

**ОПД.Ф.02.02 СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ**  
**МИКРОТВЕРДОСТЬ МАТЕРИАЛОВ**  
Методические указания к лабораторной работе

Излагаются сущность, назначение и области применения метода микротвердости (дюраметрии) при изучении механических свойств металлов и сплавов. Предназначены для студентов дневной, вечерней и заочной форм обучения, изучающих курсы «Сопротивление материалов», «Прикладная физика (Трибология)» и «Механические свойства металлов». Могут быть использованы при выполнении соответствующей лабораторной работы.

**Цель работы:** Исследование механических свойств материалов методом микротвердости (дюраметрии).

## 1. Теоретическая часть

Метод определения микротвердости предназначен для оценки твердости очень малых (микроскопических) объемов материалов. Его применяют для измерения твердости мелких деталей, тонкой проволоки или ленты, тонких поверхностных слоев, покрытий и т. д. Главное назначение — оценка твердости отдельных фаз или структурных составляющих сплавов, а также разницы в твердости отдельных участков этих составляющих.

Метод стандартизован (ГОСТ 9450—76). В качестве индентора при измерении микротвердости чаще всего, как и в случае определения твердости по Виккерсу, используют правильную четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине  $136^\circ$ . Эта пирамида плавно вдавливаются в образец при нагрузках 0,05—5Н. Число микротвердости  $H_\mu$ , МПа, определяется по формуле  $H_\mu = 1,854 \cdot 10^5 F/d^2$ , где  $F$  — нагрузка, Н;  $d$  — диагональ отпечатка, обычно 7—50 мкм;  $d^2/1,854$  — площадь боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка.

По ГОСТу число микротвердости, МПа, записывают без единицы измерения, например  $H_\mu - 1050$ .

Микротвердость массивных образцов измеряют на металлографических шлифах, приготовленных специальным образом. Глубина вдавливания индентора при определении микротвердости ( $d/7$ ) составляет несколько микрометров и соизмерима с глубиной получаемого в результате механической шлифовки и полировки наклепанного поверхностного слоя. Поэтому методика удаления этого слоя особенно важна.

Наклепанный слой удаляют обычно одним из трех методов: электрополировкой, отжигом готовых шлифов в вакууме или инертной атмосфере и глубоким химическим травлением. При использовании любого метода экспериментально устанавливают режим (время электрополировки или травления, плотность тока и концентрацию реактива, температуру и

время отжига и т. д.), при котором полностью снимается наклеп в поверхностном слое образца. Для этого строят зависимость  $H_\mu$  от параметра, изменяемого при подборе режима снятия наклепанного слоя. Момент выхода на горизонталь величины  $H_\mu$  соответствует оптимальному режиму, который затем используется при подготовке аналогичных образцов

Фактически метод микротвердости — это разновидность метода Виккерса (HV) и отличается от него только использованием меньших нагрузок и соответственно меньшим размером отпечатка. Поэтому физический смысл числа микротвердости аналогичен твердости HV. Для гомогенных однофазных материалов с крупным зерном  $H_\mu \approx HV$ . Часто наблюдаемые отклонения от этого равенства, особенно в области  $F < 0,05—0,1H$ , объясняются в основном большими погрешностями измерения микротвердости. Источники этих погрешностей — вибрации, инструментальные ошибки в измерении длины диагонали отпечатка, неидентичность условий ручного нагружения, искажения структуры поверхностного слоя и др. По мере уменьшения нагрузки все погрешности возрастают. Поэтому не рекомендуется работать с нагрузками, которые дают отпечатки с  $d < 8—9$  мкм. Использование приставок для автоматического нагружения, всемерное устранение вибраций, тщательная отработка методики приготовления шлифов позволяют свести ошибки в определении числа микротвердости к минимуму.

Как уже отмечалось, главная ценность метода микротвердости — это возможность оценки твердости отдельных фаз и структурных составляющих, что очень важно при решении многих металловедческих задач и чего нельзя сделать другими методами. Некоторые области применения метода микротвердости представлены в табл. 1.

