



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П.О. Сухого»

Кафедра «Технология машиностроения»

ИССЛЕДОВАНИЕ И ИЗОБРЕТАТЕЛЬСТВО В МАШИНОСТРОЕНИИ

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по одноименному курсу для студентов специальности
1-36 01 01 «Технология машиностроения»
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2006

УДК 621.002:652.562.6(075.8)
ББК 307я73
И88

*Рекомендовано научно-методическим советом
машиностроительного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 1 от 27.09.2004 г.)*

Автор-составитель: *И. В. Царенко*

Рецензент: д-р. техн. наук, проф., зав. отд. «Герметология» Института механики металло-полимерных систем НАНБ *Л. С. Пинчук*

И88 **Исследование** и изобретательство в машиностроении : лаб. практикум по одноим. курсу для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» днев. и заоч. форм обучения / авт.-сост. И. В. Царенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2006. – 73 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

Представлена методика выполнения 9 лабораторных работ. Рассмотрены методы статистической обработки экспериментальных данных; планирования эксперимента; корреляционно-регрессионного анализа; исследования атмосферо-, износостойкости материалов, топографии и морфологии поверхности, механических, теплофизических свойств, физико-химической структуры и химического состава материала.

Для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.002:652.562.6(075.8)
ББК 307я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2006

Лабораторная работа №1 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: практическое освоение выборочного метода статистической обработки результатов прямых измерений.

Оборудование и принадлежности: калькулятор, микрометр, образцы.

Основные положения

Генеральная совокупность и выборка - два фундаментальных понятия статистической теории. *Генеральная совокупность* – это совокупность всех возможных результатов наблюдений случайной величины, которые в принципе могут быть проведены при данных условиях. Генеральная совокупность – теоретическое понятие, т.к. проведение неограниченно большого количества испытаний невозможно. Поэтому на практике приходится использовать ограниченное число измерений, которое получило название выборки. *Выборка* – набор значений случайной величины, полученный в результате наблюдений. Число элементов выборки называют её объёмом и обычно обозначают *n*. Смысл статистической обработки экспериментальных данных заключается в том, чтобы по выборке ограниченного объема *n*, т.е. лишь по некоторой части генеральной совокупности, высказать обоснованное суждение об её свойствах в целом.

Экспериментальные данные получают в результате измерений, которые разделяют на *прямые и косвенные*. В данной работе рассматриваются прямые измерения.

При *прямых* измерениях искомое значение величины находят непосредственно в процессе измерения. К прямым относятся измерения линейных размеров линейками, штангенциркулями, микрометрами и т.д., измерения масс на рычажных весах с помощью гирь, измерения времени с помощью часов или секундомера, температуры – термометром, силы тока - амперметром и т.п. Однако полученное таким образом значение не есть истинное значение измеряемой величины, т.к. оно всегда содержит ошибку (или погрешность) измерения Δ . Ошибки измерения подразделяются на *систематические, случайные и грубые* (промахи).

Систематическая ошибка (Δ_c) – величина, которая остается постоянной на протяжении одной серии измерений или изменяется закономерно. В качестве основных составляющих систематической ошибки обычно рассматривают ошибки средства измерения, округления, методические и субъективные (зависящие от индивидуальных особенностей человека, занятого измерениями). Часто ошибки средства измерения составляют большую часть систематической ошибки и, как правило, легко могут быть определены. Методические погрешности возникают из-за несовершенства метода измерений, влияния условий измерений на их результаты.

Случайная ошибка ($\Delta_{сл}$) изменяется от одного измерения к другому непредсказуемо. Её рассматривают как суммарный эффект многих факторов, действие которых столь мало, что их нельзя выделить и учесть по отдельности. Примеры: колебание температуры в процессе измерения; незначительное движение воздуха; колебание почвы.

Методические указания

Методы обработки результатов прямых измерений рассмотрены в приложении к деталям, используемым в лабораторной работе №1 по курсу «Технология машиностроения» [1]. Микрометром измеряется толщина кольца, изображённого на рис. 1.

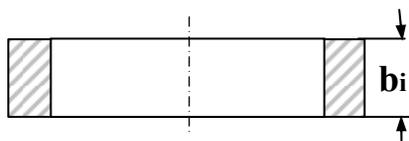


Рис. 1. Пример прямого измерения: определение толщины кольца b_i микрометром.

Истинное значение измеряемой величины (толщина кольца B) представляется в виде:

$$B = \bar{B} \pm \Delta_{\Sigma}, \text{ вероятность } P = p \quad (1)$$

где \bar{B} - точечная оценка измеряемой величины B , вычисляемая как среднее арифметическое значение n измерений:

$$\bar{B} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i, \quad (2)$$

b_i – результат i -го измерения;

Δ_{Σ} - суммарная погрешность или ширина доверительного интервала в котором с вероятностью p будет находиться истинное значение измеряемой величины B .

В вероятностном выражении уравнение (1) запишется:

$$P(\bar{B} - \Delta_{\Sigma} < B < \bar{B} + \Delta_{\Sigma}) = p \quad (3)$$

Погрешность Δ_{Σ} определяется как сумма систематической погрешности Δ_c и случайной ошибки измерения $\Delta_{сл}$:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_c + \Delta_{сл} \quad (4)$$

Учитывая, что систематическая ошибка состоит из ошибки средства измерения, округления, методической и субъективной, то суммарную систематическую ошибку Δ_c можно найти по формуле:

$$\Delta_c = k \sqrt{\sum_{j=1}^m \Delta_{c_j}^2}, \quad (5)$$

где k – поправочный коэффициент;

m – число элементарных систематических погрешностей.

При несложном линейном измерении как, например, в данной лабораторной работе измерение толщины кольца микрометром, систематическая ошибка будет определяться ошибкой средства измерения.

$$\Delta_c = \Delta_{ср.изм.} \quad (6)$$

Если на шкале прибора указан класс точности (равный приведенной погрешности γ_n), то ошибка средств измерения рассчитывается по формуле:

$$\Delta_{\text{ср.изм.}} = \gamma_n A / 100\%, \quad (7)$$

где A - верхний предел измерения на шкале прибора.

Если на шкале прибора не указан класс точности, то ошибка средств измерения рассчитывается по формуле:

$$\Delta_{\text{ср.изм.}} = 0.2 \cdot a, \quad (8)$$

где a – цена деления измерительного прибора.

Случайную ошибку измерений $\Delta_{\text{сл}}$ можно определить после многократных измерений по формуле:

$$\Delta_{\text{сл}} = t_{\alpha, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (9)$$

где $t_{\alpha, n-1}$ – коэффициент Стьюдента, приведён в табл.1; n – число измерений; α – вероятность так называемой ошибки I-го рода: $\alpha = 1 - p$; S – среднее квадратичное отклонение результатов измерений:

$$\text{При } n \leq 30 \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (b_i - \bar{B})^2}{n-1}}, \quad (10)$$

$$\text{При } n > 30 \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (b_i - \bar{B})^2}{n}}, \quad (11)$$

Здесь b_i – результат i -го измерения;

\bar{B} - среднее арифметическое значение n измерений, определяемое по формуле (2).

Для более точного расчёта S используется формула (при $n < 30$):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(b_i - b_0)^2 - n(\bar{B} - b_0)^2]}{n-1}}, \quad (12)$$

где b_0 – одно из значений b_i . В качестве b_0 принимают минимальное число из выборки, как наиболее удобное для вычитания из значений b_i . Например, если $b_i = 1.80; 1.81; 1.82 \dots$, то $b_0 = 1.80$.

Таблица 1

Значение коэффициентов Стьюдента $t_{\alpha, n-1}$

n-1	α				n-1	α			
	0.1	0.05	0.01	0.001		0.1	0.05	0.01	0.001
1	6.314	12.70	63.65	636.6	6	1.943	2.447	3.707	5.959
2	2.920	4.303	9.925	31.59	7	1.895	2.365	3.449	5.405
3	2.353	3.182	5.841	12.94	8	1.860	2.306	3.355	5.041
4	2.132	2.776	4.604	8.610	9	1.833	2.262	3.250	4.781
5	2.016	2.571	4.032	6.849	10	1.812	2.228	3.169	4.587

При выполнении измерений может быть поставлена задача либо оценить вероятность того, что результаты отдельных измерений находятся в определенном интервале, либо установить доверительный интервал по известной вероятности. Для решения этих задач используют значения функции Лапласа, рассчитываемые по формуле:

$$\gamma = \Delta/S \quad (13)$$

где Δ – допускаемая погрешность измерений или $\Delta = \pm(b_{\max} - b_{\min})/2$;
 S – среднее квадратичное отклонение.

По таблице 2 определяется доверительная вероятность P , соответствующая рассчитанному γ , или наоборот, по известному P устанавливается γ , а затем по формуле (13) рассчитывается Δ .

Таблица 2

Значение вероятностей для нормального распределения

$\gamma = \Delta/S$	P	$\gamma = \Delta/S$	P	$\gamma = \Delta/S$	P
0	0	1.2	0.77	2.6	0.990
0.05	0.04	1.3	0.80	2.7	0.993
0.1	0.08	1.4	0.84	2.8	0.995
0.15	0.12	1.5	0.87	2.9	0.996
0.2	0.16	1.6	0.89	3.0	0.9973
0.3	0.24	1.7	0.91	3.1	0.9981
0.4	0.31	1.8	0.93	3.2	0.9986
0.5	0.38	1.9	0.94	3.3	0.9990
0.6	0.45	2.0	0.95	3.4	0.9993
0.7	0.51	2.1	0.964	3.5	0.9995
0.8	0.57	2.2	0.972	3.6	0.9997
0.9	0.63	2.3	0.978	3.7	0.9998
1.0	0.68	2.4	0.984	3.9	0.9999
1.1	0.73	2.5	0.988	4.0	0.99993

Так, например, для $\gamma = 0.4$ доверительная вероятность $P = 0.31$. Это означает, что 1/3 результатов всех измерений находится в интервале $\pm\Delta$. С увеличением интервала Δ доверительная вероятность P возрастает.

На практике часто важно знать, какой доверительный интервал нужно выбрать для некоторого ряда измерений, чтобы 95% (или другое значение P) результатов попадали в него. Из табл. 2 находим, что значению $P = 0.95$ соответствует значение $\Delta/S = 2$. Отсюда Δ рассчитывается как $2S$, то есть в интервал $B = \bar{B} \pm 2S$ попадает 95% возможных значений измеряемой величины.

Порядок выполнения работы

1. Из партии деталей (кольца) сделать две выборки в n штук ($n=5, 10$); измерить микрометром толщину каждой детали (b_i); результаты измерений занести в таблицу (по форме табл.3).
2. С заданной преподавателем вероятностью оценить для каждой выборки:
 - 2.1. точечную оценку измеряемой величины \bar{B} по формуле (2);
 - 2.2. систематическую ошибку измерений Δ_c по формулам (5-8);
 - 2.3. случайную ошибку измерений $\Delta_{сл}$ по формулам (9-12). Расчет $\Delta_{сл}$ выполнить двумя методами: грубый расчет по формулам (9-11) и точный по формулам (9, 12);
 - 2.4. суммарную ошибку измерений Δ_Σ (4).
3. Результаты вычислений занести в таблицу 3.
4. Результаты измерений для обеих партий представить в виде, соответствующем уравнению (1).
5. Используя формулу (13) и таблицу 2 рассчитать для партии в 10 колец интервал Δ , в котором будут находиться результаты измерений с заданной преподавателем вероятностью.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Методика статистической обработки результатов прямых измерений на примере оценки истинного значения толщины кольца B , включая форму представления истинного значения измеряемой величины; формулы расчета точечной оценки измеряемой величины \bar{B} , систематической ошибки измерений Δ_c , случайной ошибки измерений $\Delta_{сл}$, суммарной ошибки измерений Δ_Σ .
3. Таблица результатов измерений и расчетов по форме табл. 3, включающая расчет случайной ошибки измерений для обеих выборок двумя методами: (1) грубый расчет по уравнениям (9-11) и (2) точный расчет по уравнениям (9,12). Соответственно двумя методами оценивается и Δ_Σ .

Таблица 3

Результаты измерений и расчетов

N	Измеряемый размер b_i , мм	\bar{B} , мм (2)	Δ_c (5-8)	S (10,11) S (12)	$\Delta_{сл}$ (10, 9) $\Delta_{сл}$ (12, 9)	Δ_Σ (10, 4) Δ_Σ (12, 4)
1						
2						
...						
5						
6						
7						
...						
10						

4. Результаты измерений для обеих партий деталей в виде, соответствующем уравнению (1).
5. Для партии из 10 деталей расчеты: 1) вероятности попадания измерений в заданный преподавателем интервал и 2) доверительного интервала для заданной вероятности. Расчеты выполняются с использованием значений функции Лапласа (представленные в таблице 2) и формулы 13.
6. Выводы: 1) сравнить значения Δ_{Σ} , рассчитанные двумя методами; 2) оценить, как влияет количество измерений на различные ошибки измерений; 3) оценить доверительный интервал при изменении вероятности попадания размеров в этот интервал.

Контрольные вопросы

1. Смысл статистической обработки экспериментальных данных.
2. Генеральная совокупность и выборка. Определения.
3. Классификация измерений.
4. Прямые измерения. Примеры.
5. Виды ошибок измерений.
6. Виды систематических ошибок измерений.
7. Расчет систематической ошибки средства измерений.
8. Расчет случайной ошибки измерения.
9. Влияние числа измерений на случайную и систематическую ошибки.
10. Расчет среднего квадратичного отклонения результатов измерений.
11. Форма представления результатов измерений.
12. Как определить вероятность того, что результаты отдельных измерений будут находиться в заданном интервале измерения?

Литература

1. Практическое руководство к лабораторной работе №1 по курсу «Технология машиностроения» для студентов специальности ТО3.01.01/Под ред. Пучкова А.А. и Щербакова С.А. – Гомель: ГПИ. 1997.
2. Кане М.М. Основы научных исследований в технологии машиностроения: Учебн. пособие для вузов. – Мн.: Выш. школа, 1987.
3. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978.

Лабораторная работа №2
МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: практическое освоение методов статистической обработки результатов косвенных измерений.

Оборудование и принадлежности: прибор ПМТ-3 для измерения микротвердости, калькулятор, набор образцов.

Основные положения

Значение косвенно измеряемой величины y вычисляется по уравнению, включающему результаты прямых измерений x_1, x_2, \dots, x_m :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m; a, b, \dots), \quad (1)$$

где a, b, \dots - физические константы и постоянные приборов.

Например, площадь прямоугольника S находится путем измерения длин двух его сторон l_1 и l_2 по соотношению $S = l_1 \times l_2$. В этом случае измерение длин сторон будет прямым, а измерение площади прямоугольника – косвенным.

Как и для случая прямых измерений, истинное значение косвенно измеряемой величины y записывается в виде:

$$y = \bar{y} \pm \Delta_{y\Sigma}, \quad \text{вероятность } P = p \quad (2)$$

где \bar{y} - точечная оценка измеряемой величины y , вычисляемая как среднее арифметическое значение n измерений;

$\Delta_{y\Sigma}$ - суммарная погрешность или ширина доверительного интервала, в котором с вероятностью p будет находиться истинное значение измеряемой величины y .

При косвенных измерениях существует два метода расчета y .

Метод I

1.1. Расчет точечной оценки \bar{y} .

1.1.1. Вычисление значений $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ - средних арифметических результатов прямых измерений.

1.1.2. Подстановка значений $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ в уравнение

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m; a, b, \dots), \quad (3)$$

1.2. Расчет суммарной погрешности $\Delta_{y\Sigma}$.

1.2.1. Принимается допущение $\Delta_{y\Sigma}^2 = D(y)$, где $D(y)$ - дисперсия функции (1) случайных независимых аргументов:

$$\Delta_{y\Sigma}^2 = D(y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 D(x_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 D(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m}\right)^2 D(x_m), \quad (4)$$

где $\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_m}$ - частные производные функции (1) по переменным x_1, x_2, \dots, x_m

соответственно, а $D(x_1), D(x_2), \dots, D(x_m)$ – дисперсии при измерении величин x_1, x_2, \dots, x_m .

$$D(x_i) = \Delta_{x\Sigma}^2 \quad (5)$$

где $\Delta_{x\Sigma}$ - суммарная погрешность измеряемой величины x_i (подробный расчет приведен в лабораторной работе № 1)

Напомним, что частная производная функции многих переменных по одной переменной, скажем x_1 , является обычной производной этой функции по x_1 , причем другие переменные $x_2 \dots x_m$ считаются постоянными параметрами. Все производные в выражении (4) вычисляются при средних арифметических значениях переменных, т.е. при $x_1 = \bar{x}_1, x_2 = \bar{x}_2 \dots x_m = \bar{x}_m$. Зависимость (4) получена путем разложения функции (1) в ряд Тейлора, при котором ограничились лишь линейными членами разложения.

Метод II

2.1. Расчет точечной оценки \bar{y} .

2.1.1. Вычисление y_j для каждого из значений $x_{1j}, x_{2j} \dots x_{mj}$ по (1);

2.1.2. Расчет среднего арифметического значения \bar{y} :

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_j, \text{ где } n - \text{число прямых измерений.}$$

2.2. Расчет суммарной погрешности $\Delta_{y\Sigma}$.

2.2.1. Вычисление y_j для каждого из $x_{1j}, x_{2j} \dots x_{mj}$ по формуле (1).

2.2.2. Расчет $\Delta_{y\Sigma}$ по формуле:

$$\Delta_{y\Sigma} = t_{\alpha, n-1} \frac{S_y}{\sqrt{n}}, \quad (6)$$

где $t_{\alpha, n-1}$ – коэффициент Стьюдента (значения приведены в табл.1); n – число измерений; α – вероятность так называемой ошибки I-го рода, рассчитываемая как $\alpha = 1 - P$; S_y – среднее квадратичное отклонение суммарной погрешности измерений y .

$$\text{При } n \leq 30 \quad S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}{n-1}, \quad (7)$$

$$\text{При } n > 30 \quad S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}{n}, \quad (8)$$

Если погрешности измерений малы по сравнению с измеряемым значением величины (это условие положено в основу всех формул), то оба способа дают одинаковые результаты. Однако в силу меньшей трудоемкости вычислений первый способ предпочтительней.

Таблица 1

Значение коэффициентов Стьюдента $t_{\alpha, n-1}$

n-1	α				n-1	α			
	0.1	0.05	0.01	0.001		0.1	0.05	0.01	0.001
1	6.314	12.70	63.65	636.6	6	1.943	2.447	3.707	5,959
2	2.920	4.303	9.925	31.59	7	1.895	2.365	3.449	5.405
3	2.353	3.182	5.841	12.94	8	1.860	2.306	3.355	5.041
4	2.132	2.776	4.604	8.610	9	1.833	2.262	3.250	4.781
5	2.016	2.571	4.032	6.849	10	1.812	2.228	3.169	4.587

В табл. 2 приведены формулы для расчета погрешности результатов косвенных измерений $\Delta_{y\Sigma}$ для некоторых простейших функций, полученные в результате подстановки y в уравнение (4).

Таблица 2

Значения $\Delta_{y\Sigma}$ для различных функций $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$

Вид функции	Значение $\Delta_{y\Sigma}$
$y = x_1 + x_2$	$\Delta_y = \sqrt{\Delta_{x_1}^2 + \Delta_{x_2}^2}$
$y = x_1 \cdot x_2$	$\Delta_y = \sqrt{x_2^{-2} \cdot \Delta_{x_1}^2 + x_1^{-2} \cdot \Delta_{x_2}^2}$
$y = x_1 / x_2$	$\Delta_y = \sqrt{x_2^{-2} \cdot \Delta_{x_1}^2 + x_1^{-2} \cdot x_2^{-4} \cdot \Delta_{x_2}^2}$
$y = x^n$	$\Delta_y = n \cdot x^{n-1} \cdot \Delta_x$
$y = \sin x$	$\Delta_y = \Delta_x \cdot \cos x$
$y = \cos x$	$\Delta_y = \Delta_x \cdot \sin x$
$y = \operatorname{tg} x$	$\Delta_y = \Delta_x \cdot \cos^{-2} x$
$y = \operatorname{ctg} x$	$\Delta_y = \Delta_x \cdot \sin^{-2} x$
$y = \ln x$	$\Delta_y = \Delta_x \cdot x^{-1}$
$y = \lg x$	$\Delta_y = 0.4 \Delta_x \cdot x^{-1}$

Методические указания

Методы обработки результатов косвенных измерений рассмотрены на примере оценки микротвердости поверхности детали H_μ по методике, описанной в лабораторной работе “Методика измерения твердости и микротвердости поверхности”. На приборе ПМТ-3 проводится измерение микротвердости пяти деталей из различных марок стали при нагрузке $F = 100$ г. При этом с прибора считывается не непосредственно само значение микротвердости H_μ (МПа), а диаметр d (мкм) отпечатка индентора в детали. Далее, микротвердость может быть определена из зависимости:

$$H_{\mu} = \frac{18540 \cdot F}{0.3d^2}, \quad (9)$$

где F – нагрузка, г. Учитывая, что измерение проводится при $F = 100$ г, зависимость упрощается:

$$H_{\mu} = \frac{18540 \cdot 100}{0.3d^2} = \frac{618 \cdot 10^4}{d^2}, \quad (10)$$

Окончательный результат измерений должен быть представлен в виде:

$$H_{\mu} = \bar{H}_{\mu} \pm \Delta_{H_{\mu}}, \quad \text{вероятность } P = p. \quad (11)$$

Как было описано выше (в разделе “основные положения”) существует два метода определения неизвестной правой части этого равенства.

