

УДК 539.3-620.1

Е.И. Орешко<sup>1</sup>, Д.А. Уткин<sup>1</sup>, В.С. Ерасов<sup>1</sup>, А.А. Ляхов<sup>1</sup>**МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-101-117

*Проведен обзор основных методов измерения твердости в хронологическом порядке. Рассмотрены следующие методы измерения твердости: статическая твердость, динамическая твердость, кинетическая твердость, микротвердость, наноинdentирование. Рассмотрена возможность применения метода конечных элементов для построения кривой растяжения материалов по результатам измерения твердости. Проведен сравнительный анализ методов инdentирования и рассмотрены основные факторы, влияющие на результат измерения твердости. Проведен анализ соответствия отечественных и зарубежных стандартов по методам измерения твердости.*

**Ключевые слова:** твердость, напряжение, прочность, инdentирование, микротвердость, деформация.

E.I. Oreshko<sup>1</sup>, D.A. Utkin<sup>1</sup>, V.S. Erasov<sup>1</sup>, A.A. Lyakhov<sup>1</sup>**METHODS OF MEASUREMENT OF HARDNESS OF MATERIALS (review)**

*The review of the main methods of measurements of hardness in a chronological order is carried out. The following methods of measurement of hardness are considered: static hardness, dynamic hardness, kinetic hardness, microhardness, nanoindentation. Possibility of application of a method of finite element for creation of a curve of stretching of materials by results of hardness measurement is considered. The comparative analysis of methods of an indentation is carried out and the major factors influencing result of measurement of hardness are considered. The analysis of compliance of domestic and foreign standards on methods of measurement of hardness is carried out.*

**Keywords:** hardness, tension, durability, indentation, microhardness, deformation.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

При разработке конструкционных материалов необходимо проводить оценку их физико-механических характеристик [1–8]. Одной из характеристик, позволяющих определить качество изделий и материалов, является твердость.

Под твердостью понимается свойство материала, позволяющее сопротивляться внедрению в него более твердого и упругодеформированного инdentора. Инdentирование является одним из способов механических испытаний. В процессе увеличения нагрузки на наконечник материал проявляет те же свойства, что и при любом другом виде механических испытаний и проходит три стадии: упругую деформацию, пластическую деформацию и разрушение [9].

Инdentирование позволяет:

- в короткий срок испытать изделие, используя только его небольшую область;
- использовать данный вид испытаний тогда, когда другие способы по тем или иным обстоятельствам использовать невозможно;

- испытать материал практически без повреждения, что позволяет отнести данный вид измерений к неразрушающему контролю;
- определять твердость в микрообъемах и микросечениях (в отдельных слоях или фазах материала);
- использовать малогабаритные приборы, измерять твердость изделий в процессе их эксплуатации с применением автоматизации и интеграции с цифровой вычислительной техникой;
- устанавливать аналитическую или эмпирическую связь получаемых результатов с данными других испытаний [10].

Возможно измерять следующие характеристики:

- упругие свойства металла – например, при упругом отскоке шарика [11];
- сопротивление небольшим пластическим деформациям, т. е. свойства, аналогичные пределу текучести [12, 13];
- сопротивление значительным пластическим деформациям [14], т. е. свойство, аналогичное временному сопротивлению, измеренному у металлов, образующих шейку [15];
- сопротивление разрушению – например, при испытании на твердость царапанием, которое для большинства материалов является местным разрушением путем среза [16];
- удельную работу деформации [11];
- анизотропию сопротивления пластической деформации [11].

Таким образом, физическая природа твердости определяется зависимостями, связывающими ее с характеристиками прочности, пластичности и разрушения [17–23].

Существует большое количество методов измерения твердости, к которым применяют разные квалификации как по особенности приложенной нагрузки (статические, динамические, кинетические), так и по масштабному фактору (нано-, микро-, макро-). Используют также сочетание твердометрии с различными видами физических методов исследования поверхности металлических материалов: комбинирование измерения твердости с методами акустической эмиссии и контролем магнитной проницаемости, кинетическое акустическое склероскопирование, динамическое кинетическое индентирование и др. [10].

По способу прикладываемой нагрузки методы измерения твердости можно разделить на методы царапания, резания, отскока и вдавливания. При этом величину силы вдавливания относят либо к площади отпечатка, либо к проекции этой площади на поверхность образца [24]. Твердость материала определяют либо по глубине контакта, либо по глубине внедрения индентора.

В связи с этим в данной статье будет предпринята попытка провести обзор основных методов измерений твердости в хронологическом порядке, дать им краткую характеристику и провести их сравнительный анализ.

### **История развития методов измерения твердости материалов**

Испытания материалов на твердость впервые были проведены Ремюром в 1722 г., который предложил классифицировать материалы путем испытания их на твердость царапанием (метод склерометрии). Эту идею продолжил немецкий минеролог Моос, который в 1811 г. представил опытный метод оценки физико-механических свойств, позволяющий качественно оценить твердость материалов по возможности оставлять царапины эталонными минералами – от алмаза до талька [25].

Шкала Мооса оказалась настолько удачно подобранной, что сохраняет свое значение в минералогии до настоящего времени [26], а твердость по Моосу является качественным методом оценки твердости материала.

Количественные методы оценки твердости возникли после развития теории контактной механики в конце 19-го века на основе идей Буссинеска и Герца. Метод расчета значений прикладываемой нагрузки и возникающих деформаций в эластичном образце предложен Буссинеском, при этом нагрузку прикладывали твердым индентором [27]. Герц нашел решение задачи упругого контакта двух сфер с различными модулем упругости и радиусом. Следующим важным этапом в развитии контактной механики являются решения Снеддона, который определил отношения между нагрузкой, деформацией и формируемой контактной областью для коэффициентов пересчета функции формы индентора, а также для осесимметричных инденторов.

Продолжением идей Снеддона, Герца и Буссинеска стали разработки в области проведения испытаний на твердость статическими методами.

Только после выхода в свет в 1901 г. работы Бринелля испытания на твердость как метод определения механических характеристик получил общее признание. Метод измерения твердости, при котором вдавливание происходит при постоянной нагрузке сферическим индентором, со временем стал называться методом Бринелля.

Одной из разновидностей сферического индентирования является метод АВИ (Automated Ball Indentation) [28]. Он предполагает повторно-циклическое нагружение с постепенно увеличивающейся нагрузкой [29].

Позже Роквеллом разработан метод определения твердости, в ходе которого проводили предварительное и полное нагружение образца индентором конической формы, а твердость рассчитывали по глубине внедрения индентора.

В 1925 г. Смит и Сандланд в качестве индентора применили алмазную пирамидку с квадратным основанием, в настоящее время известную как индентор Виккерса.

Исследование пирамидального индентирования включает несколько направлений, среди которых можно отметить следующие: развитие модели гидростатического ядра Джонсона [30]; определение пластической зоны [31]; разработку эмпирических уравнений, описывающих нагрузочные кривые и позволяющие определить некоторые механические параметры материала [31]; компьютерное моделирование пирамидального индентирования материалов [31].

После появления стандартных методов измерения твердости начало развиваться направление исследования взаимосвязи твердости материалов с другими механическими характеристиками [11, 14, 18, 19, 32, 33].

