



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДВФУ)

**ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ШКОЛА)**

«СОГЛАСОВАНО»

Руководитель программы аспирантуры  
Сварка, родственные процессы  
и технологии

А.В. Гридасов

31.03.2022 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор департамента промышленной  
безопасности

А.В. Гридасов

31.03.2022 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Современные методы определения эксплуатационных свойств материалов и покрытий**

2.5.8 Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)

курс 2 семестр 3

лекции 8 час.

практические занятия 10 час.

лабораторные работы     -     час.

в том числе с использованием МАО лек., пр. 10 лаб. 0 час.

всего часов аудиторной нагрузки 18 час.

в том числе с использованием МАО 10 час.

самостоятельная работа 54 час.

контрольные работы (количество) не предусмотрены

курсовая работа / курсовой проект не предусмотрены

зачет 3 семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов), утвержденными Приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 20 октября 2021 г. N 951 и паспортом научной специальности 2.5.8 Сварка, родственные процессы и технологии.

Рабочая программа обсуждена на заседании департамента промышленной безопасности, протокол № 7 от 10.03.2022 г.

Директор департамента: канд. техн. наук, доцент А.В. Гридасов

Составитель: канд. техн. наук, доцент А.В. Гридасов

**Оборотная сторона титульного листа**

**I. Рабочая программа актуализирована на заседании департамента промышленной безопасности:**

Протокол от « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Директор департамента

\_\_\_\_\_  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(И.О. Фамилия)

**II. Рабочая программа актуализирована на заседании департамента промышленной безопасности:**

Протокол от « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Директор департамента

\_\_\_\_\_  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(И.О. Фамилия)

## АННОТАЦИЯ

Дисциплина «Современные методы определения эксплуатационных свойств материалов и покрытий» предназначена для аспирантов, обучающихся по научной специальности 2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки).

Общая трудоемкость дисциплины составляет 72 часа (2 з.е). Учебным планом предусмотрены лекционные занятия (8 часов), практические занятия (10 часов) и самостоятельная работа аспиранта (54 часа). Дисциплина реализуется на 2 году обучения в 3 семестре. Результат промежуточной аттестации – зачет.

Дисциплина «Современные методы определения эксплуатационных свойств материалов и покрытий» логически и содержательно связана с такими курсами предыдущего уровня образования 15.04.01 Машиностроение (магистерская программа), как: Технологические особенности сварки специальных сталей и сплавов, Техническая диагностика и контроль качества сварных конструкций, Системное проектирование технологических процессов восстановления и упрочнения деталей и узлов, Методы повышения износостойкости и восстановления деталей узлов трения.

Дисциплина «Современные методы определения эксплуатационных свойств материалов и покрытий» имеет как самостоятельное, так и базовое значение при подготовке специалистов сварочного производства. Разработка новых технологических процессов сварки, наплавки, напыления, пайки и сварочных материалов требует теоретической подготовки в области сварочных процессов и технологий. Знание основ теории сварочных процессов и технологий дает аспиранту и исследователю ключ к пониманию механизмов процессов сварки, наплавки, напыления и пайки и, следовательно, к его сознательному регулированию. В этом состоит ее самостоятельное значение.

**Цель** – формирование системного представления о методах исследования эксплуатационных свойств материалов и деталей, развитие навыков научного мышления, обучение основам организации и методикам проведения испытаний при определении эксплуатационных свойств материалов.

**Задачи:**

1. Способствовать развитию знаний по методам исследования эксплуатационных свойств материалов и покрытий;
2. Сформировать навыки по самостоятельному обучению новым методам исследования эксплуатационных свойств материалов и покрытий;
3. Выработать умение по применению современных методов и средств проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций, в том числе объектов, испытывающих фазовые и структурные превращения при внешних воздействиях; планирования проведения и интерпретирования экспериментальных данные при изучении физико-механических свойств сварных соединений; обработки, анализа и обобщения результатов экспериментов;
4. Сформировать основные умения, необходимые для организации и проведения самостоятельных научных исследований эксплуатационных свойств материалов и покрытий;
5. Сформировать позитивное отношение к методам исследований эксплуатационных свойств материалов и покрытий.

Планируемые результаты обучения по данной дисциплине (знания, умения, владения), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы:

Формулировка требования	Этапы формирования планируемых результатов освоения программы	
Способность научно обоснованно оценивать новые решения в области построения и	<b>Знает</b>	- методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях;

<p>моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем и специализированного машиностроительного оборудования, а также средств технологического оснащения производства</p>		- методы моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем и специализированного машиностроительного оборудования;
	<b>Умеет</b>	методики альтернативных вариантов решения исследовательских и практических задач, оценки новых решений в области построения и моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем
	<b>Владеет</b>	навыками моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем и специализированного машиностроительного оборудования, способностью построения и моделирования средств технологического оснащения производства.
<p>Способность формулировать и решать нетиповые задачи математического, физического, конструкторского, технологического, электротехнического характера при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники</p>	<b>Знает</b>	методики аналитического решения задач планирования экспериментов при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники
	<b>Умеет</b>	формулировать и решать нетиповые задачи математического, физического, конструкторского, технологического, электротехнического характера при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники
	<b>Владеет</b>	способностью формулировать и решать нетиповые задачи математического, физического, конструкторского, технологического, электротехнического характера при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники
<p>Способность планировать и проводить экспериментальные исследования с последующим адекватным оцениванием получаемых результатов</p>	<b>Знает</b>	методики планирования и проведения экспериментальных исследований с последующим адекватным оцениванием получаемых результатов
	<b>Умеет</b>	планировать и проводить экспериментальные исследования с последующим адекватным оцениванием получаемых результатов
	<b>Владеет</b>	способностью планировать и проводить экспериментальные исследования с последующим адекватным оцениванием получаемых результатов
<p>Способность самостоятельно выполнять научные исследования в области сварки, родственных процессов и технологий, используя соответствующий физико-математический аппарат, вычислительные методы и компьютерные технологии, с целью установления математических моделей</p>	<b>Знает</b>	методики разработки методик измерения, обработки полученных результатов при выполнении научных исследований в области сварки, родственных процессов и технологий с использованием компьютерных технологий
	<b>Умеет</b>	самостоятельно выполнять научные исследования в области сварки, родственных процессов и технологий, используя соответствующий физико-математический аппарат, вычислительные методы и компьютерные технологии, с целью установления математических моделей
	<b>Владеет</b>	способностью самостоятельно выполнять научные исследования в области сварки, родственных процессов и технологий

Способность овладевать современными методами и средствами проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций, в том числе объектов, испытывающих фазовые и структурные превращения при внешних воздействиях; планировать проведение и интерпретировать экспериментальные данные по изучению физико-механических свойств сварных соединений; обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов	<b>Знает</b>	методики средства проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций, планирование и проведение экспериментальных исследований по изучению свойств сварных соединений
	<b>Умеет</b>	овладевать современными методами и средствами проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций, в том числе объектов, испытывающих фазовые и структурные превращения при внешних воздействиях; планировать проведение и интерпретировать экспериментальные данные по изучению физико-механических свойств сварных соединений; обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов
	<b>Владеет</b>	современными методами и средствами проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций; планировать проведение и интерпретировать экспериментальные данные; обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов

Для формирования вышеуказанных знаний, умений и навыков в рамках дисциплины «Современные методы определения эксплуатационных свойств материалов и покрытий» применяются следующие методы активного / интерактивного обучения: проблемные лекции и лекции-презентации.

## **I. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (8 час.)**

### **Раздел 1. Поверхностный слой деталей (5 час.)**

#### **Тема 1. Введение (1 час.)**

Схема поверхностного слоя. Взаимосвязь поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами деталей. Классификация параметров поверхностного слоя. Роль покрытий в повышении надежности деталей и конструкций.

## **Тема 2. Шероховатость и волнистость поверхности (1 час.)**

Волнистость поверхности. Шероховатость поверхности. Методы и средства измерения волнистости поверхности. Влияние волнистости на параметры поверхностного слоя и эксплуатационные свойства. Параметры шероховатости. Методы и средства измерения шероховатости поверхности.

## **Тема 3. Физико-химическое состояние поверхности (2 час.)**

Параметры физико-химического состояния поверхностного слоя. Методы исследования структурно-фазового состояния поверхностного слоя. Методы исследования химического состава поверхностного слоя.

## **Тема 4. Остаточные напряжения (1 час.)**

Макронапряжения. Микронапряжения. Методы определения остаточных напряжений.

## **Раздел 2. Влияние параметров поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей (3 час.)**

### **Тема 1. Прочность при статическом и циклическом нагружении (1 час.)**

Влияние шероховатости поверхности на сопротивление усталости. Физико-химическое состояние поверхностного слоя. Фазовый и химический составы поверхностного слоя. Остаточные макронапряжения.

### **Тема 2. Трение и изнашивание (1 час.)**

Основные трибологические характеристики. Влияние структуры на износостойкость материалов. Влияние механических свойств поверхностного слоя на износостойкость. Методы исследования трибологических характеристик материалов.

### **Тема 3. Коррозионная стойкость (1 час.)**

Виды коррозии. Методы защиты металлов от коррозии. Методы исследования коррозионной стойкости. Влияние химического состава поверхностного слоя на коррозионную стойкость. Влияние структурно-фазового состава поверхностного слоя на коррозионную стойкость.

## **II. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА**

### **Практические занятия (10 час., в том числе МАО 10 час.)**

Занятия проводятся с использованием метода интерактивного обучения – «Тренинг». Специфика данного метода заключается в том, что результате тренинга происходит формирование и отработка умений и навыков работы на современном исследовательском оборудовании для определения эксплуатационных свойств конкретных материалов и покрытий.

#### **Практическое занятие №1. Определение параметров структуры поверхности (2 час.)**

Цель работы — ознакомление с теоретическими основами, оборудованием и приобретение практических навыков в определении параметров структуры поверхности деталей

Аспиранты с материалами практических занятий по следующему плану.

1. Определение параметров поверхности профиля - максимальная высота пика профиля, наибольшая глубина впадины профиля, максимальная высота профиля, среднее арифметическое отклонение оцениваемого профиля и др.

2. Ознакомление с профилограммами микронеровностей поверхностей стали 40Х.

3. Ознакомление с топографией поверхности стали 40Х.

4. Определения параметров поля – пространственные, гибридные, функциональные параметры.

5. Назначение, технические характеристики и компоненты оптического профилометра

6. Методика определения параметров структуры поверхности

7. Порядок выполнения работы

8. Содержание отчета



## **Практическое занятие №2. Определение механических свойств тонкопленочных антифрикционных покрытий (2 час.)**

Цель работы — ознакомление с теоретическими основами, оборудованием и приобретение практических навыков в определении механических свойств тонкопленочных покрытий деталей.

Аспиранты с материалами практических занятий по следующему плану.

1. Основные положения теории и определения.
2. Схема контактирования твердых тел при трении скольжения
3. Диаграмма нагрузка – глубина отпечатка, полученная методом нормального наноиндентирования. Схема измерения нанотвердости пирамидой Берковича
4. Технические характеристики ультрамикротестера DUH-211S.
5. Порядок выполнения работы.
6. Содержание отчета.

## **Практическое занятие №3. Определение силы трения и коэффициента трения скольжения (2 час.)**

Цель работы — ознакомление с оборудованием, применяемым для исследования процессов трения и изнашивания, и приобретение практических навыков в определении коэффициента и силы трения скольжения.

Аспиранты с материалами практических занятий по следующему плану.

1. Виды и характеристики внешнего трения.
2. Виды смазки.
3. Технические характеристики трибометра УМТ-3.
4. Необходимое оборудование и технические характеристики.
5. Порядок выполнения работы
6. Содержание отчёта

## **Практическое занятие №4. Определение технологических параметров плазменного напыления (2 час.)**

Цель работы — ознакомление с оборудованием, технологическими особенностями и возможностями процесса плазменного напыления.

Аспиранты с материалами практических занятий по следующему плану.

1. Особенности процесса плазменного напыления.
2. Плазменное газотермическое оборудование.
3. Схема установки для плазменного напыления УПУ–3Д.
4. Схема плазмотрона ПН-В1.
5. Схема процесса плазменного напыления.
6. Конструкция плазменного распылителя.
7. Указания по выбору технологии.
8. Порядок выполнения работы.
9. Содержание отчета.

### **III. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Современные методы определения эксплуатационных свойств материалов и покрытий» представлено в Приложении 1 и включает в себя:

- план-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, в том числе примерные нормы времени на выполнение по каждому заданию;
- характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению;
- требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы;
- критерии оценки выполнения самостоятельной работы.

#### IV. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА

№ п/п	Контролируемые модули/ разделы/ темы дисциплины	Этапы формирования планируемых результатов освоения программы	Оценочные средства - наименование	
			текущий контроль	Промежуточ ная аттестация
<b>Раздел 1. Поверхностный слой деталей</b>				
1	Тема 1 Введение.	<b>Знает</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	Вопросы к зачету: 1-4
		<b>Умеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	
2	Тема 2. Шероховатость и волнистость поверхности	<b>Знает</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	Вопросы к зачету: 5-10
		<b>Умеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
3	Тема 3. Физико-химическое состояние поверхности	<b>Знает</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	Вопросы к зачету: 11-13
		<b>Умеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
4	Тема 4. Остаточные напряжения	<b>Знает</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	Вопросы к зачету: 14-18
		<b>Умеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
<b>Раздел 2. Влияние параметров поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей</b>				
6	Тема 1. Прочность при статическом и циклическом нагружении	<b>Знает</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	Вопросы к зачету: 19-23
		<b>Умеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	
7	Тема 2. Трение и изнашивание	<b>Знает</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	Вопросы к зачету: 24-32
		<b>Умеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	
8	Тема 3. Коррозионная стойкость	<b>Знает</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	Вопросы к зачету: 33-37
		<b>Умеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	

Типовые контрольные задания, методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков и (или) опыта деятельности, а также критерии и показатели, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и характеризующие этапы формирования

планируемых результатов освоения программы, представлены в Приложении 2.

#### **IV. СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

##### **Основная литература**

1. Сварка и ремонт металлических конструкций по противокоррозионным покрытиям: учебное пособие для вузов / А. П. Шатов, И. О. [т. е. О. И.] Стеклов, В. П. Ступников. – Москва: Изд-во Московского технического университета, 2014. – 179 с. (9 экз.).

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:791485&theme=FEFU>

2. Современные технологии сварки. Инженерно-физические основы: [учебное пособие] / А. В. Люшинский. – Долгопрудный: Интеллект, 2013. – 239 с. (5 экз.)

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:690555&theme=FEFU>

3. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / А. Г. Суслов. – М.: КноРус, 2013. – 288 с. (2 экз.).

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:698384&theme=FEFU>

4. Дефектация сварных швов и контроль качества сварных соединений: учебник / В. В. Овчинников. – Москва: Академия, 2015. – 224 с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:785440&theme=FEFU>

##### **Дополнительная литература**

1. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. – М.: Машиностроение. 2009. 312 с. Режим доступа:

<http://e.lanbook.com/view/book/730/>

2. Булычев С.И. Определение модуля Юнга по твердости // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – Т. 75, №9, 2009. – С. 63–66.

[http://lib.dvfu.ru:8080/search/query?term\\_1=%D0%9E%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5+%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8F+%D0%AE%D0%B](http://lib.dvfu.ru:8080/search/query?term_1=%D0%9E%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5+%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8F+%D0%AE%D0%B)

[D%D0%B3%D0%B0+%D0%BF%D0%BE+%D1%82%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8&theme=FEFU](http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:648586&theme=FEFU)

3. Матюнин В.М. Определение механических свойств металла в зонах концентрации напряжений // Технология металлов. №7. 2009. С. 19–22.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:648586&theme=FEFU>

4 Введение в сварочные технологии. Сварка плавлением, контактная сварка и сварка давлением: учебное пособие / С. Н. Козловский. – Красноярск: Изд-во Сибирского аэрокосмического университета, 2010. – 131 с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:433637&theme=FEFU>

**• Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети  
«Интернет»**

- <http://websvarka.ru> – Форум сварщиков. Справочный сайт.
- <http://autoweld.ru/statyai.php> - информационный портал «Autoweld.ru сварочное оборудование».
- <http://www.shtorm-its.ru> - информационный портал «Шторм», сварочное оборудование.
- <http://www.osvarke.com> - информационный портал «Осварке».
- <http://www.autowelding.ru> - информационный портал «autoWelding.ru».
- <http://www.esab.ru> – компания ESAB, сварочное оборудование.
- <http://www.fips.ru> – ФГБУ Федеральный институт промышленной собственности.
- <http://www.icsti.su/> - Международный центр научной и технической информации (МЦНТИ).
- <http://www.wipo.int/portal/index.html.en> – World intellectual property organization (WIPO).

**Перечень информационных технологий  
и программного обеспечения**

Электронный учебный курс в интегрированной платформе электронного обучения Blackboard ДВФУ. Идентификатор курса:

[FU50218-150700.62-twp-01: Теория сварочных процессов](#)

## **VI. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Теоретическая часть курса, проводимая в аудиториях/лабораториях ДВФУ (с преподавателем / руководителем) – 8 час.

Практическая часть курса, проводимая в аудиториях/лабораториях ДВФУ (с преподавателем/руководителем) – 10 час., в том числе с использованием интерактивных методов (МАО) – 10 час.

Всего часов аудиторной нагрузки (с преподавателем/руководителем) – 18 часов, в том числе с использованием интерактивных методов (МАО) – 10 часов.

Время на самостоятельную работу (без преподавателя/руководителя) как теоретической, так и практической частей курса – 54 час.

### **Рекомендации по планированию и организации времени, на изучение дисциплины**

Время, отведённое на изучение дисциплины, должно быть использовано обучающимся планомерно. Время на изучение дисциплины указывается на титульном листе рабочей программы учебной дисциплины.

Планирование времени – эффективный вариант организация учебной деятельности. Общие рекомендации составления планирования:

1. Своевременный и полный учет задач, вытекающих из содержания профессиональной деятельности.
2. Регулярное распределение рабочего времени в соответствии с приоритетностью и сложностью задач, выделение части времени в резерв.
3. Документирование результатов планирования и организации рабочего времени (составление текущих и перспективных планов работы).
4. Учет работоспособности в течение периода, отведенного для работы (в течение дня, недели, месяца, года).
5. Концентрация усилий на первоочередном решении задач, от которых, в свою очередь, зависит решение задач второго уровня значимости (срочности, важности).

6. Умелое использование информации в процессе планирования и организации рабочего времени.

7. Способность к самоограничению (умение говорить «нет», когда значимость той или иной задачи и, следовательно, необходимость ее выполнения не являются очевидными).

8. Самоконтроль расходования времени в ходе выполнения задач профессиональной деятельности.

9. Стремление к постоянному совершенствованию системы планирования и организации рабочего времени.

### **Описание последовательности действий обучающихся при изучении дисциплины**

В соответствии с целями и задачами дисциплины обучающийся изучает и готовится к теоретическим и практическим занятиям, проходит контрольные точки текущей и промежуточной аттестации, включающие разные формы проверки усвоения материала (конспекты, отчёты, тесты, контрольные мероприятия).

Освоение дисциплины включает несколько составных элементов учебной деятельности:

1. Ознакомление с рабочей программой учебной дисциплины.
2. Выполнение требований, установленных преподавателем (руководителем) в рамках профессиональной деятельности сотрудника ДВФУ.
3. Регулярная подготовка к занятиям и активная работа на них, включающая следующее общее планирование:

<b>№ п/п</b>	<b>Наименование этапа</b>	<b>Содержание задач этапа</b>
1	Обработка информации	Сбор, учет, систематизация, анализ информации, необходимой для надлежащего планирования и организации профессиональной деятельности, а также актуализация и оперативный обмен информацией с руководителем, коллегами и деловыми партнерами.
2	Постановка целей и	Предварительное, а затем окончательное

	задач	формулирование целей и задач, доклад соответствующих предложений руководителю.
3	Планирование	Разработка (участие в разработке) документов планирования (планов, программ, графиков и т. п.) по направлениям и периодам профессиональной деятельности, их согласование по срокам и методам реализации, определение состава привлекаемых к их реализации сил и средств.
4	Подготовка решения	Представление проектов документов планирования, а также предложений, направленных на выработку оптимального решения, уточнение проектов и доведение принятых решений (утвержденных планов работы по направлениям и периодам) до сведения лиц, ответственных за руководство.
5	Реализация решения	Непосредственная реализация решений, участие в их реализации, делегирование полномочий, координация работы ответственных за реализацию, обработка информации о ходе реализации решений, ее передача руководителю.
6	Контроль реализации решения	Планирование и организация контрольных мероприятий, учет и сравнение результатов контроля с планируемыми показателями, доклады руководителю.
7	Корректировка решений	Сбор, учет, систематизация, анализ информации, выработка и представление руководителю предложений по корректировке решений (отдельных действий в рамках реализации таких решений)
8	Оценка и анализ результатов	Сбор, учет, систематизация, анализ информации, отражающей результаты реализации решений, подведение итогов профессиональной деятельности (за период или по направлению – текущая/промежуточная аттестация)

### Рекомендация по процессу обучения

Обучение по рабочей программе учебной дисциплины «Современные методы определения эксплуатационных свойств материалов и покрытий» предполагает изучение курса на аудиторных занятиях (лекции и практические работы) и самостоятельной работы аспирантов. С целью обеспечения успешного обучения аспирант должен готовиться к лекции, поскольку она является важнейшей формой организации учебного процесса, поскольку:

- знакомит с новым учебным материалом;
- разъясняет учебные элементы, трудные для понимания;
- систематизирует учебный материал;



- ориентирует в учебном процессе.