Метод I - обработка результатов косвенных измерений с учетом математической зависимости между значением измеряемой величины и результатами прямых измерений.

1.1 Расчет среднего арифметического значения \bar{H}_{μ}

1.1.1. Вычисление \bar{d} :

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i, \quad (12)$$

где di – измеряемый размер отпечатка, мкм.

1.1.2. \bar{H}_{μ} вычисляют, используя \bar{d} , по известной формуле:

$$\bar{H}_{\mu} = \frac{618 \cdot 10^4}{\bar{d}^2}, \quad (13)$$

1.2. Расчет суммарной погрешности $\Delta_{H_{\mu}}$ ($\Delta_{y\Sigma}$).

Для оценки погрешности $\Delta_{H_{\mu}}$ при определении микротвердости H_{μ} используется формула (4) с учетом приближения $\Delta^2 = D$. Тогда

$$\Delta_{H_{\mu}} = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial d} \Delta d_{\Sigma}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial f} \Delta f_{\Sigma}\right)^2}, \quad (14)$$

где Δf_{Σ} - погрешность определения массы груза индентора, равная 0.001;

Δd_{Σ} -суммарная погрешность измерения диаметра отпечатка di , рассчитываемая по формулам из лабораторной работы № 1, а именно:

$$\Delta d_{\Sigma} = \Delta d_c + \Delta d_{cl} \quad (15)$$

Систематическая ошибка измерения, образуемая погрешностью прибора при измерении диаметра отпечатка, $\Delta d_c = 0.5$.

Случайная ошибка измерения Δd_{cl} рассчитывается по формулам:

$$\Delta d_{cl} = t_{\alpha, n-1} \frac{S_d}{\sqrt{n}}, \quad (16)$$

$$S_d^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2}{n-1}, \quad (17)$$

где

Метод II – обработка результатов косвенных измерений как прямых, т.е. используется та же методика как при обработке результатов прямых измерений.

2.1. Расчет точечной оценки \bar{H}_μ .

2.1.1. Вычисление $H_{\mu j}$ для каждого из значений $d_j (d_1, d_2 \dots d_m)$:

$$H_{\mu j} = \frac{618 \cdot 10^4}{d_j^2}. \quad (18)$$

2.1.2. Расчет среднего арифметического значения \bar{H}_μ :

$$\bar{H}_\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_{\mu j}, \quad (19)$$

где n – число прямых измерений.

2.2. Расчет суммарной погрешности $\Delta_{H\mu} (\Delta_{y\Sigma})$.

2.2.1. Вычисление $H_{\mu j}$ для каждого d_j , аналогично пп.2.1.1.

2.2.2. Расчет $\Delta_{H\mu}$ по формуле:

$$\Delta_{H\mu} = t_{\alpha, n-1} \frac{S_H}{\sqrt{n}}, \quad (20)$$

где $t_{\alpha, n-1}$ – коэффициент Стьюдента (значения приведены в табл.1); n – число измерений; α – вероятность ошибки I-го рода, рассчитываемая как $\alpha = 1-p$; S_H – среднее квадратичное отклонение суммарной погрешности измерений H_μ .

$$\text{При } n \leq 30 \quad S_H = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (H_{\mu j} - \bar{H}_\mu)^2}{n-1}}, \quad (21)$$

По таблице 1 для $\alpha = 0.05$ находят $t_{0.05}$, и затем $\Delta_{H\mu}$ по формуле (20).

Более подробно второй метод описан в лабораторной работе №1.

Порядок выполнения работы

1. Выполнить 5 измерений di (диаметр отпечатка, мкм).
2. Рассчитать \bar{H}_μ и $\Delta_{H\mu}$ двумя методами, заполнить таблицы по форме табл. 3 и табл. 4. Методика расчетов представлена в разделах «Основные положения» и «Методические указания».

Таблица 3

Результаты измерений и расчетов по методу I

n	d_{i_s} мкм	\bar{d} , (12)	\bar{H}_μ , (13)	S_d (17)	Δd_{cn} , (16)	Δd_c	Δd_Σ , (15)	Δf_Σ	ΔH_μ , (14)
1									
2									
...									
5									

Таблица 4

Результаты измерений и расчетов по методу II

n	d_i , мкм	$H_{\mu j}$, (18)	\bar{H}_{μ} , (19)	S_H , (21)	ΔH_{μ} , (20)
1					
2					
...					
5					

- Сравнить результаты, полученные различными методами.
- Для указанного преподавателем варианта условий косвенных измерений (табл. 5) рассчитать \bar{y} , $\Delta_{y\Sigma}$ по первому методу. Результат записать по форме уравнения (2).

Таблица 5

Задания для оценки погрешности косвенных измерений

№	Вид функции $y = f(x_1, x_2 \dots x_m)$	\bar{x}_1	\bar{x}_2	Δx_1	Δx_2
1	$y = 15x_1$	10	-	0.1	-
2	$y = 15x_1/x_2$	14	4	1.5	0.6
3	$y = 0.2x_1 + 2.1x_2$	12	100	1.2	5
4	$y = 2.1 \ln x_1 + 0.2 \sin x$	12	15	0.3	1.1
5	$y = 3.5x_1 + 0.8x_1^2$	2.6	-	0.4	
6	$y = 0.2x_1 + 0.7x_2 + 1.1x_1x_2$	4	6	0.2	0.3
7	$y = 2.1x^2$	5	-	0.1	-
8	$y = 7.3^x$	2	-	0.01	-
9	$y = 1.1 + 2.3x_1x_2$	3.5	6.8	0.1	0.2
10	$y = 1.2x_1x_2 + 2.3x_1^2 + \frac{1}{x^2}$	10	15	0.5	0.3

Содержание отчета

- Название и цель работы.
- Описание выборочного метода статистической обработки результатов косвенных измерений (методика определения истинного значения измеряемой величины y при косвенных измерениях), включая форму представления истинного значения измеряемой величины; формулы расчета точечной оценки измеряемой величины \bar{y} (\bar{H}_{μ}), и суммарной ошибки измерений $\Delta_{y\Sigma}$ ($\Delta_{H_{\mu}}$) двумя методами.
- Таблицы результатов измерений d_i и расчетов по форме таблиц 3 и 4, включающие результаты расчетов точечной оценки \bar{H}_{μ} и погрешности измерений ΔH_{μ} двумя методами.

4. Окончательный результат измерений, представленный по форме уравнения (11) для обоих методов.
5. Расчеты \bar{y} , $\Delta_{y\Sigma}$ по методу I для указанного преподавателем варианта задачи из табл. 5; окончательный результат измерения y по форме уравнения (2).
6. Выводы о сопоставимости данных, полученных методами I и II.

Контрольные вопросы

1. Какие измерения являются косвенными? Примеры.
2. Цель выборочного метода статистической обработки результатов косвенных измерений.
3. Расчет точечной оценки измеряемой величины по методу I.
4. Расчет суммарной погрешности косвенного измерения $\Delta_{y\Sigma}$ по методу I.
5. Расчет точечной оценки измеряемой величины по методу II.
6. Расчет суммарной погрешности косвенного измерения $\Delta_{y\Sigma}$ по методу II.
7. Форма записи результата косвенных измерений.

Литература

1. Кане М.М. Основы научных исследований в технологии машиностроения: Учебн. пособие для вузов. – Мн.: Выш. школа, 1987.
2. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978.
3. Математическая обработка результатов эксперимента / В.К. Калоша, С.И. Лобко, Т.С. Чихова. – Мн.: Выш. Школа, 1982.

Лабораторная работа № 3
ПРИМЕНЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННО-РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА
(КРА) ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ
(V, S) НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Цель работы: практическое освоение методик планирования эксперимента и корреляционно-регрессионного анализа (КРА) при исследовании влияния режимов шлифования (скорости и подачи) на шероховатость обработанной поверхности детали.

Оборудование и принадлежности: шлифовальный станок мод. 3E711B, образцы, профилограф-профилометр мод.201, калькулятор.

Основные положения

Корреляционный анализ изучает закон поведения случайной величины (Y) в зависимости от других случайных величин (x_1, x_2, \dots, x_n). Аналитическая форма представления корреляционной зависимости реализуется с помощью уравнения регрессии. В математической статистике для описания неизвестных функций наиболее часто используют полиномиальные модели. Степень полинома определяется максимальной степенью входящих в него переменных. Например, для однофакторной задачи: полином нулевой степени $y = b_0$, полином первой степени $y = b_0 + b_1x$, полином второй степени $y = b_0 + b_1x + b_{11}x^2$ и т.д. На первом этапе КРА используют линейные уравнения регрессии. Если линейная модель неудовлетворительно описывает изучаемую зависимость, степень полинома постепенно увеличивают.

Данная лабораторная работа посвящена решению двухфакторной задачи: выведению уравнения, отражающего корреляцию шероховатости обработанной поверхности детали со скоростью и подачей при шлифовании. Поэтому в качестве уравнения регрессии можно попробовать линейный двухфакторный полином первой степени:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \quad (1)$$

где Y - параметр шероховатости (R_a); b_0, b_1, b_2 - коэффициенты уравнения регрессии; x_1 - скорость резания; x_2 - подача. После конкретизации факторов уравнение (1) примет вид:

$$R_a = b_0 + b_1v + b_2s, \quad (2)$$

Методические указания

Чистовое шлифование образцов из стали 45 производится на плоскошлифовальном станке мод. 3E711B. Перед шлифованием необходимо выполнить правку круга алмазным карандашом. Высота микронеровностей поверхности детали после шлифования определяется с помощью профилографа-профилометра мод.201.

I. Планирование эксперимента проводится с использованием метода полного факторного плана (ПФП). Для ПФП количество экспериментов

рассчитывается по формуле $n=2^k$, где k - количество факторов. В случае планирования двухфакторного эксперимента, требуемое количество опытов $n=2^2=4$. Каждому фактору присваивается кодовое значение (скорость резания - X_1 ; подача - X_2), и назначаются *основной уровень варьирования* X_{i0} (V_0 и S_0) и *интервал варьирования* (Δ_v , Δ_s); рассчитываются уровни варьирования *верхний* ($V_0+\Delta_v$, $S_0+\Delta_s$) и *нижний* ($V_0 - \Delta_v$, $S_0 - \Delta_s$). Основные составляющие плана представлены в табл.1.

Таблица 1

План эксперимента		
Уровни варьирования	Натуральные (кодовые) значения факторов	
	V (X_1), м/мин	S (X_2), мм/ход
0 Основной (X_{i0})	V_0	S_0
Интервал (Δ)	Δ_v	Δ_s
+1 Верхний : $X_{i0}+\Delta$	$V_0+\Delta_v$	$S_0+\Delta_s$
- 1 Нижний : $X_{i0}-\Delta$	$V_0-\Delta_v$	$S_0-\Delta_s$

II. Согласно матрице планирования эксперимента представленной в табл. 2, рассчитать действительные значения скорости и подачи. Действительные значения переменных (V_j , S_j) связаны с кодированными значениями факторов (X_{1j} , X_{2j}) следующими соотношениями:

$$\text{Скорость} \quad V_j = V_0 + x_{1j} \cdot \Delta_v \quad , \quad (3)$$

$$\text{Подача} \quad S_j = S_0 + x_{2j} \cdot \Delta_s \quad , \quad (4)$$

где V_0 , S_0 – основные уровни варьирования скорости и подачи (табл. 1); X_{1j} , X_{2j} – кодированные значения соответственно скорости и подачи, представленные в табл. 2; Δ_v , Δ_s – интервалы варьирования скорости и подачи в эксперименте (табл. 1).

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента

№ опы- та	Матрица планирования				Реализация матрицы планирования (эксперимент) R_a , мкм				Расчетные значения	
	Факторы									
	V м/мин		S мм/ход		Y_{j1}	y_{j2}	...	y_{jk}	\bar{y}_j	S_j^2
	Кодовое значение X_{1j}	Действит. значение V_j	Кодовое значение X_{2j}	Действит. значение S_j						
1	+1		+1							
2	+1		-1							
3	-1		+1							
4	-1		-1							

III. В соответствии с матрицей планирования проводится эксперимент (шлифование образцов) и определяется высота микронеровностей профиля обработанной поверхности. Результаты первой, второй, ..., k-ой реализации матрицы планирования (R_a , мкм) заносятся в табл. 2 как $y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jk}$.

IV. Для каждой серии параллельных опытов вычисляется среднее арифметическое значение полученного результата \bar{y}_j по формуле:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_{ji}, \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad (5)$$

где k – число параллельных опытов, проводимых при одинаковых условиях.

V. Дисперсия (среднеквадратичное отклонение) для каждой серии параллельных опытов определяется по формуле:

$$S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (y_{ji} - \bar{y}_j)^2 \quad (6)$$

Вычисленные значения записываются в соответствующие графы табл. 2.

VI. Проверка воспроизводимости опытов проводится на основе расчета критерия Кохрена и сравнения расчетного значения (G_p) с табличным ($G_{\text{табл}}$) при доверительной вероятности $P=0.95$. Формула для расчета G_p :

$$G_p = \frac{S_{j\max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} \quad (7)$$

где $S_{j\max}^2$ – максимальное значение дисперсии из j -ой серии опытов.

$G_{\text{табл}}$ берется из таблицы 3 в зависимости от n – общего количества оценок дисперсии и k – числа параллельных опытов.

Таблица 3

Значения критерия Кохрена при доверительной вероятности $P = 0.95$

n	k-1			
	1	2	3	4
2	0.999	0.998	0.939	0.906
3	0.967	0.871	0.798	0.746
4	0.907	0.768	0.684	0.628
5	0.841	0.684	0.598	0.544
6	0.781	0.616	0.532	0.480
7	0.727	0.561	0.480	0.431
8	0.680	0.516	0.438	0.391
9	0.639	0.478	0.403	0.358
10	0.602	0.445	0.373	0.331
12	0.541	0.392	0.326	0.288
15	0.471	0.335	0.276	0.242
20	0.389	0.271	0.221	0.191

Если $G_p > G_{\text{табл}}$, гипотеза отвергается и эксперимент повторяют, если $G_p \leq G_{\text{табл}}$, гипотеза воспроизводимости опытов принимается, и приступают к вычислению коэффициентов уравнения регрессии.

VII. Расчет коэффициентов уравнения регрессии (2):

$$b_o = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{y}_j, \quad (8)$$

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ji} \bar{y}_j, \quad (9)$$

где n – количество опытов ($n = 4$); X_{ji} – кодированное значение i -го фактора в j -м опыте.

VIII. Производится определение значимости коэффициентов регрессии. Коэффициент регрессии статистически значим, если выполняется условие

$$|b_i| \geq t S_b, \quad (10)$$

где t – критерий Стьюдента, который выбирают из табл. 4 для доверительной вероятности $P = 0.95$.

S_b – оценка дисперсии коэффициента регрессии:

$$S_b = \sqrt{\frac{S_y^2}{n}}, \quad (11)$$

где S_y^2 – оценка среднего значения дисперсии:

$$S_y^2 = \frac{1}{kn} \sum_{j=1}^N S_j^2, \quad (12)$$

где k – число параллельных опытов.

S_j^2 – дисперсии результатов реализации, берутся из табл. 2;

n – количество опытов, проводимых при разных условиях ($n = 4$).

Таблица 4

Значение коэффициента Стьюдента при доверительной вероятности $P=0.95$

n-1	t	n-1	t	n-1	t	n-1	t
1	12.70	9	2.26	17	2.11	25	2.06
2	4.30	10	2.23	18	2.10	26	2.06
3	3.18	11	2.20	19	2.09	27	2.05
4	2.78	12	2.18	20	2.08	28	2.05
5	2.57	13	2.16	21	2.07	29	2.05
6	2.45	14	2.14	22	2.07	30	2.04
7	2.37	15	2.13	23	2.07	31	2.02
8	2.31	16	2.12	24	2.06	32	2.00

Если неравенство (10) не соблюдается, следовательно, коэффициент регрессии незначим, и соответствующий член можно исключить из уравнения регрессии. Анализируя значения и знак полученных коэффициентов уравнения регрессии b_1 и b_2 , можно сделать вывод о влиянии обоих факторов на высоту микронеровностей поверхности.

IX. Запись уравнения регрессии осуществляется подстановкой значимых коэффициентов регрессии (b_0 , b_1 и b_2) с соответствующими знаками в уравнение (2).

X. Проверка адекватности (соответствия) полученной зависимости экспериментальным данным осуществляется по результатам расчета критерия Фишера F_p и сравнения его с табличным значением $F_{\text{табл}}$ (табл. 5). Формула расчета F_p :

$$F_p = \frac{\max(S_{a.d.}^2; S_{\bar{y}}^2)}{\min(S_{a.d.}^2; S_{\bar{y}}^2)}, \quad (13)$$

где $S_{\bar{y}}^2$ - оценка среднего значения дисперсии, рассчитываемая по (12);

$S_{a.d.}^2$ - оценка дисперсии адекватности, рассчитываемая по формуле:

$$S_{a.d.}^2 = \frac{1}{n - B} \sum_{j=1}^n (y_j^p - y_j^3)^2, \quad (14)$$

где B – число значимых коэффициентов уравнения регрессии (2), включая свободный член (b_0); y_j^3 и y_j^p - экспериментальное и расчетное значения результатов реализации матрицы планирования в j -ом опыте: $y_j^3 = \bar{y}_j$ (табл. 2); y_j^p определяются подстановкой в полученное в п. IX уравнение регрессии вместо значений V_j и S_j кодовых значений факторов x_{ij} из матрицы планирования (табл. 2).

Таблица 5

Значение критерия Фишера при доверительной вероятности $P = 0.95$

n(k-1)	n - B				n(k-1)	n - B			
	1	2	3	4		1	2	3	4
1	161.45	199.50	215.72	224.57	16	4.49	3.63	3.24	3.01
2	18.51	19.00	19.16	19.25	17	4.45	3.59	3.20	2.96
3	10.13	9.55	9.28	9.12	18	4.41	3.55	3.16	2.93
4	7.71	6.94	6.59	6.39	19	4.38	3.52	3.13	2.90
5	6.61	5.79	5.41	5.19	20	4.35	3.49	3.10	2.87
6	5.99	5.14	4.76	4.53	21	4.32	3.47	3.07	2.84
7	5.59	4.74	4.35	4.12	22	4.30	3.44	3.05	2.82
8	5.32	4.46	4.07	3.84	23	4.28	3.42	3.03	2.80
9	5.12	4.26	3.86	3.63	24	4.26	3.40	3.01	2.78
10	4.96	4.10	3.71	3.48	25	4.24	3.38	2.99	2.76
11	4.84	3.98	3.59	3.36	26	4.22	3.37	2.98	2.74
12	4.75	3.88	3.49	3.26	27	4.21	3.35	2.96	2.73
13	4.67	3.80	3.41	3.18	28	4.20	3.34	2.95	2.71
14	4.60	3.74	3.34	3.11	29	4.18	3.33	2.93	2.70
15	4.54	3.68	3.29	3.06	30	4.17	3.32	2.92	2.69

В числителе уравнения (13) находится большая, а в знаменателе – меньшая из оценок дисперсии. Табличное значение критерия Фишера ($F_{\text{табл}}$) вы-

бирают из таблицы 5 для доверительной вероятности $P = 0.95$ и соответствующих n , k и B . При $F_p < F_{\text{табл}}$, уравнение регрессии считается адекватным экспериментальным данным. Если полученное уравнение неадекватно описывает эксперимент, то степень полиномиальной модели следует увеличить и расчет по пп. VII – X повторить.

XI. Построение полученной корреляционной зависимости в координатах $R_a/V/S$. Графически полученная зависимость представляет собой поверхность отклика функции изменения шероховатости поверхности от скорости и подачи шлифования.

