкосновениях тел. В частности, трибология как междисциплинарная наука о контактном взаимодействии тел учитывает все геометрические, механические, термодинамические, химические и другие аспекты отдельных наук, обобщает их и добавляет специфические особенности и модели поверхностей, непосредственно связанные с состояниями и процессами контактных взаимодействий.

Как известно, тела имеют систему дефектов, прежде всего линейных, поверхностных и объемных, которые образуют внутреннюю сеть свободных микроотверстий.

Система внешних и внутренних поверхностей, соединенных между собой невидимыми микроканалами, полностью формирует систему пространственной контактной сети. Последняя соединяет основные микроэлементы в единое целое. Контактная сеть осуществляет реальные взаимодействия, процессы и поведения тела как целого и его элементов. Когда речь идет о трибологии поверхностей, то имеется в виду не только внешние поверхности тел, которые были упомянуты ранее, но также внутренние поверхности и связи между ними. В более общем

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

плане рассматривается вся контактная сеть исследуемого объекта. Эту тематику подробно исследуют Ю. М. Лужнов, В. Д. Александров [1].

Внешние поверхности могут быть отнесены только к твердым веществам и жидкостям, поскольку в газообразной фазе вещества не имеют своего собственного объема.

2.1.2 Поверхностная энергия жидкостей

Если, например, рассматривается сосуд с водой, внешняя поверхность воды обычно определяет границу фаз между ней и атмосферой.

С трибологической точки зрения, во-первых, внешняя поверхность является не только этой «границей», но и «границами» воды со стенками сосуда, а во-вторых, внешняя поверхность не является границей в смысле геометрической поверхности (линии), а представляет собой реальную функциональную единицу, гибрид по своей природе, со своими размерами и структурами. Последние совершают переход между водой и двумя другими окружающими фазами. Если мы заменим слово «граница» понятием граничного слоя между жидкой и другими фазами веществ, то мы получим более близкое представление о рассматриваемом объекте.

На рисунке 2.1 кратко представлен граничный слой между жидкой и газообразной фазами. Из физики жидкостей известно, что силы притяжения между молекулами жидкости имеют радиус действия r порядка 10^{-9} м.

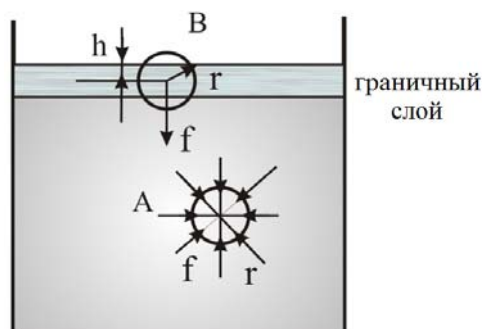


Рисунок 2.1 — Граничный слой между жидкой и газообразной фазами

Одна молекула A объема жидкости оказывает всестороннее симметричное воздействие f_i на все молекулы вокруг с радиусом r . Из-за симметрии внешних

молекулярных сил результирующая сила, действующая на рассматриваемую молекулу, будет равна нулю, т.е.:

$$\vec{f} = \sum \vec{f}_i = 0. \quad (2.1)$$

Поэтому она не воспринимает присутствие своих соседей, за исключением тепловых колебаний (ударов), которые они периодически сообщают ей.

Однако если мы рассмотрим молекулу из поверхностного слоя жидкости на глубине $h < r$, то обнаружим нарушение описанной выше симметрии, и из-за более низкой плотности газообразной фазы результирующая сила на каждой молекуле поверхностного слоя не будет равна нулю и будет направлена внутрь к жидкой фазе.

Избыток потенциальной энергии в поверхностном слое жидкости называется поверхностной энергией ΔE , которая определяется по формуле (2.2). Поверхностная энергия тем больше, чем больше площадь поверхности ΔS :

$$\Delta E = \alpha \cdot \Delta S, \quad (2.2)$$

где α - коэффициент пропорциональности, Н/м.

Поверхностное натяжение α жидкости измеряется как сила f , приложенная к единице длины по контуру внешней поверхности жидкости и направленная внутрь этой поверхности (рисунок 2.2).

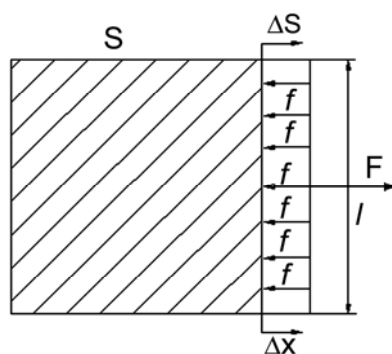


Рисунок 2.2 — Натяжение на поверхностном слое

2.1.3 Поверхностная энергия твердых тел

Естественно предполагать, что поверхностная энергия твердых тел больше, чем у жидкостей, поскольку в принципе они более плотные и более упорядоченные на микроуровне. Это причина, почему они имеют свою собственную форму.

Все методы измерения поверхностной энергии жидкостей по поверхностному натяжению α основаны на их фундаментальной способности течь. Твердые частицы не имеют такой возможности, и это затрудняет измерение их поверхностного натяжения γ . Однако при высоких температурах, близких к температуре плавления твердого вещества, они становятся очень пластичными и ведут себя как жидкости. В этих условиях твердое тело стремится уменьшить свою внешнюю поверхность, а противодействующая этому внешняя сила может служить мерой поверхностного натяжения γ .

Поверхностное натяжение твердого тела, согласно формуле (2.3), теоретически оценивается по работе внешней силы, необходимой для создания новой поверхности. Например, по работе A , при которой происходит хрупкое разрушение тела, деленной на вновь образованную внешнюю поверхность ΔS перелома:

$$\gamma = \frac{A}{\Delta S}. \quad (2.3)$$

Внешняя поверхность отделяет тело от окружающей его среды, поверхностный слой защищает его, а контактная сеть получается объединением наружных и внутренних поверхностей.

Поверхностный слой относительно объема тела характеризуется дополнительным потенциалом, создаваемым асимметрией в его микроструктуре. Он поддерживает его стабильную форму. Чем выше поверхностное натяжение тела, тем оно тяжелее и тем сложнее его сломать и разжижить. Поэтому, изменяя поверхностное натяжение тел, мы получаем возможность влиять на него, и в частности на его механические свойства.

										Лист
										21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ

2.1.4 Геометрия и микрогеометрия твердых поверхностей

В трибологии под поверхностью тела понимается зона границы тела с окружающей средой, которая отличается по структуре и свойствам от свойств его внутренних частей. В качестве окончательного результата этих различий выделяют независимую роль и место темы «качество поверхности». Эксплуатационные характеристики, такие как усталостная прочность, износостойкость, антифрикционность и коррозионная стойкость тел, прочность, плотность и проницаемость контактных соединений, в значительной степени зависят от качества поверхностей. Вопросы геометрии и микрогеометрии контактирующих поверхностей широко рассматриваются в трудах известных отечественных трибологов Д. Г. Громаковского с соавторами [2], Д. Н. Гаркунова, [3, 14-16], В. А. Зорина [31] и др.

Каждая деталь имеет свою собственную номинальную поверхность (плоскую, сферическую, коническую и т. д.), которая получается путем правильной обработки твердого тела. На более глубоком уровне существуют отклонения, которые чаще всего невидимы невооруженным глазом (рисунок 2.3).

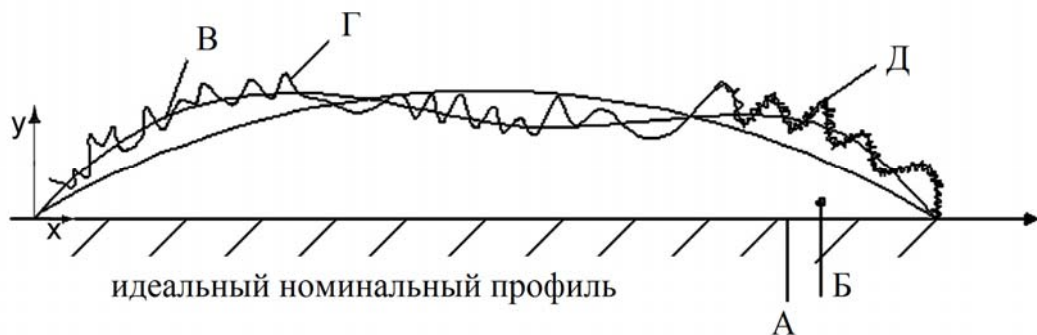


Рисунок 2.3 — Виды отклонений от номинальной поверхности:

А – номинальная поверхность; Б – макроотклонение; В – волнистость;
Г – шероховатость; Д – субшероховатость

Волнистость, шероховатость и субшероховатость носят периодический характер и обусловлены динамичным взаимодействием между используемой технологией, станками и оборудованием с одной стороны, и зернистой

структурой, фиксацией и микроструктурой обрабатываемого тела с другой (рисунок 2.4, рисунок 2.5).

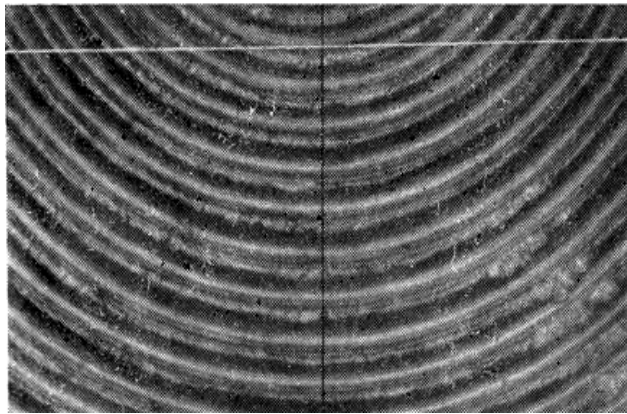


Рисунок 2.4 — Поверхность серебра после обработки x50 (оптический микроскоп)



Рисунок 2.5 — Поверхность меди (электронный микроскоп)

На рисунке 2.4 показана поверхность серебра после обработки при увеличении x50 (оптический микроскоп), а на рисунке 2.5 – поверхность меди, определяемая наличием кристаллических зерен (электронный микроскоп).

Появление макроотклонений от номинальной поверхности тела является результатом, в первую очередь, погрешности работы станков, стабильности системы «станок-заготовка-инструмент» и, наконец, износа инструмента в процессе обработки.

Волнистость относительно номинальной поверхности с макроотклонениями, в принципе, представляет собой периодически повторяющиеся выступы и впадины с длиной волны, значительно превышающей ее высоту (рисунок 2.6).

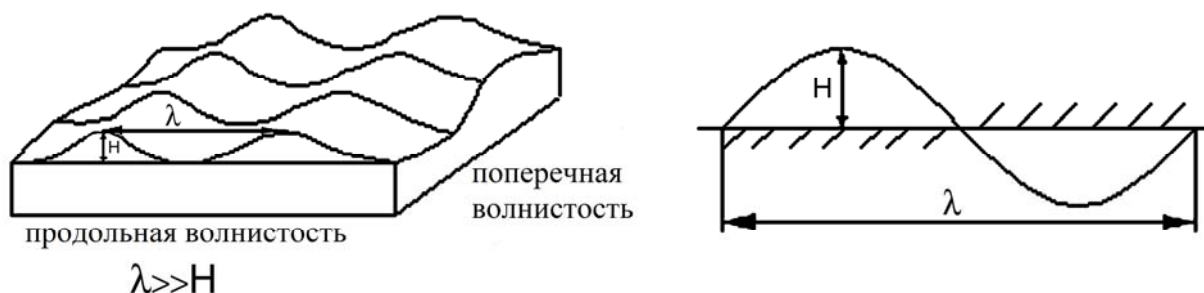


Рисунок 2.6 — Волнистость поверхности

Волнистость поверхностей характеризуется ограничительным условием $\lambda/H \geq 40$. Волнистость в главном направлении движения при обработке заготовки называется продольной, а в направлении, перпендикулярном ему, - поперечной. Оба типа волн как периодические отклонения являются продуктом вынужденных колебаний системы «станок-изделие-инструмент». Последние вызваны периодическими изменениями силы резания, неуравновешенными силами инерции. Длина волны λ этого типа отклонения от номинальной поверхности варьируется от 0,25 до 10 мм, а высота - от 1 до 10 мкм.

Третий тип отклонения от номинальной поверхности заготовки является наиболее значимым для трибологии и называется шероховатостью. Шероховатость поверхностей – это совокупность неровностей, расположенных на одной базовой длине l с относительно небольшими отклонениями шага по длине λ ($l = 2 \dots 800$ мкм).

Базовая линия, на которой измеряется базовая длина, находится ниже профиля поверхности и параллельна средней линии ($m-t$) профиля (рисунок 2.7).

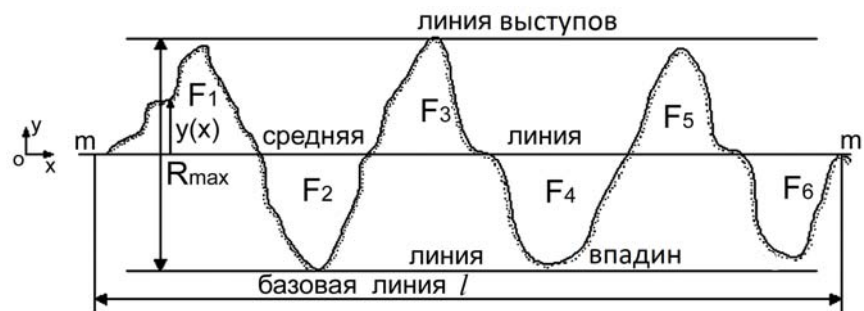


Рисунок 2.7 — Линии профиля поверхности

Параметры, характеризующие отклонения реальной от номинальной (идеальной) поверхности, можно разделить на три группы: по высоте, по длине и по структуре, поскольку высота и горизонтальный шаг отклонения должны дополняться информацией о структуре и форме отклонения.

Параметры профиля шероховатости твердой поверхности сгруппированы в три высотных – R_a , R_z , R_{max} , два шаговых – S , S_m и один структурный – t_p . Конечно, есть и другие параметры шероховатости, но они находятся на других более глубоких уровнях, таких как наклон шероховатости, радиус закругления и т.п.

Профилограмма шероховатости твердой поверхности в перпендикулярной ей плоскости Oxy , состоит из системы случайных выступов и впадин в направлении базовой длины l . Определение количественных показателей по оси Oy (высоте) осуществляется через среднюю линию профиля ($m-m$). Последняя проходит так, чтобы площади выступов и впадин с обеих сторон были равны (см. рисунок 2.7), т.е. должно выполняться условие:

$$F_1 + F_3 + F_5 + \dots = F_2 + F_4 + F_6 + \dots \quad \text{или} \quad \int_0^l y(x) dx = 0. \quad (2.4)$$

Профиль шероховатости ограничен двумя линиями: линией выступов и линией впадин, проведенными параллельно средней линии по самому высокому выступу и самой глубокой впадине.

Параметр R_a , называемый средним арифметическим отклонением профиля, определяется формулой:

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|. \quad (2.5)$$

Параметр R_a представляет собой высоту прямоугольника с основанием l , площадь F которого удовлетворяет условию:

$$F = R_a \cdot l = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + \dots \quad (2.6)$$

Параметр R_{max} , называемый максимальной высотой профиля шероховатости, измеряется расстоянием между линией выступов и линией впадин. Другими словами, это толщина слоя шероховатости.

Параметр высоты профиля R_z , называемый высотой профиля, определяется формулой:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |y_{p_i}| + \sum_{i=1}^5 |y_{v_i}| \right), \quad (2.7)$$

где p_i – отклонение i -го из пяти наибольших выступов;

v_i – отклонение i -й из пяти наибольших впадин профиля, выбранных из всех расположенных на одной базовой длине l .

Очевидно, что в этих обстоятельствах выполняется условие:

$$R_z \geq 2R_a \quad \text{и} \quad R_{max} \geq R_z. \quad (2.8)$$

Параметр S представляет собой гибридный параметр профилограммы, который измеряет среднее арифметическое расстояние между соседними вершинами:

$$S \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i. \quad (2.9)$$

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

Поскольку две смежные вершины профиля могут быть ниже или выше средней линии, S называется шагом местных выступов профиля, в отличие от среднего шага неровностей S_m профиля.

Параметр длины S_m (рисунок 2.8) является средним арифметическим на выбранной базовой длине шероховатости поверхности:

$$S_m \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{m_i}, \quad (2.10)$$

где n – число местных (для S) и средних шагов (для S_m), которые измеряются непосредственно на базовой длине.

Например $n = 10$. Очевидно, что чем n больше, тем точнее (относительно профиля) будут определены S и S_m .