Одновременно с Бринеллем российский ученый Кубасов предложил свой способ измерения твердости, который основан на вдавливании 90-градусного конуса [31].

В 1908 г. Мейер предложил измерять твердость способом, при котором предполагается, что сила относится к площади проекции отпечатка на плоскость. При увеличении глубины вдавливания твердость по Майеру является степенью от диаметра лунки и ее значение приблизительно соответствует показателю степени упрочнения материала. В 1951 г. Тейбор предложил способ построения диаграммы деформирования материала по экспериментальным данным, полученным с помощью сферического индентора, который последовательно увеличивал глубину вдавливания [34]. Тейбором были основаны два направления исследований по расчету механических свойств на основе результатов измерения твердости материалов.

Первое направление связано с измерением геометрических параметров восстановленных отпечатков. Это направление похоже на метод Бринелля, но процедура многократной «нагрузки–разгрузки» весьма трудоемка. Второе направление основано на непрерывной регистрации нагрузки на индентор и глубины вдавливания индентора [35–38]. Преимущества второго метода – значительная экономия времени и возможность автоматизации.

В дальнейшем аналогичные эксперименты провели Тейбор и Стиллвел для случая индентирования металлов коническим индентором.

Для расчета деформации под действием индентора предлагались различные формулы [39, 40], но наиболее популярной остается формула Тэйбора. В переходной зоне между упругостью и пластичностью коэффициент относительного давления изменяется как линейная функция логарифма отпечатка, а после возникновения пластической деформации его можно считать постоянным [41].

В 60-х годах 20-го века был предложен метод измерения твердости UCI (Ultrasonic Contact Impedance), по которому твердость определяют по приложенной (не снятой) нагрузке [16]. Результаты, полученные методом UCI, близки к значениям твердости, определенным по методу Виккерса. В настоящее время метод UCI используется в основном в портативных твердомерах [31].

В 70-х годах 20-го века появляется новый способ измерения твердости – метод DSI (continuous-depth-sensing indentation testing). Вначале этот метод использовали для измерения свойств тонких пленок [31] и для других специфических исследований. Твердость по методу DSI рассчитывали аналогично твердости по методу Виккерса, только площадь определяли не по диагонали отпечатка, а по заглублению индентора [31]. Метод DSI используют также для измерения модуля упругости материалов [42–47].

В конце 20-го века появился метод Мартенса [16], который позволял получать диаграмму индентирования. При кинетическом индентировании твердость определяют в процессе вдавливания индентора. В международном стандарте ISO 14577-1:2003 (аналог ГОСТ Р 8.748–2011) метод кинетического индентирования [48–50] получил наименование «метод инструментального индентирования».

Дорнер и Никс предложили метод для расчета модуля упругости и значений твердости на основе анализа данных, полученных в процессе индентирования. В этом методе используется индентор в форме цилиндра с плоской вершиной и предполагается, что на начальном этапе разгрузки характер упругого восстановления области контакта индентора с испытываемым образцом коррелирует с характером упруго-пластического поведения отпечатка.

В ходе экспериментальных исследований Оливер и Фарр выдвинули теорию о том, что кривая разгрузки нелинейна [48], и определили, что жесткость контакта меняется мгновенно и на всем протяжении снятия нагрузки. Результаты, полученные Оливером и Фарром, позволили разработать метод измерения твердости, который учитывает нелинейность начала кривой разгрузки и определяет глубину контактной поверхности.

При использовании метода инструментального индентирования возможно оценить изменение размеров области контакта под индентором, благодаря чему возможно избежать трудоемких оптических измерений, которые характерны для метода Тэйбора. В 80-х годах 20-го века этому направлению посвящено много исследований [51–55]. Описание методики проведения инструментального индентирования представлено в стандарте ГОСТ 56232–2014.

При индентировании проявляется эффект ползучести и наплыва, что значительно влияет на результаты измерения по глубине из-за вязкопластичности материала [56].

Первыми, кто обратил внимание на образование наплыва, были Норбюри и Сэмюэль, которые указали на его связь с упрочнением материала [57]. Хилл определил параметр наплыва как  $c^2$ , равный  $a^2/Dh$  (где  $D$  – диаметр отпечатка индентора,  $h$  – глубина индентирования), который зависит от степени упрочнения материала ( $a$ ). Расчеты параметра  $c^2$  численным методом представлены в работе [58].

Впоследствии развиты методы восстановления диаграммы «напряжение–деформация» на основании сопоставления их с экспериментально полученными диаграммами вдавливания [59, 60].

### Классификация методов индентирования для измерения твердости материалов

Принято условное разделение методов индентирования по масштабному фактору: микроиндентирование, макроиндентирование и наноиндентирование [26, 61]. В международном стандарте ISO 14577 («Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 2. Проверка и калибровка твердомеров») определены следующие масштабные диапазоны измерений твердости:

- нанодиапазон – усилие от 0,1 до 1960 мН, глубина индентирования  $h$  – не более 20 нм;
- микродиапазон – усилие менее 2 Н,  $h$  – более 20 нм;
- макродиапазон – усилие от 2 до 30 кН,  $h$  – более 20 нм.

Выделяют еще пикоиндентирование в случае, если глубина отпечатка не превышает несколько нанометров, а разрешение – не более 1 нм [62].

При определении микротвердости используют нагрузки в диапазоне 0,049–4,9 Н, при макротвердости – более 49 Н.

По временному фактору методы измерения твердости подразделяют на кинетические, динамические и статические.

#### Статическая твердость

Среди методов определения статической твердости материалов следует выделить методы Бринелля, Виккерса и Роквелла.

При измерении твердости по Бринеллю в качестве индентора используется стальной шарик диаметром  $D$ , который равен 10; 5 или 2,5 мм. Нагрузка при испытании может изменяться от 2500 до 30000 Н в зависимости от вида материала [10]. Отпечаток после сферического индентирования представляет собой лунку диаметром  $d$  (рис. 1, а).

В связи с тем, что при высокой твердости испытываемого материала стальной шарик при испытании по методу Бринелля может деформироваться, этот метод не используют для высокотвердых материалов (>450 НВ).

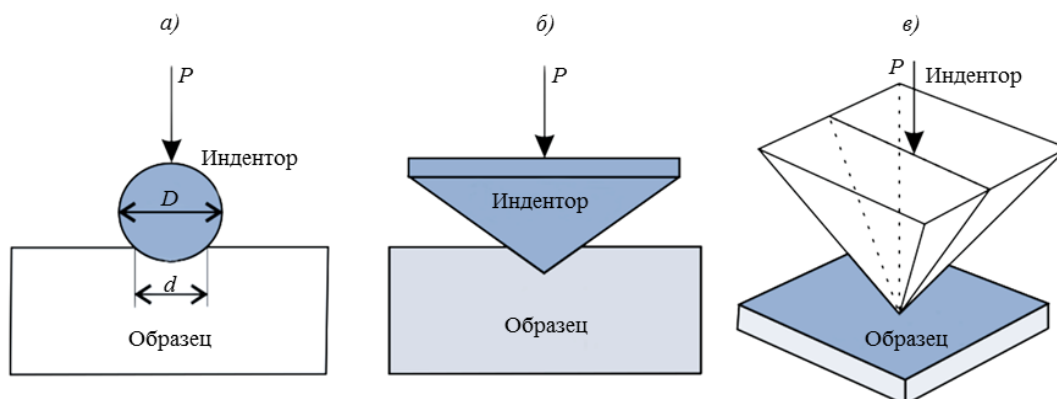


Рис. 1. Схема определения твердости:  
а – по Бринеллю (сферический индентор); б – по Роквеллу (конический индентор); в – по Виккерсу (индентор в виде пирамиды)

Метод Роквелла наименее трудоемок и наиболее универсален (рис. 1, б). Твердость по Роквеллу (HR) пропорциональна глубине вдавливания индентора  $h$  [10] и измеряется по трем шкалам (А, В, С) в зависимости от типа индентора и величины нагрузки (табл. 1).