Порядок проведения работы

Для обоих факторов преподавателем назначаются: основной уровень варьирования X_{i0} (V_0 и S_0) и интервал варьирования (Δ_v , Δ_s); после чего студентам необходимо:

- (1) Рассчитать верхний уровень варьирования ($V_0 + \Delta_v$, $S_0 + \Delta_s$) и нижний уровень варьирования ($V_0 - \Delta_v$, $S_0 - \Delta_s$). Результаты занести в табл. 1.
- (2) Рассчитать действительные значения скорости (V_j) и подачи (S_j) по формулам (3) и (4). Результаты занести в левую часть таблицы 2.
- (3) Провести эксперимент в соответствии с матрицей планирования и определить высоту микронеровностей профиля обработанной поверхности (R_a , мкм) - y_{j1} , y_{j2} , ..., y_{jk} . Результаты первой, второй, ..., k -ой реализации матрицы планирования (параллельных серий опытов) занести в среднюю часть таблицы 2.
- (4) Для каждой серии параллельных опытов рассчитать среднее арифметическое значение результатов реализаций \bar{y}_j по формуле (5) и дисперсию результатов реализации S_j^2 по (6).
- (5) Оценить воспроизводимость опытов по критерию Кохрена, используя уравнение (7) и таблицу 3.
- (6) Рассчитать коэффициенты уравнения регрессии (b_0 и b_i) по уравнениям (8) и (9) и оценить их значимость по (10 – 12).
- (7) Записать уравнение регрессии, подставив значения коэффициентов в (2).
- (8) Осуществить проверку адекватности полученной зависимости экспериментальным данным по критерию Фишера, используя уравнения (13) и (14) и таблицу 5.
- (9) Построить график полученной зависимости.
- (10) Проанализировать полученные результаты.
- (11) Составить отчет.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Описание методики КРА.
3. План эксперимента, включая описание метода ПФП и таблицу 1.

4. Расчет действительных значений скорости (V_j) и подачи (S_j) по формулам (3) и (4).
5. Матрица планирования и результаты эксперимента (табл. 2).
6. Расчет средних арифметических значений результатов реализаций \bar{y}_j по (5) и дисперсий результатов реализаций S_j^2 по (6).
7. Проверка воспроизводимости опытов по критерию Кохрена, используя уравнение (7).
8. Расчет коэффициентов уравнения регрессии (b_i) по уравнениям (8, 9).
9. Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии по (10-12).
10. Уравнение регрессии, отражающее корреляцию шероховатости обработанной поверхности детали со скоростью и подачей при шлифовании, полученное подстановкой значений b_i в уравнение (2).
11. Определение адекватности полученной зависимости по критерию Фишера (12-14).
12. Поверхность отклика: графическое изображение влияния режимов шлифования на высоту микронеровностей.
13. Выводы о влиянии обоих факторов (подачи и скорости шлифования) на высоту микронеровностей поверхности.

Контрольные вопросы

1. Что изучает КРА?
2. Уравнение регрессии.
3. Планирование с использованием метода ПФП.
4. Как проверяется воспроизводимость опытов?
5. Как определяются коэффициенты уравнения регрессии?
6. Как определяется статистическая значимость коэффициентов уравнения регрессии?
7. Как проверить адекватно ли полученное уравнение регрессии экспериментальным данным?
8. Как влияют скорость и подача при плоском шлифовании на высоту микронеровностей поверхности?

Литература

1. Калоша В.К., Лобко С.И., Чикова Т.С. Математическая обработка результатов эксперимента. - Мн.: Выш. шк. 1982. -103с.
2. Кане М.М. Основы научных исследований в технологии машиностроения.-Мн.: Выш шк. 1987.-231с.

Лабораторная работа № 4
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: Изучение методов оценки атмосферостойкости материалов (полимеров и композиционных материалов на основе полимеров); ознакомление с работой камеры искусственной погоды ИП-1-3 и низкотемпературной установки НС 280/75.

Оборудование и принадлежности: камера искусственной погоды ИП-1-3, низкотемпературная установка НС 280/75, набор образцов.

Основные положения

Атмосферостойкость материалов – это их способность выдерживать действие различных атмосферных факторов (солнечной радиации, тепла, кислорода воздуха, влаги, промышленных газов и т. д.) в течение продолжительного времени без значительного изменения внешнего вида и эксплуатационных свойств (физико-механических, диэлектрических и др.).

Атмосферные факторы, вызывающие старение полимера:

I. **Солнечное излучение:** УФ-, видимое и ИК-излучение. ИК-излучение вызывает нагревание образцов; видимое излучение способствует нагреванию и может вдобавок инициировать в полимерах фотофизические и фотохимические превращения. УФ-составляющая является наиболее опасной. Взаимодействие полимера с коротковолновым излучением приводит к необратимым физико-химическим процессам в материале.

II. **Температура** воздуха - активатор старения полимерных материалов. Резкие термоудары (перепад температуры в течение суток) приводят к возникновению или возрастанию остаточных напряжений в изделиях.

III. **Окислители**, присутствующие в составе земной атмосферы (кислород, озон, перекись водорода), способствуют термоокислительному разрушению полимеров.

IV. **Промышленные примеси:** диоксид серы, оксид азота. При наличии воды и SO_2 в атмосфере под влиянием излучения образуется разбавленная H_2SO_4 , разрушающая полимерные материалы.

Методы исследования атмосферостойкости классифицируют:

(1) По времени проведения испытаний: (1.1) **долгосрочные**, проводимые на испытательных станциях; (1.2) **ускоренные** испытания, проводимые в специальных лабораториях. *Главным критерием* применимости того или иного метода ускоренных испытаний является адекватность физико-химических процессов, которые протекают в полимерном материале явлениям, происходящим в нем при экспозиции в естественных условиях.

(2) По природе факторов, воздействующих на образец (при проведении ускоренных испытаний) различают: (2.1) **комплексные** испытания, включающие воздействие двух и более факторов (температура Т+влажность, Т+влажность+УФ, Т+влажность+УФ+ SO_2 и т. д.); комплексные испытания проводятся в камерах искусственной погоды (ИП-1-2, ИП-1-3 и др.); (2.2)

термоциклические испытания, включающие циклическое воздействие различных (чаще всего знакопеременных) температур. Испытания проводятся в термокамерах, низкотемпературных установках, термоклавах и тд.

(3) По циклическости воздействия факторов на образцы: (3.1) *одноциклические*; (3.2) *циклические* методы воздействия.

Методические указания

I. Камера искусственной погоды марки ИП-1-3 предназначена для проведения ускоренных испытаний материалов на атмосферостойкость. Она позволяет реализовать комплексное воздействие на образец следующих факторов: температура, влажность и искусственный свет.

Основные технические характеристики ИП-1-3

1	Внутренние размеры камеры, мм	880x880x950
2	Количество размещаемых образцов, шт.	60
3	Размер образца, мм	60x150
4	Количество дуговых ламп, шт.	2
5	Количество ртутно-кварцевых ламп, шт.	2
6	Пределы регулирования температуры в камере в процессе испытания образцов, °С	+30...+90
7	Количество режимов орошения водой, шт	6
8	Скорость вращения барабана с образцами, об/мин	1

Основные узлы ИП-1-3

1. **Металлический каркас** представляет собой сварную конструкцию, служащую для размещения в ней основных узлов аппарата.
2. **Камера.** Три вертикальные стенки камеры глухие, четвертая стенка выполнена в виде двухстворчатой двери для установки и смены образцов. В крышке камеры крепятся лампы. Днище камеры представляет собой ванну для сбора и отвода орошающей образцы воды.
3. **Барабан** с приводом расположен в нижней части камеры и служит для крепления и перемещения образцов. Образцы крепятся с внутренней стороны барабанного цилиндра вертикально. Вращение барабана осуществляется электродвигателем автоматически с включением любой из ламп.
4. **Узел дуговых и ртутно-кварцевых ламп,** используемых в качестве источника тепла и УФ-излучения. С помощью специальных лампочных колпаков длина волны излучения λ может изменяться от 254 до 546 мм. С изменением λ изменяется и спектральная пропускная способность от 0 ($\lambda=254$ мм) до 90% ($\lambda=546$ мм).
5. **Узел регулирования** температурного режима. Основным способом регулирования температуры является нагнетание холодного воздуха в камеру при помощи вентилятора. Вентилятор автоматически включается, как только температура в камере поднимется (в результате работы ламп) выше заданной. При снижении температуры ниже заданной, вентилятор автома-

тически выключается. Датчиком температуры служит термобаллон манометрического термометра ТС-100. Указатель прибора ТС-100 устанавливается на требуемую температуру. При совпадении концов указателя и стрелки прибора контакты в приборе замыкаются, и срабатывает промежуточное реле, включающее двигатель вентилятора. Дополнительное охлаждение достигается открытием заслонок на верхней крышке камеры.

6. **Узел водяного орошения** предусматривает возможность внутреннего и наружного орошения образцов. Включение наружного орошения осуществляется вручную поворотом рукоятки верхнего крана. Наружное орошение производится независимо от автоматического включения внутреннего орошения через сопло установленное под углом 45° к поверхности вращающегося барабана. Внутреннее орошение производится от водяного коллектора, снабженного отверстиями. После орошения образцов вода из ванны вытекает в канализацию. Камера предусматривает шесть режимов внутреннего орошения: (1) 0-60; (2) 3-17; (3) 10-50; (4) 30-30; (5) 40-20; (6) 60-0, где первая цифра означает время орошения в минутах, а вторая – перерыв в минутах.
7. **Шкаф управления** содержит:
 - 7.1 приборы управления и контроля работы узла ламп;
 - 7.2 приборы управления и регулирования температурного режима;
 - 7.3 приборы управления и регулирования узла орошения;
 - 7.4 приборы включения электродвигателя привода барабана.

Порядок работы на ИП-1-3

1. Заложить образцы в кассеты барабана таким образом, чтобы лицевая сторона образцов была обращена внутрь барабана.
2. Выбрать схему и режим орошения, открыть краны орошения, установить переключатель программного реле на один из шести режимов орошения.
3. Установить указатель термометра ТС-100 на требуемую температуру.
4. Выбрать источник УФ-излучения и установить колпак, соответствующий определенной длине волны излучения.
5. Закрывать дверки камеры.
6. Нажатием на пусковую кнопку включить в работу одну из ламп. При этом автоматически включаются в работу и все остальные приборы.
7. Производить регулярное наблюдение за работой камеры, а именно: (1) за горением ламп (через стекла в дверках камеры только в защитных очках); (2) за поступлением воды через сопла и утечкой воды из ванны камеры; (3) за показанием температуры по шкале ТГ-610. В случае повышения температуры в камере свыше заданной открыть заслонки в верхней крышке камеры.
8. Для остановки испытания выключить все лампы нажатием на кнопку "стоп".

II. Низкотемпературная установка марки НС 280/75 предназначена для искусственного старения материалов (испытания на атмосферостойкость) при температурах от -40 до -75°C .

Основные технические характеристики НС 280/75

1	Диапазон рабочих температур, °С	- 40... – 75
2	Емкость рабочей камеры, л	280
3	Размеры рабочей емкости, мм	790x520x680
4	Хладагент (P12/P13)	CC12F3/ CC1F3

Основные рабочие части НС 280/75

1. **Замораживающая** часть состоит из металлического кожуха, танка, испарителя, вентилятора испарителя, привода вентилятора, фильтра-дегидратора. Пространство между кожухом и танком заполнено изоляционным материалом – вспененным полиуретаном.
2. **Машинная** часть состоит из компрессорно-конденсаторного агрегата с конденсатором воздушного охлаждения и приборов регулирования (регулятор температуры, выключатель работы установки). В агрегате установлена холодильная машина, которая состоит из двух компрессоров P12 и P13, работающих на хладагентах.

Принцип работы установки

После включения установки компрессор P12 охлаждает промежуточный теплообменник. После охлаждения до $T = -30...-35^{\circ}\text{C}$ включается компрессор P13, обеспечивающий давление конденсации хладагента в пределах 1.0 МПа. После достижения установленной температуры, компрессор P13 выключается. Далее температура поддерживается с помощью P12, включение и выключение которого происходит в случае тепловых потерь.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с методикой оценки атмосферостойкости материалов.
2. Изучить устройство, порядок работы и основные характеристики камеры искусственной погоды марки ИП-1-3.
3. Изучить принцип работы, устройство и основные технические характеристики низкотемпературной установки марки НС 280/75.
4. Установить образцы на испытание.
5. Задать режимы работы ИП-1-3 и НС 280/75 для проведения испытания на атмосферостойкость с комплексным воздействием факторов, указанных в таблице:

Режим		Время, ч	Установка
№	Воздействующие факторы		
I	УФ-излучение ($\lambda=254$ мм), $t= 80^{\circ}\text{C}$, влажность 80%	3	ИП-1-3
II	$t= - 45^{\circ}\text{C}$	3	НС 280/75
I	УФ-излучение ($\lambda=254$ мм), $t= 80^{\circ}\text{C}$, влажность 80%	3	ИП-1-3
III	$t= 25^{\circ}\text{C}$	15	-

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Теоретическая часть, содержащая описание метода оценки атмосферостойкости материалов (включая определение атмосферостойкости; факторы воздействия и т.д.).
3. Устройство камеры искусственной погоды ИП-1-3 и низкотемпературной установки НС 280/75.
4. Таблица режимов комплексного воздействия.

Контрольные вопросы

1. Атмосферостойкость. Определение.
2. Атмосферные факторы, вызывающие старение полимеров.
3. Классификация методов оценки атмосферостойкости.
4. Главный критерий применимости метода ускоренных испытаний.
5. Как проводятся комплексные ускоренные испытания материалов на атмосферостойкость?
6. Устройство и принцип работы камеры искусственной погоды ИП-1-3.

Литература

1. Л.С.Корецкая. Атмосферостойкость полимерных материалов. – Мн.: Наука і тэхніка, 1993, 206 с.
2. ГОСТ 24813-81 "Испытания изделий на воздействие климатических факторов".
3. ГОСТ 16962.1-89 "Методы испытаний на устойчивость к климатическим внешним воздействующим факторам".
4. ГОСТ 9.708-83 "Пластмассы. Методы испытаний на старение при воздействии естественных и искусственных климатических факторов".
5. "Пластмассы. Метод определения стойкости к атмосферным воздействиям" ASTM D 1485-75.

Лабораторная работа №5
СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Цель работы: Ознакомление с основными методами изучения химической структуры и состава материала; освоение метода инфракрасной спектроскопии с помощью ИК-спектрофотометра марки UR-20; приобретение навыков снятия и расшифровки ИК-спектров.

Оборудование и принадлежности: Инфракрасный спектрофотометр марки UR-20 (Германия); набор исследуемых материалов; комплект кювет для установки образцов; атлас ИК-спектров.

Основные положения

Спектроскопические методы анализа материалов основаны на изучении реакции поверхности на воздействие различных факторов.

Классификация спектроскопических методов:

1. По виду зондирующего поверхность образца потока частиц. Существует четыре основных вида зондирующих поверхность потока частиц: электроны, ионы, нейтральные частицы и фотоны. Кроме этого поверхность может подвергаться и другим видам воздействия, таким как нагревание, электрическое или магнитное поле, звуковые волны.
2. По виду эмиттируемых частиц. Зондирующие поверхность частицы вызывают эмиссию (испускание) вторичных частиц: электронов, ионов, фотонов или нейтральных атомов, несущих информацию о поверхности на соответствующий детектор.
3. По диапазону длин электромагнитных волн зондирующего излучения: γ -спектроскопия, рентгеновская, оптическая, радиочастотная.
4. По типам квантовых переходов (или видам движения атомов в молекулах), которые вызывает зондирующее излучение: (1) электронная; (2) колебательная; (3) вращательная; (4) магнитная; (5) электрическая; (6) тонкой структуры; (7) сверхтонкой структуры.
5. По типам исследуемых объектов: (1) спектроскопия атомов; (2) молекулярная спектроскопия; (3) спектроскопия конденсированных сред; (4) ядерная спектроскопия.

К основным методам *электронной* спектроскопии относятся рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), оже-электронная спектроскопия (ОЭС) и ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (УФЭС). В их основе лежат процессы, происходящие в электронной подсистеме твердого тела при облучении его фотонами и электронами. Рентгеновские фотоны, падающие на поверхность образца с определённой энергией, вызывают явление фотоэффекта. Далее анализатор разделяет поток электронов, «выбиваемых» из поверхностного слоя образца, по кинетическим энергиям $E_{кин}$, а детектор определяет значение $E_{кин}$. Зная энергию поглощённого фотона $h\nu$ и кинетическую энергию выбитого электро-

на $E_{\text{кин}}$, с помощью уравнения Эйнштейна можно рассчитать $E_{\text{св}}$ - энергию связи электрона изучаемого уровня с ядром:

$$E_{\text{св}} = h\nu - E_{\text{кин}} - \phi,$$

где ϕ - константа прибора.

Идентификацию химических элементов, из которых состоит поверхность изучаемого материала, проводят по значениям $E_{\text{св}}$, приведенным в таблицах в различных литературных источниках.

Основные методы *колебательной* спектроскопии - инфракрасная спектроскопия (ИКС), ультрафиолетовая спектроскопия (УФС) и спектроскопия комбинационного рассеивания (КР).

В основе ИК – методов колебательной спектроскопии лежит явление, состоящее в том, что различные атомные группы поглощают и отражают излучение строго индивидуальной частоты, которая называется характеристической для данной группы атомов. Если просканировать поверхность образца материала последовательно по всему диапазону частот, получим колебательный спектр, полосы в котором соответствуют определённым функциональным группам. Для идентификации материала используют каталоги характеристических спектров.

Методические указания

Метод колебательной инфракрасной спектроскопии рассмотрен на примере ИК спектрофотометра UR-20 (Германия)

Принцип работы UR-20 показан на рис.1. От источника излучения 1 ИК-лучи проходят два одинаковых пути, а именно, через кювету измерения 2 и кювету сравнения 3, и далее падают на вращающееся секторное зеркало 4. С его помощью оба луча направляются попеременно (каждые 50 мсек) на входную щель монохроматора 5. После разложения в спектр на выходной щели монохроматора лучи с определенным волновым числом попадают на приемник излучения 6, который превращает их в соответствующее электрическое напряжение. Величина последнего является мерой интенсивности излучения. Если энергия излучения обоих лучевых потоков (проходящих через 2 и 3) различна, то приемник регистрирует переменную составляющую напряжения, величина которой соответствует разности интенсивности обоих излучений. Далее переменная составляющая усиливается в усилителе 7. Полученное таким образом переменное напряжение, во-первых, управляет фазочувствительным выпрямлением с помощью секторного зеркала 4, включающегося синхронно с переключением лучевых потоков; во-вторых, через двигатель 8 приводит в движение пишущий штифт самописца 9. Таким образом, в зависимости от величины переменного напряжения регистрируется поглощение света образцом исследуемого материала, а при постоянном напряжении пишущий штифт регистрирует пропускание исследуемого образца.

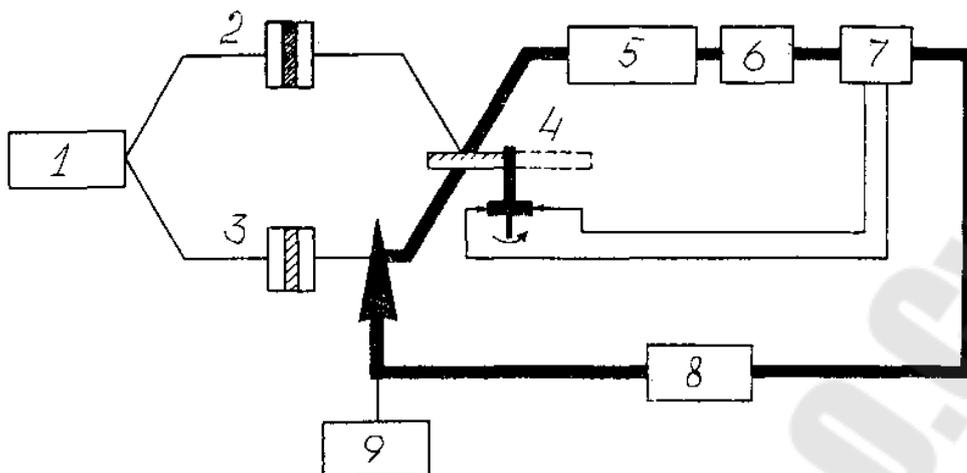


Рис.1. Схема работы UR-20:

1 – источник излучения; 2 – кювета измерения; 3 – кювета сравнения; 4 – вращающийся зеркальный сектор; 5 – монохроматор; 6 – приемник излучения; 7 – усилитель; 8 – двигатель; 9 – самописец. Жирная линия - контур регулирования.