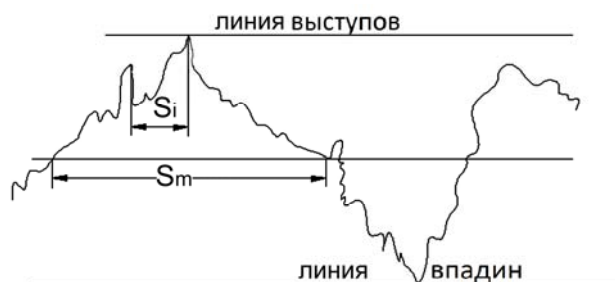


Рисунок 2.8 — Параметры длины реальной шероховатой поверхности

Фактический шероховатый слой не является однородным по длине и высоте. Степень неоднородности шероховатого слоя на различной высоте по отношению к средней линии профиля шероховатости характеризуется параметром t_p , называемым относительной опорной длиной профиля (рисунок 2.9), которая является отношением суммарной длины единичных участков на линии шероховатости, параллельной линии выступов с текущей глубиной p , к базовой длине:

$$t_p = \frac{\sum \Delta l_i}{l}, \quad (2.11)$$

где p – глубина прохождения в пространство шероховатого слоя, измеренная от линии выступов;

Δl_i – единичный участок.



Рисунок 2.9 — Относительная опорная длина профиля, ε – относительное заглабление

Из рисунка видно, что с увеличением глубины p параметр t_p увеличивается. Это объясняется соответствующим увеличением суммарной длины участков. Максимальным значением, которому может равняться t_p , является 1. Это значение получается, когда p станет равно R_{max} , т.е. когда толщина шероховатого слоя истощается на p и начинается прохождение в объем тела.

В практической эксплуатации тел глубина прохождения p в поверхностный слой тел не превышает 50% от максимальной высоты R_{max} шероховатого слоя. В этих условиях функциональная зависимость $t_p = f(\varepsilon)$ имеет вид:

$$t_p = b \cdot \varepsilon^\nu, \quad (2.12)$$

где b и ν – константы, зависящие от вида обработки поверхности и режима трения, обычно $b = 2 \dots 4$; $\nu = 1,5 \dots 3$. Точные значения этих величин приводятся в справочниках [4, 6, 7].

Относительная опорная длина профиля t_p на заданном уровне p также выражает относительную площадь поперечного сечения материала шероховатого слоя, т.е.:

$$t_p = \frac{\sum \Delta l_i}{l} = \frac{A_p}{A_{R_{max}}}, \quad (2.13)$$

где A_p – суммарная площадь поперечного сечения « p » шероховатого слоя;

$A_{R_{max}}$ – площадь исследуемого сечения номинальной поверхности заготовки.

Устройство для вычерчивания профилограмм шероховатого слоя твердых тел называется профилограф. На рисунке 2.10 представлен профилограф-профилометр из лаборатории кафедры «Автомобильный транспорт» Южно-Уральского государственного университета, а на рисунке 2.11 – профилограммы поверхности, снятые с помощью данного прибора.

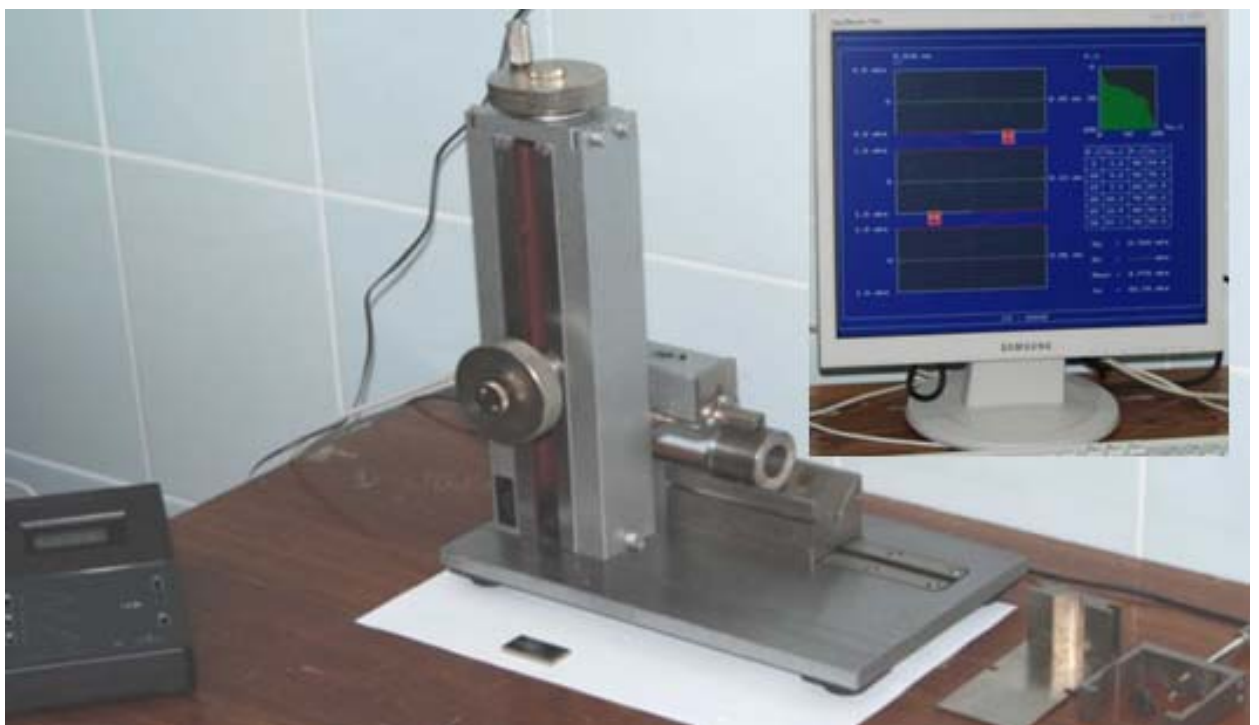
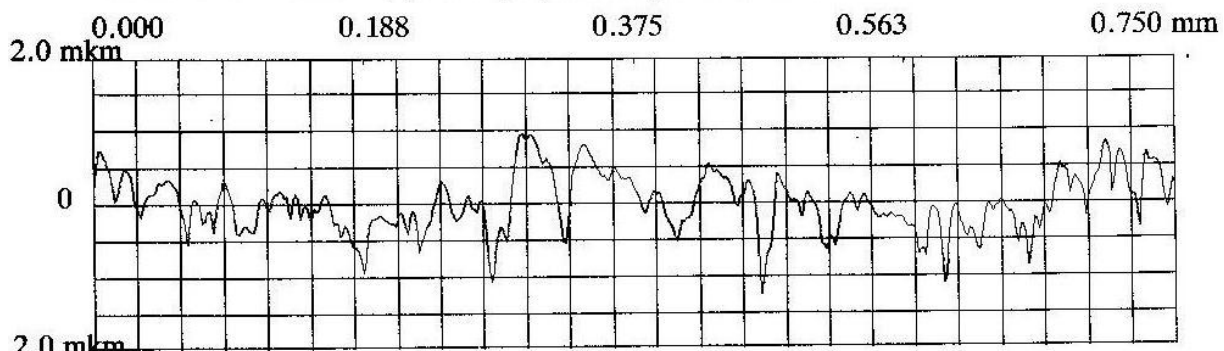


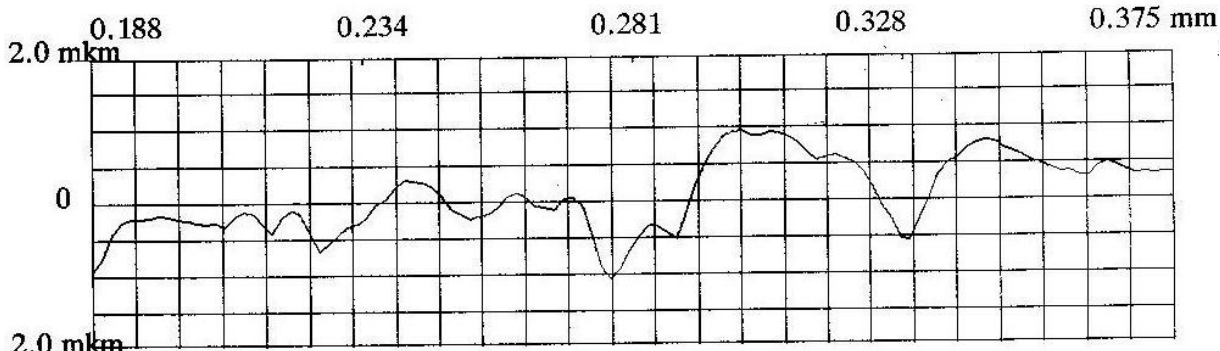
Рисунок 2.10 — Профилограф-профилометр АБРИС

Машинка Боровой + Смазка

АБРИС - ПМ7 Дата :01/01/2002 Время:00:24:30



Верт.увел. $V_v = 10000$; Гориз.увел. $V_h = 200$ Цена дел. по гориз.: 0.030 mm



Верт.увел. $V_v = 10000$; Гориз.увел. $V_h'' = V_h \times 4$

Рисунок 2.11 — Профилограммы поверхности

2.1.5 Элементарная контактная система

Инженерные сооружения, машины и механизмы состоят из отдельных частей, соединенных между собой контактными соединениями (контактами). Структуры, состояния и процессы формируются в контактах в зависимости от типа пар трения и условий рабочей среды.

Под «элементарной контактной системой» (ЭКС) или «трибосистемой» понимается триединое целое, которое содержит два физических тела и контакт между ними (рисунок 2.12). Одно из тел, играющее активную роль в трибосистеме, называется «тело» (активный элемент), другое - «контртело» (реактивный элемент), а третья динамическая форма между ними - «контакт» (контактное тело) как гибридное происхождение трибосистемы. Следует обратить внимание на тот факт, что контакт между двумя телами не является отдельным физическим элементом системы, как два взаимодействующих тела, но является третьим функциональным элементом, который во времени, месте и роли не может соединиться с двумя другими. Следует подчеркнуть, что в процессе

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ

Лист

30

функционирования трибосистемы свойства контактного тела изменяются во времени и пространстве.

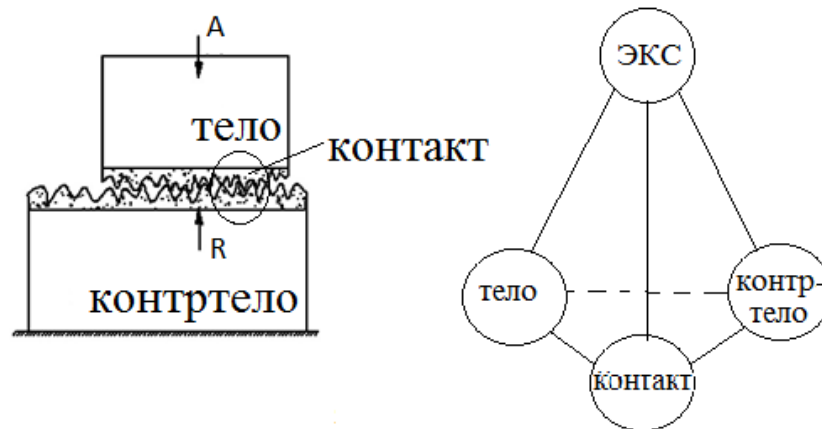


Рисунок 2.12 — Модель элементарной контактной системы (ЭКС) – трибосистемы

Трибологические системы рассматриваются как совокупность элементарных контактных систем. Механизмы и машины содержат множество десятков, сотен, а иногда и тысяч трибосистем - подшипники качения и скольжения, зубчатые колеса, кулачковые шестерни, механизмы трения (рисунок 2.13).



Рисунок 2.13 — Примеры применения трибосистем

Изм.	Лист	№ докum.	Подпись	Дата

23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ

Лист

31

Основные технические функции трибосистем в машинах связаны с преобразованием движения, энергии, информации и вещества и могут быть разделены на следующие группы (таблица 2.1):

- передача движения;
- передача механической работы (мощности);
- перевозка материалов;
- обработка материалов;
- получение и/или воспроизведение информации.

Таблица 2.1 — Примеры основных функций трибосистем в механических и биологических системах

Основные функции		Примеры
Движение	Ограничение/ передача движения, прекращение движения	Подшипники, шарниры, шпиндели, фланцы, зубчатые передачи, сцепления, тормоза, демпферы трения, болтовые соединения, суставы у животных и людей и др.
Работа/ мощность	Механическая, гидравлическая и пневматическая передача мощности	Передачи и механизмы: зубчатые, цепные, кулачковые, исполнительные, червячные, фрикционные, гипоидные, кривошипно-шатунные и др.
Информация	Получение	Циферблаты, реле, электрические контакты, кулачковые механизмы, печатные узлы, механизмы слежения, часовые механизмы и др.
	Воспроизведение	Дисковые накопители, магнитные головки, звукозаписывающие устройства и др.
Материалы	Транспортировка	Система «колесо-рельс», «шина-дорога», конвейеры, клапаны, фильтры, поршневые узлы, уплотнения, землеройные машины, трубопроводы, конвейеры, кровеносная система животных и человека и др.
	Обработка	Сжатие, литье, резка, штамповка, точение, полировка, шлифовка, дробление, зубы животных и человека и др.

Трибологические процессы трения, износа, смазки, контактной проводимости, контактной восприимчивости, контактной капиллярности сильно зависят от геометрической формы и типа движения контактирующих тел в трибосистемах. Большое разнообразие контактов между твердыми телами, в зависимости от их геометрической формы в трибологии, условно сгруппированы в три большие группы: точечный, линейный и плоский контакт (рисунок 2.14).

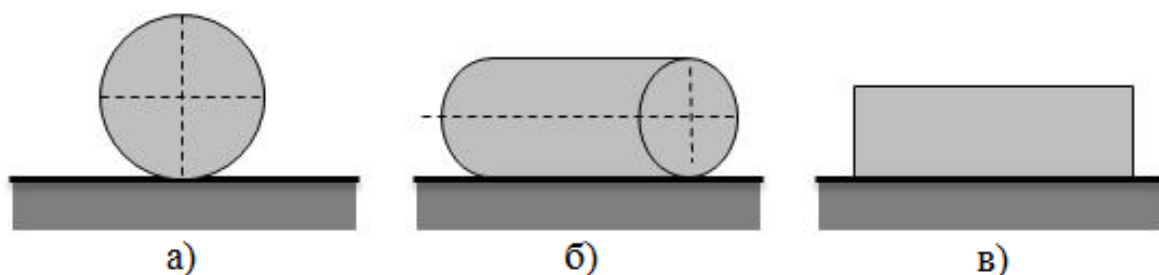


Рисунок 2.14 — Схемы трех групп контактов:

а) точечный контакт, б) линейный контакт, в) плоский контакт

Некоторые из возможных кинематических схем трибосистем показаны на рисунке 2.15: а) скольжение; б) качение и вращение вокруг оси x ; в) вращение вокруг оси y (верчение); г) удар; д) колебательные движения (возвратно-поступательное движение), которые могут выполняться по одной, двум или трем осям; е) взаимодействие однофазного потока жидкости или жидкости, несущей частицы, с поверхностью твердого тела.

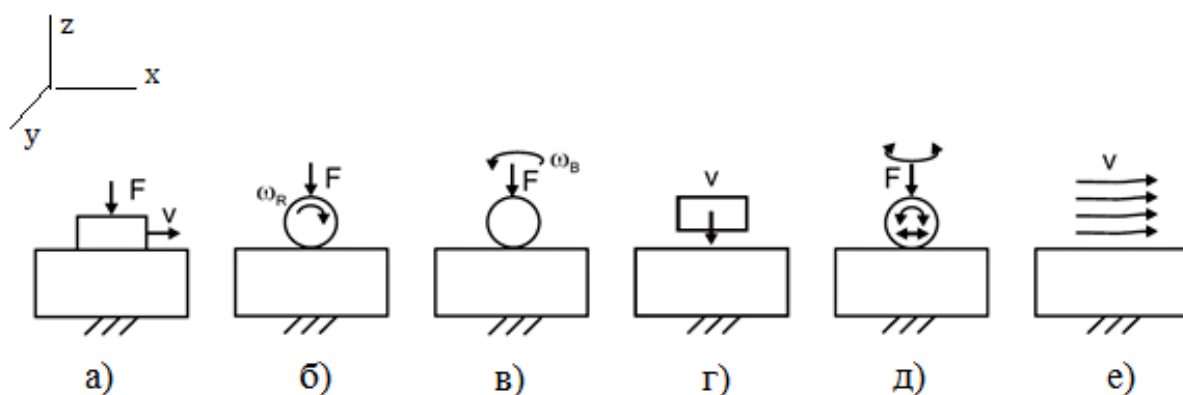


Рисунок 2.15 — Некоторые кинематические схемы трибосистем

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

2.1.6 Контактное тело

Контакт как третье тело в структуре контактных соединений, рассматриваемых как трибосистемы, не является самостоятельным физическим объектом, но он является функциональным элементом, поскольку играет центральную роль в процессе их эксплуатации.