Некоторые области применения метода микротвердости (дюраметрии)

Таблица 1

№№ п./п	Область применения	Схема измерений	Краткая методика
1	Оценка микротвердости отдельных структурных составляющих сплава (например, стали с феррито-перлитной структурой)		Используется металлографический шлиф с выявленной травлением структурой. Отпечатки наносятся в отдельные структурные составляющие сплава с последующим их измерением и определением микротвердости.
2	Оценка градиента микротвердости по толщине поверхностного слоя (в частности, после поверхностного упрочнения)		Используется поперечный или косой металлографический шлиф. Отпечатки наносятся от поверхности вглубь через определенные интервалы с последующим их измерением и определением микротвердости по толщине поверхностного слоя.
3	Оценка разброса значений микротвердости в металле или сплаве (служит косвенной оценкой прочностной микронеоднородности материала)		На исследуемой поверхности металлографического шлифа наносятся произвольно не менее 20 отпечатков с последующим их измерением, определением микротвердости и статистической обработкой полученных результатов.
4	Оценка анизотропии прочностных свойств монокристалла		При нанесении каждого отпечатка индентор поворачивается на определенный угол. Анизотропия свойств оценивается по отношению диагоналей полученных отпечатков.
5	Оценка микронеоднородности пластической деформации по локальным объемам металла или сплава.		Вдоль образующей цилиндрического образца для испытаний на растяжение, через равные интервалы «l» наносятся не менее 100 отпечатков микротвердости (реперных точек) при малой нагрузке на индентор (0,0196 – 0,049Н). Измеряются расстояния между ними после деформации образца с последующей статистической обработкой полученных данных.

## 2. Приборы, оборудование, испытываемый образец.

Для определения микротвердости в России серийно выпускают прибор марки ПМТ-3 (рис. 1, а). На чугунном основании закреплена колонна 3 с резьбой, а на ней — кронштейн с микроскопом и нагружающим устройством. Для установки кронштейна на требуемой высоте служат гайка 4 и стопорный винт. Микроскоп состоит из тубуса 8, окуляр-микрометра 7, сменного объектива 10 (40- или 8-кратного) и осветительного устройства 9. Для грубой наводки на резкость микроскоп можно перемещать по высоте относительно кронштейна винтом 6, связанным с реечным устройством. Прежде чем вращать винт 6, необходимо ослабить винт, расположенный на правой части кронштейна. Для тонкой наводки на резкость микроскоп перемещают в вертикальном направлении вращением микрометрического винта 5. К нижней части тубуса микроскопа прикреплен механизм нагружения 14.

На рис. 1, б показана его схема. Грузики в виде дисков с прорезями надевают на стержень 17, в нижнем конце которого крепится оправка с алмазным индентором 16. Стержень подвешен к кронштейну на двух плоских пружинах 20 и 21. При повороте рукоятки 18 на себя стержень 17 освобождается и перемещается под действием грузов вниз, вдавливая индентор в поверхность образца.

На основании прибора установлен предметный столик 11, который может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях при помощи микрометрических винтов 12 и 13. Кроме того, столик можно поворачивать рукояткой 2 вокруг своей оси на 180°. Для нанесения отпечатка испытываемый образец устанавливают под микроскопом и выбирают на нем место, в котором необходимо измерить микротвердость. Затем перемещают образец так, чтобы выбранное место оказалось под острием алмазной пирамиды (поворотом предметного столика на 180° до упора). После вдавливания индентора и снятия нагрузки с образца последний вновь переводят под микроскоп и измеряют длину диагонали отпечатка.

