

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра летательных аппаратов

В. Д. Проскурин

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика и 24.03.04 Авиастроение

Оренбург
2018

УДК 620.179.1
ББК 34.42я73
П82

Рецензент – кандидат технических наук, доцент Н. А. Морозов

Проскурин, В. Д.
П82 Исследование строения и свойств конструкционных материалов летательных аппаратов: методические указания / В. Д. Проскурин; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2018. – 166 с.

Методические указания содержат описание лабораторного оборудования для исследования свойств и характеристик конструкционных материалов и задания на выполнение лабораторных работ.

Методические указания предназначены для проведения лабораторных занятий по дисциплине «Материаловедение» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика и 24.03.04 Авиастроение

УДК 620.179.1
ББК 34.42я73

© Проскурин В. Д., 2018
© ОГУ, 2018

Содержание

Введение.....	7
1 Микроструктурный анализ металлов и сплавов	9
1.1 Задачи микроструктурного анализа.....	9
1.2 Цели лабораторной работы.....	10
1.3 Конструкция и основные характеристики металлографического инвертированного микроскопа МИМ-10	10
1.4 Оптическая схема микроскопа МИМ-10.....	15
1.5 Органы управления оптической системой микроскопа	17
1.6 Устройство металлографического микроскопа МЕТАМ РВ-34.....	19
1.7 Выполнение исследований на микроскопе МИМ-10.....	21
1.7.1 Визуальное наблюдение	21
1.7.2 Фотографирование микрошлифов.....	23
1.7.3 Определение цены деления шкалы окуляра.....	24
1.8 Выполнение микроструктурного анализа	25
1.8.1 Подготовка образцов для микроструктурного анализа.....	25
1.8.2 Визуальное исследование микроструктуры металлов и сплавов.....	27
1.8.3 Определение размеров зерен и других элементов структуры.....	32
1.9 Порядок выполнения лабораторной работы и составление отчета.....	33
1.10 Контрольные вопросы.....	33
2 Количественный анализ сплавов металлов с использованием металлографического микроскопа МИМ-10	35
2.1 Цель лабораторной работы	35
2.2 Основы количественного анализа сплавов по микроструктуре	36

2.3	Конструкция сканирующего столика и пульта управления.....	38
2.4	Методика количественного анализа сплавов на микроскопе МИМ-10...	41
2.4.1	Количественный анализ в линейном режиме.....	42
2.4.2	Количественный анализ в точечном режиме	44
2.5	Порядок выполнения работы.....	45
2.6	Содержание отчета по лабораторной работе	47
2.7	Контрольные вопросы	47
3	Измерение твердости металлов методом Бринелля	48
3.1	Цель работы.....	48
3.2	Твердость материалов и ее определение.....	48
3.3	Методы измерения твёрдости	50
3.4	Методика измерения твердости по методу Бринелля.....	53
3.5	Конструкция и технические характеристики твердомера ТБ 5004	58
3.6	Измерение твердости образцов материалов на твердомере ТБ 5004	61
3.7	Содержание отчета по работе.....	65
3.8	Контрольные вопросы	66
4	Измерение твердости методом Роквелла.....	67
4.1	Цель работы.....	67
4.2	Сущность метода измерения твердости по Роквеллу	67
4.3	Условия измерения твердости по Роквеллу.....	73
4.4	Измерение твердости по Роквеллу на твердомере модели 2410 ТР.....	77
4.5	Порядок выполнения лабораторной работы.....	80
4.6	Содержание отчета по работе.....	83
4.7	Контрольные вопросы	84
5	Измерение микротвердости материалов.....	85

5.1 Цели работы	85
5.2 Испытание микротвердости по методу восстановленного отпечатка	85
5.3 Область применения испытания микротвердости материалов.....	91
5.4 Подготовка образца к измерению микротвердости	92
5.5 Условия проведения испытаний на микротвердость.....	93
5.6 Конструкция микротвердомера ПМТ-3М.....	94
5.7 Порядок выполнения лабораторной работы.....	97
5.8 Содержание отчета по лабораторной работе	100
5.9 Контрольные вопросы	102
6 Динамические испытания конструкционных материалов.....	103
6.1 Цель лабораторной работы	103
6.2 Виды разрушения материалов в динамических испытаниях.....	104
6.3 Динамические испытания на ударный изгиб образцов с надрезом	106
6.3.1 Образцы для динамических испытаний на ударный изгиб	106
6.3.2 Схема испытания на ударный изгиб	107
6.4 Устройство маятникового копра модели ИО 5003-0,3	110
6.5 Порядок проведения испытаний на маятниковом копре.....	115
6.6 Проверка маятниковых копров	116
6.6 Порядок выполнения лабораторной работы.....	119
6.7 Содержание отчета по лабораторной работе	120
6.8 Контрольные вопросы	120
7 Ультразвуковая дефектоскопия в производстве летательных аппаратов	122
7.1 Цель и задачи лабораторной работы	122
7.2 Методы ультразвуковой дефектоскопии.....	124
7.2.1 Общие положения	124

7.2.2 Эхо-метод	126
7.2.3 Конструкции пьезоэлектрических искателей для эхо-метода.....	127
7.2.4 Чувствительность эхо-метода	131
7.2.5 Применение эхо-метода.....	133
7.2.6 Теневой метод.....	133
7.2.7 Резонансный метод	134
7.2.8 Импедансный метод.....	136
7.2.9 Акустико-топографический метод	137
7.3 Ультразвуковой дефектоскоп УД2-12	138
7.3.1 Назначение и условия применения дефектоскопа УД2-12.....	138
7.3.2 Состав дефектоскопа.....	141
7.3.3 Режимы работы дефектоскопа	141
7.3.4 Органы управления и настройки дефектоскопа.....	142
7.4 Работа на дефектоскопе УД2-12	146
7.4.1 Порядок включения дефектоскопа.....	146
7.4.2 Настройка временной регулировки чувствительности	147
7.4.3 Режим измерения глубины залегания дефекта	148
7.4.4 Режим измерения координат залегания дефекта	149
7.4.5 Оценка эквивалентной площади дефекта	150
7.5 Порядок выполнения лабораторной работы	151
7.6 Содержание отчета по лабораторной работе	152
7.7 Контрольные вопросы	152
Список использованных источников	153
Приложение А (<i>справочное</i>) Таблица перевода чисел твердости.....	155
Приложение Б (<i>справочное</i>) Таблица микротвердости.....	160

Введение

В производстве деталей летательных аппаратов необходимо контролировать характеристики используемых конструкционных материалов, чтобы обеспечить заданную нагрузочную способность, надежность и долговечность деталей, агрегатов и узлов. В состав машиностроительного предприятия обычно входит центральная заводская лаборатория, оснащенная необходимым для решения этих задач приборным и испытательным оборудованием. К основным функциям центральной заводской лаборатории относятся:

- входной контроль качества поставляемых на предприятие материалов, заготовок, полуфабрикатов;
- технологический контроль процессов термообработки, нанесения покрытий;
- неразрушающий контроль заготовок и изготовленных деталей;
- контроль качества сварных швов и соединений;
- опытно-экспериментальные работы по исследованию влияния внедряемых технологических процессов на конструкционные материалы и эксплуатационные характеристики изделий;
- разработка нормативной и технологической документации на процессы испытаний и контроля изделий и отдельных деталей.
- техническое обслуживание, наладка, профилактика и ремонт исследовательского и испытательного оборудования и приборов.

Для выполнения этих работ необходимы специалисты, имеющие практические навыки по исследованию строения, структуры и свойств конструкционных материалов на различных этапах производства изделий. Рабочей программой дисциплины «Материаловедение» по направлениям подготовки бакалавров 24.03.04 Авиастроение, 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика предусмотрены лабораторные работы, в результате выполнения которых обучающиеся приобретают:

- знания по основам кристаллического строения металлов и сплавов, теории деформации и разрушения конструкционных материалов, по методам определения

физико-механических характеристик, по видам, маркам и технологическим характеристикам конструкционных материалов;

– практические навыки и умения проведения экспериментальных исследования физико-механических свойств конструкционных материалов, работы с металлографическим, испытательным и другим лабораторным оборудованием, выполнения контроля качества материала заготовок и обработанных деталей.

Методические указания содержат описание методик, применяемого оборудования и последовательности выполнения лабораторных работ по изучению структуры материалов, определению твердости, ударной вязкости и ультразвуковой дефектоскопии изделий.

1 Микроструктурный анализ металлов и сплавов

1.1 Задачи микроструктурного анализа

Микроструктурный анализ – метод исследования структуры металлов и сплавов с помощью оптических и электронных микроскопов. Микроструктурный анализ позволяет выявить и определить:

- форму и размеры кристаллов, зерен, включений и других составляющих структуры;
- характер взаимодействия компонентов сплава: образование твердого раствора, механической смеси различных фаз или химического соединения;
- фазовый состав сплавов, виды и количественное соотношение отдельных фаз;
- наличие дефектов структуры, пористости, инородных включений, дислокаций.

По результатам микроструктурного анализа можно прогнозировать механические свойства металлов и сплавов, технологичность материалов в производстве, работоспособность изделий из них в различных условиях.

Для микроструктурного анализа применяются оптические металлографические микроскопы, конструкция и оптическая схема которых обеспечивает наблюдение и фотографирование поверхности непрозрачных объектов в отраженном свете.

В качестве объектов микроструктурного анализа используются металлографические шлифы (микрошлифы) – образцы металлов и сплавов с подготовленной для исследования поверхностью. Процесс приготовления шлифа включает операции шлифования, полирования и обработки (травления) поверхности образца химическими реактивами. Различное воздействие химических реактивов на отдельные структурные составляющие обеспечивает их выявление и дифференциацию за счет образования микрорельефа на поверхности шлифа, окрашивания в различные цвета, изменения оптических свойств в поляризованном свете.

В машиностроительном производстве микроструктурный анализ применяется:

- при входном контроле металлов и сплавов, используемых для изготовления деталей;
- для контроля качества выпускаемых изделий;
- для контроля результатов термической и химико-термической обработки в процессе изготовления изделий;
- для контроля качества сварных и паяных соединений, характеристик покрытий;
- для исследования влияния условий эксплуатации деталей на изменение структуры и свойств металлов и сплавов.

Специалист в области проектирования и производства летательных аппаратов должен знать возможности микроструктурного анализа и иметь практические навыки работы с металлографическим оборудованием.

1.2 Цели лабораторной работы

Целями выполнения лабораторной работы являются:

- изучение конструкции, оптической схемы и органов управления металлографических инвертированных микроскопов МИМ-10 и МЕТАМ РВ-34;
- приобретение практических навыков и умений выполнения микроструктурного анализа металлов и сплавов.

1.3 Конструкция и основные характеристики металлографического инвертированного микроскопа МИМ-10

Металлографический инвертированный микроскоп МИМ-10 предназначен для микроструктурного анализа металлов, сплавов и других материалов, визуального исследования и фотографирования микрошлифов, а также для выполнения

объемного количественного анализа фазового и структурного состава сплавов с помощью полуавтоматического интеграционного устройства.

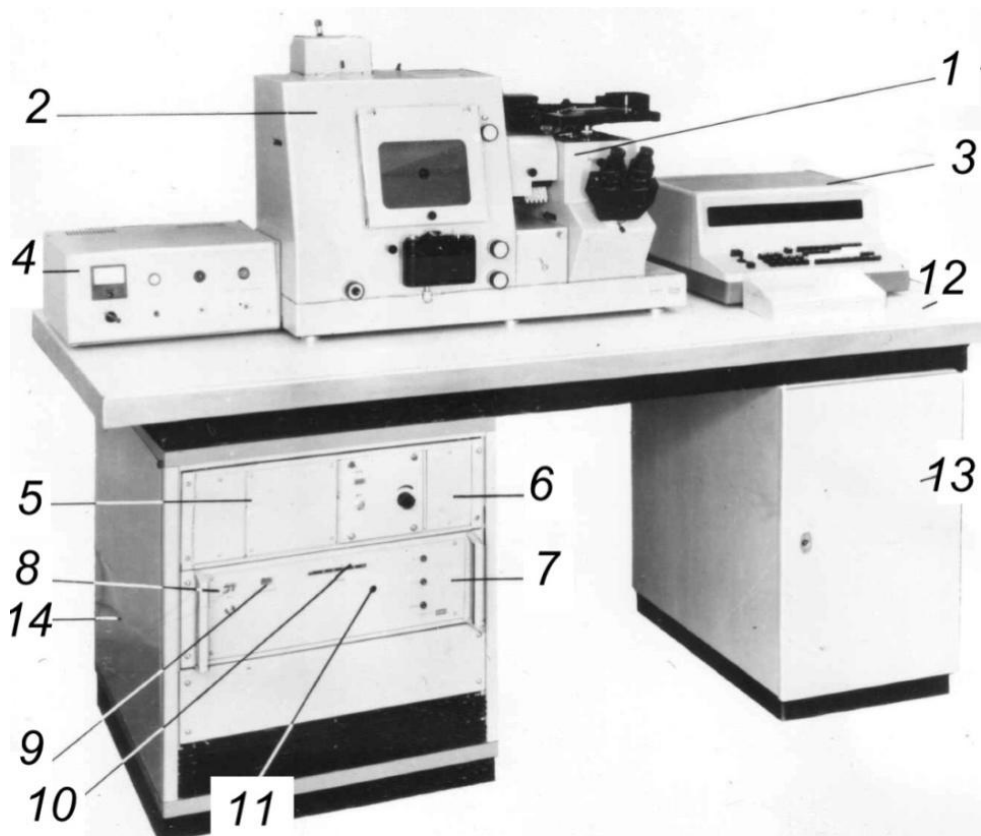
Инвертированными называют микроскопы, у которых предметный столик расположен над объективом, направленным вертикально вверх. Образец располагается на предметном столике исследуемой поверхностью вниз. Такая конструкция снимает ограничение по толщине, характерное для микроскопов прямой конструкции.

В состав металлографического микроскопа МИМ-10 входят (рисунок 1.1):

- собственно микроскоп с фототубусом и осветителями;
- стол с двумя тумбами, в которых размещены блоки питания для осветителей и комплект принадлежностей и запасных элементов;
- пульт управления МФНЭ-1 для отработки экспозиций при фотографировании на фотопластинки;
- пульт управления сканирующим столиком с интегрирующим устройством для количественного анализа.

Технические характеристики металлографического микроскопа МИМ-10:

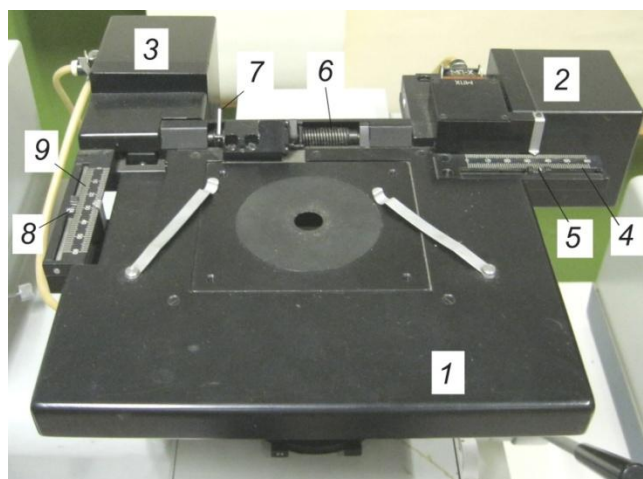
- увеличение микроскопа от 20 до 2000 крат;
- диапазоны перемещения столика от 0 до 15 мм в продольном направлении и от 20 до 35 мм в поперечном направлении;
- диапазон вращения столика от 0° до 360°;
- диапазон перемещения сканирующего столика от 5 до 55 мм;
- шаг сканирования 1, 2, 4, 8, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 400, 600, 800 мкм;
- диапазон перемещения объектива механизмом микрометрической фокусировки от 0 до 2 мм;
- размеры фотопластинок 9 x 12 и 13 x 18 см;
- размер кадра фотопленки 24 x 36 мм;
- источники света: лампа накаливания с йодным циклом КГМ9-70, ксеноновая дуговая лампа ДКсШ-120;
- габаритные размеры микроскопа 1780 x 780 x 1250 мм;
- масса микроскопа 300 кг.



1 – микроскоп; 2 – фототубус; 3 – пульт управления столиком; 4 – пульт управления МФНЭ-1; 5 – блок электроаппаратуры; 6 – блок питания лампы КГМ9-70; 7 – блок питания лампы ДКсШ-120; 8 – лампа включения питания блока; 9 – сигнал «Смени лампу»; 10 – индикатор тока лампы; 11 – регулировка тока лампы; 12 – стол; 13 – тумба с принадлежностями; 14 – тумба для электроаппаратуры.

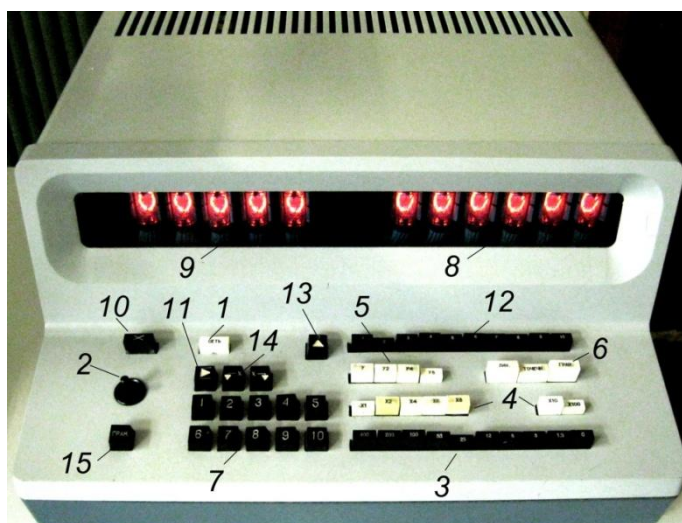
Рисунок 1.1 – Конструкция микроскопа МИМ-10

В состав микроскопа МИМ-10 входит сканирующий предметный столик, снабженный шаговыми электродвигателями и механизмами для перемещения по двум координатам X и Y в горизонтальной плоскости (рисунок 1.2). Скорость перемещения столика, определяемая частотой импульсов, подаваемых на электродвигатели, задается с помощью кнопок 3 пульта управления (рисунок 1.3). Шаг сканирования, равный перемещению столика на один импульс, также настраивается переключением кнопок пульта управления.



1 – предметный столик; 2 – шаговый электродвигатель оси X; 3 – шаговый электродвигатель оси Y; 4 – линейка оси X; 5 – ограничительные упоры по оси X; 6 – винт оси X; 7 – ручка гайки оси X; 8 – ограничительные упоры по оси Y; 9 – линейка оси Y.

Рисунок 1.2 – Сканирующий предметный столик микроскопа МИМ-10



1 – кнопка включения; 2 – рукоятка управления столиком, 3 – кнопки выбора скорости; 4 – кнопки выбора шага по оси X; 5 – кнопки выбора шага по оси Y; 6 – кнопки выбора режима работы; 7 – кнопки, назначаемые элементам структуры; 8 – счетчик импульсов суммарный; 9 – счетчик импульсов единичный; 10 – кнопка сброса; 11 – кнопка нерегистрируемого перемещения; 12 – кнопки единичных счетчиков; 13 – кнопка возврата в исходное положение; 14 – кнопки перемещения по оси Y; 15 – кнопка гранулометрического режима.

Рисунок 1.3 – Пульт управления сканирующим столиком

Управление движением столика с пульта управления осуществляется:

- отклонением качающейся в двух плоскостях рукоятки (типа «джойстик») – при визуальном наблюдении объекта исследования;

- нажатием кнопок 7 – при выполнении количественного анализа микроструктуры.

Количество электрических импульсов, подаваемых на электродвигатели при нажатии кнопок 7, выводится на цифровые индикаторы счетчиков и используется для подсчета процентного содержания отдельных составляющих структуры на поверхности микрошлифа.

Важную роль при микроструктурном анализе и металлографических исследованиях играет освещение микрошлифа. Оптическая система микроскопа МИМ-10, а также других металлографических микроскопов позволяет проводить наблюдения объекта:

- в светлом поле при прямом освещении поверхности микрошлифа через объектив микроскопа;

- в светлом поле при косом освещении микрошлифа наклонным световым лучом для лучшего выявления рельефности исследуемой поверхности;

- в темном поле при освещении микрошлифа светом, проходящим вокруг объектива и сфокусированным на исследуемой поверхности металлическим зеркалом, закрепленным на оправе объектива;

- в поляризованном свете с ручным изменением угла поворота поляризатора и анализатора;

- методом фазового контраста и интерференции.

Применение различных способов освещения микрошлифа позволяет выявить и дифференцировать элементы структуры исследуемых материалов, отличающиеся оптическими свойствами.

1.4 Оптическая схема микроскопа МИМ-10

Оптическая схема микроскопа МИМ-10 состоит из трех основных систем: осветительной, наблюдательной и фотографической (рисунок 1.4).

Осветительная система обеспечивает освещение исследуемой поверхности объекта. Источниками света по выбору являются:

- дуговая ксеноновая лампа типа ДКсШ-120;
- кварцевая галогенная лампа накаливания типа КГМ9-70.

Спектр дуговой ксеноновой лампы близок к спектру естественного солнечного света. Яркость дуговой лампы не регулируется. Яркость лампы накаливания регулируется изменением напряжения.

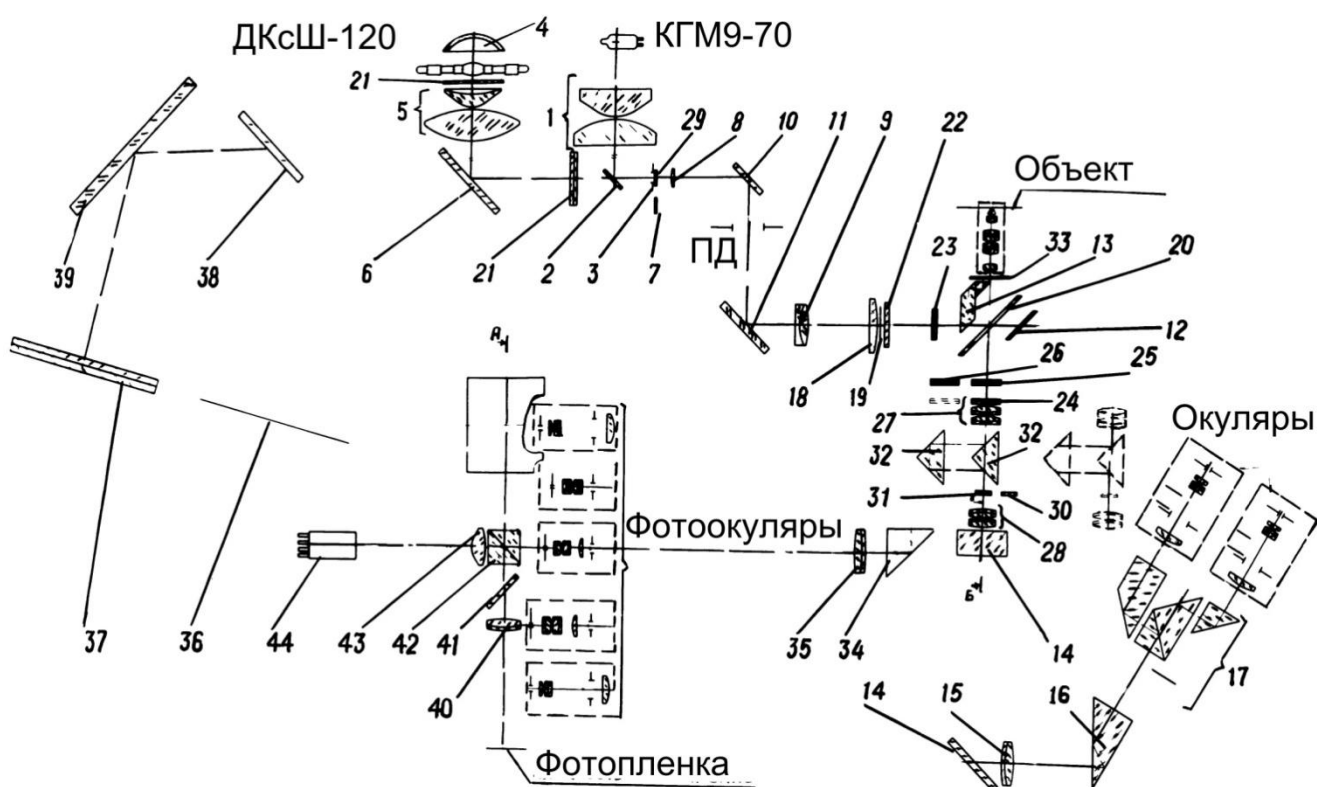


Рисунок 1.4 – Оптическая схема микроскопа МИМ-10

Свет от лампы КГМ9-70 проходит через коллекторные линзы 1, отражается зеркалом 2 и проецируется в плоскость апертурной диафрагмы 3.

Свет от лампы ДКсШ-120 концентрируется отражателем 4, коллектором 5 и зеркалом 6 направляется к апертурной диафрагме 3.

Апертурная диафрагма имеет отверстие с изменяемым диаметром и предназначена для изменения освещенности наблюдаемого объекта.

Далее свет проходит через линзовый растр 7, систему линз 8, 9, отклоняется зеркалами 10, 11 и при прямом освещении и наблюдении объекта в светлом поле направляется отражательной пластинкой 12 в объектив. Для косоугольного освещения объекта перед объективом помещается призма 13, отклоняющая световой луч.

При наблюдении объекта в темном поле в ход светового луча вместо линзы 9 включается линза 18 и кольцевая диафрагма 19. Свет падает на кольцевое зеркало 20, затем на зеркальную поверхность параболического металлического конденсора на объективе и фокусируется в плоскости исследуемого объекта.

В осветительную систему входят теплофильтры 21 и сменные светофильтры 22.

Наблюдательная система служит для визуального исследования поверхности образца. Изображение поверхности объекта проходит через объектив и пластинку 12, отражается зеркалом 14, проходит через линзу 15, призму 16, призмы бинокулярной насадки 17 и попадает в фокальную плоскость окуляров.

Для наблюдения объекта в поляризованном свете в осветительную систему включается поляризатор 23, а в наблюдательную систему – анализатор 24. Плоскость поляризации света в наблюдательной системе устанавливается поворотом анализатора вокруг оптической оси.

Фотографическая система включается перемещением призмы 34, которая устанавливается в ход лучей вместо зеркала 14. Далее через линзу 35 свет попадает в фокальную плоскость одного из пяти фотоокуляров, которые проецируют изображение на фотопластинку 36 или экран 37 с помощью зеркал 38 и 39. Через призму-куб 42 и линзу 43 свет направляется на фотоэлектронный умножитель 44, служащий для определения времени экспозиции при автоматическом управлении фотозатвором.

При включении линзы 40 и зеркала 41 изображение проецируется на фотопленку фотоаппарата.

1.5 Органы управления оптической системой микроскопа

Основные органы управления оптической системой при визуальном наблюдении и фотографировании микрошлифов представлены на рисунках 1.5, 1.6.

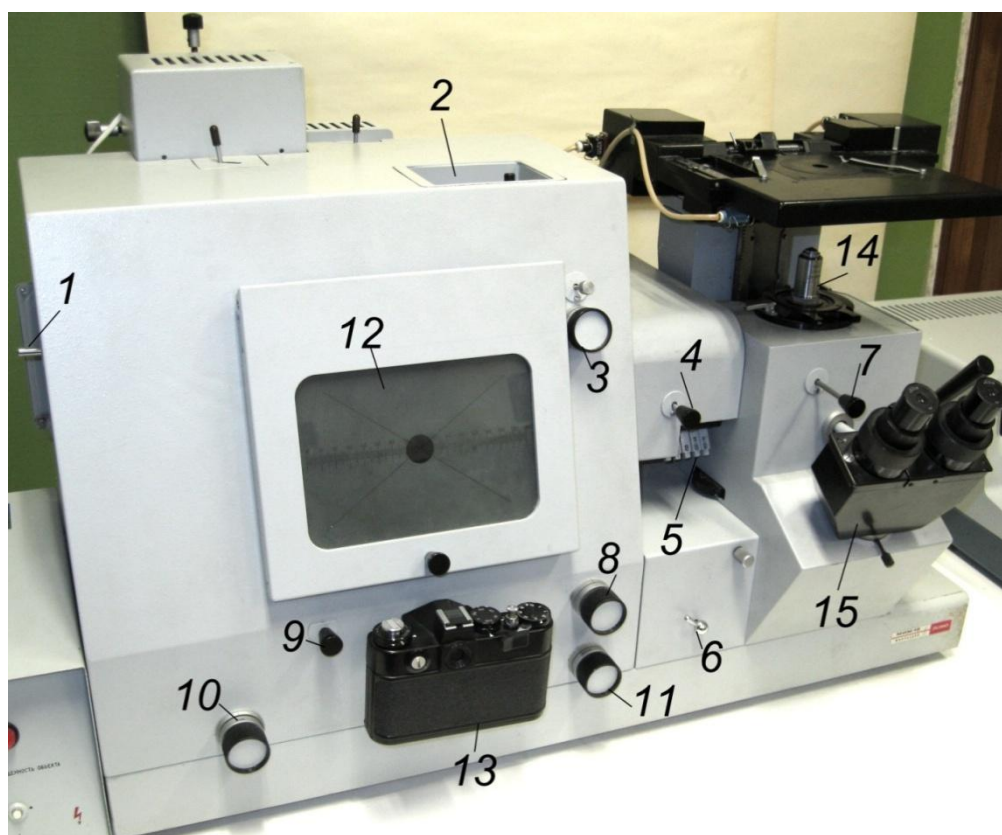


Рисунок 1.5 – Органы управления микроскопа МИМ-10

На рисунке 1.5 показаны:

- 1 – рукоятка выбора источника освещения (лампы накаливания КГМ9-70 или дуговой ксеноновой ДКсШ-120);
- 2 – кольцо раскрытия апертурной диафрагмы;
- 3 – рукоятка раскрытия полевой диафрагмы;
- 4 – рукоятка переключения линз при наблюдении в светлом или темном поле;

- 5 – рукоятки включения светофильтров;
- 6 – рукоятка зажима предметного столика;
- 7 – рукоятка включения призмы косоугольного освещения;
- 8 – рукоятка переключения фотоокуляров;
- 9 – рукоятка включения фотографирования на фотопластинку с автоматическим экспонометром;
- 10 – кнопка фотозатвора;
- 11 – рукоятка переключения вывода изображения на экран или на фотоаппарат;
- 12 – экран или кассета с фотопластинкой;
- 13 – пленочный фотоаппарат;
- 14 – сменный объектив;
- 15 – бинокулярная насадка.

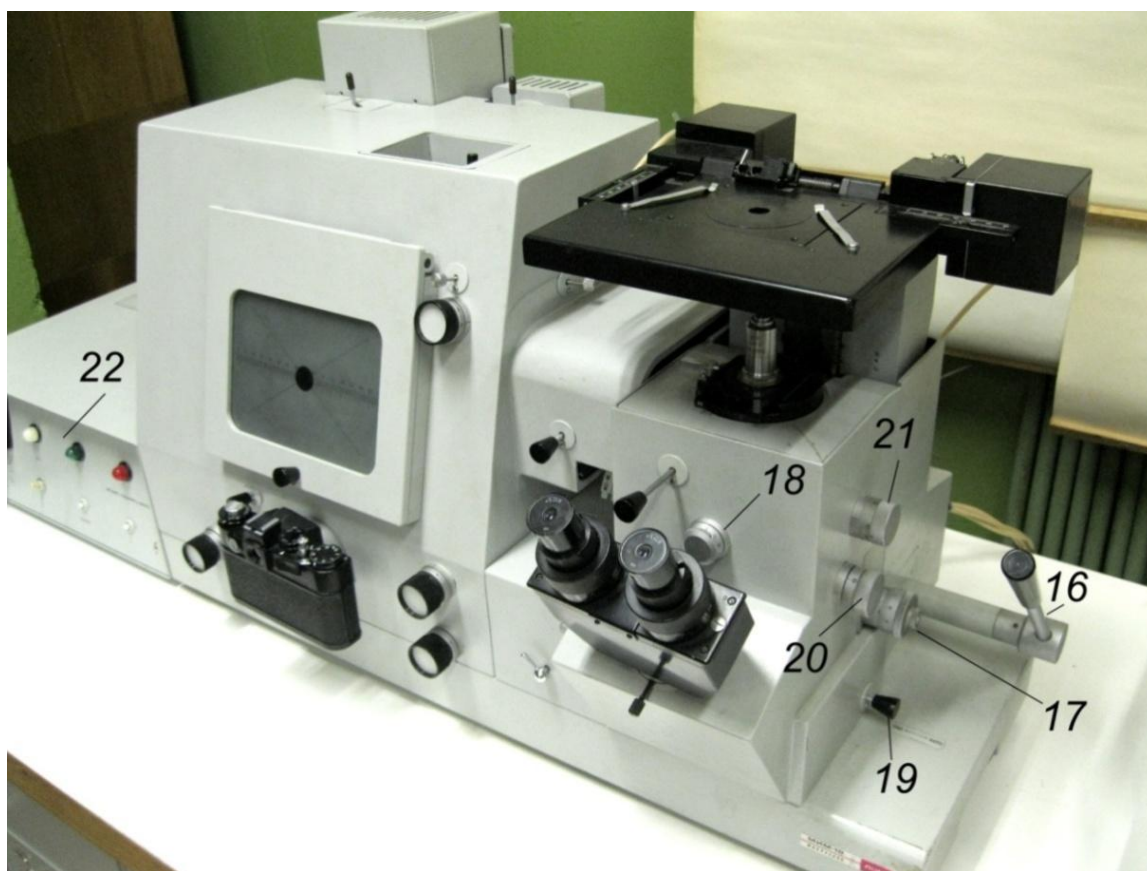


Рисунок 1.6 – Органы управления микроскопа МИМ-10

На рисунке 1.6 показаны:

16 – рукоятка подъема и опускания предметного столика;

17 – рукоятка микрометрической фокусировки изображения объекта;

18 – рукоятка включения поляризованного освещения и поворота анализатора;

19 – рукоятка переключения визуального наблюдения и фотографирования;

20 – рукоятка включения системы фазового контраста;

21 – рукоятка включения компенсационных пластинок;

22 – пульт управления фотозатвором МФНЭ-1.

1.6 Устройство металлографического микроскопа МЕТАМ РВ-34

Микроскоп металлографический инвертированный МЕТАМ РВ-34 (рисунок 1.7) предназначен для визуального наблюдения микроструктуры металлов, сплавов и других непрозрачных объектов в отраженном свете при прямом освещении в светлом поле.

Микроскоп применяется для проведения исследований в материаловедении, в металлургии, микроэлектронике, машиностроении, минералогии и других областях науки и техники, а также для учебных целей.

Включение освещения объекта и регулировка яркости осуществляется поворотом ручки 1 в основании микроскопа. Предметный столик 2 расположен в верхней части на вертикальных салазках. Под столиком размещена четырехпозиционная револьверная головка 3, на которой установлены четыре объектива с увеличением 10х, 20х, 40х, и 100х.

Окуляры 4, установленные в бинокулярной насадке 5, имеют увеличение 10х. Общее увеличение микроскопа изменяется при смене объективов от 100х до 1000х. Наблюдение через объектив с увеличением 100х возможно только при использовании иммерсионной жидкости, капля которой заполняет зазор между передней линзой и исследуемой поверхностью. Иммерсионная жидкость позволяет расширить пределы увеличения изображения, повысить яркость и улучшить контраст.



1 – ручка включения и регулировки яркости; 2 – предметный столик; 3 – револьверная головка с объективами; 4 – окуляры; 5 – бинокулярная насадка, 6 – ручка грубой фокусировки, 7 – ручка точной фокусировки; 8 – ручка регулировки зажима вертикального перемещения столика; 9 – ручки перемещения столика в горизонтальной плоскости; 10 – кольцо апертурной диафрагмы; 11 – кольцо полевой диафрагмы.

Рисунок 1.7 – Микроскоп металлографический МЕТАМ РВ-34

Фокусировка изображения осуществляется за счет вертикального перемещения предметного столика с исследуемым образцом. Грубая фокусировка осуществляется поворотом ручки 6, точная фокусировка – ручкой 7. Ручка 8 предназначена для регулировки зажима вертикальных направляющих. Регулировка необходима для предотвращения самопроизвольного опускания предметного столика под собственным весом.

Перемещение столика в горизонтальной плоскости, необходимое для наблюдения различных участков исследуемой поверхности, осуществляется вращением ручек 9. Нижняя ручка перемещает столик по оси X (вправо – влево), верхняя ручка – по оси Y (вперед – назад). Диапазон перемещений столика 30 x 30 мм.

Апертурная диафрагма регулируется вращением кольца 10. При уменьшении отверстия апертурной диафрагмы снижается освещенность объекта и одновременно повышается резкость наблюдаемого изображения.

Диаметр отверстия полевой диафрагмы изменяется вращением кольца 11. Полевая диафрагма служит для выделения некоторого участка (поля) из наблюдаемого изображения объекта.

1.7 Выполнение исследований на микроскопе МИМ-10

1.7.1 Визуальное наблюдение

Образец устанавливается подготовленной поверхностью микрошлифа на предметный столик над объективом. При необходимости образец фиксируется упругими клеммами. Для установки неустойчивых и мелкогабаритных образцов используется специальный держатель.

Для визуального наблюдения объекта в светлом поле необходимо включить лампу накаливания КГМ9-70 и установить в соответствующее положение рукоятку 1 (рисунок 1.5). Кольцом 2 раскрыть апертурную диафрагму на $\frac{3}{4}$ максимального диаметра зрачка по шкале на поверхности кольца. Рукоятка 19 (рисунок 1.6) должна быть передвинута в положение «Виз».

Раскрытием апертурной диафрагмы следует отрегулировать освещение объекта. При мало раскрытой диафрагме изображение объекта получается искаженным, при широко открытой диафрагме – бледным и неконтрастным из-за избыточной освещенности.

Фокусировка изображения при визуальном наблюдении осуществляется вращением рукоятки 17. При смене объективов фокусировка может незначительно нарушаться.

Поворотом рукоятки 3 полевой диафрагмы можно ограничить поле зрения или выделить нужный участок объекта.

Для общего обзора исследуемого объекта рекомендуется начинать наблюдение при малом увеличении с объективом, имеющим фокусное расстояние $F=50$ мм и с окулярами с увеличением $4\times$.