Как «третье тело» между взаимодействующими элементами, контакт в целом отличается от них по структуре, характеристикам и свойствам. В частности:

– контакт - дискретное тело, это означает, что он существует в отдельных контактных зонах, возникающих в результате неизбежной шероховатости контактирующих поверхностей;

– контактное тело имеет меньшую плотность, чем контактирующие элементы, так как это пористое тело. Пористость обусловлена его дискретной природой. Пористость является фундаментальной характеристикой контактного тела и определяется количественно путем суммирования объемов его открытых пор;

– фактическая площадь контакта между поверхностями является еще одной фундаментальной характеристикой контактного тела. Эта величина количественно измеряется суммированием площадей дискретных зон контакта. Фактическая площадь и пористость имеют специфическое распределение для каждого контактного соединения в зоне контактного взаимодействия пары трения. Их распределение равномерно, если плотность пористости и фактическая площадь контакта постоянны во времени и пространстве;

– пространство между микроконтактами называется контактным зазором. Он может быть заполнен воздухом, водой, смазкой, частицами износа, продуктами разложения смазки во время работы. Размер, форма, состав и распределение контактного зазора в пространстве и времени работы зависят от динамики контактной проводимости при смазке и, соответственно, от срока службы трибосистемы. Контактный зазор измеряется общей пористостью контактного тела, отнесенной к единице номинальной площади контакта.

Состояние и характеристики контакта зависят от внешней механической нагрузки, его собственной структуры и природы, а также от продолжительности его работы.

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

2.1.7 Дискретность контакта. Площади контакта

То, что определяет дискретную природу существования на трех уровнях – макро, микро и мезо, - это контакты во всем их разнообразии, объединенные в единую контактную сеть.

На рисунке 2.16 изображена техническая система «подшипник скольжения» (ПС) с учетом контакта как независимого третьего объекта К между подшипником П и направляющей Н.



Рисунок 2.16 — Трибосистема «Подшипник-контакт-направляющая»

В отличие от подшипника и направляющей, третье тело-контакт между ними имеет подчеркнуто дискретный характер, что связано с неизбежными отклонениями технических поверхностей от идеальных математических поверхностей деталей.

В трибологии используют три типа площадей контакта: номинальная площадь A_n , которая является непрерывной и соответствует идеальным поверхностям с номинальными размерами детали. В классической механике работают именно с номинальными поверхностями и номинальной площадью контакта.

Площадь A_c соответствует контакту гладких волнистых поверхностей и называется контурной площадью, а площадь A_r , соответствующая общей площади контакта между шероховатыми поверхностями, называется фактической площадью контакта.

Самое важное значение для трибологии представляет фактическая площадь контакта, т.к. она определяет мезодискретность контакта и реализует контактное взаимодействие в соединениях. На рисунке 2.17 представлена схема

прямоугольного ползунка с размерами a и b , вид сверху [2]. Номинальная площадь контакта равна $A_a = a \cdot b$, а фактическая площадь контакта A_r определится сложением элементарных пятен контакта A_{ri} , образованных шероховатостью подшипника и направляющих поверхностей.

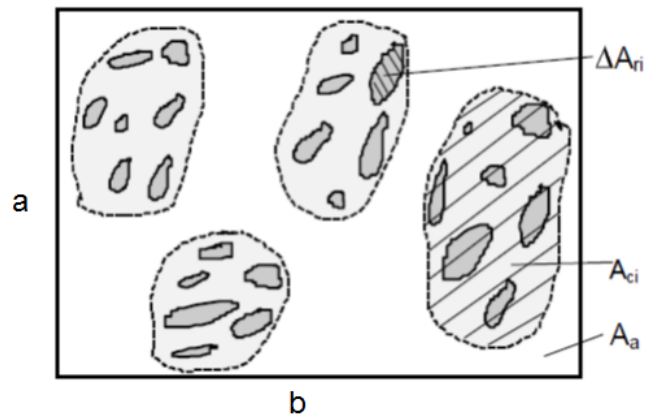


Рисунок 2.17 — Площади контакта между шероховатыми телами:

$A_a = a \cdot b$ – номинальная площадь контакта; A_c – контурная площадь контакта;

ΔA_{ri} – фактическая площадь единичного пятна контакта

Каждый реальный контакт, как структура, образован дискретными точками контакта n_i , соответствующими касанию двух противоположных шероховатостей тела и контртела. Фактическая площадь контакта A_r и количество n точек контакта рассчитываются по формуле:

$$A_r = \sum_i^n A_r^i; \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.14)$$

Две взаимодействующих шероховатости тела и контртела образуют контактную точку (пятно), если они сближаются на такое расстояние, что между ними возникают силы отталкивания.

Расстояние между двумя точками контакта в горизонтальном направлении определяет шаг дискретности и распределение пятен. Этот шаг может быть постоянным при однородном контакте, монотонно изменяющимся и хаотичным в самом общем случае.

Отношение фактической площади A_r к номинальной A_a определяет относительную площадь (плотность фактического контакта) η_r :

$$\eta_r = \frac{A_r}{A_a} = \eta_r(x, y, z), \quad (2.15)$$

где $\eta_r(x, y, z)$ – функция распределения относительной площади контакта по A_a .

Изменение η_r при разных давлениях происходит в интервале от нуля до единицы, т.е. $0 < \eta_r(x, y, z) < 1$.

Зависимости от внешнего давления N и контактного давления p имеют вид:

$$A_r = A_r(N), \quad (2.16)$$

$$\eta_r = \eta_r(p). \quad (2.17)$$

Эти зависимости называются соответственно законом изменения фактической площади контакта A_r от внешнего давления N и законом изменения относительной площади контакта η_r от контактного давления $p_a = N/A_a$.

Отношение N/A_r определяет фактическое контактное давление p_r :

$$p_r = \frac{N}{A_r} = \frac{N}{A_a} \frac{A_a}{A_r} = \frac{p_a}{\eta_r}. \quad (2.18)$$

Функциональное распределение номинального давления:

$$p(x, y, z) = p_r \eta_r(x, y, z). \quad (2.19)$$

Для наглядности на рисунке 2.18 схематично показан контакт между двумя горизонтальными техническими поверхностями. Для простоты предполагают, что нижняя поверхность является совершенно гладкой плоскостью.

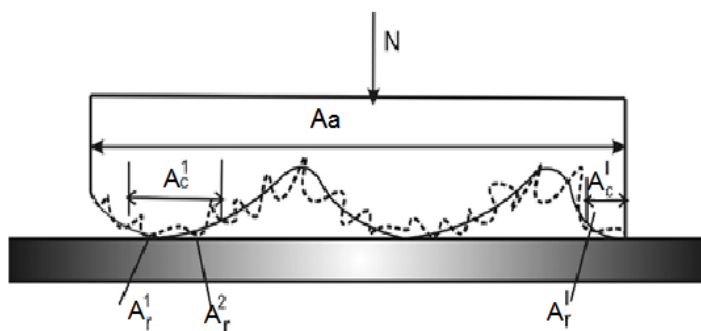


Рисунок 2.18 — Контакт между гладкой и шероховатой поверхностью

Можно увидеть, что контурная площадь A_c , создаваемая волнистостью верхней поверхности, является суммой микроплощадок A_c^j :

$$A_c = \sum_j A_c^j \quad (j=1,2,\dots,m); \quad A_r = \sum_i A_r^i = nA_r^o \quad (i=1,2,\dots,n), \quad (2.20)$$

где m – число контактных площадок, вызванных волнистостью;

n – число пятен контакта, вызванных шероховатостью;

A_r^o – средняя площадь пятен контакта.

Номинальная, контурная и фактическая площади удовлетворяют условию:

$$A_a > A_c > A_r. \quad (2.21)$$

Знак неравенств для площадей в формуле (2.21) меняется на противоположный, когда вводятся соответствующие давления – номинальное p_a , контурное p_c и фактическое p_r , т.е.:

$$p_r = \frac{N}{A_r} > p_c = \frac{N}{A_c} > p_a = \frac{N}{A_a}. \quad (2.22)$$

В трибологии по традиции, введенной Боуденом [35, 36], предполагается, что фактическое контактное давление p_r равно твердости более мягкого тела по Бринеллю HB :

$$p_r = HB. \quad (2.23)$$

В соответствии с формулами (2.15) и (2.23) для распределения плотности фактического контакта (относительной площади контакта) получаем:

$$\eta(x, y, z) = \frac{1}{HB} p_a(x, y, z). \quad (2.24)$$

Т.е. распределение η совпадает с распределением номинального контактного давления p_a .

Из формул (2.19) и (2.24) определяется фактическая площадь A_r контакта:

$$A_r = \eta \cdot A_a = \frac{A_a}{HB} \frac{N}{A_a} = \frac{N}{HB}. \quad (2.25)$$

Формула (2.25) выражает закон изменения фактической площади контакта по Боудену. Эта зависимость от внешнего нормального сжатия N является линейной. Если, например, более мягкий элемент в контактном соединении имеет твердость 100 кг/мм^2 и прижимается к твёрдому телу с силой 10 кг , то фактическая площадь контакта между ними определится по формуле (2.25):

$$A_r = \frac{N}{HB} = \frac{10}{100} = 0,1 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Если тело имеет номинальную площадь 10 см^2 , то относительная площадь контакта определится по формуле (2.15):

$$\eta = \frac{A_r}{A_a} = \frac{0,1 \text{ (мм}^2\text{)}}{100 \text{ (см}^2\text{)}} = 10^{-5} = 0,001\%.$$

Таким образом, только одна тысячная процента от номинальной площади соединения фактически участвует в трении.

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

2.1.8 Контактные деформации

Существует три уровня деформаций в контактном теле: деформации шероховатости, деформации в контактах и деформации контактных систем. Исследованием данной темы занимались многие известные ученые, например, Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец [22], А.С. Ахматов [21], Н.М. Михин [37, 38], А.А. Санников [39] и др.

Деформации шероховатости

Если две шероховатости соприкасаются, это означает, что они взаимодействуют посредством давления и реакции и обязательно деформируются, проходя, в зависимости от внешнего давления, три последовательных этапа: упругий, упруго-пластический и пластический.

На рисунке 2.19 изображены три идеализированные модели взаимодействующих поверхностей: стержневая, сферическая и коническая.

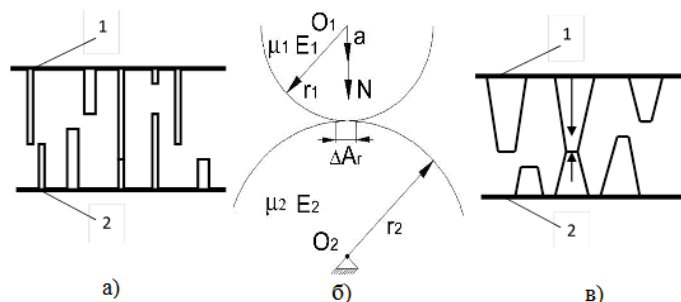


Рисунок 2.19 — Идеализированные модели микрорельефа:
стержневая (а), сферическая (б) и коническая (в)

Кратко рассмотрим сферическую модель микрорельефа. Это чаще всего используется в формуле Герца для упругой деформации δ контактирующих сфер с радиусами r_1 и r_2 . Согласно Герцу, взаимодействие упругих сфер выражается, с одной стороны, деформацией:

$$\delta = 0,82 \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{r_1 + r_2}{r_1 r_2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot N^{\frac{2}{3}}. \quad (2.26)$$

С другой стороны – через площадь контакта сфер A_r под действием их сжимающей силы N :

$$A_r = 0,82\pi \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot N, \quad (2.27)$$

где E_1 и E_2 – модули упругости соответствующих сфер;

μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона для материала сфер.

Деформация δ измеряется по изменению расстояния между двумя центрами O_1 и O_2 сфер, т.е. $\delta = \Delta(r_1 + r_2)$.

При пластической деформации сферического микрорельефа площадь контакта A_r между ними и деформацию δ можно рассчитать в соответствии с предположением Боудена [36], что напряжение в месте контакта равно твердости по Бринеллю для более мягкого вещества.

Для простоты рассмотрим частный случай контакта твердой сферы радиуса $r_1 = r$, с одной стороны, с упругим, а с другой – с пластическим полупространством, которое получается из второй сферы пересечением границы $r_2 \rightarrow \infty$. На рисунке 2.20 показан контакт твердой сферы с упругим полупространством, а на рисунке 2.21 – взаимодействие этой же сферы с пластическим полупространством.

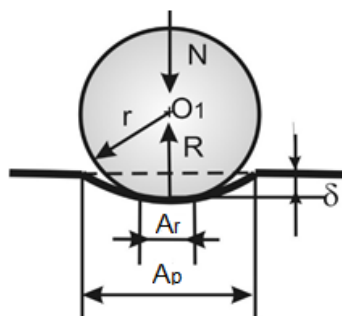


Рисунок 2.20 — Контакт твердой сферы с упругим полупространством

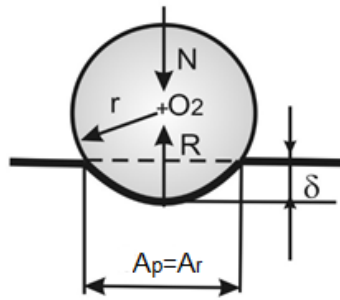


Рисунок 2.21 — Контакт сферы с пластическим полупространством

На представленных рисунках A_r обозначает фактическую площадь контакта, а A_p – площадь поперечного сечения внедряющийся сферы радиуса r линией границы деформируемого полупространства. Между A_r и A_p в общем случае существует связь:

$$A_r = \alpha \cdot A_p, \quad (2.28)$$

где α – коэффициент пропорциональности, который различен для разных видов деформации (упругой, пластической, упругопластической) полупространства.

Согласно определению твердости по Бринеллю, HB любого полупространства, которое деформируется твердой сферой радиуса r под действием внешней нагрузки, рассчитывается по формуле:

$$HB = \frac{N}{A_r} \text{ или } A_r = \frac{N}{HB}. \quad (2.29)$$

Но при пластическом режиме расчет будет:

$$A_r = A_p = 2\pi \cdot r \cdot \delta. \quad (2.30)$$

Следовательно, пластическая деформация полупространства:

$$\delta = \frac{N}{2\pi \cdot r \cdot HB}. \quad (2.31)$$

Из формул (2.28) и (2.30) следует, что коэффициент α пластической деформации равен единице, т.е. $\alpha = 1$.

Для определения значения α для упругого контакта той же твердой сферы с полупространством воспользуемся формулами (2.26) и (2.27) для δ и A_r при $r_1 = r$ и $r_2 \rightarrow \infty$ и получим:

$$\delta = 0,82 \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{1}{r^{\frac{1}{3}}} \cdot N^{\frac{2}{3}}, \text{ т.к. } \frac{r}{r_2} \rightarrow 0. \quad (2.32)$$

$$A_r = 0,82\pi \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{\frac{2}{3}} r^{\frac{2}{3}} \cdot N^{\frac{2}{3}}. \quad (2.33)$$

Следовательно, по формулам (2.30) и (2.33) определяется A_p :

$$A_p = 2 \cdot 0,82\pi \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{\frac{2}{3}} r^{\frac{2}{3}} \cdot N^{\frac{2}{3}} = 2A_r. \quad (2.34)$$

Т.к. $A_r = 0,5A_p$, из формулы (2.28) получим, что коэффициент α для упругой деформации полупространства равен 0,5.

Для упругопластического режима деформации полупространства коэффициент α изменяется в пределах $0,5 \leq \alpha \leq 1$.

Деформации в контактах

Контакты как функциональные элементы в техническом оборудовании, как правило, представляют собой многофазные системы, которые обязательно включают шероховатость и волнистость на двух твердых поверхностях, взаимодействующих друг с другом. Чаще всего поры между шероховатостями заполнены воздухом или жидким смазочным материалом.

Отличительной чертой контакта как третьего тела в контактной системе является тот факт, что он не может быть выделен сам по себе как два других

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
						43
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

альтернативных тела, но автономно проявляет себя как третье функциональное тело.

Автономность проявления контакта бывает частичной и полной. Частичная заключается в ее участии в общих деформациях и смещениях контактных систем с нормальной контактной тепло-, электро- и звукопроводностью, работоспособностью, долговечностью, эксплуатационной надежностью. Полная – это автономия контактных проявлений, связанных с процессами трения, износа, смазки, герметичностью, капиллярностью.

Поскольку технические контакты имеют толщину порядка микрометров, измерение нормальных контактных деформаций требует очень чувствительной методики и системы контроля, которая, помимо необходимости исключать объемные деформации тела и контртела, способна измерять десятки и сотые доли микрометра.

Закон нормальной контактной деформации

Идея законов нормальной и тангенциальной деформации твердого тела иллюстрируется схематически на рисунках 2.22 и 2.23.