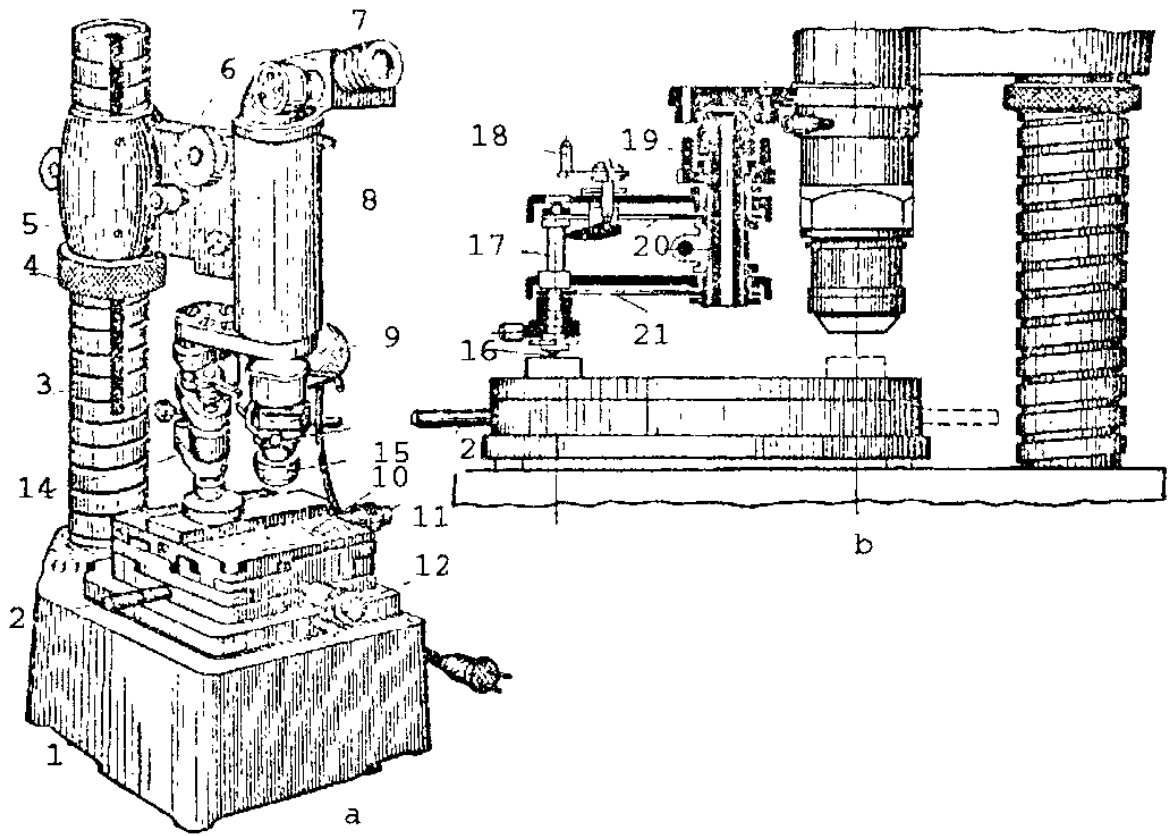


Рис. 1. Схема прибора ПМТ-3

Для обеспечения точного замера микротвердости прибор должен быть тщательно юстирован. Задача юстировки — точное совмещение оптической оси с осью нагружения при повороте предметного столика на  $180^\circ$ . Иными словами, необходимо добиться, чтобы отпечаток наносился именно на том месте, которое было выбрано под микроскопом. Центрирующее устройство, позволяющее перемещать объектив в горизонтальной плоскости, приводится в действие винтами 15 (см. рис. 1,а).

Схема центровки приведена на рис. 2. Сначала устанавливают перекрытие нитей окуляр-микрометра точно в центре поля зрения микроскопа. Для этого перемещающийся при вращении барабанчика окуляр-микрометра двоянный штрих должен находиться, против цифры 4 неподвижной шкалы окуляра, а нуль шкалы барабанчика — точно против риски. Затем перемещением предметного столика со шлифом подводят под перекрестие, выбранное для испытания место (см. рис. 2, а) и наносят отпечаток. Но если прибор не отцентрован, отпечаток получится в стороне от перекрестия (см. рис. 2, б). Центровочными винтами 15 (см. рис. 1, а) перемещают перекрестие до тех пор, пока оно не совпадет с центром получившегося отпечатка (см. рис. 2, б). Затем опять перемещают столик (микрометрическими винтами) так, чтобы перекрестие пришлось на то место, где нужно сделать отпечаток (см. рис. 2, г). Вновь сделанный отпечаток должен быть сделан точно в заданном месте (см. рис. 2, д). Если этого не произойдет, все операции повторяют сначала. Операции центровки часто приходится выполнять и в процессе работы, после предварительной настройки прибора.

