



УДК 620.22
doi:10.21685/2587-7704-2022-7-2-5



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Исследование и пути развития метода измерения твердости

Ирина Юрьевна Наумова

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
iraipvla@yandex.ru

Алексей Владимирович Лысенко

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
kipra@pnzgu.ru

Александр Дмитриевич Цуприк

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
tsuprik.rjirf@yandex.ru

Кирилл Сергеевич Новиков

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
kirill1novikov1@gmail.com

Никита Дмитриевич Кошелев

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
spellbinderrus@gmail.com

Аннотация. Имеется анализ способов оценки твердости на базе вдавливания индентора. Представлено короткое описание состояния вопроса о способах оценки твердости. Описаны предложенные и используемые в реальное время способы оценки твердости материалов. Описаны схемы вдавливания шарика по Бринеллю и приведено сравнение характеристик отпечатков шариками вдавливанием в зависимости от прилагаемой нагрузки. Обнаружены немаловажные дефекты, которые искажают физиологическую природу деформирования и разрушения материалов. Представлено описание способа измерения твердости металлов, основанного на определении конкретным измерением глубины восстановленного отиска впоследствии удаления индентора или же расчетом по формулам. Описан способ измерения твердости металлов, базирующийся на оценке твердости по диаграмме, охватывающей некоторое количество значений. Сформулированы возможные направленности оценки физико-механических данных материалов.

Ключевые слова: твердость, нагрузка, индентор, отпечаток, Бринелль

Для цитирования: Наумова И. Ю., Лысенко А. В., Цуприк А. Д., Новиков К. С., Кошелев Н. Д. Исследование и пути развития метода измерения твердости // Инжиниринг и технологии. 2022. Т. 7(2). С. 1–5. doi:10.21685/2587-7704-2022-7-2-5

Research and development paths for hardness measurement

Irina Yu. Naumova

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
iraipvla@yandex.ru

Aleksey V. Lysenko

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
kipra@pnzgu.ru

Aleksandr D. Tsuprik

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
tsuprik.rjirf@yandex.ru

Kirill S. Novikov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
kirill1novikov1@gmail.com

Nikita D. Koshelev

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
spellbinderrus@gmail.com



Abstract. An analysis of methods for assessing hardness based on the indenter indentation is given. A short issue overview on the methods for hardness assessment is presented. Current methods proposed and used for assessing the hardness of materials are described. The Brinell ball indentation schemes are described, and the characteristics of imprints by indentation balls depending on the applied load are compared. Major defects that distort the physiological nature of deformation and destruction of materials have been found. A method for measuring the hardness of metals, based on the determination by a specific measurement of the depth of the recovered impression after the removal of the indenter or by calculation according to formulas, is presented. A method for measuring the hardness of metals, based on the evaluation of hardness according to a diagram covering a certain number of values, is described. Possible ways for assessing physical and mechanical data of materials are formulated.

Keywords: hardness, load, indenter, imprint, Brinell

For citation: Naumova I.Yu., Lysenko A.V., Tsuprik A.D., Novikov K.S., Koshelev N.D. Research and development paths for hardness measurement. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2022;7(2):1–5. (In Russ.). doi:10.21685/2587-7704-2022-7-2-5

Введение

Интерес к тому, как оценивать твердость металла и металлических изделий проявляли давно. Проверка производилась при помощи удара объектов друг об друга.

В 1822 г. Моссом был предложен способ оценивания при помощи царапания. Кельверт и Джонс оценивали твердость по величине нагрузки на рычаг для вдавливания усеченного конуса на глубину 3,5 мм после 30 с выдержки. В 1900 г. Бринелль предложил более простой и надежный метод определения твердости. Он осуществлялся при помощи вдавливания стального закаленного шарика Ø10 мм в поверхность образца при нагрузке 500 кг для цветных металлов и 3000 кг для стали [1].