Оптико-механическая схема прибора представлена на рис. 2. В качестве источника излучения (мощностью 450 Вт) служит накаливаемый электрическим током силитовый стержень 1 (SiC). Лучи от него проектируются с помощью системы зеркал на образцы измерения 2 и сравнения 3.

Далее через систему зеркал, вращающийся зеркальный сектор 4, измерительную диафрагму 5, и предварительный диспергатор 6 (предназначен для уменьшения доли рассеянного света), лучи попадают на входную щель 7 монохроматора, который осуществляет разложение пучка лучей в спектр. Основными составными частями монохроматора являются зеркало коллиматора 8, система призм 9 и зеркало Литтрова 10. Зеркало коллиматора отбрасывает луч на одну из трех призм, выполненных из KBr, NaCl и LiF. Они обеспечивают расширение рабочего диапазона длин волн от 400 до 5000 см^{-1} . Принцип действия монохроматора заключается в том, что электромагнитные излучения разной длины отклоняются призмой на различные углы.

В процессе работы призма остается неподвижной, а при помощи кулачкового механизма 11 поворачивается зеркало Литтрова 10. Любое изменение положения зеркала Литтрова меняет настройку (юстировку) прибора на регистрацию излучения с определенной длиной волны. Луч проходит через призму дважды: он отражается от зеркала-коллиматора 8 и зеркала Литтрова 10 и через выходную щель монохроматора 12 попадает на приемник 13. Приемником служит термоэлемент, преобразующий электромагнитную энергию излучения в электрическое напряжение, которое затем усиливается с помощью усилителя 14. Применение двигателя 15 уменьшает восприимчивость прибора к помехам. Самописец 16 записывает спектр на бумаге, (ширина записи составляет 100 мм) и автоматически регистрирует его в координатах: волновое число - пропускание в процентах.

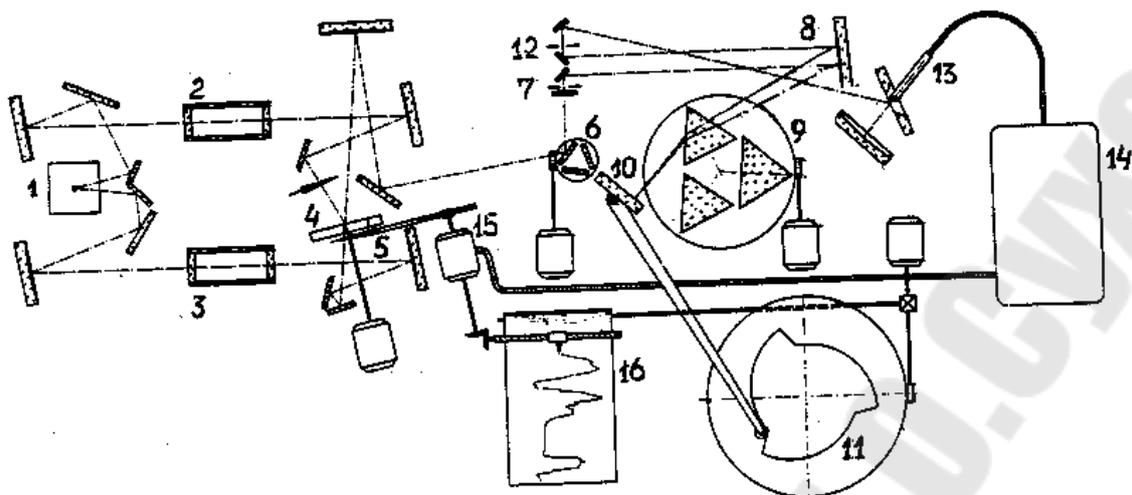


Рис.2. Опытно-механическая схема UR-20:

1 – источник излучения; 2 и 3 – кюветы измерения и сравнения; 4 – вращающийся зеркальный сектор; 5 – измерительная диафрагма; 6 - диспергатор; 7 – входная щель монохроматора; 8 – зеркало-коллиматор; 9 – система призм; 10 – зеркало Литтрова; 11 – кулачковый диск для распределения спектра по длинам волн; 12 – выходная щель монохроматора; 13 – приемник излучения; 14 – усилитель; 15 – двигатель; 16 - самописец.

Основные технические данные прибора

Диапазон волновых чисел, см^{-1}	
Призма KBr	400...850
Призма NaCl	670...4000
Призма LiF	1600...5000
Общий диапазон	400...5000
Скорости регистрации спектра, $\text{см}^{-1}/\text{мин}$	4,10,25,64,160,400
Масштаб записи спектра, $\text{мм}/100 \text{ см}^{-1}$	10,20,40,100,200,400
Время записи спектра по амплитуде (0 до 100%), сек	4,16,64
Усиление электрического сигнала	$0 \dots 6 \times 10^4$
Щелевая программа	1...8
Разрешение прибора	0.6 см^{-1}
Путь излучения от источника до приемника, м	5.75

Порядок снятия спектрограммы (основные пункты)

1. Подключить источник излучения. Включить подачу охлаждающей воды.
2. Выбрать и установить рабочие параметры:
 - 2.1 Скорость регистрации спектра (4,10,25,16,64,160,400 $\text{см}^{-1}/\text{мин}$);
 - 2.2 Щелевую программу (ширина щели) 1.4, 2, 4 или 8. Щелевая программа 8 предназначена только для записи обзорных спектров; 4 - универсальная щелевая программа; 2 – программа для записи спектров газов; 1.4 – программа реализует высокую разрешающую способность прибора, но низкое соотношение сигнал/шум;

- 2.3 Диапазон регистрируемых волновых чисел (400...5000 см^{-1});
- 2.4 Время записи спектра по амплитуде: 0 до 100% (4,16,64 сек);
- 2.5 Масштаб записи спектра (10,20,40,100,200,400 $\text{мм}/100 \text{ см}^{-1}$);
3. Установить исследуемый образец и образец сравнения в кюветное отделение.
4. Вложить бумагу в самописец.
5. Произвести запись спектра.

Порядок выполнения работы

1. Изучить основные методы анализа состава и химической структуры материалов: классификация, и сравнительная характеристика методов.
2. Детально ознакомиться с принципом работы и опико-механической схемой инфракрасного спектрофотометра UR-20.
3. Изучить порядок снятия спектрограммы.
4. Произвести запись спектра предложенного преподавателем образца.
5. С помощью таблиц (атомарная группировка / волновое число полосы поглощения) и атласа ИК-спектров произвести анализ полученной спектрограммы: распознавание молекулярных связей и идентификацию материала.
6. Составить отчет.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Теоретическая часть, включающая классификацию и сравнительную характеристику спектроскопических методов, описание основных методов анализа состава и химической структуры материала.
3. Физические основы колебательной, в том числе, инфракрасной спектроскопии (принцип работы UR-20, схема работы прибора).
4. Основные рабочие параметры эксперимента:
 - скорость регистрации спектра, $\text{см}^{-1}/\text{мин}$,
 - щелевая программа;
 - диапазон регистрируемых волновых чисел, см^{-1} ,
 - время записи спектра по амплитуде: 0 до 100%, сек.
5. ИК-спектр предложенного преподавателем материала.
6. Таблица расшифровки спектра по форме таблицы 1.
7. Вывод о составе и химической структуре образца.

Таблица 1

Расшифровка спектра

Данные спектра: частота колебаний ν , см^{-1}	Интерпретация спектра		Данные спектра: частота колебаний ν , см^{-1}	Интерпретация спектра	
	связь	группа		связь	группа

Контрольные вопросы

1. Физические принципы спектроскопических методов.
2. Классификация спектроскопических методов.
3. Сущность электронной спектроскопии.
4. РФЭС, её физические принципы.
5. Что изучает колебательная спектроскопия?
6. ИКС: сущность метода.
7. Сравнение спектрограмм молекулярной и атомной спектроскопий.
8. Принцип работы UR-20.
9. Порядок снятия спектрограммы.
10. Как производится расшифровка ИК-спектра?

Темы индивидуальных заданий

1. Спектральные методы элементного анализа.
2. Методы изучения химической структуры материала.
3. Метод рентгено-фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).
4. Метод Оже-электронной спектроскопии (ОЭС).
5. Метод ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС).
6. Метод спектроскопии ионного рассеяния (СИР).
7. Метод вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС).
8. Метод лазерного микрозондового масс-анализа (ЛАММА).
9. Метод инфракрасной спектроскопии (ИКС).
10. Метод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР).
11. Методы электронной спектроскопии для химического анализа (ЭСХА).
12. Метод рентгеновского флуоресцентного (РФ) анализа.
13. Способы послойного анализа образца при использовании методов электронной спектроскопии.
14. Методы колебательной спектроскопии.
15. Методы электронной спектроскопии.
16. Количественный элементный анализ с помощью РФЭС.
17. Аппаратурные факторы, влияющие на спектрометрические измерения.
18. Причины разрушения полимеров при их исследовании методом РФЭС.
19. Метод ультрафиолетовой спектроскопии.
20. Инфракрасная спектроскопия многократного нарушенного полного внутреннего отражения (ИК МНПВО).
21. Инфракрасная спектроскопия с Фурье-преобразованием (ИКФ).
22. Метод фотоакустической инфракрасной спектроскопии (ИК ФАС).
23. Метод рентгеновского микроанализа (РМА)
24. Спектроскопия энергетических потерь электронов (СЭПЭ)

Литература

1. Физический энциклопедический словарь. М: Сов. Энци., 1983.
2. Тарутина Л.И., Позднякова Ф.О. Спектральный анализ полимеров. Л: Химия, 1986.
3. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия: пер. с англ. –М.: Мир, 1982
4. Дехант И., Данц Р., Киммер В., Шмольке Р. Инфракрасная спектроскопия полимеров. М: Химия, 1976.
5. Методы анализа поверхностей/Под ред.А.Зандерны. М:Мир, 1979,582с.
6. Нефедов В.И., Черепин В.Т. Физические методы исследования поверхности твердых тел. М.: Наука, 1983, 293с.
7. Карлсон Т.А. Фотоэлектронная и Оже-спектроскопия. Л.: Машиностроение, 1981, 431с.
8. Электронная и ионная спектроскопия твердых тел / Под ред. Л.Фирменса и др. М.: Мир, 1981, 467с.
9. Черепин В.Т., Васильев М.А. Методы и приборы для анализа поверхности материалов. Справочник, Киев: Наукова думка, 1982. 400с
10. Нефедов В.И. Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений. Справочник. М.: Химия, 1984, 256с.
11. Гоулдстейн Дж., Ньюберн Д., Эчлин П., Джой Д., Фиорн И., Лифшин Э. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. М.: Мир, 1984. Кн.1, 303с., кн.2, 348с.
12. Зигбан К., Нардинг К., Фальман А. и др. Электронная спектроскопия. М.: Мир, 1971. 494с.
13. Харрик Н. Спектроскопия внутреннего отражения. М.: Мир, 1970, 335с.
14. Колебательная спектроскопия. Современные воззрения. Тенденции развития / Под ред. А.Барнса. М.: Мир, 1981, 480с.
15. Повстугар В.И., Кодолов В.И., Михайлова С.А. Строение и свойства поверхности полимерных материалов. М.: Химия, 1988, 192с.

Лабораторная работа № 6
МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТОПОГРАФИИ И МОРФОЛОГИИ
ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Цель работы: Ознакомление с основными методами оценки топографии и морфологии поверхности твердых тел; приобретение навыков работы на профилографе-профилометре, оптическом, электронном и атомно-силовом микроскопах; снятие профилограммы поверхности детали щуповым и методом зондовой микроскопии.

Оборудование и принадлежности: профилограф-профилометр типа А1 модели 252, оптический микроскоп модели NU2 (Германия), растровый электронный микроскоп JSM-50A, атомно-силовой микроскоп Nano-Scan (производство ИММС НАНБ).

Основные положения

Поверхности твердых тел не являются идеально гладкими и имеют отклонения от геометрически правильных форм. Эти отклонения описываются набором параметров, чаще всего высотных (H) и шаговых (S). В зависимости от диапазона S, H и их отношения S/H различают: 1) макрогеометрические отклонения (отклонения формы); 2) волнистость; 3) шероховатость; 4) субмикрощероховатость.

Экспериментальные методы измерения топографии поверхности:

I. **Измерение макрогеометрических отклонений** осуществляется с помощью индикаторов, оптиметров, микрометров, лекальных линеек и другого измерительного инструмента.

II. **Измерение волнистости** возможно с помощью: 2.1) метода красок и угольных пленок; 2.2) растрового метода; 2.3) метода теневой проекции профиля; 2.4) волнометров, волнографов и др.

III. **Измерение шероховатости** осуществляется с помощью следующих методов:

3.1) Метод визуального сравнения. Метод применим только для грубо обработанных поверхностей ($Ra > 0.6$) и заключается в визуальном сравнении поверхностей детали и эталона известной шероховатости.

3.2) Щуповой метод. Игла-щуп с малым радиусом закругления (2-10 мкм) скользит по поверхности исследуемого образца, повторяя ее рельеф. Перемещения иглы в вертикальном направлении преобразуются в электрические сигналы, которые записываются в виде профилограмм. Соответственно приборы называются профилографами (профилометрами). *Достоинство* метода - простота. *Недостатки:* игла, вследствие своих размеров действует как низкочастотный фильтр, «выглаживая» поверхность; чем меньше размер иглы, тем существеннее контактные давления, даже при незначительных нагрузках и вызывающие деформацию (царапание) поверхностного слоя образца.

3.3) Метод электронной микроскопии. Изучаемая поверхность зондируется потоком электронов, который инициирует появление вторичных пото-

ков электронов (рассеянные, упруго отраженные или вторичные электроны), несущих информацию от поверхности на соответствующие детекторы. Метод основан на существовании соответствия между ординатами профиля и величиной низкоэнергетической компоненты излучения (вторичных электронов). Количество электронов, рассеянных, отраженных или выбитых с каждого микроучастка поверхности, зависит от геометрических и физических свойств поверхности. Информация, преобразованная в электрические сигналы, поступает от детектора в кинескоп, с экрана которого изображение поверхности можно рассматривать визуально или фотографировать.

Различают три класса электронных микроскопов (ЭМ): 1) ЭМ для исследования объектов в проходящих лучах (просвечивающие ЭМ); 2) ЭМ для исследования непрозрачных для электронов объектов (растровые электронные микроскопы); 3) теневые ЭМ.

IV. Измерение субмикрощероховатости твердых тел осуществляется с помощью методов *сканирующей зондовой микроскопии*, основанных на принципе сканирования исследуемой поверхности зондом и регистрации его перемещений в плоскости исследуемой поверхности и по нормали к ней. Методы обеспечивают получение трехмерного изображения поверхности с атомарным разрешением и включают: сканирующую туннельную микроскопию (СТМ); атомно-силовую микроскопию (АСМ) и световую сканирующую микроскопию (ССМ).

Методические указания

Лабораторная работа предусматривает изучение следующих методик оценки топографии и морфологии поверхности твердых тел:

1. щуповая профилометрия;
2. оптическая микроскопия;
3. электронная микроскопия;
4. зондовая микроскопия.

1. **Метод щуповой профилометрии** рассматривается на примере профилографа-профилометра типа А1 модели 252 (производство Россия, завод «Калибр»), который предназначен для измерения в лабораторных условиях шероховатости и волнистости поверхности плоских изделий.

Основные составные части прибора: (а) стойка; (б) мотопривод; (в) блок питания; (г) измерительный блок; (д) счетно-решающий блок; (е) датчики; (ж) предметный стол; (з) записывающий прибор.

На столе прибора размещен мотопривод, на котором крепится датчик. Усилие и преобразование электрических сигналов с датчика, а также управление работой прибора осуществляется блоком питания и измерительным блоком. Они связаны с расчетно-решающим блоком, предназначенным для обработки электрических сигналов и выдачи результатов измерения на цифровое устройство и записывающий

прибор (для записи результатов на диаграммную ленту). На стойку устанавливается предметный стол, позволяющий перемещать измеряемую деталь в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Принцип действия прибора (рис. 1) основан на скольжении по неровностям исследуемой поверхности 1 алмазного щупа 2, закрепленного на датчике 3 и преобразовании возникающих при этом колебаний щупа в электрические сигналы, пропорциональные этим колебаниям.

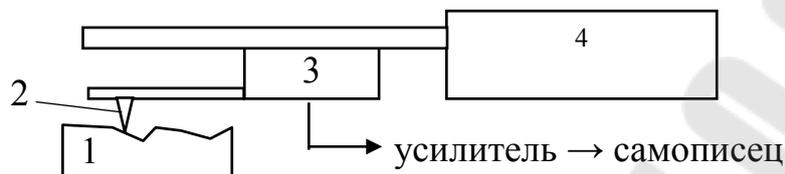


Рис.1. Схема щупового профилометра: 1 – образец; 2 – игла; 3 – датчик вертикальных перемещений; 4 – привод.

Прибор может быть использован для работы в качестве профилографа и профилометра.

При работе в режиме профилографа диапазон измерений (высотных) прибора может изменяться от 0.02 мкм (2000 Å) до 250 мкм; максимальная длина трассы ощупывания составляет 50 мм; вертикальное увеличение может задаваться в пределах 200÷100 тыс. крат; горизонтальное увеличение – 0.5÷2 тыс.

При работе в режиме профилометра прибор измеряет среднее арифметическое отклонение профиля Ra ; высоту наибольшего выступа профиля $Hmax$; глубину наибольшей впадины профиля $Hmin$; относительную опорную длину профиля tp ; число шагов неровностей в пределах длины трассы ощупывания n . Диапазон измерения составляет: для Ra 0.02...100 мкм; для $Hmax$ и $Hmin$ – 0.1...100 мкм; для tp – 0...100%, для n – 1000 шагов. Длина трасс ощупывания при этих измерениях может изменяться от 1.5 до 6 мм.

2. **Метод оптической микроскопии** рассматривается на примере оптического микроскопа модели NU 2 (Германия). Микроскоп позволяет: 1) получать изображения темнопольные, светопольные и в фазовом контрасте; 2) осуществлять наблюдения в поляризованном свете; 3) наблюдать флуоресценцию; 4) осуществлять микрофотографию интерференционных картин. Максимальное увеличение микроскопа составляет ×2500.

Оптическая схема NU 2 изображена на рисунке 2.

Микроскоп NU 2 позволяет реализовать работу в двух режимах: 1) режим проходящего света для прозрачных образцов (рис. 2а); 2) режим отраженного света для непрозрачных образцов (рис. 2б). Кроме этого прибор предусматривает возможность использования одного из двух вариантов хода лучей: а) прямой ход лучей и б) так называемый панкратический ход лучей (позволяющий получать дополнительное увеличение).

Принцип работы NU 2 заключается в следующем.

При работе в режиме *проходящего* света (рис. 2а) свет от источника излучения 1 (лампа накаливания, ксеноновая лампа или ртутная лампа) через систему линз 2 и 3, зеркало 4 проходит через исследуемый образец, лежащий на предметном столике 5, и далее, через увеличивающее изображение окуляр 6 попадает на направляющую призму 7. Последняя может включать либо прямой ход лучей, направляя свет в двойной тубус 8 на окуляры визуального наблюдения 9, либо панкратический ход лучей, направляя свет в панкратическую систему 10, позволяющую получить дополнительное увеличение.

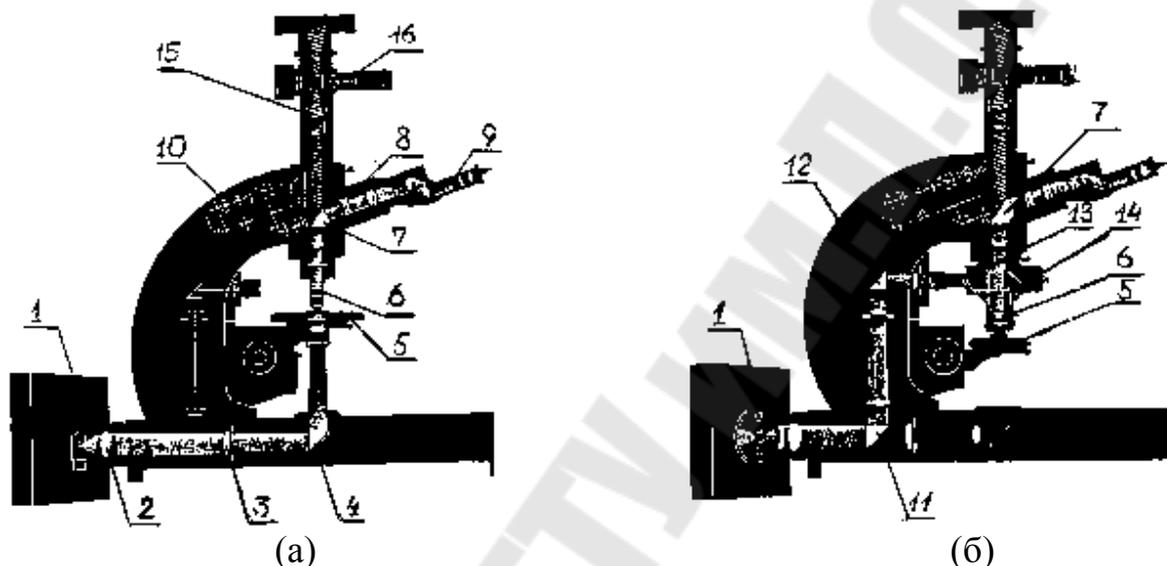


Рис.2. Оптическая схема микроскопа: (а) в режиме проходящего света; (б) в режиме отраженного света.