При применении объективов с фокусным расстоянием $F=2,5$ мм, отмеченных черной полосой на оправе корпуса, следует использовать иммерсионную жидкость (кедровое масло), которая наносится на фронтальную линзу объектива и на исследуемую поверхность. После работы линза объектива промывается чистым бензином.

Для наблюдения в светлом поле при прямом освещении рукоятку 4 необходимо вдвинуть в корпус до упора, рукоятку 7 вытянуть до упора. Рукоятка включения поляризованного освещения 18 (рисунок 1.6) должна быть выдвинута.

Для получения рельефного изображения объекта в светлом поле следует применять косое освещение через призму, включаемую перемещением рукоятки 7 вперед до упора. Производить измерения при косом освещении не рекомендуется, так как в этом режиме получается несколько искаженное изображение.

Для наблюдения в темном поле необходимо установить объектив, имеющий металлический конденсор, полностью раскрыть апертурную и полевую диафрагмы и выдвинуть рукоятку 4 до упора. Косую призму следует выключить, выдвинув рукоятку 7.

Наблюдение в поляризованном свете может производиться в светлом поле при прямом и косом освещении объекта. Для наблюдения в поляризованном свете необходимо вдвинуть рукоятку 18, при этом в оптическую схему включаются одновременно поляризатор и анализатор. Поляризатор превращает свет от источника освещения в поляризованный, анализатор выделяет в изображении наблюдаемого объекта свет, поляризованный в определенной плоскости. Положение плоскости поляризации изменяется поворотом рукоятки 18. При повороте анализатора на 90 градусов наблюдается полное гашение изображения, так как при этом плоскости поляризации поляризатора и анализатора взаимно перпендикулярны. В этом положении на поверхности микрошлифа обнаруживаются элементы структуры, изменяющие плоскость поляризации.

Изменение увеличения при визуальном наблюдении осуществляется путем смены объективов и окуляров бинокулярной насадки.

1.7.2 Фотографирование микрошлифов

Объекты с высокой отражательной способностью при увеличении до 1000х можно производить с освещением лампой накаливания КГМ9-70. При большом увеличении, особенно в темном поле и в поляризованном свете, для наблюдения и фотографирования рекомендуется включать освещение дуговой лампой ДКсШ-120. Переключение источников света осуществляется рукояткой 1.

Для вывода изображения на экран фототубуса необходимо передвинуть рукоятку 19 (рисунок 1.6) в положение «Фото», открыть фотозатвор нажатием и поворотом с фиксацией рукоятки 10 в положении «Откр», повернуть рукоятку 11 в положение «Экран». Фокусировка изображения на экране осуществляется вращением рукоятки 17.

Увеличение изображения на экране зависит от фокусного расстояния объектива и от оптических характеристик проекционного фотоокуляра, выбранного поворотом рукоятки 8.

После получения резкого изображения экран поднимается вверх, а на его место устанавливается кассета с фотопластинкой. При этом фотозатвор следует закрыть поворотом рукоятки 10 в положение «Закр».

Фотографирование на фотопластинку можно производить с ручным открытием фотозатвора нажатием на рукоятку 10 и отсчетом выдержки по секундомеру, или с автоматическим управлением и отсчетом выдержки с помощью экспонетрического устройства МФНЭ-1.

Для автоматического фотографирования рукоятка 9 должна быть выдвинута, питание пульта МФНЭ-1 включено. Фотографирование с автоматическим отсчетом выдержки включается кнопкой «Съемка» на пульте МФНЭ-1.

Для переключения изображения объекта на пленочный фотоаппарат необходимо повернуть рукоятку 11 в положение «Фото». В этом случае фокусировка изображения выполняется при наблюдении объекта через видоискатель фотоаппарата. Фотографирование и выдержка при съемке на фотопленку осуществляется с помощью затвора фотоаппарата.

1.7.3 Определение цены деления шкалы окуляра

В поле зрения окуляров имеется шкала с делениями от 0 до 10, подобная миллиметровой линейке, предназначенная для измерения размеров наблюдаемых объектов, например, отдельных зерен, включений, микротрещин, толщины покрытий. Для получения истинных размеров измеряемых объектов необходимо знать цену деления шкалы окуляра. Цена деления шкалы окуляра зависит от установленного объектива и является величиной, обратной увеличению микроскопа. В связи с этим цену деления шкалы окуляра необходимо находить для каждого объектива отдельно.

Для определения цены деления шкалы окуляра используется объект-микрометр типа ОМО, представляющий собой пластинку, на которой нанесена шкала длиной 1 мм с делениями, имеющими шаг 0,01 мм. Объект-микрометр помещают на предметный столик и фокусируют микроскоп на его поверхность. Объект-микрометр располагают таким образом, чтобы его штрихи были параллельны штрихам шкалы окуляра (рисунок 1.8).

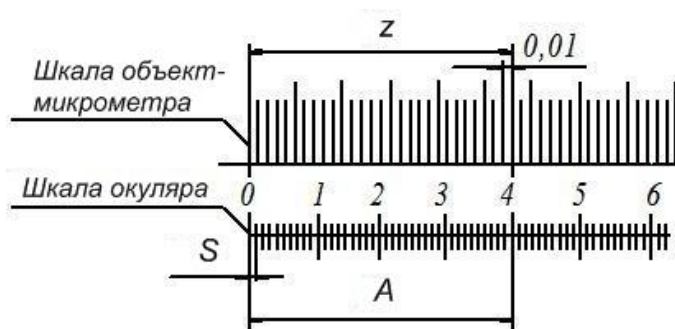


Рисунок 1.8 – Схема определения цены деления шкалы окуляра

Перемещением предметного столика крайний левый штрих шкалы объект-микрометра совмещают с нулевым штрихом шкалы окуляра. Затем находят на шкалах окуляра и объект-микрометра совпадающие штрихи и подсчитывают число делений объект-микрометра и соответствующее ему число делений шкалы окуляра.

Цена деления шкалы окуляра S , мм/дел., рассчитывается по формуле

$$S = \frac{0,01 \cdot z}{A}, \quad (1.1)$$

где z – число делений объект-микрометра,

A – соответствующее число делений шкалы окуляра.

Пример – на рисунке 1.8 представлены наблюдаемые в поле зрения микроскопа шкалы окуляра и объект-микрометра с совмещенными нулевыми штрихами. По совпадающим штрихам получаем следующие результаты:

$z = 28$ делений = 0,28 мм – число делений и расстояние, отсчитанные по шкале объект-микрометра;

$A = 40$ делений – число делений по шкале окуляра.

Цена деления шкалы окуляра будет равна:

$$S = \frac{0,01 \cdot 28}{40} = 0,007 \text{ мм/дел.}$$

1.8 Выполнение микроструктурного анализа

1.8.1 Подготовка образцов для микроструктурного анализа

Микроструктурный анализ – исследование структуры металлов, сплавов и других материалов с помощью металлографического микроскопа.

Микроструктурный анализ позволяет:

- определить форму и размеры кристаллов и зерен, составляющих структуру материала;
- выявить виды твердых фаз, входящих в структуру;
- обнаружить дефекты и пороки структуры материала, определить их вид и размеры;
- выявить изменения в структуре, вызванные технологическими операциями при обработке материалов резанием, давлением, при сварке, литье, резке, термической обработке, нанесении покрытий и др.

Для микроструктурного анализа используются образцы материалов с подготовленными шлифами или микрошлифами. Приготовление шлифов состоит из следующих операций:

- шлифование образца на мелкозернистой шлифовальной шкурке для получения плоской поверхности;
- полирование поверхности для удаления шероховатости и следов от шлифования;
- травление шлифа – обработка химическими реактивами для выявления структуры металлов и сплавов в результате различной степени растворения и окрашивания отдельных структурных составляющих.

Шлифование и полирование выполняют на специальном станке с вращающимися дисками. Для шлифования на плоскую поверхность диска наклеивается шлифовальная шкурка на бумажной или тканевой основе. Предварительное шлифование выполняется шкуркой с зернистостью абразива 22, 16, 10, 8. Для окончательного шлифования необходимо использовать шкурку зернистостью от 5 до 3 и менее.

Полирование выполняется на плоской поверхности вращающегося диска, покрытой сукном. Сукно смачивается водной суспензией мелкодисперсной окиси хрома Cr_2O_3 . Могут использоваться и другие полировальные пасты и порошки.

Отполированный шлиф имеет зеркальную поверхность и под микроскопом выглядит как сплошное равномерно освещенное поле. На полированном шлифе без травления обнаруживаются неметаллические включения, оксиды, сульфиды металлов, поры, микротрещины и другие пороки структуры.

Состав реактивов для травления подбирают в зависимости от вида и марки исследуемого материала.

Для выявления структуры сталей и чугуна наиболее часто используют следующие составы:

- 5 % раствор азотной кислоты HNO_3 в этиловом спирте;
- пикрат натрия (пикриновая кислота и едкий натр) – реактив для отличия цементита от феррита;
- 4 % раствор пикриновой кислоты в спирте;
- 20 см³ концентрированной соляной кислоты HCl , 5 г сульфата меди CuSO_4 , 20 мм³ воды H_2O – реактив для травления жаропрочных сплавов

Для травления титановых сплавов применяют реактивы на основе плавиковой кислоты HF , для медных сплавов – водный раствор хлорного железа FeCl_3 , для алюминиевых сплавов – раствор едкого натра NaOH , раствор серной кислоты H_2SO_4 .

Отдельные элементы структуры в разной степени взаимодействуют с химическими реактивами. Сильно протравленные элементы теряют отражательную способность и при наблюдении проявляются в виде темных участков изображения микроструктуры. Устойчивые к реактивам элементы травятся слабо, сохраняют отражательную способность и выглядят как светлые зоны.

В результате неравномерного травления различных элементов структуры на полированной поверхности шлифа образуется микрорельеф в виде многочисленных впадин и выступов, которые наблюдаются под микроскопом и позволяют выявить и исследовать микроструктуру сплава.

1.8.2 Визуальное исследование микроструктуры металлов и сплавов

Подготовленные микрошлифы образцов металлов и сплавов устанавливают на предметный столик и подбирают увеличение микроскопа путем смены объективов. В первую очередь применяют объективы с большим фокусным расстоянием, затем переходят к объективам с меньшим фокусным расстоянием. По виду

микроструктуры, форме зерен, распределению элементов структуры по поверхности микрошлифа можно определить состав сплава, концентрацию входящих в него компонентов, марку сплава, вид термической обработки, определить наличие включений, микротрещин и других дефектов, примерно определить ожидаемые механические характеристики и эксплуатационные свойства сплава.

Вид микроструктуры некоторых металлов и сплавов представлен на рисунках 1.9 – 1.20.

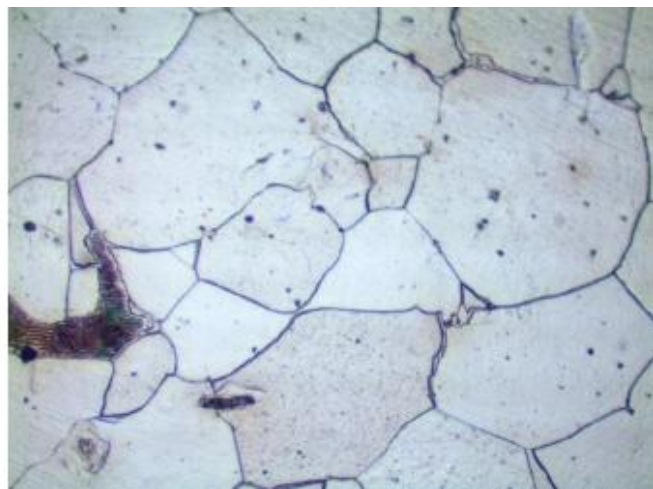
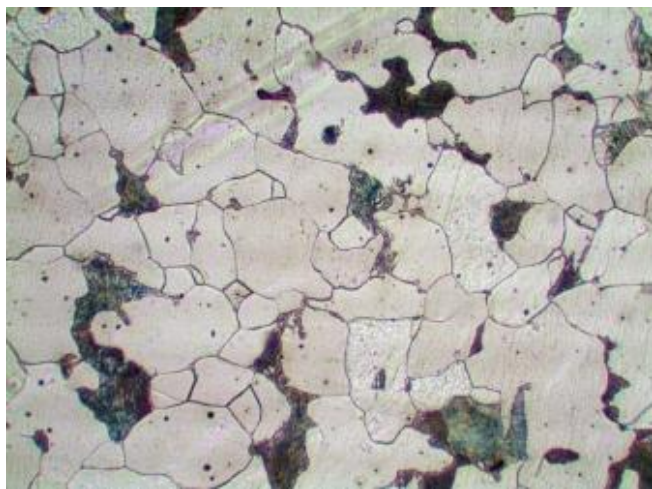


Рисунок 1.9 – Сталь 20, доэвтектоидная, феррит (светлые зерна) и пластинчатый перлит (темные), включения цементита в феррите (темные точки)

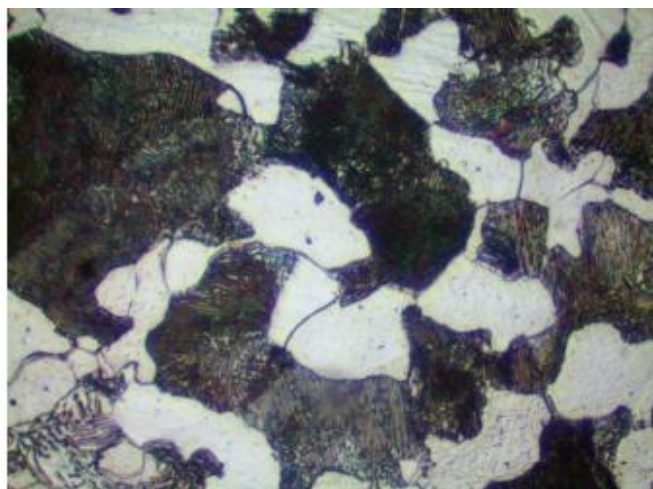
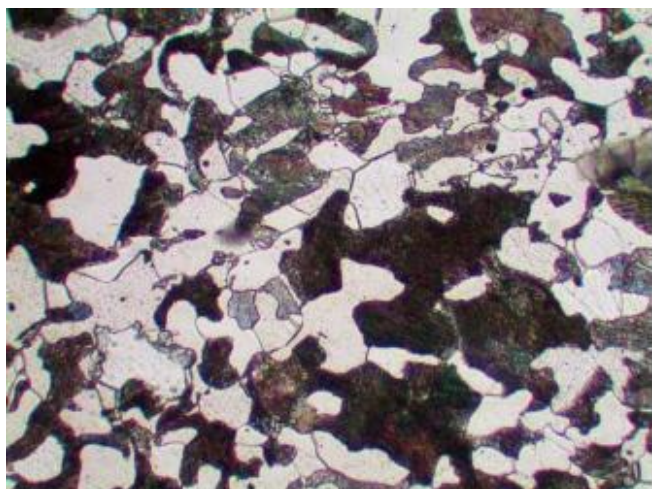


Рисунок 1.10 – Сталь 45, доэвтектоидная, феррит (светлые зерна) и пластинчатый перлит (темные) примерно в равном соотношении

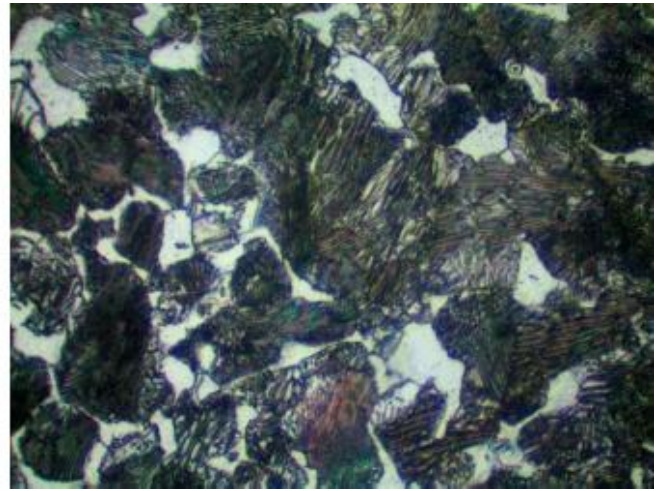
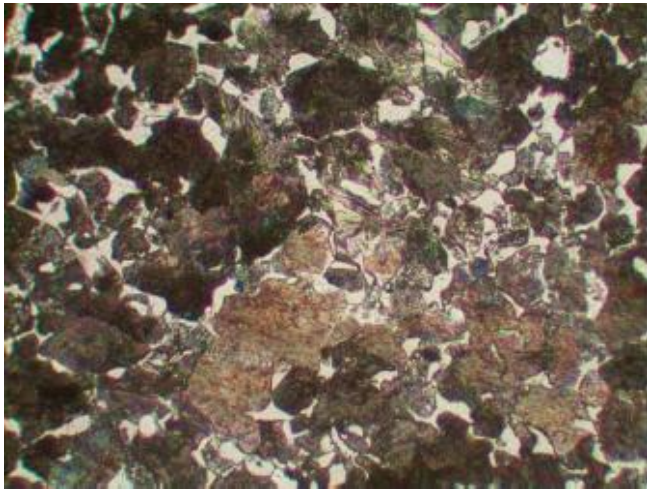


Рисунок 1.11 – Сталь 65 после отжига, феррит (светлый) и пластинчатый перлит

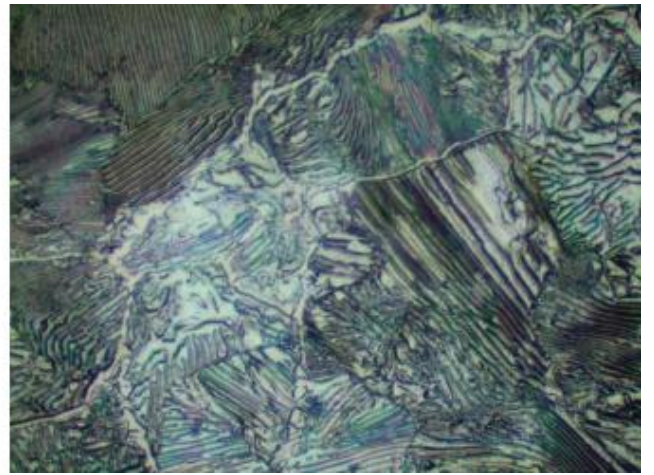
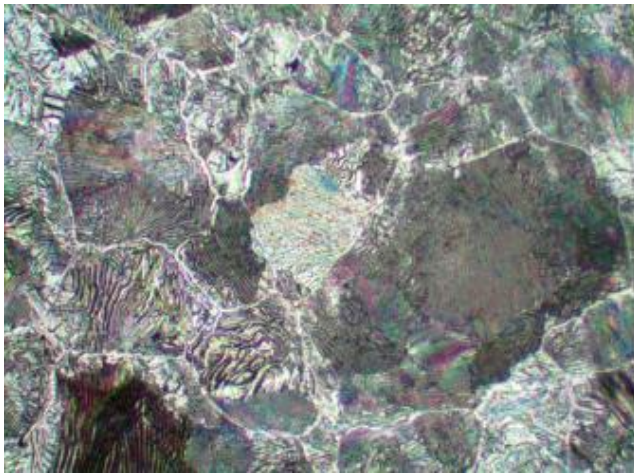


Рисунок 1.12 – Сталь У12, заэвтектоидная, отжиг, пластинчатый перлит, цементит по границам зерен (белый)

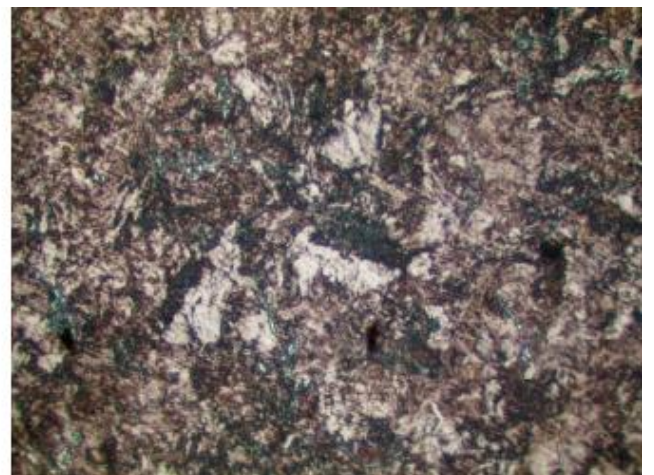
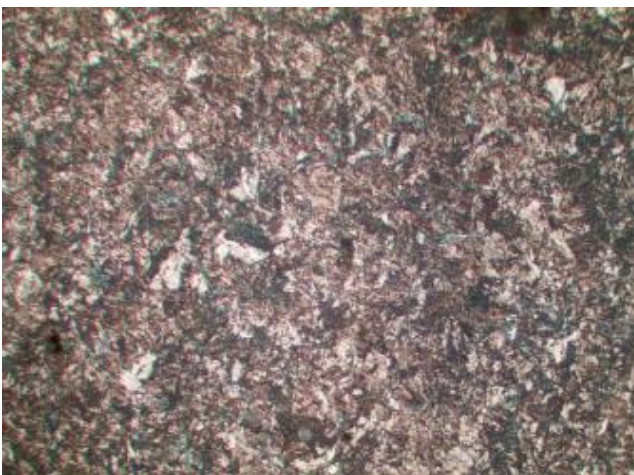


Рисунок 1.13 – Сталь У8, эвтектоидная, после закалки, мартенсит и троостит

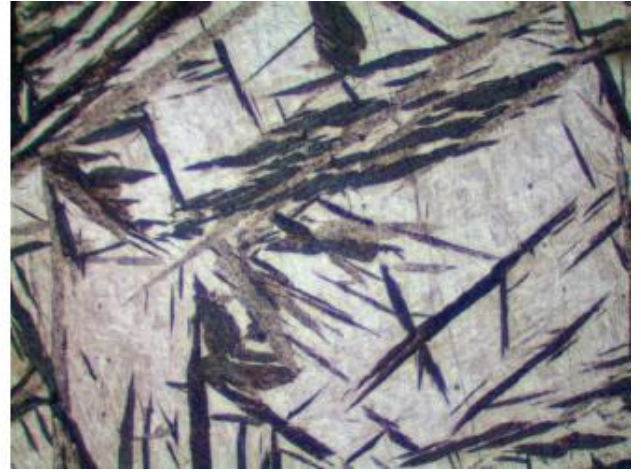
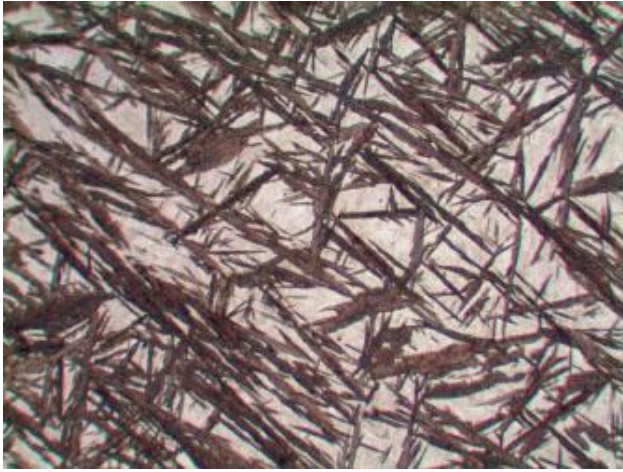


Рисунок 1.14 – Сталь 65Г, после ускоренного охлаждения со скоростью меньше критической, нижний бейнит, похожий на игольчатый мартенсит

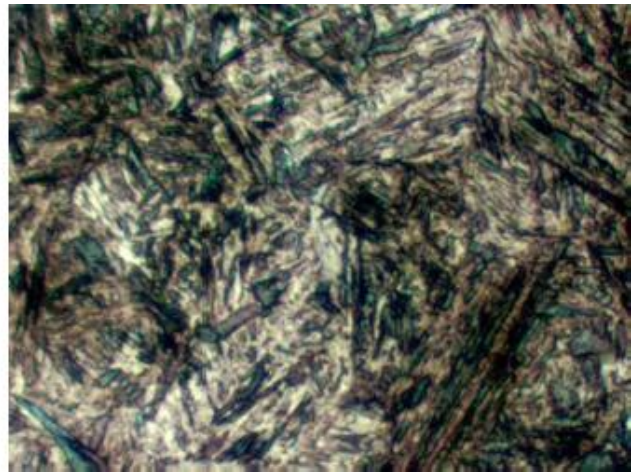
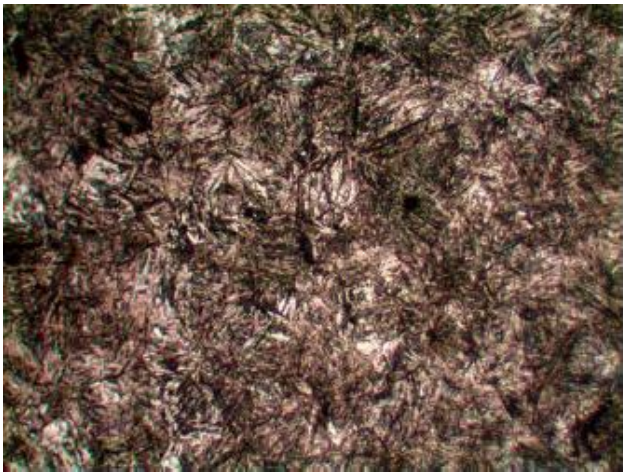


Рисунок 1.15 – Сталь 45, после закалки, игольчатый мартенсит

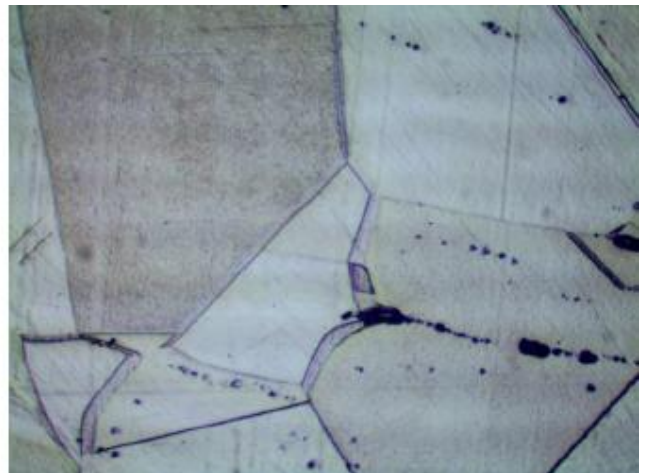
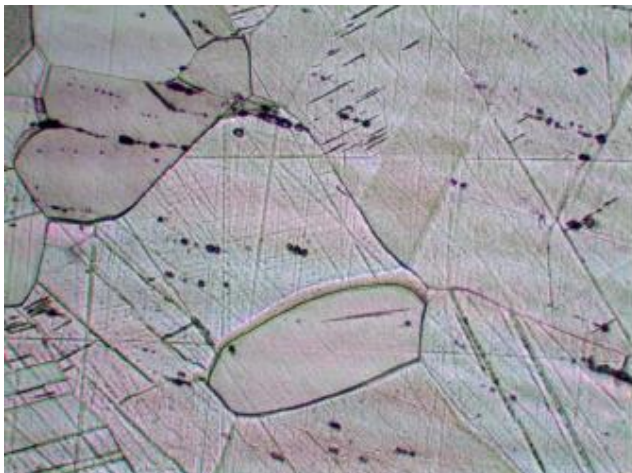


Рисунок 1.16 – Коррозионностойкая хромоникелевая сталь X18H10T, аустенит

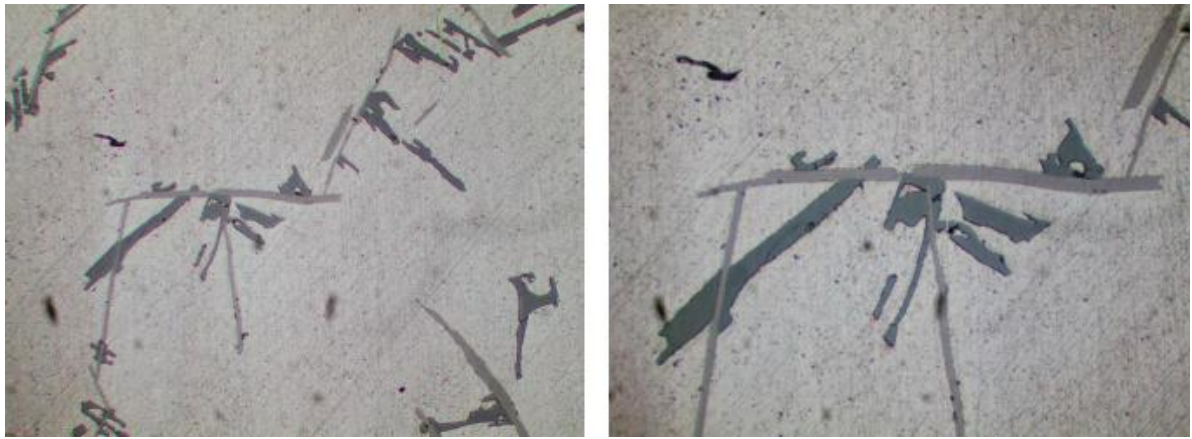


Рисунок 1.17 – Технический алюминий с включениями $FeAl_3$

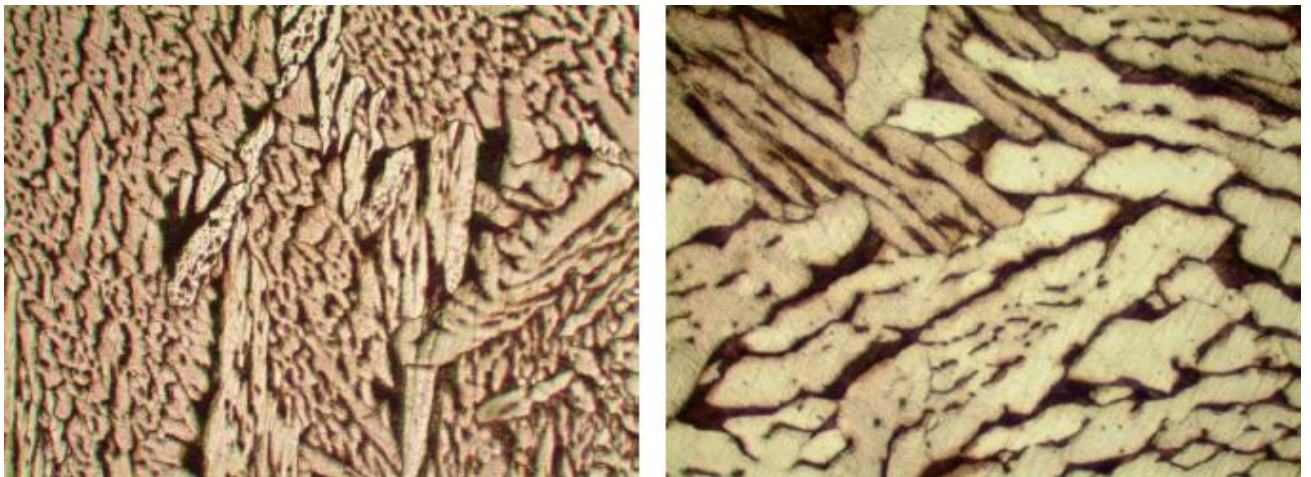


Рисунок 1.18 – Латунь Л62, α -фаза (светлая) – твердый раствор 39 % Zn в меди, β' -фаза (темная) – твердый раствор на основе соединения CuZn

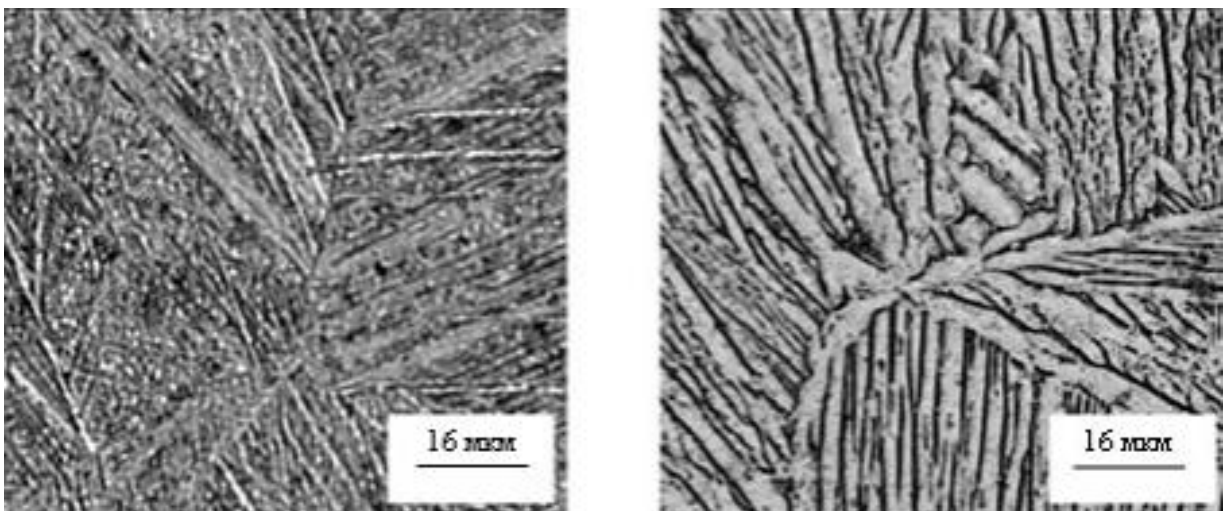


Рисунок 1.19 – Титановый сплав ВТ6 после насыщения водородом и после вакуумного отжига, структура $\alpha+\beta$

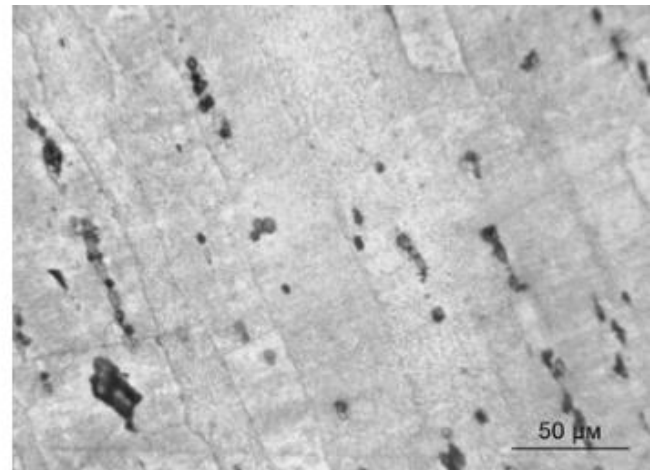
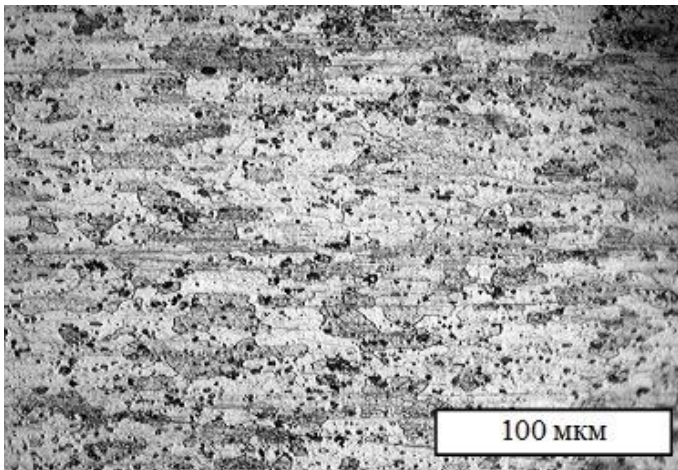


Рисунок 1.20 – Алюминиевый сплав Д16Т

1.8.3 Определение размеров зерен и других элементов структуры

Измерение размеров зерен и других наблюдаемых объектов осуществляется по шкале окуляра с известной ценой деления, определенной по методике, представленной в п. 3.3.

Если микроструктура состоит из равноосных зерен (рисунок 1.9), то необходимо выбрать среднее по размерам зерно и измерить его диаметральный размер в делениях шкалы. Для определения истинного размера зерна полученное число делений умножается на цену деления.

Пример – размер зерна в поле зрения микроскопа составляет 38 делений по шкале окуляра. Цена деления шкалы $S = 0,007$ мм/дел. Истинный размер зерна D , мм, равен

$$D = 0,007 \cdot 38 = 0,266 \text{ мм.}$$

Если в структуре присутствуют неравноосные, вытянутые, игольчатые, пластинчатые элементы (рисунки 1.12, 1.14, 1.18, 1.19), то необходимо по такой же методике измерить их протяженность, толщину, другие характерные размеры и описать примерную форму.

1.9 Порядок выполнения лабораторной работы и составление отчета

1.9.1 Записать название, цели и задачи лабораторной работы.

1.9.2 Изучить устройство металлографических микроскопов МИМ-10 и МЕТАМ РВ-34, освоить приемы работы на них.

1.9.3 Перечислить основные части микроскопа МИМ-10 и их назначение.

1.9.4 Зарисовать упрощенную оптическую схему микроскопа с указанием ее элементов.

1.9.5 Выполнить визуальное исследование микроструктуры образцов сплавов при наблюдении в светлом поле при прямом и косом освещении, в темном поле, в поляризованном свете.

1.9.6 Выполнить определение цены деления шкалы окуляра для объективов с фокусным расстоянием 16, 10 и 4 мм.

1.9.7 Измерить характерные размеры зерен образцов микроструктуры сталей, титановых сплавов, латуни и др.

1.9.8 Зарисовать характерные формы зерен исследуемых микроструктур и указать их размеры в мм.

1.10 Контрольные вопросы

1.10.1 Какие исследования выполняются с использованием металлографического микроскопа?

1.10.2 В чем принципиальное отличие оптической схемы металлографического микроскопа от биологического?

1.10.3 Какие способы освещения применяются при исследовании микроструктуры металлов и сплавов?

1.10.4 Какие источники света применяются на микроскопе МИМ-10 и в каких случаях?

1.10.5 Каким образом и для чего определяется цена деления шкалы окуляра?

1.10.6 Каким образом на микроскопе измеряют размеры наблюдаемых объектов?

1.10.7 Как выполнить фотографирование микроструктуры на микроскопе МИМ-10?

1.10.8 Каковы пределы увеличения микроскопа МИМ-10?

1.10.9 Как приготовить микрошлиф для исследования микроструктуры?

1.10.10 Для чего необходимо травление микрошлифа?

