

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620.178.151.6

СОВРЕМЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ТВЕРДОСТИ

В.И. Мощенок, профессор, к.т.н., ХНАДУ

*Аннотация.* Разработан новый подход к классификации методов определения твердости материалов, основанный на величине показателя степени глубины внедрения индентора в расчетной формуле.

*Ключевые слова:* твердость, ползучесть, глубина внедрения индентора.

## СУЧАСНА КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ

В.І. Мощенок, професор, к.т.н., ХНАДУ

*Анотація.* Розроблено новий підхід до класифікації методів визначення твердості матеріалів, що ґрунтується на значенні показника степеня глибини проникнення індентора в розрахунковій формулі.

*Ключові слова:* твердість, повзучість, глибина втискання індентора.

## MODERN CLASSIFICATION OF HARDNESS DETERMINATION METHODS

V. Moshchenok, Professor, Candidate of Technical Science, KhNAHU

*Abstract.* A new approach concerning the classification of materials hardness determination methods, based on the value of indentation depth exponent in the calculation formula is developed.

*Key words:* hardness, creep, indentation depth.

## Введение

Одним из основных свойств материала, определяющих надежность и долговечность механизмов и конструкций, является твердость. Количество деталей в современном автомобиле стремительно приближается к десяти тысячам, а иногда и превышает эту отметку, поэтому чрезвычайно важно разобраться, что представляет собой понятие «твердость» и какие методы оно объединяет.

## Анализ публикаций

Понятие твердости известно человечеству с давних времен. В 1881 г. один из основоположников теории твердости Генрих Герц от-

мечал, что твердость – «это настолько общепонятное свойство, что каждый считает, что знает о твердости не меньше, чем сам я» [1]. Он же ввел одно из первых понятий твердости, которую рассматривал как нагрузку, соответствующую началу пластической деформации при вдавливании шара в плоскость [2]. Проанализировав имеющуюся информацию о твердости, Брокгауз и Эфрон в своей знаменитой энциклопедии дают в 1901 г. следующее определение этого понятия: «твердость рассматривается как сопротивление тела углублению, производимому в нем другим телом, более твердым» [3]. Сегодня существует много методов определения твердости как по восстановленному отпечатку, так и при нагруженном инденторе, по-

этому необходимо провести классификацию этих методов.

В основу классификации методов определения твердости, после многолетнего обсуждения, было положено разделение методов по диапазонам в зависимости от применяемых нагрузок и, соответственно, глубин внедрения индентора в исследуемый материал. В результате проведенных дискуссий, в 2002 г. в международном стандарте ISO 14577 было закреплено распределение методов определения твердости по диапазонам, которое приведено в табл. 1 [4].

Макродиапазон включает в себя все методы определения твердости, при осуществлении которых используются нагрузки на индентор от 2 до 30000 Н. В этот промежуток попадают известные стандартизованные методы определения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу, несмотря на то, что они используют для расчета значений твердости параметры восстановленного отпечатка, т.е. фактически оценивают не твердость, а пластичность исследуемого металла. К микродиапазону относятся методы, для реализации которых применяются нагрузки меньше 2 Н, а глубина внедрения индентора при этом больше 0,2 мкм. Нанодиапазон характеризуется любыми методами определения твердости, при которых глубина внедрения индентора не превышает 0,2 мкм. Стремительно развивающееся в последнее время наноиндентирование часто выходит за пределы 0,2 мкм глубины внедрения индентора. Поэтому такую твердость материала правильнее называть микротвердостью, а не нанотвердостью, как часто приводится в современных публикациях. Вышеуказанный стандарт ориентирован преимущественно на определение твердости при нагруженном инденторе, т.е. с учетом упругой и пластической составляющих твердости.

## Цель и постановка задачи

Для более полного понимания сути понятия, а также правильной интерпретации данных, полученных при испытаниях на твердость, в данной работе поставлена задача разработать современный подход к классификации характеристик, определяемых при испытаниях.

