

ТВЁРДОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. И. Красовский¹⁾, А. В. Васин¹⁾, М. В. Мелеховец¹⁾

¹⁾ Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь, vikras@iseu.by

Твёрдость металлов и сплавов как комплексный параметр, определяющий их эксплуатационные свойства. Рассмотрены факторы, влияющие на твёрдость: химический состав, тип кристаллической решётки, микроструктура, дефекты, а также методы термической и механической обработки. Приведены эмпирические зависимости между твёрдостью и характеристиками материалов, такими как трещиностойкость, предел выносливости и усталостная прочность. Проанализированы методы измерения твёрдости (Бринелля, Роквелла, Виккерса, Шора и др.), их преимущества и недостатки. Особое внимание уделено применению материалов в машиностроении, электронике и энергетике, на основе знаний их твёрдости.

Ключевые слова: твёрдость; металлы; сплавы; методы измерения; микроструктура; эксплуатационные свойства.

HARDNESS OF STRUCTURAL MATERIALS

V. I. Krasovsky¹⁾, A. V. Vasin¹⁾, M. V. Melekhovets¹⁾

¹⁾ International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Dolgobrodskaya str., 23/1, 220070, Minsk, Belarus, vikras@iseu.by

Hardness of metals and alloys as a complex parameter determining their operational properties. The factors influencing hardness are considered: chemical composition, type of crystal lattice, microstructure, defects, as well as methods of thermal and mechanical processing. Empirical dependences between hardness and material characteristics such as crack resistance, endurance limit and fatigue strength are given. The methods of hardness measurement (Brinell, Rockwell, Vickers, Shore, etc.), their advantages and disadvantages are analyzed. Special attention is paid to the use of materials in mechanical engineering, electronics and energy, based on knowledge of their hardness.

Keywords: hardness; metals; alloys; measurement methods; microstructure; operational properties.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-2-117-121>

Твердость металлов и сплавов – это многофакторный параметр, зависящий от состава, микроструктуры, обработки и условий эксплуатации. Понимание и правильное использование этого параметра имеет решающее значение для выбора материала при его применении.

Твёрдость конструкционных материалов, как физическое явление, зависит от следующих факторов:

1. Химический состав: примеси (неконтролируемые примеси, например, сера (S), фосфор (P) могут снижать твёрдость, нарушать структуру); сплавы (добавки в сталь хрома и никеля).
2. Тип кристаллической решётки (объёмно-центрированная кристаллическая (ОЦК), гранецентрированная кристаллическая (ГЦК) и гексагонально плотноупакованная (ГПУ)).
3. Фазовый состав и размер зерна.
4. Дефекты структуры: дислокации, вакансии.
5. Термическая обработка: закалка, отпуск, отжиг.
6. Механическая обработка: наклёп; пластическая деформация.
7. Химико-термическая обработка: азотирование, цементирование, цианирование.

Твёрдость коррелирует со следующими характеристиками материалов:

1. Трещиностойкость (для конструкционных сталей)

$$K = 0,075P/C^{3/2}, \text{ кГс/мм}^{3/2},$$

где K – коэффициент трещиностойкости; P – нагрузка, кГс; C – половина длины трещины, мм.

2. Выносливость (для конструкционных сталей)

$$\sigma_B \approx 0,33HB,$$

где σ_B – временное сопротивление разрыву (предел выносливости); HB – твёрдость по Бринеллю.

3. Текучесть (для конструкционных сталей)

$$\sigma_T = 0,167HB,$$

где σ_T – предел текучести, кГс/мм²; HB – твёрдость по Бринеллю.

4. Ударная вязкость

Ударная вязкость не имеет прямой формулы перевода, но косвенно связана с прочностью.

5. Усталостная прочность, для грубой оценки используют формулу:

$$\sigma_{-1} \approx (0,4 - 0,6) * \sigma_T \approx (1,4 - 2,1) * HB,$$

где σ_{-1} – усталостная прочность; σ_T – предел текучести; HB – твёрдость по Бринеллю.