Подготовка к лекции заключается в следующем:

- внимательно прочитайте материал предыдущей лекции;
- узнайте тему предстоящей лекции (по тематическому плану, по информации лектора);
- ознакомьтесь с учебным материалом по учебнику и учебным пособиям;
- постарайтесь уяснить место изучаемой темы в своей профессиональной подготовке;
- запишите возможные вопросы, которые вы зададите лектору на лекции.

Подготовка к практическим занятиям и работам:

- внимательно прочитайте материал лекций относящихся к данным практическим занятиям, ознакомьтесь с учебным материалом по учебнику и учебным пособиям;
- выпишите основные термины, принципы, формулы;
- ответьте на контрольные вопросы по практическим занятиям, готовьтесь дать развёрнутый ответ на каждый из вопросов;
- уясните, какие учебные элементы остались для вас неясными и постарайтесь получить на них ответ заранее (до практического занятия) во время текущих консультаций преподавателя;
- готовиться можно индивидуально, парами или в составе малой группы, последние являются эффективными формами работы;
- рабочая программа дисциплины в части целей, перечню знаний, умений, терминов и учебных вопросов может быть использована вами в качестве ориентира в организации обучения.

Подготовка к зачету.

К зачету необходимо готовиться целенаправленно, регулярно, систематически и с первых дней обучения по данной дисциплине.

Попытки освоить дисциплину в период зачётно-экзаменационной сессии, как правило, показывают не слишком удовлетворительные результаты.

В самом начале учебного курса познакомьтесь со следующей учебно-методической документацией:

- программой дисциплины;
- перечнем знаний и умений, которыми аспирант должен владеть;
- тематическими планами лекций, семинарских занятий;
- контрольными мероприятиями;
- учебником, учебными пособиями по дисциплине, а также электронными ресурсами;
- перечнем вопросов.

После этого у вас должно сформироваться чёткое представление об объёме и характере знаний и умений, которыми надо будет овладеть по дисциплине. Систематическое выполнение учебной работы на лекциях и практических занятиях позволит успешно освоить дисциплину и создать хорошую базу для сдачи зачета.

### **Рекомендации по работе с информационными источниками**

Работа с информацией – процесс нахождения знаний (информации) о причинах возникновения проблем, применённых инженерных решений/идей, современного состояния объекта исследования.

Поиск информации по дисциплине и её дальнейшей обработки следует начинать с:

- проработки тематического плана – теоретическая и практическая части курса;
- классификации информационного материала;
- составления логической схемы основных понятий, категорий, связей между рассматриваемыми темами;

- составления новой библиографии, при неудовлетворении предложенной.

- реферирования – краткое, основное содержание одной и более работ по теме.

- конспектирования – детальное изложение главных положений и концептуальных идей.

- аннотирования (аннотация) – краткое, предельно сжатое изложение основного содержания литературных источников.

- цитирования – дословная запись высказываний, выражений автора, а также приведение в тексте работы фактических и статистических данных, содержащихся в литературных источниках.

Для реализации информации в печатном виде необходимо выполнять общепринятые требования по оформлению - ГОСТ 2.105-95 Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам.

### **Рекомендации по подготовке к текущей/промежуточной аттестации**

Успешное освоение программы курса предполагает:

- усвоение теоретической части курса;
- выполнение требований преподавателя (руководителя), установленных преподавателем (руководителем) в рамках профессиональной деятельности сотрудника ДВФУ;

- выполнение практической части курса.

## **VII. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Для проведения занятий по дисциплине «Современные методы определения эксплуатационных свойств материалов и покрытий» используются следующие помещения, оборудование и приборы:

1. Лекционная аудитория (ауд. L346). Она оснащена следующим оборудованием и приборами:

- автомат сварочный в комплекте с источником питания ВДУ-1202 и кабелем управления;
- автомат сварочный АДГ-602 в комплекте с источником ВДУ-601 (аттестован НАКС).

2. Лаборатория специальных методов сварки (L339). Она оснащена следующим оборудованием и приборами:

- персональный компьютер с доступом в сеть интернет;
- принтер (многофункциональное устройство);
- монитор АОС 230LM00003, 23”;
- телевизор плазменный lg 50pt81 16:9, 1366x768, 15000:1, 1500 cd/m2, 160 degrees, xd engineiii, 15wx2, surround;
- весы электронные CAS;
- ноутбук lenovo ideapad s205 bra c50/2g/320gb/int/11/6’;
- ноутбук lenovo thinkpad x121e black 11.6" hd(1366x768) amd e300.2gb ddr3.320gb;
- проектор «ИНФОКУС ИН-24»;
- цифровой микроскоп digimicro Prof с увеличением 20–300х с USB выходом;
- приборы измерения температур: пирометр инфракрасный AR300 диапазон -32°С до 700°С, термометры стеклянные типа ТЛ, термопары типа ТХА и ТХК, термометры сопротивления медные (ТСМ) и платиновые (ТСП) мод. 115...165 с коммутационной головкой;
- учебные стенды:
  - тарировки деформационного манометра;
  - тарировки ротаметра;
  - тарировки расходомерной шайбы;
  - термометра сопротивления;
  - манометрического термометра и др.
- учебные стенды:

- стенд холодной точечной сварки;
- установка точечной ультразвуковой сварки;
- стенд диффузионной сварки;
- стенд сварки стержней трением встык;
- установка сварки пластмассовых труб;
- стенд сварки в защитной камере;
- установка сварки пластмассовых пластин горячим газом.

3. Лаборатория механических испытаний и структурного анализа (ауд. L 101). Она оснащена следующим оборудованием и приборами:

- универсальная настольная испытательная машина ags-1kpx (Shimadzu, Япония);
- универсальная настольная испытательная машина AG-100 kpxplus (Shimadzu, Япония);
- универсальная электромагнитная система для динамических испытаний MMT Shimadzu, Япония)
- ультразвуковая система для усталостных испытаний USF-2000 (Shimadzu, Япония).

4. Аудитория для самостоятельной работы аспирантов:

Русский Остров, ул. Аякс, п, д. 10, кор. А (Лит. П), Этаж 10, каб. А1017.

Она оснащена следующим оборудованием и приборами:

- Моноблок Lenovo C360G-i34164G500UDK – 15 шт.
- Интегрированный сенсорный дисплей Polymedia FlipBox - 1 шт.
- Копир-принтер-цветной сканер в e-mail с 4 лотками Xerox WorkCentre 5330 (WC5330C) – 1 шт.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДВФУ)

---

**ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ШКОЛА)**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ  
РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

**по дисциплине «Современные методы определения эксплуатационных  
свойств материалов и покрытий»**

2.5.8 Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)

Форма подготовки очная

**Владивосток**

**2022**

Самостоятельная работа – это педагогически управляемый процесс самостоятельной деятельности, обеспечивающий реализацию целей и задач по овладению необходимым объемом знаний, умений и навыков, опыта творческой работы и развитию профессиональных интеллектуально-волевых, нравственных качеств будущего специалиста. Самостоятельная работа по курсу «Современные методы определения эксплуатационных свойств материалов и покрытий» является важной составной частью учебно-воспитательного процесса и имеет целью: закрепить и углубить знания, полученные на теоретических и практических занятиях; выполнить контрольное задание; теоретическую подготовку к практическим занятиям; подготовиться к предстоящему экзамену по дисциплине; формировать самостоятельность и инициативу в поиске и приобретении знаний, а также умения и навыки обработки результатов наблюдений. Основным и преимущественным видом самостоятельной работы является работа с рекомендованной литературой, направленная на освоение программы курса. Самостоятельная работа должна носить систематический и непрерывный характер в течение всего семестра. Время для самостоятельной работы отводится исходя из фактического уровня знаний, умений и навыков по курсу.

#### **План-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине**

<b>№ п/п</b>	<b>Дата/сроки выполнения</b>	<b>Вид самостоятельной работы</b>	<b>Примерные нормы времени на выполнение, час.</b>	<b>Форма контроля</b>
1	1 – 18 неделя 3 семестра	Освоение теоретического учебного материала.	30	Собеседования
2	1 – 18 неделя 3 семестра	Подготовка к практическим занятиям	20	Проверка результатов практического занятия
3	19 – 20 неделя 3 семестра	Подготовка к зачету	4	зачет
<b>Итого</b>			<b>54</b>	

## Рекомендации по самостоятельной работе аспирантов

Вид учебных занятий	Организация деятельности обучающегося
Занятия лекционного типа	<p>В ходе лекций преподаватель излагает и разъясняет основные, наиболее сложные понятия темы, а также связанные с ней теоретические и практические проблемы, дает рекомендации на выполнение самостоятельной работы.</p> <p>В ходе лекций обучающимся рекомендуется:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- вести конспектирование учебного материала;</li> <li>- обращать внимание на категории, формулировки, раскрывающие содержание тех или иных явлений и процессов, научные выводы и практические рекомендации по их применению;</li> <li>- задавать преподавателю уточняющие вопросы с целью уяснения теоретических положений, разрешения спорных ситуаций.</li> </ul> <p>В рабочих конспектах желательно оставлять поля, на которых во внеаудиторное время можно сделать пометки из учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся, дополняющего материал прослушанной лекции, а также пометки, подчеркивающие особую важность тех или иных теоретических положений.</p> <p>Для успешного овладения курсом необходимо посещать все лекции, так как тематический материал взаимосвязан между собой. В случаях пропуска занятия аспиранту необходимо самостоятельно изучить материал и ответить на контрольные вопросы по пропущенной теме во время индивидуальных консультаций.</p>
Занятия практические	<p>Практические занятия – это активная форма учебного процесса. При подготовке к практическим занятиям обучающемуся необходимо изучить основную литературу, ознакомиться с дополнительной литературой, учесть рекомендации преподавателя. Темы теоретического содержания предполагают дискуссионный характер обсуждения. Большая часть тем дисциплины носит практический характер, т.е. предполагает выполнение заданий и решение задач, анализ практических ситуаций.</p>
Самостоятельная работа (изучение теоретического курса, подготовка к практическим занятиям)	<p>Важной частью самостоятельной работы является чтение учебной и научной литературы. Основная функция учебников – ориентировать аспиранта в системе знаний, умений и навыков, которые должны быть усвоены будущими специалистами по данной дисциплине.</p>
Подготовка к зачету	<p>Подготовка к зачету предполагает:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- изучение основной и дополнительной литературы</li> <li>- изучение конспектов лекций</li> <li>- участие в проводимых контрольных опросах</li> </ul>





МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДФУ)

---

**ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ШКОЛА)**

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**  
по дисциплине «Современные методы определения эксплуатационных  
свойств материалов и покрытий»

**2.5.8 Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)**

**Форма подготовки очная**

**Владивосток**

**2022**

## Паспорт фонда оценочных средств

Формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
Способность научно обоснованно оценивать новые решения в области построения и моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем и специализированного машиностроительного оборудования, а также средств технологического оснащения производства	<b>Знает</b>	- методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях; - методы моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем и специализированного машиностроительного оборудования;
	<b>Умеет</b>	методики альтернативных вариантов решения исследовательских и практических задач, оценки новых решений в области построения и моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем
	<b>Владеет</b>	навыками моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем и специализированного машиностроительного оборудования, способностью построения и моделирования средств технологического оснащения производства.
Способность формулировать и решать нетиповые задачи математического, физического, конструкторского, технологического, электротехнического характера при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники	<b>Знает</b>	методики аналитического решения задач планирования экспериментов при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники
	<b>Умеет</b>	формулировать и решать нетиповые задачи математического, физического, конструкторского, технологического, электротехнического характера при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники
	<b>Владеет</b>	способностью формулировать и решать нетиповые задачи математического, физического, конструкторского, технологического, электротехнического характера при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники
Способность планировать и проводить экспериментальные исследования с последующим адекватным оцениванием получаемых результатов	<b>Знает</b>	методики планирования и проведения экспериментальных исследований с последующим адекватным оцениванием получаемых результатов
	<b>Умеет</b>	планировать и проводить экспериментальные исследования с последующим адекватным оцениванием получаемых результатов
	<b>Владеет</b>	способностью планировать и проводить экспериментальные исследования с последующим адекватным оцениванием получаемых результатов
Способность самостоятельно выполнять научные исследования в области сварки, родственных процессов и технологий, используя	<b>Знает</b>	методики самостоятельной разработки методик измерения, обработки полученных результатов при выполнении научных исследований в области сварки, родственных процессов и технологий с использованием компьютерных технологий
	<b>Умеет</b>	самостоятельно выполнять научные исследования в области сварки, родственных процессов и технологий,

соответствующий физико-математический аппарат, вычислительные методы и компьютерные технологии, с целью установления математических моделей		используя соответствующий физико-математический аппарат, вычислительные методы и компьютерные технологии, с целью установления математических моделей
	<b>Владеет</b>	способностью самостоятельно выполнять научные исследования в области сварки, родственных процессов и технологий
Способность овладевать современными методами и средствами проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций, в том числе объектов, испытывающих фазовые и структурные превращения при внешних воздействиях; планировать проведение и интерпретировать экспериментальные данные по изучению физико-механических свойств сварных соединений; обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов	<b>Знает</b>	методики средства проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций, планирование и проведение экспериментальных исследований по изучению свойств сварных соединений
	<b>Умеет</b>	овладевать современными методами и средствами проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций, в том числе объектов, испытывающих фазовые и структурные превращения при внешних воздействиях; планировать проведение и интерпретировать экспериментальные данные по изучению физико-механических свойств сварных соединений; обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов
	<b>Владеет</b>	современными методами и средствами проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций; планировать проведение и интерпретировать экспериментальные данные; обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов

№ п/п	Контролируемые модули/ разделы/ темы дисциплины	Этапы формирования компетенций	Оценочные средства - наименование	
			текущий контроль	промежуточ ная аттестация
<b>Раздел 1. Поверхностный слой деталей</b>				
1	Тема 1 Введение.	<b>Знает</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	УО-1 УО-2 ПР-7
		<b>Умеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	
2	Тема 2. Шероховатость и волнистость поверхности	<b>Знает</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	УО-1 УО-2 ПР-7
		<b>Умеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
3	Тема 3. Физико-химическое состояние поверхности	<b>Знает</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	УО-1
		<b>Умеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	УО-2
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	ПР-7

4	Тема 4. Остаточные напряжения	<b>Знает</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
		<b>Умеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
<b>Раздел 2. Влияние параметров поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей</b>				
6	Тема 1. Прочность при статическом и циклическом нагружении	<b>Знает</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	УО-1 УО-2 ПР-7
		<b>Умеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	
7	Тема 2. Трение и изнашивание	<b>Знает</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
		<b>Умеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	
8	Тема 3. Коррозионная стойкость	<b>Знает</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
		<b>Умеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7	
		<b>Владеет</b>	УО-1, УО-2, ПР-2, ПР-7,	

<b>Расшифровка кодировок оценочных средств (ОС)</b>				
№ п/п	Код ОС	Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
1	УО-1	Собеседование	Средство контроля, организованное как специальная беседа преподавателя с обучающимся на темы, связанные с изучаемой дисциплиной, и рассчитанное на выяснение объёма знаний обучающегося по определённому разделу, теме, проблеме и т.п.	Вопросы по темам/разделам дисциплины
2	УО-2	Коллоквиум	Средство контроля усвоения учебного материала темы, раздела или разделов дисциплины, организованное как учебное занятие в виде собеседования преподавателя с обучающимися.	Вопросы по темам/разделам дисциплины
4	ПР-2	Контрольная работа	Средство проверки умений применять полученные знания для решения задач определённого типа по теме или разделу	Комплект контрольных заданий по вариантам
5	ПР-7	Конспект	Продукт самостоятельной работы обучающегося, отражающий основные идеи заслушанной лекции, сообщения и т.д.	Темы/разделы дисциплины

### Шкала оценивания уровня сформированности компетенций

Формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	критерии	показатели
Способность научно обоснованно оценивать новые решения в области построения и моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем и специализированног	Знает (пороговый уровень)	методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях;	знание методики критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских
			способность формулировать методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, методы моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем и

о машиностроительного оборудования, а также средств технологического оснащения производства		- методы моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем и специализированного машиностроительного оборудования;	и практических задач	
	Умеет (продвинутой)	методики альтернативных вариантов решения исследовательских и практических задач, оценки новых решений в области построения и моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем	умеет формулировать методики альтернативных вариантов решения исследовательских и практических задач, оценки новых решений и средств технологического оснащения производства	разработка и формулировать методики альтернативных вариантов решения исследовательских и практических задач, оценки новых решений и моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем
	Владеет (высокий)	навыками моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем и специализированного машиностроительного оборудования, способностью построения и моделирования средств технологического оснащения производства.	владение способностью моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем и специализированного машиностроительного оборудования	способность моделирования машин, приводов, оборудования, технологических систем и специализированного машиностроительного оборудования, способность построения и моделирования средств технологического оснащения
Способность формулировать и решать нетиповые задачи математического, физического, конструкторского, технологического, электротехнического характера при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники	знает (пороговый уровень)	методики аналитического решения задач планирования экспериментов при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники	знание методики генерирования идеи в научной и профессиональной деятельности	способность формулировать нетиповые задачи математического, технологического, характера при проектировании новой техники
	умеет (продвинутой)	формулировать и решать нетиповые задачи математического, физического, конструкторского, технологического, электротехнического характера при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники	умение формулировать нетиповые задачи математического, технологического, характера при проектировании новой техники	способность формулировать нетиповые задачи математического, технологического, характера при проектировании новой техники
	владеет (высокий)	способностью формулировать и решать нетиповые задачи математического, физического, конструкторского, технологического, электротехнического	владение способностью формулировать и решать нетиповые задачи математического, технологического, характера при	способность формулировать и решать нетиповые задачи математического, технологического, характера при проектировании новой

		характера проектирования, изготовления и эксплуатации новой техники	проектировании новой техники	техники
Способность планировать и проводить экспериментальные исследования с последующим адекватным оценением получаемых результатов	знает (пороговый уровень)	методики планирования и проведения экспериментальных исследований с последующим адекватным оценением получаемых результатов	знание методики планирования и проведения экспериментальных исследований с последующим	способность планировать и проводить экспериментальные исследования с последующим оценением получаемых результатов
	умеет (продвинутый)	формулировать и решать нетиповые задачи математического, физического, конструкторского, электротехнического характера при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники	умение планировать и проводить экспериментальные исследования с последующим оценением получаемых результатов	способность планировать и проводить экспериментальные исследования с последующим адекватным оценением получаемых результатов
	владеет (высокий)	способностью формулировать и решать нетиповые задачи математического, физического, конструкторского, электротехнического характера при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники	владение способностью планировать и проводить экспериментальные исследования с последующим адекватным оценением получаемых результатов	способность планировать и проводить экспериментальные исследования с последующим адекватным оценением получаемых результатов
Способность самостоятельно выполнять научные исследования в области сварки, родственных процессов и технологий, используя соответствующий физико-математический аппарат, вычислительные методы и компьютерные технологии, с целью установления математических моделей	знает (пороговый уровень)	методики разработки методик измерения, обработки полученных результатов при выполнении научных исследований в области сварки, родственных процессов и технологий с использованием компьютерных технологий	знание современных методов исследования в области сварки, родственных процессов и технологий	способность самостоятельно выполнять научные исследования в области сварки, родственных процессов и технологий
	умеет (продвинутый)	самостоятельно выполнять научные исследования в области сварки, родственных процессов и технологий, используя соответствующий физико-математический аппарат, вычислительные методы и компьютерные технологии, с целью установления математических моделей	умение самостоятельно выполнять научные исследования в области сварки, родственных процессов и технологий, используя соответствующий физико-	способность самостоятельно выполнять научные исследования в области сварки, родственных процессов и технологий, используя соответствующий физико-математический аппарат,

			математический аппарат с целью установления математических моделей	вычислительные методы и компьютерные технологии, с целью установления математических моделей
	владеет (высокий)	способностью самостоятельно выполнять научные исследования в области сварки, родственных процессов и технологий, используя соответствующий физико-математический аппарат, вычислительные методы и компьютерные технологии, с целью установления математических моделей	умение самостоятельно выполнять научные исследования в области сварки, родственных процессов и технологий, используя соответствующий физико-математический аппарат с целью установления математических моделей	способностью самостоятельно выполнять научные исследования в области сварки, родственных процессов и технологий, используя соответствующий физико-математический аппарат с целью установления математических моделей
Способность овладевать современными методами и средствами проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций, планировать проведение и интерпретировать экспериментальные данные по изучению физико-механических свойств сварных соединений; обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов	знает (пороговый уровень)	методики средства проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций, планирование и проведение экспериментальных исследований по изучению свойств сварных соединений	знание современных методов и средств проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций	способностью овладевать современными методами и средствами проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций
	умеет (продвинутый)	овладевать современными методами и средствами проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций, в том числе объектов, испытывающих фазовые и структурные превращения при внешних воздействиях; планировать проведение и интерпретировать экспериментальные данные по изучению физико-механических свойств сварных соединений; обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов	умение овладевать современными методами и средствами проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций, в том числе объектов, испытывающих фазовые и структурные превращения при внешних воздействиях;	способностью овладевать современными методами и средствами проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций, в том числе объектов, испытывающих фазовые и структурные превращения при внешних воздействиях
	владеет (высокий)	способностью овладевать современными методами и	владение способностью	способностью овладевать современными

	<p>средствами проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций, в том числе объектов, испытывающих фазовые и структурные превращения при внешних воздействиях; планировать проведение и интерпретировать экспериментальные данные по изучению физико-механических свойств сварных соединений; обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов</p>	<p>овладевать современными методами и средствами проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций, планировать проведение и интерпретировать экспериментальные данные по изучению физико-механических свойств сварных соединений; обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов</p>	<p>методами и средствами проведения экспериментальных исследований по исследованию процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов деталей и сварных конструкций, планировать проведение и интерпретировать экспериментальные данные по изучению физико-механических свойств сварных соединений; обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов</p>
--	--	--	--

## **1. Методические рекомендации, определяющие процедуры оценивания результатов освоения дисциплины**

**Промежуточная аттестация аспирантов.** Промежуточная аттестация аспирантов по дисциплине проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной.