При работе в режиме *отраженного* света (рис. 2б) свет от источника 1 отклоняется вверх при помощи призмы 11, а призма 12 направляет его на «зеркальную лестницу» 13 и зеркало 14, откуда свет падает на образец на предметном столике 5. Далее, ход лучей аналогичен работе в режиме проходящего света: через окуляр 6 свет падает на направляющую призму 7, включающую прямой либо панкратический ход лучей. При микрофотографических работах свет направляется на проекционный окуляр 15 и поступает в фотокамеру 16 (показана на рис. 2а).

Эффективное общее увеличение микроскопа = увеличение объектива × увеличение окуляра (визуального наблюдения или панкратического).

При *прямом* ходе лучей изменение увеличения осуществляется в результате: 1) замены окуляра визуального наблюдения 9 (возможные увеличения ×8, 12.5, 20); 2) замены объектива 6 в револьверном механизме (возможные увеличения ×4, 6.3, 10, 12.5, 50, 63, 100). Таким образом, максимально достижимое увеличение при прямом ходе лучей составляет 2000.

При *панкратическом* ходе лучей изменение увеличения осуществляется путем: 1) замены объектива 6 в револьверном механизме (×4÷100); 2) ус-

тановкой панкратического окуляра (его увеличение в сочетании с увеличением окуляров визуального наблюдения может составлять $\times 12.5, 16, 20, 25$). Максимальное увеличение, достижимое при панкратическом ходе лучей составляет 2500.

Порядок работы на микроскопе NU 2:

1. Изучить оптическую схему микроскопа и его принцип работы.
2. Выбрать режим работы в соответствии с изучаемым объектом (проходящий / отраженный режим; панкратический / прямой ход лучей).
3. Настроить микроскоп на визуальное наблюдение: установить необходимые объективы на револьверной головке; установить окуляры в бинокулярном тубусе; подключить с помощью соответствующих шатунов необходимые линзы, зеркала и призмы.
4. С помощью механизма грубой настройки опустить предметный столик в самое нижнее положение.
5. Установить образец на предметный столик.
6. Включить соответствующую исследованию лампу на пульте управления.
7. Вращением окулярных патрубков произвести фокусировку микроскопа.
8. Поднятием предметного столика с помощью рукояток механизмов грубой и точной настроек навести объект на резкость.
9. Оценить количественно особенности морфологии исследуемой поверхности образца с учетом эффективного общего увеличения микроскопа.

3. **Метод электронной микроскопии** рассматривается на примере растрового электронного микроскопа (РЭМ) JSM-50A, который позволяет исследовать микрорельеф поверхности. Максимально достижимое увеличение РЭМ составляет $\times 500000$. При изучении диэлектрических объектов (полимеры), а также для уменьшения электризации поверхности (при бомбардировании ее электронами) на изучаемую поверхность предварительно напыляют тонкий ($\sim 10\text{\AA}$) слой Au, Pt/Pd или углерода.

Основные составные части РЭМ: 1) **Электронная пушка** - вакуумное устройство для получения пучка электронов. Электроны испускаются катодом в процессе термоэлектронной эмиссии и далее ускоряются электрическим полем. Управление электронным пучком на выходе из электронной пушки осуществляется с помощью электрических и магнитных полей. (2) **Вакуумная камера для образца** – камера, поддерживающая необходимый вакуум $10^{-5} - 10^{-9}$ Тор. 3) **Детекторы** потоков вторичной эмиссии: вторичных электронов, отраженных электронов, рентгеновских лучей. 4) **Электронно-лучевая трубка**.

Принцип действия РЭМ схематически показан на рисунке 3 и состоит в следующем. На поверхность образца 1 фокусируется с помощью электронной пушки 2 узкий электронный зонд (поток). Магнитные отклоняющие катушки 3 перемещают зонд по заданной площади на объекте.

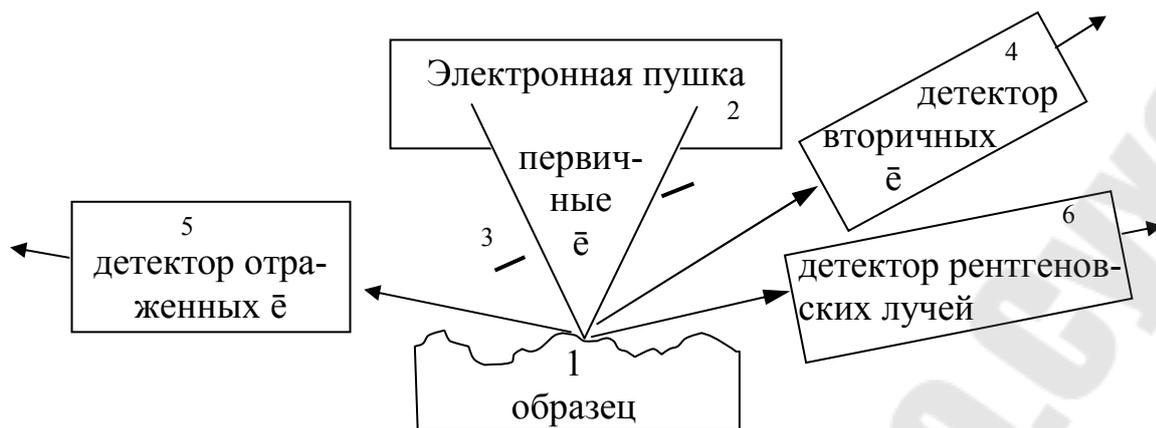


Рис.3. Схема действия электронного микроскопа.

При взаимодействии электронов зонда с объектом возникает несколько видов излучений (вторичные \bar{e} , отраженные \bar{e} , рентгеновское излучение). Любое из этих излучений может регистрироваться соответствующим детектором (4,5,6), преобразующим излучение в электрические сигналы, которые после усиления подаются на электронно-лучевую трубку (ЭЛТ) и моделируют ее пучок электронов. Развертка пучка ЭЛТ производится синхронно с разверткой электронного зонда в РЭМ, в результате чего на экране ЭЛТ наблюдается увеличенное изображение объекта.

Основное *достоинство* РЭМ – высокая информативность прибора, обусловленная возможностью наблюдать изображения, возникающие с помощью сигналов от различных детекторов.

4. **Метод зондовой микроскопии**

В электронной микроскопии получение изображения базируется на сложных физических явлениях, поэтому иногда могут возникать затруднения при интерпретации электронных изображений вследствие возникновения различного рода артефактов. Зондовая микроскопия безразлична к изменениям оптических или электронных свойств материала и дает информацию об истинной топографии поверхности. Она включает группу методов, основанных на принципе сканирования исследуемой поверхности зондом и регистрации его перемещений в плоскости исследуемой поверхности и в перпендикулярном к ней направлении.

4.1. **СТМ**

Физической основой сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) является туннелирование электронов между двумя близко расположенными электродами. Туннельный эффект заключается в «просачивании» частиц (электронов, α -частиц) сквозь потенциальный барьер. При перемещении иглы (закрепленной в трехкоординатном пьезоприводе) над исследуемой поверхностью твердого тела, в зазоре между иглой и поверхностью под действием некоторого напряжения U возникает туннельный ток I_t .

Существует два основных режима работы туннельного микроскопа.

Режим постоянного туннельного тока (рис. 4а) осуществляется с помощью системы обратной связи, управляющей пьезоприводом перемещения иглы таким образом, чтобы зазор (расстояние между иглой и поверхностью) оставался постоянным. При этом траектория движения иглы дает профиль измеряемой поверхности.

Режим постоянной высоты (рис.4б). Поддерживается линейная траектория движения иглы независимо от профиля поверхности. Поскольку расстояние между иглой и поверхностью образца в этом режиме изменяется, то и величина тока изменяется соответственно профилю поверхности.

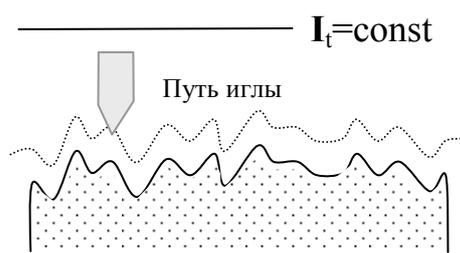


Рис. 4а. Режим постоянного тока.

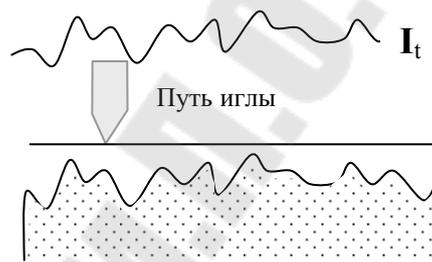


Рис.4б. Режим постоянной высоты.

У каждого режима есть преимущества и недостатки. Режим *постоянной высоты* более быстрый, т.к. системе не приходится передвигать сканирующее устройство вверх и вниз, но в этом режиме можно получить информацию только с относительно гладкой поверхности. В режиме *постоянного тока* можно с высокой точностью измерять любые нерегулярные поверхности, но измерения занимают больше времени.

В качестве зонда используется острая токопроводящая игла. Между острием иглы и образцом прикладывается электрическое напряжение и при приближении острия иглы к поверхности образца на расстояние 0.5 – 1.0 нм электроны с образца начинают «туннелировать» через зазор к острию, или наоборот, в зависимости от полярности рабочего напряжения. СТМ позволяет измерять субмикронеровности с размерами порядка 0.01 нм. *Ограничение* метода: применение СТМ возможно только для электропроводных образцов.

4.2. АСМ

Атомная силовая микроскопия (АСМ) сочетает в себе принципы СТМ и щупового профилометра. Отличительная черта АСМ – это измерение не туннельного тока, а силы межатомного взаимодействия (Ван-дер-ваальсова сила) иглы и образца при сканировании поверхности. На рисунке 5 изображена зависимость силы межатомного взаимодействия от расстояния между иглой и образцом.

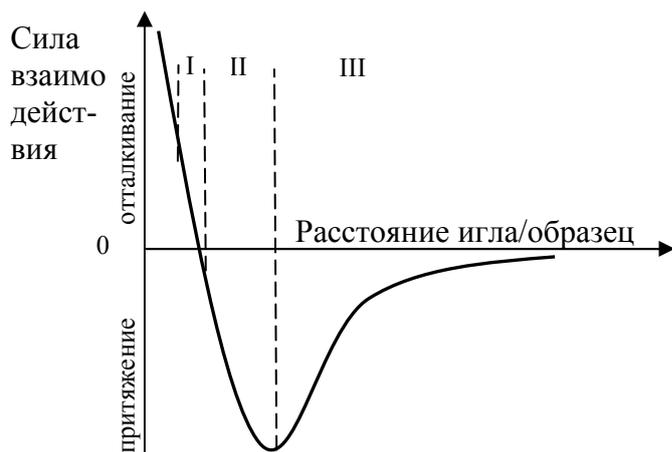


Рис.5. Зависимость межатомного взаимодействия от расстояния между иглой и образцом:

- I – режим контактный,
- II – режим «обстукивания»,
- III – бесконтактный режим.

Когда расстояние между иглой и образцом уменьшается, то при каком-то критическом расстоянии между атомами их поверхностей вначале возникает сила притяжения. Она будет возрастать до тех пор, пока атомы не сблизятся настолько, что их электронные облака начнут отталкиваться электростатически. В процессе дальнейшего сближения сила притяжения ослабевает в результате роста силы отталкивания. При расстоянии между атомами порядка двух ангстрем (что приблизительно составляет длину химической связи) наступает равновесие сил притяжения и отталкивания (суммарная сила взаимодействия равна нулю). Дальнейшее сближение приводит к тому, что результирующей силой взаимодействия становится отталкивание. Это свидетельствует о касании поверхностей иглы и образца.

В зависимости от степени сближения поверхностей иглы и образца, АСМ работают в контактном (рис. 5, режим I), бесконтактном (рис. 5, режим III) и режиме «обстукивания» (рис. 5, режим II). Бесконтактный режим реализуется при таком сближении, когда между иглой и поверхностью существуют силы притяжения порядка 10^{-12} Н. При контактном режиме возникают силы отталкивания, а острие иглы находится в состоянии «мягкого» физического контакта с образцом. При режиме «обстукивания» измерительная консоль колеблется на своей резонансной частоте с высокой амплитудой (порядка 100 нм). При каждом колебании в нижней точке острие касается образца. Поскольку при работе в контактном режиме, и режиме «обстукивания» игла может деформировать поверхность образцов из мягких материалов, эти режимы применяются, в основном, для изучения упругих характеристик материала, тогда как бесконтактный режим – для изучения топографии поверхности.

Кроме контактно/бесконтактного режимов, АСМ может работать (аналогично СТМ) в режимах постоянного тока и постоянной высоты.

Разрешающая способность АСМ ниже, чем у СТМ и составляет 0.1 нм в вертикальном направлении и 2-5 нм в горизонтальном. *Достоинство* АСМ – возможность исследования в атомарном масштабе поверхности образцов из любых материалов: проводников, полупроводников и диэлектриков.

В настоящей лабораторной работе методы зондовой микроскопии рассматриваются на примере сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) модели НАНОТОП-203 и атомно-силового микроскопа (АСМ) модели Nano-Scan (производство ИММС НАН Б, Беларусь).

Порядок выполнения работы

1. Изучить основные методы оценки топографии и морфологии поверхности, рассматриваемые в настоящей лабораторной работе.
 - 1.1 Изучить принцип действия профилографа-профилометра модели 252.
 - 1.2 Изучить устройство и принцип действия оптического микроскопа NU 2 и порядок работы на нем.
 - 1.3 Изучить устройство и принцип действия ЭМ JSM-50.
 - 1.4 Изучить принцип действия СТМ НАНОТОП-203 и АСМ Nano-Scan.
2. Научиться снимать профилограмму поверхности и основные топографические характеристики (*Ra*, *Hmax*, *Hmin*) предложенной преподавателем детали в режиме профилометрирования.
3. Научиться работать на оптическом микроскопе NU 2. Оценить морфологию поверхности предложенного преподавателем образца.

Содержание отчета

1. Наименование, цель работы.
2. Теоретическая часть, включающая описание основных методов оценки топографии и морфологии поверхности.
3. Описание топографии поверхности изучаемой детали: профилограмма и основные топографические характеристики поверхности (*Ra*, *Hmax*, *Hmin*).
4. Описание морфологических особенностей поверхности изучаемой детали, полученных с помощью оптического микроскопа NU 2.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Основные параметры, описывающие микрорельеф поверхности.
2. Виды отклонений поверхности от идеальной формы и их определение.
3. Методы измерения волнистости поверхности.
4. Оценка макрогеометрических отклонений поверхности.
5. Методы оценки шероховатости поверхности.
6. Методы оценки субмикрощероховатости поверхности.
7. Виды электронных микроскопов.
8. Виды зондовых микроскопов.
9. Принцип действия профилографа-профилометра.
10. Режимы работы оптического микроскопа NU 2.
11. Расчет общего эффективного увеличения оптического микроскопа.
12. Принцип действия РЭМ JSM-50A.
13. Основные составные части РЭМ.

14. Физическая основа метода СТМ.
15. Основные режимы работы СТМ: их достоинства и недостатки.
16. Принцип работы АСМ.
17. Три основных режима работы АСМ.
18. Достоинства и недостатки АСМ по сравнению с СТМ.
19. Методы зондовой микроскопии.

Темы для индивидуальных заданий.

1. Методы изучения морфологии поверхности.
2. Метод растровой электронной микроскопии (РЭМ).
3. Метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).
4. Метод сканирующей туннельной микроскопии (СТМ).
5. Метод атомно-силовой микроскопии (АСМ).
6. Методы измерения волнистости поверхности.
7. Растровый метод измерения волнистости.
8. Щуповые методы для измерения волнистости.
9. Методы измерения шероховатости.
10. Методы сравнения (визуального и с применением оптической системы) для оценки шероховатости поверхности.
11. Метод светового сечения для измерения шероховатости.
12. Интерференционный метод оценки микрогеометрии поверхности.
13. Щуповой метод оценки микрогеометрии поверхности.
14. Методы сканирующей зондовой микроскопии.
15. Метод световой сканирующей микроскопии.

Литература

1. Богданович П.Н., Прушак В.Я. Трение и износ в машинах: Учеб. для вузов. – Мн.: Выш. шк., 1999. – с. 48-57.
2. Методы анализа поверхностей / Под ред. А.Зандерны. М.: Мир, 1979.- 582с.
3. Нефедов В.И., Черепин В.Т. Физические методы исследования поверхности твердых тел. М.: Наука, 1983. – 293с.
4. Мышкин Н.К., Петроковец М.Н. Трибология. Принципы и приложения. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – с. 22-28.

Лабораторная работа №7
МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Цель работы: освоение основных методов оценки износостойкости деталей машин; изучение устройства машины трения 2070 СМТ-1; определение основных триботехнических показателей различных материалов.

Оборудование и принадлежности: машина трения 2070 СМТ-1; аналитические весы (с погрешностью не более 0,1 мг); профилограф-профилометр модели 252; набор металлических фольг разных материалов (сталь 3, латунь, алюминий, цинк и др.), набор блочных полимеров (полиэтилен, полиамид, политетрафторэтилен и др.); ножницы; штангенциркуль.

Основные положения

Изнашивание – процесс удаления материала с контактной поверхности твердого тела в результате его трения с другим твердым телом, жидкостью или газом. Результатом изнашивания является износ трущихся тел. **Износ** – изменение размеров и формы твёрдого тела в результате изнашивания.

Факторы, влияющие на износ деталей:

- внешние условия трения (нагрузка, температура, смазка и т.д.);
- характеристики материала:
 - механические свойства (прочность, твёрдость);
 - триботехнические характеристики;
 - микрогеометрические характеристики поверхности, участвующей в изнашивании (поверхности трения).

Методы оценки износостойкости.

I. Весовой метод. Интенсивность изнашивания I и, соответственно, износостойкость $E_{\text{и}}$ определяются по потере массы образцов в процессе трения. Метод прост в реализации, но не обеспечивает возможность непрерывной регистрации износа в процессе испытаний.

II. Метод измерения линейных размеров изнашиваемого образца (метод микрометрических измерений). С помощью микрометров, индикаторов, оптиметров и другого измерительного инструмента фиксируют изменение толщины исследуемого образца. Недостаток тот же: нет возможности непрерывной регистрации результата исследования. Разновидностью микрометрического метода является *профилографирование*.

III. Метод искусственных баз. На поверхность детали наносят углубление строго определенного размера (в виде пирамиды, конуса, лунки), а величина износа определяется по изменению этого размера.

IV. Метод масляной пробы основан на анализе пробы рабочего масла на содержание продуктов изнашивания (металлические частицы, оксиды металла, продукты химического взаимодействия металла и активных компонентов смазочных материалов). Основные методы анализа проб мас-

ла следующие: 1) химический, 2) спектральный, 3) радиометрический, 4) фотометрический, 5) микроскопический.

V. Метод поверхностной активизации (или радиоактивных индикаторов) основан на измерении снижения радиоактивности образца, в которой предварительно введены радиоактивные изотопы, по мере его износа.

VI. Другие физические методы.

6.1. *Магнитометрический* метод основан на явлении возникновения электромагнитного излучения при деформации металлов. Магнитная компонента электромагнитного излучения детали трения регистрируется с помощью индуктивного датчика.

6.2. *Акустический* метод основан на возбуждении и приеме акустических и ультразвуковых волн специальными преобразователями. Об износе детали судят по параметрам упругих волн, прошедших через исследуемый узел трения.

Выбор метода испытаний диктуется условиями работы пары трения, целью исследования, требуемой точностью и экономическими соображениями.

Методические указания

В настоящей лабораторной работе износостойкость материалов определяется на машине трения 2070 СМТ-1 (рис. 1).

Машина трения – это устройство, воспроизводящее трибологический процесс (трение) в контролируемых условиях и обеспечивающее контроль его выходных параметров. По геометрическому признаку (геометрии контактной пары) трибометры классифицируют на (1) установки точечного контакта, (2) установки линейного контакта, (3) установки плоскостного контакта.