Вторая задача юстировки — правильная установка по высоте механизма нагружения. При этом острие алмаза (см. рис. 1, б) должно касаться поверхности образца, а микроскоп сфокусирован на эту поверхность. Юстировка по высоте осуществляется гайкой 19. Необходимо добиться такого положения, чтобы без нагрузки на поверхности шлифа из какого-нибудь мягкого металла (например, алюминия или олова) не появлялось

ток. Юстировку по высоте можно проводить на эталоне с точно известной твердостью (например, на кристалле NaCl). Поднимая или опуская нагружающий механизм, необходимо добиться получения отпечатка с такой диагональю, которая бы соответствовала микротвердости эталона.

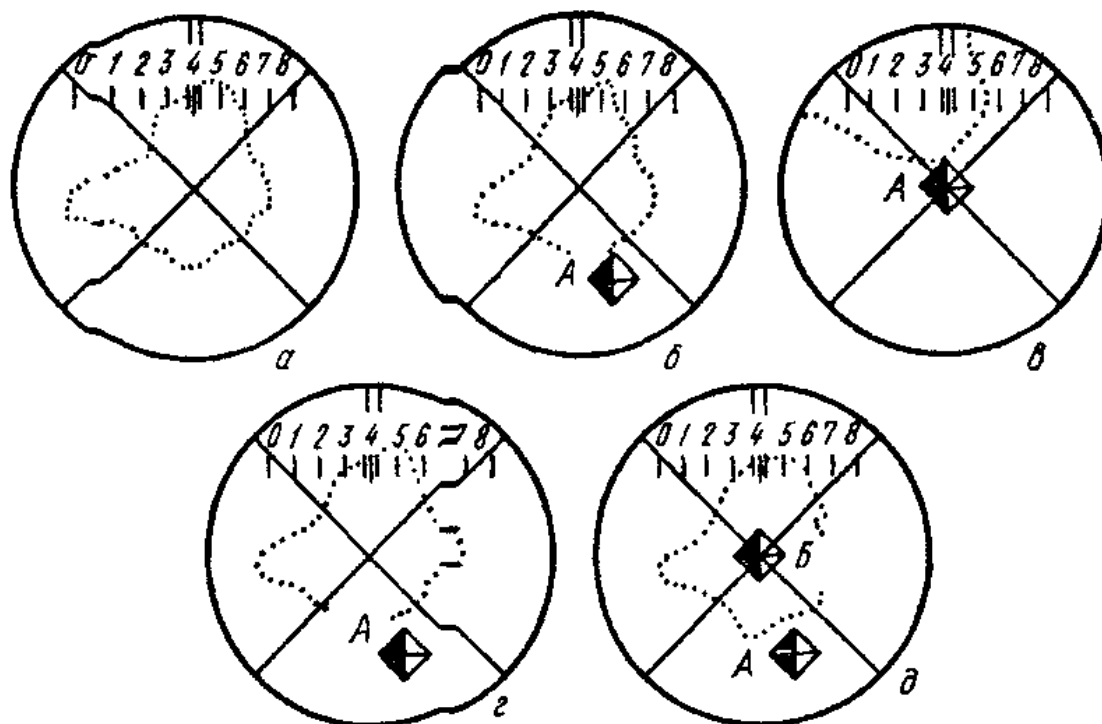


Рис. 2. Схема центровки прибора ПМТ-3

При измерении микротвердости расстояние между центрами соседних отпечатков должно быть не менее двух длин диагонали большего отпечатка. Таким же должно быть расстояние от центра отпечатка до края образца, длина диагонали отпечатка — не более полуторной толщины образца.

Для определения числа микротвердости по длине диагонали при разных нагрузках  $F$  существуют специальные таблицы и номограммы.