**Текущая аттестация аспирантов.** Текущая аттестация аспирантов по дисциплине проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной.

Текущая аттестация по дисциплине «Современные методы определения эксплуатационных свойств материалов и покрытий» проводится в форме контрольных мероприятий по оцениванию фактических результатов обучения аспирантов и осуществляется ведущим преподавателем.

Объектами оценивания выступают:



– учебная дисциплина (активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость всех видов занятий по аттестуемой дисциплине);

– степень усвоения теоретических знаний;

– уровень овладения практическими умениями и навыками по всем видам учебной работы;

– результаты самостоятельной работы.

### **Вопросы по разделам дисциплины (текущая аттестация аспирантов)**

#### **Раздел 1. Поверхностный слой деталей**

1. Схема поверхностного слоя.
2. Взаимосвязь поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами деталей.
3. Классификация параметров поверхностного слоя.
4. Роль покрытий в повышении надежности деталей и конструкций.
5. Волнистость поверхности.
6. Шероховатость поверхности.
7. Методы и средства измерения волнистости поверхности.
8. Влияние волнистости на параметры поверхностного слоя и эксплуатационные свойства.
9. Параметры шероховатости.
10. Методы и средства измерения шероховатости поверхности.
11. Параметры физико-химического состояния поверхностного слоя.
12. Методы исследования структурно-фазового состояния поверхностного слоя.
13. Методы исследования химического состава поверхностного слоя.
14. Макронапряжения.
15. Микронапряжения.
16. Методы определения остаточных напряжений.

## Раздел 2. Влияние параметров поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей

17. Влияние шероховатости поверхности на сопротивление усталости.
18. Влияние физико-химического состояния поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей.
19. Влияние фазового и химического состава поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей.
20. Влияние остаточных макронапряжения на эксплуатационные свойства деталей.
21. Основные трибологические характеристики.
22. Влияние структуры на износостойкость материалов.
23. Влияние механических свойств поверхностного слоя на износостойкость.
24. Методы исследования трибологических характеристик материалов.
25. Виды коррозии.
26. Методы защиты металлов от коррозии.
27. Методы исследования коррозионной стойкости.
28. Влияние химического состава поверхностного слоя на коррозионную стойкость.
29. Влияние структурно-фазового состава поверхностного слоя на коррозионную стойкость.
30. Методика определения твердости металлов методом Роквелла.
31. Методика определения твердости металлов методом Бринелля.
32. Методика определения твердости металлов методом Виккерса.
33. Методика определения микротвердости поверхностного слоя металлов и покрытий.
34. Методика определения механических свойств поверхностного слоя металлов и покрытий методом наноиндентирования.
35. Методика определения триботехнических характеристик покрытия.

36. Методика определения параметров шероховатости и топографии поверхности покрытий.

37. Методика определения предела выносливости сварных соединений.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДВФУ)

---

**ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ШКОЛА)**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
по дисциплине «Современные методы определения эксплуатационных  
свойств материалов и покрытий»

**2.5.8 Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)**

**Форма подготовки очная**

**Владивосток**  
**2022**

## Практическое занятие №1 «Определение параметров структуры поверхности»

**Цель работы** — ознакомление с теоретическими основами, оборудованием и приобретение практических навыков в определении параметров структуры поверхности деталей, а также в проведении анализа шероховатости поверхности стальных образцов, выполненный при двух- и трехмерных измерениях.

### 1. Основные положения теории и определения

Оценка параметров структуры и топографии поверхностного слоя деталей и износостойких покрытий позволяет в большинстве случаев характеризовать их качество и триботехнические свойства [12]. Надежность узлов трения машин, механизмов и оборудования существенно зависит от качества поверхностей сопряженных деталей. Как известно из практики, трение и износ деталей в значительной степени обусловлены микрогеометрией их поверхностей, в этой связи оценка микрогеометрии и анализ влияния этого фактора на функциональные свойства изделий представляются особо важными [13, 14].

Анализ профиля поверхности и оценку его параметров в России выполняют, главным образом, осуществляя двухмерные измерения в соответствии с ГОСТ Р ИСО 4287-2014 «Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности».

#### Основные термины и определения шероховатости

##### Общие термины

**Шероховатость поверхности** – совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная с помощью базовой длины.

**Базовая длина  $\ell_r$**  – длина в направлении оси X, используемая для определения неоднородностей, характеризующих оцениваемый профиль.

**Профиль поверхности** – профиль (линия), который образуется в результате пересечения реальной поверхности с плоскостью, перпендикулярной этой поверхности.

**Средняя линия профиля** – базовая линия профиля, проведенная таким образом, что в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля от этой линии минимально.

#### Определения параметров поверхности профиля

**Максимальная высота пика профиля  $R_p$**  – расстояние между линией наибольшего выступа профиля  $Z_p$  и средней линией профиля в пределах базовой длины (рис.1.1).

**Наибольшая глубина впадины профиля  $R_v$**  – расстояние между линией наибольшей впадины профиля  $Z_v$  и средней линией профиля в пределах базовой длины (рис.1.1).

**Максимальная высота профиля  $R_z$**  — сумма наибольшей высоты пика профиля  $R_p$  и наибольшей глубины впадины профиля  $R_v$  в пределах базовой длины.

**Среднее арифметическое отклонение оцениваемого профиля  $R_a$**  — арифметическое среднее абсолютных значений ординаты  $Z(x)$  в пределах базовой длины.

$$Ra = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |Z(x)| dx.$$

Среднеквадратичное отклонение оцениваемого профиля  $Rq$  — среднеквадратичное значение ординаты  $Z(x)$  в пределах базовой длины.

$$Pq, Rq, Wq = \sqrt{\frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} Z^2(x) dx}$$

Средняя ширина элементов профиля  $RSm$  (рис.1).

$$PSm, RSm, WSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{Si}$$



Рис. 1.1. Основные параметры поверхности профиля

В настоящее время известно более 30 различных микрогеометрических параметров, количественно оценивающих топографию поверхности. Ряд из них, например  $Ra$ , общепринят и входит в большинство международных и национальных стандартов. Важность параметров, которые дают представление о форме неровностей профиля хорошо демонстрируется рисунком 1.2, на котором приведено два профиля поверхностей, имеющих различную форму микронеровностей, но равные высотные параметры. Соответственно данные поверхности будут иметь существенно отличающиеся эксплуатационные свойства.

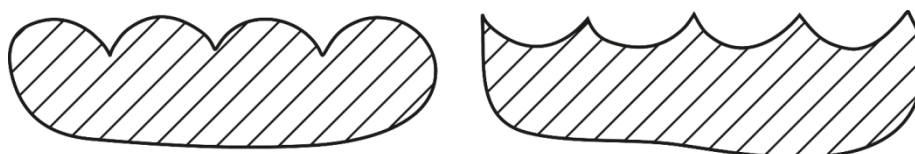


Рис. 1.2. Профили поверхностей, имеющие различную форму микронеровностей, но равные высотные параметры:  $a$  – впадины микрорельефа с малым радиусом закруглений дна;  $b$  – впадины с закругленной формой дна

Следует отметить, что геометрические свойства поверхности деталей как после механической обработки, так и в процессе трения анизотропны (рис. 1.3 и 1.4). Кроме того, поскольку топология поверхности трехмерна, любая двумерная оценка дает неполное ее описание, поэтому в последнее время в инженерной практике для оценки эксплуатационных свойств деталей машин все шире используется трехмерный анализ шероховатости поверхности. Трехмерное профилометрирование позволяет более точно оценить реальные характеристики поверхности (рис. 1.4): однозначно дифференцировать впадины, образованные единичными лунками или бороздками (в двумерных измерениях их идентифицировать не удастся); определить значения экстремальных характеристик шероховатости, поскольку при традиционном способе их измерения профиль проходит по склонам вершин и впадин, а не пересекается с ними, что искажает опорную кривую поверхности; повысить информативность результатов в связи с увеличением определяемых независимых параметров; визуализировать поверхность при помощи компьютера, т.е. детально представить ее топографию; получить ряд новых параметров, таких как материальный объем или площадь контакта.

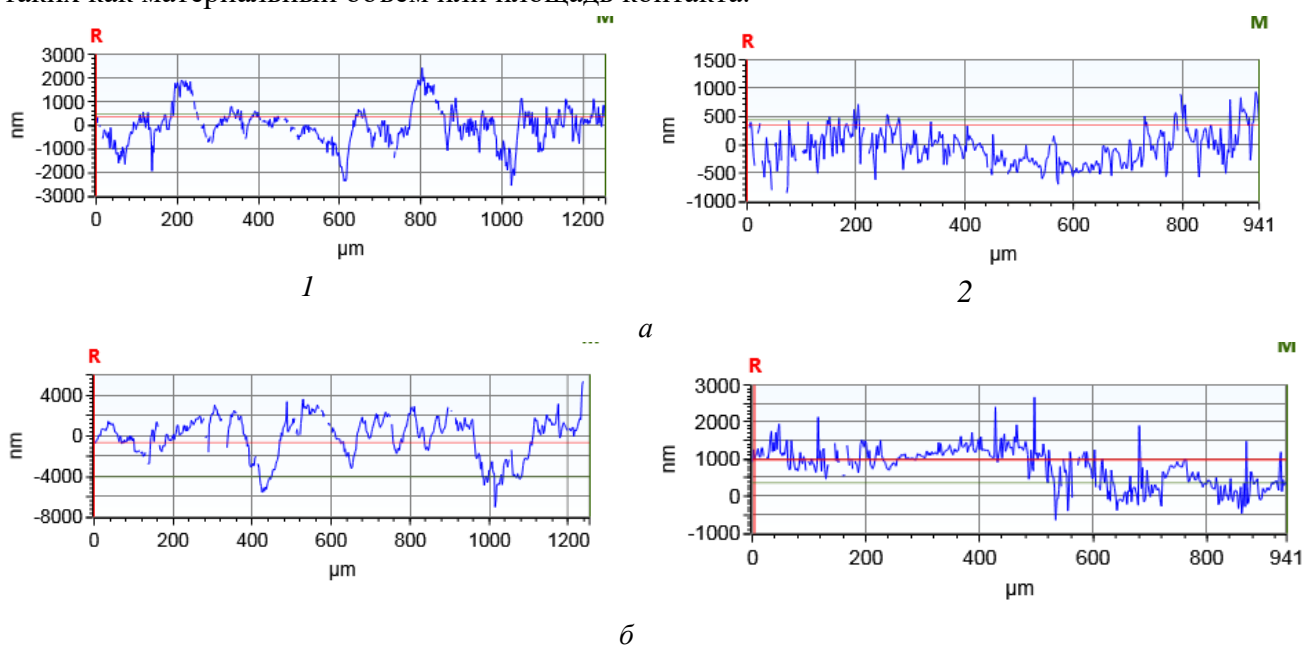
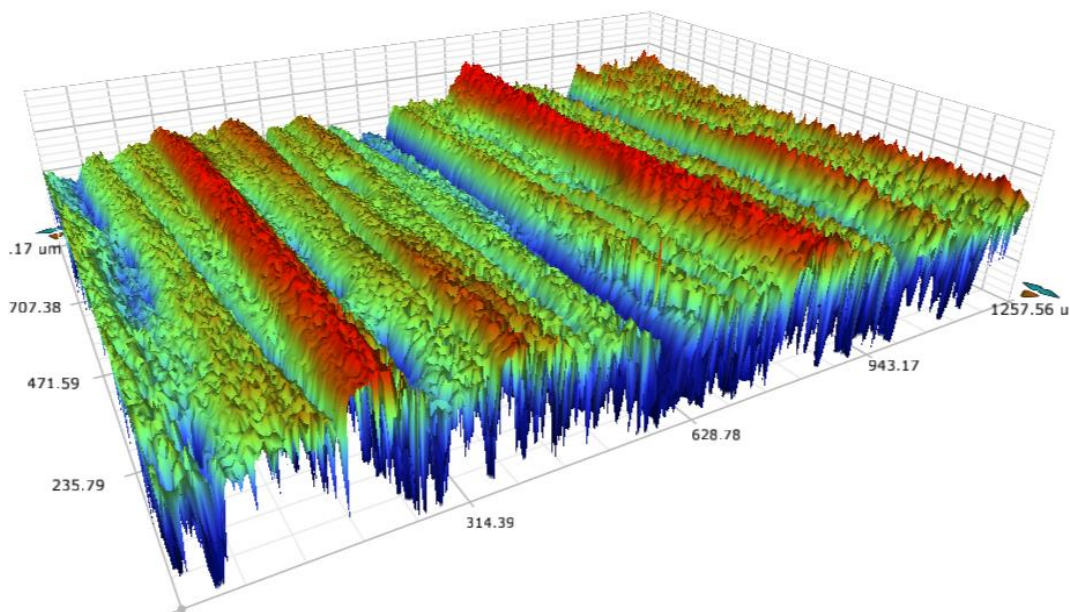


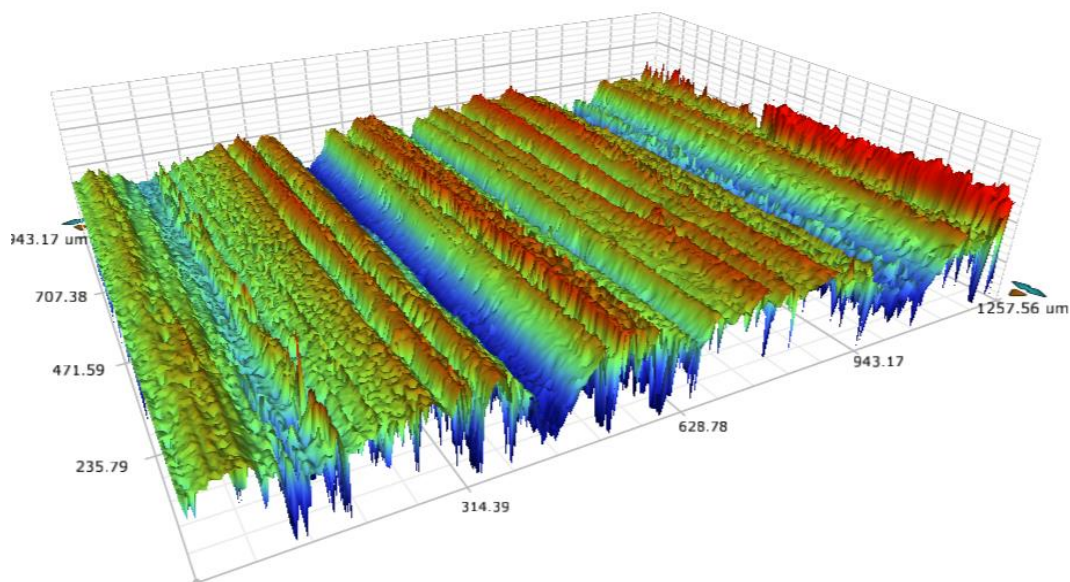
Рис. 1.3. Профилограммы микронеровностей поверхностей стали 40Х:  
 после шлифования (а); после трибоиспытаний (б);  
 1 – перпендикулярно направлению вращения образца,  
 2 – по направлению вращения образца

Существует несколько мировых стандартов, которые регламентируют методы оценивания микрогеометрии поверхностного слоя, однако полным является стандарт ISO 25178, на основе которого выделяются 5 групп параметров:

- высотные параметры (height parameters), определяемые на основе статистического распределения значений по высоте;
- пространственные параметры (spatial parameters), содержащие данные о пространственной периодичности (текстуре), в частности о ее направлении;



*a*



*б*

Рис. 1.4. Топография поверхности стали 40X:  
после шлифования (*a*); после трибоиспытаний (*б*)

– гибридные параметры (hybrid parameters), относящиеся к пространственной форме (гибридными параметрами именуется параметры, основанные на амплитудной и пространственной информации. С их помощью численно определяются гибридные топографические свойства (наклон поверхности, кривизна выбросов и пограничные (интерфейсные) зоны). На гибридное свойство могут оказывать влияние любые изменения амплитуды или интервала. Применение этих параметров особенно целесообразно при изучении параметров структуры поверхности при трении и износе;

– функциональные параметры (functional parameters), рассчитываемые на основе соотношений количества материала к заданным высотам профиля;



– параметры сегментации (segmentation parameters), получаемые путем сегментации поверхности по впадинам и вершинам.

Параметры для оценки структуры поверхностей, полученные при трехмерных измерениях, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 25178-2–2014 (ISO 25178-2:2012), обозначаются буквами  $S$  (от англ. *surface* – поверхность) и  $V$  (объемные).

### **Термины геометрических признаков**

**Пик** (peak) – точка на поверхности, которая выше всех остальных точек поблизости от данной точки.

**Горб** (hill) – область вокруг пика, в которой все варианты траектории максимального подъема заканчиваются на пике.

**Провал** (pit) – точка на поверхности, которая располагается ниже всех остальных точек поблизости от данной точки.

**Желоб** (dale) – область вокруг провала, в которой все варианты траектории максимального спуска заканчиваются в провале.

**Топографическая характеристика** (topographic feature) – характеристика ареала, линии или точки на поверхности ограниченного масштаба.

### **Определения параметров поля**

В терминологических записях, представленных ниже, за каждым термином следует его параметр (сокращенный термин), а затем его символ. И хотя сокращенные термины могут содержать множество букв, символы включают только одну букву с индексом (при необходимости). Символы используются в уравнениях, представленных в настоящем документе. Причина такого разделения состоит в том, чтобы избежать неправильной интерпретации составных букв как знака умножения между количественными параметрами в уравнениях. Параметры (сокращенные термины) используются в документации изделия, рисунках и листах технических данных.