Машина трения состоит из привода (осуществляющего относительное перемещение контактирующих образцов) и устройств для установки испытательных образцов 1, для нагружения узла трения 2, для контроля выходных параметров 3 и ряда дополнительных устройств: для подачи смазочного материала в зону трения, для нагрева узла трения и др. Приводом служит электродвигатель 5 и передаточный механизм 4.

Принцип действия машины трения заключается в истирании прижатых друг к другу силой P пары образцов по одной из приведенных выше схем трения. Машина позволяет проводить испытания с различными образцами, нагрузками (изменяющимися в диапазоне 200-5000 Н), частотами вращения образцов ($75-1500 \text{ мин}^{-1}$). Кроме того, испытание может проводиться в камере с различными смазками, так и без них.

Машина трения 2070 СМТ-1 позволяет производить фрикционный контакт по трем схемам трения:

1. *Вал-втулка* (рис. 2а). Схема воспроизводит трение скольжения; применяется в основном для оценки износостойкости материалов для изготовления подшипников скольжения.
2. *Вал - частичный вкладыш* (рис. 2б). Схема воспроизводит трение скольжения; применяется для оценки прирабатываемости и стойкости к

заеданию антифрикционных материалов и покрытий на металлической основе при трении в режиме смешанной смазки по ГОСТ 23.215-84.

3. **Вал-вал** (или диск-диск) (рис. 2в). Схема воспроизводит как трение скольжения, так и трение качения с проскальзыванием в зависимости от направления и величины угловых скоростей ω_1 и ω_2 . Изменение скорости каждого ролика в отдельности позволяет получить различные соотношения скоростей скольжения и качения: чистое качение, угловое, чистое скольжение. Схема является одной из самых распространенных и применяется при моделировании трения в зубчатых передачах.

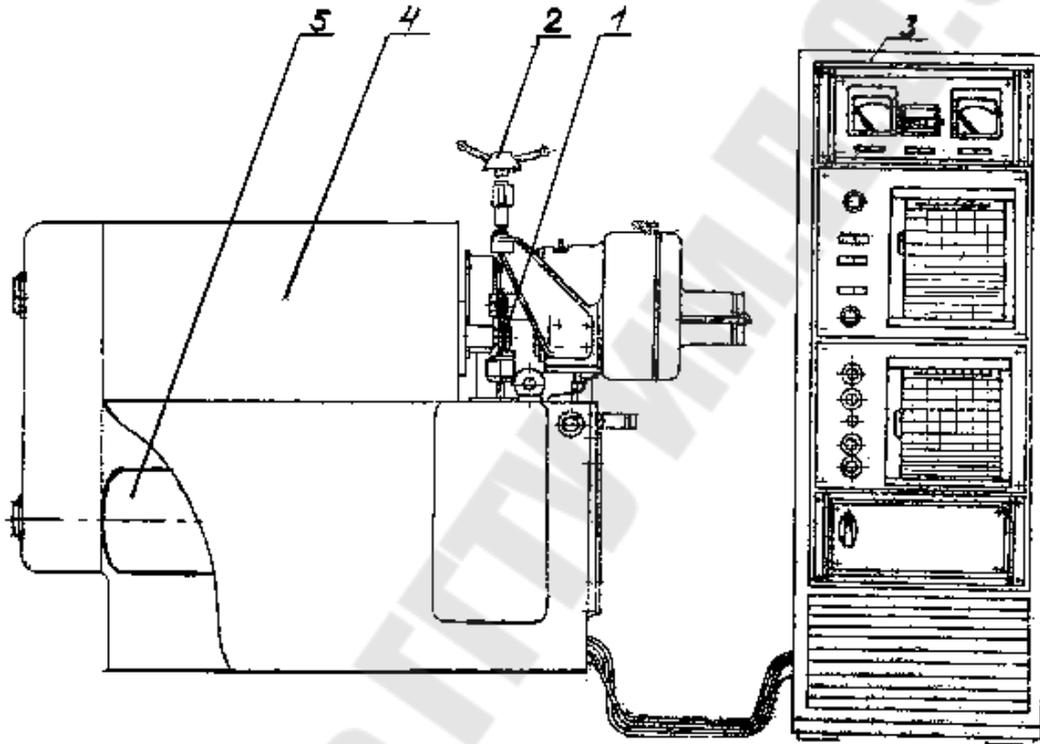


Рис. 1. Машина трения 2070 СМТ-1:

- 1 - устройство для установки образцов;
- 2 - устройство для нагружения узла трения;
- 3 - устройство для контроля выходных параметров трения;
- 4 - передаточный механизм;
- 5 - электродвигатель.

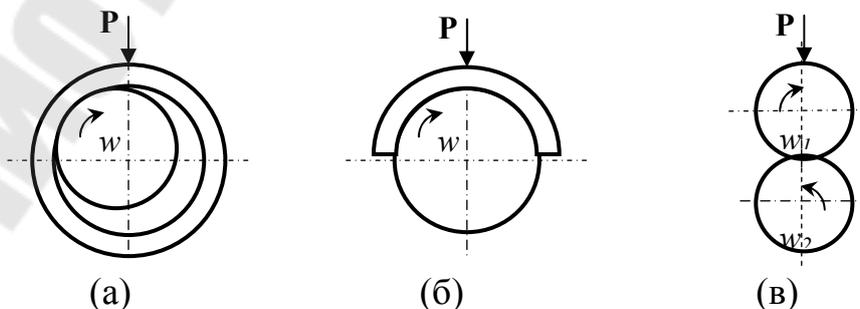


Рис. 2. Схемы трения: (а) вал-втулка; (б) вал-частичный вкладыш; (в) вал-вал.

Основные подготовительные и рабочие операции при испытании на машине трения:

- установка шпинделя, соответствующего одной из трех возможных схем трения;
- установка диапазона частоты вращения образцов, производимая путем замены шкива на электродвигателе;
- установка образца;
- нагружение образцов усилием P (только при вращающемся образце);
- регистрация в процессе работы машины измеряемых датчиками характеристик (момент трения M , усилие нагрузки на образцы P , скорость вращения вала ω , температура контакта T);
- расчет основных триботехнических параметров (K, E_u, I, i, f) после окончания испытания.

После проведения испытания осуществляют расчет следующих основных количественных характеристик процесса изнашивания:

1. **Скорость изнашивания i** – величина износа в единицу времени.

Различают линейную i_h , объемную i_v и массовую i_m скорости изнашивания:

$$i_h = \Delta h / \Delta t; i_v = \Delta V / \Delta t; i_m = \Delta m / \Delta t,$$

где $\Delta h, \Delta V, \Delta m$ – изменения соответственно линейного размера, объема и массы детали в течение времени испытания Δt .

2. **Интенсивность изнашивания I** – величина износа, приходящаяся на единицу пути трения.

Различают линейную I_h , объемную I_v , массовую I_m и энергетическую I_w интенсивности изнашивания:

$$I_h = \Delta h / L; I_v = \Delta V / L; I_m = \Delta m / L; I_w = \Delta h / LF,$$

где L – путь трения, F – сила трения.

3. **Износостойкость E_u** – величина обратная интенсивности изнашивания: $E_u = 1/I$. E_u характеризует сопротивление материала изнашиванию при заданных режимах трения. Различают десять классов износостойкости узлов трения (от 3-го до 12-го), каждый из которых отличается по величине от следующего за ним в 10 раз. Номер класса соответствует минимальному показателю степени при E_u (таблица):

Класс износостойкости	3	4	5	6	...	12
E_u	10^3-10^4	10^4-10^5	10^5-10^6	10^6-10^7	...	$10^{12}-10^{13}$

4. **Коэффициент износа K** – коэффициент пропорциональности в уравнении Арчарда $I=KР/Н$. Это уравнение изнашивания, показывающее прямо пропорциональную зависимость интенсивности изнашивания I от нормальной нагрузки P и обратно пропорциональную зависимость I от твердости H .

5. Коэффициент трения f , рассчитывается по формуле:

$$f = F/P = kM_{\text{тр}}/P$$

где F – сила трения, Н;

$M_{\text{тр}}$ – момент трения, мм;

k – тарировочный коэффициент, Н/мм.

В рамках настоящей лабораторной работы рекомендуется проведение испытаний по схеме вал – частичный вкладыш. В качестве вала (контр-тело) используется ролик диаметром 40мм и шириной 10мм, изготовленный из стали 45, закаленной до 42..46 HRC с базовой шероховатостью $R_{a1} \leq 0.32$ мкм. В качестве частичного вкладыша используют исследуемые образцы в виде сектора, имеющего внутренний и наружный диаметры 40 и 60 мм соответственно; шириной 10 мм; с длиной рабочей части 20 мм. На рабочей поверхности стального вкладыша закрепляется фольга из исследуемого материала (сталь 3, латунь, алюминий, цинк) толщиной 0,1 мм с шероховатостью $R_{a2} \leq 0.2$ мкм. При исследовании износостойкости полимеров или полимерных материалов на основе полимеров применяют вкладыши, изготовленные из соответствующих блочных материалов (например, ПЭНД ГОСТ 16803-77). Смазывание узла трения осуществляется путем окунания ролика в ванночку со смазочной средой (индустриальное масло И-40А). Рекомендуемые режимы трения: контактное давление $P=10$ МПа; скорость скольжения ролика $v=0.5$ м/с.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством машины трения 2070 СМТ-1.
2. Выбрать схему трения и установить соответствующий схеме шпиндель в машине трения.
3. Подготовить образцы для сравнительных испытаний на износостойкость.
 - 3.1. Выбрать образцы из ряда металлических фольг (сталь 3, латунь, алюминий, цинк и др.) и блочных полимеров (полиэтилен, полиамид, политетрафторэтилен и др.).
 - 3.2. Вырезать вкладыши из металлической фольги размером 10×20 мм и полимерные вкладыши в виде сектора шириной 10 мм, имеющего внутренний и наружный диаметры 40 и 60 мм соответственно, с длиной рабочей части 20мм.
 - 3.3. Взвесить образцы до испытаний.
 - 3.4. Снять профилограммы поверхности образцов на профилографе-профилометре (модель 252) до испытаний.
4. Выбрать необходимые режимы трения (контактную нагрузку P , МПа и скорость скольжения v , м/с).
5. Установить диапазон частоты вращения образцов, подбором соответствующих шкивов на электродвигателе.
6. Установить образцы на испытание.
7. Запустить машину.

8. Осуществить нагружение образца усилием P .
9. В процессе работы машины зафиксировать измеряемые датчиками значения триботехнических характеристик (момент трения M , усилие нагрузки P , скорость вращения ω , температура контакта T).
10. После завершения испытания снять образцы и оценить изменение массы Δm и линейных размеров Δh (по величине смещения профилограммы на изношенном участке образца относительно базовой поверхности).
11. Рассчитать значение основных триботехнических параметров для всех исследуемых материалов (i, I, E_u, f).
12. Построить диаграмму сравнительной износостойкости различных материалов.
13. Построить графики зависимости коэффициента трения от контактной нагрузки и скорости скольжения.
14. Построить графики зависимости величины износа от времени испытания.
15. Составить отчет.

Примечание: Из-за ограниченного времени лабораторных занятий выполнение пунктов 11-14 допускается по заранее полученным данным.

Содержание отчета

1. Наименование, цель работы.
2. Теоретическая часть, включающая определение основных понятий изнашивания и методов оценки износа.
3. Описание условий испытания: машина трения, схема трения (привести эскиз), исследуемые материалы, условия окружающей среды (смазка, температура и т.д.), режимы трения (контактное давление P , МПа, скорости скольжения v , м/с и вращения узлов пары ω , об/мин).
4. Расчет основных триботехнических параметров для всех исследуемых материалов (скорость изнашивания i , интенсивность изнашивания I , износостойкость E_u , коэффициент трения f).
5. Определение класса износостойкости для каждого из исследуемых материалов.
6. Диаграммы сравнительной износостойкости исследуемых материалов.
7. График зависимости коэффициента трения от контактной нагрузки и скорости скольжения.
8. График зависимости величины износа от времени испытания.
9. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Определение изнашивания, износа и износостойкости материалов.
2. Основные количественные характеристики процесса изнашивания и их расчет.
3. Факторы, влияющие на износ.
4. Методы оценки износостойкости.
5. Классификация установок для испытания материалов на трение и износ.

6. Три основные схемы контакта пар трения (классификация машин трения по геометрическому признаку).
7. Схемы трения, воспроизводимые машиной трения 2070 СМТ-1.
8. Машина трения: назначение, принцип действия, основные узлы.
9. Основные операции триботехнического испытания на машине трения.
10. Классы износостойкости материалов.
11. Расчет интенсивности изнашивания.
12. Факторы, влияющие на износ.

Темы для индивидуальных заданий

1. Весовой метод оценки износостойкости поверхности.
2. Метод измерения линейных размеров изнашиваемого образца.
3. Метод искусственных баз для оценки износостойкости.
4. Метод вырезанных лунок для оценки износостойкости.
5. Метод профилограмм для оценки износостойкости.
6. Физические методы измерения износа.
7. Магнитометрический метод измерения износа.
8. Метод радиоактивных изотопов для оценки износостойкости.
9. Акустический метод оценки износостойкости.
10. Метод поверхностной активации для оценки износостойкости.
11. Метод акустической эмиссии для оценки износостойкости.
12. Вибрационно-диагностический метод контроля узла трения.
13. Шумо-диагностический метод оценки износа узла трения.
14. Монометрический метод оценки интенсивности износа.
15. Метод электропроводности контакта для оценки износа узла трения.
16. Метод теплопроводности контакта для оценки износостойкости материалов.
17. Метод масляной пробы для оценки износостойкости.
18. Седиментометрия для оценки износостойкости.
19. Фотометрирование для оценки износостойкости.
20. Феррография как метод для установления механизмов изнашивания узлов трения.
21. Трение о закрепленные частицы абразивы как метод испытания материала на стойкость к абразивному изнашиванию.
22. Трение о свободный абразив как метод испытания материала на стойкость к абразивному изнашиванию.
23. Изнашивание в потоке абразивных частиц – метод оценки стойкости к абразивному износу.
24. Методы оценки стойкости к абразивному изнашиванию.
25. Методы оценки стойкости к кавитационному изнашиванию.
26. Методы оценки стойкости к фрикционной усталости материалов.
27. Методы испытаний на стойкость к фреттинг-коррозии.
28. Методы оценки стойкости материалов к схватыванию.

Литература

1. Богданович П.Н., Прушак В.Я. Трение и износ в машинах. Учеб. для вузов. Мн.: Выш. шк. 1999. – 374с.
2. Тархунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. – 424с.
3. И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение. 1977. – 526с.
4. Папок К.К., Рагозин Н.А. Словарь по топливам, маслам, смазкам, и специальным жидкостям (химмотологический словарь). М.: Химия 1975. – 392с.
5. И.В. Крагельский. Трение и износ. М.: Машиностроение. – 1968с.
6. Мышкин Н.К., Петроковец М.Н. Трибология. Принципы и приложения. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – с. 22-28.
7. Буяновский И.А. Методы и средства трибологических испытаний. – Химия и технология топлив и масел, 1994, № 3 с. 29-40.
8. Кане М.М. Основы научных исследований в технологии машиностроения: Учебн. пособие для вузов. – Мн.: Выш. шк., 1987. – с. 156-168.

Лабораторная работа №8 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы: Изучение основных теплофизических методов исследования материалов; ознакомление с устройством и принципом действия дериватографа ОД-102 и микрокалориметра ДСМ – 10м/3а; освоение методики работы на дериватографе; снятие и расшифровка термограммы.

Оборудование и принадлежности: Дериватограф ОД-102; дифференциальный сканирующий микрокалориметр ДСМ-10м/3а; набор образцов; инертное вещество (порошок Al_2O_3).

Основные положения

Теплофизические методы предназначены для изучения процессов, сопровождающихся тепловыми эффектами (фазовые и реологические превращения в материале, химические реакции) при помощи построения термограмм. Термограмма – кривая зависимости тепловой физической характеристики (теплоёмкости C_p , Дж/г·К; теплового потока, мДж/с; коэффициента термического расширения $\alpha \cdot 10^{-4}$, K^{-1}) от температуры. На термограммах эндо- или экзоэффекты (эффекты, соответственно, выделения или поглощения тепла) отражаются в виде пиков или изломов кривых.

К основным теплофизическим методам исследования относятся дилатометрия, термогравиметрия (ТГ), деривативная термогравиметрия (ДТГ), дифференциальный термический анализ (ДТА), дериватография, калориметрия.

I. Дилатометрия

Методы регистрации изменения размеров и объёма тел под влиянием температуры или в результате протекающих в них физических или химических процессов объединяются термином «дилатометрия». Различают *линейную* дилатометрию (фиксируется изменение линейных размеров образца) и *объёмную* дилатометрию (фиксируется изменение объёмных размеров). Измеряемой величиной является коэффициент теплового расширения (используемый, как отмечалось выше, для обнаружения и идентификации температурных переходов).

II. Термогравиметрия (ТГ)

Сущность термогравиметрии заключается в регистрации изменений массы пробы при непрерывном изменении температуры. Этот метод реализуется с помощью термовесов. Достоинства метода: 1) простота; 2) возможность выполнения количественных расчётов состава материала (стехиометрические или другие расчёты). Недостатки метода: в случаях, когда две реакции (или превращения) следуют плотно друг за другом, или перекрывают друг друга, а также, если чередуются реакции, приводящие к значительному и незначительному изменению массы пробы, метод термогравиметрии оказывается неопределённым и оценка кривой ТГ становится затруднительной и неточной. Этот недостаток преодолевается с помощью ДТГ.

III. Деривативная термогравиметрия (ДТГ)

Деривативная термогравиметрия основывается на регистрации скорости изменения массы образца при изменении температуры. Зависимость ДТГ представляет собой производную от зависимости ТГ. Анализ кривой ДТГ позволяет воспроизвести истинную картину, происходящего в испытуемом материале процесса и облегчает интерпретацию одновременно записываемой термограммы ТГ. Следующие непрерывно друг за другом процессы, смешивающиеся на кривой ТГ, на деривативной кривой ДТГ разделяются и отчётливо отличимы друг от друга.

IV. Дифференциальный термический анализ (ДТА)

Принцип этого метода заключается в измерении температурной зависимости разности температур исследуемого вещества и термически инертного эталонного образца при непрерывном нагревании или охлаждении. Для этого образец и эталон (чаще всего Al_2O_3) нагреваются с помощью одного источника теплоты, а температуру измеряют введёнными в них чувствительными датчиками. Измеряемой величиной является разница ΔT между температурами образца $T_{об}$ и эталона $T_{эт}$ ($\Delta T = T_{об} - T_{эт}$) в функции температуры нагревания. Величина ΔT пропорциональна изменению энтальпии ΔH и теплоёмкости C_p образца. Недостатки ДТА: 1) для пересчёта площади пика на экспериментальной кривой в единицы энергии и для калориметрических оценок необходимо использовать достаточно сложные математические модели; 2) большая инерционность измерений, обуславливающая низкую разрешающую способность метода; (3) большие ошибки оценки ΔH и C_p ($\pm 10-15\%$).

V. Калориметрия

Существует множество калориметрических методов исследования материалов. Наиболее распространёнными из них являются следующие: 1) адиабатическая калориметрия; 2) динамическая калориметрия, включающая дифференциальную калориметрию Кальве (ДТК), дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК) и др.; 3) микрокалориметрия; 4) деформационная калориметрия.

Метод *дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК)* лишён вышеперечисленных недостатков метода ДТА. В техническом исполнении ДСК отличается от ДТА наличием индивидуальных нагревателей для камер образца и эталона. Два автономных микронагревателя, расположенные в каждой из камер, автоматически выравнивают разность температур, возникающую в процессе нагрева между измерительной и сравнительной камерами. При этом автоматически регистрируется необходимая для балансировки (выравнивания) тепловая мощность dP (или тепловой поток). Суммарный тепловой эффект превращения, равный изменению энтальпии образца, определяется по площади пика на термограмме зависимости тепловой мощности от температуры (dP/t). Кроме этого, при помощи калибровочного коэффициента кривая ДСК может быть представлена в виде зависимости теплоёмкости C_p от температуры.

Таким образом, фундаментальным отличием ДСК от ДТА является регистрация непосредственно тепловой мощности процесса. При этом соблюдается полное внешнее сходство термограмм. Новейшие ДСК (DSK-7) позволяют производить измерения в интервале температур 100 – 1000°K с 11-ю различными скоростями – от 0.3 до 320 град/мин при погрешности измерений $\pm 0.1\%$.