2 Количественный анализ сплавов металлов с использованием металлографического микроскопа МИМ-10

2.1 Цель лабораторной работы

Одной из задач лабораторных исследований в машиностроительном производстве является анализ металлов и сплавов, используемых для изготовления деталей. Анализ необходим для определения элементного состава металлов и сплавов, проверки типа и сорта сплава, установления влияния технологических процессов на строение и свойства конструкционных материалов. Применяются различные методы количественного анализа:

- стилоскопические методы;
- волнодисперсионный анализ;
- эмиссионный анализ;
- рентгенофлуоресцентный анализ;
- пробирный анализ.

Одним из методов определения количественного состава сплавов является количественный анализ микроструктуры, выполняемый при проведении металлографических исследований.

Целью лабораторной работы является изучение и практическое освоение методики выполнения количественного анализа сплавов металлов с помощью полуавтоматического интеграционного устройства, входящего в состав металлографического инвертированного микроскопа МИМ-10.

В задачи лабораторной работы входят:

- приобретение практических навыков работы с полуавтоматическим интеграционным устройством микроскопа МИМ-10 в разных режимах;
- определение концентрации компонентов сталей и сплавов методом анализа микроструктуры и сравнение полученных результатов со справочными данными.

2.2 Основы количественного анализа сплавов по микроструктуре

В структуру сплавов металлов входят твердые фазы с определенным соотношением компонентов. К таким фазам относятся:

- насыщенные твердые растворы, образующиеся в результате распада пересыщенных твердых растворов при охлаждении и снижении растворимости компонентов;
- химические соединения, имеющие стехиометрический состав, соответствующий химической формуле;
- кристаллы чистых металлов, если они не растворяются в других компонентах и не образуют с ними химический соединения.

По известному составу твердых фаз и их количеству в сплаве можно определить состав сплава, то есть значения концентрации отдельных компонентов. Для определения количественного соотношения твердых фаз в сплаве достаточно иметь фотографию микроструктуры, полученную при исследовании образца на металлографическом микроскопе.

Если сплав состоит из двух компонентов A и B , которые образуют две твердые фазы α и β , то концентрацию K_B компонента B в процентах можно вычислить по формуле

$$K_B = \frac{B_\alpha \cdot S_\alpha}{100} + \frac{B_\beta \cdot S_\beta}{100}, \quad (2.1)$$

где B_α – концентрация компонента B в α -фазе, в процентах;

B_β – концентрация компонента B в β -фазе в процентах;

S_α – доля площади микрошлифа, занимаемая α -фазой, в процентах;

S_β – доля площади микрошлифа, занимаемая β -фазой; в процентах.

На рисунке 2.1 представлена микроструктура латуни – сплава меди с цинком.

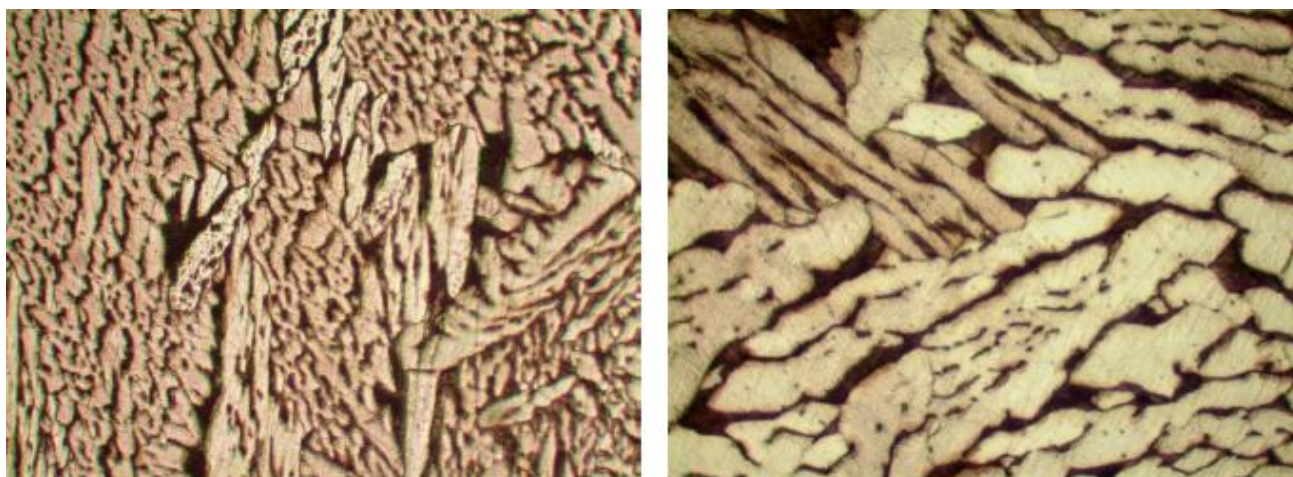


Рисунок 2.1 – Микроструктура латуни: α -фаза (светлая) – твердый раствор с концентрацией 39 % Zn, β' -фаза (темная) – твердый раствор с 46 % Zn

Известно, что цинк растворяется в меди, в результате чего образуется твердый раствор с концентрацией 39 % Zn и 61 % Cu, так называемая α -фаза. При травлении микрошлифа α -фаза слабо взаимодействует с реактивом, вследствие чего при исследовании с помощью металлографического микроскопа наблюдается в виде светлых зерен с блестящей поверхностью.

При больших концентрациях цинк образует химическое соединение с медью типа CuZn, на базе которого возникает твердый раствор – β' -фаза, содержащая 46 % цинка. Кристаллы β' -фазы активно вытравливаются металлографическим реактивом, в результате чего поверхность микрошлифа становится рельефной. На микроструктуре β' -фаза наблюдается в виде темных участков с пониженным уровнем.

Допустим, что каким-либо образом определили, что на фотографии микроструктуры латуни 67 % площади занимает α -фаза и 33 % площади занимает β' -фаза. В этом случае концентрация цинка в латуни составит

$$K_{Zn} = \frac{39 \cdot 67}{100} + \frac{46 \cdot 33}{100} = 41 \text{ \%}.$$

По концентрации цинка можно установить марку латуни. Латунь, содержащая 59 % Cu и 41 % Zn, обозначается Л59.

Таким же образом можно определить марку стали, имеющей ферритно–перлитную структуру (рисунок 2.2). При нормальной температуре феррит может содержать менее 0,02 % углерода, а перлит представляет собой эвтектоидную смесь феррита и цементита, содержащую 0,8 % углерода. По соотношению объемов феррита и перлита вычисляется концентрация углерода в стали и соответственно определяется ее марка.

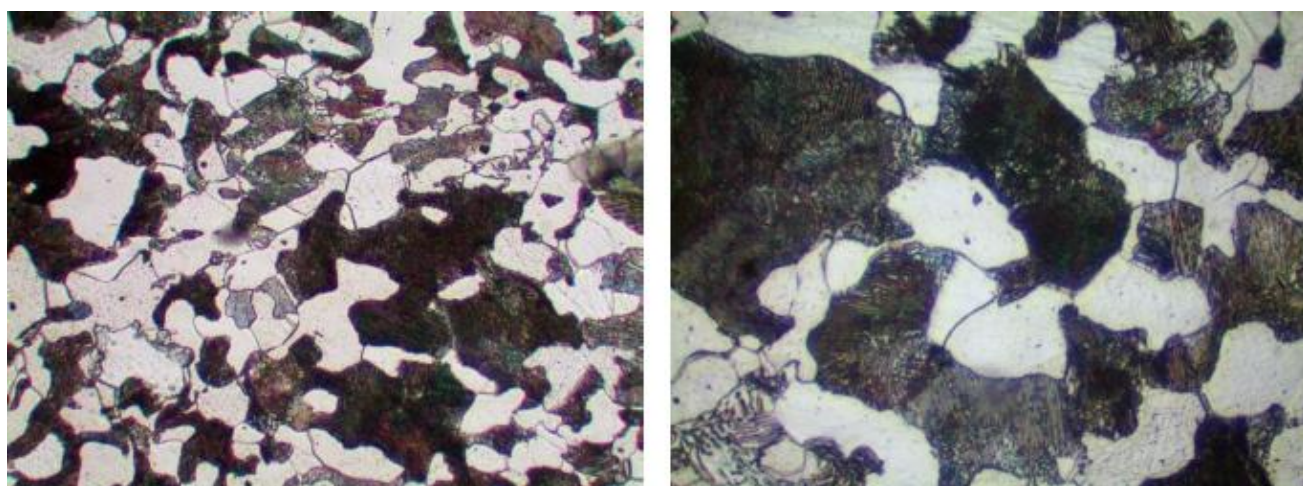
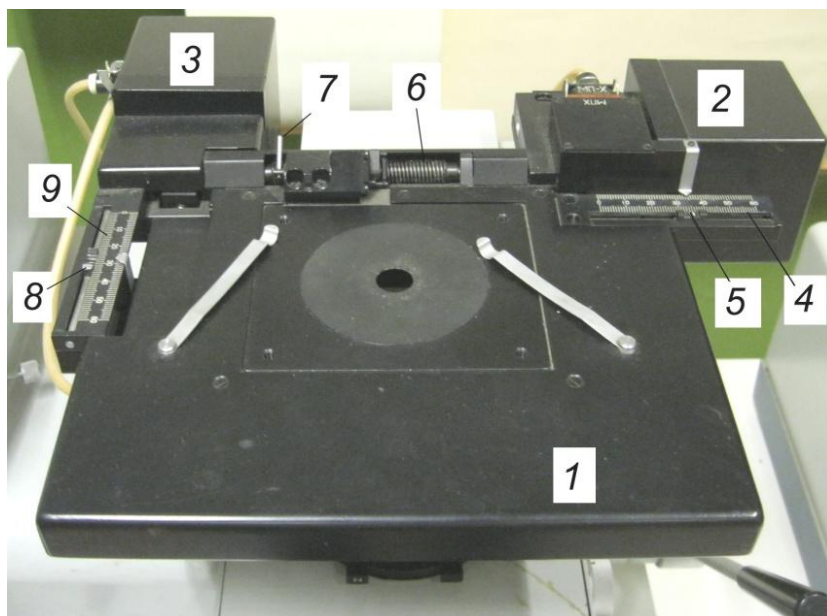


Рисунок 2.2 – Сталь 45, феррит (светлые зерна) и перлит (темные)

2.3 Конструкция сканирующего столика и пульта управления

Металлографический микроскоп МИМ-10 снабжен сканирующим предметным столиком, приводимым в движение по двум координатам в горизонтальной плоскости шаговыми электродвигателями и механизмами типа винт–гайка (рисунок 2.3).

Шаговые электродвигатели управляются импульсами электрического тока, которые подаются от пульта с интеграционным устройством, снабженным счетчиками импульсов с цифровой индикацией (рисунок 2.4).

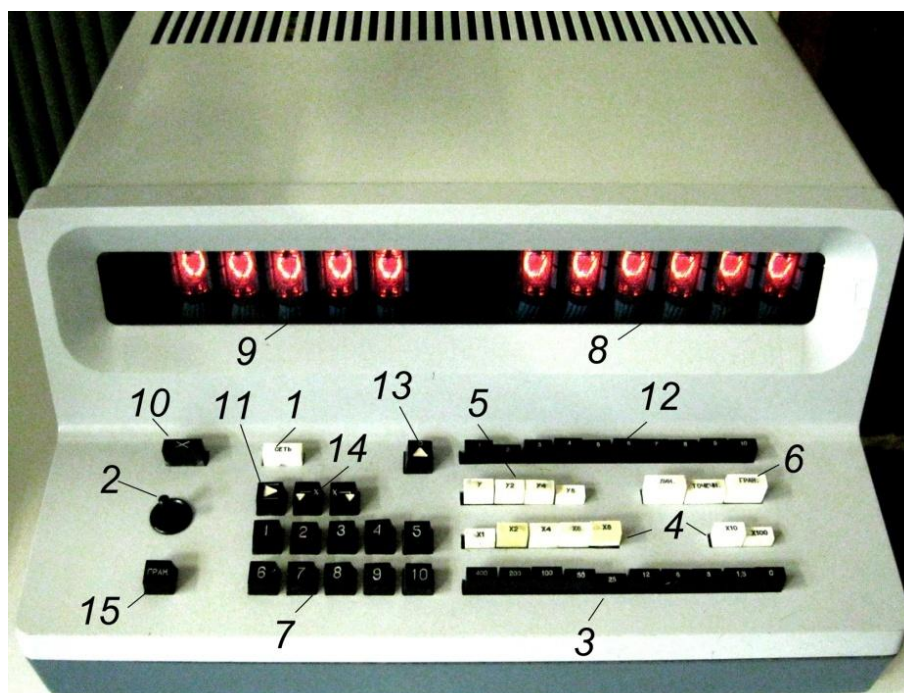


1 – предметный столик; 2 – шаговый электродвигатель оси X; 3 – шаговый электродвигатель оси Y; 4 – линейка оси X; 5 – ограничительные упоры по оси X; 6 – винт оси X; 7 – ручка гайки оси X; 8 – ограничительные упоры по оси Y; 9 – линейка оси Y.

Рисунок 2.3 – Сканирующий предметный столик микроскопа МИМ-10

При подаче одного импульса ротор шагового электродвигателя поворачивается на определенный угол. Величина перемещения предметного столика определяется количеством поданных импульсов и шагом сканирования. Шаг сканирования по осям X и Y устанавливается кнопками 4 и 5 пульта управления. Значения шага сканирования при разных вариантах включения приведены в таблице 2.1. Количество шагов подсчитывается счетчиками и выводится на цифровые индикаторы. Индикатор 8 показывает суммарное количество шагов, индикатор 9 – количество шагов, поданных при нажатии одной из кнопок 7 и подсчитанных единичным счетчиком. Устройство имеет 10 единичных счетчиков шагов. Показания каждого из десяти единичных счетчиков выводятся нажатием одной из кнопок 12. Наличие десяти единичных счетчиков позволяет выделять на микрошлифе до 10 различных твердых фаз или структурных составляющих. Скорость перемещения столика зависит от частоты импульсов тока, подаваемых на

шаговые электродвигатели. Выбор удобной для выполнения работы скорости движения столика осуществляется кнопками 3.



1 – кнопка включения; 2 – рукоятка управления движением столика, 3 – кнопки выбора скорости движения; 4 – кнопки выбора шага сканирования по оси X; 5 – кнопки выбора шага сканирования по оси Y; 6 – кнопки выбора режима работы; 7 – кнопки, назначаемые элементам микроструктуры исследуемого сплава; 8 – суммирующий счетчик импульсов; 9 – единичный счетчик импульсов по элементам микроструктуры; 10 – кнопка сброса показаний счетчиков; 11 – кнопка для нерегистрируемого перемещения столика; 12 – кнопки выбора номера единичного счетчика; 13 – кнопка перемещения столика в исходное положение; 14 – кнопки перемещения по оси Y для перехода на следующую строку сканирования; 15 – кнопка для регистрируемого перемещения столика в гранулометрическом режиме.

Рисунок 2.4 – Пульт управления интеграционного устройства металлографического микроскопа МИМ-10

Таблица 2.1 – Шаг сканирования предметного столика микроскопа МИМ-10

Включенные кнопки по оси X	Шаг сканирования по оси X, мм	Шаг сканирования по оси Y, мм, при включенных кнопках			
		Y 1	Y 2	Y 4	Y 8
X 1	0,001	0,001	0,002	0,004	0,008
X 2	0,002	0,002	0,004	0,006	0,01
X 4	0,004	0,004	0,006	0,008	0,02
X 6	0,006	0,006	0,008	0,01	0,04
X 8	0,008	0,008	0,01	0,02	0,06
X 1 и X10	0,01	0,01	0,02	0,04	0,08
X 2 и X10	0,02	0,02	0,04	0,06	0,1
X 4 и X10	0,04	0,04	0,06	0,08	0,2
X 6 и X10	0,06	0,06	0,08	0,1	0,4
X 8 и X10	0,08	0,08	0,1	0,2	0,6
X 1 и X100	0,1	0,1	0,2	0,4	0,8
X 2 и X100	0,2	0,2	0,4	0,6	1,6
X 4 и X100	0,4	0,4	0,6	0,8	
X 6 и X100	0,6	0,6	0,8	1,6	
X 8 и X100	0,8	0,8	1,6		

2.4 Методика количественного анализа сплавов на микроскопе МИМ-10

Металлографический микроскоп МИМ-10 со сканирующим предметным столиком и полуавтоматическим интеграционным устройством позволяет осуществлять количественный анализ сплавов по микроструктуре в трех режимах: линейном, точечном и гранулометрическом.

Количественный анализ на микроскопе МИМ-10 осуществляется методом построчного сканирования поверхности микрошлифа путем перемещения предметного столика по двум осям с автоматическим подсчетом суммарного числа

шагов и числа шагов единичных счетчиков, соответствующих элементам микроструктуры. По числу шагов, зафиксированных единичными счетчиками, выполняется расчет процентного содержания элементов микроструктуры и концентрации компонентов сплава.

2.4.1 Количественный анализ в линейном режиме

Выбор линейного режима сканирования осуществляется включением кнопки «Лин.» из группы кнопок 6 (рисунок 2.4).

За каждым видом элементов микроструктуры (твердая фаза, неметаллическое включение, зерно, граница зерна) следует закрепить одну из кнопок из группы 7. Например, при исследовании стали можно за кнопкой «1» закрепить кристаллы феррита, а за кнопкой «2» – зерна перлита.

Включением кнопок 4 и 5 согласно таблице 2.1 необходимо задать шаг сканирования. Шаг сканирования по оси X в линейном режиме может быть минимальным для более точного отсчета. Шаг по оси Y должен быть близким к среднему размеру зерна исследуемой микроструктуры.

Сканирование поверхности микрошлифа выполняется в следующем порядке.

Установить исследуемый образец на предметный столик, настроить фокусировку изображения микроструктуры.

Наблюдая микроструктуру через окуляры микроскопа, с помощью рукоятки 2 пульта управления переместить предметный столик в такое положение, чтобы перекрестие окуляра остановилось на границе какого-либо зерна или кристалла.

Нажать кнопку группы 7, закрепленную за видом, к которому относится выбранное зерно, и держать кнопку нажатой до момента, когда при движении предметного столика перекрестие окуляра дойдет до границы следующего зерна. После этого необходимо нажать кнопку из группы 7, соответствующую виду следующего зерна, и держать ее до следующей границы. Эти действия повторяются

множественно, пока перекрестие не достигнет до края исследуемой области микрошлифа.

Для перехода на следующую строку сканирования следует однократно нажать одну из кнопок 14 в зависимости от того на какой стороне области – левой или правой – находится перекрестие. Движение по оси Y и переход на следующую строку будет происходить при нажатии кнопки из группы 7. Примерная траектория перекрестия представлена на рисунке 2.5.

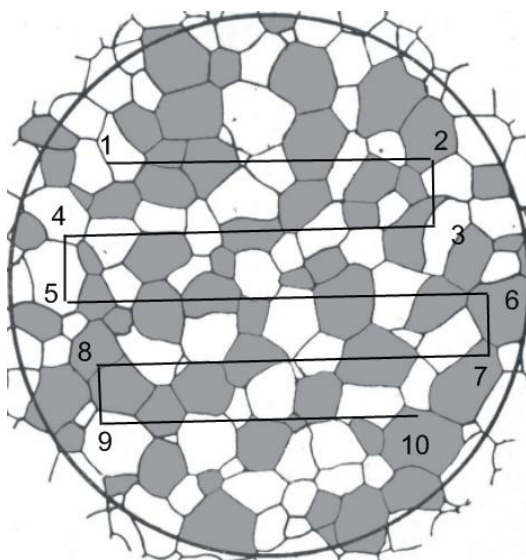


Рисунок 2.5 – Траектория перекрестия окуляра при сканировании микрошлифа

В процессе сканирования поверхности микрошлифа интеграционное устройство заносит в единичные счетчики количество шагов, соответствующее отдельным фазам и составляющим микроструктуры, а в суммирующий счетчик – общее количество шагов, пройденное при сканировании исследуемой площади.

Из теории вероятности известно, что если на какой-то поверхности имеется определенное количество равномерно расположенных точек, то число точек, находящихся на отдельных участках поверхности, будет пропорционально площади этого участка. Из этого следует, что число шагов на единичном счетчике будет пропорционально площади, занимаемой на микрошлифе фазой, закрепленной за соответствующей кнопкой и счетчиком.

После окончания сканирования поверхности микрошлифа необходимо записать показания суммирующего счетчика и, переключая показания цифрового индикатора 9 кнопками 12, снять показания единичных счетчиков. Порядковые номера от 1 до 10 кнопок 12 соответствуют номерам кнопок группы 7.

Содержание отдельных фаз и составляющих в процентах от объема исследуемой микроструктуры вычисляется по формуле

$$S_{\alpha} = \frac{C_i}{C_{\Sigma}} \cdot 100 \% , \quad (2.2)$$

где C_i – показание единичного счетчика, соответствующего i -той составляющей микроструктуры;

C_{Σ} – показание суммирующего счетчика.

После этого по методике, представленной в п. 2.2., выполняется вычисление концентрации компонентов сплава.

2.4.2 Количественный анализ в точечном режиме

Точечный режим включается кнопкой «Точечн.» из группы кнопок 6 (рисунок 2.4). Таким же образом, как при линейном режиме, следует закрепить кнопки 7 за отдельными фазами и элементами микроструктуры, кнопками 4 и 5 установить шаг сканирования.

Шаг сканирования по осям X и Y должен быть соизмерим с размерами зерна исследуемой микроструктуры. В точечном режиме может быть выбрана максимальная скорость перемещения предметного столика.

Однократное нажатие кнопки 7 в точечном режиме вызывает перемещение столика по оси X на величину одного шага в пределах от 0,001 до 0,8 мм в зависимости от настройки (таблица 2.1). При этом показания суммирующего и единичного счетчика увеличиваются на единицу.

Сканирование поверхности микрошлифа в точечном режиме выполняется следующим образом:

- перемещением предметного столика рукояткой 2 совместить перекрестие окуляра с начальной точкой сканирования на каком-либо зерне микроструктуры с определенным типом фазы;

- нажать кнопку из группы 7, выбранную для типа фазы, на котором находится перекрестие, при этом предметный столик сдвинется на один шаг;

- вновь нажать кнопку из группы 7, выбранную для типа фазы, на котором остановилось перекрестие, столик сдвинется на следующий шаг.

Таким образом, необходимо многократно нажимать на кнопки 7, соответствующие фазам, на которых в данный момент находится перекрестие окуляра.

Переход на следующую строку сканирования выполняется кнопками 14 таким же образом, как в линейном режиме.

Вычисление процентного соотношения твердых фаз микроструктуры выполняется по формуле (2.1). Концентрация компонентов сплава рассчитывается по формуле (2.2).

2.5 Порядок выполнения работы

2.5.1 Изучить конструкцию сканирующего предметного столика микроскопа МИМ-10 и пульт управления полуавтоматического интеграционного устройства. Практически освоить управление перемещением сканирующего столика с помощью рукоятки 2 кнопок 7, 14 пульта интеграционного устройства. Зарисовать эскиз пульта управления и указать назначение кнопок.

2.5.2 Приготовить микрошлифы образцов исследуемых сплавов для выполнения количественного анализа.

2.5.3 Выполнить сканирование микроструктуры образцов в точечном и линейном режимах, показания единичных и суммирующего счетчиков записать в таблицы 2.2 и 2.3.

2.5.4 Вычислить процентное содержание отдельных твердых фаз в микро-структуре образцов сплавов по формуле (2.2), результаты записать в таблицы 2.2 и 2.3.

2.5.5 Вычислить концентрацию компонентов исследуемых сплавов по формуле (2.1), записать результаты в отчет и определить по ним марку исследованных сплавов.

Таблица 2.2 – Результаты сканирования стального образца

Элементы микроструктуры	Линейный режим		Точечный режим	
	Показания единичных счетчиков	Содержание фазы в микро- структуре, %	Показания единичных счетчиков	Содержание фазы в микро- структуре, %
Феррит				
Перлит				
Показания суммирующего счетчика		100 %		100 %

Таблица 2.3 – Результаты сканирования образца латуни

Элементы микроструктуры	Линейный режим		Точечный режим	
	Показания единичных счетчиков	Содержание фазы в микро- структуре, %	Показания единичных счетчиков	Содержание фазы в микро- структуре, %
α -фаза				
β' -фаза				
Показания суммирующего счетчика		100 %		100 %

2.6 Содержание отчета по лабораторной работе

2.6.1 Название и цель лабораторной работы.

2.6.2 Эскиз пульта управления полуавтоматического интеграционного устройства интеграционного устройства с указанием назначения кнопок.

2.6.3 Таблицы с результатами сканирования микроструктуры образцов сплавов (таблицы 2.2, 2.3).

2.6.4 Формулы для расчета и результаты вычисления процентного содержания отдельных твердых фаз в микроструктуре образцов и концентрации компонентов в исследуемых сплавах.

2.6.5 Выводы по работе – марки сплавов исследованных образцов.

2.7 Контрольные вопросы

2.7.1 Что можно определить в результате количественного анализа сплава по микроструктуре?

2.7.2 В чем заключается сущность количественного анализа сплавов по микроструктуре?

2.7.3 Что представляет собой конструкция сканирующего предметного столика микроскопа МИМ-10?

2.7.4 Как соотносятся шаг сканирования предметного столика и импульсы тока, подаваемые на шаговые электродвигатели?

2.7.5 Для чего нужны единичные и суммирующий счетчики интеграционного устройства?

2.7.6 В каких режимах может выполняться количественный анализ сплавов на микроскопе МИМ-10 и чем они отличаются?

2.7.7 Как выбирается скорость перемещения предметного столика при сканировании в разных режимах?

3 Измерение твердости металлов методом Бринелля

3.1 Цель работы

3.1.1 Приобретение знаний о твердости, как характеристики механических свойств конструкционных материалов.

3.1.1 Изучение методики измерения твердости металлов по Бринеллю.

3.1.2 Ознакомление с конструкцией прибора для измерения твердости методом Бринелля и получение практических навыков измерения твердости образцов сплавов металлов.

3.2 Твердость материалов и ее определение

Твёрдость – это свойство материала, которое заключается в сопротивлении пластической деформации при вдавливании в образец испытываемого материала измерительного наконечника, имеющего более высокую твердость

Измерение твёрдости материалов осуществляется с помощью приборов, которые называются твердомерами. Твердомер оснащается измерительным наконечником из высокотвердого материала, который называется индентором. Инденторы имеют различную форму в зависимости от метода измерения твердости. В процессе измерения индентор вдавливается в поверхность испытываемого образца материала с определенной силой, в результате чего на поверхности остается отпечаток. Условия проведения измерений твердости, форма инденторов и значение силы вдавливания регламентированы стандартами.

Технические характеристики и основные параметры твердомеров должны удовлетворять стандарту ГОСТ 23677–79 «Твердомеры для металлов. Общие технические требования».

Твёрдость определяется как отношение величины силы вдавливания к площади или объёму поверхности отпечатка. Различают *поверхностную* и *объёмную* твёрдость:

– поверхностная твёрдость – отношение нагрузки к площади поверхности отпечатка;

– объёмная твёрдость – отношение силы вдавливания к объёму отпечатка.

Различают также *восстановленную* и *невосстановленную* твёрдость. Восстановленная твёрдость определяется как отношение нагрузки к площади или объёму отпечатка, а невосстановленная твёрдость определяется как отношение силы сопротивления внедрению индентора к площади или объёму внедренной в материал части индентора. Объём восстановленного отпечатка меньше объёма внедренной части индентора на величину упругой деформации измеряемого материала.

Твёрдость измеряют в трёх диапазонах: макротвёрдость (или просто твердость), микротвёрдость, нанотвёрдость (*nanohardness*). Сила вдавливания индентора при измерении макротвёрдости составляет от 2 Н до 30 кН (от 200 г до 3000 кг). При измерении микротвёрдости регламентируется величина силы на инденторе до 2 Н и глубина внедрения индентора больше 0,2 мкм. Для нанотвёрдости регламентируется только глубина внедрения индентора, которая должна быть менее 0,2 мкм.

Результат измерения твердости зависит от величины силы, прикладываемой к индентору. Такая зависимость получила название *размерного эффекта* (в англоязычной литературе *indentation size effect*). Характер зависимости твердости от нагрузки определяется формой индентора:

– для сферического индентора, представляющего собой шарик из твердого материала, с увеличением нагрузки число твердости увеличивается, проявляется обратный размерный эффект (*reverse indentation size effect*);

– для индентора, имеющего форму пирамиды, с увеличением нагрузки число твердости уменьшается – прямой или просто размерный эффект (*indentation size effect*);

– для индентора, имеющего форму конуса с закругленной вершиной, с увеличением нагрузки число твердости сначала увеличивается, когда внедряется сфе-

рическая часть индентора, а затем при вдавливании сфероконической части индентора начинает уменьшаться.

3.3 Методы измерения твёрдости

Методы определения твёрдости по способу приложения нагрузки делятся на статические и динамические (ударные). Статические методы применяются для измерения твердости небольших деталей и образцов материалов. Динамические методы применяются для измерения твердости материалов массивных и крупногабаритных деталей.

В зависимости от степени воздействия на объект измерения методы определения твердости могут относиться как к неразрушающим, так и к разрушающим.

В машиностроительном производстве для определения твёрдости материалов применяются следующие методы измерения с различными шкалами и единицами измерения.

Метод Бринелля – в поверхность образца вдавливается шарик из закаленной стали или твердого сплава и измеряется диаметр полученного восстановленного отпечатка. Твёрдость вычисляется как отношение силы, приложенной к шарик, к площади сферической поверхности отпечатка. По ГОСТ 9012–59 твердость по Бринеллю измеряется в кг/мм^2 , но число твердости записывают без единиц измерения и обозначают буквами *HB* (*H* – hardness, твёрдость; *B* – Brinell, Бринелль)

Метод Виккерса – твёрдость определяется по результатам измерения и вычисления площади отпечатка, оставляемого четырёхгранной алмазной пирамидой, вдавливаемой в поверхность. Твёрдость вычисляется как отношение нагрузки, приложенной к пирамиде, к площади поверхности отпечатка. Размерность единиц твёрдости по Виккерсу – кг/мм^2 . Твёрдость, определённая по этому методу, обозначается *HV* – (*H* – hardness, *V* – Vickers).

Метод Роквелла – твёрдость определяется по глубине вдавливания металлического шарика или алмазного конуса в поверхность тестируемого материала. С

увеличением глубины отпечатка твердость уменьшается по зависимости $HR = 100 - 0,5 \cdot h$, где h – глубина отпечатка в мкм. Число твердости по методу Роквелла не может быть больше 100 единиц, является безразмерной величиной и определяется по показаниям прибора, имеющего несколько шкал. Каждой шкале твердомера Роквелла соответствуют определенный индентор и сила вдавливания, всего предусмотрено 11 шкал. Твёрдость по Роквеллу обозначается *HRA*, *HRB*, *HRC* в зависимости от применяемой шкалы (*H* – hardness, *R* – Rockwell, *A*, *B*, *C* – шкалы).

Методы Шора – существуют статический и динамический методы измерения твердости по Шору.

Твёрдость по Шору статический – метод вдавливания. Твёрдость определяется по глубине проникновения в материал индентора в виде специальной закаленной стальной иглы под действием калиброванной пружины. В данном методе измерительный прибор именуется дюрометром. Обычно метод Шора используется для определения твердости низкомодульных материалов (полимеров). Метод Шора, описанный стандартом ASTM D2240, оговаривает 12 шкал измерения. Чаще всего используются варианты *A* (для мягких материалов) или *D* (для более твердых). Твёрдость, определённая по этому методу, обозначается *HS* и буквой используемой шкалы, записываемой после числа с явным указанием метода.

Твёрдость по Шору динамический – метод отскока. Твердость определяется по высоте, на которую после удара отскакивает специальный боёк, падающий с определенной исходной высоты. Прибор для измерения твердости методом отскока называется склерометром. Этот метод применяется для определения твёрдости очень твёрдых и высокомодульных материалов. Твердость по динамическому методу Шора оценивается в условных единицах, пропорциональных высоте отскакивания бойка. Основные шкалы *C* и *D*. Обозначается *HS_x*, где *H* — Hardness, *S* — Shore и *x* — латинская буква, обозначающая тип шкалы, использованной при измерении.

В международных стандартах этот метод измерения твёрдости называется **методом Либа**. Результаты измерения твёрдости изделий указываются в единицах твёрдости Либа, обозначаемых HL. Стандарт на метод Либа в Российской Федерации не разработан.

Таким образом, статический и динамический методы Шора – это два принципиально разных метода с разными значениями шкал, выполняемых по разным стандартам.

Метод Польди (метод двойного отпечатка шарика) – твердость оценивается путем сравнения с твердостью эталона, испытание производится путем ударного вдавливания стального шарика одновременно в образец и эталон.

Шкала Мооса – твердость определяется по тому, какой из десяти стандартных минералов царапает тестируемый материал, и какой материал из десяти стандартных минералов царапается тестируемым материалом. Стандартные минералы характеризуются твердостью от 1 до 10: 1 – тальк, 2 – гипс, 3 – кальцит, 4 – флюорит, 5 – апатит, 6 – ортоклаз, 7 – кварц, 8 – топаз, 9 – корунд, 10 – алмаз.

Конкретный способ определения твердости выбирается исходя из свойств материала, задач измерения, условий его проведения, имеющейся аппаратуры и пр.

Измерение твердости является наиболее распространенным способом определения механических свойств материалов в условиях машиностроительного производства. Простота и доступность методов измерения твердости дает возможность использовать его для оценки качества полуфабрикатов, заготовок и окончательно обработанных деталей.

После испытаний на твердость изделия, признанные годными, можно использовать, так как они не разрушаются, а оставленные отпечатки могут быть удалены, если в этом есть необходимость.

Получаемые в результате испытаний характеристики твердости используются для контроля качества термической обработки, выбора наиболее рационального режима механической обработки детали, оценки качества наносимых покрытий.

Существующие методы определения твердости не отражают целиком какого-либо одного определённого фундаментального свойства материалов, поэтому не существует прямой взаимосвязи между разными шкалами и методами, но имеются приближенные таблицы, связывающие шкалы отдельных методов для определённых групп и категорий материалов. Соотношение чисел твердости, полученных при различных методах измерения, приведено в таблице А.1 приложения А.

Теорий, позволяющих расчетным методом перейти от одного способа определения твердости к другому, не существует. Таблицы перевода чисел твердости строятся по результатам экспериментальных измерений.

3.4 Методика измерения твердости по методу Бринелля

Измерение твердости методом Бринелля регламентируется стандартом ГОСТ 9012–59. В качестве индентора применяется шарик диаметром D , изготовленный из закаленной стали или твердого сплава на основе карбида вольфрама WC. Стандартный ряд диаметров D : 1; 2; 2,5; 5 и 10 мм.

Твердость стального шарика должна быть не менее 850 HV , твердость шарика из твердого сплава – не менее 1500 HV .

Метод измерения твердости по Бринеллю заключается во вдавливании индентора в образец (изделие) под действием силы F , приложенной перпендикулярно поверхности образца в течение определенного времени и измерении диаметра d отпечатка после снятия усилия и отвода индентора (рисунок 3.1). Стандартный ряд сил вдавливания индентора F : 187,5; 250; 500; 750; 1000; 1500; 3000 кг. Измерение глубины отпечатка h применяется для разбраковки партии изделий по твердости путем сравнения с глубиной отпечатка на эталонном образце.

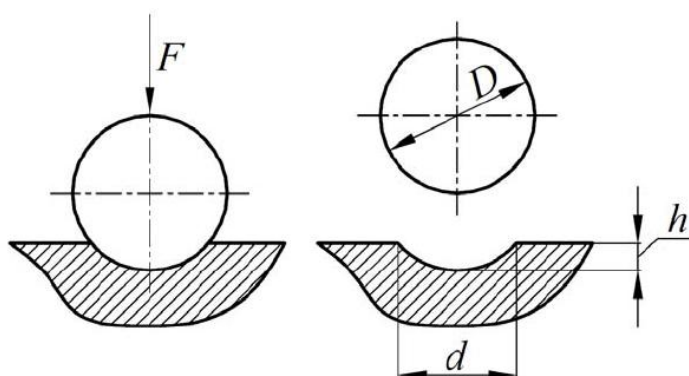


Рисунок 3.1 – Схема вдавливания индентора по методу Бринелля

Измерение твердости производится для металлов с твердостью не более 650 единиц для исключения ошибок, связанных с возможной деформацией шарика. При твердости металлов менее 450 единиц применяют стальные закаленные шарики или шарики из твердого сплава, при твердости более 450 единиц – только шарики из твердого сплава ВК2.

Твердость по Бринеллю обозначают символом *HB* при применении стального шарика или *HBW* в случае применения шарика из твердого сплава. Перед этим символом указывают числовое значение твердости из трех значащих цифр, после символа указывают условия проведения испытаний: диаметр шарика, значение приложенного усилия (в кг) и продолжительность выдержки образца под нагрузкой (в секундах), разделяемые косой чертой.

Примеры:

183 *HB* 5/1500/15;

523 *HBW* 10/3000/30.

Число твердости по Бринеллю рассчитывается как отношение силы вдавливания индентора *F* к площади сферического отпечатка по формуле

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (3.1)$$

где *F* – сила вдавливания, кг;

D и *d* – соответственно диаметры шарика и отпечатка, мм.

При измерении твердости по методу Бринелля необходимо выполнять следующие условия:

– толщина образца должна не менее чем в 8 раз превышать глубину отпечатка, а на противоположной стороне образца после испытания не должно быть следов деформации;

– поверхность образца должна быть плоской, гладкой и свободной от окисной пленки;

- шероховатость поверхности образца или изделия в месте нанесения отпечатка не более $Ra\ 2,5$;
- обработку поверхности образца (изделия) можно проводить шлифовкой или мелким напильником;
- при определении твердости шариком диаметром 1 мм поверхность образца должна быть отполирована;
- образец должен быть подготовлен таким образом, чтобы не изменялись свойства металла в результате механической или другой обработки, например, от нагрева или наклепа;
- расстояние между центром отпечатка и краем образца должно быть не менее 2,5 диаметров отпечатка d ;
- расстояние между центрами двух смежных отпечатков должно быть не менее 4 диаметров отпечатка;
- диаметры отпечатков измеряются в двух взаимно перпендикулярных направлениях, за диаметр отпечатка d принимается среднее арифметическое значение результатов измерений;
- диаметр шарика D и силу вдавливания F выбирают таким образом, чтобы диаметр отпечатка d находился в пределах от $0,24D$ до $0,6D$.