Наибольшее распространение получил метод Бринелля, в результате чего стандартизировался в большинстве стран. В качестве инденторов стали использовать металлические шарики из твердого сплава диаметрами 1; 2; 2,5; 5 и 10 мм с соответствующим изменением величины нагрузки, также было введено обозначение *HBW* (символьное обозначение твердости по Бринеллю, ГОСТ 9012-59; ISO 6506-1:2005).

Твердость по Бринеллю можно рассчитать двумя способами.

1. Метод восстановленного отпечатка находится как

$$HBW = \frac{0,102F}{\frac{\pi D}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}, \quad (1)$$

где F – приложенная нагрузка, D – диаметр шарика, d – диаметр отпечатка.

2. Метод невосстановленного отпечатка:

$$HBW = \frac{0,102F}{\pi Dh}, \quad (2)$$

где h – глубина внедрения индентора.

Множество технической документации содержит указания по измерению твердости методом Бринелля. Полный анализ условий испытания твердости шариком был сделан Мейером в 1908 г. Исследование Мейера является одной из наиболее важных работ по теоретическим осмыслениям методов испытания на твердость [2].

Основные недостатки

Благодаря анализу Мейера и многолетней практике метода Бринелля были выявлены существенные недостатки механизма формирования и оценки параметров отпечатка [3, 4].

Метод Бринелля имеет следующие недостатки.

1. Не удовлетворяются условия геометрического подобия. В качестве примера можно взять 2 варианта отпечатков шариком диаметром D , образующих хорды $d1$ и $d2$ с центральными углами $\phi1$ и $\phi2$.

На рис. 1 видно, что отпечаток диаметром $d1$, сделанный шариком с диаметром D на глубину $h1$, при приложенной нагрузке $F1$, имеет угол вдавливания $\phi1$. Если тем же самым шариком сделать отпечаток, приложив меньшую нагрузку $F2$, глубина вдавливания будет характеризоваться глубиной



h_2 и хордой d_2 , тогда новый отпечаток будет иметь меньший угол вдавливания φ_2 . При этом $h_2 < h_1$ и $d_2 < d_1$. Соответственно новый отпечаток будет иметь меньший центральный угол $\varphi_2 < \varphi_1$, поэтому оба эти отпечатка не будут геометрически подобными.

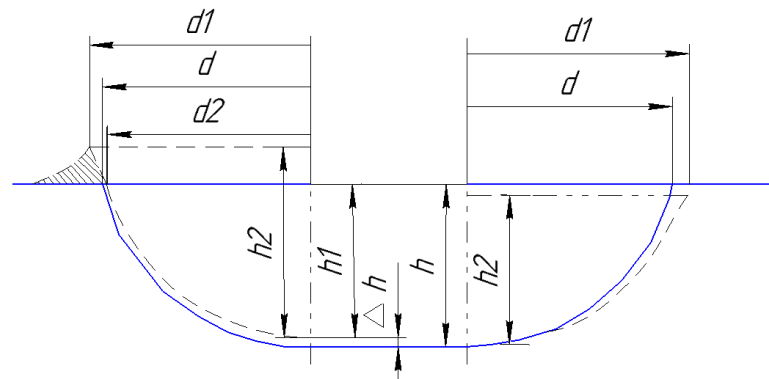


Рис. 1. Схема сопоставления параметров отпечатка шариками

2. Основным недостатком измерения твердости по методу Бринелля является неточность определения диаметра отпечатка. В качестве примера рассмотрим отмеченное еще в исследовании Фосса и Брумфильда. В некоторых случаях в процессе нагружения деформируемый металл образует выступающую воронку на поверхности образца по краям отпечатка. Диаметр отпечатка, замеренный на поверхности деформированного металла, может быть примерно вдвое больше диаметра восстановленного отпечатка. Это явление называется наращиванием (рис. 2).