Методические указания

В настоящей лабораторной работе теплофизические методы рассмотрены на примере дериватографа ОД-102 и микрокалориметра ДСМ – 10м/3а. **Дериватография** – это метод позволяющий измерять одновременно температуру (Т), изменение массы (ТГ), скорость изменения массы (ДТГ) и изменение энтальпии (ДТА) одной единственной пробы исследуемого вещества. Таким образом, обеспечивается абсолютная тождественность условий эксперимента для различных измерений.

Схема дериватографа ОД-102 (прибор, реализующий метод дериватографии) изображена на рисунке 1.

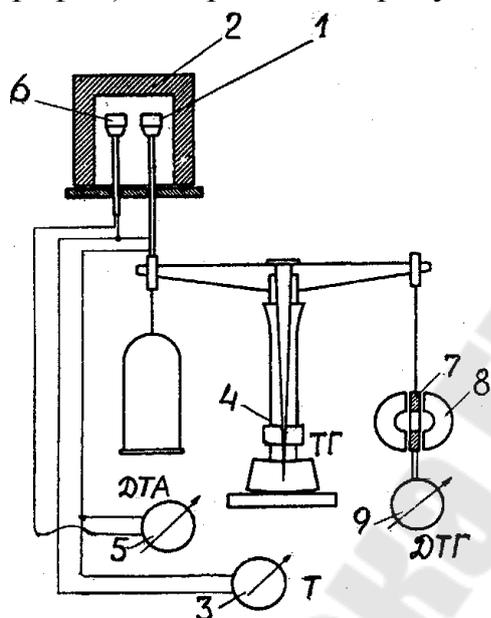


Рис. 1. Схема дериватографа:

- 1 – тигель с исследуемым веществом;
- 2 – электропечь;
- 3 – гальванометр для регистрации температуры;
- 4 – термовесы;
- 5 – ДТА гальванометр;
- 6 – тигель с инертным веществом;
- 7 – катушка;
- 8 – магниты;
- 9 – ДТГ гальванометр.

Испытуемое вещество помещается в тигле 1 и нагревается в электропечи 2. Изменение температуры (Т) во времени регистрируется с помощью термопары, находящейся внутри пробы, и гальванометра 3. Изменение массы пробы (ТГ) фиксируется с помощью весов 4. Направление и величина изменения энтальпии в результате физических и химических превращений в веществе определяется аналогично методике ДТА (дифференциального термического анализа). Для этого с помощью гальванометра 5 фиксируется разность температур между испытуемым материалом, находящимся в тигле 1, и инертным веществом (Al_2O_3) в тигле 6. Прибор измеряет также и скорость изменения массы (ДТГ) с помощью катушки с большим числом витков 7, подвешенной к коромыслу весов и движущейся в поле магнита 8. Силовое поле магнитов индуцирует в движущейся ка-

тушке ток, напряжение которого (пропорциональное отклонению коромысла весов) регистрируется гальванометром 9.

Основные части дериватографа ОД-102

1. Аналитические весы с воздушным демпфером и устройством для автоматической установки гирь.
2. Электродуховка с автоматическим подъемным устройством.
3. Гальванометры (3 шт.).
4. Терморегулятор.
5. Регистрирующее устройство с фотозаписью.

Основные технические характеристики дериватографа ОД-102

1	Масса пробы, г	0.2 - 3
2	Чувствительность весов, мг	0.2
3	Пределы регулирования чувствительности весов, мг	50,100,200,500,1000
4	Максимальная температура нагрева, °С	1050
5	Скорость увеличения температуры, °С/мин	1 – 20
6	Скорость вращения фоторегистрирующего барабана, об/мин	50,100,200,400

Порядок работы на дериватографе

1. Установка навесок испытуемого и инертного вещества.
 - 1.1. Проверка чувствительности термовесов.
 - 1.2. Выбор тигля зависит от количества исследуемого вещества. Проба должна быть взята в таком количестве, чтобы она даже после испытания заполнила суженную часть тигля, в противном случае результаты ДТА будут некорректны. Если испытуемого вещества недостаточно даже для наименьшего тигля, то навеску смешивают с известным количеством инертного вещества (Al_2O_3) и производят испытание этой смеси. Разбавление не искажает кривые ТГ и ДТГ, а уменьшает максимумы на кривой ДТА.
 - 1.3. Взвешивание производят на весах, установленных на максимальную чувствительность (max отклонение – при массе груза 20 мг).
 - 1.4. Масса Al_2O_3 в тигле инертного вещества должна приблизительно равняться массе испытуемого вещества.
2. Установка скорости отвода и подачи газа.

При образовании в процессе испытания газообразных продуктов разложения образца, следует обеспечить их отвод. Подача газа производится в случае необходимости создания в тигле специальной (чаще инертной) газовой атмосферы.
3. Установка чувствительности весов и гальванометров.

Чувствительность должна быть выбрана таким образом, чтобы все пики на кривых поместились на фотобумаге. Если чувствительность выбрана

слишком высокой, то на дериватограмме будет видна лишь часть кривой. Наоборот, при низкой чувствительности точность оценок снижается. При исследовании совершенно неизвестного вещества необходимо производить ориентировочное измерение, на основании которого выбирается правильная чувствительность.

4. Заправка светочувствительной бумаги.
5. Установка нулевого положения световых сигналов термовесов и гальванометров.
6. Нанесение штриховой сетки на светочувствительную бумагу. Штриховка, обозначающая массу, в каждом случае одинакова; для штриховки температуры устанавливаются один из четырёх режимов, в соответствии с пределом измерения температуры (125, 500, 1000 или 1500°C).
7. Установка программы нагревания (скорость нагрева).
8. Установка скорости записи (скорость вращения регистрирующего устройства - 50, 100, 200, 400 минут за полный оборот).
9. Измерение: включить двигатели регулятора напряжения и регистрирующего устройства, ток нагрева.
10. Оформление протокола испытания. В протокол заносится следующая информация: масса навесок пробы и инертного вещества; номер тигля; чувствительность по T, ДТГ, ДТА; скорость нагрева; скорость регистрации; атмосфера в печи.
11. Окончание измерения: отключить двигатели регистрирующего барабана и регулятора напряжений, отключить нагрев; охладить печь с помощью подъёмного двигателя; отключить подвод и отвод газов.
12. Анализ термограммы.

Анализ термограммы

1. Оценка кривой ДТА позволяет определить:

- 1.1 Направление изменения энтальпии, происходящего в результате теплофизического процесса: эндоэффект (процесс, сопровождающийся поглощением тепла, например, плавление) на термограмме ДТА реализуется в виде пика, направленного вниз; экзоэффект (процесс, сопровождающийся выделением тепла, например, кристаллизация) на термограмме реализуется в виде пика, направленного вверх.
- 1.2 Характеристические температуры (температуры плавления $T_{пл}$, кристаллизации $T_{кр}$, испарения $T_{исп}$, сублимации $T_{сб}$ и др.), соответствующие максимуму пика на кривой ДТА в случае эндотермической реакции, а в случае экзотермического превращения – температуре начала интенсивного выделения/поглощения теплоты. Путём сопоставления полученных данных с литературными, возможна как идентификация материала, так и заключение о его чистоте (примеси приводят к смещению характеристических температур). По кривой ДТА обычно определяют температуры превращений в исследуемом материале, не связанных с изменением массы пробы (для этого используют кривую ДТГ, имеющую более идеальную базовую линию)

1.3 Величину изменения энтальпии ΔH определяют, измеряя площадь, лежащую под максимумом кривой (площадь пика). Для этого вначале получают калибровочную кривую (кривую ДТА вещества с известной теплотой превращения) и определяют калибровочный коэффициент – отношение заранее известной теплоты превращения к площади пика превращения. Далее, для того, чтобы определить теплоту превращения в исследуемом образце, площадь пика умножается на калибровочный коэффициент. В качестве эталонов применяют чаще всего CaSO_4 , AgNO_3 и CaCO_3 . Основная проблема при расчёте площади под кривой состоит в определении базовой линии (линия *ac* на рисунке 2), ограничивающей площадь пика. Трудности ее определения вызваны, в основном, изменением теплопроводности и теплоёмкости пробы в результате химического или физического превращения. В связи с этим расчёт величины изменения энтальпии возможен только с погрешностью 5 – 10%.

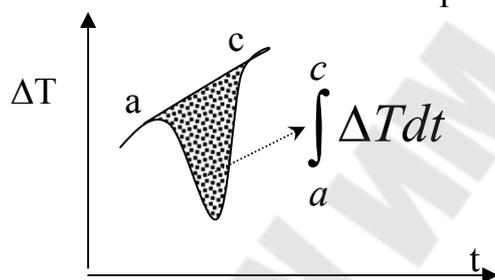


Рис.2. Фрагмент кривой ДТА

2. Оценка кривой ТГ позволяет в подавляющем большинстве случаев определить количественный состав испытуемой пробы на основании изменения её массы. Например, при нагревании известняка, содержащийся в нём кальцит (CaCO_3) разлагается в температурном диапазоне 600 - 800°C на окись кальция и углекислый газ:



По кривой ТГ (рис.3) можно рассчитать количество CO_2 по изменению массы пробы при температуре 600 - 800°C:

$$m(\text{CO}_2) = m_0 (\text{CaCO}_3) - m_1(\text{CaO}) \quad (2)$$

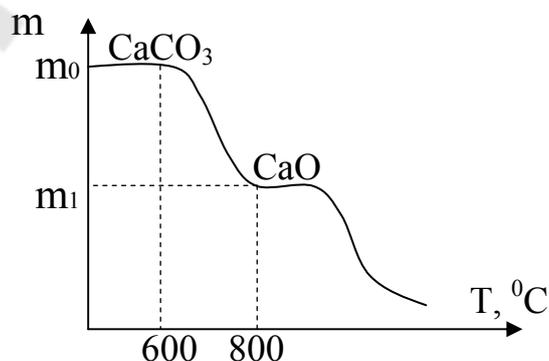


Рис. 3. Фрагмент ТГ кривой известняка

Можно рассчитать содержание кальцита в пробе путём стехиометрического вычисления по формуле (1). Зная величину навески (m_0) можно вычислить процентное содержание всех её составляющих (кальцита и примесей), если отдельные стадии разложения пробы образуют чётко определённые «волны» на кривой ТГ.

Однако случаи, когда химические реакции в пробе протекают в различных интервалах температур, встречаются достаточно редко. Чаще имеет место «перекрытие» химических реакций на шкале температур, что приводит к затруднению качественной оценки изломов на ТГ кривой.

3. Оценка кривой ДТГ значительно облегчает объяснение изменений основной кривой ТГ, особенно в случаях, когда превращения в исследуемом материале следуют друг за другом или перекрываются. Сливающиеся и трудно идентифицируемые на кривой ТГ тепловые эффекты разделяются и становятся чётко различимыми на ДТГ. По кривой ДТГ определяют характеристические температуры процессов, сопровождающихся изменением массы образца.

4. Совместная оценка кривых ДТА и ДТГ.

Путём сопоставления кривых ДТА и ДТГ можно производить оценку происходящих в пробе термических реакций одновременно с двух сторон: 1) анализируя изменения энтальпии и 2) изменения массы образца.

4.1 Кривая ДТГ не обнаруживает изменений, а изменяется только кривая ДТА. Это свидетельствует о том, что в пробе происходят только физические превращения, не сопровождающиеся изменением массы, такие как, изменение фазового (агрегатного) состояния, перекристаллизация и др.

4.2 Изменения на кривых ДТА и ДТГ совпадают. Это указывает на то, что в пробе произошло химическое превращение, например окисление, термическая диссоциация и т.п. (химические превращения, как правило, сопровождаются изменением массы).

4.3 Изменения есть на обеих кривых (ДТА и ДТГ), но они не совпадают. Это указывает на то, что данный участок кривой ДТА соответствует сложению термических эффектов двух или нескольких химических реакций, или физических превращений в исследуемом образце. Кривая ДТА регистрирует результирующий термический эффект.

Принцип работы дифференциальной сканирующей калориметрии рассмотрен на примере прибора ДСМ 10м/3а (дифференциальной сканирующий микрокалориметр). Измеряемой величиной является разница тепловых мощностей dP , затрачиваемых на прогрев исследуемого и эталонного образцов. Результатом измерения является термограмма – кривая зависимости dP от температуры (рис 4).

Основные рабочие части прибора:

(1) Две калориметрические ячейки: для исследуемого и эталонного образцов. Ячейки снабжены нагревателями и датчиками температуры.

- (2) Блок сканирования, подающий на нагреватели обеих ячеек одинаковую тепловую мощность прогрева, которая обеспечивает изменение температуры эталонной ячейки в соответствии с заданной программой (скоростью нагрева/охлаждения).
- (3) Блок измерения, обеспечивающий подачу дополнительной мощности в одну из ячеек для поддержания одинаковой температуры в обеих ячейках.
- (4) Панель управления прибора, для ручного регулирования режимов работы прибора.
- (5) ЭВМ (компьютерное программное обеспечение).
- (6) Прибор самопишущий двухкоординатный Н-307/1.

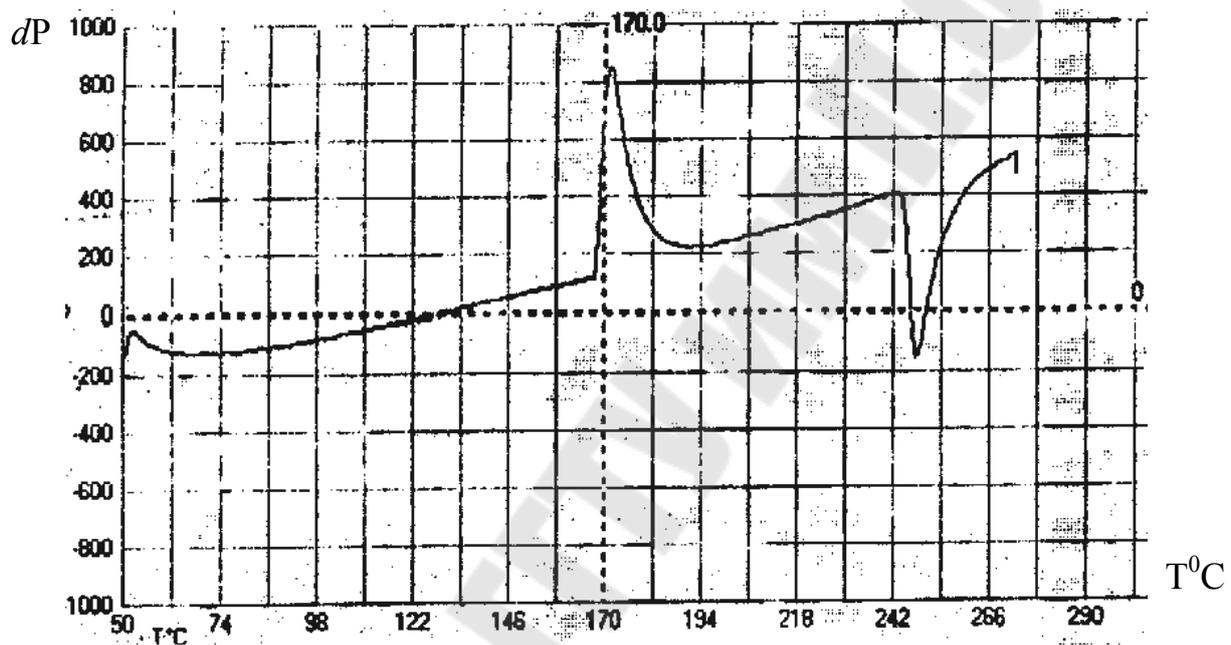


Рис.4. Изображение термограммы, полученной на ДСМ-10м/3а.

В комплект прибора входит также набор стандартных образцов температур и теплот фазовых переходов.

Основные технические характеристики.

1	Диапазон рабочих температур, °С	
	общий	-180(-170) ... 500
	в камере I	-180(-170) ... 80
	в камере II	70 ... 500
2	Скорость изменения температуры, °/мин	0.5;1;2;4;8;16;32;64;128
3	Диапазон измерения теплоёмкости, Дж/°С	0 ... 0.3
4	Погрешность измерения температуры, °С	±0.5
5	Допустимое время непрерывной работы, не менее, ч	24
6	Масса навески, мг	20
7	Диапазон dP (разница тепловых мощностей), мВт	± 5 ... ± 40

- Режимы работы. Прибор позволяет использовать пять режимов работы:
- (1) **Изотермия** – режим постоянной температуры. Прибор переходит в режим изотермы при той температуре, при которой была нажата кнопка.
 - (2) **Прогрев** – режим нагревания образца с заданной скоростью в диапазоне от температуры, при которой нажата кнопка, до установленной максимальной температуры ($T_{\text{верх}}$).
 - (3) **Охлаждение** – режим охлаждения образца с заданной скоростью. Работа аналогично режиму прогрева, но нижней границей является установленная минимальная температура ($T_{\text{ниж}}$).
 - (4) **Исходное** – стандартный режим работы, применяемый для вывода образца в начальное состояние, с которого начинается снятие термограммы. Время вывода зависит от текущего значения температуры ячеек, что связано с их охлаждением или нагревом.
 - (5) **Автомат** – режим многократного повторения режимов.

Микрокалориметр ДСМ-10м/3а позволяет работать, поддерживая нормальное, повышенное, и пониженное давление в калориметрическом блоке. Для создания давления до 10^7 Па к калориметрическому блоку подключают баллоны с азотом, гелием или воздухом. Для создания разряжения до $1.33 \cdot 10^{-3}$ Па подключают вакуумный насос.

Порядок работы на микрокалориметре ДСМ-10м/3а

1. Установка следующих параметров режима работы (путём запуска программы на компьютере либо, используя панель управления прибора):
 - 1.1. Верхняя граница изменения температуры ($T_{\text{верх}}$).
 - 1.2. Нижняя граница изменения температуры ($T_{\text{ниж}}$).
 - 1.3. Диапазон изменения разницы тепловых мощностей dP .
 - 1.4. Скорость прогрева (охлаждения).
 - 1.5. Время изотермы.
 - 1.6. Режим графика. Информация может регистрироваться двумя способами:
 - 1.6.1. График типа I – изотерма (изменения dP при $T = \text{const}$).
 - 1.6.2. График типа S (зависимость dP/T).

По умолчанию программа сохраняет предыдущую настройку.
2. Установка исследуемого образца и эталона соответственно в рабочую и эталонную ячейки калориметрического блока.
3. Включение прибора и выполнение подготовительной работы (если необходимо - подключение баллонов газа или вакуумного насоса).
4. Запись термограммы (рис.4) либо в режиме сканирования (S), либо в режиме изотермы (I).
5. Анализ термограммы.

Порядок выполнения работы

1. Изучить основные теплофизические методы исследования материалов: принцип работы, достоинства и недостатки.
2. Ознакомится с устройством дериватографа ОД-102 и дифференциального сканирующего микрокалориметра ДСМ-10м/3а; изучить их принцип работы и основные технические характеристики.
3. Изучить порядок работы на дериватографе.
4. Снять термограмму предложенного преподавателем образца.
5. Произвести расшифровку термограммы: 1) установить основные характеристические температуры материала - температуры фазовых переходов (температуры плавления, кристаллизации, испарения, рекристаллизации и т.д.) и температуры химических превращений (окисление, разложение и т.д.); 2) рассчитать изменение энтальпии ΔH переходов по величине площади соответствующих пиков кривой ДТА.
6. Заполнить таблицу результатов теплофизических испытаний по приведенной ниже форме.
7. Составить отчёт.

Таблица результатов теплофизических испытаний

Характеристические температуры					
Значение t , °С	t_1	t_2	t_3	...	t_n
Превращение:					
- <u>Химическое</u> (окисление, термическая диссоциация и др.)					
- <u>Физическое</u> (плавление, испарение, кристаллизация, рекристаллизация и др.)					
Физические показатели					
Площадь пика S					
Изменение энтальпии ΔH					
Состав пробы					
Название компоненты					
Содержание %					

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Теоретическая часть, содержащая краткое описание методов дериватографии и калориметрии, устройство дериватографа ОД-102 и микрокалориметра ДСМ-10м/3а.
3. Термограмма предложенного преподавателем материала.
4. Расшифровка термограммы:
 - 4.1. Описание кривых ДТА, ДТГ и ТГ: описание и интерпретация эндо- и экзоэффектов (всех аномалий в виде пиков и изломов).
 - 4.2. Таблица результатов теплофизических испытаний по представленной выше форме.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Сущность теплофизических методов.
2. Что такое термограмма и как её получить?
3. Какие характеристики материала определяют с помощью теплофизических методов?
4. Обнаружение фазового превращения на дериватограмме (ДТА, ДТГ и ТГ).
5. Основные теплофизические методы исследования материалов.
6. ТГ: принцип метода, достоинства и недостатки.
7. ДТГ: принцип метода.
8. ДТА: принцип метода, достоинства и недостатки.
9. Калориметрия.
10. Дилатометрия.
11. Дериватография.
12. Чем отличается метод ДСК от ДТА?
13. Эндо- и экзоэффекты: примеры и выражение на термограмме.
14. Оценка кривой ДТА (как и что оценивается).
15. Оценка кривой ТГ.
16. Оценка кривой ДТГ.
17. Совместная оценка кривых ДТА и ДТГ.
18. Отражение химических превращений на кривых дериватограммы.