### **Параметры высоты**

**Арифметическое среднее значение высоты поверхности ограниченного масштаба**  $S_a$ . Арифметическое среднее абсолютного значения ординаты в области определения ( $A$ )

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy$$

$S_a$  характеризуется средним арифметическим значением высоты в пределах выборочного участка (зоны) поверхности. Параметр  $S_a$  наиболее близок к параметру  $R_a$ , однако они фундаментально различны и при их сравнении следует быть очень внимательным. Ареальные (или  $S$ ) параметры используют ареальные фильтры, в то время как профильные (или  $R$ ) параметры – профильные фильтры;

**Среднеквадратичное значение высоты поверхности ограниченного масштаба**  $S_q$ . Среднеквадратичное значение ординаты в области определения ( $A$ ) определяется по формуле (аналог  $R_q$ )

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x,y) dx dy}$$

**Асимметрия поверхности ограниченного масштаба  $S_{sk}$ :** отношение среднего ординаты в третьей степени и куба  $S_q$  в области определения ( $A$ )

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[ \frac{1}{A} \iint_A z^3(x,y) dx dy \right]$$

**Экссесс поверхности ограниченного масштаба  $S_{ku}$ :** отношение среднего значения ординаты в четвертой степени и  $S_q$  в четвертой степени в области определения ( $A$ )

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[ \frac{1}{A} \iint_A z^4(x,y) dx dy \right]$$

**Максимальная высота пика поверхности ограниченного масштаба  $S_p$ :** наибольшее значение высоты пика в области определения (аналог  $R_{max}$ );

**Максимальная глубина провала поверхности ограниченного масштаба  $S_v$ :** отрицательное значение наибольшей глубины провала в области определения;

**Максимальная высота поверхности ограниченного масштаба  $S_z$  (аналог  $R_z$ ):** сумма максимальной высоты пика и максимальной высоты провала в области определения.

### Пространственные параметры

**Длина автокорреляции  $S_{al}$ :** определяется как расстояние, на котором происходит ее наиболее быстрое уменьшение до указанного значения  $S$ ,  $0 \leq S < 1$ . У анизотропной поверхности  $S_{al}$  вычисляется в направлении, перпендикулярном направлению обработки изделия. Большое значение  $S_{al}$  указывает на то, что на поверхности преобладают компоненты с низкими пространственными частотами, в то время как малое значение  $S_{al}$  свидетельствует о противоположном случае. Параметр  $S_{al}$  является количественной мерой расстояния вдоль поверхности, на котором расположена текстура, статистически отличная от той, где расположено начало отсчета этой длины.

**Соотношение геометрических размеров структуры поверхности  $S_{tr}$ .** Используется при идентификации прочности поверхности, т.е. однородности ее формы. Значение  $S_{tr}$  находится в пределах от 0 до 1. Большие значения ( $S_{tr} > 0,5$ ) свидетельствуют об однородности поверхности во всех направлениях, т.е. отсутствует заметное направление обработки изделия. Меньшие значения (например,  $S_{tr} < 0,3$ ) указывают на чрезмерно сильную направленную структуру или направление обработки [21]. Параметр  $S_{tr}$  полезен при определении наличия следов обработки или износа в любом из направлений.

### Гибридные параметры

**Среднеквадратичный градиент поверхности ограниченного масштаба  $S_{dq}$**  характеризует наклоны поверхности, может быть использован при определении различий между поверхностями с идентичными параметрами  $S_a$ ;

**Развернутое соотношение пограничной площади поверхности ограниченного масштаба  $S_{dr}$ .** Этот параметр позволяет различать поверхности с одинаковыми амплитудой и усредненной шероховатостью. Обычно  $S_{dr}$  будет увеличиваться по мере

усложнения пространственной структуры текстуры поверхности независимо от  $Sa$ . Параметр полезен при оценке покрытий поверхности и ее адгезионных свойств, а также в случаях применения смазки.

### **Функциональные параметры**

**Объем материала  $V_m$**  – определяется на единицу площади при заданном коэффициенте смятия.

**Объем пустот  $V_v$**  – определяется на единицу площади при заданном коэффициенте смятия.

Указанные параметры крайне важны при описании поверхностей трения. Однако некоторые поверхности не могут быть полностью описаны с помощью перечисленных параметров. Например, в работе [22] указывается, что отдельные параметры шероховатости, например, отвечающие за объем материала в разных зонах, взаимосвязаны с трибологическими эксплуатационными характеристиками поверхности подшипника.

## **2. Назначение, технические характеристики и компоненты оптического профилометра Contour GT-I 3D**

**Назначение: оптический профилометр Contour GT-I 3D Optical Microscope** фирмы Bruker (рис. 1.5) предназначен для восприятия и воспроизведения рельефа поверхности и обеспечивает быстрое, точное, высококачественное 3х-мерное компьютерное отображение тестируемых объектов. Прибор позволяет измерять топографию поверхности с высоким разрешением в диапазоне от долей нм до  $\approx 10$  мм. Метод вертикальной сканирующей интерферометрии используется для измерения профиля шероховатых поверхностей, в том числе тогда, когда разница высот соседних пикселей изображения превышает 135 нм. Разрешающая способность по оси  $Z$  при этом составляет несколько нанометров. В основе метода лежит вертикальное перемещение объектива встроенным приводом с одновременной периодической регистрацией изображения камерой. Когда каждая точка поверхности оказывается в фокусе, модуляция интерференции в ней достигает максимума, после чего спадает по мере ухода объектива из зоны фокуса. Высота каждой точки поверхности определяется системой по положению объектива в области максимальной модуляции. Максимальный размер скана в режиме VSI составляет 10 мм в направлении оси  $Z$ .

### **Технические характеристики оборудования:**

1. Методы измерения: вертикальная сканирующая интерферометрия (в белом свете); фазовая интерферометрия.
2. Возможность субнанометрового вертикального разрешения от не более 0,1 нм до не менее 10 мм.
3. Возможность линейаризации перемещений во всем диапазоне измерений.
4. Установка оснащена двух-светодиодным источником света (белый и зеленый светодиоды).
5. Наличие видеокamеры с матрицей формата 640x480 и скоростью регистрации не менее 60 кадров в секунду.
6. Наличие измерительной головки с возможностью наклона.

7. Диапазон перемещений по XY осуществляется с помощью программного обеспечения (ПО) и с помощью джойстика и составляет не менее 150 мм.
  8. Возможность разрешения по вертикали ( $Ra$ ) не менее  $0,8 \text{ \AA}$  (фазовая интерферометрия).
  9. Возможность обеспечивать повторяемость RMS не менее  $0,1 \text{ \AA}$ .
  10. Возможность интерферометрии образцов высотой не более 100 мм.
  11. Поле зрения установки в диапазоне от 0,05 до 8 мм, включая краевые значения.
  12. Возможность расширения поля зрения за счёт склейки отдельных кадров в автоматическом режиме с помощью ПО.
  13. Установка имеет диапазон измерений по вертикали не менее 10 мм.
  14. Возможность интерферометрии образцов, коэффициент отражения которых составляет от не более 1 до не менее 100 %, включая краевые значения.
- Система ContourGT обладает возможностью автоматического выбора оптики. Измерительные объективы имеют увеличения от 2,5x до 115x и закрепляются на турели, либо на однообъективном адаптере.
15. Наличие линз для расширения поля зрения с увеличением в диапазоне от не более 0,55X до не менее 2X, включая краевые значения.
  16. Система сбора и обработки результатов измерений:



Рис. 1.5. Оптический профилометр Contour GT-I 3D

#### **Компоненты системы**

Профилометры ContourGT-K состоят из нескольких основных компонентов. Основная часть системы, оптический измерительный модуль (ОИМ), находится под защитным кожухом. Измеряемый образец помещается на столик. На всех профилометрах серии используется ручное управление наклоном столика по двум осям (система tip/tilt).

Рукоятка ручной фокусировки, используется для фокусировки в системе ContourGT-K0 без моторизованного столика.

Многофункциональная панель аварийного выключения (далее панель управления), входит в комплект профилометра ContourGT. На ней расположены кнопка аварийного

выключения, кнопки включения и выключения, а также джойстик и ручка для управления моторизованным столиком в направлении оси Z.

Блок питания преобразует напряжение сети переменного тока в постоянное напряжение, необходимое для работы прибора. Клавиша выключателя сети на блоке питания является основным выключателем питания электронной части прибора.

### **3. Методика определения параметров структуры поверхности**

#### **Основные режимы работы**

Оптический измерительный модуль ContourGT-K ОММ поддерживает две методики измерений: вертикальную сканирующую интерферометрию (VSI) и интерферометрию фазового сдвига (PSI).

#### **Метод вертикальной сканирующей интерферометрии (VSI)**

В методе вертикальной сканирующей интерферометрии используется источник света с широким спектром (белый). Данный метод лучше всего подходит для измерения профиля шероховатых поверхностей, в том числе тогда, когда разница высот соседних пикселей изображения превышает 135 нм. Разрешающая способность по оси Z при этом составляет несколько нанометров. В основе метода лежит вертикальное перемещение объектива встроенным приводом с одновременной периодической регистрацией изображения камерой. Когда каждая точка поверхности оказывается в фокусе, модуляция интерференции в ней достигает максимума, после чего спадает по мере ухода объектива из зоны фокуса. Высота каждой точки поверхности определяется системой по положению объектива в области максимальной модуляции. Максимальный размер скана в режиме VSI составляет 10 мм в направлении оси Z.

#### **Принцип измерений**

Оптический измерительный модуль включает в себя камеру, светодиоды зеленого и/или белого свечения, блок сканирования и измерительный объектив. В объективе свет расщепляется на опорный и измерительный лучи: опорный луч отражается от сверхплоского зеркала, смонтированного внутри объектива, а измерительный отражается от исследуемой поверхности. В результате возникает интерференция, сигнал которой используется для вычисления высот поверхности. Опорное зеркало расположено внутри объектива в фокальной плоскости (то есть, на том же оптическом расстоянии от светоделителя, что и образец). В такой схеме комбинация двух лучей создает интерференционную картину, представляющую собой чередование темных и светлых полос. Количество таких полос и расстояние между ними зависит от формы образца и угла наклона исследуемой поверхности относительно опорного зеркала. Если образец имеет высокую плоскостность, то интерференционные полосы будут прямыми. По мере уменьшения наклона образца относительно опорного зеркала, количество полос будет уменьшаться и, в итоге, при условии параллельности поверхностей, полосы практически исчезнут.

#### **Программное обеспечение для работы с системой ContourGT-K**

ПО Vision64 является высококлассным метрологическим приложением под управлением ОС «Windows 7 64 bit». Благодаря использованию новейших разработок в вычислительных технологиях, Vision64 обладает мощнейшими возможностями и, вместе с

тем, простотой использования. Эргономичный дизайн пользовательского интерфейса делает использование данного приложения интуитивно понятным и эффективным. В сочетании с высококлассным профилометрическим оборудованием фирмы Брукер, ПО Vision64 предоставляет непревзойденные возможности для измерений и характеристики топографии поверхности.

Программное обеспечение Vision64 управляет настройками оборудования, анализирует данные и обеспечивает графическое представление результатов. Оно предоставляет возможности полной настройки представления данных и позволяет сохранять результаты анализа в базу данных. Настройки измерений и анализа сохраняются в конфигурационных файлах для дальнейшего использования. Для запуска приложения используется ярлык, находящийся на панели задач, как показано на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Панель задач Windows с кнопкой «Пуск» и закрепленным ярлыком запуска ПО Vision64

### **Порядок выполнения измерений на приборе**

1. Перед использованием оборудования ContourGT-K необходимо овладеть следующими навыками:

- а) включение и выключение системы, а также запуск и завершение приложения Vision64;
- б) позиционирование образца для измерения;
- в) выведение интересующей области поверхности в поле зрения камеры;
- г). подстройка фокуса таким образом, чтобы на поверхности образца стали видны интерференционные полосы;
- д) подстройка угла наклона между поверхностью образца и опорным зеркалом для уверенного наблюдения полос;
- е) выбор параметров измерения и проведение измерения.

2. Включение прибора и запуск приложения Vision64:

1. Включите питание прибора.
  1. Проверьте правильность подключения и отсутствие видимых повреждений всех кабелей.
  2. Убедитесь, что выключатель питания на передней панели корпуса ПК индицирует состояние «Вкл».
  3. Убедитесь, что выключатель на блоке питания находится в положении «Вкл».
  4. Убедитесь, что кнопка аварийного отключения не нажата, и зеленая кнопка «Сеть» на многофункциональной панели светится.
5. Попробуйте еще раз полностью выключить и включить систему.

## Завершение работы приложения и выключение системы

Для выключения системы:

1. Завершите работу приложения **Vision64**, выбрав пункт **Exit Vision** в меню, доступном по нажатию на кнопку меню в левом верхнем углу окна. Эта кнопка вызывает традиционное меню **File**.
2. Завершите работу системы Windows.
3. Выключите питание профилометра (выключателем на многофункциональной панели и/или на блоке питания).

## Работа с вкладкой Live Video (видео в реальном времени)

Прежде чем начать измерение, необходимо правильно расположить образец и настроить систему:

1. Переместите образец, чтобы интересующий вас участок поверхности попал в поле зрения камеры.
2. Настройте уровень освещения.
3. Подстройте фокус таким образом, чтобы на поверхности образца стала видна картина интерференционных полос.
4. Подстройте наклон образца относительно опорного зеркала для того, чтобы полосы продолжали быть видимыми.

Большинство из этих действий производятся путем наблюдения видео и изменения настроек во вкладке **Live Video** (чтобы активировать ее на главной панели, надо щелкнуть вкладку **Live Video** в области **вкладок представления**). Во вкладке отображается видеоизображение области измерения, а также находятся элементы управления столиком и осветителем. На рис. 1.7 показан типичный вид этого окна.

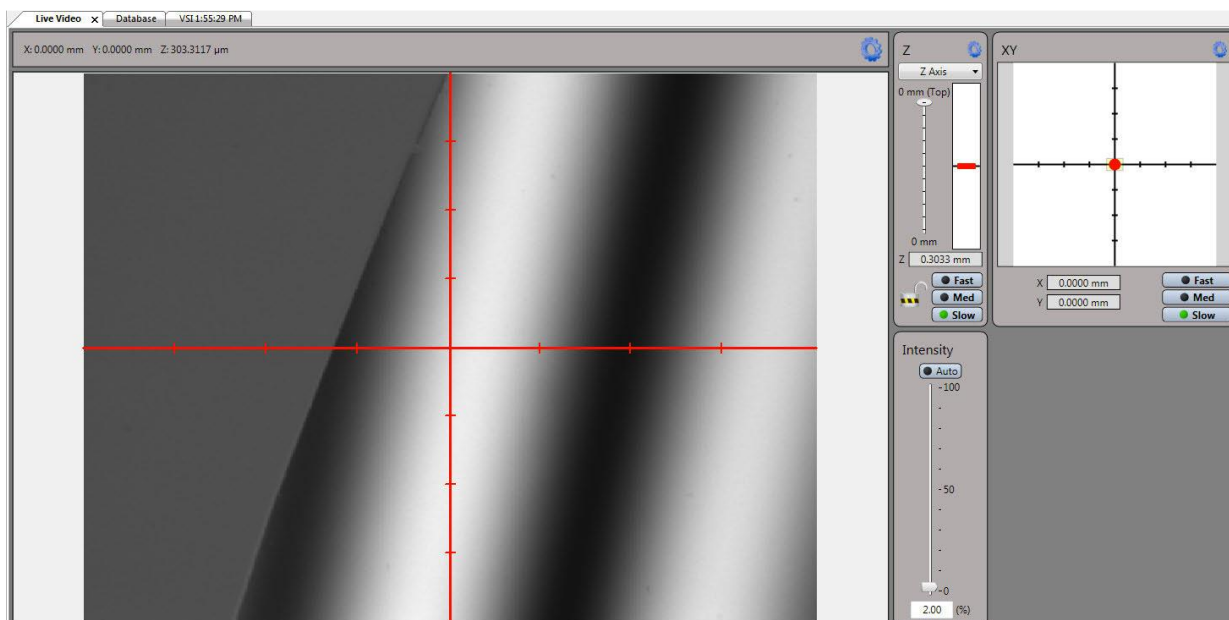


Рис. 1.7. Активное окно вкладки LiveVideo в Главной панели представления

## Слежение за образцом

В левой части вкладки **Live Video** постоянно отображается наблюдаемый камерой участок образца. По изображению всегда можно судить о положении образца и условиях

освещения. Следует иметь в виду, что оптические профилометры серии ContourGT-K оснащены черно-белой видеокамерой, поэтому изображение всегда отображается в оттенках серого. В случае работы с моторизованным столиками текущие координаты столика показываются в левом верхнем углу изображения.

### **Органы управления**

Элементы управления движением по оси Z, освещенностью, наклоном и перемещением X-Y столика расположены в правой части вкладки **Live Video**. Если какая-либо функция недоступна, соответствующий элемент управления не отображается. В следующих подразделах о каждом из этих элементов будет рассказано подробнее.

### **Управление осветителем**

Интенсивность освещения в приборе ContourGT-K регулируется с помощью элемента управления (ползунок) **Intensity** (интенсивность), расположенного во вкладке **Live Video**.

Регулировать величину интенсивности можно следующим образом:

- Двигая мышкой ползунок вверх и вниз.
- Нажав кнопку **Auto** над ползунком.

Наилучший вариант настройки освещения — немного не ниже уровня насыщения. Пример оптимального освещения. При избытке интенсивности некоторые области изображения насыщаются и отображаются красным цветом. Слишком тусклое, как и слишком яркое освещение, могут привести к проблемам во время измерения.

Если нажата кнопка **Auto**, то уровень освещенности автоматически настраивается немного ниже насыщения и поддерживается на оптимальном уровне даже во время подстройки фокуса и/или движения образца. Когда авторежим активен, индикатор на кнопке **Auto** подсвечивается.

### **Фокусировка**

**Использование Z-перемещения.** Можно проводить измерения на образцах разного размера путем корректировки положения по оси Z вверх и вниз. В случае ручного столика высоту можно изменять с помощью ручки фокусировки с правой стороны станины прибора; вращение ручки по часовой стрелке поднимает оптический измерительный модуль, против часовой — опускает. На моторизованном столике фокусировка по Z-оси производится либо вращением колеса на многофункциональной, либо с помощью программы Vision64. Чтобы найти на поверхности образца интерференционные полосы, необходимо подстроить положение по оси Z так, чтобы поверхность оказалась в фокусе.

На системах с моторизованным столиком возможно задействовать режим быстрой фокусировки, когда нажата кнопка **Fast** рядом с колесом оси Z. Из программы фокусировка осуществляется перемещением красного ползунка вверх или вниз. При этом доступны три скорости фокусировки. Нажмите одну из кнопок **Fast**, **Med** или **Slow**, чтобы задать скорость движения по оси Z перед изменением фокуса.

**Использование сканера.** Фокусировку также можно производить путем изменения позиции сканера. На системах с ручной Z-осью программный элемент управления осью Z по умолчанию управляет положением сканера. В таких системах контроль фокуса из программы точнее, чем с помощью ручки фокусировки. В приборах с



моторизованным столиком можно переключиться на управление сканером, щелкнув мышью на стрелке правее **Z-Axis** и выбрав вариант **Scanner** в выпадающем списке.

**Процедура безопасной фокусировки.** При выполнении правил, описанных ниже, объектив будет перемещаться вверх, удаляясь от образца, в то время, как вы следите за интерференционными полосами на изображении. Таким образом исключается столкновение объектива с поверхностью образца. Для того, чтобы сфокусироваться на образце:

1. Выберите вкладку **Live Video** и нажмите кнопку **Auto** на панели **Intensity**.
2. Внимательно наблюдая за объективом сбоку, настраивайте фокус, опуская оптический измерительный модуль так, чтобы нижний край объектива оказался на расстоянии нескольких миллиметров от поверхности образца. Таблица 2.1 поможет вам заранее выставить это расстояние согласно рабочему расстоянию выбранного объектива.
3. Подстраивайте фокус, медленно поднимая оптический измерительный модуль. По мере его поднятия наблюдайте за изображением, чтобы поймать моменты:
  - а) улучшения резкости изображения деталей поверхности.
  - б) минимума величины интенсивности.
4. Когда возникает любое из условий, перечисленных выше, вы находитесь очень близко к оптимальной фокусировке. Продолжайте медленно настраивать фокус, тщательно наблюдая за появлением полос. Имейте в виду, что при сильно наклоненном образце интерференционные полосы могут быть видны в очень узкой области.
5. Продолжайте поднимать оптический измерительный модуль до тех пор, пока в поле зрения не появятся интерференционные полосы. Увеличение яркости изображения свидетельствует о том, что вы прошли область фокуса, поэтому необходимо снова опустить оптический измерительный модуль.

#### **Перемещение образца в горизонтальной плоскости**

Приборы серии оснащены столиком, диапазон перемещения которого по осям X и Y составляет величину 150 мм.

В случае ручного столика точное перемещение осуществляется с помощью вращения ручек микрометрической оси, грубое — соответствующими стопорными зажимами. Сжатие зажима разблокирует столик относительно микрометрической оси и позволяет быстро установить нужное положение столика.

Моторизованный столик можно двигать с помощью джойстика или программно.