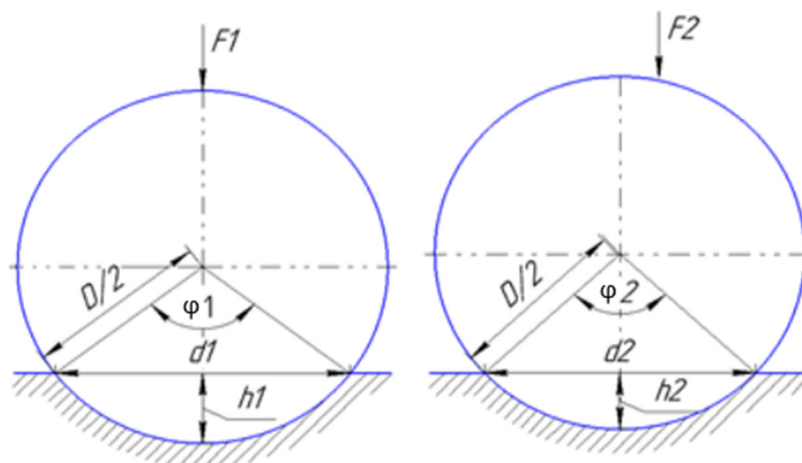


Рис. 2. Отпечаток, показывающий наращивание и вмятие металла по краям отпечатка

Часть усилия вдавливания расходуется на наращивание выступающей кромки, это необходимо учитывать при получении максимально истинных и правдивых результатов. В случае если данное явление не принимать в расчет, то не будет соблюдаться закон пропорционального сопротивления. Испытания твердости по Бринеллю не являются достаточно точными и попытки выразить основные физико-механические характеристики материалов через значения твердости по Бринеллю являются некорректными и могут служить только как ориентировочные.

3. Наиболее существенным недостатком метода является игнорирование упруго-пластических свойств исследуемых материалов, т.е. параметров вязкости. Восстановленный отпечаток – результат совместного влияния деформации вдавливаемого индентора и упругого последствия, величина которого в большинстве случаев весьма существенна, поскольку характеризует параметры вязкости и способность материала к упрочнению. В 1905 г. был экспериментально оценен диапазон расхождения глубины восстановленных и невосстановленных отпечатков при последовательном ступенчатом изменении нагрузки при вдавливании 5 мм стального шарика (табл. 1).

Получившиеся результаты весьма отличаются и показывают разницу между глубиной восстановленных и невосстановленных отпечатков.



Таблица 1

Изменение глубины невосстановленного и восстановленного отпечатка от величины нагрузки

Нагрузка, кг	Невосстановленная глубина h , мм	Восстановленная глубина h_1 , мм	Величина упруго-пластической деформации Δh	
			мм	%
92	0,05	0,029	0,021	42
112	0,06	0,037	0,023	38,3
141	0,07	0,046	0,025	34,3
166	0,08	0,055	0,025	31,1
200	0,09	0,064	0,026	28,9

М. С. Дрозд вывел новую единицу твердости, которая основана на измерении глубины восстановленного отпечатка. Она определяется непосредственным измерением после удаления индентора или может быть рассчитана по формулам.

Глубина восстановленного отпечатка находится по формуле

$$h = \frac{1}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right), \quad (3)$$

где D – диаметр шарика, d – диаметр невосстановленного отпечатка.

Следует

$$h_1 \approx h - \Delta h, \quad (4)$$

Смещение центра отпечатка можно рассчитать из частного случая задачи Герца:

$$\Delta h = 1,77 k_1 \sqrt[3]{\frac{F^2}{(k_1 + k_2)}}, \quad (5)$$

где $k_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi E_1}$, $k_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{\pi E_2}$; μ_1 , μ_2 , E_1 , E_2 – коэффициенты Пуассона и модуля Юнга, R – радиус шарика.

В основу своего нового метода М. С. Дрозд заложил принцип геометрического подобия диаметров отпечатков с восстановленной глубиной, это значит, что $\frac{F - F_0}{D h_1} = \text{const}$ на любом этапе нагружения.