Темы индивидуальных заданий

1. Адиабатическая калориметрия.
2. Дифференциальный термический анализ.
3. Методы термического анализа (классификация, сущность методов).
4. Динамическая калориметрия.
5. Калориметрический термографический метод «теплового моста».
6. Калориметрический метод диатермической оболочки.
7. Калориметрический метод Тиана-Кальве.
8. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК).
9. Дифференциальная калориметрия Кальве (ДКК).
10. Микрокалориметрия.
11. Деформационная калориметрия.
12. Метод газовой деформационной микрокалориметрии Мюллера.
13. Метод газовой деформационной калориметрии.
14. Метод проточной газовой калориметрии.
15. Дилатометрические методы исследования теплофизических характеристик твердых тел.
16. Линейный дилатометрический метод.
17. Метод объемной дилатометрии.
18. Методы исследования теплопроводности.
19. Методы исследования температуропроводности.
20. Стационарные методы измерения теплопроводности.

21. Нестационарные методы измерения теплофизических характеристик материалов.
22. Методы определения анизотропии теплопроводности и температуропроводности полимеров.
23. Метод де Сенармонта для определения анизотропии теплопроводности материалов.
24. Теплофизические методы определения фазовых переходов (температурных превращений) в веществе.
25. Методы определения реологических переходов.
26. Термомеханические методы исследования полимеров (построение термомеханических кривых зависимости деформации от температуры).
27. Эффекты, изучаемые теплофизическими методами.

Литература

1. Годовский Ю.К. Теплофизические методы исследования полимеров. М., Химия, 1976.
2. Бартенев Г.М., Зеленев Ю.В. Курс физики полимеров. Под ред. Проф.С.Я.Френкеля. Л., Химия, 1976.
3. Берштейн В.А., Егоров В.М. Дифференциальная сканирующая калориметрия в физикохимии полимеров. – Л., Химия, 1990 – 256с.
4. Ю.А.Геллер, А.Г.Рахштадт. Материаловедение. Методы анализа. М., Металлургия, 1975.

Лабораторная работа № 9 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: ознакомление с методами исследования механических свойств материалов; изучение устройства и принципа действия универсальной испытательной машины ZD-20; получение навыков снятия диаграмм растяжения, сжатия и изгиба.

Оборудование и принадлежности: универсальная испытательная машина ZD-20; набор образцов.

Основные положения

Классификацию методов определения механических свойств материалов и изделий проводят по следующим признакам:

- а) по схеме приложения нагрузки (растяжение, сжатие, изгиб, кручение);
- б) по способу и времени действия нагрузки (статические, динамические, усталостные);
- в) по температуре, при которой проводят испытания (при нормальной, пониженной или повышенной температуре).

Статические испытания проводят таким образом, что нагрузка, приложенная к образцу, возрастает с постоянной скоростью либо не изменяется в течение времени испытания.

1. Испытания на растяжение

Методы испытаний на растяжение регламентированы ГОСТ 1497-84. С их помощью определяют следующие механические характеристики материалов: предел пропорциональности $\sigma_{пц}$; предел упругости $\sigma_{0.05}$; модуль упругости E ; предел текучести физический σ_T ; предел упругости условный $\sigma_{0.2}$; временное сопротивление σ_B ; относительное удлинение образца после разрыва δ ; относительное сужение поперечного сечения после разрыва ψ .

Испытание на растяжение включает операции закрепления цилиндрических или плоских образцов в захватах испытательной машины и растягивании их под действием постепенно возрастающей нагрузки. Фиксируется зависимость удлинения образца Δl от прилагаемой нагрузки P , по которой строится диаграмма растяжения, схематически изображенная на рис. 1

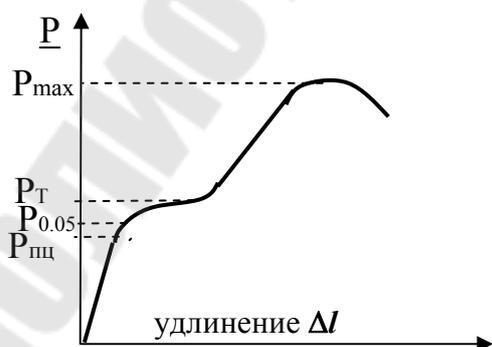


Рис. 1. Схематическая диаграмма растяжения.

Определение предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$. $\sigma_{\text{пц}}$ – напряжение, которое материал образца выдерживает без отклонений от закона Гука, (МПа), вычисляется по формуле:

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{F_0}, \quad [1]$$

где F_0 – начальная площадь поперечного сечения образца.

Определение предела упругости $\sigma_{0.05}$. $\sigma_{0.05}$ – напряжение, при котором остаточное удлинение образца достигает 0.05 % от его первоначальной длины. $\sigma_{0.05}$ характеризует прочность металлических материалов в области очень малых деформаций. $\sigma_{0.05}$, МПа, определяют по формуле:

$$\sigma_{0.05} = \frac{P_{0.05}}{F_0}. \quad [2]$$

Модуль упругости E – постоянная материала, характеризующая деформацию детали в пределах действия закона Гука. E , МПа, определяют как отношение растягивающего напряжения σ к упругой деформации ε образца:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad [3]$$

На диаграмме растяжения модуль упругости можно представить как тангенс угла наклона прямой, соответствующей начальному участку диаграммы растяжения, подчиняющемуся закону Гука.

Определение предела текучести физического σ_T и условного $\sigma_{0.2}$. σ_T – напряжение, при котором образец деформируется без увеличения нагрузки, (МПа) вычисляют по формуле:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}. \quad [4]$$

Прочность металлов, не имеющих четко выраженного σ_T , характеризуют с помощью предела текучести условного. Под условным пределом текучести $\sigma_{0.2}$ понимают напряжение, при котором остаточное удлинение образца соответствует 0.2 % от его начальной длины:

$$\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0}. \quad [5]$$

Определение временного сопротивления (предела прочности) σ_B . Это основной показатель прочности материалов, который характеризует напряжение в образце, соответствующее наибольшей нагрузке и предшествующее разрушению образца. σ_B , МПа, вычисляют по формуле:

$$\sigma_B = \frac{P_{\text{max}}}{F_0}. \quad [6]$$

Для пластичных металлов наибольшая нагрузка при растяжении соответствует не разрушению образца, а переходу его пластической деформации от равномерной к сосредоточенной на определенном (обычно более ослаб-

ленном) участке. Поэтому σ_B характеризует сопротивление материала пластической деформации.

Относительное удлинение образца после разрыва (δ) – отношение приращения длины образца $l_k - l_0$ после разрушения к начальной длине l_0 , %:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100. \quad [7]$$

Относительное сужение поперечного сечения образца после разрыва (ψ) – отношение уменьшения площади поперечного сечения образца после разрыва $F_k - F_0$ к первоначальной площади поперечного сечения F_0 , выраженное в процентах:

$$\psi = \frac{F_k - F_0}{F_0} 100. \quad [8]$$

2. Испытание на сжатие

Метод статических испытаний на сжатие при температуре 20⁰С регламентирует ГОСТ 25.503-80. По результатам испытаний на сжатие определяют: предел пропорциональности $\sigma_{ни}$; предел упругости $\sigma_{0.05}$, модуль упругости E^c , предел текучести физический σ_T , предел упругости условный $\sigma_{0.2}$, временное сопротивление σ_B , которые вычисляют по формулам, аналогичным характеристикам растяжения. В отличие от испытаний на растяжение, при испытаниях на сжатие деформациями образца являются не удлинения, а укорочения; не сужение, а увеличение поперечного сечения образца.

3. Испытания на изгиб

При изгибе в разных зонах образца действуют как растягивающие, так и сжимающие напряжения. Испытания на изгиб считаются более мягким способом нагружения, чем растяжение, но более жестким, чем сжатие. Этот метод применяется для определения механических характеристик малопластичных материалов (твердые стали, чугуны, порошковые материалы, твердые сплавы), для которых испытания на растяжение мало информативны и не пригодны. Для пластичных материалов испытания на изгиб не применяют, т.к. образцы в виде бруска изгибаются до соприкосновения обоих концов образца без разрушения. Для проведения испытания образец в виде стержня круглого или прямоугольного сечения устанавливают на опорах (цилиндрических, роликовых) и прикладывают нагрузку. Регистрируют зависимость прогиба образца f от прилагаемой нагрузки P , по которой строится диаграмма изгиба, аналогичная диаграмме растяжения (рис.1).

При сосредоточенном изгибе нагрузкой P , приложенной в середине пролета между опорами l наибольший изгибающий момент рассчитывается по формуле:

$$M_{изг} = \frac{Pl}{4}. \quad [9]$$

По результатам испытаний на изгиб определяют следующие механические характеристики: пределы прочности $\sigma_{изг}$, пропорциональности $\sigma_{ли}$, упругости $\sigma_{0,05}$ и текучести σ_T по формуле:

$$\sigma = \frac{M_{изг}}{W}, \quad [10]$$

где $M_{изг}$ – изгибающий момент;

W – момент сопротивления изгибу (для образцов круглого сечения $W = \pi d^3/32$, для образцов прямоугольного сечения $W = bh^2/6$).

Нагрузка P , применяемая для расчета прочностных характеристик при изгибе, определяется по диаграмме изгиба аналогично испытаниям на растяжение.

Методические указания

В настоящей лабораторной работе проводят испытания материалов на универсальной испытательной машине ZD-20 (Германия), позволяющей реализовать испытания на растяжение, сжатие и изгиб образцов из металла и других материалов. Большие рабочие пространства, имеющиеся в машине при испытаниях на растяжение и сжатие, допускают возможность проводить испытания не только стандартных образцов, но некоторых узлов и деталей конструкций. Узел нагружения машины – гидравлический, с приводом от электродвигателя.

Основные части установки (рисунок 2):

(1) *Основание* 1.

(2) *Силовая рама*, состоящая из колонн 2, трех рабочих поперечин (нижней 3, средней 4 и верхней 5) и верхней направляющей траверсы 6. Поперечины 3 и 5 жестко соединены между собой посредством соединительных колонн. Поверхность нижней поперечины приспособлена для установки на ней опоры для испытаний на сжатие или траверсы изгиба. Верхняя поперечина силовой рамы работает только при испытаниях на растяжение и в центре имеет вертикальное сквозное отверстие для вставки зажимов, в которых крепят образцы частей. Для открытия и закрытия зажимов в верхней поперечине служит рукоятка 7. При её перемещении вниз зажимные плашки открываются. Для фиксации закрытых и открытых зажимов предусмотрена зажимная рукоятка 8. Средняя поперечина 4 используется при испытаниях на растяжение, на сжатие и изгиб. Рукоятки 9 и 10 работают аналогично рукояткам 7 и 8, описанным выше.

(3) *Устройство для измерения деформации*. Измерительная линейка прикреплена к правой колонне силовой рамы машины. На средней поперечине (которая при испытании не движется) установлена стрелка, по отношению к которой измерительная линейка устанавливается в исходное для испытания положение. При испытании стрелка, в соответствии с движением силовой рамы, показывает деформацию образца (мм).

(4) *Пульт управления* состоит из:

- 4.1. корпуса 11, в котором размещен насос 12 и электродвигатель 13. Подача масла в рабочий цилиндр регулируется вращением маховика 14.
- 4.2. силоизмерительного устройства, состоящего из торсиона с силоизмерительными цилиндрами (малоинерционный стержень кручения), шкалы нагрузки 15 и переключателя пределов измерения 16.
- 4.3. самопишущего прибора, состоящего из барабана 17 и привода. Барабан служит для передвижения диаграммной ленты, перфорированной по краям.
- 4.4. панели управления 18.

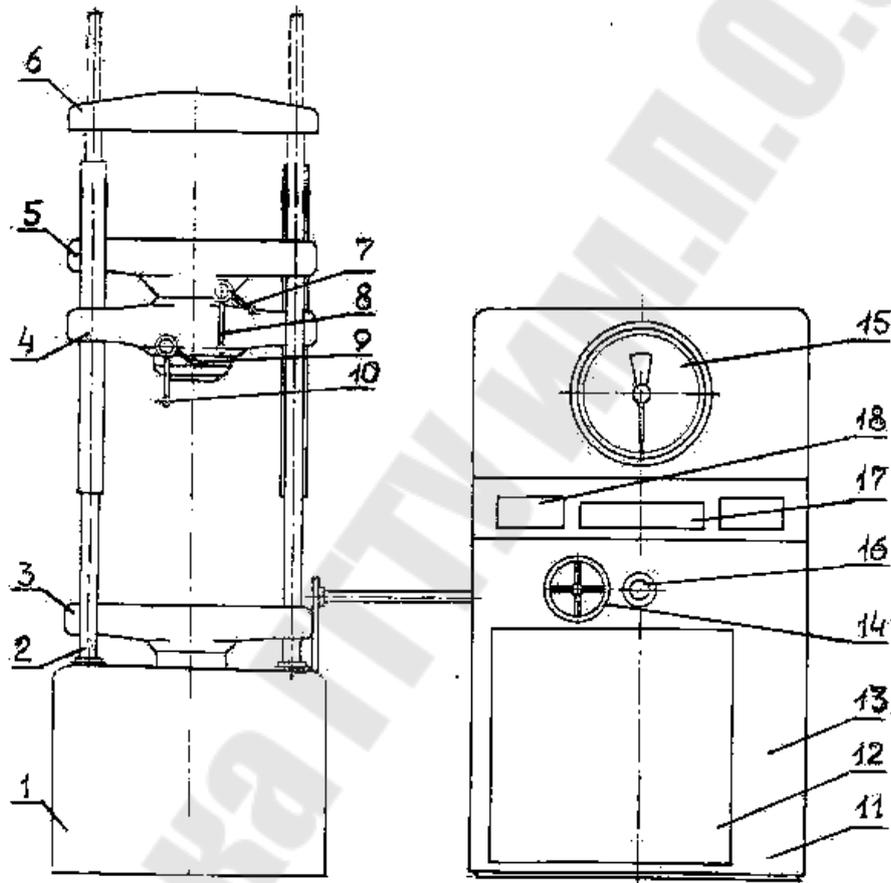


Рис. 2. Схема универсальной испытательной машины ZD-20.

Кроме основных частей машина оснащена следующими приставками:

1. Трубчатая электропечь с управляющим и измерительным устройствами для испытания на растяжение при температурах от 300 до 900⁰С, включая тензометр для измерения деформации при температурах до 600⁰С.
2. Холодильная камера с термоизмерительным и регулирующим устройствами, а также тензометром для испытания на растяжение образцов при температурах от +150⁰С до -50⁰С.
3. Опоры для образцов при испытаниях на изгиб с диаметром роликов 12.5; 15; 20; 25; 30; 50 и 100 мм.
4. Призма изгиба жесткая со сменными вкладышами.

Принцип работы машины

Растягивающие усилия действуют на образец, закрепленный между поперечинами 5 и 4. Средняя поперечина в исходном для испытания положении неподвижна, верхняя - поднимается поршнем рабочего цилиндра.

Сжимающие усилия создаются между поперечинами 4 и 3, при этом верхняя поперечина остается ненагруженной.

Для проведения *испытаний на изгиб* на нижней поперечине устанавливается траверса изгиба; в среднюю поперечину вставляется призма изгиба.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными методами исследования механических характеристик материала.
2. Изучить устройство и принцип действия универсальной испытательной машины ZD-20.
3. Провести испытания предложенных преподавателем образцов на растяжение, сжатие и изгиб. Получить зависимости: 1) нагрузка P / удлинение образца Δl (для растяжения); 2) нагрузка P / укорочение образца Δl (для сжатия); 3) нагрузка P / прогиб образца f (для изгиба).
4. По полученным данным построить диаграммы растяжения, сжатия и изгиба.
5. Рассчитать основные механические характеристики материала по формулам (1-10), результаты расчета занести в таблицу.

Таблица механических характеристик

Механическая характеристика	Вид испытания		
	Растяжение	Сжатие	Изгиб
σ_{nc}			
$\sigma_{0.05}$			
E			
$\sigma_{0.2}$			
σ_T			
σ_B			
δ			
ψ			
f			

6. Составить отчет.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Теоретическая часть, содержащая описание основных методик исследования механических характеристик материала.
3. Устройство универсальной испытательной машины ZD-20 (включая рисунок).
4. Диаграмма растяжения.

5. Диаграмма сжатия.
6. Диаграмма изгиба.
7. Таблица механических характеристик исследуемого материала.
8. Выводы, включающие сравнение по жесткости испытаний прочностных характеристик материала, полученных различными методами.

Контрольные вопросы

1. Классификация механических методов.
2. Статические механические методы.
3. Построение диаграмм и их значение.
4. Основные механические характеристики материала.
5. Как проводится испытание на растяжение?
6. Как проводится испытание на сжатие?
7. Как проводится испытание на изгиб?
8. Как рассчитываются $\sigma_{\text{пц}}$; $\sigma_{0.05}$; E ; σ_T ; $\sigma_{0.2}$; σ_B ; δ ; ψ и f ?

Индивидуальные задания

1. Испытание материалов на растяжение.
2. Испытание на растяжение при повышенных и пониженных температурах.
3. Испытание на растяжение тонких листов и лент, проволоки и труб.
4. Испытание на сжатие.
5. Испытание на длительную прочность. Испытание на вязкость разрушения.
6. Испытание на ползучесть.
7. Испытание на усталость.
8. Испытание при переменных нагрузках.
9. Испытание на ударное растяжение (разрыв).
10. Испытание на ударный изгиб.
11. Испытание на кручение.
12. Испытание на чистый изгиб.
13. Испытание на простой (сосредоточенный) изгиб.
14. Общая характеристика методов исследования механических свойств материалов.
15. Классификация методов механических испытаний.
16. Статические методы механических испытаний.
17. Динамические методы механических испытаний.
18. Усталостные методы механических испытаний.
19. Определение прочностных характеристик материалов при испытании на растяжение.
20. Определение прочностных характеристик при испытании на изгиб.
21. Определение прочностных характеристик при испытании на кручение.
22. Механические испытания материалов при низких температурах.
23. Механические испытания материалов при повышенных температурах.
24. Диаграмма растяжения.
25. Диаграмма сжатия.

26. Диаграмма испытания на изгиб.
27. Диаграмма кручения.
28. Кратковременные механические испытания при повышенных температурах.
29. Изотермический метод испытаний на ползучесть.
30. Дилатометрический метод испытаний на ползучесть.
31. Релаксационный метод испытаний на ползучесть.

Литература

1. Ю.А.Геллер, А.Г.Рахштадт. Материаловедение (методы анализа, лабораторные работы и задачи) Изд.4. М.: Металлургия, 1975, стр.134-167.
2. П.П.Костин. Физико-механические испытания металлов, сплавов и механических материалов. М: Машиностроение, 1990, стр.56-109.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Обработка результатов прямых измерений.....	3
Лабораторная работа № 2. Методы обработки результатов косвенных измерений	9
Лабораторная работа № 3. Применение корреляционно-регрессионного анализа (кра) при исследовании влияния режимов шлифования (v, s) на шероховатость поверхности деталей.....	16
Лабораторная работа № 4. Методы исследования атмосферостойкости материалов.....	23
Лабораторная работа № 5. Спектроскопические методы анализа.....	28
Лабораторная работа № 6. Методы оценки топографии и морфологии поверхности твердых тел.....	35
Лабораторная работа №7. Методы оценки износостойкости деталей машин	45
Лабораторная работа № 8. Теплофизические методы исследования	53
Лабораторная работа № 9. методы исследования механических свойств материалов	65

ИССЛЕДОВАНИЕ И ИЗОБРЕТАТЕЛЬСТВО В МАШИНОСТРОЕНИИ

**Лабораторный практикум
по одноименному курсу для студентов специальности
1-36 01 01 «Технология машиностроения»
дневной и заочной форм обучения**

Автор-составитель: **Царенко** Ирина Владимировна

Подписано в печать 16.05.06.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 4,30. Уч.-изд. л. 4,98.

Изд. № 155.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Отпечатано на МФУ XEROX WorkCentre 35 DADF
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.

Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого».

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.