Измерение твердости проводят при температуре (23 ± 5) °С. При измерении твердости прибор должен быть защищен от ударов и вибраций. Опорные поверхности столика и подставки, а также опорные и рабочие поверхности образца должны быть очищены от посторонних веществ (окалины, смазки и др.).

В соответствии с рекомендациями ГОСТ 9012–59 сила вдавливания F выбирается по таблице 3.1 в зависимости от диаметра шарика D и параметра K . Значение параметра K определяется по таблице 3.2 в зависимости от свойств исследуемого материала.

Продолжительность выдержки образца под действием силы вдавливания индентора устанавливается по таблице 3.3 в зависимости от ожидаемой твердости исследуемого материала.

Таблица 3.1 – Выбор силы вдавливания индентора F , кг

Диаметр шарика D , мм	Параметр K по таблице 3.2					
	30	15	10	5	2,5	1
1,0	30	–	10	5	2,5	1
2,0	120	–	40	20	10	4
2,5	187,5	–	62,5	31,2	15,6	6,2
5,0	750	–	250	125	62,5	25
10,0	3000	1500	1000	500	250	100

Таблица 3.2 – Значения параметра K в зависимости от свойств исследуемого материала

Материал	Твердость по Бринеллю	Параметр K
Сталь, чугун, высокопрочные сплавы на основе никеля, кобальта и др.	До 140	10
	Более 140	30
Титан и сплавы на его основе	От 50 и более	15
Медь и сплавы на ее основе, легкие металлы и их сплавы	Менее 35	5
	Более 35	10
Подшипниковые сплавы	От 8 до 50	2,5
Свинец, олово и другие мягкие металлы	До 20	1

Таблица 3.3 – Выбор продолжительности выдержки силы вдавливания индентора

Твердость исследуемого материала по Бринеллю HB , HBW	Продолжительность выдержки силы вдавливания, с
< 10	180
от 10 до 35	120
от 35 до 100	30
> 100	от 10 до 15

Метод измерения твердости по Бринеллю имеет ряд преимуществ по сравнению с другими:

- метод Бринелля является одним из самых старых, поэтому накоплен большой объем технической документации, где твердость материалов указана в соответствии с этим методом;
- метод Бринелля является более точным по сравнению с методом Роквелла на низких значениях твердости (менее 290 *HB*);
- метод Бринелля менее критичен к чистоте поверхности, подготовленной под замер твердости;
- по результатам измерения твердости по Бринеллю можно рассчитать предел прочности и предел текучести материала с достаточной точностью для решения прикладных задач (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Формулы для расчета прочностных характеристик материалов по твердости

Материал и прочностная характеристика	Расчетная формула
Сталь, предел прочности σ_{σ} , Н/мм ²	$\sigma_{\sigma} = \frac{10 \cdot HB}{3}$
Сталь, предел текучести σ_T , Н/мм ²	$\sigma_T = \frac{10 \cdot HB}{6}$
Предел прочности алюминиевых сплавов σ_{σ} , Н/мм ²	$\sigma_{\sigma} = 3,62 \cdot HB$
Предел прочности медных сплавов σ_{σ} , Н/мм ²	$\sigma_{\sigma} = 2,6 \cdot HB$

При измерении твердости методом Бринелля следует учитывать характерные для него недостатки:

- невозможность измерения твердости высокотвердых материалов, рекомендуется применять для материалов с твердостью до 450 *HB*;

- твердость по Бринеллю зависит от нагрузки, возникает обратный размерный эффект;
- при вдавливании индентора вследствие пластической деформации материала по краям отпечатка образуются навалы и наплывы, что снижает точность измерения диаметра и глубины отпечатка;
- метод Бринелля неприменим для тонких образцов из-за большого размера индентора (диаметра шарика) и глубокого отпечатка.

3.5 Конструкция и технические характеристики твердомера ТБ 5004

Для измерения твердости методом Бринелля применяются стационарные и переносные твердомеры. Стационарные твердомеры используются для определения твердости образцов материалов и небольших деталей, переносные предназначены для определения твердости крупногабаритных деталей на месте их нахождения.

Стационарный полуавтоматический твердомер модели ТБ 5004 (рисунок 3.2) предназначен для контроля твердости материалов, выполняемого в двух режимах:

- для измерения твердости методом Бринелля по ГОСТ 9012–59;
- для разбраковки партии изделий на группы твердости по глубине восстановленного отпечатка с помощью указателей стрелочного индикатора, которым снабжен твердомер.

Схема механизма твердомера ТБ 5004 представлена на рисунке 3.3. Испытываемый образец помещается на стол 2, который поднимается винтом при вращении гайки с маховичком. В результате подъема стола образец прижимается к индентору 5 и перемещает шпиндель с индентором вверх. В автоматическом режиме работы твердомера при этом срабатывает концевой выключатель 9, запускающий цикл приложения испытательной нагрузки. Включается электродвигатель механизма 16, происходит поворот выходного вала редуктора с кривошипом, толкатель 3 опускается в нижнее положение, в результате чего вес груза 14 через систему рычагов 4 и 11 действует на шпиндель 6 и с заданной силой вдавливает

индентор в образец. Запускается электронное реле времени, отсчитывающее заданную выдержку действия испытательной силы. По истечении заданного времени вдавливания включается электродвигатель механизма 16, который перемещает толкатель 3 в верхнее положение, при этом происходит подъем рычага 4 с грузом 14 и снимается испытательная нагрузка с индентора. После этого с помощью маховичка стол 2 можно опустить и снять образец с полученным отпечатком для дальнейшего измерения.

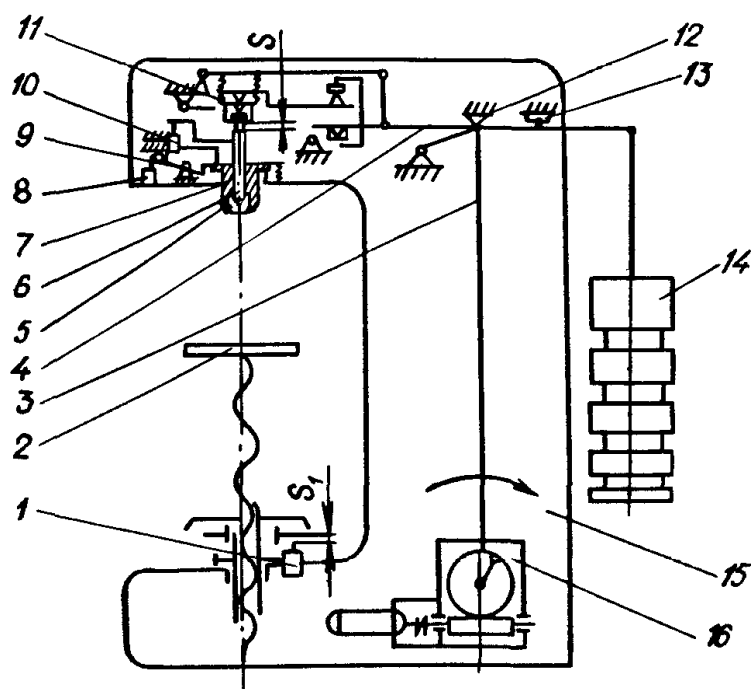
В ручном режиме цикл приложения нагрузки запускается и останавливается кнопками «Пуск» и «Стоп», расположенными на корпусе твердомера.

Величина испытательной нагрузки устанавливается с помощью системы сменных грузов. Время выдержки задается поворотными переключателями на пульте электронного реле времени.

Технические данные твердомера ТБ 5004 приведены в таблице 3.5.



Рисунок 3.2 – Твердомер ТБ 5004, общий вид



1 – фиксатор винта; 2 – стол; 3 – толкатель; 4 – рычаг; 5 – индентор; 6 – шпindelь; 7 – измерительная втулка; 8 – упор индикатора; 9 и 10 – концевые выключатели; 11 – рычаг; 12 и 13 – упоры; 14 – груз; 15 – корпус; 16 – электромеханизм подъема груза.

Рисунок 3.3 – Схема твердомера ТБ 5004

Таблица 3.5 – Технические данные твердомера ТБ 5004

Диапазон измерения твердости	от 4 до 450 <i>НВ</i>
Испытательные нагрузки кН (кг)	1,839; 2,452; 4,903; 7,355; 9,807; 14,71; 29,42 кН. (187,5; 250; 500; 750; 1000; 1500; 3000 кг)
Предел допускаемой относительной погрешности испытательных нагрузок	$\pm 1 \%$
Цена деления шкалы индикатора глубины внедрения индентора	0,002 мм

Продолжение таблицы 3.5

Пределы допускаемой относительной погрешности прибора по твердости при измерении диаметра отпечатка микроскопом МТБ–3	<p>в диапазоне $(100 \pm 25)HB \pm 5 \%$</p> <p>в диапазоне $(200 \pm 50)HB \pm 4 \%$</p> <p>в диапазоне $(400 \pm 50)HB \pm 4 \%$</p>
Продолжительность выдержки испытуемого образца под нагрузкой	регулируемая от 5 до 300 с
Предел допускаемой погрешности времени выдержки	± 3 с
Расстояние от оси накопечника до корпуса	120 мм
Расстояние от наконечника до стола регулируемое	от 0 до 250 мм
Потребляемая мощность	0,180 кВт
Габаритные размеры	840 x 375 x 920 мм
Масса	205 кг

3.6 Измерение твердости образцов материалов на твердомере ТБ 5004

3.6.1 По таблицам 3.1, 2.3 и 3.3 выбрать необходимые для измерения стальных и алюминиевых образцов диаметр шарика индентора, величину испытательной нагрузки и время выдержки. Твердость стали и алюминиевых сплавов более 100 *HB*, твердость алюминия от 35 до 100 *HB*.

На твердомере, подготовленном к лабораторной работе, установлен индентор – стальной шарик диаметром 10мм. Сила вдавливания индентора равна 3000 кг.

3.6.2 Установить испытываемый образец на стол твердомера. Образец должен лежать на столе устойчиво, без смещения и прогиба во время испытания.

3.6.3 На пульте управления твердомера установить переключатель режимов работы АВТ (автоматическое включение нагрузки), переключатель вида работы – в положение РАБОТА. Переключателями реле времени установить время приложения нагрузки 10 секунд. Включить электропитание тумблером в положение ВКЛ.

3.6.4 Вращением маховичка поднять стол до контакта образца с индентором. Далее продолжать плавно вращать маховичок, наблюдая за движением стрелки индикатора, отсчитывающего перемещение шпинделя с индентором. При установке стрелки индикатора на показание примерно 1,80 мм сработает концевой выключатель и запустится электродвигатель механизма отработки цикла нагружения. Рычаг с подвешенным грузом переместится в нижнее положение. При этом загорится сигнальная лампа ВЫДЕРЖКА и начнется отсчет времени действия силы вдавливания индентора. По окончании времени выдержки механизм твердомера поднимет рычаг с грузом, испытательная нагрузка снимется с индентора, сигнальная лампа ВЫДЕРЖКА на пульте управления погаснет.

После этого следует опустить стол с образцом вращением маховичка в обратном направлении и снять образец.

3.6.5 Установить измерительный микроскоп МПБ-2 на поверхность образца, настроить фокусировку измерительной шкалы окуляра и наблюдаемого отпечатка (рисунок 3.4). Выполнить измерение диаметров отпечатка d_1 и d_2 в двух взаимно перпендикулярных направлениях и вычислить среднее арифметическое значение диаметра d с точностью до 0,01 мм. Разность измерений диаметров d_1 и d_2 одного отпечатка не должна превышать 2 %.

Для приобретения навыков измерения диаметра отпечатка полезно воспользоваться эталонным образцом с известной твердостью и нанесенными ранее отпечатками.

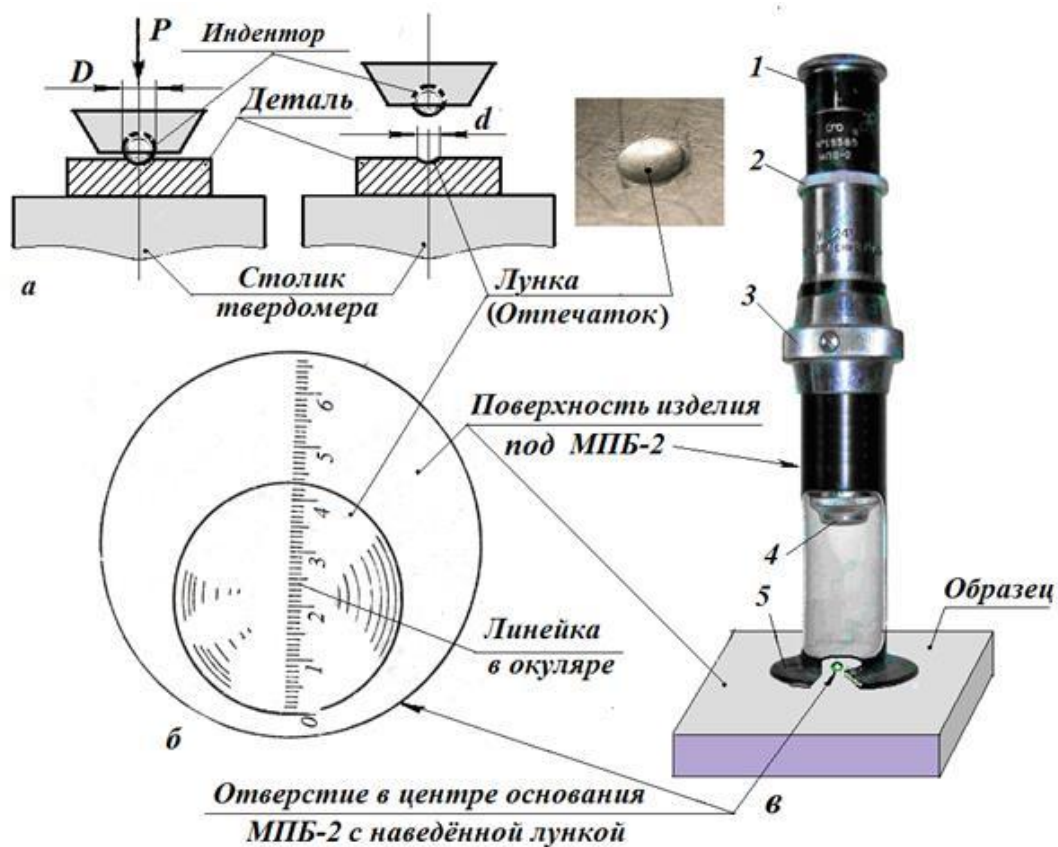
Пример – при твердости эталонного образца 371 *НВ*, диаметр отпечатка d на его поверхности равен 3,16 мм.

Диаметр измеренного на исследуемом образце отпечатка d должен соответствовать требованиям стандарта:

$$0,24 \cdot D \leq d \leq 0,6 \cdot D. \quad (3.2)$$

При диаметре индентора $D = 10$ мм диаметр отпечатка должен быть в интервале от 2,4 до 6 мм.

3.6.6 Рассчитать твердость образца по формуле (3.1), или определить твердость по таблице 3.6. Значения твердости в таблице рассчитаны для восстановленных отпечатков при диаметре индентора $D = 10$ мм и силе вдавливания $F = 3000$ кг.



1 – окуляр; 2 – кольцо для фокусировки измерительной шкалы окуляра; 3 – кольцо для фокусировки наблюдаемого отпечатка; 4 – объектив; 5 – опора микроскопа.

Рисунок 3.4 – Измерение диаметра отпечатка микроскопом МПБ-2

Таблица 3.6 – Определение твердости *НВ* по диаметру отпечатка *d* при *D* = 10 мм и *F* = 3000 кг.

Диаметр отпечатка <i>d</i> , мм	Твердость <i>НВ</i>	Диаметр отпечатка <i>d</i> , мм	Твердость <i>НВ</i>	Диаметр отпечатка <i>d</i> , мм	Твердость <i>НВ</i>
2,20	782	3,06	398	4,22	204
2,25	744	3,08	393	4,25	201
2,30	713	3,10	388	4,30	197
2,34	688	3,12	383	4,32	195
2,31	688	3,14	378	4,34	193
2,39	659	3,16	373	4,36	191
2,42	643	3,20	363	4,40	187
2,45	627	3,22	359	4,45	183
2,48	611	3,24	354	4,48	180
2,50	601	3,30	341	4,52	177
2,54	582	3,36	329	4,60	170
2,56	573	3,40	321	4,65	167
2,61	551	3,44	313	4,72	161
2,65	534	3,48	306	4,80	156
2,68	522	3,52	298	4,91	148
2,70	514	3,54	295	4,95	146
2,72	507	3,58	288	5,00	143
2,75	495	3,60	285	5,05	140
2,76	492	3,66	275	5,15	134
2,79	481	3,70	269	5,21	130
2,81	474	3,74	263	5,40	121
2,87	454	3,80	255	5,50	116
2,88	451	3,85	248	5,59	112
2,90	444	3,90	241	5,68	108

Продолжение таблицы 3.6

Диаметр отпечатка <i>d</i> , мм	Твердость <i>HV</i>	Диаметр отпечатка <i>d</i> , мм	Твердость <i>HV</i>	Диаметр отпечатка <i>d</i> , мм	Твердость <i>HV</i>
2,91	441	3,95	235	5,7в.	104
2,95	429	3,96	234	5,67	100
2,96	426	4,00	229	5,99	96
2,98	420	4,10	217	6,16	90
3,00	415	4,15	212	6,48	80
3,02	409	4,18	209	6,63	76
3,03	404	4,20	207		

3.7 Содержание отчета по работе

3.7.1. Цель работы.

3.7.2. Краткое описание методики измерения твердости методом Бринелля.

3.7.3 Технические характеристики твердомера модели ТБ 5004.

3.7.4 Выбор режимов испытания твердости образцов из стали и алюминиевого сплава (*D*, *F*, время выдержки).

3.7.5 Результаты измерения твердости двух образцов в форме таблицы 3.7.

3.7.6 Проверка соответствия отпечатков требованиям

$$0,24 \cdot D \leq d \leq 0,6 \cdot D,$$

$$\frac{d_1 - d_2}{d_1} \cdot 100 \leq 2 \text{ \%}.$$

3.7.7 Выводы о применимости метода измерения по Бринеллю на основе его преимуществ, недостатков и результатов выполненной работы.

Таблица 3.7 – Результаты измерения твердости материалов

Образец	d_1 , мм	d_2 , мм	$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$, мм	HV кг/мм ²
Сталь				
Алюминиевый сплав				

3.8 Контрольные вопросы

3.8.1 Дайте определение понятия «твердость материалов».

3.8.2 Опишите условия нанесения отпечатка при определении твердости по методу Бринелля: форма наконечника, значение нагрузки.

3.8.3 Раскройте сущность формулы для расчета числа твердости по Бринеллю.

3.8.4 Перечислите требования, предъявляемые к условиям нанесения отпечатка, обеспечивающим достоверность определения твердости.

8.5 Что необходимо предпринять, если диаметр полученного отпечатка оказался больше, чем $0,6D$?

3.8.6 Для каких материалов применим метод измерения твердости по Бринеллю?

3.8.7 Какое значение имеет твердость для работоспособности деталей машин?

3.8.8 Какую толщину должен иметь образец для измерения твердости методом Бринелля?

4 Измерение твердости методом Роквелла

4.1 Цель работы

4.1.1. Изучение метода измерения твердости металлов по Роквеллу.

4.1.2. Изучение конструкции прибора для измерения твердости методом Роквелла.

4.1.3 Приобретение практических навыков измерения твердости образцов сплавов металлов по Роквеллу.

4.2 Сущность метода измерения твердости по Роквеллу

Твёрдость – свойство материала, заключающееся в сопротивлении пластической деформации при вдавливании в образец испытываемого материала измерительного наконечника, имеющего более высокую твердость.

Измерение твердости по Роквеллу относится к статическим методам и заключается во вдавливании твёрдого наконечника (индентора) в материал и измерении глубины его внедрения. Твердость материала и глубина внедрения индентора находятся в обратной зависимости: чем больше глубина, тем меньше твердость. Существуют формулы для расчета твердости в зависимости от глубины, однако, необходимости в выполнении вычислений нет. Твердомеры для измерения твердости по Роквеллу снабжены измерительным индикатором, шкала которого уже проградуирована в единицах твердости. Благодаря этому твердость определяется быстро и оперативно, а метод Роквелла получил широкое распространение.

Измерение твёрдости по относительной глубине проникновения индентора было предложено в 1908 году венским профессором Людвигом. Метод определения относительной глубины исключал ошибки, связанные с механическими несовершенствами системы, такими, как люфты и поверхностные дефекты.

Твердомер Роквелла, прибор для определения относительной глубины проникновения, был разработан американцами Хью М. Роквеллом и Стэнли П. Роквеллом. Потребность в таком приборе была вызвана необходимостью быстрого определения качества термообработки на обоймах стальных подшипников. Метод Бриелля, изобретённый в 1900 году в Швеции, был медленным, не применимым для закалённых сталей, и оставлял слишком большой отпечаток, что не позволяло контролировать все 100 % деталей.

Для определения твердости разнообразных материалов по методу Роквелла предусмотрено использование различных инденторов и усилий вдавливания. Условия измерения твердости по Роквеллу регламентированы стандартами:

- ГОСТ 9013-59 Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу;
- ГОСТ 24622-91 Пластмассы. Определение твердости. Твердость по Роквеллу.

В качестве инденторов используются (рисунок 4.1):

- наконечник алмазный конусный типа НК по ГОСТ 9377, угол конуса 120° , вершина конуса сферическая с радиусом 0,2 мм – применяется для определения твердости закаленных сталей, твердых сплавов;
- наконечник шариковый стальной, закаленный, номинальные диаметры шариков равны 1,588; 3,175; 6,35 и 12,7 мм (1/16; 1/8, 1/4 и 1/2 дюйма) – применяется для определения твердости незакаленных сталей, цветных сплавов, пластмасс.



Рисунок 4.1 – Комплект инденторов твердомера Роквелла

Твердомер Роквелла снабжен индикатором с несколькими шкалами, по которым определяется твердость. Каждой шкале соответствует определенный тип индентора и сила вдавливания. Шкалы обозначаются буквами от *A* до *V* (таблица 4.1). Шкалы *A, B, C, D, E, F, G, K* предназначены для измерения твердости металлов, *L, M, P, R, S, V* – для измерения твердости пластмасс.

Таблица 4.1 – Шкалы твердости по Роквеллу, инденторы и силы вдавливания

Обозначение шкалы твердости	Сила вдавливания индентора, Н (кг)		
	588,4 (60)	980,7 (100)	1471 (150)
<i>A</i>	конус 120°		
<i>B</i>		шар 1,588 мм	
<i>C</i>			конус 120°
<i>D</i>		конус 120°	
<i>E</i>		шар 3,175 мм	
<i>F</i>	шар 1,588 мм		
<i>G</i>			шар 1,588 мм
<i>H</i>	шар 3,175 мм		
<i>K</i>			шар 3,175 мм
<i>L</i>	шар 6,350 мм		
<i>M</i>		шар 6,350 мм	
<i>P</i>			шар 6,350 мм
<i>R</i>	шар 12,700 мм		
<i>S</i>		шар 12,700 мм	
<i>V</i>			шар 12,700 мм

Сущность метода Роквелла заключается во вдавливании индентора в поверхность образца или изделия под действием последовательно прилагаемых предварительной F_0 и основной F_1 сил.

Предварительная сила F_0 , равная 98,07 Н (10 кг), прикладывается для выборки зазоров и люфтов между индентором, образцом и столом, а также в механизмах

твердомера. Под действием предварительной силы индентор вдавливаются в образец на некоторую глубину h_0 . При этом стрелка индикатора, измеряющего глубину внедрения индентора, устанавливается на нулевую отметку. В результате этого создается однозначная точка отсчета глубины внедрения индентора.

Основная сила F_1 выбирается в зависимости от шкалы измерения твердости (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Силы вдавливания инденторов при измерении твердости по методу Роквелла

Шкала твердости	Обозначение	Предварительная сила F_0		Основная сила F_1		Общая сила F		Диапазон измерений
		Н	кг	Н	кг	Н	кг	
A	<i>HRA</i>	98,07	10	490,3	50	588,4	60	20 – 88
B	<i>HRB</i>	98,07	10	882,6	90	980,7	100	20 – 100
C	<i>HRC</i>	98,07	10	1373	140	1471	150	20 – 70
D	<i>HRD</i>	98,07	10	882,6	90	980,7	100	40 – 77
E	<i>HRE</i>	98,07	10	882,6	90	980,7	100	70 – 100
F	<i>HRF</i>	98,07	10	490,3	50	588,4	60	60 – 100
G	<i>HRG</i>	98,07	10	1373	140	1471	150	30 – 94
H	<i>HRH</i>	98,07	10	490,3	50	588,4	60	80 – 100
K	<i>HRK</i>	98,07	10	1373	140	1471	150	40 – 100
L	<i>HRL</i>	98,07	10	490,3	50	588,4	60	
M	<i>HRM</i>	98,07	10	882,6	90	980,7	100	
P	<i>HRP</i>	98,07	10	1373	140	1471	150	
R	<i>HRR</i>	98,07	10	490,3	50	588,4	60	
S	<i>HRS</i>	98,07	10	882,6	90	980,7	100	
V	<i>HRV</i>	98,07	10	1373	140	1471	150	

Под действием общей силы F , равной сумме сил F_0 и F_1 , индентор внедряется в поверхность образца на глубину h_1 . Стрелка индикатора при этом показывает перемещение, представляющее собой сумму глубины внедрения индентора и величины упругой деталей твердомера: корпуса, стола, подъемного винта с гайкой, шпинделя и др. Схемы вдавливания инденторов и измерения глубины внедрения представлены на рисунках 4.2 и 4.3.

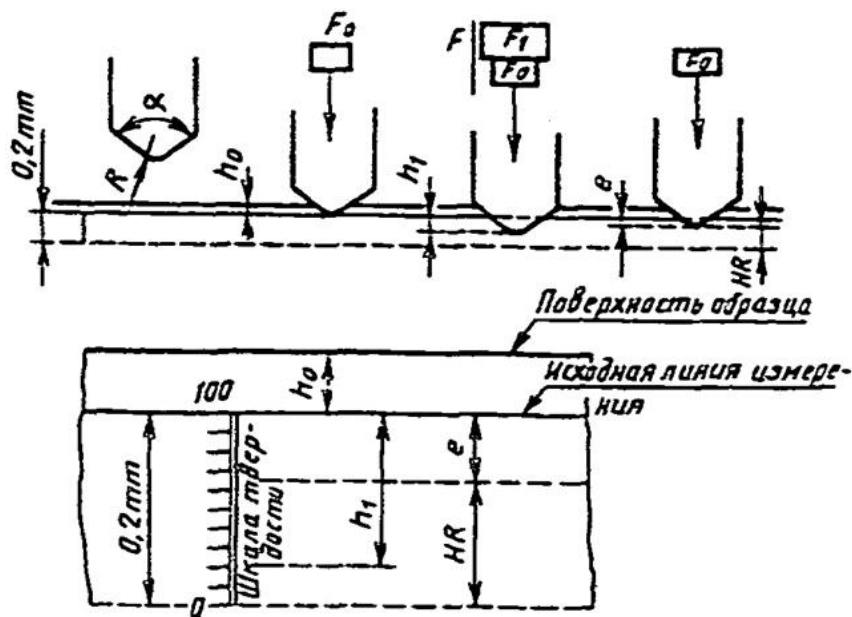


Рисунок 4.2 – Схема вдавливания алмазного конуса

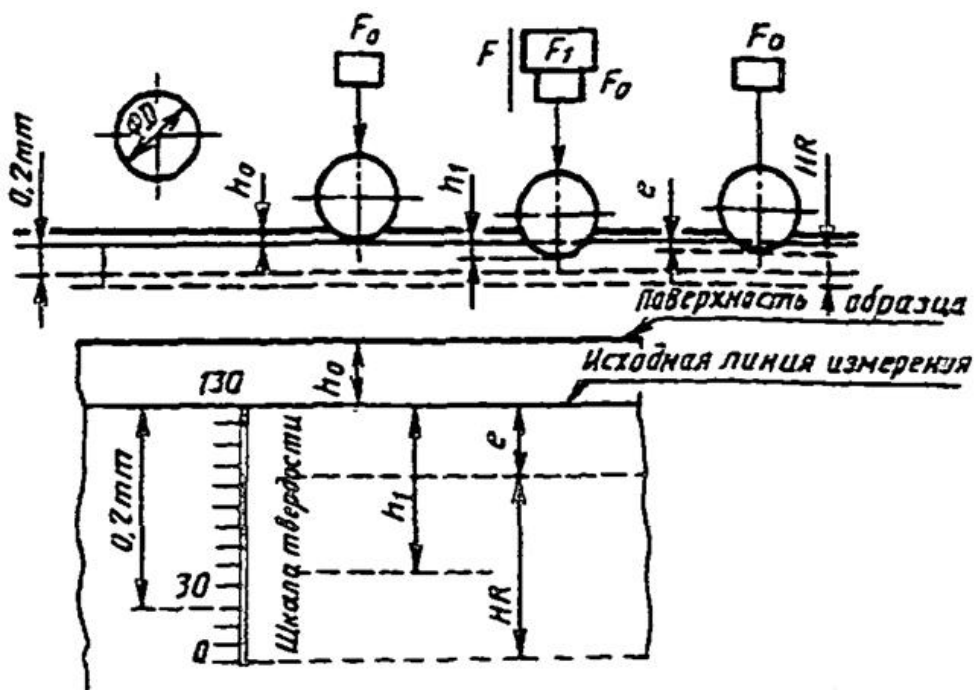


Рисунок 4.3 – Схема вдавливания шарика

Для определения глубины внедрения индентора e , по которой определяется твердость, отсчет показания индикатора выполняется после снятия основной силы F_1 . При этом устраняются упругие деформации материала образца и деталей твердомера, вызванные силой F_1 , но вся система остается под действием предварительной силы F_0 , то есть в состоянии, которое было принято за точку отсчета. Таким образом, глубина e меньше глубины h_1 на величину упругих деформаций образца Δl :

$$e = h_1 - \Delta l. \quad (4.1)$$

Единице твердости по шкале индикатора твердомера Роквелла соответствует глубина отпечатка, равная 0,002 мм. При испытании алмазным конусом установлена предельная глубина внедрения индентора, равная 0,2 мм, что соответствует 100 делениям шкалы индикатора. Связь между глубиной внедрения e и числом твердости HR по шкалам A , C и D выражается формулами

$$HRA = 100 - \frac{e}{0,002}; \quad HRC = 100 - \frac{e}{0,002}; \quad HRD = 100 - \frac{e}{0,002}. \quad (4.2)$$

При испытании стальным закаленным шариком предельная глубина внедрения составляет 0,26 мм, что соответствует 130 делениям шкалы индикатора. Поэтому число твердости по шкалам B , E , F и далее до V определяется по формуле

$$HRB = 130 - \frac{e}{0,002}. \quad (4.3)$$

Формулы (4.2) и (4.3) отражают связь между глубиной отпечатка и числом твердости. Следует заметить, что при измерении твердости по Роквеллу никакие вычисления не производятся, так как шкалы индикатора твердомера проградуированы непосредственно в единицах твердости.

Индикатор твердомера Роквелла имеет две шкалы:

– первая шкала – для отсчета твердости при измерении алмазным конусом;
– вторая шкала, повернутая по окружности относительно первой на 30 единиц, предназначена для отсчета твердости при измерении стальным шариком.

Твердость по Роквеллу записывают числом, состоящем из трех значащих цифр. Единицы измерения твердости по Роквеллу обозначают тремя буквами: две буквы *HR* – твердость по Роквеллу, третья буква (*A*, *B*, *C* и т.д.) соответствует шкале, по которой выполняется измерение.

Примеры

1 82,5 *HRA* – твердость по Роквеллу равна 82,5 единиц по шкале *A*;

2 95,0 *HRB* – твердость по Роквеллу равна 95,0 единиц по шкале *B*;

3 61,5 *HRC* – твердость по Роквеллу равна 61,5 единиц по шкале *C*.

4.3 Условия измерения твердости по Роквеллу

Условия проведения испытаний твердости металлов по Роквеллу регламентированы стандартом ГОСТ 9013-59.

Толщина образца (или изделия) должна не менее чем в 10 раз превышать глубину внедрения наконечника после снятия основной силы F_1 .

Минимальная толщина образца или изделия определяется по графикам на рисунках 4.3 и 4.4.

Шероховатость поверхности образца (или участка для измерения твердости изделия) *Ra* должна быть не более 2,5 мкм по ГОСТ 2789-73.

Образец должен быть подготовлен таким образом, чтобы не изменялись его свойства в результате механической или другой обработки, например, от нагрева или наклепа.

Измерение твердости проводят при температуре в пределах от 10 °С до 35 °С. При разногласиях в результатах измерение твердости проводят при температуре (23 ± 5) °С.

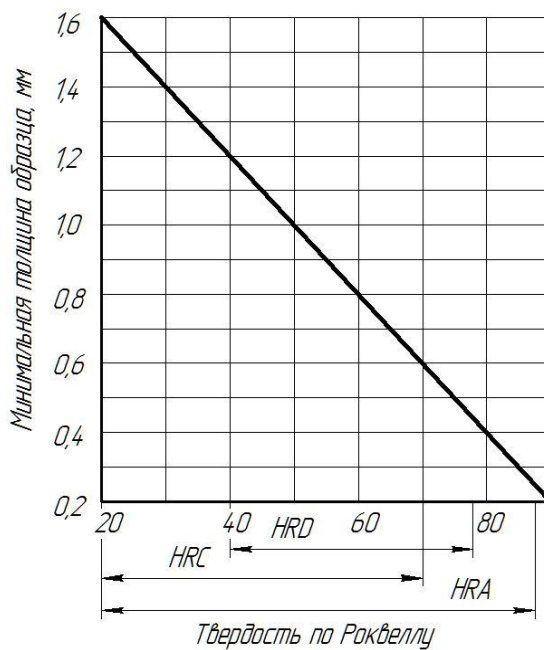


Рисунок 4.3 – Минимальная толщина образца при измерении твердости по шкалам A, C, D

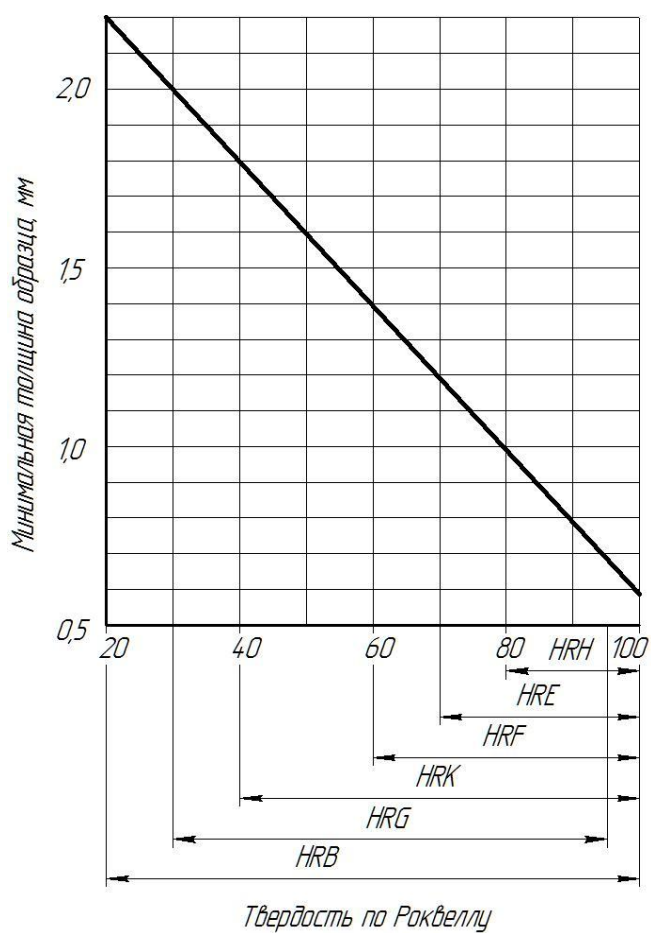


Рисунок 4.4 – Минимальная толщина образца при измерении твердости по шкалам B, E, F, G, H, K

Опорные поверхности столика и подставки, а также опорные и рабочие поверхности образца (или изделия) должны быть очищены от посторонних веществ (окалины, смазки и др.).

Образец должен быть установлен на столике или подставке устойчиво во избежание его смещения и прогиба во время измерения твердости.

При измерении твердости прибор должен быть защищен от вибрации и ударов.

При измерении твердости должны соблюдаться условия:

– плавное приведение наконечника в контакт с рабочей поверхностью образца (или изделия);

– плавное, в течение от 2 до 8 секунд, приложение предварительного F_0 и основного F_1 усилий;

– плавное снятие основного усилия F_1 через 1 – 3 с после резкого замедления или остановки стрелки индикатора.

Для металлов, при измерении твердости которых резкого замедления или остановки стрелки индикатора не наблюдается, время выдержки под общим усилием F должно составлять от 10 до 15 с. При наличии указаний в нормативно-технической документации на металлопродукцию время выдержки может быть увеличено до 60 с.

Расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее четырех диаметров отпечатка (но не менее 2 мм).

Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее 2,5 диаметра отпечатка (но не менее 1 мм).

На опорной поверхности образца (или изделия) не должно наблюдаться следов деформации от отпечатка.

Число твердости по Роквеллу определяется по шкале индикатора с округлением до 0,5 единицы твердости.

При измерении твердости на выпуклых цилиндрических и сферических поверхностях по шкалам A , B , C , D , F , G в результаты измерения твердости должны

быть введены поправки, величины которых, приведенные в таблицах 4.3 и 4.4, прибавляются к полученным значениям твердости.

Поправки при измерении твердости на вогнутых поверхностях устанавливаются в нормативно-технической документации на металлопродукцию.

После смены наконечника, рабочего столика или подставки первые три измерения не учитываются.

Количество отпечатков при измерении твердости, способ обработки и результаты измерений указываются в нормативно-технической документации на металлопродукцию.

Не разрешается проводить испытания алмазным наконечником:

- неоднородных по структуре сплавов, например, чугуна;
- хрупких изделий;
- изделий, которые могут пружинить и деформироваться под действием нагрузки, например тонкостенных труб.