## Методы определения твердости материалов

Исходя из приведенной в табл. 1 логики деления методов определения твердости на диапазоны, вполне естественно предположить появление в ближайшем будущем пикодиапазона ( $h < 1$  нм) или даже фемтодиапазона ( $h < 1$  пм).

Твердость и другие свойства, анализируемые в процессе ее определения разными методами, как правило, рассчитываются по формулам, включающим глубину внедрения индентора в испытываемую поверхность в той или иной степени. Основные критерии оценки твердости, в зависимости от показателя степени глубины внедрения индентора, условно можно разделить на 3 группы:

1. Критерии оценки твердости 1-й степени, когда в формуле расчета твердости применяется  $h^1$ :

$$H = f(h^1). \quad (1)$$

2. Критерии оценки твердости 2-й степени, когда в формуле расчета твердости применяется  $h^2$

$$H \approx f(h^2). \quad (2)$$

3. Критерии оценки твердости 3-й степени, когда в формуле расчета твердости применяется  $h^3$

$$H \approx f(h^3). \quad (3)$$

Таблица 1 Распределение методов определения твердости по диапазонам

Наименование диапазона	Величина применяемых нагрузок на индентор $F$ , Н	Глубина внедрения индентора в исследуемый материал $h$ , мкм
Макродиапазон	$2 \leq F \leq 30\ 000$	не регламентирована
Микродиапазон	$F < 2$	$h > 0,2$
Нанодиапазон	не регламентирована	$h \leq 0,2$

К критериям первого уровня можно отнести характеристики, по которым с определенными допущениями оценивается твердость, т.е. способность материала сопротивляться при внедрении в него индентора: диаграмма индентирования, работа индентирования, ползучесть, вязкоупругое восстановление материала, твердость по Роквеллу, твердость по Шору (рис. 1). Физическая сущность критериев оценки твердости первого уровня представлена в табл. 2.

К критериям второго уровня оценки твердости относятся (рис. 2): твердость по Бринеллю, твердость по Виккерсу, микротвердость, среднее контактное давление, поверхностная твердость, твердость по Мартенсу, твердость индентирования, твердость по Мейеру. Физическая сущность критериев оценки твердости второго уровня представлена в табл. 3.



Рис. 1. Критерии оценки твердости 1-й степени

Таблица 2 Физическая сущность критериев оценки твердости 1-й степени

Название критерия	Сущность критерия
Диаграмма индентирования	Показывает зависимость глубины внедрения индентора от нагрузки на индентор
Работа индентирования	Равна площади под нагрузочной ветвью диаграммы индентирования
Твердость по Шору	Показывает зависимость глубины внедрения индентора от максимальной нагрузки
Твердость по Роквеллу	Равна относительному изменению глубины внедрения индентора при разных нагрузках в условных единицах и характеризует пластическую составляющую твердости при минимальной предварительной нагрузке
Ползучесть	Показывает изменение глубины внедрения индентора в процессе нагрузки под действием постоянной максимальной нагрузки в определенном интервале времени
Вязкоупругое восстановление отпечатка в процессе разгрузки	Показывает изменение глубины внедрения индентора в процессе разгрузки при выдержке в определенном интервале времени с нагрузкой, равной 10–20 % от максимальной

Таблица 3 Физическая сущность критериев оценки твердости 2-й степени

Название критерия	Сущность критерия
Твердость по Бринеллю	Отношение нагрузки к площади поверхности сферического отпечатка
Твердость по Виккерсу	Отношение нагрузки к площади поверхности пирамидального отпечатка
Микротвердость по ГОСТ 9450-76	Отношение нагрузки, величиной до 2 Н, к площади поверхности пирамидального отпечатка
Твердость по Мейеру	Отношение нагрузки к площади проекции поверхности отпечатка
Твердость индентирования	Отношение максимальной нагрузки к площади проекции контакта индентора и материала
Среднее контактное давление	Отношение нагрузки к площади проекции контакта индентора и материала во всех точках нагрузочной ветви диаграммы индентирования
Твердость по Мартенсу	Отношение фиксированной нагрузки к площади внедренной в материал части индентора
Поверхностная твердость	Отношение нагрузки к площади внедренной в материал части индентора во всех точках нагрузочной ветви диаграммы индентирования