6. Теплопроводность и электропроводность

Выбор метода измерения твёрдости зависит от типа материала (металл, керамика, полимер), толщины образца (массивные детали, тонкие покрытия), требований к точности (лабораторные, полевые условия), цели измерения (контроль качества, научные исследования), наличия необходимого оборудования [5].

1. Метод Бринелля (НВ)

Принцип: вдавливание закалённого стального шарика диаметром 1-10 мм под нагрузкой 4500-27000 Н.

Измерение: диаметр отпечатка (d) используется для расчёта твёрдости по формуле:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

где $\frac{2}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$ – формула площади части сферы, HB – твёрдость по Бринеллю; P – нагрузка (кГс/мм²); D – диаметр индентора (мм); d – диаметр отпечатка (мм).

Применение: мягкие металлы (алюминий, медь), сталь.

Плюсы – не критичны требования к шероховатостям поверхности.

Минусы – не подходит для твёрдых материалов [1].

2. Метод Роквелла (HR)

Вдавливание алмазного конуса (шкалы А, С, D, E, G, H, K, L, M, Р) или стального шарика (шкалы В и F) с измерением глубины отпечатка.

Шкалы: HRC Алмазный конус +150 кГс (закалённые стали); HRD стальной шарик +100 кГс (латунь, алюминий).

Применение: быстрый контроль твёрдости металлов.

Плюсы – высокая скорость, автоматизация.

Минусы – требует гладкой поверхности [2].

3. Метод Виккерса (HV)

Принцип: вдавливание алмазной четырёхгранной пирамиды с углом 136° под нагрузкой 1–120 кГс.

Численное значение твёрдости определяется следующей зависимостью:

$$HV = \frac{1.854 * P}{d^2},$$

где HV – твёрдость по Виккерсу; P – нагрузка (кГс/мм²); d – диаметр отпечатка.

Применение: тонкие плёнки, микроэлектроника.

Плюсы – универсальность, высокая точность.

Минусы – требует полировки [4].

4. Метод Шора (HS)

Принцип: изменение глубины вдавливания алмазного конуса (Шор D) или стального стержня (Шор A) под нагрузкой.

Шкалы: HS A мягкие эластомеры (нагрузка 0,55 кГс); HS D твёрдые пластмассы (нагрузка 5 кГс).

Применение: резина, пластики, покрытия.

Плюсы – простота, скорость, портативность.

Минусы – низкая точность для металлов [3].

5. Метод измерения микротвёрдости (Микро-Виккерс, Кнупа)

Принцип: вдавливание алмазной пирамиды под малыми нагрузками (1 гс – 1 кГс).

Типы инденторов: Виккерс (квадратная пирамида); Кнупа (ромбовидная пирамида, удлиненный отпечаток для анизотропных материалов).

Применение: измерение прочности зёрен и микрозёрен.

Плюсы – высокая точность.

Минусы – сложная подготовка образца.

6. Метод царапания (шкала Мооса)

Принцип: оценка твёрдости по способности материала царапать другие материалы.

Шкала: от 1 (тальк) до 10 (алмаз).

Применение: минералы, керамика.

Плюсы – простота, полевое применение.

Минусы – качественная, а не количественная оценка; шкала не отражает реальной разницы в твёрдости между минералами; шкала включает всего 10 минералов, что не охватывает все возможные значения твёрдости.

7. Динамический метод Шора (склероскоп)

Принцип: измерение высоты отскока стального бойка после падения на поверхность.

Применение: крупные детали (валы, плиты).

Плюсы – не требует подготовки поверхности.

Минусы – низкая точность, зависимость от упругости [6].

8. Ультразвуковой метод

Принцип: измерение скорости ультразвука в материале. Твёрдость коррелирует с акустическим сопротивлением.

Применение: контроль качества в промышленности (например, сварные швы).

Плюсы – неразрушающий метод.

Минусы – требует калибровки.