Таблица 4.3 – Поправки, прибавляемые к твердости по Роквеллу по шкалам *B, F, G* при измерении на выпуклых цилиндрических поверхностях

Твердость по Роквеллу	Радиус кривизны, мм						
	3	5	6,5	8	9,5	11	12,5
20				4,5	4,0	3,5	3,0
30			5,0	4,5	3,5	3,0	2,5
40			4,5	4,0	3,0	2,5	2,5
50			4,0	3,5	3,0	2,5	2,0
60		5,0	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0
70		4,0	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5
80	5,0	3,5	2,5	2,0	1,5	1,5	1,5
90	4,0	3,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0
100	3,5	2,5	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5

Таблица 4.4 – Поправки, прибавляемые к твердости по Роквеллу по шкалам А, С, D при измерении на выпуклых цилиндрических поверхностях

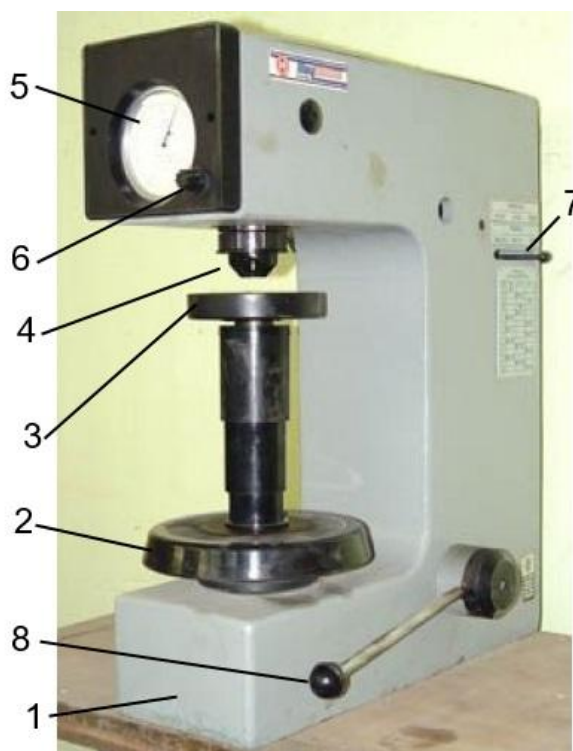
Твердость по Роквеллу	Радиус кривизны, мм								
	3	5	6,5	8	9,5	11	12,5	16	19
20				2,5	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0
25			3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0
30			2,5	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5
35		3,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5
40		2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5
45	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
50	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
55	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0
60	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
65	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
70	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
75	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0
80	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0
85	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0
90	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0

4.4 Измерение твердости по Роквеллу на твердомере модели 2410 TP

Общий вид твердомера модели 2410 TP для измерения твердости материалов по методу Роквелла представлен на рисунке 4.5.

Основой прибора служит станина 1, имеющая С-образную форму. В нижней части станины установлен маховик 2 с гайкой на вертикальном ходовом винте. На конце ходового винта установлен стол 3 для размещения испытуемых образцов. При вращении маховика происходит подъем или опускание стола.

В полости верхней части станины размещена рычажная система, служащая для создания силы, прикладываемой к шпинделю с индентором 4. Величина перемещения наконечника в процессе испытания и глубина отпечатка измеряется с помощью индикатора 5. Индикатор имеет две шкалы, проградуированные в числах твердости по Роквеллу. По черной шкале отсчитываются числа твердости *HRA* и *HRC*, по красной – числа твердости *HRB*. Ручка 6 служит для поворота шкалы индикатора и установки стрелки в нулевое положение.



1 – станина; 2 – маховик; 3 – стол; 4 – индентор; 5 – индикатор; 6 – ручка поворота шкалы индикатора; 7 – рукоятка для установки силы вдавливания индентора; 8 – рукоятка приложения силы вдавливания к индентору.

Рисунок 4.5 – Общий вид твердомера 2410 TP

Величина общей силы F вдавливания индентора устанавливается рукояткой 7 по таблице, размещенной на боковой стенке станины. Рукоятка 8 в нижней части станины служит для включения и выключения основной силы вдавливания F_1 .

К работе на приборе допускаются лица, изучившие инструкцию по эксплуатации.

Подготовка твердомера 2410 ТР к измерению твердости образцов материалов выполняется следующим образом. Индентор, выбранный в соответствии с ожидаемой твердостью образца, устанавливают и закрепляют в шпинделе твердомера. Рукояткой 7 задают величину общей силы вдавливания индентора, соответствующую выбранной шкале измерения твердости.

На стол 3 твердомера устанавливают испытуемый образец и вращением маховика 2 по часовой стрелке поднимают стол до контакта образца с индентором. Затем, плавно вращая маховик, продолжают подъем стола с образцом, наблюдая движение стрелки индикатора. Подъем стола прекращают, когда большая стрелка индикатора установится на нуль черной шкалы в вертикальном положении и малая стрелка установится вертикально вверх. Допустимое отклонение большой стрелки – не более 5 делений. Подстройка точной установки большой стрелки на нуль осуществляется поворотом шкалы с помощью ручки 6.

Следует заметить, что независимо от используемой шкалы измерения твердости (*A*, *B*, *C* и т.д.) большая стрелка индикатора всегда устанавливается на нуль по черной шкале (*A* и *C*). При таком состоянии твердомера к индентору прикладывается предварительная сила вдавливания F_0 , равная 98,07 Н или 10 кг.

Затем к индентору прикладывают основную силу вдавливания F_1 . Для этого рукоятку 8 отводят вправо для расфиксации, немного поворачивают по часовой стрелке и отпускают. Далее рукоятка поворачивается сама под действием грузов, размещенных внутри корпуса прибора. При этом происходит вдавливание индентора в образец под действием общей силы $F_0 + F_1$. Движение стрелки индикатора указывает на увеличение глубины внедрения индентора. Плавность нагружения и вдавливания обеспечивается гидравлическим демпфером в механизме твердомера.

Через 1 – 3 секунду после окончания вдавливания индентора и остановки стрелки индикатора основную нагрузку F_1 снимают. Для этого рукоятку 8 поворачивают против часовой стрелки до упора и ставят на фиксатор, нажимая влево.

В этом состоянии производят отсчет показания стрелки индикатора по шкале, соответствующей условиям испытания. Полученное число будет значением твердости материала образца по Роквеллу.

Для снятия образца необходимо опустить стол 3 вращением маховика 2 против часовой стрелки.

Для получения достоверных результатов выполняют трехкратное измерение твердости в разных точках поверхности образца и рассчитывают среднее значение.

4.5 Порядок выполнения лабораторной работы

4.5.1 Изучить конструкцию твердомера 2410 TP и методику измерения твердости по Роквеллу.

4.5.2 Установить индентор для измерения твердости по шкале *B* – стальной закаленный шарик диаметром 1,588 мм, рукояткой 7 установить силу вдавливания 980,7 Н (100 кг).

4.5.3 Установить на стол твердомера образец из незакаленной стали и выполнить четыре измерения твердости *HRB* в разных точках, записать результаты. Результат первого измерения не учитывать, так как при первом нагружении происходит опрессовка вновь установленного индентора, из-за чего возникает ошибка в измерении глубины внедрения. Рассчитать среднее значение твердости.

4.5.4 Установить на стол твердомера образец из алюминиевого сплава и выполнить три измерения твердости *HRB*. Рассчитать среднее значение твердости.

4.5.5 По таблице 4.5 перевести результаты измерения твердости по Роквеллу в единицы твердости по Бринеллю (для сравнения).

4.5.6 По средним значениям твердости образцов вычислить глубину отпечатков *e*, мм, по формуле

$$e = (30 - HRB) \cdot 0,002.$$

Определить минимально допустимую толщину образца.

4.5.7 Установить индентор – алмазный конус для измерения твердости по шкалам *A* и *C*.

4.5.8 Рукояткой 7 установить силу вдавливания 1471 Н (150 кг).

Установить на стол твердомера образец из закаленной стали и выполнить четыре измерения твердости *HRC* в разных точках, записать результаты. Результат первого измерения не учитывать, так как при первом нагружении происходит опрессовка вновь установленного индентора, из-за чего возникает ошибка в измерении глубины внедрения. Рассчитать среднее значение твердости.

4.5.9 Рукояткой 7 установить силу вдавливания 588,4 Н (60 кг).

Установить на стол твердомера образец из закаленной стали и выполнить три измерения твердости *HRA* в разных точках, записать результаты. Рассчитать среднее значение твердости.

4.5.10 По таблице 4.5 перевести результаты измерения твердости по Роквеллу в единицы твердости по Бринеллю (для сравнения). Сделать выводы о совпадении результатов измерения твердости по шкалам А и С.

4.5.11 По средним значениям твердости образцов вычислить глубину отпечатков *e*, мм, по формулам

$$e = (100 - HRC) \cdot 0,002, \quad e = (100 - HRA) \cdot 0,002.$$

4.5.12 Оформить отчет о выполненной работе.

4.5.13 Подготовить ответы на контрольные вопросы.

Таблица 4.5 – Соотношение чисел твердости при различных методах измерения

Виккерс	Бринелль		Роквелл			Виккерс	Бринелль		Роквелл		
	HV	HB	HBW	HR	HRB		HRC	HV	HB	HBW	HRA
1234	780	872	84		72	228	229		60	99	20
1116	745	840	83		70	222	223		60	98	19
1022	712	812	82		68	217	217		59	97	17
941	682	794	81		66	213	212		59	95	15

Продолжение таблицы 4.5

Вик-керс	Бринелль		Роквелл			Вик-керс	Бринелль		Роквелл		
	HV	HB	HBW	HRA	HRB		HRC	HV	HB	HB	HRA
868	673	760	80		64	208	207		58	94	14
804	627	724	79		62	201	201		58	93	13
746	601	682	78		60	197	197		57	92	12
694	578	646	78		58	192	192		57	92	11
650	555	614	77		56	186	187		56	90	9
606	534	578	76		54	183	183		56	90	8
587	514	555	75		52	178	179		55	89	7
551	495	525	74		50	174	174		55	88	6
534	477	514	73		49	171	170		54	87	4
502	461	477	73		48	166	167		53	86	3
474	444	460	72		46	162	163		53	85	2
460	429	432	72		45	159	159			84	1
435	415	418	71		43	155	156			83	
423	401	401	71		42	152	152			82	
401	388	388	70		41	149	149			81	
390	375	375	70		40	148	146			80	
386	363	364	69		39	143	143			79	
361	352	352	68		38	140	140			78	
344	341	341	67		36	138	137			77	
334	331	330	67		35	134	134			76	
320	321	321	66		33	131	131			75	
311	311	311	66		32	129	128			74	
303	302	302	65		31	127	126			73	
292	293		65		30	123	123			72	

Продолжение таблицы 4.5

Виккерс	Бринелль		Роквелл			Виккерс	Бринелль		Роквелл			
	HV	HB	HBW	HRA	HRB		HRC	HV	HB	HB	HRA	HRB
285	285		64		29	121	121				71	
278	277		64		28	118	118				70	
270	269		63		27	116	116				69	
261	262		63		26	115	114				98	
255	255		62		25	113	111				67	
249	248		62	102	24	110	110				66	
240	241		61	101	23	109	109				65	
235	235		61	100	21	108	107				64	

4.6 Содержание отчета по работе

4.6.1 Цель работы.

4.6.2 Краткое описание методики измерения твердости по Роквеллу.

4.6.3 Результаты измерения твердости в табличной форме (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Результаты измерения твердости по Роквеллу

Образец	Результаты измерения	Среднее значение твердости	Глубина отпечатка e , мм	Твердость по Бринеллю
Сталь незакаленная	_____ <i>HRB</i>	_____ <i>HRB</i>		_____ <i>HB</i>
	_____ <i>HRB</i>			
	_____ <i>HRB</i>			

Продолжение таблицы 4.6

Образец	Результаты измерения	Среднее значение твердости	Глубина отпечатка e , мм	Твердость по Бринеллю
Алюминиевый сплав	_____ <i>HRB</i>	_____ <i>HRB</i>		_____ <i>HB</i>
	_____ <i>HRB</i>			
	_____ <i>HRB</i>			
Сталь закаленная	_____ <i>HRC</i>	_____ <i>HRC</i>		_____ <i>HB</i>
	_____ <i>HRC</i>			
	_____ <i>HRC</i>			
Сталь закаленная	_____ <i>HRA</i>	_____ <i>HRA</i>		_____ <i>HB</i>
	_____ <i>HRA</i>			
	_____ <i>HRA</i>			

4.7 Контрольные вопросы

4.7.1 Дайте определение понятия «твердость».

4.7.2 Опишите условия нанесения отпечатка при определении твердости по методу Роквелла: форма наконечников, значение силы вдавливания.

4.7.3 Как связаны число твердости по Роквеллу и глубина отпечатка?

4.7.4 Перечислите условия нанесения отпечатка, обеспечивающие достоверность определения твердости.

4.7.5 От чего зависит выбор вида индентора и значения силы вдавливания при измерении твердости по Роквеллу?

4.7.6 Твердость каких материалов можно измерить методом Роквелла?

4.7.7 Какие геометрические параметры должен иметь образец для измерения твердости по Роквеллу?

5 Измерение микротвердости материалов

5.1 Цели работы

5.1.1 Приобретение знаний о твердости, как характеристики механических свойств конструкционных материалов.

5.1.2 Изучение методики измерения микротвердости металлов по методу восстановленного отпечатка.

5.1.3 Изучение конструкции прибора ПМТ-3М для измерения микротвердости.

5.1.4 Получение практических навыков измерения микротвердости образцов сплавов металлов.

5.2 Испытание микротвердости по методу восстановленного отпечатка

Испытание микротвердости материалов подразумевает измерение твердости в микрообъеме. Условия и правила проведения испытаний микротвердости материалов регламентированы стандартом ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников».

Стандарт устанавливает метод измерения микротвердости вдавливанием алмазных наконечников, применяемый для изделий и образцов из металлов, сплавов, минералов, стекол, пластмасс, полупроводников, керамики, тонких листов, фольги, пленок, гальванических, диффузионных, химически осажденных и электроосажденных покрытий. Твердость испытываемых материалов должна быть ниже твердости алмаза.

Стандартом предусмотрены два метода испытаний:

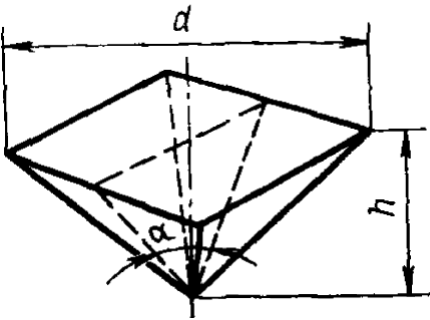
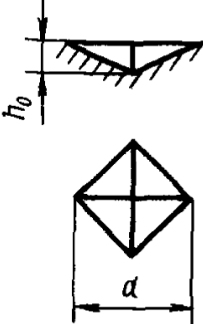
- по восстановленному отпечатку (основной метод);
- по невосстановленному отпечатку (дополнительный метод).

Испытание на микротвердость вдавливанием по методу восстановленного отпечатка заключается в нанесении на испытываемую поверхность изделия (образца) отпечатка алмазного наконечника под действием статической нагрузки, приложенной в течение определенного времени. После снятия нагрузки и удаления наконечника выполняется измерение геометрических параметров полученного отпечатка. Число микротвердости определяют делением нормальной силы, приложенной к алмазному наконечнику, на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка.

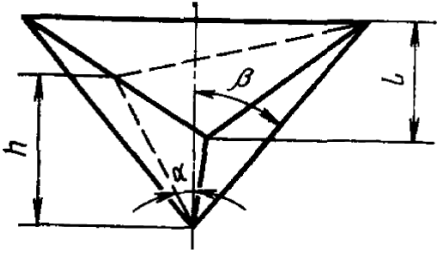
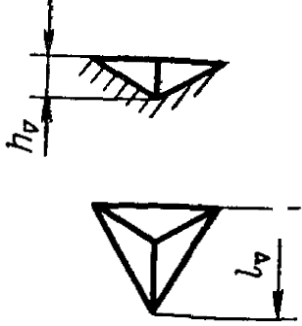
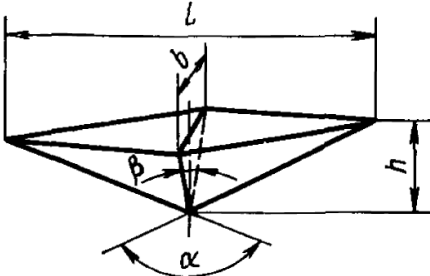
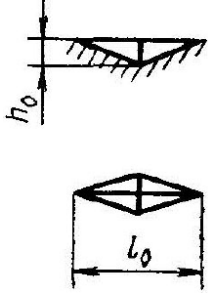
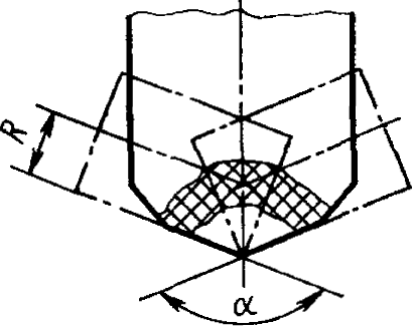
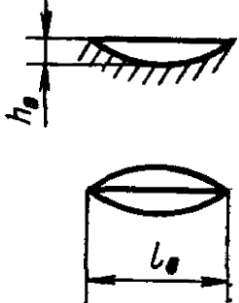
Вид формулы для вычисления микротвердости выбирают в зависимости от типа и формы применяемого наконечника. Для уменьшения объема вычислений пользуются таблицами (приложение А, таблица А.1), содержащими числа твердости, вычисленные при различных значениях параметров отпечатков.

Форма рабочей части стандартных алмазных наконечников для испытания микротвердости материалов представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Алмазные наконечники инденторов для испытания микротвердости

Наименование алмазных наконечников	Форма и параметры наконечников	Форма и параметры отпечатков
Четырехгранная пирамида с квадратным основанием	 <p style="text-align: center;">$\alpha = 136^\circ$</p>	

Продолжение таблицы 5.1

Наименование алмазных наконечников	Форма и параметры наконечников	Форма и параметры отпечатков
Трехгранная пирамида с основанием в виде равностороннего треугольника	 <p style="text-align: center;"> $\alpha = 65^\circ$ $\beta = 77^\circ$ $\alpha + \beta = 142^\circ$ </p>	
Четырехгранная пирамида с ромбическим основанием	 <p style="text-align: center;"> $\alpha = 172^\circ 30'$ $\beta = 130^\circ$ </p>	
Бицилиндрический наконечник	 <p style="text-align: center;"> $\alpha = 136^\circ$ Радиус цилиндра $R = 2 \text{ мм}$ </p>	

Указания по выбору формы рабочей части алмазного наконечника даны в ГОСТ 9450-76 в приложении.

Для испытаний на микротвердость в большинстве случаев рекомендуется применять алмазный наконечник с формой рабочей части в виде четырехгранной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине 136° .

Стабильность измерений таким наконечником может нарушаться из-за влияния перемычки по линии стыка противоположных граней, возникающей при изготовлении четырехгранной пирамиды. Величина перемычки ограничена, но неодинакова у разных наконечников. В процессе испытания перемычка оказывает дополнительное сопротивление вдавливанию, зависящее от ее длины, особенно при малой глубине отпечатка и высокой твердости образца.

Алмазный наконечник с формой рабочей части в виде трехгранной пирамиды с равносторонним треугольником в основании рекомендуется применять для испытаний материалов с твердостью HV более 1000. Трехгранная пирамида имеет более совершенное заострение без перемычки.

Алмазный наконечник с формой рабочей части в виде четырехгранной пирамиды с ромбическим основанием рекомендуется для измерения микротвердости изделий с малой толщиной испытуемого слоя (фольга, покрытия, поверхностные слои) и материалов с небольшой твердостью (алюминий, медь и др.).

Алмазный наконечник с формой рабочей части в виде бицилиндра рекомендуется применять для измерения микротвердости субтонких слоев или пленок толщиной менее 3 мкм (защитные пленки в оптике, ферромагнитные пленки и др.).

Измерение геометрических параметров восстановленного отпечатка выполняют с помощью специального микроскопа. Вид измеряемого параметра зависит от применяемого наконечника (таблица 5.1):

- при использовании четырехгранной пирамиды с квадратным основанием измеряют диагональ квадратного отпечатка d ;
- при использовании трехгранной пирамиды измеряют высоту треугольного отпечатка l_{∇} ;

– при использовании четырехгранной пирамиды с ромбическим основанием измеряют большую диагональ ромбовидного отпечатка l_{\diamond} ;

– при использовании бицилиндрического наконечника измеряют длину отпечатка l_0 .

Формулы для расчета числа микротвердости при использовании различных наконечников приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Формулы для расчета числа микротвердости

Вид алмазного наконечника	Формула для расчета числа микротвердости	Параметры (по таблице 5.1)
Четырехгранная пирамида с квадратным основанием	$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2}$	F – сила вдавливания, Н; d – длина диагонали отпечатка, мм.
	$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2}$	F – сила вдавливания, кг; d – длина диагонали отпечатка, мм.
Трехгранная пирамида с основанием в виде равностороннего треугольника	$H_{\nabla} = 0,16 \cdot \frac{F}{l_{\nabla}^2}$	F – сила вдавливания, Н; l_{∇} – высота отпечатка, мм.
	$H_{\nabla} = 1,57 \cdot \frac{F}{l_{\nabla}^2}$	F – сила вдавливания, кг; l_{∇} – высота отпечатка, мм.
Четырехгранная пирамида с ромбическим основанием	$H_{\diamond} = 1,313 \cdot \frac{F}{l_{\diamond}^2}$	F – сила вдавливания, Н; l_{\diamond} – длина большей диагонали отпечатка, мм.
	$H_{\diamond} = 12,873 \cdot \frac{F}{l_{\diamond}^2}$	F – сила вдавливания, кг; l_{\diamond} – длина большей диагонали отпечатка, мм.

Продолжение таблицы 5.2

Вид алмазного наконечника	Формула для расчета числа микротвердости	Параметры (по таблице 5.1)
Бицилиндрический наконечник	$H_0 = 0,425 \cdot \frac{F}{l_0^3}$	F – сила вдавливания, Н; l_0 – длина отпечатка, мм.
	$H_0 = 4,168 \cdot \frac{F}{l_0^3}$	F – сила вдавливания, кг; l_0 – длина отпечатка, мм.

Микротвердость, измеренную четырехгранной пирамидой с квадратным основанием, обозначают как твердость по Виккерсу HV с указанием нагрузки в килограммах и продолжительности ее приложения в секундах. Продолжительность от 10 до 15 с в обозначении микротвердости не указывают.

Примеры

1 238 HV 0,1/30 – микротвердость, измеренная при нагрузке 0,1 кг (100 г, 0,98 Н), приложенной в течение 30 с;

2 167 HV 0,05 – микротвердость, измеренная при нагрузке 0,05 кг (50 г) или 0,49 Н, приложенной в течение 13 с.

При обозначении микротвердости, измеряемой другими наконечниками, продолжительность действия нагрузки указывают во всех случаях и используют следующие символы:

- H_{∇} – микротвердость, измеренная трехгранной пирамидой;
- H_{\diamond} – микротвердость, измеренная четырехгранной пирамидой с ромбическим основанием;
- H_0 – микротвердость, измеренная бицилиндрическим наконечником.

Пример – 210 H_{∇} 0,2/10 – микротвердость, измеренная трехгранной пирамидой при нагрузке 0,2 кг (200 г), приложенной в течение 10 с.

5.3 Область применения испытания микротвердости материалов

5.3.1 Измерение микротвердости применяют в первую очередь для оценки механических характеристик отдельных структурных составляющих в сплавах.

Объем отпечатка при измерении микротвердости может быть во много раз меньше объема отдельного кристалла (зерна) металла или сплава. Для измерения микротвердости отдельных зерен используют шлифы, приготовленные для выявления микроструктуры. По характерной величине микротвердости можно идентифицировать твердые фазы в структуре сплава. Например, в сплавах железа с углеродом твердость феррита составляет примерно от 80 до 100 *HV*, твердость перлита – от 180 до 230 *HV*, твердость цементита – около 1200 *HV*.

5.3.2 Результаты измерения микротвердости используют для определения степени упрочнения металла после поверхностного пластического деформирования.

Используется поперечный или косой металлографический шлиф. Отпечатки наносятся от поверхности в глубину материала с некоторым выбранным интервалом. Упрочненный поверхностный слой имеет более высокую микротвердость по сравнению с глубинными слоями. Относительное увеличение твердости поверхностного слоя, выраженное в процентах, является оценкой степени упрочнения материала.

5.3.3 Измерение микротвердости позволяет выявить неоднородность прочностных характеристик материала.

Неоднородность прочностных характеристик возникает в результате неравномерной кристаллизации металла отливок, вследствие горячей объемной обработки давлением, при образовании сварных швов и в других технологических процессах. На исследуемой поверхности шлифа в произвольных точках наносят не менее 20 отпечатков. Выполняется статистическая обработка результатов измерения микротвердости, рассчитываются среднее арифметическое значение, дисперсия и другие статистические характеристики.

5.3.4 Измерение микротвердости отдельного монокристалла применяется для исследования анизотропии прочностных характеристик по разным кристаллографическим направлениям.

Выполняют несколько измерений микротвердости одного монокристалла. При нанесении каждого последующего отпечатка алмазный наконечник поворачивают вокруг вертикальной оси на определенный угол. Анизотропия свойств оценивается по соотношению длин диагоналей отпечатка.

5.3.5 Метод измерения микротвердости применяют для выявления неоднородности пластической деформации при холодной обработке давлением.

Повышение степени пластической деформации приводит к увеличению микротвердости вследствие упрочнения металла. Измерение микротвердости позволяет выявить зоны с критической степенью деформации, после которой может наступить разрушение.

5.4 Подготовка образца к измерению микротвердости

Поверхность испытуемого изделия (образца) должна быть свободной от загрязнения на участке нанесения отпечатка. Шероховатость испытуемой поверхности должна быть менее $R_a = 0,32$ мкм.

При подготовке поверхности испытуемого изделия (образца) необходимо принять меры предосторожности, учитывая возможное изменение твердости испытуемой поверхности вследствие нагрева или наклепа при механической обработке.

Испытуемое изделие (образец) должно быть установлено на предметном столике прибора так, чтобы в процессе испытания оно не смещалось, не прогибалось и не поворачивалось.

Поверхность изделия (образца), подлежащая испытанию, должна быть установлена перпендикулярно к оси алмазного наконечника.

Рабочая поверхность алмазного наконечника и поверхность испытуемого изделия должны быть сухими (без смазки).

5.5 Условия проведения испытаний на микротвердость

Нагрузки, вдавливающие наконечник при проведении испытаний материалов на микротвердость, выбирают из следующего ряда:

– в ньютонах: 0,0098; 0,0196; 0,0491; 0,0981; 0,1962; 0,4905; 0,981; 1,962; 2,943; 4,905;

– или в килограммах: 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5;

– или в граммах: 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 300; 500.

Для получения наиболее точного результата измерения микротвердости нагрузка должна быть возможно большей.

После нанесения отпечатка на обратной стороне изделия (образца) не должно быть следов деформации материала.

При измерении микротвердости гальванических, диффузионных, цементованных и прочих покрытий нагрузка должна быть тем меньше, чем тоньше слой покрытия. Если толщина испытуемого слоя неизвестна, то рекомендуется провести несколько измерений при различных нагрузках, начиная с минимальной. Если материал основы не влияет на результат измерений, то значения микротвердости совпадут или будут близки друг к другу. Если значения микротвердости при возрастании нагрузки будут уменьшаться или увеличиваться, то нагрузку следует уменьшать до тех пор, пока две смежные нагрузки не будут давать совпадающие или близкие друг к другу результаты.

Разность размеров диагоналей d_1 и d_2 одного отпечатка от четырехгранной пирамиды не должна превышать 3 % от меньшего значения (рисунок 5.1).

Расстояние от центра отпечатка до края изделия должно быть не менее двойного размера отпечатка. Расстояние между центрами отпечатков, нанесенных на одну поверхность, должно превышать размер отпечатка более чем в три раза.

Нагружение должно осуществляться плавно, без толчков. Скорость опускания алмазного наконечника не должна сказываться на размерах отпечатка. Продолжительность выдержки под нагрузкой должна составлять не менее 3 с.

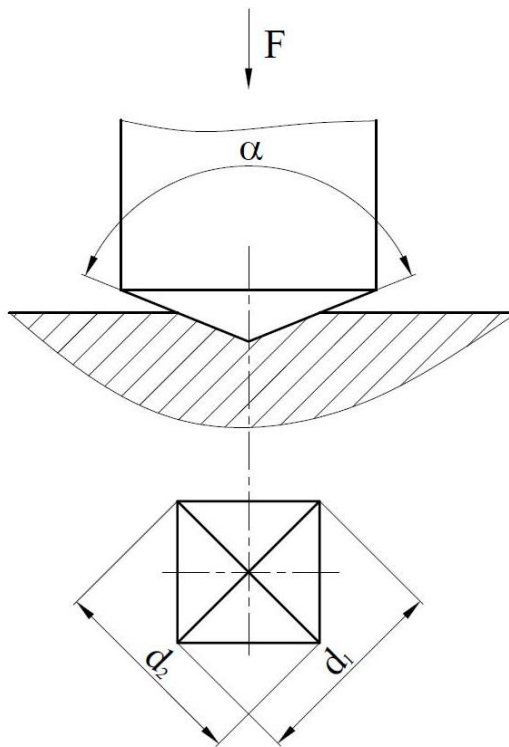


Рисунок 5.1 – Отпечаток четырехгранной пирамиды ($\alpha = 136^\circ$)

Измерение размеров отпечатков выполняют с помощью микроскопа при наблюдении в светлом или темном поле с погрешностью отсчитывания $\pm 0,5$ от наименьшего деления шкалы.

Испытания проводят при температуре окружающей среды $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$.

При измерении микротвердости изделия (образца) с криволинейной поверхностью, когда радиус кривизны на один-два порядка больше размера отпечатка, числа микротвердости имеют условное значение и могут использоваться для сравнения микротвердости поверхностей одинаковой кривизны.

5.6 Конструкция микротвердомера ПМТ-3М

Микротвердомер ПМТ-3М предназначен для испытания микротвердости металлов, сплавов, стекла, абразивов, керамики и минералов методом вдавливания алмазного наконечника.

Микротвердомер имеет массивное основание (рисунок 5.2), на котором установлены колонна с кронштейном и предметный столик. На кронштейне закреплен микроскоп и нагружающее устройство для нанесения отпечатков алмазным наконечником. Вертикальное перемещение кронштейна осуществляется по ленточной резьбе колонны с помощью гайки. В рабочем состоянии микротвердомера кронштейн фиксируется винтом.

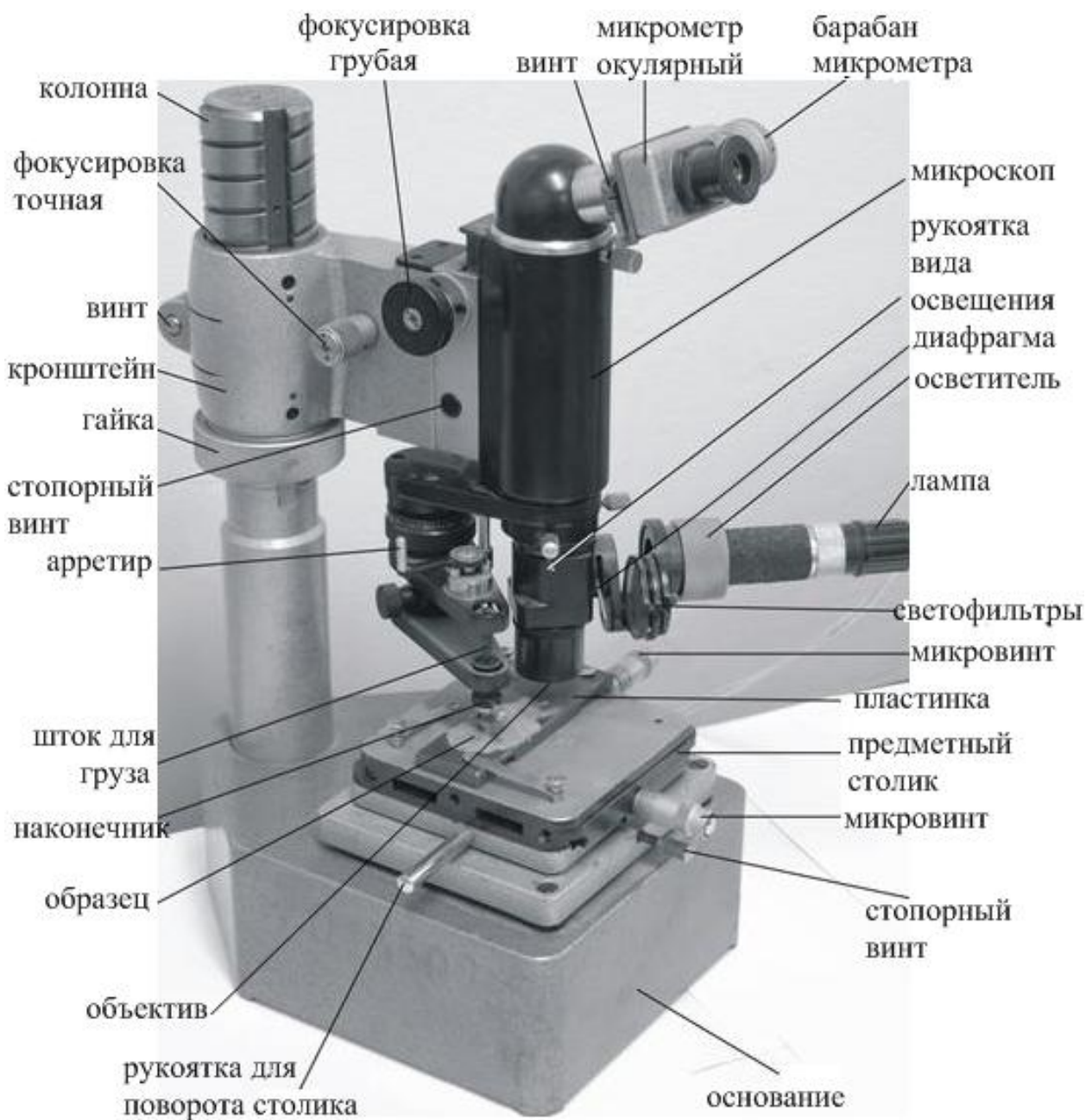
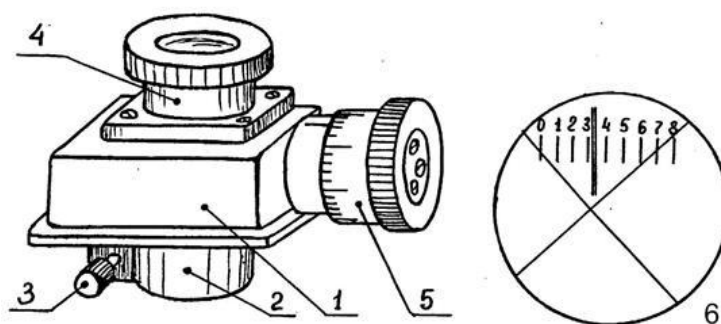


Рисунок 5.2 – Микротвердомер ПМТ-3

Микроскоп имеет объектив с фокусным расстоянием 6,16 мм, окулярный микрометр МОВ-1-16х и осветитель с лампой накаливания. Увеличение микроскопа равно 487. Для настройки резкости наблюдаемого изображения микроскоп снабжен механизмами грубой и точной фокусировки. На ручке точной фокусировки имеется барабан с шкалой, одно деление которой соответствует 0,002 мм подъема или опускания тубуса микроскопа.

Окулярный микрометр (рисунок 5.3) служит для измерения геометрических параметров отпечатка наконечника на поверхности образца, например, длины диагонали отпечатка четырехгранной пирамиды.



1 – корпус; 2 – тубус; 3 – винт; 4 – окуляр; 5 – барабан с делениями;
6 – вид поля зрения.

Рисунок 5.3 – Окулярный микрометр

В поле зрения окулярного микрометра имеется шкала с цифрами от 0 до 8 и подвижное перекрестие, которое перемещается при вращении барабана микрометрического винта. На барабане нанесена шкала для отсчета величины измеряемого параметра отпечатка, имеющая 100 делений. За один оборот барабана перекрестие в поле зрения перемещается на одно деление шкалы. Таким образом, по шкале в поле зрения отсчитываются сотни делений, а по шкале барабана – десятки и единицы делений.

Цена одного деления барабана равна 0,3 мкм.

Оптическая схема микроскопа позволяет освещать поверхность образца через объектив (наблюдение в светлом поле) или светом, отраженным от кольцевого зер-

кала, окружающего объектив (наблюдение в темном поле). Переключение вида освещения выполняется поворотом соответствующей рукоятки в горизонтальной плоскости. Интенсивность освещения регулируется рукояткой диафрагмы и изменением напряжения питания лампы накаливания. Осветитель снабжен комплектом светофильтров, позволяющих повысить контрастность изображения отпечатка на фоне поверхности образца.

Нагружающее устройство состоит из штока, закрепленного на двух пружинах, снабженного держателем для алмазного наконечника и утолщенной частью для гирь из разновеса. Шток с наконечником опускают на поверхность образца поворотом рукоятки арретира против часовой стрелки. При этом наконечник вдавливается в поверхность образца под действием веса груза.

Предметный столик установлен на круговых направляющих и может быть повернут на 180° от упора до упора. Отпечаток, нанесенный наконечником на поверхности образца, при повороте столика оказывается в центре поля зрения микроскопа.

Для выбора точки нанесения отпечатка на поверхности отпечатка верхняя часть столика может перемещаться в двух направлениях с помощью микровинтов. На барабанах микровинтов имеются шкалы с ценой деления 0,01 мм.

В комплект микротвердомера входят блок питания лампы осветителя, призма для установки круглых образцов и ручной пресс для выравнивания образцов при их закреплении на металлической или стеклянной пластинке с помощью пластилина. Пластинка фиксируется на предметном столике пружинными прихватами.

5.7 Порядок выполнения лабораторной работы

5.7.1 Подготовить образец для измерения микротвердости. Поверхность должна быть плоской, чистой, шероховатость Ra не более 0,32 мкм.