Таблица 1

## Шкалы определения твердости по Роквеллу

Шкала	Нагрузка, Н	Индентор	Измеряемые материалы
HRA	600	Конус	Высокотвердые материалы, тонкие листы и слои (0,5–1,0 мм)
HRB	1000	Сфера	Мягкие металлы (<450 HB)
HRC	1500	Конус	Твердые материалы (>450 HB)

Для метода Виккерса нагрузка при испытании от 10 до 1000 Н осуществляется через четырехгранную пирамиду (рис. 1, в), твердость рассчитывают по формуле [10]

$$HV=1,854 \frac{P}{d^2} \text{ [МПа]}, \quad (1)$$

где  $d$  – среднее арифметическое диагоналей ромбического отпечатка после индентирования;  $P$  – нагрузка.

Этот метод используется для измерения высокотвердых материалов и тонких поверхностных слоев.

Наиболее известные методы измерения статической твердости представлены в табл. 2 [50].

Таблица 2

## Методы определения статической твердости материалов

Автор(ы) метода (год)	Характеристика метода
Герц (1881 г.)	Вдавливают полусферу в образец (Hr)
Бринелль (1900 г.)	Вдавливают шарик (HB)
Лудвик (1907 г.)	Вдавливают конус с углом 90 градусов
Шор (1920 г.)	По ГОСТ 23273–78 используют конические и сферические инденторы (HSA)
Роквелл (1922 г.)	Вдавливают конус с углом 120 градусов или шарик
Смит и Сандланд (1925 г.)	Вдавливают пирамиду с углом 136 градусов (HV)
Дрозд (1958 г.)	Вдавливают шарик

*Динамическая твердость*

В динамических методах измерения твердости оценивают расход кинетической энергии индентора и определяют твердость материала при ударе. К динамическим методам можно также условно отнести метод царапания. Измерение твердости методом склерометрии заключается в анализе профиля царапин, нанесенных на поверхность материала.

Основные методы измерения динамической твердости приведены в табл. 3 [50].

Таблица 3

## Методы определения динамической твердости материалов

Автор(ы) метода (год)	Характеристика метода
Мартель (1985 г.)	Удар бойком в виде пирамиды
Николаев	Удар бойка по сфере, прижатой к изделию (HB)
Шоппер, Бауман	Удар шариком с помощью сжатой пружины (HB)
Польди	По ГОСТ 18661–73 между испытываемой поверхностью и эталонным образцом помещают шарик, по которому наносят удар молотком (HP)
Вальцель (1934 г.)	Удар шариком, укрепленным на маятниковом копре
Шор (1906 г.)	Метод отскока бойка, падающего с определенной высоты (HSD), с использованием сферических инденторов
Кузнецов (1931 г.)	Твердость измеряют по времени затухания колебаний маятника, опирающегося двумя наконечниками на образец
Лейб (1975 г.)	ASTM A956, DIN 50156-3. Метод упругого отскока бойка, при котором измеряется соотношение скоростей бойка до и после удара (HL)

### Кинетическая твердость

Метод предполагает непрерывную регистрацию параметров процесса индентирования, с помощью которого возможно довольно точно оценивать модуль упругости, прочностные и пластические свойства материалов, прочность сцепления покрытия с основой, степень пористости [50–53].

В случае измерения кинетической твердости возможно: регистрировать скорость индентирования; использовать сверхмалые нагрузки для исследования тонких слоев (толщина которых  $>1$  мкм); испытывать материалы с плохой отражающей способностью и значительными изменениями геометрической формы отпечатка при снятии нагрузки (полимеры, полупроводники, нитриды, карбиды) и др. [50, 51].

По кривой кинетического индентирования строят кривую растяжения материала. Наиболее распространенный метод построения кривой растяжения – широко применяемый на практике метод конечных элементов (МКЭ). При его реализации обычно используют профессиональные пакеты прикладных программ – например, ANSYS [62–72].

Суть метода состоит в составлении аналитической модели упругопластического поведения материала в зоне деформации материала под индентором на основании закона Гука (на участке  $\sigma < \sigma_y$ ) и аппроксимации кривой растяжения (на участке  $\sigma > \sigma_y$ ) уравнением вида [73, 74]

$$\sigma - \sigma_y = B\varepsilon^n, \quad (2)$$

где  $\sigma_y$  – условный предел текучести;  $B, n$  – коэффициенты.

Цель подобного моделирования – определение корреляции между значениями модуля упругости, коэффициента Пуассона, предела текучести, с одной стороны, и кривой кинетического индентирования, с другой стороны. Пример конечно-элементного моделирования сферического индентирования материалов в программе ANSYS представлен на рис. 2 (стальной шарик внедряется в алюминиевый образец).

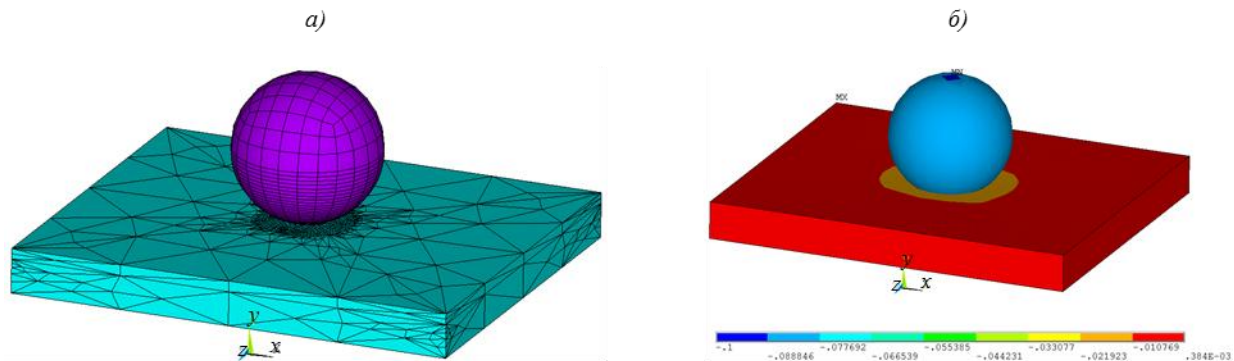


Рис. 2. Конечно-элементная модель сферического индентирования (а) и распределение перемещений по оси  $Y$  узлов модели (б)

В статье [75] автор предлагает экспресс-метод построения кривой растяжения при кинетическом индентировании.

В России не стандартизовано обозначение твердости, определяемой кинетическим методом. В зарубежных стандартах кинетическая твердость обозначается символом HU [10] и для индентирования обычно используют пирамидку Виккерса (по стандартам DIN 60359-1 и E ISO 14577-1).