Рисунок 2.22 относится к нормальной деформации, а рисунок 2.23 – к тангенциальной деформации, и соответственно законы:

$$\begin{aligned}\sigma &= E \cdot \varepsilon; \\ \tau &= G \cdot \gamma,\end{aligned}\tag{2.35}$$

где σ – нормальное напряжение;

τ – тангенциальное напряжение;

ε – линейная деформация тела;

γ – угловая деформация тела;

E – модуль линейной деформации;

G – модуль угловой деформации.

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

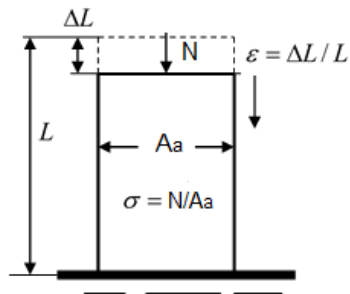


Рисунок 2.22 — Нормальная деформация твердого тела

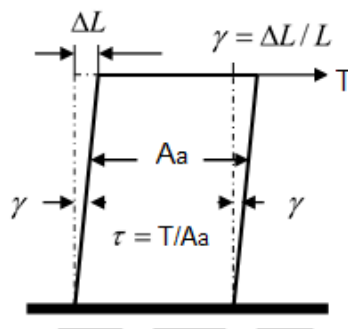


Рисунок 2.23 — Тангенциальная деформация твердого тела

Подобно (2.35), вводятся аналогичные понятия для контактной деформации и используются в виде:

$$\begin{aligned} \delta &= f_1(p), & p &= f_2(\delta); \\ \gamma &= f_3(\tau), & \tau &= f_4(\gamma), \end{aligned} \quad (2.36)$$

где $p = \frac{N}{A_a}$ – нормальные контактные давления;

$\tau = \frac{T}{A_a}$ – тангенциальные контактные давления;

δ и γ – соответствующие контактные деформации (рисунки 2.24 и 2.25).

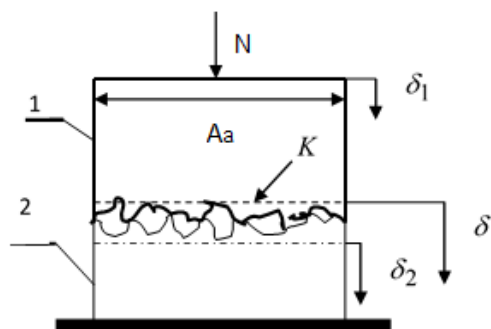


Рисунок 2.24 — Нормальные контактные деформации

									Лист
									45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ				

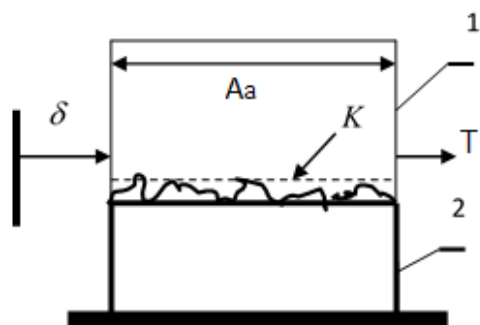


Рисунок 2.25 — Тангенциальные контактные деформации

Функциональные зависимости (2.36) известны в трибологии и трибомеханике как законы нормальной и тангенциальной контактной деформации между телами.

Законы контактной деформации, в отличие от законов деформации объемных тел, находящихся в контакте, имеют очень нелинейный характер и традиционно представлены в трибологии степенными функциями:

$$p = k_1 \delta^{k_2}; \delta = \frac{1}{k_1} p^{\frac{1}{k_2}} = c \cdot p^k, \quad c = \frac{1}{k_1}; \quad k = \frac{1}{k_2}, \quad (2.37)$$

где k_1 , k_2 , c и $p(\delta)$ — характерные константы для различных технических контактов.

Чаще всего на практике принимается $k_2 = 2$, $k = \frac{1}{k_2} = \frac{1}{2}$.

Нелинейный характер контактных деформаций подтверждается десятками экспериментальных результатов, опубликованных в трибологических журналах, диссертациях и монографиях. Вывод о контактной нелинейности подтверждается и нашими теоретическими и экспериментальными результатами. Нелинейный характер закона нормальной контактной деформации иллюстрируется графиками (рисунок 2.26). Кривая δ_2 относится к контакту, образованному твердыми поверхностями с более низким классом шероховатости.

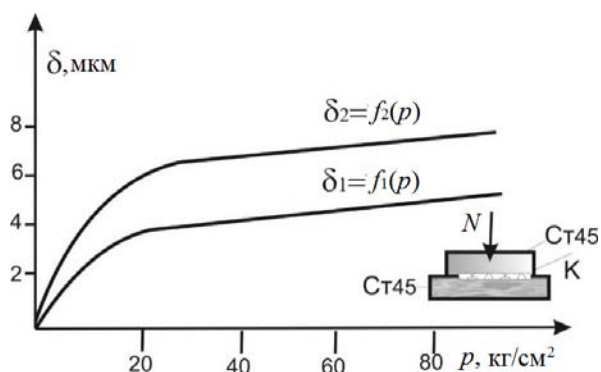


Рисунок 2.26 — Нелинейный характер закона нормальной контактной деформации

Деформация контактной системы

В элементарной контактной системе (рисунок 2.27) контакт между телом и контртелом представлен двумя мягкими слоями: слоем шероховатости и слоем волнистости (рисунок 2.28).

Общая деформация δ трибосистемы образована тремя деформациями: деформацией тела δ_T , деформацией контртела δ_K и деформацией в контакте δ_{KH} :

$$\delta = \delta_T + \delta_K + \delta_{KH}. \quad (2.38)$$

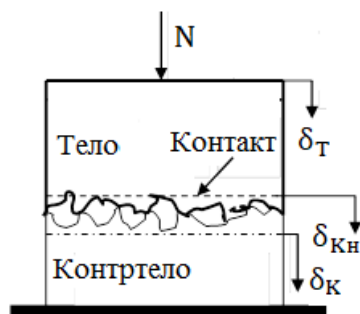


Рисунок 2.27 — Элементарная контактная система

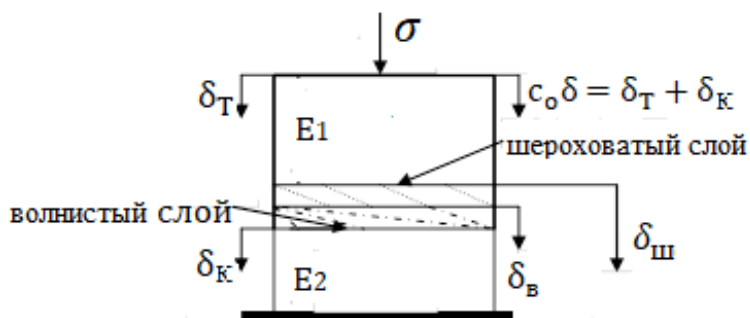


Рисунок 2.28 — Слои контакта

В свою очередь контактная деформация складывается из контактной деформации шероховатости $\delta_{ш}$ и волнистости $\delta_{в}$:

$$\delta_{KH} = \delta_{ш} + \delta_{в} = H(1 - e^{-kp}) + cp^m, \quad 0 < \delta \leq \delta_{max}, \quad m < 1, \quad (2.39)$$

где H – толщина шероховатого слоя;

p – контактное давление;

k, c, m – константы.

Поскольку модель для деформации в контакте, представленном через два слоя, континуальна, следует в законы деформации ввести вместо контактного давления

p понятие контактного напряжения $\sigma = \frac{N}{A_a}$.

Закон деформации элементарной контактной системы принимает вид:

$$\delta = \delta_{ш} + \delta(\sigma) = H(1 - e^{-k\sigma}) + c\sigma^m + c_o\sigma. \quad (2.40)$$

Слагаемые в формуле (2.40) представляют соответственно деформацию шероховатого слоя $\delta_{ш}$, изменяющуюся по экспоненциальному закону, деформацию волнистого слоя $\delta_{в}$, представленную в виде нелинейной степенной зависимости, и параметр, характеризующий деформацию тела и контртела:

$$\begin{aligned} \delta_{ш} &= H(1 - e^{-k\sigma}); \\ \delta_{в} &= c\sigma^m; \\ c_o\sigma &= \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \sigma. \end{aligned} \quad (2.41)$$

На рисунке 2.29 представлено графическое изменение деформации трибосистемы, полученное как результат сложения объемной δ_o и контактных деформаций $\delta_{ш}$ и $\delta_{в}$.

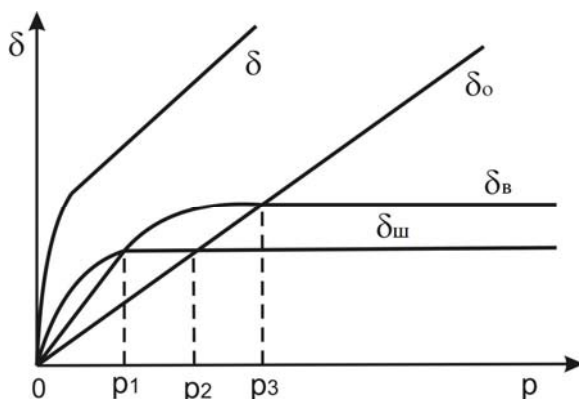


Рисунок 2.29 — Общая деформация контактной системы

2.2 Лекция по теме «Трение. Молекулярно-механическая теория трения»

2.2.1 Трение при предварительном смещении (трение покоя)

Учитывая, что относительное движение является необходимым условием возникновения трения, понятие трения в состоянии покоя вызывает недоумение. Этот момент исключается, как показано ниже, поскольку трение покоя всегда сопровождается относительными микродвижениями в области контакта [22].

Рассмотрим равновесие контактной системы «ползун-направляющая» (рисунок 2.30). Через вектор P обозначена активная сила, которая обычно нажимает на ползун, а через вектор N – опорная реакция направляющей.

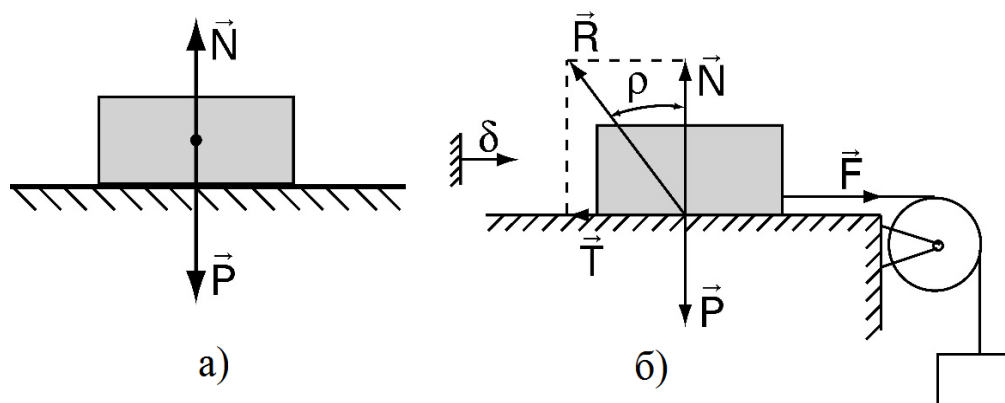


Рисунок 2.30 — Равновесие трибосистемы «ползун-направляющая»:

а) без тангенциальной силы; б) с тангенциальной силой (предварительное смещение)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ

Лист

49

Если пренебречь молекулярными силами притяжения тел, из условия равновесия ползуна получается, что две силы P и N равны по величине и образуют элементарный статический ноль (см. рисунок 2.30, а). В этом случае нет силы трения. Предположим (см. рисунок 2.30, б), что в дополнение к нормальной силе P ползуна также действует тангенциальная сила F , например, с помощью нити, один конец которой прикреплен к ползуну рядом с опорой, а на другом, проходящем через ролик, висит груз. Сила F стремится передвинуть ползун вдоль направляющей. В начале, когда F достаточно мала, как показывает опыт, ползун сохраняет свое состояние покоя. Это условие можно объяснить, если предположить, что в области контакта возникла тангенциальная реакция T , которая нейтрализует действие F . Из условий равновесия ползуна:

$$N = P, T = F. \quad (2.42)$$

Тангенциальная реакция T называется неполной силой трения покоя. Опорная реакция:

$$\vec{R} = \vec{N} + \vec{T}. \quad (2.43)$$

Опорная реакция отклоняется от нормали \vec{n} к поверхности контакта в точке редукции O на угол:

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{T}{N}, \text{ т.е. } \rho = \operatorname{arctg} \frac{T}{N}. \quad (2.44)$$

Угол ρ называется неполным углом трения покоя.

Исследования 1930-х годов показали, что появление силы трения T обязательно сопровождалось микроперемещением δ ползуна в направлении силы F . Таким образом, микроперемещение δ является возрастающей функцией T :

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\delta = f(T) \quad (2.45)$$

Это явление известно как предварительное смещение тела.

Все это доказывает, что условие относительного смещения тел остается обязательным для всех видов трения, включая трение покоя.

Если постепенно увеличивать F , это, согласно формулам (2.42) – (2.45), также увеличит величины T , R , ρ и δ . При достижении предельного значения F_0 силы F , тело достигнет такого критического состояния, что даже малейшее увеличение F приведет его в движение (рисунок 2.31).

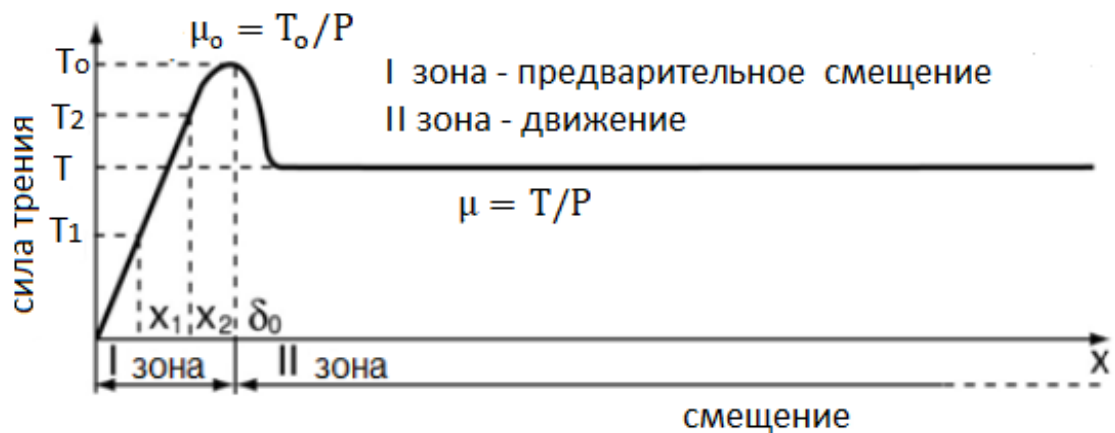


Рисунок 2.31 — Изменение силы трения от смещения; зоны предварительного смещения и движения

Критическое состояние ползуна определяется условиями:

$$T_0 = F_0. \quad (2.46)$$

$$\operatorname{tg} \rho_0 = \frac{T_0}{N}, \text{ т.е. } \rho_0 = \operatorname{arctg} \frac{T_0}{N}. \quad (2.47)$$

$$\delta_0 = f(T_0). \quad (2.48)$$

Величины T_0 , ρ_0 , δ_0 характерны для контактной системы и называются соответственно сила трения, угол трения и предварительное смещение при покое.

Экспериментальное определение силы трения покоя (см. рисунок 2.30, б) производится на основе равенства (2.46). Сила трения в состоянии покоя увеличивается с увеличением нормального давления P :

$$T = \alpha + \beta \cdot P, \quad (2.49)$$

где α и β – коэффициенты, разные для разных трущихся тел.

Зависимость (2.49) называется законом Кулона для силы трения покоя. Коэффициент α представляет собой тангенциальную реакцию, которая создается молекулярным притяжением тел.

На практике зависимость (2.49) используют в виде:

$$T = \left(\frac{\alpha}{P} + \beta \right) \cdot P = \mu_0 P. \quad (2.50)$$

В инженерной практике μ_0 считается постоянной величиной и называется коэффициентом трения покоя. В этих условиях зависимость (2.50) выражает пропорциональную зависимость T_0 и P и называется законом Амонтона. В некоторых странах это упоминается как закон Леонардо-Амонтона.

Основываясь на равенствах (2.42) и (2.49), законы трения можно представить в виде:

$$T_0 = \alpha + \beta \cdot N. \quad (2.51)$$

$$T_0 = \mu_0 \cdot N. \quad (2.52)$$

2.2.2 Трение скольжения

Для пояснения понятия трения скольжения, рассмотрим случай скольжения тела вдоль направляющей при его переходе от покоя к движению (рисунок 2.32).