5.7.2 При помощи ручного пресса закрепить испытуемые образцы пластилином на металлической пластинке так, чтобы исследуемая поверхность располагалась параллельно рабочей плоскости предметного столика.

5.7.3 Повернуть рукоятку арретира (подъема-опускания индентора) по часовой стрелке до упора. При этом наконечник будет находиться в верхнем положении.

5.7.4 Поместить на утолщенную часть штока груз массой 50 г.

5.7.5 Повернуть предметный столик за рукоятку по часовой стрелке до упора. Сила, прикладываемая к рукоятке, регулируется стопорным винтом.

5.7.6 Установить на предметный столик под объектив микроскопа пластинку с образцами и закрепить ее пружинными прихватами.

5.7.7 Ручками грубой и точной фокусировки настроить резкое изображение поверхности образца при наблюдении под микроскопом.

5.7.8 Вращая барабан окулярного микрометра, установить визир перекрестия в поле зрения на цифру 4, а шкалу барабана – на нулевое деление. При этом перекрестие будет находиться в центре поля зрения.

5.7.9 Выбрать место нанесения отпечатка на поверхности образца, которое будет находиться под перекрестием. Перемещение образца под объективом осуществляется вращением микровинтов предметного столика.

5.7.10 Плавно без толчков повернуть предметный столик против часовой стрелки до упора. Выбранная для нанесения отпечатка точка поверхности образца окажется под вершиной наконечника.

7.11 Медленно и плавно повернуть рукоятку арретира против часовой стрелки до упора, в результате чего алмазный наконечник опустится на поверхность образца и под действием веса груза нанесет отпечаток. После выдержки около 5 секунд рукоятку арретира повернуть по часовой стрелке в исходное положение, при этом наконечник будет поднят над поверхностью образца.

5.7.12 Плавно повернуть предметный столик по часовой стрелке до упора. Наблюдать полученный отпечаток в поле зрения микроскопа.

5.7.13 Измерить диагональ отпечатка при помощи окулярного микрометра по схеме, представленной на рисунке 5.4. Для этого микрометрическими винтами столика подвести левый конец диагонали отпечатка к перекрестию, а затем вращением барабана окулярного микрометра перевести перекрестие к правому концу диагонали и произвести отсчет числа делений a по шкале барабана.

Шкала окружности барабана имеет 100 делений. За один оборот барабана перекрестие перемещается на одно деление по шкале в поле зрения окулярного микрометра. Таким образом, одно деление шкалы в поле зрения равно 100 делениям шкалы барабана.

Пример – на рисунке 5.4 длина диагонали отпечатка равна 165 делений по шкале барабана окулярного микрометра.

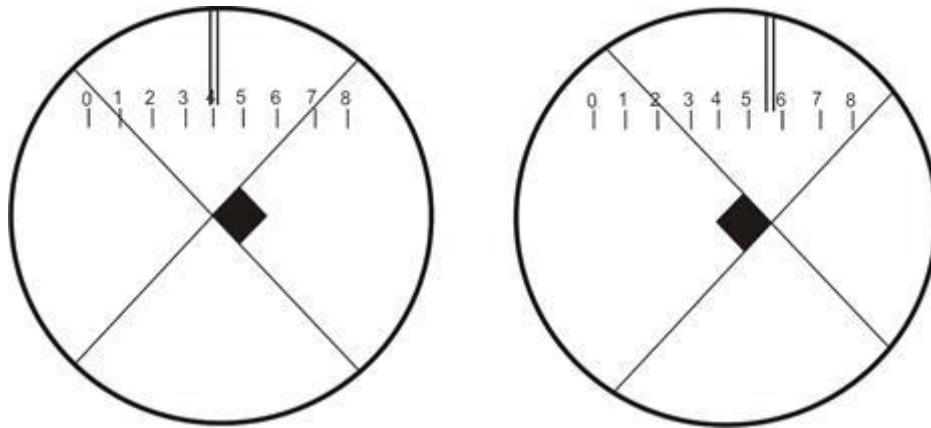


Рисунок 5.4 – Схема измерения длины диагонали отпечатка окулярным микрометром

5.7.14 Вычислить длину диагонали d в микрометрах, для чего необходимо умножить полученное число делений на цену деления шкалы барабана окулярного микрометра, равную 0,3 мкм/дел:

$$d = a \cdot 0,3, \quad (5.1)$$

где a – длина диагонали в делениях барабана окулярного микрометра.

5.7.15 Вычислить микротвердость HV , кг/мм², по формуле

$$HV = 1854 \cdot \frac{F}{d^2}, \quad (5.2)$$

где F – сила вдавливания наконечника в граммах;

d – длина диагонали отпечатка в микрометрах.

Для сокращения объема вычислений следует использовать таблицу Б.1 в приложении Б, в которой приведены результаты расчета микротвердости в зависимости от длины диагонали отпечатка при трех значениях силы вдавливания наконечника.

5.7.16 По приведенной методике выполнить измерения микротвердости двух образцов из различных сплавов при нагрузках 50, 100 и 200 г. При каждой нагрузке наносить отпечатки в трех разных точках поверхности образца.

Результаты измерений записать в отчет в табличной форме (таблица 5.3).

5.8 Содержание отчета по лабораторной работе

5.8.1 Название работы.

5.8.2 Цель лабораторной работы.

5.8.3 Краткое описание метода и области применения измерения микротвердости материалов.

5.8.4 Выбор формы алмазного наконечника в зависимости от вида и характеристик измеряемого объекта.

5.8.5 Технические характеристики микротвердомера ПМТ-3М:

- тип наконечника;
- значения сил вдавливания наконечника;
- увеличение микроскопа;
- цена деления шкалы барабана и пределы измерения окулярного микрометра;
- способы освещения поверхности образца;
- пределы перемещения предметного столика микрометрическими винтами

5.8.6 Требования к качеству поверхности образца для измерения микротвердости.

5.8.7 Результаты измерения микротвердости образцов сплавов (таблица 5.3).

5.8.8 Выводы о влиянии условий измерения микротвердости на точность полученных результатов.

Таблица 5.3 – Результаты измерения микротвердости

Номер измерения	Сила вдавливания наконечника F , г	Число делений барабана окулярного микрометра a	Длина диагонали отпечатка d , мкм	Микротвердость HV , кг/мм ²
Образец – сталь конструкционная				
1	50			
2	50			
3	50			
4	100			
5	100			
6	100			
7	200			
8	200			
9	200			
Образец – латунь Л59С				
10	50			
11	50			
12	50			
13	100			
14	100			
15	100			
16	200			
17	200			
18	200			

5.9 Контрольные вопросы

5.9.1 Какие задачи могут решаться с помощью измерения микротвердости?

5.9.2 В чем отличие измерения микротвердости и твердости материалов?

5.9.3 Какие формы наконечников используются при измерении микротвердости?

5.9.4 При каких значениях нагрузки производится вдавливание наконечника для измерения микротвердости?

5.9.5 Какие параметры отпечатка измеряются для определения микротвердости?

5.9.6 В чем заключается сущность формул для расчета числа микротвердости?

5.9.7 С чем связаны искажения формы отпечатка микротвердости?

5.9.8 Как обеспечить параллельность поверхности образца и предметного столика?

5.9.9 Каково минимально допустимое расстояние между соседними отпечатками наконечника, чем обусловлено это требование?

5.9.10 От чего зависит разброс значений микротвердости при испытании одного образца?

5.9.11 Какие требования предъявляются к поверхности материала при измерении микротвердости?

6 Динамические испытания конструкционных материалов

6.1 Цель лабораторной работы

Эксплуатация различных машин сопряжена с ударными динамическими нагрузками, которым подвергаются детали и узлы. В качестве примера можно привести условия взлета и посадки самолетов, движение автомобиля по неровной дороге, высокоскоростную обработку металлов давлением, обработку резанием прерывистых поверхностей и др. При динамическом нагружении наиболее вероятным является внезапное хрупкое разрушение деталей, приводящее к аварийной ситуации.

Для оценки сопротивления конструкционных материалов воздействию ударных нагрузок, а также для выявления склонности материалов к хрупкому разрушению необходимо проведение динамических испытаний. Динамические испытания характеризуются высокой скоростью изменения действующей на образец нагрузки и большой скоростью их деформации. В зависимости от вида прикладываемой нагрузки и формы образца различают испытания методом динамического растяжения, сжатия, кручения, изгиба. Стандартизованы и наиболее часто применяются ударные испытания на изгиб образцов с надрезом, в результате которых определяется ударная вязкость материала.

Ударная вязкость характеризует способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки.

В динамических испытаниях определяется работа разрушения образца, отнесенная к площади его сечения в месте приложения ударной нагрузки. Единицы измерения ударной вязкости – Дж/см² или кДж/м².

Целью лабораторной работы является получение знаний о динамических испытаниях и приобретение практических навыков определения ударной вязкости конструкционных материалов методом ударного изгиба образцов на маятниковом копре модели ИО 5003-0,3.

В задачи лабораторной работы входит:

- изучение конструкции маятникового копра;
- ознакомление с регламентированными стандартом условиями проведения ударных испытаний на изгиб;
- изучение методики проверки работоспособности маятникового копра.

6.2 Виды разрушения материалов в динамических испытаниях

Динамические испытания отличаются от статических высокой скоростью изменения нагрузки и деформирования образца. В стандартных испытаниях на динамический изгиб скорость деформирования составляет от 3 до 5 м/с, в то время как в статических испытаниях скорость деформирования не превышает 0,01 м/с.

Высокая скорость приложения нагрузки оказывает существенное влияние на характер пластического деформирования, деформационного упрочнения и разрушения. В условиях динамического деформирования изменяется поведение дефектов кристаллической решетки, в первую очередь дислокаций.

Различают два вида разрушения металлов: хрупкое и вязкое. Практическим критерием хрупкого разрушения является малая величина пластической деформации в изломе образца, которая часто близка к значению предельной упругой деформации. Вязкому разрушению предшествует значительная пластическая деформация материала образца в зоне излома.

Скорость развития процессов хрупкого и вязкого разрушения различна. Хрупкое разрушение происходит с высокой скоростью. Вязкому разрушению предшествует пластическое деформирование материала, происходящее со сравнительно малой скоростью.

Причиной разрушения в обоих случаях являются нормальные растягивающие напряжения, которые, достигнув значения теоретической прочности, соответствующей силе связи между атомами, приводят к разделению образца на отдельные части.

В зависимости от условий нагружения один и тот же материал может обнаружить склонность к хрупкому или вязкому разрушению.

Разрушение материалов происходит в виде процесса распространения трещины, который протекает самопроизвольно, когда длина трещины превышает критическое значение. Скорость распространения трещины не превышает величины $0,38C$, где C – скорость распространения упругих волн (звука) в материале. Установленная опытным путем скорость роста трещин в стали составляет около 1000 м/с. При увеличении длины трещины концентрация напряжений в материале перед трещиной непрерывно повышается. Если эти напряжения недостаточны для образования значительного количества дислокаций, то вся энергия нагружения расходуется на разрушение межатомных связей и образование поверхностей раздела, при этом происходит хрупкое разрушение путем отрыва в чистом виде. Поверхность разрушения в идеально хрупком металле блестящая, так как плоские поверхности граней кристаллов хорошо отражают свет. В реальных металлах концентрация и увеличение напряжений выше предела текучести приводит в движение дислокации и параллельно с развитием трещины происходит процесс пластической деформации металла. Деформация возникает преимущественно впереди трещины, где концентрация напряжений максимальна. Энергия нагружения в этом случае расходуется как на образование новых поверхностей, так и на пластическую деформацию, обусловленную перемещением дислокаций. При вязком разрушении трещина растет за счет присоединения дислокаций, что создает мелкодисперсный матовый рельеф поверхности излома.

Интенсивность возникновения и развития дислокаций, а также связанная с ней степень развития пластического деформирования перед трещиной, зависят от скорости распространения трещины и температуры материала. Установлено, что скорость распространения трещины примерно на два порядка выше скорости зарождения и развития дислокаций. В связи с этим при динамическом нагружении образца рост трещины опережает развитие пластических деформаций, что приводит к хрупкому разрушению.

Металлы, имеющие кубическую объемно–центрированную и гексагональную плотноупакованную кристаллическую решетку, обнаруживают свойство быстрого увеличения предела текучести с понижением температуры. Это связано со снижением интенсивности развития дислокаций. Отсюда следует, что с понижением температуры склонность металлов к хрупкому разрушению возрастает и наоборот. Влияние температуры на прочностные характеристики металлов при динамическом нагружении используется для определения порога хладноломкости – диапазона температуры, в котором происходит резкое снижение ударной вязкости вследствие изменения характера разрушения от пластического к хрупкому.

6.3 Динамические испытания на ударный изгиб образцов с надрезом

6.3.1 Образцы для динамических испытаний на ударный изгиб

Результаты динамических испытаний существенно зависят от формы и размеров образцов. Для получения сравнимых характеристик различных материалов необходима стандартизация условий проведения испытаний, формы и размеров используемых образцов материалов. Условия испытаний на ударный изгиб установлены стандартом ГОСТ 9454–78. Образцы для испытаний имеют форму стержня длиной 55 мм с квадратным сечением 10x10 мм. Допускается использование образцов той же длины с высотой сечения 8 и 11 мм и шириной 7,5; 5 или 2 мм, а также образцов длиной 140 мм сечением 25x25 мм.

Посередине длины на образце наносится концентратор напряжения в виде надреза, имеющего стандартные размеры и форму. Стандартом установлены три вида концентраторов:

– концентратор вида U – надрез, имеющий ширину 2 мм, глубину от 2 до 5 мм и радиус закругления дна 1 мм;

– концентратор вида V – надрез с углом 45° между стенками, имеющий и радиус закругления дна 0,25 мм;

– концентратор вида T (трещина) – надрез с углом 45° между стенками, имеющий глубиной 1,5 или 3,5 мм, радиус закругления дна 0,1 мм, и усталостную трещину глубиной 1,5 мм от дна надреза.

Образцы с U -образным концентратором рекомендуется применять при выборе и приемо-сдаточных испытаниях металлов и сплавов.

Образцы с V -образным концентратором являются основными для контроля металлов и сплавов, применяемых в ответственных конструкциях (летательные аппараты, транспортные средства, грузоподъемные машины, трубопроводы, сосуды давления).

Образцы с концентратором вида T предназначены для испытания материалов, работающих в особо ответственных конструкциях, где сопротивление развитию трещины имеет первостепенное значение (бронированные машины, орудийные стволы), а также при исследовании причин разрушения ответственных конструкций.

6.3.2 Схема испытания на ударный изгиб

Испытания на ударный изгиб выполняются на маятниковых копрах с максимальной энергией до 300 Дж. Схема испытания приведена на рисунке 6.1. Образец устанавливается горизонтально на опорах таким образом, чтобы надрез располагался строго в середине между опорами и был направлен вертикально. При испытании образцов длиной 55 мм расстояние между опорами должно быть 40 мм. Удар по образцу наносится маятником со стороны, противоположной надрезу. Нож маятника имеет форму клина с углом 30 градусов и радиусом закругления вершины 2 мм.

При проведении испытаний маятник устанавливается в верхнее исходное положение и удерживается фиксатором. Угол отклонения маятника определяется по круговой шкале. В исходном положении маятник имеет потенциальную энергию E , Дж, вычисляемую по формуле

$$E = m \cdot g \cdot H = m \cdot g \cdot [R + R \cdot \sin(\alpha - 90)], \quad (6.1)$$

где m – масса маятника, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

H – высота подъема маятника в исходном положении, м;

R – радиус маятника – расстояние от оси качания до центра массы, м;

α – угол исходного отклонения, градус.

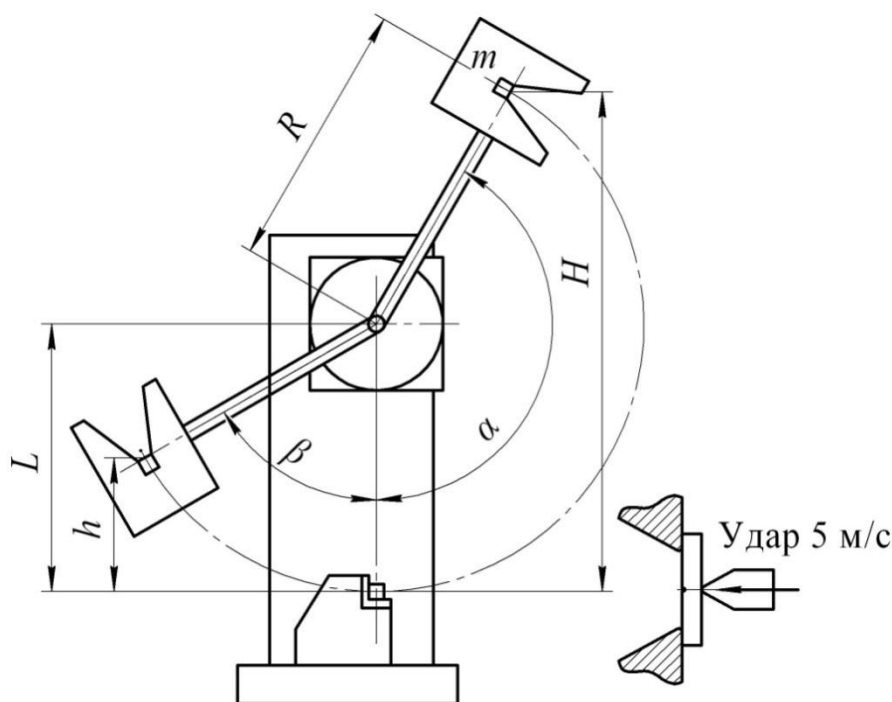


Рисунок 6.1 – Схема испытания на ударный изгиб

Максимальная энергия маятникового копра модели ИО 5003-0,3 при угле исходного отклонения маятника 150 градусов равна 300 Дж.

При отключении фиксатора маятник под действием силы тяжести с ускорением поворачивается вокруг оси и наносит удар по образцу. Образец деформируется и разрушается, а маятник продолжает двигаться по инерции и поднимается на некоторую высоту h , соответствующую углу остаточного отклонения β . Скорость маятника V , м/с, в момент удара по образцу зависит от высоты подъема H и может быть вычислена по формуле

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} . \quad (6.2)$$

Стандартное значение скорости маятника в момент удара равно $(5 \pm 0,5)$ м/с. Это условие обеспечивается постоянной заданной величиной высоты подъема H и угла исходного отклонения маятника α . Для изменения потенциальной энергии маятника необходимо изменить его массу путем установки или снятия специальных накладок.

Величина работы K , Дж, затраченной на деформацию и разрушение образца, равна разности между начальной потенциальной энергией маятника и остаточной энергией, которую маятник приобретает при подъеме на высоту h при движении по инерции:

$$K = m \cdot g \cdot (H - h) = m \cdot g \cdot R \cdot [\cos(\beta) - \cos(\alpha)]. \quad (6.3)$$

Маятниковый копер снабжен круговой шкалой, проградуированной в единицах работы (в Джоулях), затраченной на деформацию и разрушение испытываемого образца, и стрелкой, фиксирующей угол остаточного отклонения маятника. Если в результате испытаний образец не будет разрушен, то маятник остановится в нижнем положении, стрелка будет указывать на деление 300 Дж по круговой шкале. Это будет означать, что произошло полное поглощение энергии удара образцом. При отсутствии образца работа разрушения будет равна нулю, угол остаточного отклонения маятника будет равен исходному (150°), а стрелка остановится на нулевом делении круговой шкалы.

Ударная вязкость материала образца K_C , Дж/см², вычисляется по формуле

$$K_C = \frac{K}{S}, \quad (6.4)$$

где K – работа разрушения, Дж;

S – площадь сечения образца в месте надреза, см².

Стандартом установлены следующие условные обозначения ударной вязкости в зависимости от вида концентратора напряжений:

– $K_C U$ – для образца с концентратором вида U ;

- *KCV* – для образца с концентратором вида V;
- *KCT* – для образца с концентратором вида T.

6.4 Устройство маятникового копра модели ИО 5003-0,3

Копер маятниковый ИО 5003-0,3 (рисунок 6.2) предназначен для испытания образцов из металлов и сплавов на двухопорный ударный изгиб и определения ударной вязкости в соответствии с ГОСТ 9454–78.

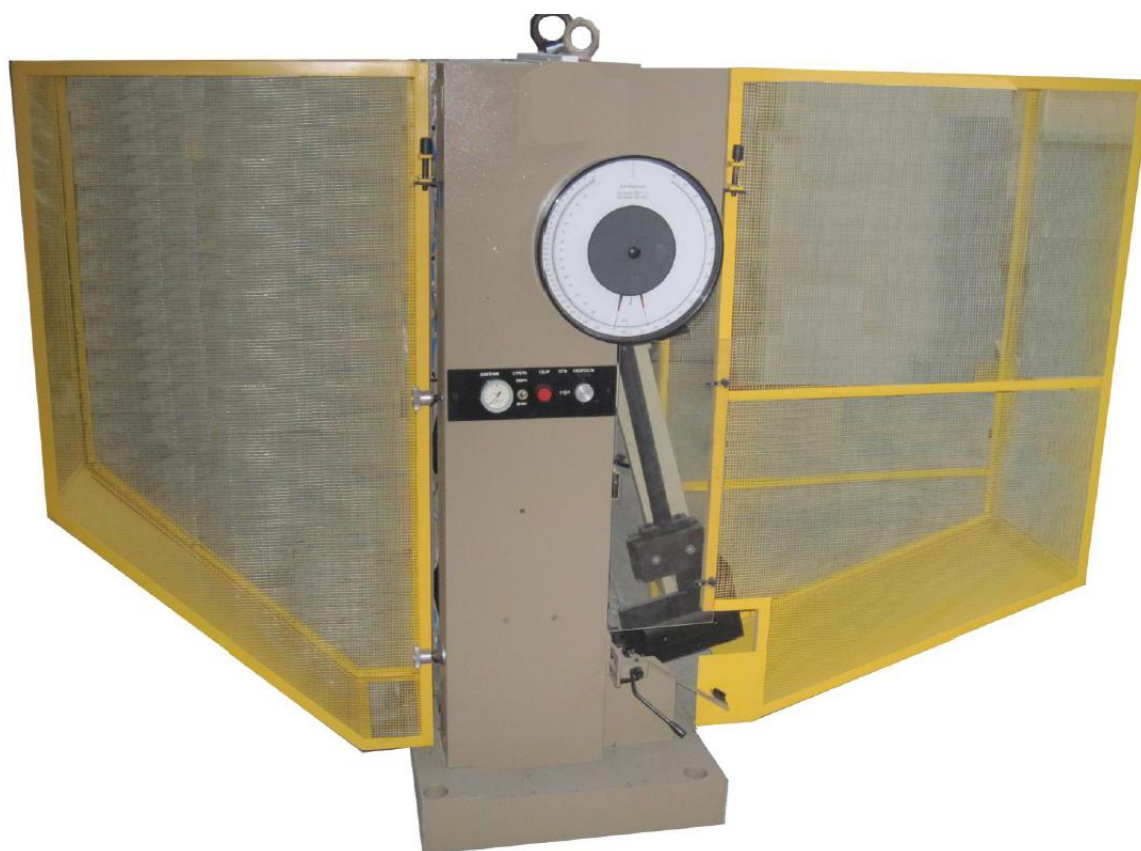


Рисунок 6.2 – Маятниковый копер модели ИО 5003-0,3

Номинальные значения запаса потенциальной энергии маятника устанавливаются за счет изменения массы и составляют 150, 200, 250 и 300 Дж. Скорость движения маятника в момент удара равна $(5 \pm 0,5)$ м/с. Расстояние между опорами для установки образцов регулируется в пределах от 30 до 120 мм. Копер имеет устройство автоматического подъема маятника после разрушения образца, состоящее из стрелы и пневмоцилиндра. Для определения работы разрушения образца ко-

пер снабжен двумя отсчетными устройствами: аналоговым и цифровым. Аналоговое отсчетное устройство имеет круговую шкалу с ценой деления 1 Дж и стрелку, фиксирующую положение маятника в конце хода. Цифровое отсчетное устройство состоит из датчика угла поворота маятника и цифрового индикатора. Дискретность цифрового отсчетного устройства равна 0,6 Дж.

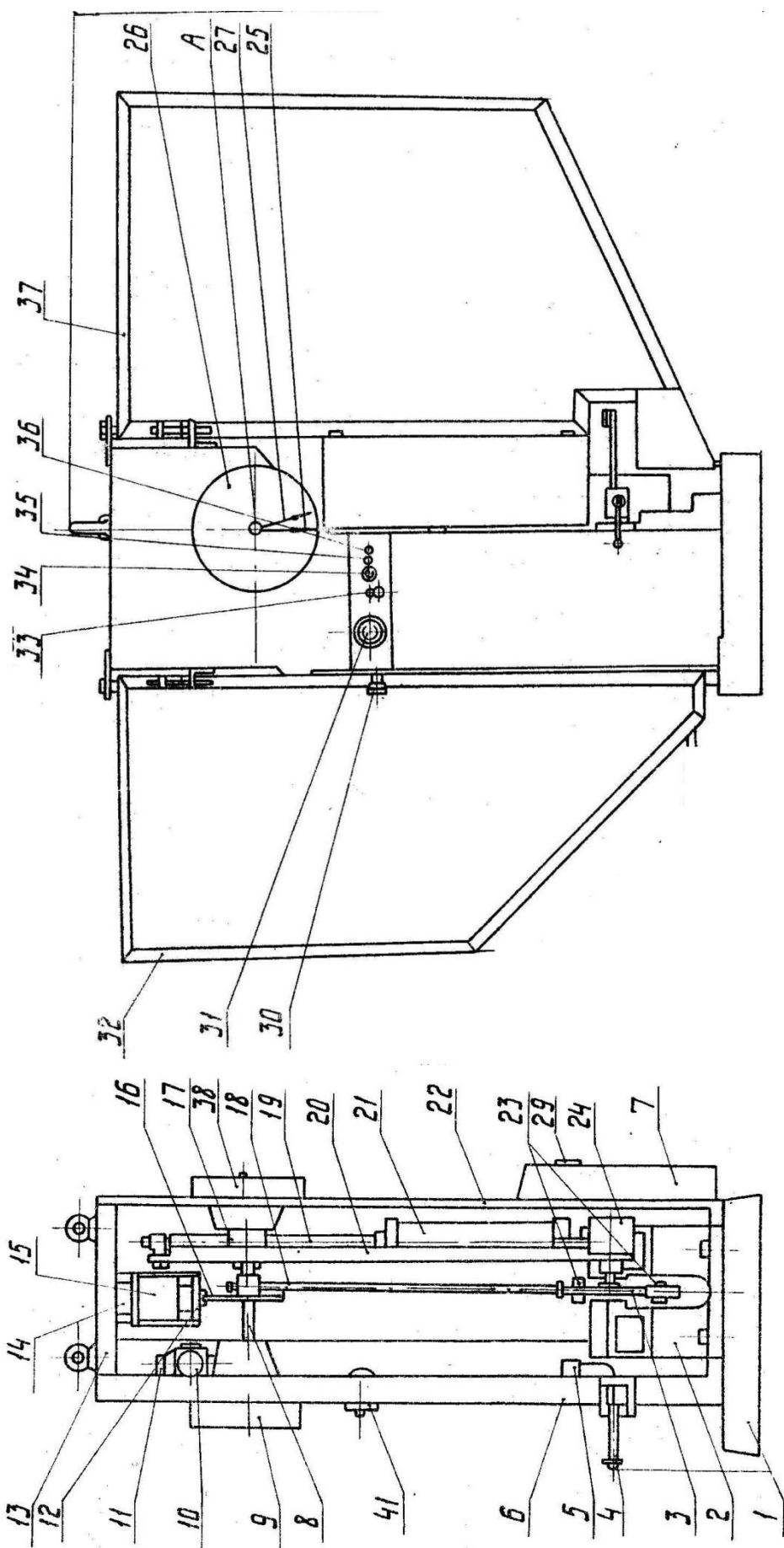
Устройство маятникового копра представлено на рисунке 6.3. Корпус маятникового копра состоит из массивной чугунной плиты 1 с закрепленными на ней стойками 6 и 22. Сверху стойки стянуты накладкой 13. Во втулках 17, запрессованных в верхней части стоек, находятся подшипники оси 8 маятника 3. Маятник закреплен на оси двумя болтами, защемляющими ось между обоймой штанги 18 и ее съемной крышкой. На маятнике установлены четыре планки 23, предназначенные для изменения массы и соответствующего запаса энергии от 150 до 300 Дж.

На плите 1 закреплена опора 2 с губками для установки образцов. В опоре 2 шарнирно закреплен пневмоцилиндр 21 для автоматического подъема маятника. Шток 19 пневмоцилиндра 21 шарнирно связан со стрелой 20, установленной на втулке 17. На конце стрелы установлен электромагнит 24 с подпружиненным фиксатором. На стреле также установлены микропереключатели для подачи сигналов на отключение электромагнитов тормоза, стрелы и воздухораспределителя.

К накладке 13 прикреплен тормоз 12, состоящий из сварного корпуса, внутри которого закреплен электромагнит 15 с фиксатором для сцепления с храповым колесом 16, насаженным на ось маятника и прикрепленным к штанге 18. Фиксатор электромагнита 15 входит в зацепление с храповым колесом 16 и удерживает маятник при обесточенном электромагните 15.

Образцы устанавливаются на губки опоры 2 с помощью механизма ручной установки 4, закрепленного петлей на левой стойке 6 копра. Это обеспечивает безопасность работы на копре.

Рычаг механизма 4 представляет собой Г-образную планку, на одном конце которой установлены регулируемый упор и штифт для фиксации образцов по надрезу. Рычаг поворачивается вокруг оси в горизонтальной плоскости и имеет возможность совершать движения вверх и вниз.



1 – плита; 2 – опора; 3 – маятник; 4 – рычаг подачи образцов; 5 – фильтр – влагоотделитель; 6 – стойка передняя; 7 – кожух; 8 – ось маятника; 9 – аналоговая отсчетная система; 10 – воздухораспределитель; 11 – маслораспылитель; 12 – тормоз; 13 – накладка. 14 – петля; 15 – электромагнит; 16 – колесо храповое; 17 – втулка правая; 18 – штанга; 19 – шток пневмоцилиндра; 20 – стрела; 21 – пневмоцилиндр; 22 – стойка задняя; 23 – планка; 24 – электромагнит; 25 – контрольная стрелка; 26 – шкала; 27 – рабочая стрелка; 29 – автомат «СЕТЬ»; 30 – регулятор давления; 31 – манометр; 32 – ограждение правое; 33 – тумблер «СТРЕЛА ВВЕРХ – ВНИЗ»; 34 – кнопка «УДАР»; 35 – лампа сигнальная; 36 – дроссель с обратным клапаном; 37 – ограждение левое; 40 – кнопочная станция; 41 – панель управления.

Рисунок 6.3 – Устройство маятникового копра ИО 5003-0,3

Испытуемый образец устанавливают по надрезу на центрирующий штифт, поворачивают рычаг к губкам и после того, как образец упрется в губки, поворачивают рычаг вниз, при этом центрирующий штифт выходит из надреза на образце, после этого отводят рычаг в исходное положение, образец остается установленным на губках.

Копер имеет ограждения 32 и 37 рабочей зоны, представляющие собой каркасы, обтянутые сеткой. Ограждения снабжены электрической блокировкой с микропереключателями. При открытых ограждениях сброс маятника невозможен.

Аналоговое отсчетное устройство 9 закреплено на лицевой стойке копра и содержит шкалу 26, рабочую стрелку 27, закрепленную на оси маятника, и контрольную стрелку 25 с механизмом возврата в исходное положение.

Цифровое отсчетное устройство состоит из связанного с осью маятника фотоэлектрического датчика 38, закрепленного на задней стойке копра и показывающего прибора с цифровыми индикаторами и электрическим разъемом для соединения с цифropечатающим устройством или ЭВМ.

Под кожухом 7 на задней стойке копра расположен блок электроаппаратуры с входным автоматом 29 «СЕТЬ». На передней стойке 6 установлена панель управления (рисунок 6.4), на которой расположены кнопка 34 «УДАР» для спуска маятника, тумблер 33 «СТРЕЛА ВВЕРХ– ВНИЗ» для спуска стрелы с маятником в конце работы и сигнальная лампа 35 готовности копра к работе.



Рисунок 6.4 – Панель управления маятникового копра

Пневмосистема копра питается сжатым воздухом от компрессора с электрическим приводом. При подаче воздуха в пневмосистему копра стрела 20 поднимает маятник 3 на угол зарядки 150° . Образец устанавливают на губки опоры с помощью рычага подачи 4. Нажатием кнопки 34 «УДАР» включаются электромагниты 24, 15 и электромагнит воздухораспределителя 10. Первые два электромагнита освобождают маятник, он приходит в движение и наносит удар по образцу. Воздухораспределитель соединяет верхнюю полость пневмоцилиндра с атмосферой и стрела 20 опускается вслед за маятником 3. Маятник разрушает образец и поднимается на высоту, соответствующую запасу его оставшейся энергии. Контрольная стрелка аналогового устройства при этом останавливается в крайнем положении и показывает на шкале работу разрушения образца. На индикаторы цифрового показывающего прибора также выводится величина затраченной на разрушение образца энергии, отсчитанная фотоэлектрическим датчиком по углу остаточного отклонения маятника.

Достигнув верхней точки отклонения, маятник под действием силы тяжести возвращается назад, проходит мимо стрелы и нажимает на микропереключатели, которые отключают питание электромагнитов. Электромагнит 15 отпускает фиксатор, который при движении маятника вверх скользит по зубьям храповика и поддерживает маятник, остановившийся в крайнем верхнем положении. Электромагнит 24 отпускает фиксатор на стреле, служащий для удержания маятника. При отключении электромагнита воздухораспределителя 10 в верхнюю полость пневмоцилиндра 21 подается сжатый воздух, стрела поворачивается и посредством фиксатора поднимает маятник и удерживает его в исходном положении. В случае падения давления в пневмоцилиндре стрела опустится, а маятник останется в верхнем положении, удерживаемый фиксатором храповика.

После проведения испытаний для опускания маятника тумблер 33 «СТРЕЛА ВВЕРХ–ВНИЗ» переключают в положение «ВНИЗ». При этом срабатывает электромагнит 15, выводящий фиксатор из зацепления с храповиком. После этого поворотом рукоятки регулятора 30, закрепленного на передней стойке копра, снижают давление воздуха в пневмоцилиндре, в результате чего стрела с маятником плавно опускается в нижнее положение.

6.5 Порядок проведения испытаний на маятниковом копре

Подготовленный к лабораторной работе копер настроен на максимальный запас энергии, равный 300 Дж. На маятнике закреплены все входящие в комплект планки.

Перед включением копра органы управления должны находиться в следующих положениях:

- тумблер 33 «СТРЕЛА ВВЕРХ–ВНИЗ» – в положении «ВВЕРХ»;
- рукоятка регулятора давления – в положении, соответствующему нулевому показанию манометра копра;
- ограждения должны быть закрыты.

Маятник должен быть сцеплен со стрелой. Для этого необходимо открыть левое ограждение 37 и отклонить маятник до контакта с фиксатором стрелы, после чего закрыть ограждение.

Испытания проводятся в следующем порядке:

6.5.1 Включить компрессор, подать сжатый воздух в пневмосистему копра и рукояткой 30 регулятора давления установить давление от 0,35 до 0,5 МПа (от 3,5 до 5 кг/см² по манометру). При этом стрела поднимет маятник в исходное положение. Копер готов к проведению испытания.

6.5.2 Включить автомат «СЕТЬ» на блоке электроаппаратуры на задней стойке, при этом загорятся контрольные лампы, включить цифровой показывающий прибор.

6.5.3 Рычагом механизма ручной подачи установить образец на губки опор копра, соблюдая меры предосторожности.

6.5.4 Нажать кнопку «УДАР» на пульте управления, при этом освобожденный маятник нанесет удар, разрушит образец и с помощью стрелы вернется в исходное положение.

6.5.5 Определить величину работы разрушения образца по положению контрольной стрелки аналогового отсчетного устройства и по цифровому прибору, записать показания в отчет.

6.5.6 Вычислить ударную вязкость испытуемого материала делением работы разрушения на площадь поперечного сечения образца.

6.5.7 После возврата маятника в исходное положение установить следующий образец.

6.5.8 Если образец при испытании не разрушился, а маятник остановился между губками опоры, необходимо выполнить следующее:

- регулятором давления 30 сбросить давление воздуха до нуля;
- открыть ограждение и вручную сцепить маятник со стрелой;
- удалить неразрушившийся образец;
- закрыть ограждение;
- установить регулятором 30 рабочее давление воздуха и продолжить работу.

6.5.9 После окончания испытаний необходимо:

- переключить тумблер 33 «СТРЕЛА» в положение «ВНИЗ»;
- снизить давление воздуха регулятором давления 30 до нуля, в результате чего стрела с маятником опустятся в нижнее положение;
- выключить компрессор и закрыть вентиль подачи сжатого воздуха;
- выключить цифровой показывающий прибор и отключить копер от сети автоматом 29 «СЕТЬ».

6.6 Поверка маятниковых копров

Маятниковые копры, как и другое испытательное оборудование, подвергается периодической поверке не реже 1 раза в год. Поверку начинают с внешнего осмотра. Температура воздуха в помещении должна быть (22 ± 8) градусов, относительная влажность не более 80 %. На поверхности копра не должно быть механических и коррозионных повреждений, на шкале должны быть четко нанесены цифры и надписи.

Размеры ножа маятника и опор копра контролируют путем измерения с помощью штангенциркуля, угломера и радиусного шаблона.

Горизонтальность установки опор копра в направлении оси образца проверяют с помощью уровня, отклонение от горизонтальности не должно превышать 0,15 мм на длине 100 мм.

Отклонение от перпендикулярности боковых поверхностей маятника относительно вертикальной и горизонтальной поверхностей опоры определяют поверочной линейкой и угольником. Отклонение от перпендикулярности не должно превышать 0,3 мм на 100 мм.

Расстояние между опорами для образца длиной 55 мм должно быть равным 40 мм с допуском не более 0,5 мм.

Симметричность опорных клиньев относительно ножа маятника в горизонтальном направлении определяют штангенциркулем, измеряя расстояние от боковых поверхностей опорных клиньев до боковых поверхностей ножа. Отклонение от симметричности допускается не более 0,5 мм.