9. Метод упругого отскока (Либа)

Принцип: ударник с стальным наконечником ударяет по поверхности, измеряется разница в скорости до и после удара.

Применение: бетон, горные породы.

Плюсы – портативность.

Минусы – низкая точность.

10. Метод Мартенса (инструментальная твёрдость)

Принцип: вдавливание индентора с непрерывным измерением глубины и нагрузки (нано-индентирование).

Применение: нанотехнологии, тонкие покрытия, биоматериалы.

Плюсы – измерение модуля упругости и твёрдости.

Минусы – высокая стоимость оборудования.

11. Метод Герберта (для резины)

Принцип: вдавливание стального шарика под нагрузкой 1-5 кГс с измерением остаточной деформации.

Применение: резиновые изделия, уплотнители.

Плюсы – специализирован для мягких материалов.

Минусы – ограниченная область применения.

12. Метод Берковича

Принцип: вдавливание трёхгранной алмазной пирамиды (угол 65°) для анализа микро-твёрдости.

Применение: хрупкие материалы (стекло, керамика).

Плюсы: минимальное растрескивание.

Минусы: специальный индентор [7].

Твёрдость является важным параметром при выборе материалов для деталей машин и механизмов, таких как подшипники, валы, шестерни и другие компоненты. Высокая твёрдость обеспечивает устойчивость к износу и длительный срок службы. Твёрдость материала влияет на его обрабатываемость. Например, материалы с высокой твёрдостью сложнее обрабатывать, но они могут выдерживать высокие нагрузки и износ.

Использование знаний о твёрдости в различных отраслях:

1. Машиностроение и металлообработка

Режущие инструменты: резцы, свёрла, фрезы из быстрорежущей стали (HSS) или твёрдых сплавов (карбид вольфрама) – высокая твёрдость обеспечивает износостойкость.

Подшипники и шестерни: Поверхностная закалка (индукционная, азотирование) повышает твёрдость, снижая износ.

Штампы и пресс-формы: используются инструментальные стали (например, D2) с твёрдостью HRC 58–62 для работы под ударными нагрузками.

2. Электроника и микротехнологии

Полупроводниковые покрытия: при использовании необходимо знать порог твёрдости, когда можно использовать нитрид кремния (Si_3N_4) защищает микросхемы от механических повреждений.

Дискретные компоненты: Твёрдые керамические подложки (Al_2O_3) в чипах и резисторах.

3. Энергетика

Турбиностроение: лопатки из мартенситных сталей (например, 13CrMo4-5) с высокой твёрдостью и коррозионной стойкостью.

В ядерной энергетике знание твёрдости материалов играет критическую роль в обеспечении безопасности, долговечности и эффективности реакторов.

Ветрогенераторы: подшипники из сталей с твёрдыми покрытиями (TiN) для работы в агрессивных средах [8].

Дальнейшее исследование твёрдости, поиск глубинной связи с критическими эксплуатационными характеристиками материалов в будущем позволит эффективно использовать материалы, включая вновь создаваемые.

Библиографические ссылки

1. *Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П.* «Материаловедение» М.: Машиностроение, 1990 глава
2. *Горячева И. Г., Дроздов Ю. Н.* «Механические свойства и испытания материалов» М.: Машиностроение, 2004
3. *Сёмин Г. И.* «Испытания резин и резинотехнических изделий» М.: Химия, 1989
4. *Горячева И. Г., Дроздов Ю. Н.* «Механические свойства и испытания материалов» М.: Машиностроение, 2004
5. *Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / под ред. В. С. Чередниченко. 5-е изд., стер. М. : Издательство «Омега-Л», 2009. 752 с. :ил., табл.*
6. *Рогов В. А., Тюрин А. Н.* «Испытание резин и резинотехнических изделий» П. 2015
7. *Лурье С. А., Белов П. А.* «Механика конструкционных материалов» Ф. 2015
8. *Гуляев А. П.* «Металловедение» М. 1986