Если имеется джойстик, то управлять столиком можно вне зависимости от того, запущено ли приложение **Vision64** или нет. Кроме того, при нажатии кнопки **FAST** на джойстике включается режим быстрого движения столика

В программе **Vision64** управлять столиком можно тремя способами:

1. Смещением красной точки из центра сетки в желаемую сторону движения столика. Имейте в виду, что чем дальше вы сместите точку, тем быстрее будет двигаться столик. Кроме того, можно задать номинальную скорость, нажав на кнопки **Fast**, **Med** или **Slow** перед началом движения.
2. При двойном щелчке мыши в любом месте XY-панели столик переместится в выбранные координаты.

3. Двойным щелчком мыши в любом месте на видеоизображении поверхности образца вы переместите этот участок в центр перекрестия.

### Выравнивание образца

Профилометры серии ContourGT-K оснащены столиком, угол наклона которого вручную регулируется в пределах  $\pm 6^\circ$  по двум осям. Наклон изменяется с помощью двух регулировочных ручек спереди и слева на станине. Вращением этих ручек осуществляется тонкая подстройка угла наклона столика для достижения оптимального размера и положения интерференционных полос в зависимости от характера поверхности образца и типа измерения. Часто под этим подразумевается настройка наклона таким образом, чтобы в случае VSI-измерения наблюдалось от 0 до 15 полос, а для PSI-измерения — менее 5 полос.

## 4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с методическими указаниями.
2. Получить образцы для определения значений параметров шероховатостей и структуры поверхности.
3. Выбрать базовую длину в зависимости от величины параметров микронеровностей, которая согласно ГОСТ 2789-73 должна примерно соответствовать рекомендациям табл. 1.1. При этом необходимо иметь в виду, что с увеличением величины базовой длины возрастает точность определения параметров шероховатости, но возрастает влияние волнистости поверхности на результаты измерений.

Таблица 1.1

Значения базовой длины в зависимости от параметров  $Ra$

$Ra$ , мкм	Базовая длина, мм
0,025–0,100	0,08
0,02–0,032	0,25
0,32–2,50	0,8

4. Произвести замеры и записать значения параметров шероховатости поверхности образцов в 2D формате в соответствующие ячейки таблицы 1.2.

5. Произвести замеры и записать значения параметров структуры поверхности образцов в 3D формате в таблицу 1.3.

Таблица 1.2

Параметры шероховатости образцов из стали 40X по ГОСТ Р ИСО 4287-2014

Зона измерения	Параметры шероховатости, мкм					
	$Ra$	$Rq$	$Rz$	$Rv$	$Rp$	$Rsm$
Образец №1						
Образец №2						
Образец №3						

Примечание. \* – В числителе записать величины параметров перпендикулярно направлению вращения образца при механической обработке или трибоиспытаниях, в знаменателе — по направлению вращения образца.

Таблица 1.3

Параметры структуры поверхности образцов из стали 40Х ГОСТ Р ИСО 25178-2–2014

Параметры структуры	Величина параметра		
	Образец №1	Образец №2	Образец №3
$Sa$ , мкм			
$Sq$ , мкм			
$Ssk$			
$Sku$			
$Sp$ , мкм			
$Sv$ , мкм			
$Sz$ , мкм			
$Sal$ , мкм			
$Str$			
$Sdq$ , град			
$Sdr$ , %			
$Vm, \frac{нм^3}{нм^2}$			
$Vv, \frac{нм^3}{нм^2}$			

## 5. Содержание отчета

1. Основные теоретические положения и определения.
2. Результаты замеров параметров шероховатости образцов из стали 40Х после шлифования и триботехнических испытаний в 2D и 3D форматах.
3. Анализ высотных параметров шероховатости образцов полученных в 2D формате, полученных перпендикулярно направлению вращения образца и по направлению вращения образца.
4. Результаты замеров параметров структуры поверхности образцов из стали 40Х после шлифования и триботехнических испытаний.
5. Анализ параметров структуры поверхности образцов из стали 40Х после шлифования и триботехнических испытаний.
6. Выводы по работе.

## 6. Контрольные вопросы

1. Что называется шероховатостью поверхности?
2. Как определяется шероховатость поверхности?
3. Что такое профиль поверхности?

4. Дайте определение базовой длины.
5. Назовите группы параметров микрогеометрии поверхностного слоя при трехмерном профилометровании.
6. Назовите высотные параметры микрогеометрии поверхностного слоя при трехмерном профилометровании.
7. Назовите пространственные параметры микрогеометрии поверхностного слоя при трехмерном профилометровании.
8. Назовите гибридные параметры микрогеометрии поверхностного слоя при трехмерном профилометровании.
9. Назовите функциональные параметры микрогеометрии поверхностного слоя при трехмерном профилометровании.
10. Объясните, почему параметры при трехмерном профилометровании предпочтительны при оценке качества микрогеометрии поверхностного слоя.
11. Объясните, почему величины параметров при двух- и трехмерном профилометровании микрогеометрии поверхностного слоя существенно отличаются.
12. Назовите основные технические характеристики оптического профилометра Contour GT-I 3D.

## **Практическое занятие №2 «Определение механических свойств тонкопленочных антифрикционных покрытий»**

*Цель работы* — ознакомление с теоретическими основами, оборудованием и приобретение практических навыков в определении механических свойств тонкопленочных покрытий деталей.

### **1. Основные положения теории и определения**

В зоне трибоконтакта происходит выделение тепла, возникают поля не только напряжений и деформаций, но и тепловые, электрические и т.д.; изменяются структура сплавов (количество и расположение дефектов, их эволюция) и их физико-механические свойства.

Трибомодифицирование поверхностных слоев органонеорганическими триботехническими материалами на основе природных или искусственных слоистых силикатов позволяет сформировать на поверхности трения тонкопленочное покрытие, исследования которого необходимо проводить в объемах нанометрового масштаба. Процессы, которые происходят при этом в тонких поверхностных слоях, определяют служебные свойства изделия, его долговечность, износостойкость, коэффициент трения, химическую активность поверхности, ее способность эмитировать электроны и другие частицы, а также многое другое. До последнего времени эти процессы изучались главным образом феноменологически на микроуровне путем усреднения характеристик по всей поверхности контакта.

В настоящее время стандартами Евросоюза предусмотрено кинетическое индентирование для определения твердости, при этом придерживаются следующих уровней определения твердости:

макроуровень	микроуровень	наноуровень
$2\text{Н} < F < 30\ 000\ \text{Н}$	$F < 2\text{Н}; h > 200\ \text{нм}$	$h < 200\ \text{нм}$

где  $F$  нагрузка;  $h$  – глубина индентирования.

Механическое и механохимическое взаимодействия твердых тел в процессе их контактирования происходят первоначально на небольшом количестве точек, воспринимающих всю нагрузку (рис. 2.1). При этом в областях с субмикронными характерными размерами развиваются напряжения, близкие к теоретическому пределу прочности (порядка нескольких процентов от модуля Юнга), и относительные деформации  $\varepsilon$  в десятки процентов. (Напомним, что интенсивность деформации определяется безразмерной величиной  $\varepsilon = \Delta L/L$ , где  $\Delta L$  – изменение исходного размера  $L$ .) Причем подобные напряжения возникают даже в таких хрупких и не деформируемых пластически (в обычных условиях) материалах, как карбиды или бориды тугоплавких металлов.

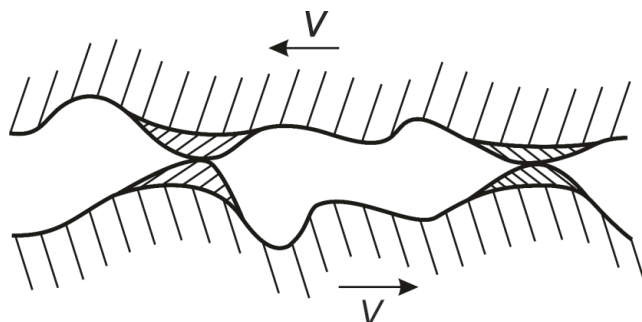


Рис. 2.1. Схема контактирования твердых тел при трении скольжения

Анализ зарождения и развития повреждения поверхности трения с позиций структурной механики разрушения составляет суть нового подхода к пониманию микромеханизмов изнашивания. Основная научная идея — установление взаимосвязи твердости, модуля упругости и структуры материала с износостойкостью.

При исследовании твердости различных материалов предполагалось, что ее величина  $H$  должна быть определенным образом связана с пределом текучести  $\sigma_T$  при одноосном растяжении/сжатии макрообразцов. Так, было установлено, что для большинства металлов и сплавов  $H = A\sigma_T$ , где  $A \sim 3$ . Поскольку величина  $\sigma_T$  в металлах определяется главным образом процессами размножения специфических квазиодномерных дефектов кристаллической структуры – дислокаций, твердость также стали связывать с поведением дислокационных ансамблей. Впоследствии эти представления были молчаливо распространены (заметим, без достаточных на то оснований) и на другие материалы и ситуации. Учитывая широкий спектр современных материалов, исследуемых в настоящее время методами наноиндентирования, случаи, когда  $A = \text{const} \sim 3$ , следует считать скорее исключением, чем правилом.

Для определения механических свойств покрытий с целью изучения их влияния на триботехнические свойства практически единственным универсальным инструментом

является наноиндентирование. Установлена связь физико-химических свойств твердых тел и покрытий с наноструктурой.

Для исследования механических свойств покрытий на наноуровне использовали ультрамикротестер для динамических испытаний твердости материалов DUH-211S фирмы Shimadzu (Япония). Прибор предназначен для измерения твердости  $H$ , модуля упругости  $E$  и упругого восстановления  $W_e$  по методу наноиндентирования. Испытания соответствуют стандарту ISO 14577-4. В процессе измерений снимается кривая нагружение–разгрузка (рис. 6), которая в дальнейшем обрабатывается по методу Оливера-Фарра. Ультрамикротестер позволяет производить измерения твердости при заданной глубине отпечатка, при этом нагрузка на инденторе в зависимости от твердости материала будет различная. Прибор DUH-211S позволяет определять максимальную глубину отпечатка при максимальной нагрузке, которая является суммой нескольких слагаемых – глубины остаточного отпечатка после снятия нагрузки и величина упругого восстановления или глубины остаточного отпечатка при максимальной нагрузке на индентор и величины упругого прогиба поверхности образца (рис. 2.2).

При наноиндентировании характерно наличие небольшой пластической деформации при значительной упругой (рис. 2.3). При этом твердость часто достигает теоретического предела прочности поверхностного слоя на сдвиг или близка к нему. Причем эта область соответствует глубине проникновения индентора от долей нанометра до десятков, а в некоторых случаях — и сотен нанометров.

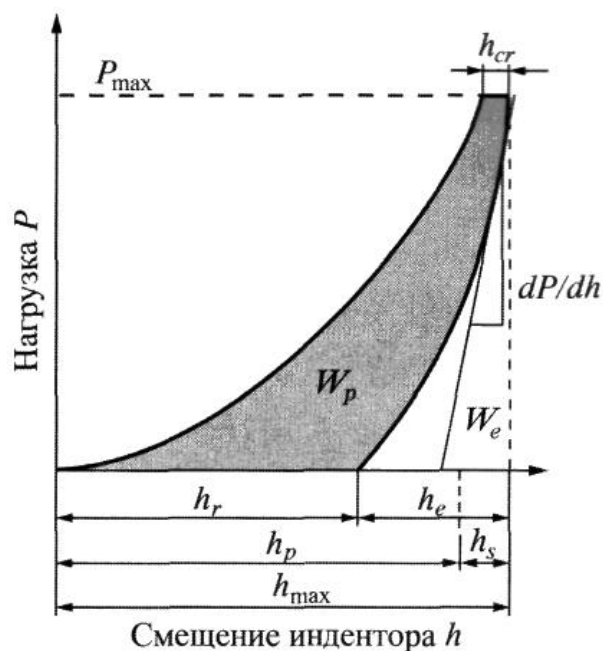


Рис. 2.2. Диаграмма нагрузка – глубина отпечатка, полученная методом нормального наноиндентирования:

$h_r$  – глубина остаточного отпечатка после снятия нагрузки;  $h_e$  – величина упругого восстановления;  $h_p$  – глубина остаточного отпечатка при максимальной нагрузке на индентор;  $h_s$  – упругий прогиб поверхности образца;  $h_{max}$  – максимальная глубина отпечатка при максимальной нагрузке  $P_{max}$ ;  $h_{cr}$  – ползучесть при  $P = const$ ;  $W_p$  – работа пластической деформации при формировании отпечатка;  $W_e$  – работа упругой деформации;  $dP/dh = S$  – жесткость в контакте «индентор – образец»

Известно, что нанотвердость зависит от величины нагрузки на инденторе при глубине отпечатка менее 100 нм (рис. 2.4). При этом более высокие значения нанотвердости соответствуют малым нагрузкам, а с увеличением нагрузки на индентор величина нанотвердости монотонно уменьшается и при глубине отпечатка свыше 100 нм стабилизируется. Так как толщина композиционного покрытия при модифицировании стали минеральными и органоминеральными материалами составляет около 3 мкм, оптимальная глубина отпечатка для получения объективной информации о механических свойствах покрытия должна быть примерно 100 нм.

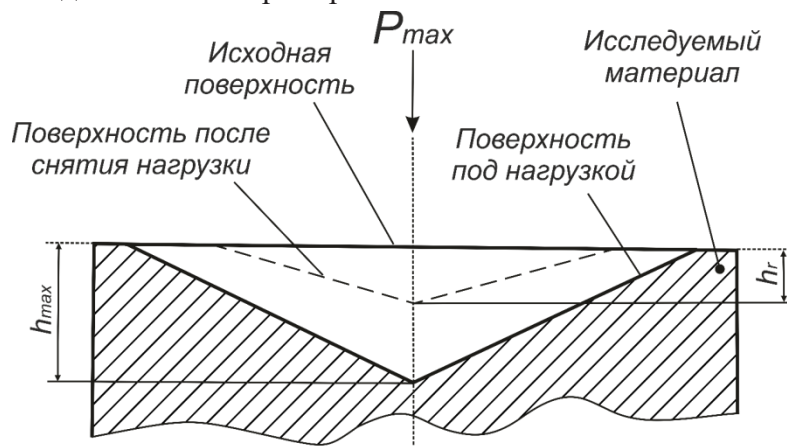


Рис. 2.3. Схема измерения нанотвердости пирамидой Берковича:

$P_{\max}$  – максимальная нагрузка на индентор;  $h_{\max}$  – максимальная глубина отпечатка при максимальной нагрузке  $P_{\max}$ ;  $h_r$  – глубина остаточного отпечатка после снятия нагрузки

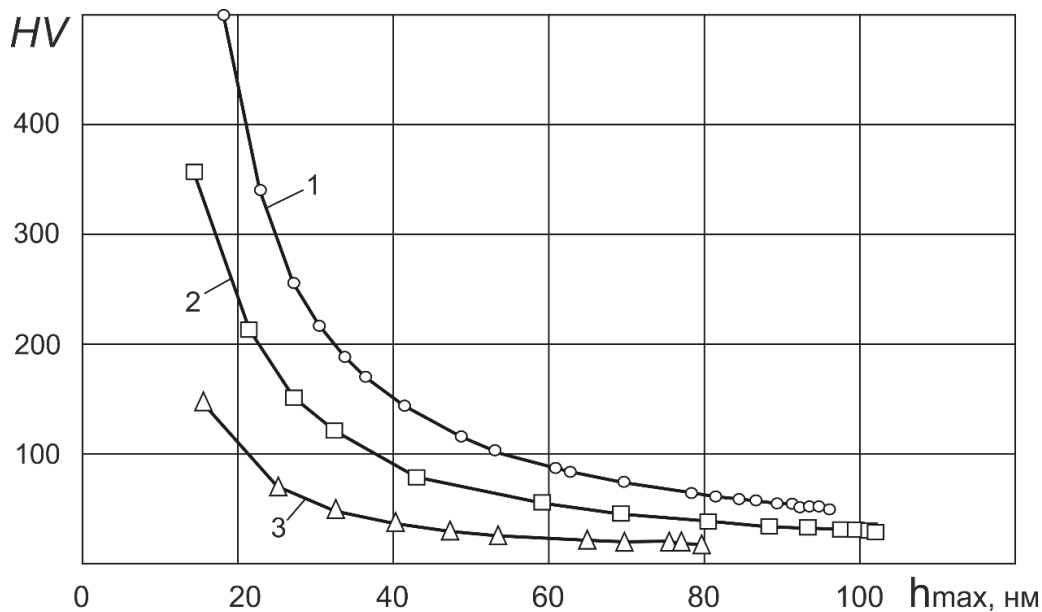


Рис. 2.4 Зависимость нанотвердости от материала и глубины внедрения индентора:  
1 – TiSiN; 2 – Si; 3 – Cu

Суть метода наноиндентирования состоит в аппроксимации начального участка разгрузочной кривой степенной функцией

$$P_{\max} = B(h_{\max} - h_r)^m,$$

где  $P_{\max}$  – максимальная нагрузка;  $h_{\max}$  – максимальная глубина проникновения индентора;  $h_r$  – глубина остаточного отпечатка после снятия нагрузки,  $B$  и  $m$  – эмпирически определяемые параметры (материальные константы).

Наклон начального этапа разгрузочной кривой определяет жесткость материала:

$$S = dP/dh = mB(h_{\max} - h_r)^{m-1}.$$

Динамическая твердость рассчитывается по формуле

$$H = aF/h_r^2, \quad (2.1)$$

где  $a$  – константа, которая зависит от формы индентора, для треугольного индентора с углом при вершине  $115^\circ$  (индентор Берковича)  $a = 3,8584$ .

Твердость рассчитывается по формуле

$$H = P_{\max} / A, \quad (2.2)$$

где  $A$  – площадь проекции отпечатка, определяемая из глубины максимального проникновения индентора  $h_{\max}$ .

Модуль упругости  $E$  покрытия определяется из выражения

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu_s^2)}{E} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i}, \quad (2.3)$$

где  $E_r = \frac{S\sqrt{\pi}}{2\beta\sqrt{A}}$ ;  $\beta = 1,034$  – поправочный коэффициент Кинга для индентора

Берковича;  $\nu_s$  – коэффициент Пуассона покрытия;  $\nu_i$  – коэффициент Пуассона индентора. Для алмазного индентора коэффициент Пуассона равен 0,07 и модуль упругости  $E_i$  соответственно 1141 ГПа.

Величину упругого восстановления покрытий определяют по формуле:

$$W_e = \frac{(h_{\max} - h_r)}{h_{\max}}. \quad (2.4)$$

Для оценки стойкости материалов к упругой деформации разрушения можно использовать величину отношения твердости к модулю упругости,  $H/E$ , называемую также индексом пластичности материала, а для оценки сопротивления материала пластической деформации – параметр  $H^3/E^2$ .

Для анализа свойств покрытия определяют отношение  $P$  к  $S^2$ , которое не зависит от глубины отпечатка и контактной площади и хорошо коррелирует с некоторыми трибологическими характеристиками [9].

## 2. Назначение и технические характеристики

Ультрамикротестер DUH-211S (рис. 2.5) разработан компанией SHIMADZU для использования во всех отраслях промышленности и предназначен для определения твердости поверхности материалов и готовых изделий и тонких пленок (специально обработанные поверхности, например нитридный слой), позволяет производить измерения твердости при заданной глубине отпечатка, при этом нагрузка на инденторе в зависимости от твердости материала будет различная. Определение твердости и параметров материала осуществляется в соответствии с принятыми стандартами (ISO 14577-1:2015, ISO 14577-4:2016).





Рис. 2.5. Ультрамикротестер DUN-211S

### Технические характеристики

- Высокоточное определение модуля упругости.
- Контроль силы, прикладываемой в процессе испытания с разрешением 0.196 мкН.
- Широкий диапазон нагрузок от 0.1 до 1961 мН.
- Высокоточное измерение глубины следа.
- Возможность выбора инденторов (наконечников), в том числе и для проведения испытаний по Виккерсу и Кнупу (опция).

Принципиальная схема ультрамикротестера для динамических испытаний твердости материалов основана на прецизионном локальном силовом воздействии на исследуемую поверхность (рис. 2.6).