Касание всей поверхности ножа маятника с контрольным образцом размером 10x10 мм определяют щупами. Допускаемое отклонение положения рабочей кромки ножа маятника от вертикальной плоскости должно быть в пределах 0,1 мм.

Для определения отклонения от параллельности боковых поверхностей относительно плоскости его качания используют индикатор, закрепленный на магнитной стойке. Измерительный стержень индикатора при этом устанавливают на боковую поверхность маятника, а маятник перемещают в плоскости качания. Допускаемое отклонение от параллельности составляет не более 0,3 мм на длине 300 мм.

Осевой люфт маятника также определяют индикатором. Для этого индикатор устанавливают таким образом, чтобы его стержень касался оси маятника. Ось маятника перемещают в подшипниках перпендикулярно стойкам копра легким нажатием руки. Допустимая величина осевого люфта не более 0,25 мм.

Проверку технического состояния копра производят на холостом режиме без установки образца. Маятник должен быть надежно закреплен на оси. Стрела должна надежно удерживать маятник фиксатором и плавно подниматься на заданную высоту. Предохранительное устройство с храповым колесом должно прочно запирать спусковое устройство при поднятом маятнике и освобождать его под действием

спускового приспособления. Стрелки отсчетного устройства должны перемещаться без заеданий.

Часть энергии маятника теряется за счет трения в подшипниках оси. Определение потери энергии выполняется без установки образца на опоры. Маятник устанавливают в исходное положение на угол 150 градусов, отпускают его кнопкой «УДАР» и при холостом ходе после взлета отсчитывают значение потери энергии маятника по аналоговой шкале и по цифровому прибору. Показания должны быть близки к нулевым. Потеря энергии не должна превышать 0,5 % от полного запаса энергии маятника.

Высота опор, на которые устанавливается образец, должна быть отрегулирована таким образом, чтобы ось образца находилась на уровне центра массы маятника (рисунок 6.1). Разность между расстоянием L от оси качания маятника до оси образца и радиусом маятника R не должна превышать 1 %.

Размер L от оси маятника до оси образца измеряется линейкой.

Радиус маятника R , м, – расстояние от его оси до центра массы – рассчитывается по формуле

$$R = \frac{g \cdot T^2}{4 \cdot \pi^2}, \quad (6.5)$$

где $g = 9,807 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

T – период колебаний маятника, с;

$\pi = 3,14\dots$

Период колебаний маятника T определяют опытным путем. Маятник освобождают от фиксаторов, отводят от вертикали на небольшой угол (примерно 10 градусов) и отпускают с одновременным включением секундомера. Наблюдать колебания маятника удобно по рабочей стрелке аналогового отсчетного устройства. После того, как маятник совершит некоторое число полных колебаний (от 10 до 30), секундомер останавливают. Период колебаний T вычисляют делением времени по секундомеру на число колебаний. Увеличение числа наблюдаемых колебаний повышает точность определения периода.

6.6 Порядок выполнения лабораторной работы

6.6.1 Изучить особенности процесса деформирования и разрушения металлов под действием динамических нагрузок, обратив внимание на факторы и условия, способствующие преимущественно хрупкому или преимущественно пластическому характеру разрушения.

6.6.2 Ознакомиться с методикой проведения испытаний на ударный изгиб образцов с надрезом и определения ударной вязкости материалов. Зарисовать схему проведения испытаний и эскиз испытываемого образца.

6.6.3 Изучить конструкцию, технические характеристики и принцип действия маятникового копра ИО 5003-0,3. Подготовить копер к проведению испытаний, закрыть ограждения.

6.6.4 Выполнить определение потерь энергии маятника на холостом ходу без установки образца на опоры. Наблюдать работу основных элементов копра, движение рабочей и контрольной стрелок.

6.6.5 После подъема маятника в исходное положение установить испытываемый образец на опоры, нажать кнопку «УДАР», по показаниям отсчетных устройств записать величину работы K , Дж, затраченной на разрушение образца.

Вычислить ударную вязкость KCU , Дж/см², по формуле (6.4). Результаты испытаний записать в отчет.

6.6.6 Отсоединить маятник от фиксаторов стрелы и храпового колеса, обеспечив его свободные колебания. С помощью секундомера определить период колебаний маятника и рассчитать его радиус R по формуле (6.5). Измерить линейкой расстояние L от оси качания маятника до середины образца. Размеры R и L не должны отличаться более чем на 1 %.

6.6.7 Соединить маятник с фиксаторами стрелы. Установить на горизонтальную поверхность плиты 1 (рисунок 6.3) и магнитную индикаторную стойку, подвести ножку индикатора к боковой поверхности маятника в районе нижнего правого угла. Отклонить маятник вверх так, чтобы ножка индикатора оказалась у левого нижнего угла. Определить по индикатору непараллельность боковой поверхности

относительно плоскости качания. Допускаемое отклонение от параллельности не должно превышать 0,3 мм на длине 300 мм.

6.7 Содержание отчета по лабораторной работе

6.7.1 Название лабораторной работы, фамилия студента, номер группы.

6.7.2 Цель лабораторной работы.

6.7.3 Схема динамического испытания на изгиб образцов с надрезом и формула для расчета ударной вязкости материала.

6.7.4 Эскиз образца для определения ударной вязкости методом динамического испытания на изгиб.

6.7.5 Результаты испытания образцов: работа K разрушения образца, расчет ударной вязкости KCU .

6.7.6 Определение периода колебаний маятника, расчет радиуса маятника R , измерение расстояния L от оси качания до середины образца. Сравнение величин R и L .

6.7.6 Результаты измерения непараллельности боковой поверхности маятника и плоскости качания.

6.7.8 Выводы по работе.

6.8 Контрольные вопросы

6.8.1 Чем отличается хрупкое разрушение металлов от вязкого?

6.8.2 При каких условиях нагружения происходит хрупкое и вязкое разрушение материалов?

6.8.3 Какие образцы применяются для динамического испытания на изгиб?

6.8.4 Каким образом определяется ударная вязкость материалов и в каких единицах она выражается?

6.8.5 Что такое порог хладноломкости и каким образом он определяется?

6.8.6 Из каких частей состоит маятниковый копер модели ИО 5003-0,3?

6.8.6 Каким образом определяются потери энергии маятникового копра за половину периода колебания?

6.8.7 Каким образом изменяется запас энергии маятника?

7 Ультразвуковая дефектоскопия в производстве летательных аппаратов

7.1 Цель и задачи лабораторной работы

Одним из направлений повышения надежности агрегатов и конструкций летательных аппаратов является применение контроля качества используемых материалов, полуфабрикатов и выпускаемых изделий в процессе производства. Ультразвуковая дефектоскопия относится к неразрушающим методам обнаружения и идентификации дефектов, что позволяет использовать ее для сплошного контроля деталей и узлов с различными видами соединений.

Характеристики надежности изделий во многом зависят от состояния конструкционных материалов, химического состава, структуры, физических и механических свойств, от наличия и вида внутренних дефектов. Появление дефектов может быть вызвано действием силовых и температурных факторов в технологических процессах изготовления изделий.

Образование производственных технологических дефектов в конструкционных материалах, полуфабрикатах и изделиях может происходить на различных стадиях технологических процессов:

- при кристаллизации и охлаждении металла;
- при холодной и горячей обработке металлов давлением;
- в результате структурных превращений при термической обработке;
- при соединении деталей различными способами сварки и пайки;
- при механической обработке режущими и абразивными инструментами.

Большинство дефектов представляют собой нарушения сплошности и однородности конструкционных материалов, которые характеризуются различной протяженностью и глубиной залегания. К ним относятся неметаллические включения, раковины, пористость, ликвации, заковы и закаты, холодные и горячие трещины, расслоения, дефекты сварных, паяных и клееных соединений. Такие дефекты оказы-

вают существенное влияние на закономерности распространения упругих ультразвуковых волн в контролируемом материале и обнаруживаются по рассеиванию, отражению, снижению интенсивности, амплитуде и другим измеряемым характеристикам возбуждаемых в изделии колебаний.

В зависимости от вида контролируемых изделий и характера обнаруживаемых дефектов в производстве применяются различные методы ультразвуковой дефектоскопии, отличающиеся по частоте и длительности колебаний, по виду возбуждаемых в материале упругих волн, по измеряемым параметрам, по принципу действия используемых дефектоскопов.

Методы ультразвуковой дефектоскопии характеризуются универсальностью, возможностью автоматизации, высокой производительностью, безопасностью. Наряду с универсальными дефектоскопами разработаны ультразвуковые дефектоскопы узкоспециализированного назначения, применяемые для контроля деталей определенной группы, например, лопаток газотурбинных двигателей, деталей шасси самолетов, лопастей воздушных винтов, железнодорожных рельсов. Ультразвуковой контроль может выполняться как в производственных условиях, так и при эксплуатации изделий.

Целью лабораторной работы является изучение и практическое освоение методов ультразвуковой дефектоскопии деталей и полуфабрикатов в производстве летательных аппаратов.

При выполнении лабораторной работы решаются следующие задачи:

- получение знаний об основных принципах обнаружения и идентификации дефектов с помощью ультразвука, о возможностях и применимости ультразвуковой дефектоскопии;
- изучение конструкции, состава и основных характеристик ультразвукового дефектоскопа на примере модели УД2-12;
- приобретение практических навыков по выбору видов пьезоэлектрических искателей и выполнения дефектоскопии в зависимости от вида изделия и типа контролируемых дефектов.

7.2 Методы ультразвуковой дефектоскопии

7.2.1 Общие положения

Ультразвуковая дефектоскопия – комплекс методов неразрушающего контроля, основанных на изучении характера распространения упругих волн ультразвукового диапазона в исследуемом изделии.

В ультразвуковой дефектоскопии используются упругие волны различного вида:

- продольные;
- сдвиговые (поперечные);
- поверхностные;
- изгибные;
- крутильные.

Излучение упругих волн производится в непрерывном или импульсном режимах. Ввод волн в контролируемое изделие осуществляется с помощью пьезоэлектрического преобразователя следующими способами:

- сухим контактным;
- контактным через слой смазки;
- струйным (щелевым);
- иммерсионным.

Бесконтактным способом через воздушный зазор ультразвуковые волны вводятся с помощью электромагнитоакустического искателя, принцип работы которого основан на взаимодействии переменного магнитного тока с наводимыми в поверхностном слое изделия токами Фуко.

Ультразвуковая дефектоскопия позволяет обнаружить различные виды нарушений сплошности и однородности материалов:

- трещины;
- расслоения;
- раковины;

- крупнозернистые зоны;
- дисперсные выделения фаз на границах зерен или внутри зерна.

Перечисленные дефекты приводят к скачкообразному или плавному изменению акустических характеристик материала, к которым относятся:

- скорость распространения ультразвуковых волн;
- коэффициент затухания;
- волновое сопротивление.

Вследствие этого дефекты оказывают влияние на условия распространения ультразвуковых волн. Если поперечный размер дефекта превышает длину используемой для контроля ультразвуковой волны, то в соответствии с законами геометрической акустики волна практически полностью отражается, что приводит к образованию звуковой тени за дефектом.

В зонах материала, характеризующихся неоднородной структурой, увеличивается затухание ультразвуковых волн, и в результате их рассеивания на неоднородностях повышается уровень шумов.

В процессе контроля дефектов анализируются следующие параметры ультразвуковых волн:

- амплитуда;
- фаза;
- частота;
- скорость распространения

Кроме этого исследуется входной импеданс (комплексное сопротивление) колебательной системы, которой является контролируемое изделие.

Благодаря большому числу переменных параметров, которые могут быть использованы в различных сочетаниях, ультразвуковая дефектоскопия является одним из наиболее универсальных методов неразрушающего контроля качества заготовок, полуфабрикатов и изделий в производстве летательных аппаратов.

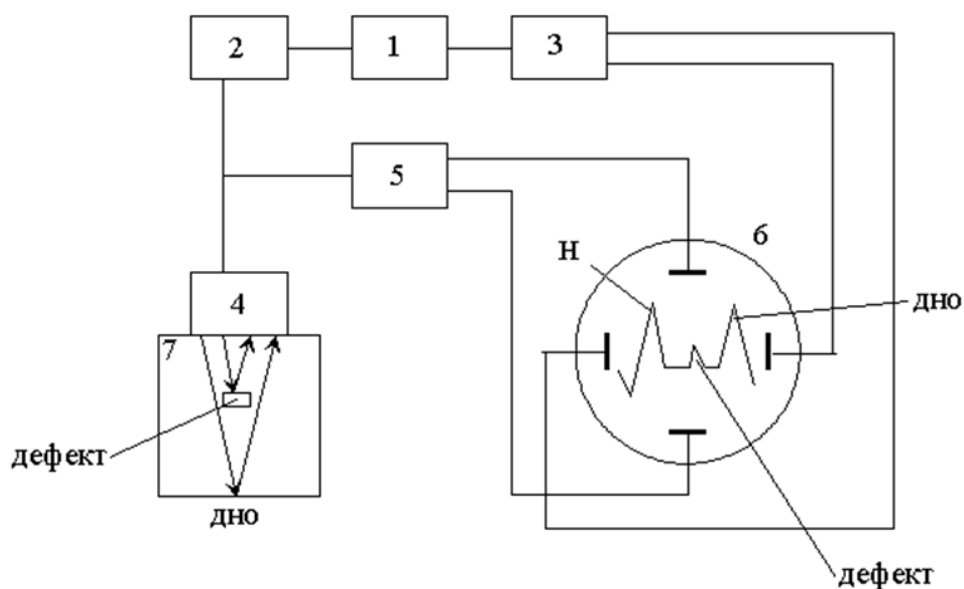
Существует семь основных методов ультразвуковой дефектоскопии, которые в некоторых случаях могут применяться в различных вариантах и комбинациях.

7.2.2 Эхо-метод

Эхо-метод ультразвуковой дефектоскопии заключается в посылке в контролируемое изделие коротких акустических импульсов и регистрации времени приема и интенсивности эхо-сигналов, отраженных от различных дефектов и поверхностей. Длительность импульса составляет около десяти периодов.

Этот метод является универсальным и применяется для решения большого числа задач по обнаружению и идентификации дефектов.

Структурная схема ультразвукового дефектоскопа, реализующего эхо-метод, представлена на рисунке 7.1.



1 – хронизатор; 2 – генератор ультразвуковой частоты; 3 – блок развертки; 4 – искатель; 5 – приемный тракт; 6 – электронно-лучевая трубка; 7 – проверяемое изделие.

Рисунок 7.1 – Структурная схема ультразвукового дефектоскопа

Дефектоскопия по эхо-методу представляет собой ультразвуковую локацию в твердой среде. Генератор 2 создает электрические импульсы с частотой F , задаваемой хронизатором 1. Импульсы подаются в пьезоэлектрический искатель 4 и преобразуются в ультразвуковые колебания. Излучаемые искателем ультразвуковые волны вводятся через поверхность в контролируемое изделие 7 и распространяются в нем. Ультразвуковые волны, отражающиеся от противоположной (донной) по-

верхности изделия, возвращаются к издателю, преобразуются в импульсы электрического напряжения, которые проходят через приемный тракт 5 и наблюдаются на экране электронно-лучевой трубки 6 в виде сигнала «дно».

Управляемая хронизатором 1 развертка 3 дает изображение сигналов в координатах «Время – амплитуда», поэтому расстояние между начальным сигналом «Н» и сигналом «дно» пропорционально толщине изделия в контролируемом сечении. ультразвуковые волны, отражающиеся от дефекта внутри материала, дают на экране эхо-сигнал «дефект» на расстоянии от начального сигнала «Н», пропорциональном глубине залегания дефекта.

Поиск дефектов осуществляется путем перемещения издателя по поверхности контролируемого изделия. Скорость и шаг перемещения выбираются с учетом размера сечения пучка ультразвуковых волн, времени прохождения импульсов от издателя к дну и обратно и минимально необходимого числа принимаемых эхо-сигналов, обеспечивающих обнаружение дефекта.

7.2.3 Конструкции пьезоэлектрических издателей для эхо-метода

Пьезоэлемент издателя в режиме излучения преобразует электрические колебания, вырабатываемые генератором импульсов дефектоскопа в ультразвуковые, а в режиме приема – ультразвуковые колебания в электрические.

Пьезоэлектрические издатели имеют различную конструкцию. Они могут быть прямыми и наклонными, совмещенными и отдельными.

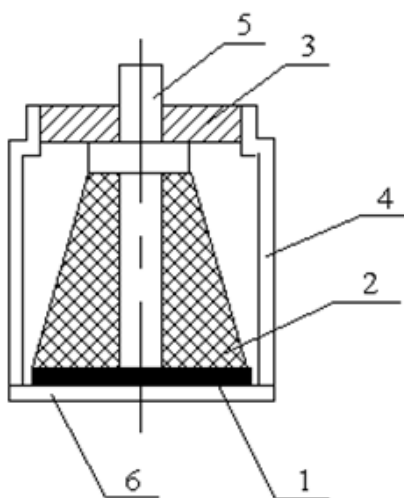
Прямые (нормальные) издатели обеспечивают ввод ультразвуковых волн по нормали к поверхности изделия, наклонные – под различными углами.

При вводе ультразвуковых волн под углом происходит их преломление и трансформация, в результате чего в изделии возбуждаются как продольные, так и поперечные сдвиговые волны, что позволяет обнаруживать поверхностные и глубинные дефекты.

Совмещенный искатель (прямой или наклонный) содержит один пьезоэлемент, который в течение каждого цикла работы поочередно выполняет функции излучателя ультразвука и приемника отраженных сигналов.

Раздельный искатель состоит из двух головок, в одной из которых содержится излучающий пьезоэлемент, а в другой – приемный. Раздельно–совмещенный искатель содержит два пьезоэлемента, размещенных в одной головке.

Наиболее удобен прямой совмещенный искатель, схема которого представлена на рисунке 7.2, но при работе с ним проявляется существенный недостаток эхо-метода – наличие неконтролируемой "мертвой" зоны.



1 – пьезоэлемент; 2 – демпфер; 3 – втулка; 4 – корпус; 5 – контакты; 6 – протектор.

Рисунок 7.2 – Схема прямого совмещенного искателя

Протяженность мертвой зоны l , мм, зависит от длительности излучаемого импульса τ_u , длительности τ_n переходных процессов от излучения к приемному режиму и от скорости звука c в контролируемом материале:

$$l = 1000 \cdot \frac{c \cdot (\tau_u + \tau_n)}{2}, \quad (7.1)$$

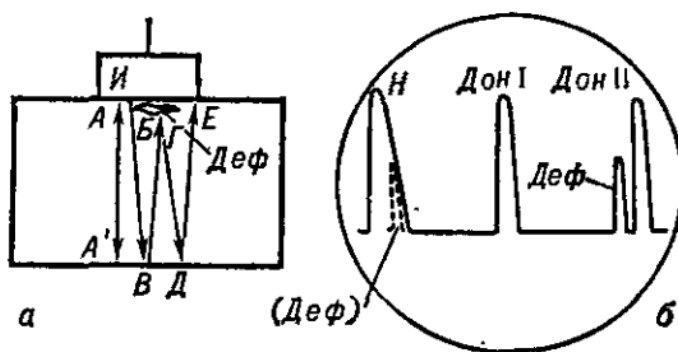
где c – скорость звука в контролируемом материале, м/с;

τ_u – длительность излучаемого импульса, с;

τ_n – длительность переходных процессов, с.

В большинстве случаев протяженность мертвой зоны равна от 6 до 8 мм, но иногда доходит до 20 мм. В пределах мертвой зоны обнаружение дефектов невозможно.

При контроле изделий небольшой толщины с плоскими параллельными противоположными поверхностями для уменьшения мертвой зоны до 2 мм может быть применен зеркальный эхо-метод, в котором приемное устройство регистрирует сигнал, отраженный от поверхности дефекта, обращенной к донной поверхности изделия (рисунок 7.3). Эхо-сигнал образуется в результате отражения донного сигнала. Сигнал от дефекта на экране индикатора наблюдается между первым и вторым донными сигналами.



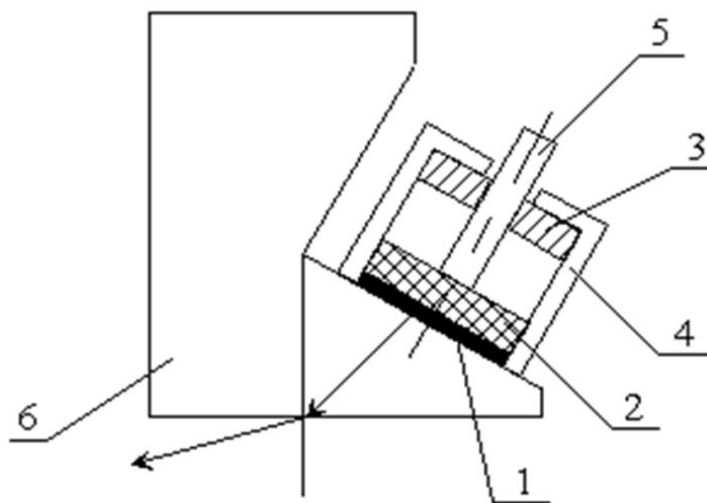
а – схема обнаружения дефекта; б – изображение на экране дефектоскопа.

Рисунок 7.3 – Схема зеркального эхо-метода

На рисунке 7.4 представлена схема наклонного совмещенного искателя. В нем имеется преломляющая призма, изготавливаемая обычно из органического стекла. Скорость распространения продольных ультразвуковых волн в органическом стекле составляет около 2550 м/с, что намного меньше, чем в контролируемых металлах и сплавах (около 6000 м/с). Вследствие этого при направлении ультразвуковых волн в наклонном искателе под углом падения больше 30° происходит полное внутреннее отражение продольных ультразвуковых волн от контактной поверхности призмы, а в изделие вводятся только сдвиговые волны под небольшим углом к поверхности.

Применение сдвиговых волн существенно расширяет возможности контроля поверхностного слоя.

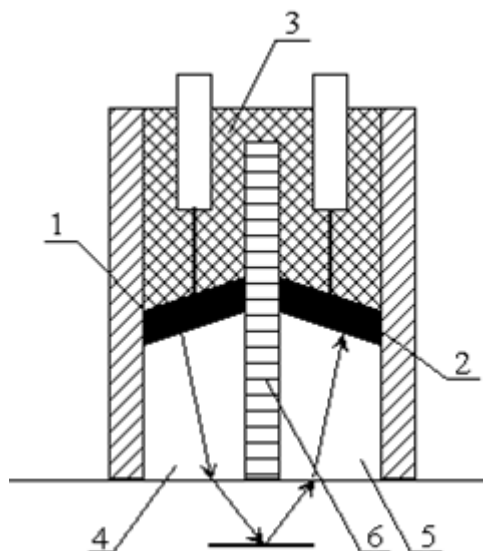
Наклонные совмещенные искатели широко используются при контроле сварных соединений и изделий сложной формы.



1 – пьезоэлемент; 2 – демпфер; 3 – изолирующая втулка; 4 – корпус;
5 – контакты; 6 – преломляющая призма.

Рисунок 7.4 – Схема наклонного совмещенного искателя

Раздельно-совмещенный искатель, схема которого представлена на рисунке 7.5, менее универсален, но имеет малые размеры мертвой зоны.



1 – пьезоэлемент-излучатель; 2 – пьезоэлемент-приемник; 3 – демпфер;
4 и 5 – преломляющие призмы; 6 – акустический экран.

Рисунок 7.5 – Схема раздельно-совмещенного искателя

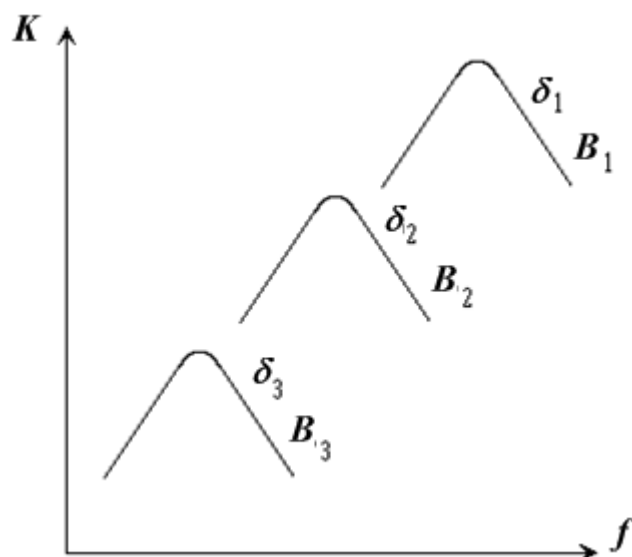
Излучающий и приемный пьезоэлементы раздельно-совмещенного искателя приклеены к поверхностям преломляющих призм из органического стекла, наклоненных под углом около 5° . Вследствие этого в изделие вводятся продольные ультразвуковые волны под значительным углом преломления, что позволяет получить отражение от дефекта, залегающего на малой глубине (до 0,5 мм). Величина мертвой зоны определяется ориентацией осей направления распространения ультразвуковых волн. Максимальная толщина контролируемого изделия при использовании раздельно-совмещенного искателя из-за значительного преломления ультразвуковых волн снижается и не превышает 200 мм.

7.2.4 Чувствительность эхо-метода

Чувствительность эхо-метода определяется с помощью специально изготовленных контрольных образцов с искусственно созданными дефектами, расположенными на заданном расстоянии от места ввода ультразвуковых волн. Чувствительность оценивается эквивалентными размерами этих дефектов.

Показатель чувствительности K зависит от частоты ультразвука, толщины изделия в контролируемом сечении и коэффициента затухания δ ультразвука в материале. Величина показателя чувствительности возрастает с повышением частоты ультразвука, так как при уменьшении отношения длины ультразвуковой волны λ к размеру дефекта d увеличивается доля отраженной от поверхности дефекта энергии звуковой волны и повышается направленность отраженного сигнала. Однако вместе с этим при увеличении частоты возрастает коэффициент затухания и увеличивается уровень структурных шумов в отраженном сигнале, что снижает чувствительность.

В результате одновременного влияния противоположно действующих факторов зависимость чувствительности K от частоты ультразвука f приобретает вид кривой, имеющей максимум. Наивысшая чувствительность K соответствует определенной частоте ультразвука f (рисунок 7.6).



B – толщина контролируемого изделия; δ – коэффициент затухания; K – показатель чувствительности; f – частота ультразвука; $B_1 < B_2 < B_3$; $\delta_1 < \delta_2 < \delta_3$

Рисунок 7.6 – Зависимость чувствительности эхо-метода от частоты ультразвука

В соответствии с рисунком 5 при увеличении толщины B и возрастании коэффициента затухания δ максимум чувствительности смещается в сторону низких частот, и его значение снижается, т.е. чувствительность падает.

Наивысшая чувствительность достигается при контроле деформируемых алюминиевых, магниевых и титановых сплавов. Для этих сплавов при использовании современной аппаратуры для ультразвуковой дефектоскопии в частотном диапазоне от 0,5 до 25 МГц можно выбрать режим, позволяющий достичь теоретической чувствительности, т.е. обнаружить дефект, имеющий размер d , равный половине длины ультразвуковой волны, при толщине изделия до 250 мм. Практически при частоте 10 МГц обнаруживаются дефекты размером 0,3 мм.

Конструкционные стали имеют большой коэффициент затухания, поэтому показатель чувствительности для них ниже. При частоте от 2,5 до 4,0 МГц и толщине изделия до 250 мм обнаруживаются дефекты размером около 1 мм.

При контроле изделий из аустенитных хромоникелевых сталей и жаропрочных никелевых сплавов чувствительность эхо-метода еще более снижается вследствие большего затухания и высокого уровня структурных шумов. Поэтому при контроле изделий из этих материалов толщиной от 100 до 200 мм оптимальная частота

снижается до $(2,5 - 1,0)$ МГц, а показатель чувствительности соответствует диаметру эквивалентного дефекта около 2 мм.

Чувствительность эхо-метода при контроле литых деталей, как правило, ниже по сравнению с контролем изделий, полученных методом пластического деформирования из тех же материалов.

7.2.5 Применение эхо-метода

Эхо-метод ультразвуковой дефектоскопии применяется для контроля слитков, фасонных отливок, поковок, штамповок, листового и фасонного проката, труб, прутков, рельсов, проволоки, а также сварных, клееных, заклепочных и паяных соединений. При этом обнаруживаются поверхностные и внутренние дефекты в заготовках и изделиях различной формы и размеров из металлических и неметаллических материалов.

Эхо-методом обнаруживаются зарождающиеся с поверхности усталостные трещины, зоны коррозионного разрушения и расположенные в объеме изделия расслоения, шлаковые включения, нарушения однородности кристаллического строения и другие дефекты.

Эхо-метод применяется для измерения толщины изделий, имеющих гладкие плоские параллельные поверхности. Точность измерения толщины достаточно высокая – до сотых долей миллиметра.

7.2.6 Теневой метод

Теневой метод ультразвуковой дефектоскопии заключается в том, что ультразвуковые волны вводятся в изделие с одной стороны, а принимаются с другой. О наличии дефекта судят либо по уменьшению интенсивности ультразвука в зоне звуковой тени, образуемой дефектом, либо по изменению фазы или времени приема волны, огибающей дефект и прошедшей более длинный путь.

Теневой метод уступает эхо-методу по чувствительности и универсальности и применяется для контроля изделий простой формы и небольших сечений. Чувствительность теневого метода возрастает с повышением частоты f ультразвука и падает с увеличением коэффициента затухания δ и повышением уровня структурных шумов.

Преимуществом теневого метода является отсутствие мертвой зоны и возможность автоматизации процесса контроля. Теневой метод целесообразно применять для контроля изделий небольшой толщины до 30 мм, когда необходимо проконтролировать наличие дефектов по всей толщине, в том числе и в приповерхностных слоях, не контролируемых эхо-методом.

Существенным ограничением теневого метода является необходимость двустороннего доступа к изделию. Этот недостаток отсутствует в зеркально-теневом методе, осуществляемом при одностороннем доступе.

В зеркально-теневом методе наличие дефектов определяется по уменьшению амплитуды донного отраженного сигнала. При этом ультразвуковые волны вводятся в изделие не в непрерывном режиме, а в импульсном. Дефект вызывает образование звуковой тени как от прямого сигнала, так и от отраженного, что приводит к снижению интенсивности отраженного сигнала и позволяет регистрировать наличие дефектов.

7.2.7 Резонансный метод

Резонансный метод ультразвуковой дефектоскопии предназначен для измерения толщины изделий из металлов, стекла, керамики и других материалов при одностороннем доступе к контролируемой поверхности, а также может быть применен для обнаружения зон коррозионного повреждения на недоступных поверхностях, расслоений в листовом металле.

Резонансный метод контроля толщины реализуется следующим образом. Генератор с пьезоэлектрическим преобразователем излучает в изделие ультразвуковые

волны с непрерывно меняющейся частотой. В моменты, когда по толщине измеряемого сечения укладывается целое число полуволн, возникает резонанс, происходит совпадение частоты возмущающих ультразвуковых колебаний с частотой собственных колебаний системы и образуются стоячие волны. При этом амплитуда упругих в изделии резко возрастает, что отмечается на экране прибора в виде ряда резонансных пиков. Каждой точке на линии развертки на экране соответствует определенная частота ультразвуковых колебаний, поэтому шкала экрана градуируется в мегагерцах или в миллиметрах. По расстоянию от начала развертки до соответствующего резонансного пика определяется толщина изделия. При этом следует учитывать, что одной толщине материала соответствует несколько резонансных пиков на разных гармониках. Поэтому примерная толщина изделия должна быть известна заранее. Если отсчет производится по резонансному пику, соответствующему основной частоте, то толщина B , мм, измеряемого изделия будет равна:

$$B = \frac{\lambda}{2} = \frac{10^3 \cdot c}{2 \cdot f}, \quad (7.2)$$

где λ – длина ультразвуковой волны, мм;

f – частота колебаний, соответствующая резонансу, Гц;

c – скорость распространения упругих колебаний в контролируемом материале (скорость звука), м/с.

В промышленности применяются резонансные ультразвуковые толщиномеры двух типов. Первый тип – измерительные толщиномеры, применяющиеся для измерения толщины в отдельных точках контролируемого изделия. Эти толщиномеры обеспечивают девиацию (изменение) частоты ультразвуковых колебаний в широких пределах, что позволяет определять толщину, примерная величина которой заранее неизвестна.

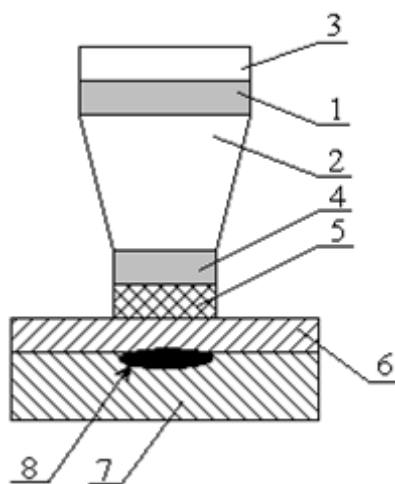
Толщиномеры второго типа – контрольные – встраиваются в технологическое оборудование и применяются для непрерывного контроля толщины выпускаемых изделий, например, листов, труб и другого проката. Толщина стенки при этом из-

вестна заранее, поэтому девиация частоты производится в узком диапазоне, что повышает чувствительность и точность измерений. Погрешность измерения толщины составляет $\pm 1\%$ при производительности до 1000 замеров в секунду.

7.2.8 Импедансный метод

Импеданс – полное механическое сопротивление контролируемого изделия – зависит от качества соединения между собой отдельных его элементов. Это свойство механических систем лежит в основе импедансного метода ультразвуковой дефектоскопии.

Схема реализации импедансного метода представлена на рисунке 7.7.



1 – излучающий пьезоэлемент; 2 – звукопроводящий стержень; 3 – отражающая масса; 4 – динамометрический пьезоэлемент; 5 – контактный наконечник; 6 – обшивка; 7 – подложка; 8 – дефект.

Рисунок 7.7 – Схема контроля клеевого соединения импедансным методом

Датчик импедансного дефектоскопа содержит излучающий пьезоэлемент 1, работающий на частоте от 1,0 до 8,0 МГц. Пьезоэлемент 1 приклеен одной стороной к основанию конического звукопроводящего стержня 2 из оргстекла, а другой стороной – к стальному цилиндру 3, который служит отражателем ультразвуковых волн. На меньшем основании звукопроводящего стержня приклеен динамометриче-

ский пьезоэлемент 4, закрытый контактным наконечником 5 из износостойкого материала.

Если датчик не прижат к поверхности изделия, то сигнал, снимаемый с динамометрического пьезоэлемента равен нулю, так как он колеблется вместе со стержнем 2, не деформируясь. При прижмем датчика к контролируемому изделию возникают силы реакции, деформирующие динамометрический элемент, сигнал с которого подается на индикатор и измерительную часть прибора. Если в контролируемой зоне обшивка 6 жестко соединена с подложкой, то входной импеданс системы будет большим и соответственно снимаемое с динамометрического пьезоэлемента 4 напряжение будет иметь максимальное значение.

При наличии дефекта в соединении обшивки с подложкой участок обшивки будет колебаться отдельно. Поскольку жесткость обшивки меньше, чем подложки, входной импеданс будет ниже, и сигнал с динамометрического пьезоэлемента уменьшится.

Таким образом, по уменьшению амплитуды сигнала можно судить о наличии дефекта соединения.

Импедансный метод применяется для контроля клееных и паяных конструкций с металлическими и неметаллическими обшивками, в том числе трехслойных панелей с легкими заполнителями, а также для обнаружения расслоений в слоистых композиционных материалах, пластинах, плакированных листах и трубах. Чувствительность импедансного метода позволяет обнаруживать дефекты диаметром около 5 мм.

7.2.9 Акустико-топографический метод

Акустико-топографический метод основан на визуализации картины колебаний поверхности контролируемого изделия. На поверхность изделия наносят тонкодисперсный порошок. Мощным ультразвуковым излучателем в изделии возбуждаются изгибные колебания с заданной или непрерывно меняющейся частотой. При

этом частицы порошка постепенно смещаются к узлам колебаний, соответствующих точкам поверхности с минимальной амплитудой. В результате на поверхности изделия возникает картина распределения узловых линий, так называемые фигуры Хладни. Для бездефектного изотропного материала эта картина получается четкой и непрерывной. При наличии дефекта в материале происходит изменение картины колебаний. В месте наличия включений и на участках с анизотропными механическими свойствами узловые линии искажаются, при расслоении материала узловые линии прерываются.

Если акустико-топографический контроль осуществляется при непрерывном изменении частоты, то в момент резонанса амплитуда дефектной зоны резко возрастает и частицы порошка смещаются к ее границам, с высокой точностью покрывая контуры дефекта.

Акустико-топографическая дефектоскопия выполняется при частоте колебаний от 30 до 200 кГц. Акустико-топографический метод обладает высокой чувствительностью. Например, в многослойной конструкции с толщиной верхнего листа 0,25 мм обнаруживаются дефекты размером до 1 мм. Мертвая зона отсутствует, сканирование не требуется, излучатель ультразвуковых колебаний прижимается к поверхности изделия в одной точке.

7.3 Ультразвуковой дефектоскоп УД2-12

7.3.1 Назначение и условия применения дефектоскопа УД2-12

Дефектоскоп ультразвуковой УД2-12 предназначен для обнаружения дефектов типа нарушения сплошности и однородности материалов полуфабрикатов, готовых изделий, сварных соединений, а также для измерения глубины и координат их залегания, измерения отношений амплитуд сигналов от дефектов.

Дефектоскоп УД2-12 относится к ручным переносным дефектоскопам общего назначения и работает на ультразвуковых частотах 1,25; 1,8; 2,5; 5,0 и 10,0 МГц.

Дефектоскоп УД2-12 позволяет контролировать материалы и изделия, скорость распространения продольных ультразвуковых колебаний в которых находится в диапазоне от 2240 до 6700 м/с. Допустимое значение затухания продольных ультразвуковых колебаний в материалах не должно превышать 3,9 дБ/см на частоте 2,5 МГц. Высота неровностей R_z шероховатости поверхности не должна превышать 250 мкм, радиус кривизны поверхности должен быть более 100 мм.

Диапазон толщины контролируемых изделий из стали составляет от 1 до 999 мм при измерении по цифровому индикатору и от 1 до 5000 мм по экрану электронно-лучевой трубки дефектоскопа.

Дефектоскоп УД2-12 применим в условиях машиностроительных и металлургических предприятий, на железнодорожном и трубопроводном транспорте, в энергетике для контроля изделий основного производства и технологического оборудования.