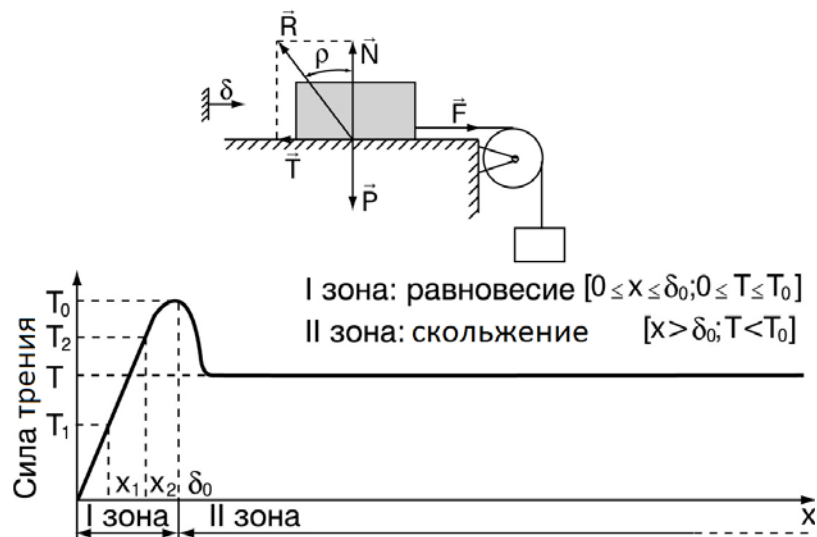


Рисунок 2.32 — Изменение силы трения при скольжении от покоя к движению:

T_1, T_2 – соответственно неполные силы трения покоя; T_0 – сила трения покоя;
 T – сила трения скольжения (кинетическое трение)

При постепенном увеличении тангенциальной силы F от 0 до ее предельного значения F_0 , ползунок сохраняет свое состояние покоя. Параллельно с увеличением F увеличивается и сила трения T от 0 до T_0 ($T_0 = F_0 = \mu_0 \cdot N$), угол трения ρ от 0 до ρ_0 ($\mu_0 = \operatorname{tg} \rho_0$) и предварительное смещение δ от 0 до δ_0 . Если продолжать увеличивать F , ползунок начинает двигаться, и, как показывают экспериментальные исследования, сила трения T при этом переходе уменьшается, а затем сохраняет постоянное значение T . Зависимость силы трения T ползуна от его относительного смещения δ показана на рисунке 2.32.

Как показали исследования, закон Амонтона сохраняет свой вид и в случае скольжения:

$$T = \mu \cdot N. \quad (2.53)$$

Т.е. сила трения скольжения пропорциональна нормальной реакции ползунка и направлена против направления смещения. Коэффициент пропорциональности μ называется коэффициентом трения скольжения. Как правило, он меньше, чем в покое ($\mu < \mu_0$).

2.2.3 Молекулярно-механическая теория трения

Внешнее и внутреннее трение имеют разную природу. Внешнее трение возникает между поверхностными слоями контактного тела, внутреннее – между частицами смазочного материала в объеме контактного тела.

Согласно основоположнику молекулярно-механической теории трения – И. В. Крагельскому [8, 10], внешнее трение имеет двойственную природу. Оно рассматривается как единство двух типов контактных взаимодействий – молекулярного (адгезивного) и механического (деформационного).

Молекулярно-механическая теория основана на дискретности контакта двух тел из-за шероховатости и волнистости контактных поверхностей. Внешнее трение осуществляется в отдельных пятнах контакта с размерами от 0,1 до 30 микрон в зависимости от шероховатости, образующейся в процессе трения.

Микроконтакты возникают в результате деформации шероховатости – внедрения или дробления. Деформации по характеру могут быть упругими или пластическими. Пятна контакта распределены неравномерно и сосредоточены на вершинах волн. Основные процессы в образовании пятен контакта связаны с контактом и прохождением поверхностей через шероховатости и образованием «соединительных мостиков» между ними. При контакте создается высокое местное давление даже при низких нормальных нагрузках из-за небольшой площади контакта [9].

Согласно этой теории, интегральная сила трения T представляется как сумма двух компонентов – адгезивного (молекулярного) T_a и деформационного (механического) T_{Δ} , действующих на отдельные пятна контакта в контактном теле:

$$T = T_a + T_{\Delta} = \sum_{i=1}^n T_{a_i} + \sum_{i=1}^n T_{\Delta_i}, \quad (2.54)$$

где T_{a_i} и T_{Δ_i} – соответственно адгезивная (молекулярная) и деформационная (механическая) составляющие силы трения T , действующей в одном пятне контакта, образованном на расстоянии h (рисунок 2.33).

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

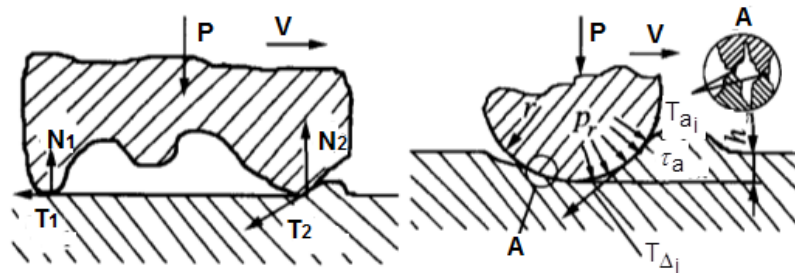


Рисунок 2.33 — Схема двухкомпонентной природы силы трения в микроконтактах

Для удельной силы трения τ , возникающей в единице фактической площади контакта, следует:

$$\tau = \frac{T}{A_r} = \frac{T_a}{A_r} + \frac{T_{\Delta}}{A_r} = \tau_a + \tau_{\Delta}, \quad (2.55)$$

где τ_a – адгезивный компонент удельной силы трения;

τ_{Δ} – деформационный компонент удельной силы трения.

Одним из источников рассеяния энергии при трении является работа, которая тратится на образование и разрушение молекулярных связей, которые образуются в контактных пятнах.

Образование связей при контакте между поверхностями твердых тел обычно называют адгезией. Адгезия зависит от сил взаимодействия между атомами, молекулами или функциональными группами контактирующих тел, которые зависят от их природы. Наиболее универсальными являются силы Ван-дер-Ваальса.

Обычно адгезивная составляющая удельного трения выражается в виде:

$$\tau_a = \tau_o + \beta \cdot p_r. \quad (2.56)$$

где τ_o и β – адгезивные константы трения, определенные экспериментально.

Считается, что эти параметры являются характеристиками поверхностных слоев материалов и зависят от природы образующихся на них тонких пленок. Для

металлов и полимеров $\beta = 0,02...0,15$. Для трибосистемы «металл-металл» без смазочного материала $\tau_o = 2,3...3$ МПа, со смазочным материалом $\tau_o \approx 1$ МПа, для трибосистемы «металл-полимер» $\tau_o = 0,2...0,5$ МПа.

Значения параметров трения τ_o и β зависят от относительной скорости движения, степени загрязнения и состава адсорбированных поверхностных слоев. Слои и грязь всегда присутствуют на приработанных поверхностях, поэтому необходимо экспериментально определять параметры τ_o и β для каждой реальной системы трения в условиях ее эксплуатации [12].

Механическое контактное взаимодействие обусловлено дискретной природой контактного тела в результате внедрения шероховатости в пятна контакта. Взаимное внедрение поверхностей контактирующих тел обусловлено не только шероховатостью, но и контактными деформациями, создаваемыми нагрузкой из-за анизотропии их механических свойств.

Различают упругую, пластическую и упругопластическую контактные деформации. На рисунке 2.34 показаны схемы контакта между единичной неровностью (сферический индентор) и идеально гладкой деформируемой поверхностью при скольжении для трех случаев деформации – а) пластического контакта, б) упругого контакта и в) упругопластического контакта. На рисунке обозначены: h_n , h_y , $h_{y/n}$ – глубина внедрения индентора соответственно при пластическом, упругом и упругопластическом контакте; $h_{yв}$ – упругое восстановление; P – нормальная нагрузка; F – тангенциальная сила; r – радиус индентора.

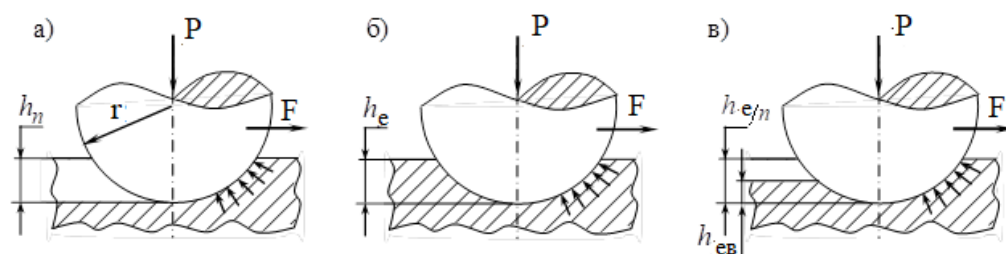


Рисунок 2.34 — Контакт между единичной неровностью и идеально гладкой деформируемой поверхностью при контакте:

а) пластическом; б) упругом; в) упругопластическом

Механический компонент силы трения зависит от коэффициента гистерезисных потерь и величины относительного внедрения h/r . Механический компонент увеличивается с увеличением шероховатости и повышением нормальной нагрузки. При упругом контакте на очень гладких поверхностях механический компонент силы трения незначителен. Объем деформируемого материала определяется относительным внедрением h/r .

Коэффициент трения μ , содержащий адгезивный μ_a и деформационный μ_Δ компоненты:

$$\mu = \mu_a + \mu_\Delta = \frac{\sum_{i=1}^n T_{a_i}}{N} + \frac{\sum_{i=1}^n T_{\Delta_i}}{N} = \frac{T_a}{N} + \frac{T_\Delta}{N} = \mu_a + \mu_\Delta. \quad (2.57)$$

Молекулярный компонент коэффициента трения:

$$\mu_a = \tau_o + \beta \cdot p_r. \quad (2.58)$$

Деформационный компонент коэффициента трения:

$$\mu_\Delta = k \sqrt{\frac{h}{r}}. \quad (2.59)$$

В этом случае коэффициент k характеризует вид контакта и принимает значения соответственно: для пластического контакта $k = 0,55\alpha$; для упругого $k = 0,19\alpha$. Параметр α – коэффициент потерь на гистерезис материала [9, 40].

В соответствии с формулами (2.57), (2.58) и (2.59) для коэффициента трения для дискретного контакта (пятно контакта) окончательно получаем:

$$\mu = \mu_a + \mu_\Delta = (\tau_o / p_r) + \beta + k \sqrt{\frac{h}{r}}. \quad (2.60)$$

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

2.2.4 Влияние эксплуатационных факторов на коэффициент трения

Преобладание адгезивной и деформационной составляющих коэффициента трения варьируется в широких пределах в зависимости от совместного действия ряда факторов - состава и свойств конструкционных и смазочных материалов, шероховатости поверхности, динамических факторов, таких как нормальная нагрузка, скорость скольжения, температура и состав окружающей рабочей среды. Вопрос влияния различных факторов на коэффициент трения изучается в работах Ю. М. Лужнова и В. Д. Александрова [1], Н. К. Мышкина и М. И. Петроковца [22].

В общем случае зависимость коэффициента трения от нормальной нагрузки проходит через минимум. Существует оптимальное значение фактического контактного давления p_r^* , при котором коэффициент трения имеет минимальное значение μ_{min} (рисунок 2.35).

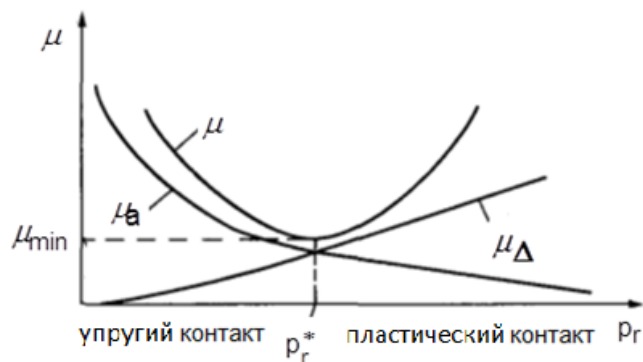


Рисунок 2.35 — Зависимость коэффициента трения от контактного давления

С увеличением нормальной нагрузки фактическое контактное давление p_r на упругом контакте увеличивается и, соответственно, уменьшается адгезивная составляющая коэффициента трения – первые два слагаемых в уравнении (2.60). В то же время увеличивается глубина внедрения шероховатости h , при этом увеличивается деформационная составляющая – последнее слагаемое.

Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения имеет сложный характер. В литературе предлагается ряд выражений, например, экспоненциальная формула:

$$\mu = (a + b \cdot V) \cdot e^{-cV} + d. \quad (2.61)$$

Параметры a , b , c , d характеризуют режим трения и свойства материала трибосистемы. Параметр a существенно зависит от физико-механических свойств материалов в контакте. Он увеличивается с увеличением модуля упругости, скорости релаксации напряжений и шероховатости. Параметр b зависит от вязкопластических характеристик материалов, параметр c характеризует демпфирующие свойства контактных слоев, а параметр d – вид контакта.

Формула (2.61) является обобщенным выражением зависимости коэффициента трения от скорости скольжения. Существенным недостатком является отсутствие влияния нормальной нагрузки, сложность определения большого количества параметров, которые существенно зависят от температуры и т.д.

Следует обратить внимание на тот факт, что изменение нормальной нагрузки и скорости скольжения во время трения приводит к значительному увеличению температуры на контакте, поскольку сила трения преобразуется в тепло. Происходят изменения в структуре, физико-механических свойствах и характеристиках контактирующих поверхностных слоев.

При повышении температуры, с одной стороны, уменьшается прочность адгезионных связей, а с другой – увеличивается пластичность контакта, а следовательно и площадь контакта, в поверхностных слоях контакта происходят химические реакции. В результате этих процессов коэффициент трения увеличивается.

Температура в контакте существенно зависит от скорости скольжения. В общем случае зависимость коэффициента трения от скорости проходит через максимум, положение которого зависит от контактного давления p_r . Наличие максимума объясняется гистерезисными потерями, возникающими при деформации поверхностного слоя при трении. При очень высоких скоростях скольжения можно расплавить поверхность, и сухое трение перейдет в гидродинамическое, т.е. коэффициент трения уменьшается с ростом температуры.

						23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докum.	Подпись	Дата			59

Согласно разработанной теории тепловых процессов в контакте, максимальная температура в пятне контакта t_{max} представляется в виде алгебраической суммы четырех компонентов:

$$t_{max} = t_o + t_V + t_S + t_B, \quad (2.62)$$

где t_o – начальная температура в трибосистеме (температура окружающей среды);

t_V – объемная температура контактирующих тел;

t_S – средняя температура площади контакта;

t_B – температура вспышки пятна контакта.

Задача теплопроводности состоит в том, чтобы определить распределение температуры в элементах трибосистемы, когда на контакт влияет переменный во времени и положении источник тепла и тепло выделяется со свободных поверхностей в окружающую среду. Эта задача особенно важна для механизмов и систем с высокими скоростями скольжения и фрикционным назначением.

Поскольку реальное контактное тело – это тело с распределенными параметрами - неоднородным составом, дискретной структурой и контактным давлением, на практике сила трения накладывается на элементарные силы трения, возникающие в отдельных точках контакта, и коэффициент трения постоянно меняется.

К сложному взаимовлиянию этих факторов следует добавить роль упругопластических характеристик контактного тела. Упругий контакт проявляется при таких значениях нагрузки и молекулярных взаимодействиях, которые не вызывают контактных напряжений, превышающих предел текучести материала в поверхностных слоях. Пластический контакт характеризуется контактными напряжениями, превышающими предел текучести материала, что приводит к внедрению единичной шероховатости в поверхностный слой с меньшей твердостью.

При значительном повышении температуры сначала микроконтакты, а затем все контактное тело переходят в пластическое состояние. Кроме того, при повышении температуры изменение твердости поверхностных слоев обычно

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

является нелинейным. В этом случае градиент температуры является основным фактором.

Температура оказывает различное влияние на молекулярную и деформационную составляющие трения. Молекулярный компонент зависит от средних касательных напряжений, которые определяются межатомными и межмолекулярными взаимодействиями в микроконтактах. Следовательно, энергоемкость и, соответственно, прочность микроконтактов уменьшается с ростом температуры. Изменение температуры вызывает изменение фрикционных характеристик контакта и изменение твердости поверхностных слоев. Эти изменения почти всегда нелинейны.

Влияние шероховатости поверхности на коэффициент трения сводится к влиянию на тот или иной компонент трения. Уменьшение параметра R_z приводит к увеличению фактической площади контакта и, следовательно, к увеличению адгезионного компонента. Наоборот, увеличение шероховатости и, как следствие, уменьшение радиуса кривизны вершин микронеровностей приводит к увеличению деформационной составляющей трения.