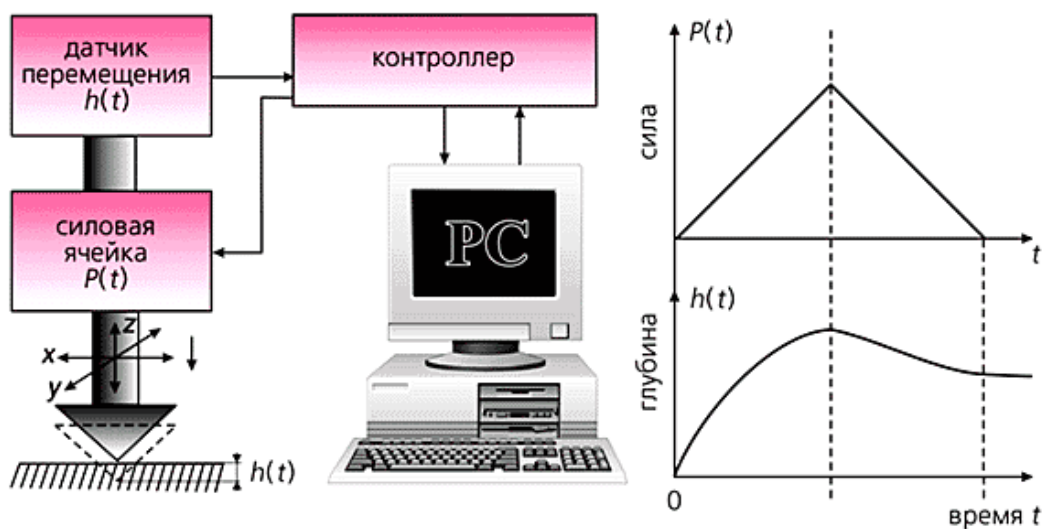


Рис. 2.6. Принципиальная схема нанотестирования поверхности (слева) и временные зависимости усилия  $P$  и глубины погружения  $h$  при внедрении индентора по нормали к поверхности (справа).

### 3. Порядок выполнения работы

Для определения изменения механических свойств по глубине исходных образцов (после шлифования), а также после трибомодифицирования и трибоиспытаний исследования проводятся на трех уровнях нагрузки: 1 – 19,61 мН; 2 – 196,1 мН и 1961 мН. Скорость нагружения зависит от нагрузки и соответственно составляет: 1 – 1,46 мН/с; 2 – 13,3 мН/с; 3 – 70,1 мН/с. Время выдержки под нагрузкой составляет 5 с.

#### 3.1. Включение питания

- 1) Убедитесь, что X-Y-платформа установлена прямо под оптической системой (под линзами объектива).
- 2) Подключите силовой кабель.
- 3) Включите главный выключатель на панели блока управления измерителя.
- 4) Включается индикатор «POWER - ON» питания лампы на блоке управления.
- 5) Включите ПК, монитор и принтер.
- 6) После запуска Windows, дважды кликните на иконке [DUN]. Запустится меню программного обеспечения.

#### 3.2. Настройка освещения

- 1) Для запуска тестовой программы нажмите кнопку <TEST>.
- 2) Чтобы включить осветительную лампу, нажмите на корпусе осветительной головки выключатель чтения длины диагонали. Проверьте включение лампы.
- 3) Установите на платформу образец с чистой поверхностью. С помощью ручки «Z», смотря в окуляр, настройте фокус изображения.
- 4) С помощью лимба яркости, расположенного на передней панели, настройте яркость изображения до необходимого уровня.

#### 3.3. Установка образца

В стандартную приставку для установки закрепляется образец высотой 8 мм и шириной 30 мм.

Чтобы зафиксировать образец между базой образца и ободом супрессии и избежать снижения базы в приставке образца используется кольцо В. Для освобождения образца кольца А и В вращаются вправо и база образца опускается. Обод супрессии накладывается путем вращения ручки вправо. После установки образца между базой и ободом, образец фиксируется (зажимается) между базой и ободом путем вращения кольца А влево. Для закрепления зажима, кольцо В поворачивается вправо. После испытания, для извлечения образца, обод супрессии ослабляется путем вращения ручки влево.

#### 3.4. Линзы объектива

При виде спереди, слева находится линза объектива с увеличением  $\times 40$ , а справа - линза  $\times 100$ . Переключение между линзами осуществляется с помощью револьверной рукоятки. Положение рукоятки фиксируется после щелчка. Каждая линза устанавливается с пружиной. Поэтому, если образец касается линзы, то она утапливается, но при сильном вдавливании линзу можно повредить. Поэтому при установке и снятии линз обращайтесь на этот факт особое внимание.

### 3.5. Оптическая головка

Оптическая головка состоит из окуляра и ручек указателя. С помощью правой ручки устанавливается положение правого указателя в поле зрения микроскопа, а с помощью левой ручки — меняется положение обеих указателей (рис. 2.7).

- 1) Метод измерения: Прямое определение с помощью кодера.
- 2) Диапазон перемещения указателей: от 0 до 250 мкм.
- 3) Величина эффективного определения: 200 мкм.
- 4) Минимально различимое значение: 0,01 мкм.
- 5) Двусторонняя одновременная система коллимации.

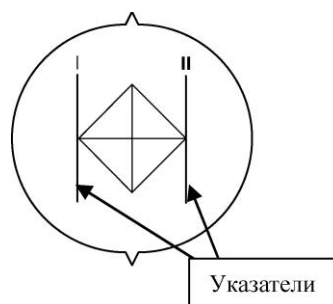


Рис. 2.7 Оптическая головка

### 3.6. Индентор (Треугольная пирамида 115°)

В данный твердомер устанавливаются треугольные пирамидальные инденторы (с углом при вершине 115° или 100°), инденторы Виккерса и Кнупа. В стандартной конфигурации прибор имеет треугольный пирамидальный индентор (с углом при вершине 115°). Форма индентора представлена на рис. 2.8.

Все инденторы имеют практически одинаковый вес и длину и легко меняются один на другой. После смены проводится тонкая настройка детекции глубины отпечатка.

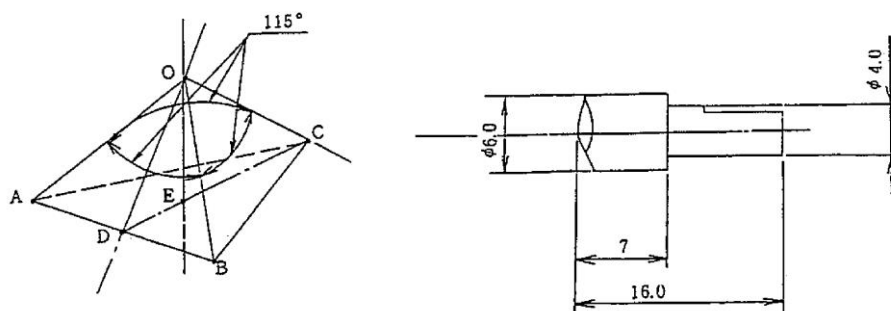


Рис. 2.8 Треугольный пирамидальный индентор с углом при вершине в 115°.

### 3.7. Метод «нагрузка / разгрузка»

В данной методике нагрузка увеличивается до ранее установленной величины и выдерживается установленное время. Затем производится разгрузка. Пример результатов испытаний приведен на рис. 2.9.

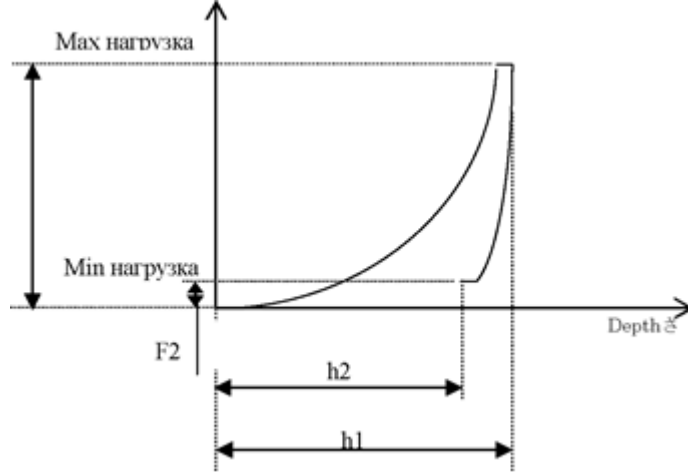


Рисунок 2.9. –Пример результатов испытаний

### 3.8. Измерение размеров отпечатка

Для определения твёрдости по треугольной пирамиде используется индентор в виде треугольной пирамиды, который оставляет на поверхности треугольный отпечаток (рис. 2.10). Твёрдость определяется по одной из формул (2.5 или 2.6), которые учитывают силу нагрузки по образцу и площадь отпечатка, определяемую глубиной отпечатка.

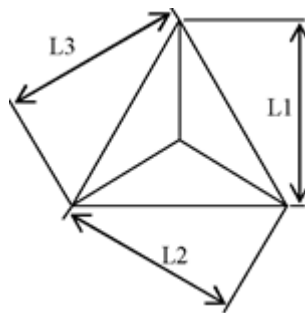


Рис. 2.10. Схема измерения отпечатка индентора

$$HT115 = 160,07 \times F_N / L^2 \quad (2.5)$$

$$HT115 = 1569,7 \times F_G / L^2 \quad \dots \quad (2.6)$$

где  $L$  – средняя длина стороны отпечатка, определяемая по формуле  $L = 1/3 (L1+L2+L3)$  мкм;  $F_N$  – нагрузка, мН;  $F_G$  – нагрузка, gf.

### 3.9. Сохранение данных

Выберите функцию **[File] - [ASCII file output]**.

На рисунке 2.11 представлено окно сохранения данных в формате **ASCII**.

В данном окне выберите файл данных, который нужно сохранить в новом формате. Выберите папку и введите название файла, нажмите ОК. Выбранные данные будут сохранены в новом формате (**CSV format**). При выборе функции **[All files]**, будут сохранены все файлы, выбранные в строке **[Output data]**.

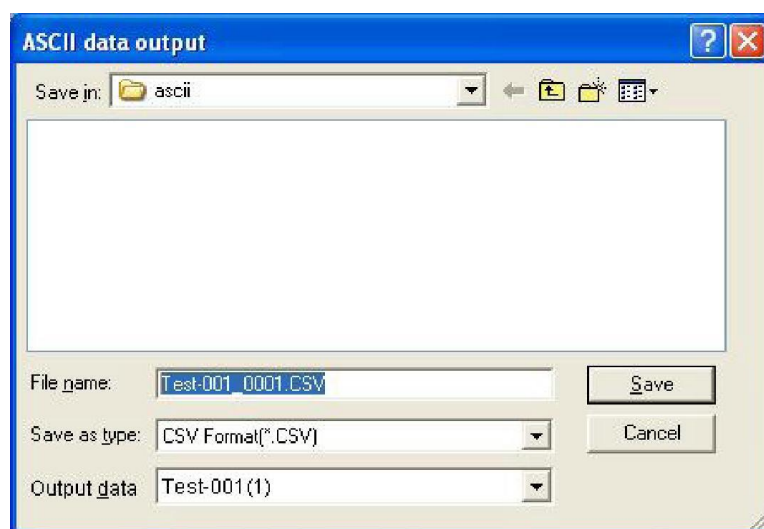


Рис. 2.11. Окно сохранения данных в формате ASCII

Полученные результаты исследования механических свойств покрытий занести в табл. 2.1

Таблица 2.1

Результаты исследования механических свойств поверхностного слоя стали и покрытий методом наноиндентирования

Вид обработки, исследуемый материал	Наименование параметра				
	Максимальная нагрузка $P_{max}$ , мН	Максимальная глубина отпечатка $h_{max}$ , мкм	Глубина остаточного отпечатка после снятия нагрузки $h_r$ , мкм	Модуль упругости и покрытия $E \times 10^5$ , Н/мм <sup>2</sup>	Динамическая твердость, HV
Шлифование Сталь 40X					
Триботехнические испытания, Сталь 40X					
Металлокерамическое покрытие					

#### 4. Содержание отчета

1. Параметры режима испытания механических свойств.
2. Диаграмма нагружения образца.
3. Результаты испытаний в табличной форме с указанием: максимальной нагрузки на индентор, глубины проникновения индентора, размеров отпечатка индентора, нанотвердости, модуля упругости.
4. Анализ параметров механических свойств поверхности образцов из стали 40X после шлифования, триботехнических испытаний и металлокерамического покрытия.

5. Выводы по работе.

## 5. Контрольные вопросы

1. Назовите уровни определения твердости.
2. Назовите форму индентора пирамиды Берковича.
3. Какие механические свойства позволяет определять ультрамикротестер DUN-211S?
4. Почему максимальная глубина отпечатка при максимальной нагрузке больше глубина остаточного отпечатка после снятия нагрузки?
5. Назовите, при какой величине глубины отпечатка нанотвердость стабилизируется.
6. При наноиндентировании величина какой деформации больше?
7. Назовите от каких параметров зависит глубина отпечатка после снятия нагрузки на индентор.

## Практическое занятие №3 «Определение силы трения и коэффициента трения скольжения»

**Цель работы** — ознакомление с оборудованием, применяемым для исследования процессов трения и изнашивания, и приобретение практических навыков в определении коэффициента и силы трения скольжения.

### 1. Термины и определения

#### Виды и характеристики внешнего трения

*Трение (внешнее)* – явление сопротивления относительно перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним.

*Трение движения* – трение двух тел, находящихся в движении друг относительно друга.

*Трение без смазочного материала* – трение двух тел при отсутствии на поверхности трения введенного смазочного материала любого вида.

*Трение со смазочным материалом* – трение двух тел при наличии на поверхности трения введенного смазочного материала любого вида.

*Трение скольжения* – трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по значению и (или) направлению.

*Сила трения* – сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленная к общей границе между этими телами.

*Коэффициент трения* – отношение силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу.

*Скорость скольжения* – разность скоростей тел в точках касания при скольжении.

*Поверхность трения* – поверхность тела, участвующая в трении.

### **Виды смазки**

*Жидкостная смазка* – смазка, при которой полное разделение поверхностей трения деталей осуществляется жидким смазочным материалом.

*Гидродинамическая смазка* – жидкостная смазка, при которой полное разделение поверхностей трения осуществляется в результате давления, самовозникающего в слое жидкости при относительном движении поверхностей

*Граничная смазка* – смазка, при которой трение и износ между поверхностями, находящимися в относительном движении, определяются свойствами поверхностей и свойствами смазочного материала, отличными от объемной вязкости.

*Полужидкостная (смешанная) смазка* – смазка, при которой осуществляется частично гидродинамическая, частично граничная смазки.

## **2. Основные положения теории**

При трении без смазочного материала контактируют несмазанные поверхности, покрытые окисными пленками и тончайшими слоями молекул газов и воды, адсорбированными из окружающей среды.

В зависимости от толщины смазочной прослойки различают 4 вида смазки: граничная, гидродинамическая, жидкостная и полужидкостная (смешанная). В условиях трения при граничной смазке помимо перечисленных пленок, присутствуют молекулы смазочных материалов в виде тонкого слоя толщиной в несколько молекул, которые прочно связаны с поверхностью.

Процессы трения без смазочного материала и при граничной смазке сходны по своей природе и имеют общие закономерности. Причиной служит то обстоятельство, что при граничной смазке мономолекулярные слои смазки прочно связаны с твердой поверхностью, обладают твердообразными свойствами и как бы служат продолжением твердой фазы. Поэтому, как и при трении без смазочного материала, фактически имеет место контакт двух твердых поверхностей. Отличие проявляется в разных значениях коэффициента трения. Если при трении без смазочного материала он обычно больше 0,2, то при граничной смазке его величина находится в интервале 0,05–0,2.

Количественной мерой процесса внешнего трения служит сила трения. Поверхности реальных деталей машин не абсолютно гладкие, а имеют микронеровности. Поэтому при трении поверхности контактируют друг с другом лишь на отдельных элементарных площадках (пятнах) касания, совокупность которых определяет фактическую площадь  $A_r$  контакта, причем  $A_r \ll A_n$ , где  $A_n$  – номинальная (общая) площадь, контактирующей поверхности. Малая величина  $A_r$  обуславливает то, что даже при невысоких нагрузках на пятна фактического касания возникают большие давления. При этом материал на площадках касания испытывает упругие и (или) пластические деформации, происходит взаимное внедрение выступов соприкасающихся поверхностей и из-за тесного сближения поверхностей между ними возникает *адгезия* (прилипание) –

явление возникновения молекулярной связи между поверхностными слоями соприкасающихся разнородных тел.

Согласно молекулярно-механической теории и трения твердых тел сила трения скольжения определяется двумя составляющими:

$$T = T_a + T_d,$$

где  $T$  – сила трения скольжения;  $T_a$  – адгезионная (молекулярная) составляющая силы трения;  $T_d$  – деформационная (механическая) составляющая силы трения.

Соответственно коэффициент трения можно представить в виде суммы адгезионной и деформационной составляющих.

Появление силы  $T_a$  обусловлено возникновением адгезии между контактирующими поверхностями. При относительном скольжении двух тел происходит разрушение (срез) возникших между поверхностями молекулярных или атомных связей, что требует затрат энергии.

Возникновение составляющей  $T_d$  определяется сопротивлением деформированию поверхностного слоя. Микровыступы более твердой из взаимодействующих поверхностей внедряются в деформируемое контртело. В процессе движения эти микровыступы пропахивают канавки в мягкой сопряженной поверхности, отесняя материал в сторону и в направлении движения.

Соотношение адгезионной и механической составляющих силы трения зависит от вида трущихся материалов, нагрузки, вида контактирования. Для металлических поверхностей при упругом контакте отношение  $T_a/T_d$  достигает 100, при пластическом  $T_a/T_d \approx 0,5-2,0$ . Для полимеров  $T_a/T_d \approx 5-30$  (для фторопласта  $T_a/T_d \approx 0,2-1,0$ ), для резин  $T_a/T_d \approx 2-3$ .

В соответствии с биноминальным законом молекулярного трения

$$\tau = \tau_o + \beta p_r, \quad (1)$$

где  $\tau$  сопротивление сдвигу, обусловленное слипанием поверхностей, приходящееся на единицу фактической площади контакта;  $p_r$  – давление на фактической площади тел;  $\beta$  – пьезокоэффициент;  $\tau_o$  – постоянная.

Разделив (1) на  $p_r$ , получим следующее выражение адгезионной составляющей коэффициента трения:

$$f_a = \frac{\tau_o}{p_r} + \beta, \quad (2)$$

где  $f$  – коэффициент трения, равный  $\tau/p_r$ .

Очевидно, что

$$p_r = F_N/A_r, \quad (3)$$

где  $F_N$  – нагрузка на пару трения,  $A_r$  – фактическая площадь контакта; при этом при упругом контакте

$$A_r = C F_N^m, \quad (4)$$

где  $C$  – постоянная,  $m = 0,8-0,9$ .



При трении металлов в условиях упругого контакта  $T_a \gg T_\delta$ , другими словами, коэффициент трения определяется, главным образом, адгезионной составляющей:  $f \approx f_n$ . Тогда, последовательно подставляя выражения (3) и (4) в (2), запишем выражение для коэффициента трения в условиях упругого контактирования трущихся металлов:

$$f \approx \frac{C \tau_o}{F_N^{1-m}} + \beta. \quad (5)$$

Так как величины  $C$ ,  $\tau_o$  и  $\beta$  являются постоянными для конкретных условий трения, а показатель степени  $(1 - m)$  мал и лежит в диапазоне 0,1–0,2, то коэффициент трения должен испытывать незначительное снижение с ростом нагрузки (рис. 3.1). Таким образом, убывающий характер зависимости  $f(F_N)$  при трении металлических материалов, как это показано на рис. 3.1, позволяет в первом приближении говорить о преобладании адгезионной составляющей трения и, как следствие, об упругом характере деформирования поверхностей при трении.

Определение коэффициента трения для конкретного узла трения представляет собой задачу большой практической значимости. В справочниках имеется мало надёжных данных по коэффициентам трения. Коэффициент трения очень чувствителен к условиям трения и зависит для одного и того же сочетания материалов трущихся поверхностей от нагрузки, шероховатостей поверхностей, скорости скольжения, температуры, смазки и т. д. Поэтому пользоваться справочными данными по коэффициентам трения следует с осторожностью. Как правило, в инженерной практике для оценки значений  $f$  прибегают к помощи эксперимента.

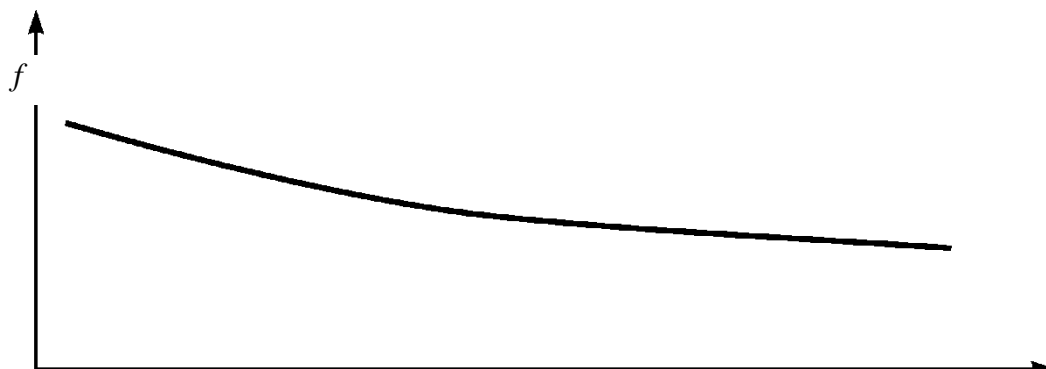


Рис. 3.1. Зависимость коэффициента трения от нагрузки для металлических материалов в случае преобладания адгезионной составляющей трения

Сущность всех известных экспериментальных методов определения коэффициента трения одинакова. Сначала определяется сила или момент трения, а затем находится коэффициент трения. При равномерном плоскопараллельном движении (рис. 3.2, а):

$$f = \frac{T}{F_N},$$

при равномерном вращательном движении (рис. 3.2, б):

$$f = \frac{T}{F_N} = \frac{M_T}{F_N R}, \quad (6)$$

где сила трения  $T = \frac{M_T}{R}$ , причем,  $M_T$  – момент трения, а  $R$  – радиус образца.