## 1. Экспериментальная часть

**ВНИМАНИЕ!!! РАБОТА С ПРИБОРОМ ПМТ-3 ТРЕБУЕТ ОСОБОЙ АККУРАТНОСТИ. ВСЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЧАСТЕЙ ПРИБОРА ДОЛЖНЫ ОСУЩЕСТВЛЯТЬСЯ МЕДЛЕННО, ПЛАВНО, БЕЗ РЫВКОВ И ИЗЛИШНИХ УСИЛИЙ ЗАПРЕЩАЕТСЯ ПЕРЕМЕЩАТЬ ОБРАЗЕЦ ИЛИ СТОЛ ПРИ НАНЕСЕНИИ ОТПЕЧАТКА (ПОД НАГРУЗКОЙ)! НЕ ПРИКАСАЙТЕСЬ РУКАМИ К РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО ШЛИФА!**

Измерение микротвердости осуществляется на специально подготовленном металлографическом шлифе из стали 45 в нормализованном состоянии, с выявленной травлением в 4-х% водном растворе азотной кислоты, феррито-перлитной структурой. Образец устанавливается на основание (стеклянную или металлическую плоскую пластину) через подложку из пластика, обеспечивающую, с помощью специального пресса, параллельность поверхности шлифа и плоскости стола прибора ПМТ-3, находящегося в положении измерения микротвердости (повернут до упора по часовой стрелке). С помощью винтов 5 и 6 осуществляется наводка на резкость. А перемещением стола микрометрическими винтами 12 и 13 выбирается место нанесения отпечатка микротвердости той или иной структурной составляющей.

Затем стол переводится в положение нанесения отпечатка плавным его поворотом против часовой стрелки до упора с помощью рукоятки 2. На механизм нагружения прибора ПМТ-3 устанавливается груз, соответствующий необходимой величине нагрузки (в данном случае – 0,98 Н). Поворотом рукоятки 18 механизма нагружения против часовой стрелки до упора, последующей выдержкой отпечатка под нагрузкой (15с. для черных и 30с. для цветных металлов и сплавов) и возвратом рукоятки 18 в исходное положение осуществляется цикл нанесения отпечатка микротвердости. Поворотом стола в положение измерения отпечатка микротвердости (по часовой стрелке до упора) помещаем отпечаток в поле микроскопа (при необходимости корректируем наводку на резкость). Совмещая перекрестие микроскопа последовательно с правым и левым углом отпечатка, считываем соответствующие показатели  $d_1$  и  $d_2$  со шкалы (сотни мкм) и лимба (десятки и единицы мкм)

микроскопа (см. рис. 3 а, б), которые заносятся в табл. 2. По приведенной методике осуществляется измерение 20 отпечатков микротвердости (10 отпечатков, нанесенных в ферритной и 10 отпечатков, нанесенных в перлитной составляющих структуры нормализованной стали 45.

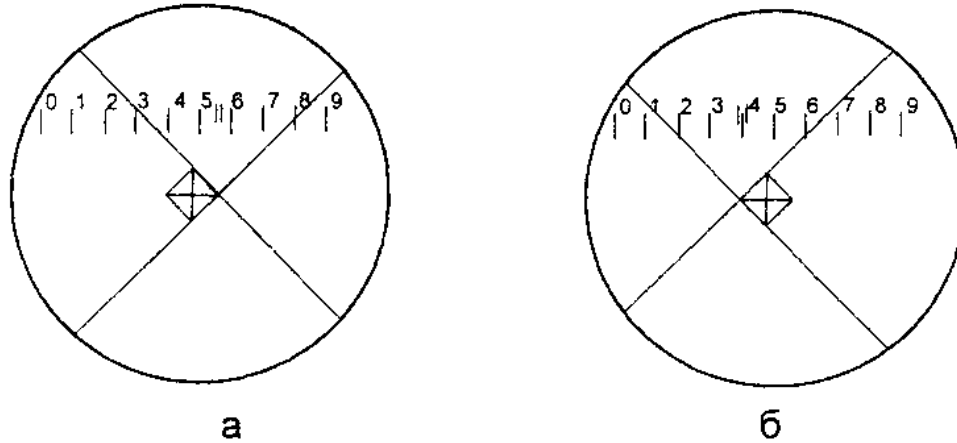


Рис. 3 Измерение диагонали отпечатка микротвердости

Обработка полученных результатов осуществляется в следующем порядке:

- ✓ для каждого отпечатка определяется разность измерений  $d_1 - d_2$ , мкм, а затем величина  $0,31(d_1 - d_2)$ , учитывающая коэффициент увеличения микроскопа:

Таблица 2

Протокол результатов измерения отпечатков микротвердости

№ обр.	Структура	$d_1$ , мкм	$d_2$ , мкм	$d_1 - d_2$ , мкм	$0,31(d_1 - d_2)$ , мкм	$H_{0,98}$	$(H_{0,98_i} - H_{0,98_{cp}})$	$(H_{0,98_i} - H_{0,98_{cp}})^2$
1	Феррит							
..								
10								
11		Перлит						
..								
20								

- ✓ по таблицам микротвердости (см. приложение) определяется значение микротвердости  $H_{0,98}$ ;
- ✓ вычисляется среднее значение микротвердости

$$H_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{0,98_i}}{n}; \quad (1)$$

- ✓ последовательно вычисляются значения

$$\left( H_{0,98_i} - H_{0,98_{cp}} \right), \left( H_{0,98_i} - H_{0,98_{cp}} \right)^2 \text{ и } \sum_{i=1}^n \left( H_{0,98_i} - H_{0,98_{cp}} \right)^2; \quad (2)$$

- ✓ вычисляется среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_{ск} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( H_{0,98_i} - H_{0,98_{cp}} \right)^2}{n}}, \quad (3)$$

- ✓ вычисляется коэффициент вариации

$$K_{H_{0,98}} = \frac{\sigma_{ск}}{H_{0,98_{cp}}}. \quad (4)$$

Все данные заносятся в табл. 2 и на основании их анализа делаются соответствующие выводы по работе.

## 2. Рекомендации по оформлению отчета

1. Сформулируйте цель исследования.
2. В теоретической части работы кратко опишите сущность, назначение и области применения метода микротвердости материалов.
3. В разделе «Оборудование, приборы и испытуемый образец» приведите краткую методику подготовки металлографического шлифа, схему прибора ПМТ-3, схему механизма нагружения, схему измерения отпечатка микротвердости.
4. В разделе «Экспериментальная часть» занесите результаты измерения отпечатков микротвердости и последующих вычислений в табл. 2, вы-

числите среднее значение микротвердости, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации.

5. Сделайте выводы согласно поставленной цели исследования.

### **3. Правила по технике безопасности**

- ✓ Допускается работа на приборе только одного экспериментатора
- ✓ Блок питания прибора находится под напряжением 220В! Проверьте заземление! Не касайтесь токоведущих проводов!
- ✓ Не работайте вблизи источников вибраций (работающих электродвигателей, электромагнитов и т.п.)!

### **4. Вопросы для самопроверки**

1. Какие задачи могут решаться с помощью измерения микротвердости.
2. В чем отличия микротвердости и твердости материалов.
3. Какой индентор используется при измерении микротвердости.
4. Каковы нагрузки на индентор при измерении микротвердости
5. С какой целью осуществляется выдержка под нагрузкой
6. Какое время выдержки под нагрузкой для черных и цветных металлов и сплавов
7. Какова форма отпечатка микротвердости, с чем связаны ее искажения
8. Какие параметры отпечатка измеряются для определения микротвердости.
9. Какими параметрами оценивается разброс значений микротвердости, какими факторами он обусловлен.
10. Какие требования предъявляются к поверхности материала при измерении микротвердости, какими методами они достигаются.
11. Какие методы применяются для подготовки поверхности микрошлифа с целью устранения влияния наклепа поверхностного слоя.
12. С какой целью проводится юстировка микроскопа прибора ПМТ-3. Каков порядок центровки отпечатка в поле микроскопа и юстировки механизма нагружения по высоте.

13. Каково минимально допустимое расстояние между соседними отпечатками микротвердости, чем обусловлено это требование.
14. Каково соотношение между диагональю отпечатка и глубиной внедрения индентора.
15. Почему результат измерения диагонали отпечатка умножается на коэффициент 0,31. Объективы с каким увеличением применяются в приборе ПМТ-3.
16. С чем связаны погрешности измерения микротвердости и каковы методы их снижения.

#### **Список рекомендуемой литературы**

1. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – Т. 2. – С.83.
2. Золотаревский В. С. Механические свойства металлов. – М.: Metallургия, 1983. – 350с.
3. Бернштейн М. Я., Займовский В. А. Механические свойства металлов. – М., Metallургия, 1979. – 495 с.