Таблица 4 Физическая сущность критериев оценки твердости 3-й степени

Название критерия	Сущность критерия
Твердость по Русселю	Отношение нагрузки к объему восстановленного отпечатка
Твердость по Холлнагелю	Отношение нагрузки к объему восстановленного отпечатка
Твердость по Шпету	Отношение максимальной нагрузки к произведению поверхности и глубины восстановленного отпечатка
Твердость по Мартелю	Отношение работы к объему восстановленного отпечатка
Объемная твердость	Отношение нагрузки к объему внедренной в материал части индентора во всех точках нагрузочной ветви диаграммы индентирования

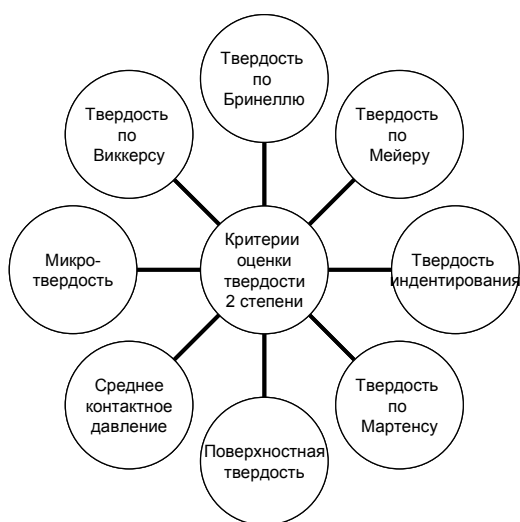


Рис. 2. Критерии оценки твердости 2-й степени

Третий уровень оценки твердости характеризуют такие критерии (рис. 3): твердость по Русселю, твердость по Холлнагелю, объемная твердость, твердость по Мартелю, твердость по Шпету.

Физическая сущность критериев оценки твердости третьего уровня представлена в табл. 4.

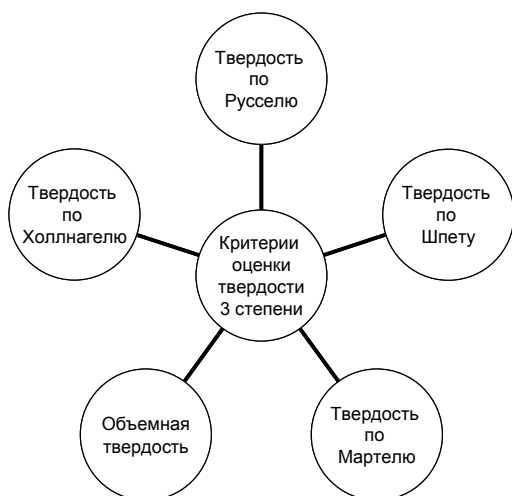


Рис. 3. Критерии оценки твердости 3-й степени

## Выводы

Общепринятая классификация способов расчета твердости, основанная на уровне прилагаемой нагрузки и глубине индентирования, не отражает современного понимания этого свойства и не учитывает весь объем информации, получаемой при испытаниях. В данной работе предложен новый подход к разделению существующих методов определения механических характеристик материалов, которые могут быть получены в процессе испытаний на твердость. Такая классификация возможна только на основании особенностей применяемых расчетных методик с учетом показателя степени глубины внедрения индентора в материал.

## Литература

1. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов / В.К. Григорович. – М. : Наука, 1976. – 230 с.
2. Hertz Н. Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte / Н. Hertz. – Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes. – Berlin, 1882. – P. 174–196.
3. Энциклопедический словарь / под ред. Н.Н. Арсеньева, Е.Е. Петрушевского : Изд-во Ф.А. Брокгауз, И.А. Эфрон. – С.Пб. : Типогр. Акц. о-ва «Изд. дело». – Брокгауз – Эфрон. – 1890 – 1907. – Т.х32а. – 1901. – С. 706–707.
4. ISO 14577 Metallic Materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1: Test method.

Рецензент: М.А. Подригало, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 18 марта 2010 г.