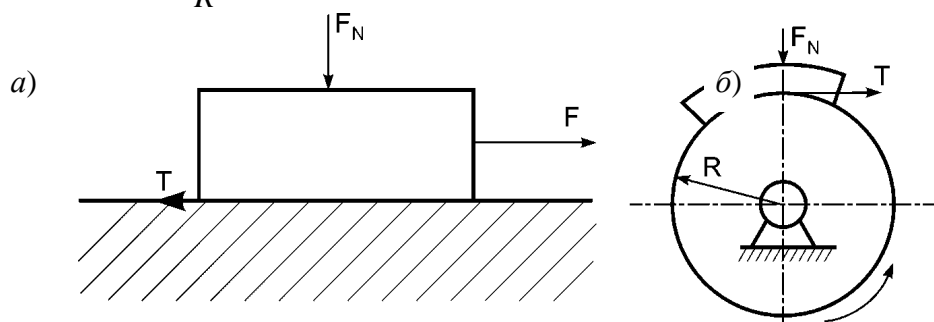
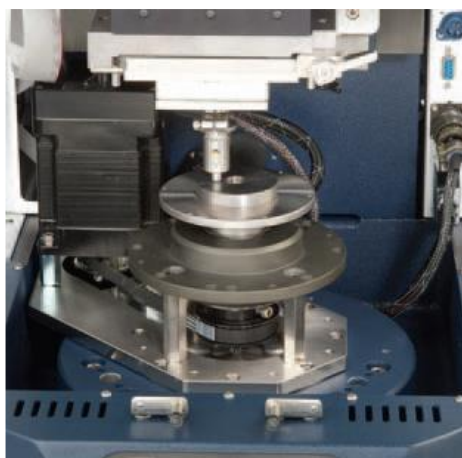


Рис. 3.2. Нагрузки, действующие на тело, при плоскопараллельном (а) и вращательном (б) движениях

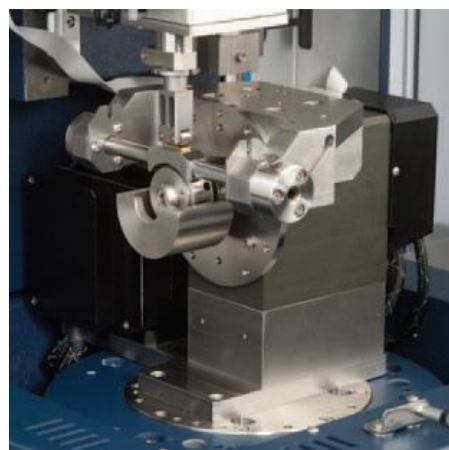
### 3. Технические характеристики трибометра UMT-3

Машина трения модели UMT-3 производства компании Bruker позволяет осуществлять испытания по следующим схемам:

- шарик – диск или стержень-диск (рис. 3.3, а);
- колодка – диск (рис. 3.3, б);
- втулка цилиндра – поршневое кольцо (рис. 3.4).



а



б

Рис. 3.3. Приводы для осуществления испытаний на износ по схеме:  
а – «шарик – диск» или «стержень – диск»; б – «колодка – диск»



Рис. 3.4. Схема испытания образцов по схеме «втулка цилиндра – поршневое кольцо»

### Машина трения обеспечивает:

- сервоконтроль нагрузки в диапазоне от 10 до 1000 Н при разрешении 50 мН;
- моторизацию по оси Z с диапазоном перемещения 150 мм, разрешающая способность датчика 0,5 мкм, скорость от 0,002 до 10 мм/с;
- контроль величины износа с точностью 5 мкм;
- моторизованное перемещение по оси «X» (для испытаний на износ и усталостных испытаний), диапазон перемещения: 75 мм, разрешающая способность датчика 0,25 мкм, скорость от 0,001 до 10 мм/с;
- контроль температуры до 350 °С с точностью 0,1°С, которая отображается на цифровом дисплее.

Программное обеспечение для анализа результатов позволяет отображать до 16 различных параметров во время проведения эксперимента.

Испытания образцов по схеме «шарик-диск», «стержень-диск» осуществляются в режиме вращательного движения с возможностью работать при нагреве до 350 °С. Для испытаний используются шарики диаметром 9,5 мм и стержни диаметром 6,3 мм. Стальные диски с центральным отверстием имеют диаметр 70 мм, толщину 6,3 мм.

Привод для осуществления испытаний по схеме «колодка-цилиндр» позволяет устанавливать нагрузку на образец до 740 Н при 1000 об/мин или 640 Н при 3000 об/мин. Цилиндры имеют диаметр 35 мм. Камера позволяет проводить испытания при температурах до 150 °С.

Привод для осуществления испытаний на износ в режиме возвратно-поступательного движения имеет камеру для проведения испытаний при нагреве до 350 °С.

### Необходимое оборудование и технические характеристики

1. Трибометр модели УМТ-3.
2. Образцы: один дисковый, изготовленный из стали 45 или 40Х твердостью 210–230 НВ, второй (колодка) – из серого перлитного чугуна марки СЧ25.
3. Схема испытываемой пары трения колодка–диск (рис. 3.5), диаметр дискового образца 35 мм.

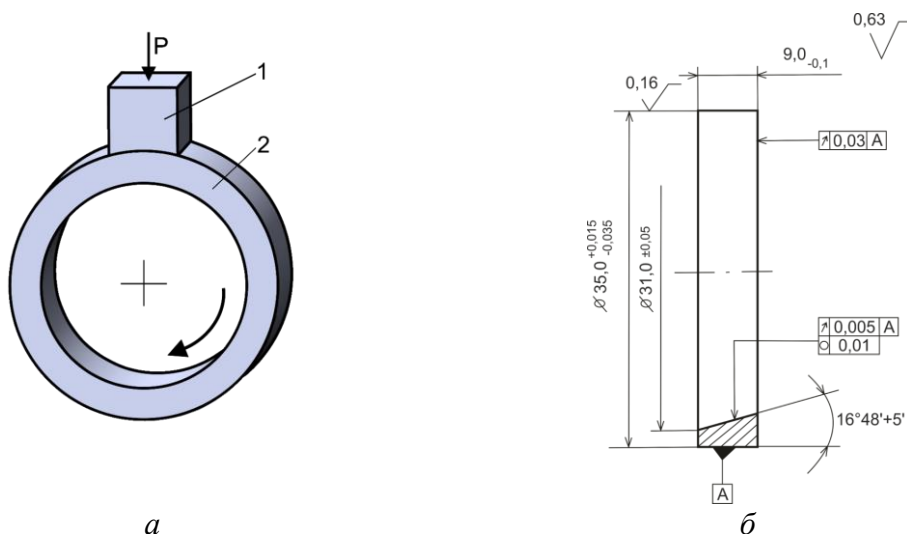


Рис. 3.5. Схема испытываемой пары трения колодка–диск (а);

1 – колодка; 2 – диск; б – чертеж диска

### Порядок выполнения работы

1. Прочитать методические указания.
2. С разрешения преподавателя подойти к машине трения и под полным его руководством изучить основные узлы машины и принцип её работы.
3. Получить у преподавателя два дисковых образца, специальный рычаг и набор грузов и произвести контроль машины.
5. После проверки машины, снять рычаг, закрепить стальной образец на нижнем шпинделе (он будет вращаться при испытаниях), а образец из антифрикционного сплава закрепить на шпинделе каретки (при трении он не вращается).
6. Провести приработку образцов. Для этого, включив машину, опустить верхнюю каретку и плавно нагрузить образцы до нагрузки 650 Н (65 кг). В процессе нагружения делают периодические паузы на 10-15 с по достижению нагрузок 350, 450, 550, 600 Н. Затем образцы разгружают. После приработки на неподвижном образце образуется лунка.
7. Плавно увеличивая нагрузку на образцы, снять показания момента трения при требуемых нагрузках, указанных в таблице, приведённой ниже, и занести полученные значения момента трения в упомянутую таблицу.

#### Результаты испытания на трение

*Условия трения:* без смазки; частота вращения нижнего диска 200 об/мин; радиус вращающегося диска  $R = 23$  мм.

*Пара трения:* диск–диск; нижний диск – среднеуглеродистая термообработанная сталь; верхний диск – (указать марку сплава).

Нагрузка $F_N$ , Н	Момент трения $M_T$ , Н·м	Сила трения $T$ , Н	Коэффициент трения
300			
350			
400			
450			
500			
550			
600			

8. Вычислить силу трения и коэффициент трения по формулам (7) и (6) соответственно и записать числа в таблицу.
9. По результатам расчётов построить график  $f(F_N)$ . По виду графика сделать вывод о том, какая составляющая трения преобладает в данных условиях.

#### Содержание отчёта

1. Краткое описание основных положений теории.
2. Экспериментальные данные, представленные в табличной форме.
3. График зависимости коэффициента трения от нормальной нагрузки ( $f(F_N)$ ).
4. График изменения силы трения от нормальной нагрузки.
5. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Что такое внешнее трение?
2. Назовите виды трения.
3. Назовите виды смазки.
4. Какая смазка называется гидродинамической?
5. Какая смазка называется граничной?
6. Какая смазка называется жидкостной?
7. Какая смазка называется полужидкостной или смешанной?
8. Какими составляющими определяется сила трения скольжения? Какова их природа?
9. Назовите основные характеристики трибометра модели УМТ-3.
10. По какой схеме и на каких образцах проводили опыты в данной работе?
11. Можно ли по внешнему виду полученной зависимости  $f(F_N)$  утверждать о преобладающем влиянии молекулярной (адгезионной) составляющей трения? Почему?

### Практическое занятие-семинар №4 «Определение технологических параметров плазменного напыления»

*Цель работы* – ознакомление с оборудованием, технологическими особенностями и возможностями процесса плазменного напыления.

#### 1. Особенности процесса плазменного напыления

*Плазменная струя* представляет собой высокотемпературный источник нагрева, поэтому в процессе плазменного напыления можно получать покрытия не только из легкоплавких, но и тугоплавких материалов (от алюминиевых сплавов до керамики). В потоке плазменной струи частицы материала химически не разлагаются и не испаряются при высоких температурах.

Источником энергии газотермического плазменного напыления является мощный дуговой разряд, при котором температура дуги колеблется в диапазоне 5230 – 15700 °С. Электрическая дуга горит между неплавящимся катодом и водоохлаждаемым медным анодом-соплом, через который непрерывно под давлением прокачивается плазмообразующий газ, играющий роль рабочей среды.

Мощность плазмотрона при неизменном токе разряда зависит от конструкции его межэлектродного пространства и от рода плазмообразующего газа (носителя газотермически диспергируемых частиц покрытия): аргона, азота, водорода, гелия и смесей этих газов, а также воздуха, смеси воздуха с природным газом и т. д.

Плазменное покрытие отличается от других газотермических покрытий улучшенными *эксплуатационными показателями*, но сама возможность нанесения плазменного покрытия и его эксплуатационная надежность реализуется только в условиях современного производства с высоким уровнем культуры прогрессивных технологий, участвующих в технологической цепочке плазменного напыления.

Недостатками метода плазменного напыления являются:

– токсичные воздействия на органы дыхания окислов азота и озона, образующиеся под воздействием ультрафиолетового излучения из воздуха при выходе плазменной струи из плазмотрона;

– интенсивные звуковые и ультразвуковые колебания, образующиеся из-за большой скорости истечения плазменной струи;

– загрязнение воздуха аэрозолями материалов, применяемых при напылении;

– ультразвуковые и инфракрасные излучения, генерируемые плазмой.

Исходными технологическими материалами плазменного напыления являются порошки металлов, сплавов, оксидов, твердых сплавов, композиционных материалов, а также проволоки из различных металлов и сплавов. Однако получение требуемого газотермического покрытия, функциональные (эксплуатационные) характеристики которого отвечают физико-механическим возможностям напыляемых материалов, возможно только в случае соблюдения ряда технических условий, предъявляемых к напыляемым материалам и способу их доставки в зону газотермического диспергирования: неизменность химического и гранулометрического состава, стабильность массовых соотношений транспортирующего газа и напыляемого порошка, подаваемых в зону напыления.

Качество покрытия характеризуется, прежде всего, соответствием состава покрытия составу напыляемого материала, адгезионной (между покрытием и подложкой) и когезионной (между частицами покрытия) прочностью, а также плотностью покрытий.

*Предварительная обработка напыляемой поверхности* необходима для образования у основы (напыляемой поверхности) активированного состояния применительно к тем техническим условиям, которые определяются методом газотермического напыления. Процесс активации основы можно классифицировать на термическую, газодинамическую и специальную предварительную обработку. *Предварительная обработка* напыляемой поверхности не только предваряет термическую и газодинамическую активацию основы, очищая основу от следов химических загрязнений, которые являются пассивирующим фактором адгезионного сцепления, но и стимулирует активацию материала основы, т.е. увеличивает поверхность контакта (что оценивается величиной шероховатости основы) и сохраняет в течение определенного промежутка времени величину поверхностной энергии основы как адсорбента, которая влияет на результативность ориентации процесса направленной адгезии основы и напыляемой частицы.

В общем случае предварительная обработка напыляемой поверхности начинается с ее промывки в моющих растворах или органических растворителях. Затем следует просушка (продувкой горячим обезжиренным и сжатым воздухом, прогревом пламенем газовой горелки до температуры 200°C, прокаливанием в термической печи и т. п. — в зависимости от состояния пористости обезжиренной поверхности и технических условий на выполнение газотермического напыления).

Предварительная оценка обезжиренной поверхности на выявление ее целостности методами визуального обследования, ультразвуковой и магнитной дефектоскопии позволяет выявить в поверхностном слое основы наличие усталостных трещин, пор, раковин и прочих дефектов, которые снижают величину нормативного запаса прочности до критической. Если основа с развитой системой усталостных трещин бракуется обязательно, то другие поверхностные дефекты оцениваются с позиции их влияния на величину допускаемого запаса прочности.

*Механическая предварительная обработка* поверхности основного материала не только активирует основу, снижая энергию поверхностных связей вещества конструкционного материала, но и создает необходимые технологические предпосылки надежного адгезионного сцепления частиц напыляемого материала с поверхностью основного посредством образования приемами механической обработки необходимой ей шероховатости, повышающей площадь контакта напыляемых частиц с основой. Кроме того, механическая предварительная обработка позволяет исправить несовершенства геометрической формы поверхности основного материала, удалить поверхностные дефекты, образовавшиеся в процессе эксплуатации детали, и препятствующие сцеплению покрытия с основой. В общем случае совокупность приемов механической предварительной обработки имеет целью:

- 1) образование необходимой шероховатости поверхности основного материала;
- 2) удаление дефектов поверхности основного материала;
- 3) удаление с поверхности основного материала следов глубокого диффузионного загрязнения, невосприимчивого к воздействию моющих средств или химической обработки травлением.

Методы механической предварительной обработки поверхности основного материала: струйно-абразивная, нарезание резьбы, ультразвуковая, электроэрозионная и т. д.

Основным видом подготовки поверхности основного материала под газотермическое напыление является струйно-абразивная обработка корундом благодаря его простоте, универсальности и высокой эффективности. В месте удара абразивных частиц основа разрушается и обнажается так называемая ювенильная поверхность материала, отличающаяся очень высокой активностью. Ювенильные поверхности двух твердых материалов, приведенные в соприкосновение, при сжатии способны прочно соединяться даже при комнатной температуре. Предварительная подготовка поверхности механическими методами влияет не только на активацию, но и резко увеличивает скорость диффузии в контакте между материалом покрытия и основы. Вследствие обработки поверхностный слой насыщается структурными дефектами и приобретает аномальные физико-химические свойства, влияющие на кинетику диффузионных процессов.

При струйно-абразивной обработке поверхности изделия возможно некоторое ее загрязнение внедренными частицами абразивного материала. Острые края частиц абразивного материала, которыми частица ударяется о поверхность, откалываются при обработке и остаются на поверхности изделия. При струйно-абразивной обработке ответственных деталей лучше всего применять электрокорунд, который меньше загрязняет поверхность. Следует учитывать, что зерна корунда и карбида кремния легко разрушаются, поэтому при подготовке ответственных изделий повторное использование их нежелательно.

После обработки поверхности рекомендуется как можно быстрее наносить покрытие. Перерыв между операциями должен быть не более 1 ч.

В последние годы для активизации поверхностного слоя начала применяться ультразвуковая обработка, которая производится специальным резцом и может быть совмещена с процессом напыления. Из всех видов предварительной обработки позволяет получить наиболее высокие параметры прочности сцепления покрытия с основой, т. к.

ультразвук не только активизирует поверхностный слой металла, но и создает в нем сжимающие остаточные напряжения.

*При выборе состава покрытия* необходимо наряду с эксплуатационными требованиями учитывать и его совместимость с материалом напыляемой детали.

Под *совместимостью* понимают принципиальную возможность адгезионного взаимодействия материалов покрытия и напыляемой детали. Кроме того, в совместимых покрытиях физико-химические процессы на границе раздела в процессе эксплуатации не приводят к нарушению стабильности исходного состояния композиции. Например, исключается образование гальванических пар, хрупких фаз и т. д.

Для повышения качества покрытий часто прибегают к напылению подслоев. Необходимость в этом возникает при неудовлетворительной совместимости материала покрытия с напыляемым изделием. Особенно часто несовместимость проявляется в низкой адгезионной прочности; образовании на границе раздела промежуточных фаз, снижающих эксплуатационные свойства напыленных деталей; большого различия в температурных коэффициентах линейного расширения материала покрытия и детали и т. д. Исходя из этого, выбирают материал промежуточного слоя.

Важным показателем для материала подслоя является энтальпия напыляемых частиц. С увеличением энтальпии повышается контактная температура и, соответственно, адгезионная прочность. Практика показала хорошие результаты при использовании для промежуточных слоев тугоплавких металлов (в распыленном состоянии энтальпия молибдена составляет 105 Дж/моль, вольфрама — 130 Дж/моль), а также композиционных терморезирующих порошков, например плакированных или конгломерированных частиц никеля и алюминия.

Терморезирующие материалы используют энергию плазменного факела для интенсивного агрегатно-фазового превращения веществ, входящих в частицы композиционных порошковых материалов, и синтеза нового химического вещества на базе взаимодействия исходных. При нагреве этих порошков протекает химическая реакция между компонентами с выделением теплоты, в результате чего повышается адгезионная прочность подслоя с подложкой и когезионная прочность покрытий. Наиболее значительные тепловые эффекты наблюдаются в металлокерамических композициях, у которых прирост температуры превышает 2000 °С. В системах «металл – тугоплавкое соединение» прирост температуры напыляемых частиц достигает 700 °С и выше.

## **2. Плазменное газотермическое оборудование**

Установки для плазменного напыления выпускаются специализированными (для определенного типа материалов или изделий) и универсальными (все серийные отечественные установки).

Установки для напыления состоят из четырех основных элементов – источника питания, плазмотрона, дозирующего устройства для подачи материала и пульта управления. Наиболее широко у нас в стране применяются такие установки, как УПУ-3Д (табл. 4.1), АРП-403, ОБ1255, УН-108 (табл. 4.2) и др. Схема плазменной установки УПУ-3Д приведена на рис. 4.1.



Таблица 4.1

Основные технические характеристики установки УПУ–3Д

Напряжение питающей сети, В	380±10
Мощность плазмотрона, кВт	25
Плазмообразующие газы:	азот, аргон, гелий, водород и их смеси
Расход плазмообразующих газов, м <sup>3</sup> /ч	2–4
Расход охлаждающей воды, дм <sup>3</sup> /мин	5

Плазменная установка УН–108 разработана для производства газотермических покрытий с использованием в составе плазменного факела распространенных промышленных горючих газов, в том числе пропан-бутана, азота, воздуха и их смесей. Плазмотрон имеет циркониевый электрод.