### Микротвердость

Этот метод измерений используют для определения твердости небольших образцов и покрытий [50, 61].

При внедрении индентора возникают деформации, а иногда и микротрещины, которые образуют новые поверхности. В связи с этим микротвердость можно представить как сумму процессов, происходящих при ее измерении [76]:

$$H = H_{упр} + H_{пл} + H_{тр} + H_{поверхн}. \quad (3)$$

При малых нагрузках требуется много энергии на образование новой поверхности и твердость в этом случае выше, чем при большой нагрузке [76].

Измерение микротвердости используется для [26]:

- исследования структурных составляющих сплава;
- анализа градиента микротвердости по толщине поверхностного слоя;
- оценки разброса значений микротвердости в материале;
- оценки анизотропии прочностных свойств монокристалла;
- оценки микронеоднородности пластической деформации по локальным объемам материала.

Существует два способа измерения микротвердости – с учетом размера отпечатка (невосстановленная твердость) и с учетом глубины отпечатка (восстановленная твердость). Упругие деформации уменьшают значения невосстановленной твердости в сравнении с восстановленной, а навал по периметру отпечатка увеличивает это значение:

$$H \cdot h / H = h - wk / h, \quad (4)$$

где  $h$  – глубина отпечатка;  $wk$  – упругие деформации по контуру отпечатка [26].

Построение универсальной модели твердости затруднено необходимостью учета микроструктуры материала – размера зерен, вклада межзеренных границ и т. д. [77]. В работе [78] предложена формула расчета твердости по Виккерсу при температуре 298 К в случае кристаллов, в которых прочность связей между атомами мало зависит от кристаллографического направления.

Таким образом, метод микротвердости – это вдавливание индентора с небольшими нагрузками на глубину до нескольких микрометров. Метод дал возможность получения на хрупких и жестких материалах (полупроводниковых кристаллах, стеклах, керамике) пластичных отпечатков. Для того чтобы минимизировать роль человеческого фактора в этих измерениях, превзойти «оптический» предел разрешения и вовсе избавиться от трудоемкого оптического способа измерения размеров отпечатка, создали устройства автоматического нагружения и датчики (индукционные и емкостные) измерения глубины невосстановленного отпечатка. Тогда же впервые реализован метод непрерывного вдавливания с одновременной регистрацией глубины внедрения индентора  $h$  и величины нагрузки  $P$ . Метод развивался благодаря усилиям главным образом отечественных материаловедов (В. Алехин, С. Булычев, Г. Калей, А. Терновский, М. Хрущов, М. Шоршоров, Ю.И. Головин и др.) и назван методом кинетической твердости [79].

Основные методы измерения статической микротвердости представлены в табл. 4 [50].

Таблица 4

**Методы определения статической микротвердости материалов**

Автор(ы) метода (год)	Характеристика метода
Липс (1936 г.) Цейс и Ганеман (1940 г.) Хрущов, Беркович (1950 г.)	Вдавливание алмазной пирамиды. Твердость определяется как отношение нагрузки к площади поверхности отпечатка (HV)
Кнуп, Петерс, Эмерсон (1939 г.)	По ГОСТ 4545-1-2015 вдавливанием алмазной пирамиды с углами 13 и 172 градуса твердость определяют как отношение нагрузки к площади поверхности невосстановленного отпечатка, метод применяется для измерений на тонких слоях и на особо хрупких материалах
Егоров (1970 г.)	Вдавливание алмазного лезвия
Хрущов, Скворцов, Алехин и др. (1968–1973 гг.)	Вдавливание алмазной пирамиды (угол 136 градусов) с регистрацией нагрузки и глубины погружения индентора в процессе испытания

### Наноиндентирование

Среди методов измерения твердости в нанометровом масштабе можно отметить: метод склерометрии и методы вдавливания индентора в материал (наноиндентирование).

Наиболее популярным методом измерения твердости в нанометровом масштабе является метод динамического наноиндентирования. Однако в данном методе не учитывается появление пластических навалов по периметру отпечатка, что является причиной некорректного измерения твердости при малых нагрузках и, соответственно, малых глубинах внедрения индентора. Подложка оказывает влияние на механические характеристики пленок и даже при небольших глубинах проникновения испытывает упруго-пластические деформации. В случае когда твердость пленки оказывается гораздо меньше твердости подложки, материал пленки выдавливается на поверхность вдоль граней пирамидки (*pile-up*, рис. 3, *а*). Когда твердость пленки превышает твердость подложки, происходит вдавливание пленки вокруг индентора (*sink-in*, рис. 3, *б*). Подобные эффекты вызывают изменение площади контакта поверхности индентора с образцом.

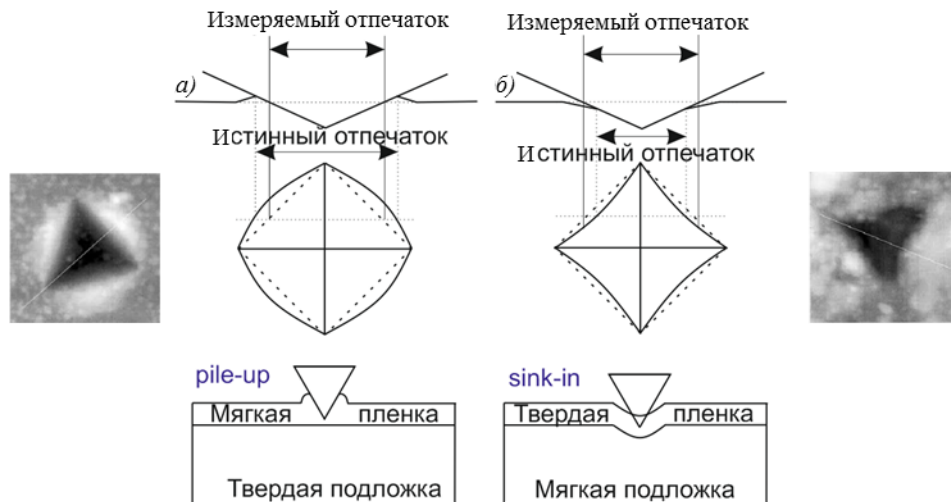


Рис. 3. Схема выдавливания (а) и вдавливания (б) материала вокруг индентора при наноиндентировании

При наноиндентировании используются инденторы различной формы, некоторые из которых представлены на рис. 4.

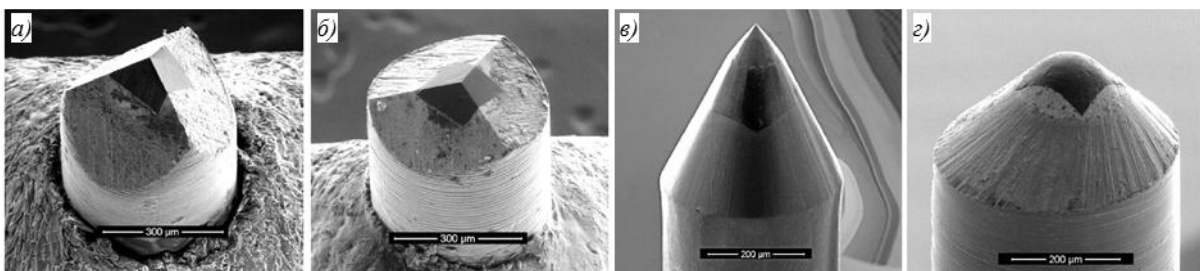


Рис. 4. Пирамидальные (а, б) и конические (в, г) инденторы для измерения твердости

Метод склерометрии используют реже методов индентирования, но он имеет некоторые преимущества:

– меньшее влияние шероховатости и дефектов материала благодаря усреднению данных при обработке царапин;

- меньший эффект упругого восстановления ширины царапины по сравнению с периметром отпечатка при индентировании;
- позволяет исследовать анизотропию механических свойств.