С помощью дефектоскопа УД2-12 реализуются эхо-метод, теневой и зеркально-теневой методы контроля и обнаружения дефектов.

Электронный блок дефектоскопа позволяет встраивать его в установки механизированного контроля, выполнять автоматизированную обработку результатов измерений, производить настройку и диагностику технического состояния дефектоскопа с элементами самопроверки.

Дефектоскоп сохраняет работоспособность при температуре окружающего воздуха от минус 10 до плюс 50 °С и влажности до 98 % (при температуре 35 °С).

Дефектоскоп укомплектован набором ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) следующих типов:

- тип П111 – контактные прямые совмещенные преобразователи;
- тип П112 – контактные прямые раздельно-совмещенные преобразователи;
- тип П121 – контактные наклонные совмещенные преобразователи.

Основные характеристики пьезоэлектрических преобразователей представлены в таблицах 7.1 и 7.2.

Таблица 7.1 – Технические характеристики ультразвуковых прямых пьезоэлектрических преобразователей типов П111 и П112

Условное обозначение пьезоэлектрического преобразователя	Диаметр отражателей, мм	Номинальная частота, МГц	Диапазон зоны контроля по дальности, мм	
			H_{\min} (мертвая зона)	H_{\max}
П111-1,25-К20-002	3,2	1,25	15	180
П111-2,5-К12-002	1,6	2,5	10	180
П111-2,5-К20-002	1,6	2,5	25	400
П111-5,0-К6-002	1,2	5,0	5	70
П111-5,0-К12-002	1,2	5,0	15	200
П111-10,0-К4-002	1,0	10,0	5	30
П112-2,5-12-002	1,6	2,5	2	30
П112-5,0-3x4-002	1,2	5,0	1	25

Таблица 7.2 – Технические характеристики ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей типа П121

Условное обозначение пьезоэлектрического преобразователя	Диаметр отражателя, мм	Номин. частота, МГц	Угол ввода, град.	Диапазон зоны контроля по дальности, мм	
				Y_{\min}	Y_{\max}
П121-1,25-40°-002	2,0	1,25	40	5	50
П121-1,25-50°-002	2,0	1,25	50	5	50
П121-1,25-65°-002	2,0	1,25	65	5	45
П121-1,8-40°-002	2,0	1,8	40	5	50
П121-1,8-50°-002	2,0	1,8	50	5	50
П121-1,8-65°-002	2,0	1,8	65	5	45
П121-2,5-40°-002	2,0	2,5	40	5	50
П121-2,5-50°-002	2,0	2,5	50	5	50
П121-2,5-65°-002	2,0	2,5	65	5	40
П121-5,0-50°-002	1,6	5,0	50	2	40
П121-5,0-65°-002	1,6	5,0	65	2	40
П121-5,0-70°-002	2,0	5,0	70	5	15

7.3.2 Состав дефектоскопа

В дефектоскоп входят следующие составные части:

- 1) выпрямитель;
- 2) стабилизатор напряжения;
- 3) преобразователь напряжения;
- 4) блок электронно-лучевой трубки;
- 5) блок развертки;
- 6) генератор импульсов возбуждения;
- 7) блок автоматической сигнализации дефектов;
- 8) устройство приемное;
- 9) измеритель отношений;
- 10) блок цифрового отсчета;
- 11) комплект пьезоэлектрических ультразвуковых преобразователей.

7.3.3 Режимы работы дефектоскопа

В основу работы дефектоскопа положена способность ультразвука распространяться в контролируемых материалах и отражаться от внутренних дефектов и граней изделий. При этом глубина залегания дефекта H , мм, определяется по формуле

$$H = \frac{10^3 \cdot c \cdot t}{2}, \quad (7.3)$$

где c – скорость ультразвука в материале, м/с;

t – время прохождения ультразвуковых колебаний от точки входа до дефекта и обратно, с.

Дефектоскоп реализует эхо-метод, теневой и зеркально-теневой методы. Дефектоскоп может работать в следующих режимах:

- 1) режим «*dB*» – измерение отношения входных амплитуд сигналов в децибелах;
- 2) режим «*mm H*» – измерение глубины залегания дефекта в миллиметрах при работе с совмещенным и раздельно-совмещенным пьезоэлектрическим преобразователем;
- 3) режим «*mm X*» – измерение *X*-координаты дефекта в миллиметрах при работе с наклонным пьезоэлектрическим преобразователем;
- 4) режим «*mm Y*» – измерение *Y*-координаты (глубина залегания) дефекта в миллиметрах при работе с наклонным пьезоэлектрическим преобразователем;
- 5) режим «*μs*» – измерение временного интервала электрических импульсов;
- 6) дежурный режим.

7.3.4 Органы управления и настройки дефектоскопа

Основные органы управления и настройки дефектоскопа расположены на передней, верхней и задней панелях прибора (рисунки 7.8, 7.9).



Рисунок 7.8 – Передняя панель дефектоскопа

На передней панели (рисунок 7.8) расположены:

1 – кнопка «Работа» для включения дефектоскопа при предварительно включенном нагреве катода электронно-лучевой трубки;

2 – кнопка «Накал», включающая нагрев катода электронно-лучевой трубки;

3 – сенсорный переключатель режима отсчета, при касании контакта переключателя пальцем оператора в течение одной-двух секунд происходит включение соответствующего режима отсчета;

4 – кнопки аттенюатора, нажатием кнопок вводится кратное ослабление входного сигнала;

5 – ручка для стробирования сигнала на экране электронно-лучевой трубки (выбора временного интервала на развертке для наблюдения, контроля или последующей обработки);

6 – экран электронно-лучевой трубки для наблюдения сигналов от пьезоэлектрического преобразователя (искателя);

7 – цифровой индикатор для наблюдения числового значения измеряемой величины;

8 – индикатор автоматической сигнализации дефектов (АСД);

9 – выходной разъем дефектоскопа для подключения пьезоэлектрического преобразователя;

10 – входной разъем дефектоскопа для подключения пьезоэлектрического преобразователя.

Верхняя панель дефектоскопа состоит из блоков А5, А6, А7, А8, А9 и А10, на которых размещены органы настройки для подготовки дефектоскопа к работе. На верхней панели расположены (рисунок 7.9):

1 – десятиоборотные ручки для калибровки дефектоскопа в режиме измерения глубины залегания дефекта H и координат X и Y ;

2 – регуляторы яркости, фокусировки, астигматизма луча электронно-лучевой трубки, смещения линии развертки по горизонтали и вертикали;

3 – ручка установки нуля глубиномера;

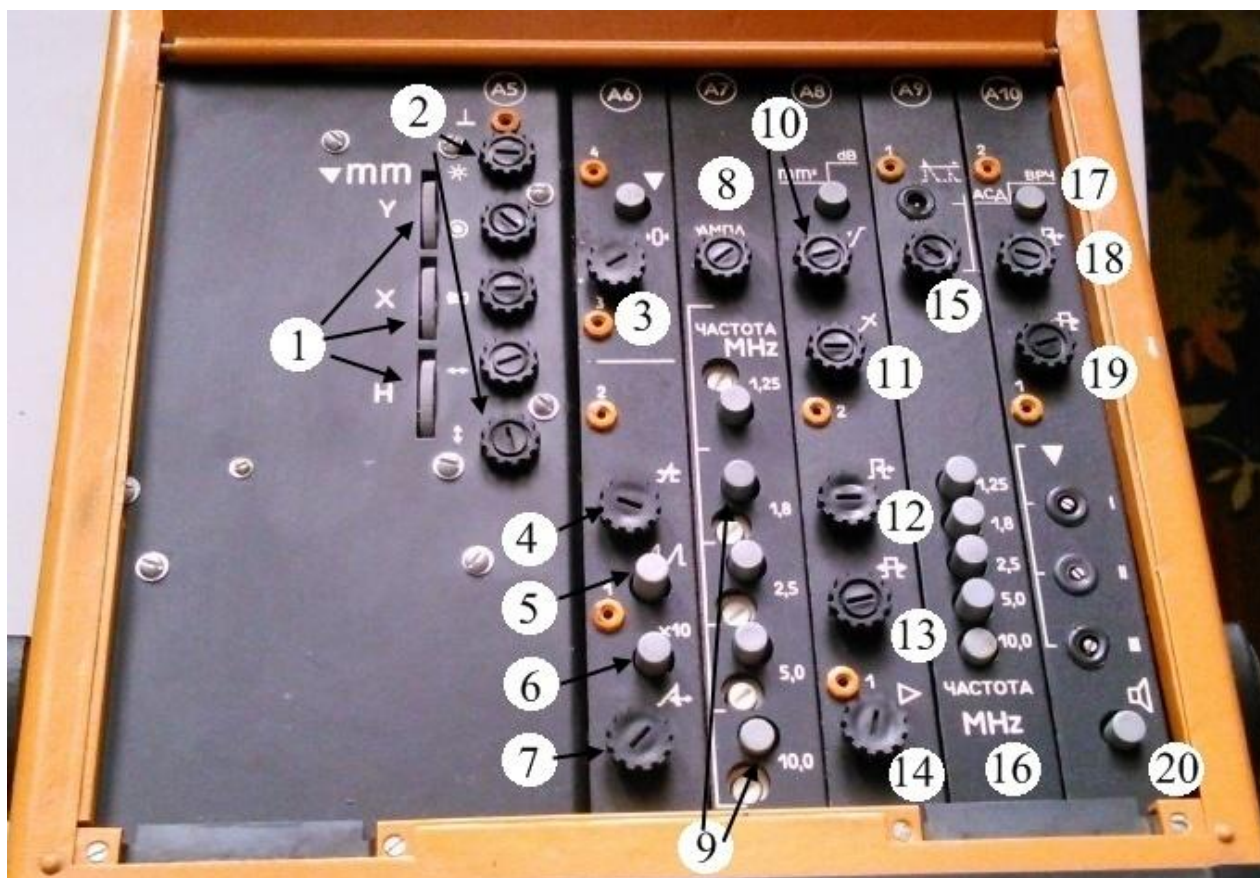


Рисунок 7.9 – Верхняя панель управления дефектоскопа

4 – ручка для установки задержки развертки, в крайнем левом положении задержка развертки максимальна, ручка имеет грубую и точную установку;

5 – кнопка включения второй развертки;

6 – кнопка увеличения длительности развертки в 10 раз;

7 – ручка для установки длительности развертки, в крайнем левом положении длительность развертки минимальная, ручка имеет грубую и точную установку;

8 – ручка «Ампл» для регулировки амплитуды ультразвукового импульса, в крайнем правом положении амплитуда максимальная;

9 – кнопки для установки частоты ультразвукового генератора от 1,25 до 10,0 МГц;

10 – ручка для регулировки усиления в середине зоны временной чувствительности (ВРЧ), в крайнем левом положении усиление минимальное;

11 – ручка для регулировки усиления в конце зоны временной чувствительности (ВРЧ), в крайнем левом положении усиление минимальное;

12 – ручка для регулировки длительности зоны ВРЧ, в крайнем левом положении длительность зоны ВРЧ минимальная;

13 – ручка для регулировки длительности задержки зоны ВРЧ, в крайнем левом положении длительность задержки зоны ВРЧ минимальная, ручка имеет грубую и точную установку;

14 – ручка для регулировки усиления приемного устройства, в крайнем левом положении усиление минимальное, ручка имеет грубую и точную установку;

15 – ручка для регулировки амплитуд сигналов, находящихся ниже уровня отсечки, в крайнем левом положении амплитуда сигнала минимальная;

16 – переключатель «Частота МГц» для установки частоты приемного устройства, одна из кнопок переключателя должна быть обязательно нажата;

17 – кнопка для переключения «АСД/ВРЧ», при отпущенной кнопке на вторую развертку выводится кривая ВРЧ, при нажатой выводится строб АСД;

18 – ручка для регулировки длительности строба АСД, в крайнем левом положении длительность строба минимальная;

19 – ручка для регулировки длительности задержки строба АСД, в крайнем левом положении длительность задержки строба минимальная, ручка имеет грубую и точную установку;

20 – кнопка включения звукового сигнализатора дефектов.

Перед включением дефектоскопа необходимо проверить правильность установки держателя плавкого предохранителя на задней стенке дефектоскопа в соответствии с напряжением питающей сети.

При работе с прямыми и наклонными пьезоэлектрическими преобразователями применяются кабели с обозначением Щ04.850.307 или Щ04.850.278-01, с помощью которых преобразователь присоединяется к выходному 9 и входному 10 разъемам дефектоскопа.

Раздельно-совмещенные преобразователи подключаются кабелем Щ04.85.305. При этом разъемы кабеля подключаются к разъемам прибора и преобразователя в соответствии с обозначениями на белых бирках.

7.4 Работа на дефектоскопе УД2-12

7.4.1 Порядок включения дефектоскопа

Дефектоскоп обслуживается одним оператором, прошедшим специальное обучение и ознакомившимся с руководством по эксплуатации. Включение дефектоскопа выполняют в следующей последовательности.

Все независимые кнопки на верхней панели устанавливают в отпущенное положение, а регуляторы, расположенные там же – в крайнее правое положение. Ручку 5 на передней панели устанавливают в крайнее левое положение. Кнопками 9 и 16 на верхней панели устанавливают частоту 2,5 МГц. На задней панели дефектоскопа кнопки «Внеш./внутр.» и «125Hz/500Hz» должны быть нажаты, а кнопка «x2» отпущена (рисунок 7.10).

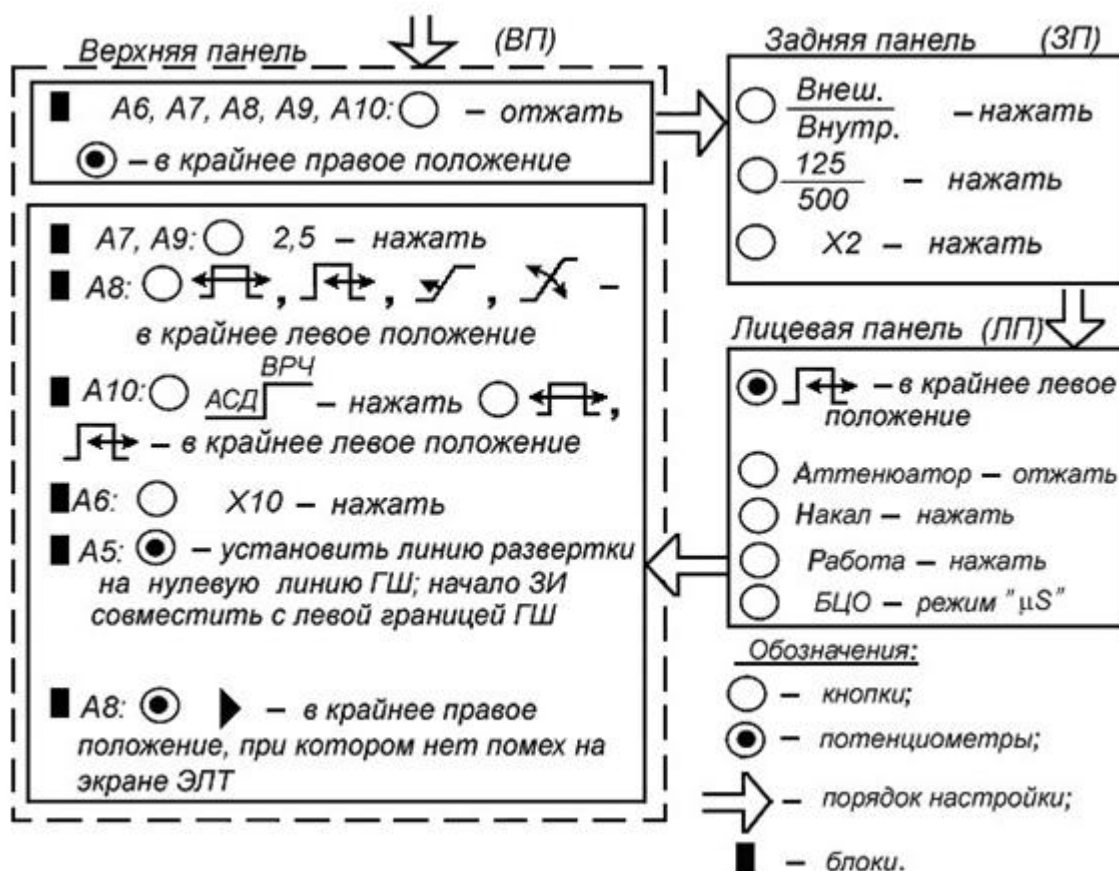


Рисунок 7.10 – Последовательность настройки дефектоскопа УД2-12

Для включения дефектоскопа необходимо нажать кнопку 2 «Накал» на передней панели, затем через одну минуту нажать кнопку 1 «Работа». При этом загорится горизонтальная черточка против сенсорного контакта «*dB*». Регуляторами 2 на верхней панели следует установить линию луча на нулевую линию горизонтальной шкалы электронно-лучевой трубки, начало линии совместить с левой границей шкалы и получить четкое изображение луча.

7.4.2 Настройка временной регулировки чувствительности

Частоту следования зондирующих импульсов дефектоскопа и тип пьезоэлектрического преобразователя выбирают в зависимости от материала контролируемого изделия. Преобразователь подключают к дефектоскопу с соответствующим кабелем.

Высокая частота следования импульсов устанавливается при больших скоростях контроля в автоматическом или полуавтоматическом режиме, при малых длительностях развертки для получения яркого изображения на экране электронно-лучевой трубки.

Низкая частота следования импульсов выбирается при контроле материалов с малым затуханием ультразвуковых колебаний, чтобы избежать реверберационных помех.

После пятиминутного прогрева включенного дефектоскопа выполняют настройку временной регулировки чувствительности. Для этого пьезоэлектрический преобразователь, смоченный контактной жидкостью, устанавливают на рабочую поверхность образца с ближним отражателем. Нажатием кнопки 5 на верхней панели блока А6 включают вторую развертку. Затем ручкой регулировки длительности задержки 13 (блок А8) устанавливают начало строба, который находится на второй развертке, на перпендикуляр, проведенный из основания заднего фронта импульса, отраженного от ближнего отражателя.

Если на линии второй развертки появляются два строба (при малой длитель-

ности развертки), то настройка выполняется по второму стробу.

Затем преобразователь переносят на образец с дальним отражателем, и с помощью ручки 13 (блок А8) конец строба устанавливают на перпендикуляр, проведенный из основания переднего фронта импульса, отраженного от дальнего отражателя. Регулятором усиления 11 (блок А8) устанавливают амплитуду сигнала, равную стандартному уровню.

7.4.3 Режим измерения глубины залегания дефекта

Для измерения глубины залегания дефекта к дефектоскопу подключают прямой совмещенный (тип П111) или отдельно–совмещенный (тип П112) пьезоэлектрический преобразователь.

Режим измерения глубины залегания дефекта включают сенсорным переключателем с обозначением «*mmH*», при этом против надписи «*mm*» загорается вертикальная черточка. Для настройки дефектоскопа на работу в этом режиме пьезоэлектрический преобразователь помещают на образец с ближним отражателем и с помощью регулятора 3, обозначенного символом « $\triangleright 0 \triangleleft$ » на блоке А6, на цифровом индикаторе дефектоскопа устанавливают значение действительной глубины залегания ближнего отражателя.

После этого преобразователь переносят на образец с дальним отражателем и регулятором «*H*» на блоке А5 (группа регуляторов 1) устанавливают значение действительной глубины залегания дальнего отражателя. Для проверки правильности настройки глубиномера преобразователь устанавливают на образец со средним отражателем, при этом показание цифрового индикатора должно соответствовать действительной глубине залегания отражателя. При необходимости настройку повторяют несколько раз с последовательным уточнением показаний индикатора.

Глубиномер считается настроенным правильно, если погрешность составляет не более $\pm(0,015H+0,5)$ мм, где H – действительное значение глубины залегания отражателя.

Измерение глубины залегания дефекта заключается в установке преобразователя на контролируемое изделие и считывании показаний цифрового индикатора.

7.4.4 Режим измерения координат залегания дефекта

Для измерения координат дефекта используются наклонные совмещенные пьезоэлектрические преобразователи типа П121.

Режим измерения координат дефекта включают сенсорным переключателем «*mmY*», при этом должна загореться вертикальная черточка против надписи «*mm*».

Затем выполняют настройку по образцу с ближним отражателем. Ручкой 5, расположенной на передней панели дефектоскопа, стробируют сигнал от отражателя, а регулятором 3 с символом « $\triangleright 0 \triangleleft$ » на верхней панели А6 настраивают действительное значение координаты Y ближнего отражателя на цифровом индикаторе. После этого пьезоэлектрический преобразователь помещают на образец с дальним отражателем, и регулятором « Y » (группа 1 на блоке А5) на цифровом индикаторе устанавливают действительное значение координаты Y .

Настройку по образцам с ближним и дальним отражателями при необходимости повторяют несколько раз до совпадения показаний цифрового индикатора с действительными значениями координаты Y . Проверку правильности настройки выполняют по образцу со средним отражателем. Для этого преобразователь устанавливают на образец, регулятором 5 на передней панели стробируют сигнал отражателя и снимают показания цифрового индикатора. Погрешность показаний индикатора должна быть в пределах $\pm(0,03Y+1)$ мм, где Y – действительное значение координаты Y отражателя.

Для измерения координаты X дефекта необходимо сенсорным переключателем включить режим «*mmX*», при этом против надписи «*mm*» загорится горизонтальная черточка. Затем пьезоэлектрический преобразователь помещают на образец с ближним отражателем, регулятором 5 на передней панели стробируют сигнал от ближнего отражателя, и регулятором « X » на блоке А5 устанавливают действительное значение координаты X .

вительное значение координаты X . Для правильной установки координаты X необходимо уточнить положение риски на боковой поверхности преобразователя.

После этого преобразователь помещают на образец с дальним отражателем. Значения координаты X определяются по цифровому индикатору. Координата X – это расстояние от риски на боковой поверхности преобразователя до перпендикуляра к поверхности образца, восстановленного из отражателя.

Погрешность измерения должна быть не более $\pm(0,03X+1)$ мм.

Настроенный таким образом дефектоскоп позволяет определить расположение дефектов в контролируемом изделии по координатам X и Y от искателя.

7.4.5 Оценка эквивалентной площади дефекта

Для измерения площади дефекта к дефектоскопу подключают прямой совмещенный пьезоэлектрический преобразователь П111-2,5-К12–002.

С помощью регуляторов 18 и 19 блока А10 на верхней панели дефектоскопа стробируют сигналы от ближнего и дальнего отражателей. Образец для настройки и контролируемое изделие должны быть изготовлены из материала одной и той же марки.

Измерение эквивалентной площади дефекта выполняется в квадратных миллиметрах по цифровому индикатору, включенному в режим « dB » с помощью сенсорного переключателя. При этом кнопка « mm^2-dB » на верхней панели блока А8 должна быть нажата кнопка.

Действительное значение площади отражателя образца, используемого при настройке дефектоскопа, устанавливают на цифровом индикаторе регулятором 14 с символом « \triangleright », расположенным на верхней панели блока А8, и кнопками 4 «Ослабление dB » на передней панели дефектоскопа. После этого усиление дефектоскопа изменять не следует.

Настроенный таким образом дефектоскоп позволяет измерять эквивалентную площадь дефектов в диапазоне от 3 до 30 мм².

7.5 Порядок выполнения лабораторной работы

7.5.1 Изучить методы ультразвуковой дефектоскопии, область применения и виды обнаруживаемых дефектов.

7.5.2 Ознакомиться с устройством, органами управления и настройки дефектоскопа УД2-12.

7.5.3 Изучить конструкцию и технические характеристики ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей различных типов.

7.5.4 Для обнаружения дефектов эхо-методом подключить прямой раздельно-совмещенный преобразователь. Установить преобразователь на поверхность эталонного образца, смоченную водой. Перемещать преобразователь по поверхности образца и наблюдать на экране эхо-импульсы от дефектов и обратной поверхности. Выполнить поиск дефектов на образцах заготовок, полуфабрикатов и деталей, проанализировать полученные результаты.

7.5.5 Подключить прямой совмещенный преобразователь, выполнить поиск дефектов на эталонном образце, на образцах заготовок, полуфабрикатов и деталей. Определить примерную глубину мертвой зоны, в которой обнаружение дефектов невозможно.

7.5.6 Подключить наклонный совмещенный преобразователь, выполнить поиск дефектов на эталонном образце. Обратит внимание на угол ввода ультразвуковых импульсов.

7.5.7 Подготовить дефектоскоп к работе теневым методом. Подключить два прямых совмещенных преобразователя: один в качестве излучателя ультразвуковых импульсов, второй в качестве приемника. Выполнить поиск дефектов на эталонном образце теневым методом.

7.5.8 Составить отчет по выполненной работе.

7.6 Содержание отчета по лабораторной работе

7.6.1 Цель лабораторной работы

7.6.2 Краткое описание основных методов ультразвуковой дефектоскопии.

7.6.3 Схемы и характеристики пьезоэлектрических преобразователей различных типов.

7.6.4 Технические характеристики дефектоскопа УД2-12.

7.6.5 Результаты дефектоскопии образцов полуфабрикатов и деталей.

7.6.6 Выводы по работе.

7.7 Контрольные вопросы

7.7.1 Для чего применяются методы ультразвуковой дефектоскопии?

7.7.2 Какие параметры ультразвуковых колебаний анализируются в процессе контроля дефектов?

7.7.3 В чем заключается эхо-метод ультразвуковой дефектоскопии и какие искатели для него применяются?

7.7.4 От чего зависит чувствительность эхо-метода, дефекты с какими размерами определяются эхо-методом?

7.7.5 Что такое мертвая зона и как уменьшить ее размеры?

7.7.6 В чем заключается теневой метод ультразвуковой дефектоскопии, его преимущества и недостатки?

7.7.7 Как реализуется и для чего применяется резонансный метод ультразвуковой дефектоскопии?

7.7.8 Какой метод ультразвуковой дефектоскопии применим для контроля клеевых соединений?

7.7.9 Перечислите режимы работы дефектоскопа УД2-12 и реализуемые методы ультразвуковой дефектоскопии.

Список использованных источников

1. Лахтин, Ю. М. Материаловедение [Текст] : учебник / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Альянс, 2013. – 528 с. – Библиогр.: с. 520. – Предм. указ.: с. 521–523. – ISBN 978-5-91872-033-2.
2. Материаловедение [Текст] : учеб. для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.]; [под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина]. – 8-е изд., стер. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 648 с. : ил. – ISBN 978-5-7038-1860-2.
3. Справочник по конструкционным материалам [Текст] / под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьевой. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 640 с. : ил. – Библиогр. в конце разд. – Прил.: с. 625–633. – ISBN 5-7038-2651-9.
4. Вербицкая, А. Г. Определение механических свойств материалов [Текст] : учеб. пособие для сред. учеб. заведений / А. Г. Вербицкая, В. И. Кириносков. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 192 с. : ил.
5. Золоторевский, В. С. Механические свойства металлов [Текст] : учеб. для вузов / В. С. Золоторевский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgy, 1983. – 351 с. : ил. – Библиогр.: с. 347.
6. ГОСТ 28489-90. Микроскопы световые. Термины и определения. – Введ. 1991-07-01. – М. : Стандартиформ, 2006. – 12 с.
7. ГОСТ 23677-79. Твердомеры для металлов. Общие технические требования. – Введ. 1960-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 9 с.
8. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю (с Изм. № 1, 2, 3, 4, 5). – Введ. 1960-01-01. – М. : Стандартиформ, 2007. – 41 с.
9. ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86). Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. (с Изм. № 1, 2, 3, с Поправкой) – Введ. 1969-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 9 с.
10. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – Введ. 1977-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1993. – 34 с.

11. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – Введ. 1979-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 10 с.
12. ГОСТ 10708-82. Копры маятниковые. Технические условия. – Введ. 1983-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 8 с.
13. Копер маятниковый ИО 5003-0,3. Паспорт Гб2.774.045 ПС. Ивановское ПО «Точприбор».
14. Ультразвук [Текст] . – М. : Сов. энциклопедия, 1979. – 400 с. : ил. – (Маленькая энциклопедия / гл. ред. И. П. Голямина).
15. ГОСТ Р ИСО 5577–2009. Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Словарь. – Введ. 2009–12–15. – М. : Стандартиформ, 2011. – 27 с.
16. Гурвич, А. К. Ультразвуковой контроль сварных швов [Текст] / А. К. Гурвич, И. Н. Ермолов. – Киев : Техника, 1972. – 460 с
17. Дефектоскоп ультразвуковой УД2-12. Руководство по эксплуатации ЩО2.068.136РЭ. – 142 с.

Приложение А

(справочное)

Таблица перевода чисел твердости

Таблица А.1 – Соотношение чисел твердости при различных методах измерения

Твердость по Виккерсу	Твердость по Бринеллю, диаметр индентора 10 мм, нагрузка 3000 кг		Твердость по Роквеллу		Твердость по Шору (метод отскока)
	индентор из закаленной стали, <i>HB</i>	индентор из сплава WC, <i>HBW</i>	<i>HRB</i> шкала В	<i>HRC</i> шкала С	
940				68.0	97
920				67.5	96
900				67.0	95
880		767		66.4	93
860		757		65.0	92
840		745		65.9	91
820		733		64.7	90
800		722		64.0	88
780		710		63.3	87
760		698		62.5	86
740		684		61.8	84
720		670		61.0	83
700		656		60.1	81
690		647		59.7	
680		638		59.2	80

Продолжение таблицы А.1

Твердость по Виккерсу	Твердость по Бринеллю, диаметр индентора 10 мм, нагрузка 3000 кг		Твердость по Роквеллу		Твердость по Шору (метод отскока)
	индентор из закаленной стали, <i>HB</i>	индентор из сплава WC, <i>HBW</i>	<i>HRB</i> шкала В	<i>HRC</i> шкала С	
670		630		58.8	
660		620		58.3	79
650		611		57.8	
640		601		57.3	77
630		591		56.8	
620		582		56.3	75
610		573		55.7	
600		564		55.2	74
590		554		54.7	
580		545		54.1	72
570		535		53.6	
560		525		53.0	71
550	505	517		52.3	
540	496	507		51.7	69
530	488	497		51.1	
520	480	488		50.5	67
510	473	479		49.8	
500	465	471		49.1	66
490	456	460		48.4	

Продолжение таблицы А.1

Твердость по Виккерсу	Твердость по Бринеллю, диаметр индентора 10 мм, нагрузка 3000 кг		Твердость по Роквеллу		Твердость по Шору (метод отскока)
	индентор из закаленной стали, <i>HB</i>	индентор из сплава WC, <i>HBW</i>	<i>HRB</i> шкала В	<i>HRC</i> шкала С	
480	448	452		47.7	64
470	441	442		46.9	
460	433	433		46.1	62
450	425	425		45.3	
440	415	415		44.5	59
430	405	405		43.6	
420	397	397		42.7	57
410	388	388		41.8	
400	379	379		40.8	55
390	369	369		39.8	
380	360	360	(110.0)	38.8	52
370	350	350		37.7	
360	341	341	(109.0)	36.6	50
350	331	331		35.5	
340	322	322	(108.0)	34.4	47
330	313	313		33.3	
320	303	303	(107.0)	32.2	45
310	294	294		31	
300	284	284	(105.0)	29.8	42

Продолжение таблицы А.1

Твердость по Виккерсу	Твердость по Бринеллю, диаметр индентора 10 мм, нагрузка 3000 кг		Твердость по Роквеллу		Твердость по Шору (метод отскока)
	индентор из закаленной стали, <i>HB</i>	индентор из сплава WC, <i>HBW</i>	<i>HRB</i> шкала В	<i>HRC</i> шкала С	
295	280	280		29.2	
290	275	275	(104.0)	28.5	41
285	270	270		27.8	
280	265	265	(103.5)	27.1	40
275	261	261		26.4	
270	256	256	(102.0)	25.6	38
265	252	252		24.8	
260	247	247	(101.0)	24	37
255	243	243		23.1	
250	238	238	99.50	22.2	36
245	233	233		21.3	
240	228	228	98.10	20.3	34
230	219	219	96.70	(18.0)	33
220	209	209	95.00	(15.7)	32
210	200	200	93.40	(13.4)	30
200	190	190	91.50	(11.0)	29
190	181	181	89.50	(8.5)	28
180	171	171	87.10	(6.0)	26
170	162	162	85.00	(3.0)	25

Продолжение таблицы А.1

Твердость по Виккерсу	Твердость по Бринеллю, диаметр индентора 10 мм, нагрузка 3000 кг		Твердость по Роквеллу		Твердость по Шору (метод отскока)
	индентор из закаленной стали, <i>HB</i>	индентор из сплава WC, <i>HBW</i>	<i>HRB</i> шкала В	<i>HRC</i> шкала С	
160	152	152	81.70	(0.0)	24
150	143	143	78.70		22
140	133	133	75.00		21
130	124	124	71.20		20
120	114	114	66.70		18
110	105	105	62.30		
100	95	95	56.20		
95	90	90	52.00		
90	86	86	48.00		
85	81	81	41.00		

Приложение Б

(справочное)

Таблица микротвердости

Таблица Б.1 – Микротвердость материалов при испытании вдавливанием четырехгранной алмазной пирамиды с углом 136°

Длина диагонали отпечатка		Микротвердость HV , кг/мм ² , при силе вдавливания		
в делениях	в микрометрах	50 г	100 г	200 г
40	12	644	1288	2576
41	12	613	1226	2451
42	13	584	1168	2336
43	13	557	1114	2229
44	13	532	1064	2129
45	14	509	1018	2035
46	14	487	974	1947
47	14	466	933	1865
48	14	447	894	1789
49	15	429	858	1716
50	15	412	824	1648
51	15	396	792	1584
52	16	381	762	1524
53	16	367	734	1467
54	16	353	707	1413
55	17	341	681	1362
56	17	329	657	1314
57	17	317	634	1268

Продолжение таблицы Б.1

Длина диагонали отпечатка		Микротвердость HV , кг/мм ² , при силе вдавливания		
		50 г	100 г	200 г
в делениях	в микрометрах			
58	17	306	612	1225
59	18	296	592	1184
60	18	286	572	1145
61	18	277	554	1107
62	19	268	536	1072
63	19	260	519	1038
64	19	252	503	1006
65	20	244	488	975
66	20	237	473	946
67	20	229	459	918
68	20	223	446	891
69	21	216	433	866
70	21	210	420	841
71	21	204	409	817
72	22	199	397	795
73	22	193	387	773
74	22	188	376	753
75	23	183	366	733
76	23	178	357	713
77	23	174	348	695
78	23	169	339	677
79	24	165	330	660
80	24	161	322	644
81	24	157	314	628
82	25	153	306	613

Продолжение таблицы Б.1

Длина диагонали отпечатка		Микротвердость HV , кг/мм ² , при силе вдавливания		
		50 г	100 г	200 г
в делениях	в микрометрах			
83	25	150	299	598
84	25	146	292	584
85	26	143	285	570
86	26	139	279	557
87	26	136	272	544
88	26	133	266	532
89	27	130	260	520
90	27	127	254	509
91	27	124	249	498
92	28	122	243	487
93	28	119	238	476
94	28	117	233	466
95	29	114	228	457
96	29	112	224	447
97	29	109	219	438
98	29	107	215	429
99	30	105	210	420
100	30	103	206	412
101	30	101	202	404
102	31	99	198	396
103	31	97	194	388
104	31	95	190	381
105	32	93	187	374
106	32	92	183	367
107	32	90	180	360

Продолжение таблицы Б.1

Длина диагонали отпечатка		Микротвердость HV , кг/мм ² , при силе вдавливания		
в делениях	в микрометрах	50 г	100 г	200 г
108	32	88	177	353
109	33	87	173	347
110	33	85	170	341
111	33	84	167	334
112	34	82	164	329
113	34	81	161	323
114	34	79	159	317
115	35	78	156	312
116	35	77	153	306
117	35	75	151	301
118	35	74	148	296
119	36	73	146	291
120	36	72	143	286
121	36	70	141	281
122	37	69	138	277
123	37	68	136	272
124	37	67	134	268
125	38	66	132	264
126	38	65	130	260
127	38	64	128	255
128	38	63	126	252
129	39	62	124	248
130	39	61	122	244
131	39	60	120	240
132	40	59	118	237

Продолжение таблицы Б.1

Длина диагонали отпечатка		Микротвердость HV , кг/мм ² , при силе вдавливания		
		50 г	100 г	200 г
в делениях	в микрометрах			
133	40	58	116	233
134	40	57	115	229
135	41	57	113	226
136	41	56	111	223
137	41	55	110	220
138	41	54	108	216
139	42	53	107	213
140	42	53	105	210
141	42	52	104	207
142	43	51	102	204
143	43	50	101	202
144	43	50	99	199
145	44	49	98	196
146	44	48	97	193
147	44	48	95	191
148	44	47	94	188
149	45	46	93	186
150	45	46	92	183
151	45	45	90	181
152	46	45	89	178
153	46	44	88	176
154	46	43	87	174
155	47	43	86	172
156	47	42	85	169
157	47	42	84	167

Продолжение таблицы Б.1

Длина диагонали отпечатка		Микротвердость HV , кг/мм ² , при силе вдавливания		
		50 г	100 г	200 г
в делениях	в микрометрах			
158	47	41	83	165
159	48	41	82	163
160	48	40	80	161
161	48	40	79	159
162	49	39	79	157
163	49	39	78	155
164	49	38	77	153
165	50	38	76	151
166	50	37	75	150
167	50	37	74	148
168	50	37	73	146
169	51	36	72	144
170	51	36	71	143
171	51	35	70	141
172	52	35	70	139
173	52	34	69	138
174	52	34	68	136
175	53	34	67	135
176	53	33	67	133
177	53	33	66	132
178	53	33	65	130
179	54	32	64	129
180	54	32	64	127
181	54	31	63	126
182	55	31	62	124

Продолжение таблицы Б.1

Длина диагонали отпечатка		Микротвердость HV , кг/мм ² , при силе вдавливания		
в делениях	в микрометрах	50 г	100 г	200 г
183	55	31	62	123
184	55	30	61	122
185	56	30	60	120
186	56	30	60	119
187	56	29	59	118
188	56	29	58	117
189	57	29	58	115
190	57	29	57	114
191	57	28	56	113
192	58	28	56	112
193	58	28	55	111
194	58	27	55	109
195	59	27	54	108
196	59	27	54	107