Таблица 4.2

Основные технические характеристики установки УН–108, УХЛ–4

Напряжение питающей сети, В	380±10
Мощность плазмотрона, кВт	120
Плазмообразующие газы:	воздух, азот, пропан-бутан
Расход плазмообразующих газов, м <sup>3</sup> /ч	3–10
Расход охлаждающей воды, дм <sup>3</sup> /мин	> 10

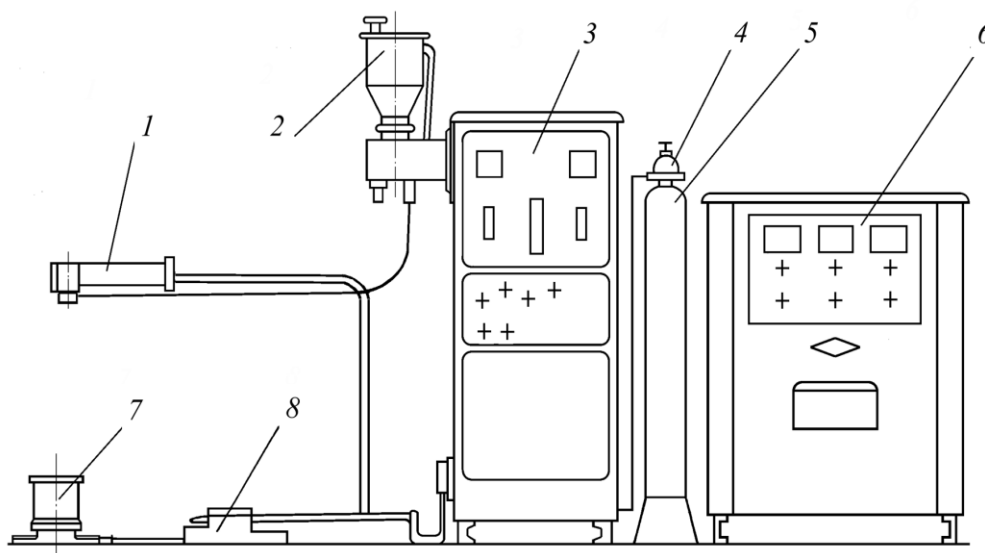


Рис. 4.1. Схема установки для плазменного напыления УПУ–3Д:  
 1 – плазмотрон ПП25; 2 – дозатор роторного типа; 3 – шкаф управления;  
 4 – редуктор кислородный; 5 – баллон с плазмообразующим газом; 6 –  
 источник питания ИПН–160; 7 – насос для подачи охлаждающей воды;  
 8 – педаль пуска установки

*Плазмотроны* для напыления предназначены для нагрева и разгона частиц

напыляемого материала. От большинства других плазмотронов они отличаются тем, что дуга в них не переносится на напыляемое изделие, а анодом, как правило, служит медное водоохлаждаемое сопло, при этом тепловые потоки в анод составляют 20–30 % подводимой мощности, что требует наличия в установке блока охлаждения.

Свойства покрытий, формирующихся в процессе плазменного напыления, в решающей степени зависят от конструкции и характеристик плазмотрона как рабочего инструмента напыления, который при длительной непрерывной работе и высокой энергетической эффективности должен обеспечить стабильность параметров плазменного потока, иметь надежную конструкцию и быть простым в эксплуатации.

Наибольшее распространение получили плазмотроны с тангенциальной подачей плазмообразующего газа, принципиальная схема плазменной горелки представлена на рис. 4.2. Плазмотрон выполнен по схеме электро-дугового плазменного устройства с секционированной межэлектродной вставкой. На входе плазмотрона установлен катод с гафниевой вставкой, а на выходе — цилиндрический анод. Между ними установлены секции межэлектродной вставки. Сжатый воздух подается со стороны катода тангенциально. Плазмотроны работают на постоянном токе и имеют самоустанавливающуюся или частично фиксированную (уступ в сопле) длину дуги, что обеспечивает простоту их конструкции и высокую надежность.

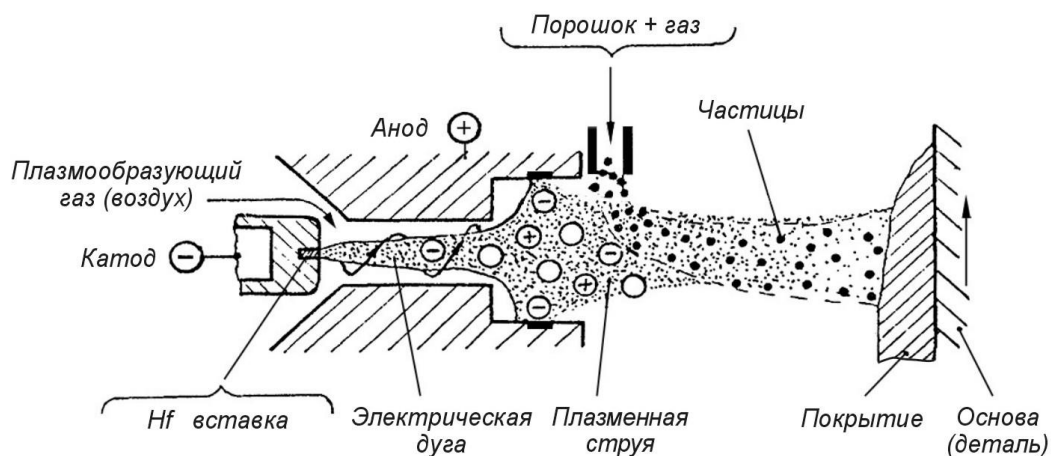


Рис. 4.2. Схема плазмотрона ПН-В1

В плазменных горелках плазменную струю получают путем вдувания в электрическую дугу, возбужденную между электродами, плазмообразующего газа и его газодинамического обжатия в канале водоохлаждаемого сопла. Принципиальная схема электропитания плазменной горелки представлена на рис. 4.3. По специальному каналу в плазменную струю вдувается напыляемый порошковый материал, частицы которого, нагреваясь, одновременно приобретают высокую скорость. При подаче напыляемого материала в виде проволоки или стержня легче осуществить ввод материала в центр струи и гарантировать его расплавление.

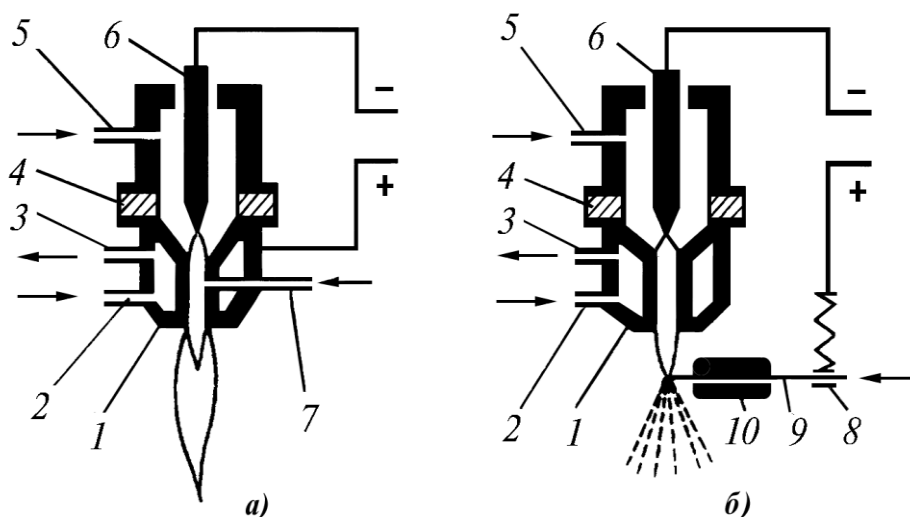


Рис. 4.3. Схема процесса плазменного напыления:  
*а* – для работы на порошках; *б* – для работы на проволоке; 1 – сопло плазменной горелки (анод); 2, 3 – подвод и отвод охлаждающей воды; 4 – изолирующее кольцо; 5 – подвод плазмообразующего газа; 6 – неплавящийся электрод (катод); 7 – подача присадочного порошка; 8 – контактное устройство для проволоки; 9 – напыляемая проволока; 10 – направляющая трубка для проволоки

Наиболее простые и надежные плазмотроны типа ПП25 (его конструкция представлена на рис. 4.4) применяются на установках УПУ-3Д.

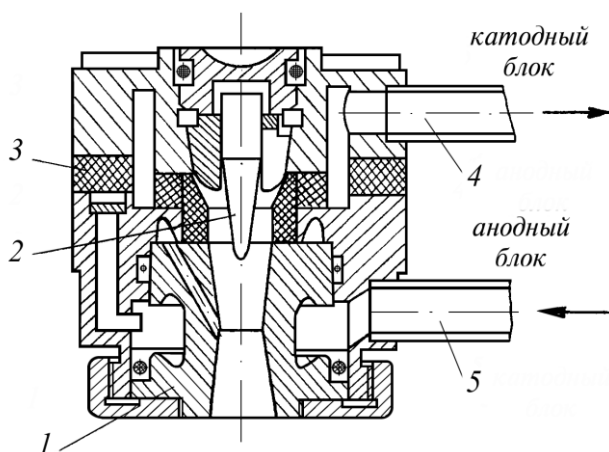


Рис. 4.4. Конструкция плазменного распылителя:  
 1 – сопло (анод медный); 2 – вольфрамовый катод; 3 – изолятор;  
 4 – охлаждающая вода; 5 – подвод постоянного тока и охлаждающей воды

Ресурс непрерывной работы плазмотронов определяется стойкостью электродного узла и сопла – анода. Ресурс работы электродов зависит от рода плазмообразующего газа и подводимой мощности и при мощности 30 кВт составляет 20–25 ч. Известно, что привязка анодного пятна к постоянному месту канала сопла анода ухудшает качество и

стабильность свойств покрытий. Особенно часто такая привязка наступает в результате даже небольшого эрозионного износа анода плазмотрона.

Разработка новых типов и моделей плазмотронов ведется в направлении увеличения их мощности, надежности и производительности, а также повышения качества покрытий. В этом смысле представляет интерес плазмотрон С2В3 (рис. 4.5), работающий на воздухе с ламинарным истечением плазменной струи.

*Параметры, характеризующие режим работы плазменного распылителя.* Напряжение и величина тока дугового разряда; состав и расход плазмообразующего газа.

*Параметры напыляемого материала и условий его ввода.* С увеличением размера частиц возникают трудности их нагрева до температуры плавления. При этом резко снижается эффективность процесса. К параметрам, характеризующим ввод порошка, относятся массовый расход и скорость его подачи в зону газотермического диспергирования.

### **3. Указания по выбору технологии**

В целом, параметры плазменной струи определяют нагрев и ускорение напыляемых частиц.

Параметры потока частиц при плазменном напылении характеризуются следующими величинами: температура напыляемых частиц; скорость напыляемых частиц; распределение температуры и скорости частиц в конусе напыления; взаимодействие напыляемых частиц с газовой фазой; испарение, сублимация и диссоциация; плотность потока частиц по пятну напыления.

Эффективность прогрева частиц напыляемого материала и распределение скорости распыляемых частиц в объеме газотермического потока определяются параметрами технологического режима плазменного напыления и соответствием ему конструкции плазмотрона.

Напыление вкладышей следует осуществлять на специализированном участке, который должен быть оснащен следующим оборудованием.

1. При напылении воздухом в качестве плазмообразующего газа:
  - источником постоянного тока, обеспечивающим напряжение холостого хода 320 В (типа АПР 404.УХЛ4);
  - плазмотроном типа С2В3, АПРП УХЛ–4 или ПЦВ20;
  - дросселем для сглаживания пульсации дуги.
2. При напылении плазмообразующим газом аргоном или смесью газов аргона и азота ( $Ar + N_2$ ):
  - источником постоянного тока, обеспечивающим напряжение холостого хода 160 В (типа ИПН 160);
  - плазмотроном типа ПП25 (установка УПУ–3Д).
3. Пультom управления, обеспечивающим регулирование и контроль следующих параметров процесса: напряжение на дуге, величина тока, расход плазмообразующего (ротаметр типа Р–50) и транспортирующих газов (ротаметр типа Р–25).
4. Питателем порошка, обеспечивающим плавную регулировку подачи порошка в интервале 20–40 г/мин (например, шнековый питатель установки УПУ–3Д).
5. Сварочным вращателем или токарным станком с высотой центров не менее 200 мм (типа 1К62).

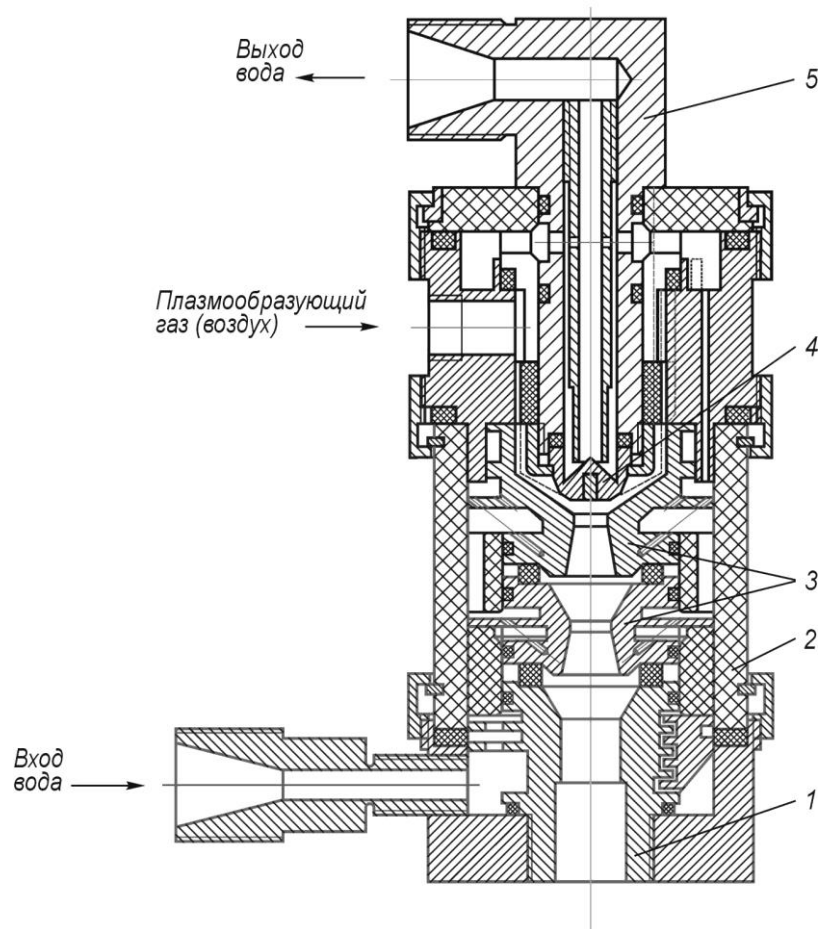


Рис. 4.5. Конструкция плазмотрона С2В3:  
 1 – анод-сопло; 2 – корпус; 3 – секция межэлектродной вставки;  
 4 – катод с гафниевой вставкой; 5 – катододержатель

6. Установкой для пескоструйной обработки с пистолетом, работающим при давлении 0,5 МПа (5 ат) и имеющим диаметр сопла 5 мм, или установкой типа «Каскад».

7. Виброситом для раздела порошка по фракциям (типа ВИЛ–23).

8. Компрессором для получения сжатого воздуха.

9. Прибором AUTOMAION KOLN для определения толщины покрытия.

Для напыления антифрикционнго слоя применяется сплав АО20 следующего химического состава (%): *Al* – основа, *Cu* 0,6–0,8, *Sn* 16–20.

Для напыления подслоя применяется никель-алюминиевый сплав ПТЮ5Н ТУ 14–1–3926–85.

Размер гранул порошков должен находиться в пределах 40–200 мкм.

Для струйной обработки применяют электрокорунд по ОСТ 2МТ 793–80 и ОСТ 2МТ 715–78 зернистостью 0,80–0,15 мм, металлическую дробь ДЧК, ДСК номера 01, 02, 03, 05 по ГОСТ 11964–66 или кварцевый песок зернистостью 0,8–1,5 мм.

#### 4. Порядок выполнения работы

4.1. Подготовка детали (образца) под напыление.

4.1.1. Мойку и обезжиривание детали (образца) производить в соответствии с ТУ на ремонт дизеля.

4.1.2. Проточить наружную поверхность детали (образца) до «чистого» металла.

4.1.3. Для увеличения прочности сцепления покрытия с основой произвести струйную обработку проточенной поверхности детали (образца). Режим обработки: давление воздуха 0,4–0,5 МПа (4–5 ат), диаметр сопла 5–7 мм, расстояние от среза сопла до поверхности вкладыша 100–150 мм, угол наклона сопла к обрабатываемой поверхности детали 60–90°, время обработки 30–40 с.

После струйно-абразивной обработки вкладыш обдувают сухим сжатым воздухом для удаления частиц абразива с поверхности. Запрещается касаться руками поверхности, подготовленной под напыление.

Перерыв между струйно-абразивной обработкой и нанесением покрытий не должен превышать 1 ч.

4.2. Просеивание порошка.

4.2.1. При нанесении покрытий из порошковых материалов большое значение имеет размер частиц наносимого порошка. От гранулометрического состава исходного порошка зависят стабильность и производительность процесса, свойства получаемого покрытия. Поэтому порошковые материалы должны обязательно проходить операцию рассеивания (классификации). Классификацию порошка производить по группам:

- 1) 40–100 мкм;
- 2) 101–160 мкм;
- 3) 161–200 мкм;
- 4) > 200 мкм.

Для напыления используются первые две группы.

4.2.2. Подготовленные порошковые материалы хранить в герметичной таре.

4.3. Напыление детали (образца).

4.3.1. Установить деталь (образец) в патроне токарного станка.

4.3.2. Установить частоту вращения патрона станка согласно таблице режимов и включить его.

4.3.3. Открыть вентиль и отрегулировать давление по манометру и расход плазмобразующего газа по ротаметру в режиме «настройка» в соответствии с требуемыми параметрами (таблица).

4.3.4. Включить дозатор и отрегулировать расход порошка 40 г/мин, выключить дозатор.

4.3.5. Зажечь дугу и установить требуемый ток (см. табл. 4.1).

4.3.6. Включить дозатор и откорректировать подачу порошка по центру плазменной струи.

Подвести плазмотрон к кромке поверхности детали (образца), выдерживая расстояние от сопла до напыляемой поверхности (см. табл. 7.3). Угол наклона плазмотрона к напыляемой поверхности детали (образца) должен находиться в пределах 60–90°. Включить устройство для перемещения плазмотрона.

Режимы напыления приведены в табл. 4.3.

Напыление материалов производится в такой последовательности:

- ПТЮ5Н напыляется за 1–2 прохода. Толщина слоя 0,06–0,10 мм;
- АО20 напыляется с припуском на механическую обработку 0,25–0,30 мм (напыляется 10–15 слоев, за проход напыляется 0,05–0,10 мм).

При напылении различными порошками временных перерывов не делать.

Параметры режима напыления

Напыляемый материал	Плазмообразующий газ	Параметры режима					
		напряжение на дуге, В	сила тока, А	расход газа, л/мин	давление газа, МПа	расстояние сопло – деталь, мм	скорость вращения, об/мин
АО20	воздух	200	140	50	0.4	100–150	25–100
АО20	аргон	30	280–320	50	0.2	100–120	25–50
ПТЮ5Н	воздух	220	100	50	0.4	150	100–300
ПТЮ5Н	аргон	30	300–400	50	0.2	120	25–120

Примечание: для транспортирования порошка используется газ того же состава, что и плазмообразующий. Расход транспортирующего газа устанавливается в пределах 2–3 л/мин при давлении 0,15–0,20 МПа.

4.3.8. Контроль качества покрытия: провести контроль качества покрытия визуально с помощью лупы; наличие трещин, капель металла, различий в цвете, указывающие на частичный местный перегрев, не допускается.

Произвести измерение толщины покрытия с помощью прибора AUTOMAION KOLN или микрометра, припуск на механическую обработку должен составлять 0,2–0,3 мм.

## 5. Содержание отчета

- 5.1. Принципиальная схема электропитания плазменной горелки.
- 5.2. Схема плазмотрона ПН-В1.
- 5.3. Технологическая схема напыления деталей.
- 5.4. Результаты опытов.
- 5.5. Описание внешнего вида напыленного слоя (наличие, величина и места расположения дефектов, если таковые имеются).
- 5.6. Выводы и объяснения полученных результатов.

## 6. Контрольные вопросы

- 6.1. Что понимают под совместимостью состава покрытия с материалом напыляемой детали?
- 6.2. Назначение и виды предварительной обработка напыляемой поверхности.
- 6.3. Какие газы применяются в качестве плазмообразующих?
- 6.4. Какие дефекты образуются при напылении?
- 6.5. Какие технологические приемы применяют для получения качественного соединения напыленного слоя с подложкой?
- 6.6. Из каких основных узлов состоит плазмотрон?
- 6.7. При каких условиях образуется плазменная струя?
- 6.8. Какие материалы называются термореагирующими?