Наноиндентирование можно назвать универсальным методом исследования механических свойств материалов, но, безусловно, данный метод не лишен недостатков и сложностей: на результаты измерений влияет огромное количество факторов, и источником неопределенности может быть не только измерительная техника, но и методика расчетов или сам образец. К образцу предъявляются достаточно жесткие требования: например, шероховатость поверхности не должна превышать 5–10% от глубины индентирования [80], а для тонких пленок необходимо исключить влияние подложки, для этого глубина индентирования не должна превышать 10% от толщины образца [80]. Некоторые исследователи полагают, что такие ограничения физически не обоснованы [81].

Метод измерения твердости используется в различных исследованиях, некоторые из которых представлены в табл. 5.

*Таблица 5*

**Использование методов измерения твердости в научных исследованиях**

Использование методов индентирования в научных исследованиях	Литературный источник
Использование индентирования в качестве метода физико-химического анализа при изучении диаграмм состояния	[82]
Определение жаропрочности металлов и сплавов и оценка характеристик ползучести путем измерения горячей твердости	[83–87]
Исследование индентирования как способа оценки напряжений в поверхностных слоях: <ul style="list-style-type: none"> <li>– исследование распространения трещин от индентора в хрупком материале;</li> <li>– измерение напряжений в пластичных материалах;</li> <li>– использование компьютерного моделирования индентирования для расчета остаточных напряжений</li> </ul>	[26, 31, 88] [31, 34, 89, 90] [91, 92]
Определение вязкости разрушения методами индентирования	[93]
Определение термостойкости материалов методами индентирования	[31]
Исследование адгезионных свойств материалов методами индентирования	[31]
Оценка хладноломкости стали методом индентирования	[94]

**Сравнительный анализ методов индентирования и основные факторы, влияющие на результат измерения твердости**

Для определения твердости строят кривую индентирования (фактически кривую нагружения) в координатах «глубина внедрения индентора–сила сопротивления внедрению индентора» (рис. 5). Кривая имеет следующие участки:

- ветвь нагружения 1, характеризующая сопротивление материала внедрению индентора;
- горизонтальный участок 2, соответствующий выдержке образца при максимальной нагрузке;
- участок разгрузки 3;
- участок выдержки 4 при снятии 90% максимальной нагрузки;
- участок разгрузки 5 до нулевого значения (полного снятия нагрузки) [95].

Наличие этих участков соответствует рекомендациям стандартов измерения твердости по последовательности нагружения образца [10].

На диаграмме индентирования можно определить несколько характерных значений глубины проникновения индентора:

- $h_{\max}$  – глубина внедрения индентора, соответствующая максимальной нагрузке;
- $h_p$  – глубина внедрения индентора после разгрузки;
- $h_e$  – глубина внедрения индентора с учетом упругого прогиба на краю отпечатка;
- $h_b$  – глубина внедрения индентора, соответствующая окончанию выдержки при максимальной нагрузке.

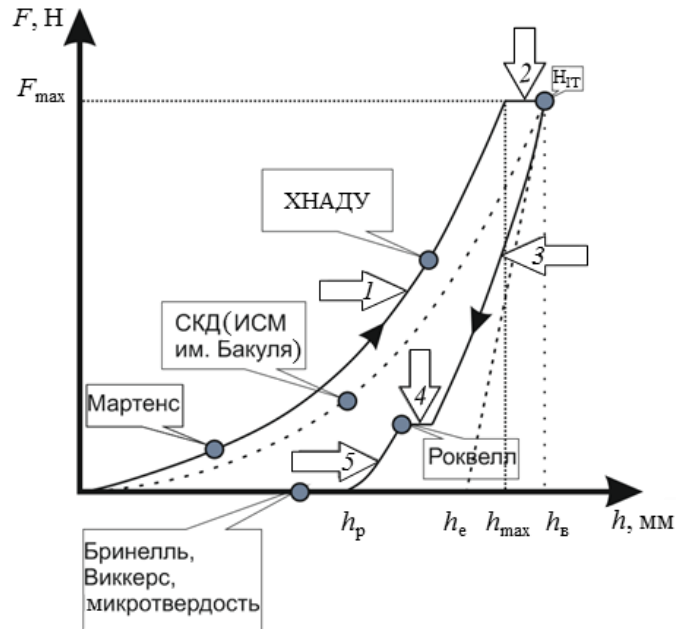


Рис. 5. Диаграмма индентирования

Диапазоны величины приложенной силы различны при разных методах испытаний, поэтому на диаграмме для сопоставления их результатов будет использована диаграмма в координатах  $F/F_{\max}$ – $h$ , которые обозначим как  $F$ – $h$  (в этих координатах отсутствует номинальная величина силы нагружения) [96].

По глубине внедрения  $h_b$ , соответствующей окончанию выдержки при максимальной нагрузке, определяют твердость при индентировании  $H_{ГТ}$  (методика Оливера и Фарра). При этом твердость по методике Оливера и Фарра определяют как отношение максимальной нагрузки индентирования к площади проекции контакта индентора с материалом при исключении упругого прогиба на краю отпечатка (т. е. упругой составляющей). С исключением упругого прогиба измеряют также твердость по методу среднего контактного давления (СКД), предложенного ИСМ им. Бакуля [10]. Если провести кривую, соответствующую изменению нагрузки с исключением упругого прогиба, из начала координат в точку окончания выдержки при максимальной нагрузке (на рис. 5 – пунктирная линия), то результаты определения твердости названными методами будут принадлежать этой кривой.

Твердость, измеренная по методу Роквелла (по технологии нанесения и измерения отпечатка), разместится на ветви разгрузки в точке окончания площадки 4. Микротвердость и твердость, измеренные методами Бринелля и Виккерса, позволяют измерить отпечаток после полного разгружения, поэтому на диаграмме индентирования займут место левее величины  $h_p$  на оси абсцисс.

На основной ветви нагружения должны разместиться результаты измерения твердости по методу Мартенса [95] и по предложенным Харьковским национальным автомобильно-дорожным университетом (ХНАДУ) методам измерения поверхностной и объемной твердости [97].

Следует отметить, что названные методы позволяют определять твердость в макро-, микро- и нанодиапазонах.

Таким образом, с помощью диаграммы индентирования можно сопоставить результаты измерения твердости различными методами [96].

Среди факторов, влияющих на измерение твердости, следует отметить следующие: величину нагрузки, расположение отпечатка, вибрации, наклеп поверхности образца при полировке и других механических воздействиях, наклеп во время индентирования, относительную погрешность измерения размеров отпечатка и др.

Рассмотрим более подробно два основных фактора, которые могут внести наибольшую погрешность при измерении твердости материалов – нагрузку и расположение отпечатка.