4.6 Трение качения

С механической точки зрения, в этом случае трение – это своего рода сопротивление, возникающее при качении одного тела по поверхности другого.

Это явление, как мы увидим, нельзя объяснить моделью абсолютного твердого тела. Предположим, что колесо (цилиндр) с весом G и радиусом r (рисунок 2.36, а) размещено на плоской горизонтальной опоре. Поскольку тела абсолютно жесткие, они должны касаться в одной точке A . При этом возникает опорная реакция N , которая уравнивает действие силы G . Таким образом, модель абсолютно твердого тела объясняет равновесие колеса в этом случае.

Предположим, что к центру колеса приложена горизонтальная сила F . Опыт показал, что если сила F достаточно мала, цилиндр сохраняет свое равновесное состояние (рисунок 2.36, б). Значит, возникла горизонтальная реакция T , которая уравнивает силу F и может быть приложена только в опорной точке A .

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

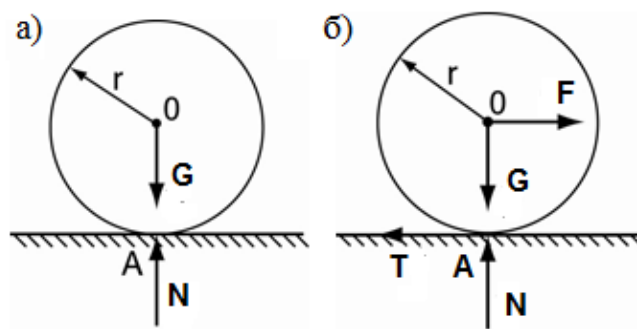


Рисунок 2.36 — Контакт с абсолютно твердым телом:

а) без движения; б) с движением

Силы F и T образуют пару с плечом r , которая может быть уравновешена только парой, крутящий момент которой такой же, но действует в противоположном направлении. Одной из сил, образующих такую пару, является сила G . Следовательно, другая сила N , которая, подобно силе T , может быть приложена только в контакте (A) между цилиндром и плоскостью, должна быть вертикальной и не должна лежать на линии действия силы G .

Появление нормальной реакции опоры N , удовлетворяющей вышеуказанным условиям, можно объяснить, предположив, что тела деформируются в зоне т. A .

В реальных телах контакт осуществляется не в точке, а в контактной площадке. Последняя симметрична относительно точки A при $F = 0$ (рисунок 2.37, а) и асимметрична (смещена вперед относительно т. A) при наличии силы F (рисунок 2.37, б). В первом случае, когда к оси колеса не приложена сила ($F = 0$), колесо в зоне контакта сжимается под давлением, а опора растягивается (стрелки на рисунке 2.37, а), но дуга контакта остается симметричной, и реакция N лежит на линии веса G . При наличии силы F и при движении колеса контактная поверхность изгибается, и материал (после колеса) не успевает восстановить свою форму (см. рисунок 2.37, б) [2]. Реакция имеет два компонента – нормальный N и тангенциальный T .

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ

Лист

62

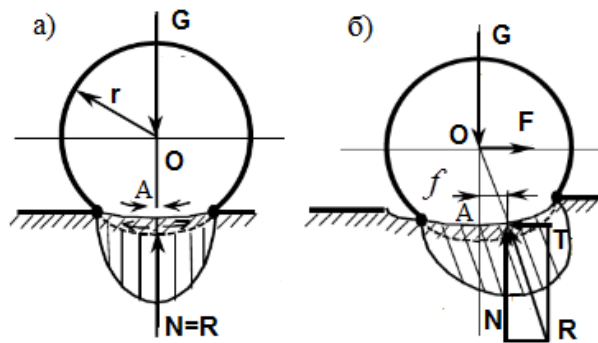


Рисунок 2.37 — Контакт с реальным твердым телом:

а) без движения; б) с движением

Составляя условия равновесия плоской системы сил $G, F, T, N \sim 0$, получим:

$$\sum X_i = 0 \rightarrow T = F. \quad (2.63)$$

$$\sum Y_i = 0 \rightarrow N = G. \quad (2.64)$$

$$\sum M_{iA} = 0 \rightarrow f \cdot N = F \cdot r. \quad (2.65)$$

В формуле (2.65) f является плечом пары сил (G, N).

Момент силы N относительно точки O является мерой сопротивления качению, называется моментом трения качения:

$$M_{mp} = f \cdot N. \quad (2.66)$$

Если сила F продолжает увеличиваться по величине, то будут увеличиваться сила трения T и момент трения качения $M_{тр}$. Момент трения увеличивается при увеличении рычага f . Как и ожидалось, изменение f ограничено размерами контактной площадки, т.е. для каждой пары контактов есть значение f_0 , которое не может превышать значение f :

$$0 \leq f \leq f_0. \quad (2.67)$$

И момент трения, который граничит с равновесным состоянием тела качения:

$$M_0 = f_0 \cdot N. \quad (2.68)$$

Величина f_0 , которая имеет размерность длины, называется коэффициентом трения качения.

Коэффициент f_0 тем меньше, чем меньше контактная площадка. Поэтому тела с более высокой твердостью характеризуются более низким коэффициентом трения качения. Предельное значение горизонтальной силы F_0 , которая еще не заставляет тело катиться, определяется из условия (2.65):

$$F_0 = \frac{f_0}{r} N. \quad (2.69)$$

Т.е. сила F_0 обратно пропорциональна радиусу r колеса.

Подводя итог, можно сказать, что контактное взаимодействие колеса с опорной плоскостью характеризуется сложной системой опорных реакций, которые сводятся к точке контакта A колеса с двумя силами N и T и одной парой с моментом $M_{тр}$ (рисунок 2.38).

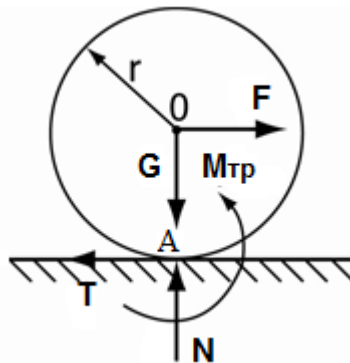


Рисунок 2.38 — Контактное взаимодействие колеса с опорной плоскостью

Горизонтальная реакция T противодействует тангенциальным микросмещениям в контакте, нормальная реакция N – нормальному контактному сближению, а момент трения $M_{тр}$ – вращению колеса.

Колесо может быть выведено из равновесия путем проскальзывания и прокрутки.

Проскальзывание колеса исключается, если сила трения удовлетворяет условию:

$$T \leq \mu_0 \cdot N. \quad (2.70)$$

Прокрутка колеса исключается, если выполняется условие:

$$M_{mp} \leq f_0 \cdot N. \quad (2.71)$$

Только одновременное выполнение этих двух условий гарантирует равновесие колеса.

В рассмотренном выше случае, чтобы не вызывать движения, сила должна удовлетворять следующим двум условиям:

$$\begin{aligned} F &\leq \mu_0 \cdot P; \\ F &\leq \frac{f_0}{r} P. \end{aligned} \quad (2.72)$$

Если нарушено только первое условие (формула (2.70)), произойдет проскальзывание.

Если нарушено только второе условие (формула (2.71)), произойдет качение.

Если оба условия будут нарушены одновременно, произойдет качение с проскальзыванием.

Для трения качения характерно рассеяние механической энергии, помимо механизма разрушения и образования точек контакта, в материале также имеются гистерезисные потери, вызванные переменными напряжениями в области контакта.

Рейнольдс также заметил, что при качении цилиндра из твердого материала по горизонтальной поверхности резины, с каждым оборотом он перемещается все меньше. Он предположил, что в центральной точке контакта резина была растянута не так, как в других точках контакта.

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		65

При трении элементарные микрообъемы в контакте подвергаются циклической нагрузке одноосного типа «сжатие-растяжение». Согласно Н. К. Мышкину [22], все реальные трибоматериалы характеризуются некоторой необратимостью деформации в циклах «сжатие-растяжение», т.е. в противном случае накопленная энергия деформации восстанавливается не полностью. Это явление известно как упругий гистерезис. В полимерах упругий гистерезис объясняется внутренним трением между молекулами полимера, а в металлах скольжением дислокаций. Отношение α потерянной энергии за цикл к максимальной энергии упругой деформации для того же цикла рассматривается как количественная оценка упругого гистерезиса. Для металлов α очень мало – до 1%, а для резин и полимеров достигает высоких значений. Наибольшее влияние на упругий гистерезис в контакте оказывает скорость движения, контактное давление и объем деформируемого материала. По мере увеличения этих параметров упругий гистерезис увеличивается, и процессы сопровождаются сильным выделением тепла, что приводит к повышенному износу.

Существует два типа микропроскальзывания в контакте при качении: микропроскальзывание по Рейнольдсу и по Хизкоуту (дифференциальное микропроскальзывание).

Микропроскальзывание по Рейнольдсу обычно происходит при наличии чистого качения во всех деформируемых телах. Это обстоятельство имеет большое значение для трения качения. Например, когда цилиндр из твердого материала катится по горизонтальной поверхности резины в результате контактного давления, резина растягивается, а после разгрузки она восстанавливает свое первоначальное состояние, т.е. цилиндр движется вдоль растянутой поверхности, и расстояние, равное длине окружности, в несколько раз превышает истинный путь, по которому проходит цилиндр. Или, другими словами, для одного оборота ($2\pi R$) требуется меньший путь. Эта разница в расстояниях может быть компенсирована относительным скольжением контактных поверхностей. Этот процесс микропроскальзывания был замечен Рейнольдсом и носит его имя.

											Лист
											66
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ						

Микропроскальзывание по Хизкоуту происходит при качении твердой сферы по поверхности с некоторой кривизной, например, близкой к радиусу сферы или движению сферы по канавке. В этом случае область контакта имеет кривизну в плоскости, перпендикулярной направлению качения. Точки контакта расположены на разных расстояниях от оси вращения, поэтому за один оборот они пройдут разный путь. Разница в пройденном расстоянии компенсируется скольжением точек контакта на скоростях, меняющихся по величине и направлению [13, 22].

Особенности адгезионного взаимодействия при качении проистекают из кинематики движения. Здесь стоит выделить два существенных различия в адгезии при качении, которые связаны с направлением и характером образования и разрушения молекулярных связей. Во-первых, адгезионные связи образуются в направлении, перпендикулярном разделительной границе, а не тангенциально, как при скольжении. В результате рост пятна контакта очень маловероятен, и адгезионные связи разрушаются в результате растягивающего усилия, а не сдвига, как в случае скользящего контакта.

2.3 Лекция по теме «Испытания на трение и износ. Методы и средства»

2.3.1 Методы исследования фактической площади контакта

Из-за теоретической сложности контактной задачи для шероховатых тел исследования в этой области носят преимущественно экспериментальный характер. Соответствующие теоретические модели непосредственно основаны на эксперименте.

Контактные процессы зависят не только от абсолютной величины фактической площади A_r , но и от ее распределения в зоне контакта. Это определяет необходимость разработки методов испытаний и приборов для двух параметров A_r и η .

Трудности, возникающие при решении этих задач, связаны с:

а) невозможностью проводить прямые измерения в области контакта тел в процессе их взаимодействия;

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

б) влиянием побочных факторов на точность косвенно определенных величин A_r и η .

Трудности возрастают при исследовании движущихся деталей.

За последние несколько десятилетий было разработано значительное количество методов для исследования фактической области контакта, различающихся по своей физической природе и эффективности. Эту тематику подробно рассматривают в своих работах И. В. Крагельский [7-9], Н. Б. Демкин [17-19], Г. М. Бартнев, В. В. Лаврентьев [23].

Существующие методы, в зависимости от их физической основы, подразделяются на:

- а) методы, основанные на контактном массопереносе;
- б) методы, основанные на контактном энергопереносе;
- в) другие информационные методы (геометрические, физико-химические).

Общим и определяющим моментом для первой группы методов является покрытие одной из поверхностей тонким слоем вещества, которое переносится (отпечатывается) на другую поверхность в их контактных областях. Чтобы сопоставить фактическую площадь контакта с площадью следа, должны быть выполнены следующие условия:

- а) площадь разрушения тонкого покрытия должна быть равна площади контакта микрошероховатостей;
- б) толщина слоя покрытия должна быть значительно меньше высоты микрошероховатостей, чтобы существенно не изменять их первоначальный профиль и характер их взаимодействия.

Электрический метод является самым старым, но он используется и в современных исследованиях. Основой этого метода является исследование Р. Хольма об электрическом контакте твердых тел [41]. Контактное электрическое сопротивление ρ шероховатой сферы выражается формулой (2.73) .

$$\rho = \frac{1}{4\alpha \cdot R} + \frac{1}{4n \cdot \alpha \cdot r}, \quad (2.73)$$

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

где R – радиус контурной площади контакта;

α – удельная электропроводность;

n – количество элементарных пятен контакта;

r – радиус одного пятна контакта.

Определение A_r по электрическому сопротивлению ρ контакта согласно формуле (2.73) возможно, если известна хотя бы одна из величин n или r . Задача определения их очень сложна и до сих пор не имеет удовлетворительного решения, поэтому метод можно использовать только для качественных исследований. Метод применим при условии, что закон Ома выполняется и контакт не нагревается. Влияние термодвижущей силы нейтрализуется с помощью переменного тока. Основные трудности возникают при учете влияния окисления и загрязнения на контактную электропроводность. Все это требует, чтобы результаты исследований электрическим методом сравнивались с результатами, полученными другими методами, для более полной оценки их точности.

Оптические методы применимы для исследования контакта двух прозрачных тел (метод Е. М. Швецово́й) и прозрачного с непрозрачным телом (метод Мехау) [8]. Их особое преимущество перед другими методами состоит в том, что они позволяют визуально наблюдать за контактом в целом и его отдельными единицами.

Метод Швецово́й основан на явлении прохождения параллельного пучка световых лучей через область контакта двух оптически прозрачных тел. В точках контакта свет проходит без преломления, а в других точках преломляется (рисунок 2.39). В результате точки контакта наблюдаются как светящиеся пятна на сером фоне. Количественные исследования проводятся фотометрией прошедшего света. Недостатки способа сводятся к:

а) слишком ограниченному выбору материалов для исследования;

б) его неприменимости к поверхностям, шероховатость которых выше 8 класса из-за прохождения света без значительного преломления через близлежащие бесконтактные области.

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

Последнее обстоятельство приводит к нарушению пропорциональности между фактической площадью и интенсивностью прошедшего светового потока, и, как следствие, к неправильным количественным результатам.

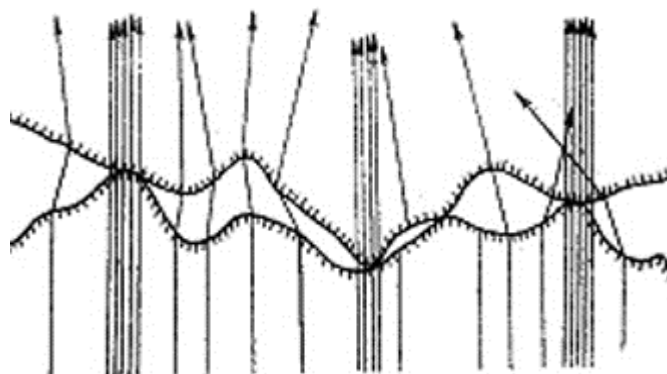


Рисунок 2.39 — Метод Швецовой для определения фактической площади контакта

Метод Меху основан на нарушении полного внутреннего отражения в областях контакта шероховатого тела с гладкой стеклянной призмой. На рисунке 2.40 показана принципиальная схема метода.

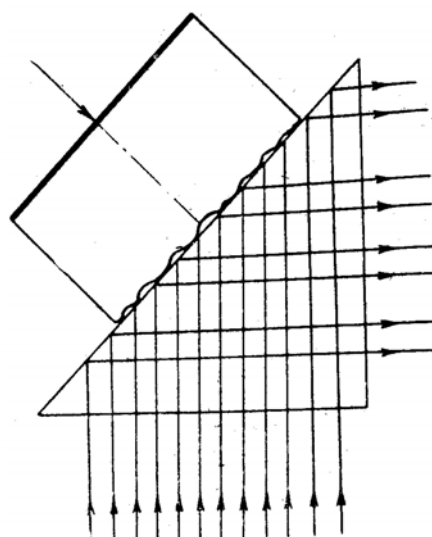


Рисунок 2.40 — Метод Меху для определения фактической контактной площади

Параллельный пучок световых лучей падает на прозрачную призму и подвергается полному внутреннему отражению. Если свет падает на область контакта стеклянной призмы с непрозрачным телом, из-за его частичного или

полного поглощения в точках контакта характер полного внутреннего отражения нарушается. В отраженном свете темные пятна наблюдаются на светлом фоне.