По научно-техническим литературным данным [98], при меньших нагрузках значения твердости получаются более высокими (рис. 6).

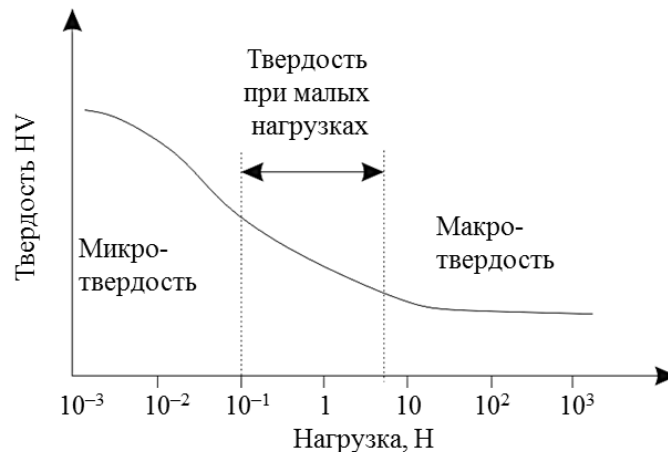


Рис. 6. Зависимость твердости по Виккерсу HV от испытательной нагрузки [98]

При индентировании возникает пластическая деформация вокруг отпечатка и происходит упрочнение внутри деформированного объема. Если отпечатки находятся близко друг к другу, то это приводит к завышенным значениям твердости. Если отпечаток находится недалеко от края образца, то результаты измерения твердости будут занижены.

При всех методах испытания на твердость очень важно подготовить поверхность образца. Чем меньше глубина вдавливания индентора, тем меньше должна быть шероховатость поверхности.

При определении твердости (кроме нано- и микротвердости) отпечатки должны быть по размерам существенно больше, чем размеры зерен и других структурных составляющих материала.

В табл. 6 представлены сведения по соответствию отечественных и зарубежных стандартов по методам измерения твердости [10].

Имеющиеся различия в стандартах ГОСТ, ISO и ASTM достаточно существенны и устранение этих несоответствий при очередных пересмотрах отечественных стандартов является актуальной задачей [99].

Таблица 6

Таблица соответствия отечественных и зарубежных стандартов по методам измерения твердости

ГОСТ	ISO, DIN	ASTM
ГОСТ 9012–59 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю»	ISO 6506 «Hardness test – Brinell test» DIN 50351 «Harteprüfung nach Brinell»	ASTM E 10-98 «Brinell Hardness of Metallic Materials»
ГОСТ 2999–75 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу»	ISO 6507 «Hardness test – Vickers test». Part 1: HV5 to HV100; Part 2: HV0,2 to less than HV5 DIN 50133 «Harteprüfung nach Vickers»	ASTM E 92-82 «Vickers Hardness of Metallic Materials»
ГОСТ 9013–59 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу»	ISO 6508 «Hardness test – Rockwell test – scales A, B, C, D, E, F, G, H, K» DIN 50103/1 «Harteprüfung nach Rockwell – Verfahren C, A, B, F»	ASTM E 18-98 «Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials»
ГОСТ 22975–78 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (по Супер-Роквеллу)»	ISO 1024 «Hardness test – Rockwell superficial test – scales 15N, 30N, 45N, 15T, 30T, 45T» DIN 50103/2 «Harteprüfung nach Rockwell – Verfahren N und T»	ASTM E 18-98 «Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials»
ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников»	ISO 6507 «Hardness test – Vickers test». Part 3: to less than HV0, 2 DIN 50133 «Harteprüfung nach Vickers»	ASTM E 384-89 «Microhardness of Materials» ASTM 1474 «Knoop hardness»
ГОСТ 22761–77 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия»	–	ASTM E 110-82 «Indentation Hardness of Metallic Materials by Portable Hardness Testers»
ГОСТ 21318–75 «Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками»	–	ASTM E 448-82 «Sclerockope Hardness Testing of Metallic Materials»

### Заключения

Проведенный обзор научно-технической литературы по методам измерения твердости материалов показывает, что индентирование является одним из основных способов механических испытаний, который отличается простотой использования и большими возможностями для определения напряжений в поверхностных слоях, вязкости разрушения, термостойкости материалов, проведения исследований структурных составляющих материала, адгезионных и упругих свойств, сопротивления пластическим деформациям, сопротивления разрушению, удельной работы деформации, анализа градиента твердости по толщине поверхностного слоя, оценки анизотропии прочностных свойств монокристалла, хладноломкости стали, микронеоднородности пластической деформации по локальным объемам материала, физико-химического анализа при изучении диаграмм состояния и т. д.

При измерении твердости методом индентирования необходимо учитывать множество факторов, влияющих на результаты эксперимента, основными из которых являются: величина нагрузки, расположение отпечатка, вибрация, наклеп поверхности образца при полировке и других механических воздействиях, погрешность измерения размеров отпечатка и др.

Наиболее перспективным является кинетический метод измерения твердости, который позволяет проводить ряд исследований по выявлению кинетики микропластической деформации, оценке скорости внедрения индентора в образец, испытанию материалов с сильными изменениями размеров отпечатка после снятия нагрузки и т. д.

Особый интерес представляет численное моделирование индентирования материалов, которое дает количественную оценку распределения полей напряжений и деформаций под индентором на всех этапах нагружения, и развитие методов построения расчетных кривых растяжения материала по результатам измерений твердости.

**Библиографический список**

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. №1. С. 36–39.
3. Бузник В.М., Каблов Е.Н., Кошурина А.А. Материалы для сложных технических устройств арктического применения // *Научно-технические проблемы освоения Арктики*. М.: Наука, 2015. С. 275–285.
4. Ильин А.А., Скворцова С.В., Спектор В.С., Куделина И.М., Орешко Е.И. Взаимосвязь структуры и комплекса механических свойств в титановом сплаве ВТ6 // *Титан*. 2011. №1 (31). С. 26–29.
5. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Деформация и разрушение как процессы изменения объема, площади поверхности и линейных размеров в нагружаемых телах // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2016. №8 (44). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.10.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-11-11.
6. Коллеров М.Ю., Гусев Д.Е., Орешко Е.И., Бурнаев А.В. Повышение характеристик работоспособности медицинских имплантатов из сплавов титана и никелида титана методом термической обработки // *Технология легких сплавов*. 2013. №3. С. 40–46.
7. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Площадь свободной поверхности как критерий хрупкого разрушения // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №2 (47). С. 69–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-69-79.
8. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2017. №10 (58). Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 25.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-11-11.
9. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. М.: Машиностроение, 1979. 191 с.
10. Колмаков А.Г., Терентьев В.Ф., Бакиров М.Б. Методы измерения твердости. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Интернет Инжиниринг, 2005. 150 с.
11. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. 3-е изд. М.: Оборонгиз, 1974. 367 с.
12. Витман Ф.Ф., Златин Н.А. Определение предела текучести методом внедрения конуса с использованием профилографа // *Заводская лаборатория*. 1947. №8. С. 990–996.
13. Пилипчук Б.И. Исследования в области измерения твердости // *Труды метрологических институтов СССР*. 1967. Вып. 91 (151). С. 121–125.
14. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. М.: Машиностроение, 1971. 200 с.
15. Авдеев Б.А. Техника определения механических свойств металлов. М.: Машиностроение, 1965. 488 с.
16. Давиденков Н.Н. Некоторые проблемы механики материалов. Л.: Лениздат, 1943. 152 с.
17. Борисенко В.К. О связи твердости с сопротивлением пластической деформации при нормальных и высоких температурах // *Термопрочность материалов и конструкционных элементов*. Киев: Наукова думка, 1965. С. 61–68.
18. Дрозд М.С. Определение механических свойств металлов без разрушения. М.: Металлургия, 1965. 171 с.
19. Соловьев В.В., Гоголинский К.В., Усеинов С.С., Усеинов А.С., Львова Н.А. Методы измерения механических свойств материалов с нанометровым разрешением и их метрологическое обеспечение // *Тр. науч. сессии НИЯУ МИФИ-2010*. 2010. Т. 2. С. 233.
20. Соловьев В.В., Гоголинский К.В., Усеинов С.С., Львова Н.А., Усеинов А.С., Кулибаба В.Ф. Особенности применения метода наноиндентирования для измерения твердости на наномасштабе // *Нанотехника. Инженерный журнал*. 2008. №1 (13). С. 111–115.
21. Тылевич И.Н., Гликман Л.А. О влиянии остаточных напряжений на твердость металла // *Заводская лаборатория*. 1968. №10. С. 1239–1242.
22. Тылевич И.Н., Гликман Л.А. Метод определения предела текучести металла вдавливанием пологой пирамиды // *Заводская лаборатория*. 1961. №27. С. 738–743.
23. Хрущов М.М. О выборе основного метода определения твердости особо твердых тел // *Заводская лаборатория*. 1947. №9. С. 1121–1128.

24. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. М.: Машиностроение, 2007. 496 с.
25. Лебедева С.И. Микротвердость минералов. М., 1997. 118 с.
26. Хасанов О.Л., Струц В.К., Соколов В.М. и др. Методы измерения микротвердости и трещи-  
нотстойкости наноструктурных керамик: учеб. пособие. Томск: Томск. политех. ун-т, 2011.  
101 с.
27. Boussinesq J. Applications des potentiels a l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides elas-  
tiques. Paris: Gauthier-Villars, 1885. 734 p.
28. Haggag F.M. Small specimen test techniques applied to nuclear reactor vessel thermal annealing  
and plant life extension: ASTM STP 1204. American Society for Testing and Materials, 1993.  
P. 27–44.
29. Haggag F.M., Nastad R.K. Innovative approaches to irradiation damage, and fracture analysis. The  
American Society of Mechanical Engineers, 1989. P. 179–181.
30. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510 с.
31. Федосов С.А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентиро-  
ванием: Современные зарубежные методики. М.: МГУ, 2004. 100 с.
32. Марковец М.П. Исследования в области измерения твердости // Труды метрологических  
институтов СССР. 1967. Вып. 91 (151). С. 58.
33. Давиденков Н.Н. Динамические испытания металлов. М.–Л.: Государственное издатель-  
ство, 1929. 366 с.
34. Tabor D. The hardness of metals. Oxford: Clarendon press, 1951. 171 p.
35. Булычев С.И., Алехин В.И. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора.  
М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
36. Бакиров М.Б., Потапов В.В. Феноменологическая методика определения механических  
свойств корпусных сталей ВВЭР по диаграмме вдавливания шарового индентора // Завод-  
ская лаборатория. Диагностика металлов. 2000. Т. 66. №12. С. 35–44.
37. Бакиров М.Б., Потапов В.В., Яровой Г.О. и др. Определение характеристик механических  
свойств металла оборудования атомных электростанций безобразцовыми методами по ха-  
рактеристикам твердости: РД ЭО 0027-94. М.: Росэнергоатом, 1994. 15 с.
38. Bakirov M.B. Modifiziert des Harteproofverfahren // Kontrolle. 1994. №. 10. P. 120.
39. Martens A. Handbuch der materialienkunde fur den Maschinenbau. Julius Springer, 1898. Vol. 1.  
598 p.
40. Ahn J.H. Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentations examination of  
strain definition and pileup effect // Journal of Materials Research. 2001. Vol. 16. №. 11.  
P. 3170–3178.
41. Johnson K.L. The correlation of indentation experiments // Journal Mechanical Physics of Solids.  
1970. Vol. 19. P. 115–126.
42. Булычев С.И., Алехин В.П., Шоршоров М.Х., Терновский А.П. Исследование механических  
свойств материалов с помощью кинетической диаграммы «нагрузка–глубина отпечатка»  
при микровдавливании // Проблемы прочности. 1976. №9. С. 79–83.
43. Терновский А.П., Алехин В.П., Шоршоров М.Х. и др. О микромеханических испытаниях  
материалов путем вдавливания // Заводская лаборатория. 1973. №10. С. 1242–1246.
44. Булычев С.И., Алехин В.П., Шоршоров М.Х. и др. Определение модуля Юнга по диаграмме  
вдавливании индентора // Заводская лаборатория. 1975. Т. 41. №9. С. 1137–1141.
45. Kleesattel C. Resonant Sensing Devices: pat. US3153338A; filed 22.11.61; publ. 20.10.64.
46. Шоршоров М.Х., Булычев С.И., Алехин В.П. Работа упругой и пластической деформации  
при вдаливании индентора // Доклады Академии наук СССР. 1981. Т. 259. №4. С. 839–842.
47. Булычев С.И., Алехин В.П. Метод кинетической твердости и микротвердости в испытании  
вдавливании индентора // Заводская лаборатория. 1987. №53. С. 76–80.
48. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus  
using load and displacement sensing indentation experiments // Journal of Materials Research.  
1992. Vol. 6. P. 1564–1583.
49. Haggag F.M. Structural integrity evaluation based on an innovative field indentation microprobe.  
ASME PVP, 1989. Vol. 170. P. 101–107.
50. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. 230 с.
51. Семин А.М. Определение механических свойств металлов по характеристикам твердости.  
М.: Современный гуманитар. ун-т, 2000. 152 с.