При исследовании металлов с высоким коэффициентом отражения часть света отражается от металлической поверхности пятен контакта, поэтому они светло-серые с оттенком отдельного металла. Особенно трудно наблюдать фактическую площадь поверхности таких металлов, как серебро, алюминий и т.д., коэффициент отражения которых близок к единице. Н.Б. Демкин использует поляризованный свет для увеличения контрастности пятен. Падающий на контакт свет предварительно поляризован с помощью николя. Если отраженный свет поляризован вторым никодем, скрещенным с первым, он погаснет. Только свет, отраженный контактными пятнами, пройдет через второй николю, так как он эллиптически поляризован. В этом случае области контакта видны как светлые пятна на темном фоне.

Специфическими недостатками метода являются:

- а) неприменимость для исследования контакта двух шероховатых тел;
- б) неприменимость для исследования многих твердых металлов, поскольку возможно разрушение стеклянной поверхности призмы;
- в) значительные погрешности измерений из-за частичного проникновения света во вторую среду и через небольшие зазоры в области контакта. Этот факт ограничивает применение метода для поверхностей с шероховатостью выше 8 класса.

Акустический метод был разработан болгарским ученым Н. Маноловым [42]. Он основан на явлении прохождения ультразвуковых волн через область контакта твердых тел.

Исследования проводятся с использованием ультразвуковых импульсов продольной волны, генерируемых и регистрируемых блок-схемой ультразвукового дефектоскопа. Количественно ультразвуковая проводимость контакта обычно характеризуется коэффициентом передачи энергии k_{xy} . В область контакта (S) твердых образцов x и y падает нормальный ультразвуковой импульс с энергией E_x (рисунок 2.41). Твердые поверхности до 8 класса шероховатости были успешно исследованы ультразвуковыми импульсами с диапазоном рабочих

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докum.	Подпись	Дата		71

частот $1 \div 10$ МГц. Для поверхностей с более высоким классом шероховатости требуются более высокочастотные импульсы, чтобы избежать необходимости создания вакуума.

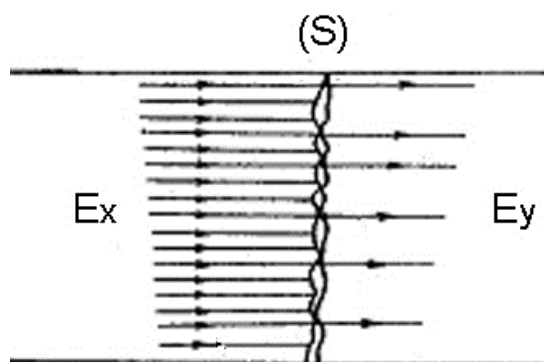


Рисунок 2.41 — Принципиальная схема ультразвукового метода Н. Манолова для определения фактической площади контакта

На основе контактного теплообмена была сделана попытка обосновать другой метод этой группы. Трудности, с которыми здесь сталкиваются, аналогичны электрическому методу. Кроме того, следует принимать во внимание тепловой поток через контактный воздушный зазор. На сегодняшний день в литературе нет данных об успешном использовании контактной теплопроводности при исследовании реальной площади контакта.

Как видим, применимость и эффективность описанных выше методов различны. Так, электрический метод удобен для качественных исследований A_r , акустический и оптический — для количественных исследований, причем не только фактической площади, но и закона распределения относительной площади контакта. С другой стороны, оптические методы применимы к прозрачным образцам, а электрические и акустические образцы — к различным деталям. Исследование формирования единичных контактных узлов до сих пор осуществлялось только оптическими методами.

2.3.2 Методы и приборы для исследования контактной деформации

В настоящее время нет общепринятых способов и приборов для исследования контактной деформации. При ее измерении возникают трудности, связанные с

незначительными размерами и массой контактного тела, деформации которого исследуются; с устранением побочных эффектов собственных деформаций контактирующих тел; с однородностью контактного тела и т.д. Существующие различные методики широко представлены в работе Н. Б. Демкина [17-19], А. С. Ахматова [21].

Контактные деформации порядка 0,1 мкм измеряются и исследуются с помощью интерференционного микроскопа (рисунок 2.42).

Изменение расстояния между линзой микроскопа и зеркалом при увеличении нормального давления N является мерой деформации в контакте между образцами 1 и 2. Измерение δ производится путем перемещения интерференционных линий по мере увеличения N .

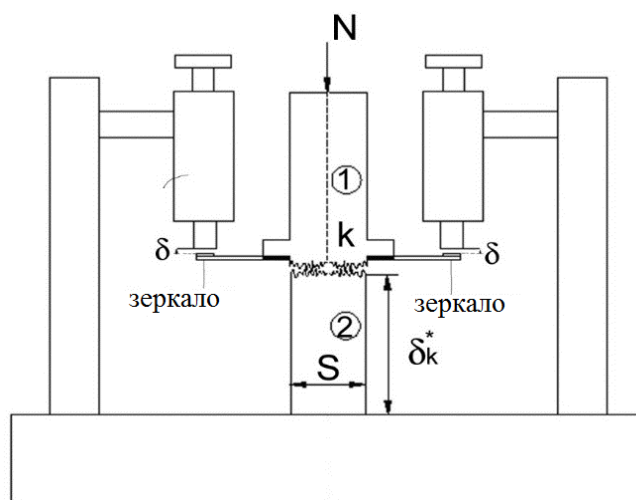


Рисунок 2.42 — Схема устройства для измерения контактной деформации с помощью интерференционного микроскопа

Поскольку отражатели (зеркала) надежно соединены с образцом 1, измеренное расстояние δ обусловлено как контактом K , так и деформацией образца 2:

$$\delta = \delta_k + \frac{L \cdot N}{A_a E} + \delta_k^*, \quad (2.74)$$

где $\frac{LN}{A_a E}$ – собственная деформация контртела 2;

δ_k^* – контактная деформация образца 2 от основания прибора.

Чтобы использовать прибор для измерения и тестирования, необходимо игнорировать два других компонента равенства (2.74). Тогда требование:

$$\delta_k \approx \delta(p_a), p_a = \frac{N}{A_a} \quad (2.75)$$

становится так же близко к реальности, как контртело становится более жестким и гладким при контакте с фундаментом.

С помощью прибора Н.Б. Демкина (рисунок 2.43) можно частично преодолеть недостатки описанного выше измерительного прибора.

Номинальный контакт между цилиндрическим телом 1 и контртелом 2 имеет кольцевую форму. Цилиндрический канал проходит вдоль оси контртела 2. Внутри канала расположена цилиндрическая трубка 3 с кольцевым расширением на верхнем конце. Штифт 4 проходит через трубку, которая касается корпуса 1. Нижний конец штифта соединен с индуктивным датчиком 8. Трубка 3 проходит через основание 5 и жестко закреплена на опоре 7, которая служит основанием корпуса индуктивного датчика.

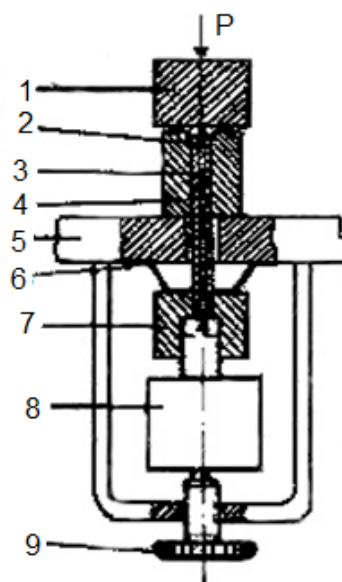


Рисунок 2.43 — Схема прибора для измерения контактной деформации
Н. Б. Демкина

При приложении силы P , штифт перемещается относительно трубки, смещение которой измеряется индуктивным датчиком. Эта схема обычно исключает внутренние деформации образцов и деформацию в контакте между контртелом 2 и основанием 5.

Специально для изучения контактных деформаций гладких образцов А. С. Ахматов предложил методику, которую назвал «Стопы слоев» [21] (рисунок 2.44).

Здесь полная деформация многослойной (многоконтактной) системы, состоящей из $100 \div 1000$ одинаковых гладких пластинок незначительной толщины, измеряется интерферометрическим методом.

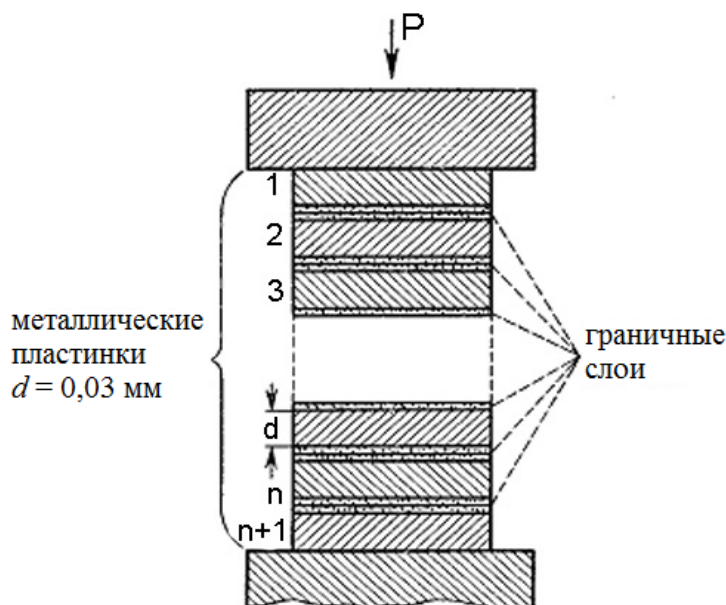


Рисунок 2.44 — Схема устройства для измерения контактной деформации
А. С. Ахматова

Незначительная одноконтактная деформация по этой схеме умножается в $100 \div 1000$ раз пропорционально количеству контактов в системе. Таким образом, незначительные деформации в отдельных контактах становятся доступными для регистрации и измерения с помощью интерферометра. Для построения зависимости $\delta_k = \delta_k(P)$ необходимо измерить общую деформацию многоконтактной системы с помощью интерферометра и поделить на количество контактов ($100 \div 1000$). Методика трудоемка, и трудности связаны с

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ

Лист

75

изготовлением большого количества точных пластин. Собственными деформациями пластин пренебрегают, так как их толщина L незначительна и, следовательно, $\delta_n \approx 0$. Из-за своей сложности данный метод используется только для научных исследований.

2.4 Лабораторные работы и практические задания

Учебно-методический комплекс «Основы трибологии» содержит четыре лабораторные работы [43].

Лабораторная работа №1 «Экспериментальное и теоретическое определение основных параметров равновесной шероховатости». Заключается в изучении оборудования для определения шероховатости поверхности, а также методик измерения и расчета основных параметров шероховатости приработанной поверхности узла трения автомобильного двигателя.

Лабораторная работа №2 «Экспериментальное и теоретическое изучение износа при скольжении в условиях режима сухого трения». Заключается в изучении экспериментальной и теоретической методик определения линейной интенсивности изнашивания при скольжении для образцов типа диск-стержень, а также в ознакомлении с различными видами процесса изнашивания и механизмами их осуществления.

Лабораторная работа №3 «Экспериментальное и теоретическое построение эпюр гидродинамического давления в опоре скольжения». Заключается в изучении экспериментальной и теоретической методик определения эпюр гидродинамического давления по угловой и осевой координатам, в сравнении результатов проведенных опытов с расчетами, а также в ознакомлении с моделями и механизмами осуществления гидродинамической смазки.

Лабораторная работа №4 «Изучение трения в опорах скольжения». Заключается в изучении экспериментальной и теоретической методик определения коэффициента трения в опорах скольжения при жидкостной, полужидкостной и граничной смазке, а также в приобретении навыков построения диаграммы Герси-Штрибека и полукруга Гюмбеля.

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

Кроме лабораторных работ, в учебно-методическом комплексе предусмотрено четыре практических задания [44].

Практическое задание №1 «Модель короткой опоры скольжения. Формулировка обратной гидродинамической задачи».

Практическое задание №2 «Качественный анализ работы подшипников скольжения».

Практические задания №1 и №2 выполняются студентами в рамках изучения темы «Смазочные материалы. Смазка трибосопряжений».

Практическое задание №3 «Гидродинамическая задача смазки сложнонагруженной радиальной опоры скольжения».

Практическое задание №4 «Трибоанализ опор коленчатого вала автомобильных двигателей».

Практические задания №3 и №4 выполняются студентами в рамках изучения темы «Гидродинамические опоры (ГДО)».

На момент составления данной пояснительной записки разработаны два практических задания – №1 и №4.

2.5 Оценка знаний студентов, полученных при освоении дисциплины

Оценка знаний проводится с помощью контрольного теста, разработанного по материалам лекций.

Тестирование является довольно распространенным видом контрольного мероприятия и эффективным способом проверки знаний обучающихся. Оно может иметь широкий охват информации, понимание которой требуется оценить, позволяет акцентировать внимание на главных аспектах той или иной темы. В зависимости от цели тестирования, с помощью различных форм тестовых вопросов можно проверить знание теоретического материала, навыки решения каких-либо задач, а также умение действовать в нестандартных ситуациях.

Тестирование включает в себя 40 вопросов по каждой из девяти тем учебно-методического комплекса и предназначено для оценки понимания обучающимися материала, изученного в рамках освоения дисциплины «Основы трибологии».

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		77

Тест содержит задания, в которых обучающимся предлагается выбрать как один вариант ответа, так и несколько.

Каждый верный ответ оценивается в 1 балл. Тест считается пройденным, если обучающийся набрал:

20-23 балла – оценка «удовлетворительно»;

24-29 баллов – оценка «хорошо»;

30-40 баллов – оценка «отлично».

Для тестирования составлен банк вопросов на основе информации из конспекта лекций, состоящий из девяти блоков по каждой теме учебно-методического комплекса. В данной пояснительной записке представлены некоторые таких из блоков.

Пройти тест было предложено шестерым обучающимся по специальности 23.03.03, в рамках чего успешно проверено функционирование данного элемента в системе «Электронный ЮУрГУ 2.0» (рисунок 3.1), а также его содержание и эффективность.

Вопрос 1
Пока нет ответа
Балл: 1,00
Отметить вопрос

Внутреннее трение - это

Выберите один ответ:

- сопротивление относительному перемещению элементов структуры тела (атомов, молекул) в жидкостях и газах
- сопротивление относительному перемещению двух соприкасающихся поверхностей
- внешнее трение в присутствии смазочного материала
- режим трения двух поверхностей, когда коэффициент трения имеет минимальное значение
- трение в закрытых узлах трения без проточного смазывания

Вопрос 2
Пока нет ответа
Балл: 1,00
Отметить вопрос

Родоначальником гидродинамической теории смазки в России считается ...

Выберите один ответ:

- Петров Н.П.
- Жуковский Н.Е.
- Чаплыгин С.А.
- Менделеев Д.И.
- Крагельский Б.В.

Вопрос 3
Пока нет ответа
Балл: 1,00
Отметить вопрос

Под изнашиванием детали понимается ...

Выберите один ответ:

- процесс разрушения поверхности детали в результате усталостных разрушений при повторных деформациях микроразмерах материала поверхностного слоя
- процесс разрушения и отделение материала с поверхности детали и (или) изменение ее формы и размеров из-за остаточной деформации

Навигация по тесту

1	2	3	4	5	6	7
10	11	12	13	14	15	16
19	20	21	22	23	24	25
28	29	30	31	32	33	34
37	38	39	40			

Закончить попытку...

Оставшееся время 0:58:49

Рисунок 2.45 — Пример теста в системе "Электронный ЮУрГУ 2.0"

Контрольные вопросы по теме «Работоспособность узлов трения машин».

1) Для объектов машиностроения надежность является совокупностью свойств:

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		78

- а) безотказности, работоспособности, ремонтпригодности и сохраняемости;
- б) безотказности, ремонтпригодности, долговечности и износостойкости;
- в) безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости;
- г) безотказности, долговечности, работоспособности и сохраняемости;
- д) безотказности, долговечности, ремонтпригодности и управляемости.

2) Проблема обеспечения работоспособности машин решается:

- а) применением системного подхода в процессе технического обслуживания и ремонта;
- б) проведением новых организационно-технических мероприятий на стадии производства и эксплуатации машин;
- в) применением при проектировании наиболее эффективных методов расчета износостойкости деталей и сопряжений;
- г) проведением новых организационно-технических мероприятий при проектировании, производстве и эксплуатации машин.

3) Выявление закономерностей изнашивания деталей позволяет рассчитать:

- а) ресурс деталей, определить периодичность проведения регулировочных работ;
- б) ресурс деталей, обеспечить рациональный режим их трения;
- в) выявить совокупность факторов, определяющих процесс изменения технического состояния элементов машины;
- г) ресурс деталей, обеспечить рациональный режим их трения, определить периодичность проведения регулировочных работ.