52. Матюнин В.М. Методы и средства безобразцовой экспресс-оценки механических свойств конструкционных материалов. М.: МЭИ, 2001. 94 с.
53. Матюнин В.М., Воков П.В. Испытания материалов царапанием // Технология металлов. 2000. №2. С. 27–30.
54. Лаврентьев А.И. К методике определения сопротивления царапанию // Машиноведение. 1974. №6. С. 94–99.
55. Марковец М.П., Матюнин В.М., Шабанов В.М. Переносные приборы для измерения твердости и механических свойств // Заводская лаборатория. 1989. Т. 55. №12. С. 73–76.
56. Huber N. On the determination on mechanical properties using the indentation // Test FZKA-Report 5850. Forschungszentrum Kerlsruhe GmbH, 1996. P. 51–55.
57. Norbury A., Samuel T. The recovery and sinking-in or piling-up of material in the Brinell test, and the effect of these factors on the correlation of the Brinell with certain other hardness tests // Journal of The Iron Steel Institute. 1928. Vol. 117. P. 673–687.
58. Mesarovic S.D., Fleck N.A. Spherical indentation of elastic-plastic solid // Proceeding of the royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1999. Vol. 455. Issue 1987. P. 2707–2728.
59. Бакиров М.Б. Математическое моделирование процесса вдавливания сферы в упругопластическое полупространство // Заводская лаборатория. 2001. №1. С. 37–47.
60. Lee H., Pharr G.M. Numerical approach to spherical indentation techniques for material property evaluation // Journal of the mechanics and physics of solid. 2005. Vol. 53. P. 2037–2069.
61. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов: учеб. для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. М.: МИСИС, 1998. 400 с.
62. Головин Ю.И. Наноиндентирование как средство комплексной оценки физико-механических свойств материалов в субмикрообъемах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. №1. С. 45–59.
63. Коллеров М.Ю., Гусев Д.Е., Орешко Е.И. Экспериментально-теоретическое обоснование выбора метода и имплантатов для устранения воронкообразной деформации грудной клетки // Научные труды (Вестник МАТИ). 2012. №19 (91). С. 331–336.
64. Гусев Д.Е., Коллеров М.Ю., Рудаков С.С., Королев П.А., Орешко Е.И. Оценка биомеханической совместимости имплантируемых опорных пластин из сплавов на основе титана и никелида титана методом компьютерного моделирования // Титан. 2011. №3 (33). С. 39–44.
65. Коллеров М.Ю., Усиков В.Д., Куфтов В.С., Гусев Д.Е., Орешко Е.И. Медико-техническое обоснование использования титановых сплавов в имплантируемых конструкциях для стабилизации позвоночника // Титан. 2013. №1 (40). С. 39–45.
66. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Математическое моделирование деформирования конструкционного углепластика при изгибе // Авиационные материалы и технологии. 2016. №2 (41). С. 50–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-50-59.
67. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Критические напряжения потери устойчивости в гибридных слоистых пластинах // Материаловедение. 2016. №11. С. 17–21.
68. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н., Терентьев В.Ф., Слизов А.К. Построение диаграмм деформирования в трехмерном пространстве  $\sigma$ - $\epsilon$ - $t$  // Авиационные материалы и технологии. 2017. №1 (46). С. 61–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-61-68.
69. Antipov V.V., Oreshko E.I., Erasov V.S., Serebrennikova N.Y. Hybrid laminates for application in north conditions // Mechanics of Composite Materials. 2016. Vol. 52. No. 5. P. 973–990.
70. Коллеров М.Ю., Егорова М.В., Орешко Е.И., Ртищев С.Н., Карачунский Г.М., Радванская С.Н. Экспериментально-теоретическое обоснование алгоритма раннего ортодонтического лечения детей с односторонней расщелиной губы и неба несъемными аппаратами // Стоматология детского возраста и профилактика. 2011. Т. X. №1 (36). С. 23–27.
71. Орешко Е.И., Ерасов В.С. Численные исследования устойчивости пластин с шарнирно закрепленными поперечными кромками // Деформация и разрушение материалов. 2018. №6. С. 7–11.
72. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Качан Д.В., Лашов О.А. Исследования устойчивости стержней и пластин при сжатии с защемленными поперечными кромками // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №9 (69) Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-61-70.
73. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение, 2009. 312 с.

74. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрорегионах, тонких приповерхностных слоях (обзор) // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. Вып. 12. С. 2113–2141.
75. Кухарева И.Е. Применение индентирования для построения кривой растяжения // Вестник ХНАДУ. 2011. Вып. 54. С. 33–39.
76. Новиков Н.В. Синтетические сверхтвердые материалы в 3 т. Киев: Наукова думка, 1986. Т. 1: Синтез сверхтвердых материалов. 280 с.
77. Масленникова Г.Н., Мамаладзе Р.А., Мидзута С. Керамические материалы. М.: Стройиздат, 1991. 320 с.
78. Муханов В.А., Куракевич А.А., Соложенко В.Л. Взаимосвязь твердости и сжимаемости веществ с их строением и термодинамическими свойствами // Сверхтвердые материалы. 2008. №6. С. 10–22.
79. Беркович Е.С., Крапошина Л.Б. Новый прибор ИМАШ – глубиномер интерференционный – для испытания на микротвердость по глубине отпечатка // Новое в области испытаний на микротвердость. М.: Наука, 1974. С. 93–100.
80. Fisher-Cripps A.C. Nanoindentation. NY.: Springer, 2002. 198 p.
81. Hay J.L., O'Hern M.E., Oliver W.C. The importance of contact radius for substratein dependent property measurement of thin films // Materials Research Society Symposium Proceedings. 1998. No. 522. P. 27–32.
82. Курнаков Н.С. Избранные труды в 2 т. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 595 с.
83. Борисенко В.А. Прочность и твердость тугоплавких материалов при высоких температурах. Киев: Наукова думка, 1984. 212 с.
84. Лозинский М.Г. Высокотемпературная металлография. М.: Metallurgizdat, 1956. 312 с.
85. Осипов К.А. Вопросы теории жаропрочности металлов и сплавов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 285 с.
86. Савицкий Е.М. Влияние температуры на механические свойства металлов и сплавов. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 300 с.
87. Бетанели А.И. Твердость стали и твердых сплавов при повышенных температурах. М.: Машгиз, 1958. 95 с.
88. Новиков Н.В., Дуб С.Н., Булычев С.И. Методы микроиспытаний на трещиностойкость // Заводская лаборатория. 1988. Т. 54. №7. С. 60–67.
89. Розенберг А.М., Хворостухин Л.А. Твердость и напряжения в пластически деформированном теле // Журнал технической физики. 1955. №25. С. 312–322.
90. Гоголинский К.В., Кондратьев А.В., Потапов А.И., Сясько В.А., Уманский А.С. Методические и метрологические аспекты измерения механических свойств материалов методом инструментального индентирования // Контроль. Диагностика. 2016. №8. С. 16–21.
91. Taljat B., Pharr G.M. Measurement of Residual Stresses by Load and Depth Sensing Spherical Indentation // Thin Films. Stresses and Mechanical Properties: Materials Research Society Symposium Proceedings. 2000. No. 594. P. 519–524.
92. Taljat B., Zacharia T., Pharr G.M. Fundamentals of Nanoindentation and Nanotribology. Materials Research Society Symposium Proceedings. 1998. No. 522. P. 33.
93. Rudnayova E., Dusza J., Pesek L., Naviar M. Engineering Ceramics // Higher Reliability Through Processing. 1996. P. 409–417.
94. Савицкий Ф.С., Захаров И.А., Вандышев Б.А. Исследование хладноломкости стали по параметрам конических отпечатков // Заводская лаборатория. 1949. №9. С. 1096–1099.
95. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. М.: Машиностроение, 2007. 496 с.
96. Мощенок В.И., Костина Л.Л. Диаграмма индентирования и современные методы измерения твердости // Вестник КрНУ им. М. Остроградского. 2011. №5. С. 16–18.
97. Moshenok V.I. Modern methods of materials makro-, mikro-, nanohardness measuring // Engineering of Surface and Wares Renovation // 9th International Scientific and Technical Conference. Yalta–Kiev, 2009. P. 139–140.
98. Симон Г., Тома М. Прикладная техника обработки поверхности: справочник. Челябинск: Metallurgiya, 1991. 368 с.
99. Гудков А.А. Стандартизация методов определения твердости металлов // Технология металлов. 2004. №3. С. 35–39.