4) При анализе трибосопряжений их характеристиками обычно являются:

(выберите один или несколько вариантов)

- а) совместимость, индекс вязкости;
- б) степень усталости материалов деталей;
- в) коэффициенты, учитывающие виды обработки деталей и условия эксплуатации;
- г) параметры контакта поверхностей деталей;
- д) прирабатываемость и износостойкость;
- е) показатели внешнего трения и изнашивания поверхностей.

										Лист
										79
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ

5) Укажите триботехническую(-ие) характеристику(-и) конструкционных материалов:

- а) сохраняемость;
- б) антифрикционность;
- в) совместимость при трении;
- г) исходная структура и фазовый состав;
- д) прилегаемость.

6) Укажите единицы измерения динамической и кинематической вязкости в системе СИ:

- а) динамическая – $\text{м}^2/\text{с}$, кинематическая – пуаз;
- б) динамическая – $\text{м}^2/\text{с}$, кинематическая – Па·с;
- в) динамическая – Па·с, кинематическая – $\text{м}^2/\text{с}$;
- г) динамическая – пуаз, кинематическая – стокс.

7) Факторы, сильнее других влияющие на работоспособность узлов трения, называются:

- а) конструктивными;
- б) технологическими;
- в) эксплуатационными;
- г) физико-химическими.

8) Укажите конструктивные триботехнические факторы, определяющие качество трибосопряжений:

- а) форма и величина зазора в сопряжении;
- б) геометрические характеристики рабочих поверхностей трения;
- в) характер и совершенство технического обслуживания узла трения;
- г) характер нагружения трибосопряжения;
- д) макрогеометрия и размеры контактирующих поверхностей;
- е) свойства конструкционных и смазочных материалов.

Контрольные вопросы по теме «Трибологические поверхности. Контактное тело».

1) Микроуровневая связь, обеспечивающая физическую адсорбцию компонентов окружающей среды поверхностью твердого тела, называется:

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докum.	Подпись	Дата		80

- а) ковалентная;
 - б) ионная;
 - в) Ван-дер-Ваальсова;
 - г) металлическая.
- 2) Как измеряется максимальная высота профиля шероховатости?
- а) расстоянием между линией выступов и линией впадин;
 - б) расстоянием между линией выступов и средней линией;
 - в) отношением суммы величин пяти наибольших выступов и пяти наибольших впадин к их общему числу;
 - г) расстоянием между базовой линией и линией выступов.
- 3) Как на макроуровне определяется твердость материала?
- а) вдавливанием в поверхность алмазной пирамиды с измерением площади ее отпечатка;
 - б) по шкале Бринелля вдавливанием твердой сферы в поверхность;
 - в) величиной давления в области контакта между поверхностью и инструментом;
 - г) величиной нагрузки, при которой происходит дробление кристаллической структуры материала.
- 4) Как на поверхности образуется переходный слой?
- а) при ее очистке в лабораторных условиях;
 - б) за счет химического взаимодействия (валентных связей) шероховатой поверхности с окружающей средой;
 - в) из-за физической и химической адсорбции молекул из второго тела и рабочей окружающей среды;
 - г) в результате пластической деформации и схватывания частиц заготовки из-за сил резания при обработке ее поверхности и сил трения при ее работе.
- 5) Укажите верное(-ые) суждение(-я) о контактном теле:
- а) является самостоятельным физическим объектом в трибосистеме;
 - б) существует только в отдельных контактных зонах, возникающих из-за шероховатости поверхностей;
 - в) является функциональным элементом трибосистемы;

г) совмещает в себе характеристики и свойства тела и контртела;

д) имеет большую относительно контактирующих тел плотность из-за своей дискретной природы;

е) изменяет свои свойства во времени и пространстве при работе трибосистемы.

б) Фактическое контактное давление:

а) прямо пропорционально фактической площади контакта и обратно пропорционально контактному давлению;

б) обратно пропорционально относительной площади контакта и прямо пропорционально количеству точек контакта;

в) прямо пропорционально контактному давлению и обратно пропорционально количеству точек контакта;

г) обратно пропорционально внешнему давлению и прямо пропорционально относительной площади контакта.

7) Чем, согласно Герцу, может выражаться взаимодействие двух упругих сфер?

а) деформацией и напряжениями в контакте;

б) площадью контакта и напряжениями в контакте;

в) величиной внешнего давления и деформацией;

г) деформацией и площадью контакта;

д) величиной внешнего давления и напряжениями в контакте.

8) Чему равен коэффициент пропорциональности α при упругой деформации шероховатостей?

а) 0,5;

б) 1;

в) $0,5 \geq \alpha \geq 1$.

9) Что показывает закон нормальной контактной деформации?

а) обратную зависимость нормального напряжения от угловой деформации тела;

б) прямую зависимость нормального напряжения от линейной деформации тела;

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		82

- в) связь нормального и тангенциального напряжений;
- г) связь нормального напряжения и модуля угловой деформации.

10) Что называется поверхностной энергией жидкости?

- а) отношение величин площади поверхности жидкости и поверхностного натяжения;
- б) избыток кинетической энергии молекул в поверхностном слое;
- в) избыток потенциальной энергии молекул в поверхностном слое;
- г) сила, приложенная к единице длины по контуру внешней поверхности.

Выводы по разделу два

Таким образом, теоретическая часть учебно-методического комплекса содержит как новую информацию, так и освещающие фундаментальные вопросы трибологии материалы, дополненные и обновленные для лучшего изучения и усвоения их обучающимися. В практической части предусмотрены четыре лабораторные работы и два практических задания. В качестве контрольного мероприятия проводится тестирование, для которого разработан банк вопросов по всем темам лекционных занятий.

					<i>23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						83
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

3 СОЦИАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ВКР

В современном мире компьютерных технологий все большее распространение получает обучение с применением электронных образовательных ресурсов. Фундаментальная традиционная составляющая образовательного процесса в сочетании с возможностями и многообразием форм компьютерной делают освоение какой-либо дисциплины более эффективным. Например, обучающиеся в любой момент могут еще раз посмотреть презентацию или открыть лекцию по нужной теме, если возникли трудности с ее пониманием или при выполнении домашнего задания, а возникающие вопросы задать преподавателю на специальном форуме. Кроме того, как показали связанные с пандемией события в нашей стране и во всем мире, при возникновении непредвиденных обстоятельств, в силу которых посещение образовательных учреждений не представляется возможным, наличие электронной образовательной площадки является действенным способом продолжать обучение в дистанционном формате.

Поэтому, в дополнение к преподаванию дисциплины «Основы трибологии» в его традиционном виде в университете, на основе разработанного учебно-методического комплекса планируется модернизация одноименного электронного курса на образовательной площадке «Электронный ЮУрГУ 2.0» для студентов специальности 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

Чтобы объективно определить социальный эффект, был применен метод экспертных оценок для принятия решений. Для этого был составлен опросный лист (Приложение А) с критериями оценивания элементов разработанного учебно-методического комплекса по дисциплине «Основы трибологии» – лекционных материалов, презентаций к соответствующим темам и контрольного тестирования.

Для оценки актуальности работы выделено восемь основных критериев:

- простота курса;
- доступность;
- раскрытие тем;

- логичность (последовательность);
- качество материала;
- наличие рисунков (схем);
- наглядность презентаций;
- формулировка контрольных вопросов.

Работа проводилась в несколько этапов:

1. Подбор экспертной группы и выбор способа работы с группой. Эксперты выбирались из числа студентов. Во время подбора учитывалась специальность студентов и их понимание того, что из себя представляет данный курс. Исходя из этого, было предложено пройти опрос студентам, обучавшимся по специальности 23.03.03.

2. Разработка анкеты. Опросный лист состоит из восьми главных критериев, позволяющих с достаточной полнотой оценить данную работу, учебно-методический комплекс и отдельные его элементы. Также в нём приведены варианты ответов.

3. Проведение опроса. На этом этапе группе экспертов предлагалось заполнить опросный лист, отвечая на представленные в нём вопросы цифрами от 1 до 5.

4. Анализ и обработка полученных данных. Здесь был выбран способ экспертных оценок для принятия решений, чтобы сделать соответствующие выводы. Степень согласованности мнений экспертов может быть определена по так называемому коэффициенту конкордации W :

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^n d_i^2}{m^2(n^3 - n) - \sum_{j=1}^m (t_j^3 - t_j)}, \quad (3.1)$$

где n – число факторов (показателей);

d_i – отклонение суммы рангов i -го показателя, вычисленной по всем экспертам от средней арифметической сумм рангов n -показателей;

m – число экспертов;

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
						85
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

t_j – число равных рангов, проставленных j -ым экспертом.

Если $W < 0,5$ – мнения экспертов значительно расходятся, и в таком случае результатами проведенного опроса пользоваться нельзя [45].

Опросный лист приведен ниже, а результаты – в таблице 3.1.

Опросный лист для оценки курса «Основы трибологии»

Пожалуйста, ответьте на вопросы, выбрав один из вариантов:

- 5 (отлично, всё понравилось);
- 4 (хорошо, есть пара моментов, которые нужно исправить);
- 3 (удовлетворительно, многое не понравилось);
- 2 (неудовлетворительно, почти всё нужно переделывать);
- 1 (абсолютно ничего не понравилось).

1. Насколько Вам просто было использовать предложенный курс? _____
2. Насколько доступным для понимания оказался изложенный материал? _____
3. Оцените полноту раскрытия тем? _____
4. Как Вы оцените последовательность и логику изложения лекционных материалов? _____
5. Насколько качественным Вы считаете изложенный в курсе материал? _____
6. По Вашему мнению, достаточно ли поясняющих рисунков и схем в лекционном материале? _____
7. Насколько наглядными для Вас были презентации к темам лекций? _____
8. Достаточно ли понятны Вам были формулировки контрольных вопросов? _____

										Лист
										86
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ					

Таблица 3.1 — Результаты опроса

Критерий	Опрашиваемый студент					
	Давыдов П.	Исламов А.	Коротаев А.	Умурзаков И.	Хафизов Р.	Ярков М.
простота курса	5	5	5	5	5	5
доступность	4	5	5	4	5	5
раскрытие тем	5	4	5	5	5	5
логичность (последовательность)	5	4	5	5	5	4
качество материала	5	5	5	4	5	5
наличие рисунков (схем)	5	5	4	5	5	4
наглядность презентаций	4	5	5	4	5	5
формулировка контрольных вопросов	4	5	4	5	4	5

Выводы по разделу три

В данном случае: $W = 0,84 > 0,5$. Таким образом, мнения экспертов можно считать согласованными. Исходя из полученного значения коэффициента конкордации, можно сделать вывод, что выполненная работа актуальна и эффективна. Эксперты считают, что данный учебно-методический комплекс будет полезен для изучения курса «Основы трибологии» студентам машиностроительных специальностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения дипломного проектирования был разработан учебно-методический комплекс по дисциплине «Основы трибологии» для студентов-бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 23.03.03. В том числе была усовершенствована рабочая программа курса «Основы трибологии»: добавлены новые темы лекций, такие как «Характерные узлы трения транспортных машин», «Смазочные материалы», перераспределено количество часов между темами в разных видах занятий.

При обновлении конспекта лекций добавлена тема «Характерные узлы трения транспортных машин», где представлены особенности изнашивания и принципы подбора материалов узлов трения в двигателях. Обновлена тема «Трибологические поверхности», добавлены параграфы о контактных деформациях в трибосистемах. В теме «Трение» помимо обновления материала больше внимания уделено влиянию различных факторов на коэффициент трения. Последняя тема дополнена методами определения фактической площади контакта, контактных деформаций, а также свойств смазочных материалов.

Были разработаны презентации, наглядно отражающие материалы лекционных занятий по каждой из девяти тем, состоящие из 10-15 слайдов. В зависимости от конкретного объекта изучения, на слайдах презентаций приведены основные понятия, строение (состав), свойства, классификации, формулы, значения основных коэффициентов, рисунки и графики и др.

Также разработан банк из 90 вопросов по курсу лекций для контрольного тестирования. На каждый вопрос предложено по 3-5 возможных вариантов ответа. Тест был успешно опробован на шестерых студентах экспертной группы и будет включен в электронный курс «Основы трибологии» в системе «Электронный ЮУрГУ 2.0».

Диск с электронной версией учебно-методического комплекса «Основы трибологии» прилагается.

					<i>23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						<i>88</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лужнов, Ю. М., Александров, В. Д. Основы триботехники: учеб. пособие.; под ред. Ю.М. Лужнова. – М.: МАДИ, 2013. – 136 с.
2. Беркович, И. И., Громаковский Д. Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.
3. Гаркунов, Д. Н., Мельников, Э. Л., Гаврилюк, В. С. Триботехника: учебное пособие. – 2-е изд., стер. – М. : КНОРУС, 2015. – 408 с.
4. Справочник по триботехнике: в 3 т. Т. 1: Теоретические основы / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
5. Ребиндер П.А., Щукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физических наук. – 1972. – Т. 108. – Вып. 1. – 42 с.
6. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 320 с.
7. Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2-х кн. / под ред. И.В. Крагельского, И.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – Кн. 1. – 400 с.
8. Крагельский, И. В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
9. Крагельский, И.В., Добычин М. И., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. - 528 с.
10. Крагельский И.В. Об условиях деформирования материала на поверхности трения // Сухое трение. – Рига, изд-во АН Латв. ССР, 1961.
11. Комбалов, В.С. Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей. – М.: Наука, 1983. – 136 с.
12. Комбалов, В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. – М.: Наука, 1974. – 111 с.
13. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Центр «Наука и техника», 1995. – 778 с.
14. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения / Под ред. Д.Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1982. – 207 с.

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		89

15. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
16. Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В., Поляков А.А. Избирательный перенос в узлах трения. – М.: Транспорт, 1969. – 104 с.
17. Демкин Н.Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 112 с.
18. Демкин Н.Б. Контактное трение шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
19. Демкин, Н. Б. Рыжов, Э. В. Качество поверхности и контакт деталей машин [Текст]. – М., 1981. – 244 с.
20. Дерягин, Б.В. Что такое трение? – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 230 с.
21. Ахматов, А. С. Молекулярная физика граничного трения. [Текст]. – Москва: Физматгиз, 1963. – 472 с.
22. Мышкин, Н. К., Петроковец, М. И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. – М.: Физматлит, 2007. – 368 с.
23. Бартенев, Г.М., Лаврентьев, В. В. Трение и износ полимеров. — Изд-во «Химия», Л., 1972. — 240 с.
24. Силин, А.А. Трение и его роль в развитии техники. – М.: Наука, 1983. – 176 с.
25. Машков, Ю.К. Трибология конструкционных материалов: Учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1996. – 304 с.
26. Проников, А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
27. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 252 с.
28. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. – М.: Наука, 1981. – 127 с.
29. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. – М.: Машиностроение, 1966. – 321с.
30. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. – М.: Машиностроение, 1976. – 271с.
31. Зорин В. А. Основы работоспособности технических систем : учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М. :Издательский центр «Академия», 2009. – 208 с.

					23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		90

32. Зорин В.А., Павлов А.П. Курс лекций по дисциплине «Теоретические основы ремонта транспортно-технологических машин». – М.: МАДИ, 2014. – 184 с.
33. Силаев Б.М. Трибология деталей машин в маловязких смазочных средах: монография. - Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм. ун-та, 2008. -264 с.
34. Каржавин В. В., Зимин А И. Трение, износ, смазочные материалы: Учеб. пособие. – Екатеринбург, 2003. – 83с.
35. Боуден Ф. Тейбор Д. Трение и смазка. – М.: Машгиз, 1980. – 181 с.
36. Боуден Ф., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.
37. Михин Н.М. Трение в условиях пластического контакта. – М.: Наука, 1968. – 104 с.
38. Михин Н.М. Внешнее трение твердых тел. – М.: Наука, 1977. – 220 с.
39. Санников А.А., Куцубина Н. В., Витвинин А. М. Надежность машин. Трибология и триботехника в оборудовании лесного комплекса: Учебное пособие. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2006. – 145 с.
40. Польцер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
41. Хольм Р. Электрические контакты / Пер. с англ. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 464 с.
42. Манолов Н.Т. Теория контакта. – София: ТЕМТО, 2014. – 628 с.
43. Задорожная Е. А., Дойкин А. А. Триботехника: учебное пособие к лабораторным работам. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – 73 с.
44. Задорожная, Е.А. Основы триботехники. Трибоанализ опор коленчатого вала автомобильных двигателей. Уч. пос. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2017. – 50 с.
45. Бояршинова А. К., Фишер А.С. Теория инженерного эксперимента. Текст лекций. – Юж.-Урал. гос. ун-т, Каф. Автомобил. транспорт; ЮУрГУ. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2006. – 84 с.

						23.03.03.2020.129.00.00 ПЗ	Лист
							91
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			