При снятии нагрузки происходит упругое восстановление глубины и диаметра отпечатка. Это восстановление является неоднородным в зависимости от материала. Поэтому установление зависимости между диаметром и высотой участков не представляется возможным.

Н. Н. Давиденков усмотрел полную несостоятельность метода Бринелля: склонность металла к наклепу, одна из важнейших характеристик, не усматривается [5].

Было высказано предложение о необходимости оценивать твердость не по одному частному значению, а по диаграмме, охватывающей несколько значений. Это исследование оказалось возможным только благодаря М. П. Марковцу, который в 1949 г. предложил способ количественного определения степени деформации в лунке:

$$\psi = 1 - \frac{d^2}{D \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2} \right]} = \frac{4h^2}{4h^2 + d^2}, \quad (6)$$

где D – диаметр шарика; d и h – диаметр и глубина восстановленного отпечатка соответственно.

Сопоставление характеристик прочности, определенной при тестированиях на растяжение, и по значениям твердости, проведенное группой создателей, продемонстрировало вероятность установления приближенных значений связи механических данных, приобретенных при тестировании на растяжение с показателями твердости по способу Бринелля.



Заключение

В работе рассмотрены разновидности износа, взаимодействие трущихся материалов при неоднородности и наличии промежуточных сред. Проанализированы попытки установления связи износостойкости с параметрами твердости и другими физико-механическими чертами материалов, приведены советы по выбору всеохватывающего способа оценки физико-механических характеристик материала, определяющих его износостойкость.

При разработке свежего способа измерения твердости абсолютно бесспорно, что оценка качеств материалов обязана происходить сопоставлением итогов при напряжениях, измеряемых при схожих деструкциях, например как комплекс физико-механических данных материалов ориентируется значениями характеристик пластичности: пределом текучести, коэффициентом Мейера n и упругими неизменными – модулем упругости E и коэффициентом Пуассона μ .

Очень принципиально поймать момент перехода упругой деструкции в пластическую, что нельзя ввести при схожих критериях нагрузки, используемых при тестированиях по способу Бринелля. Бесспорно, сопоставление количества твердости нужно готовить только при напряжениях, которые измеряются при схожих деструкциях аналогично с тестированиями разрывных образцов. Проведенный тест и обнаруженные направленности улучшения способов определения твердости имеют все шансы быть положены в базу разработки современного высокоточного метода оценки твердости.

Список литературы

1. Гордиченко В. И., Давиденко Б. Ю., Исаев В. А. [и др.]. *Материаловедение: практикум : учеб. пособие / под ред. С. В. Ржевской.* М. : Логос, 2004. 272 с.
2. Орешко Е. И., Уткин Д. А., Ерасов В. С., Ляхов А. А. Методы измерения твердости материалов (обзор) // *Труды ВИАМ.* 2020. № 1 (85).
3. Кушнер В. С., Верешчака А. С., Схиртладзе А. Г., Негров Д. А., Бургонова О. Ю. *Материаловедение: практикум : учеб. пособие.* Омск : Изд-во ОмГТУ. 2011. 165 с.
4. Кулешов С. С. Измерение твердости металла // *IN SITU.* 2015. № 3. С. 29–32.
5. Денисова Э. И., Карташов В. В., Рычков В. Н. *Прикладное материаловедение: металлы и сплавы.* Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2018. 215 с.

References

1. Gordichenko V.I., Davidenko B.Yu., Isaev V.A. et al. *Materialovedenie: praktikum: ucheb. posobie = Materials science. Workshop: A textbook.* Moscow: Logos, 2004:272. (In Russ.)
2. Oreshko E.I., Utkin D.A., Erasov V.S., Lyakhov A.A. Methods of measurement of hardness of materials (A review). *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM.* 2020;(1). (In Russ.)
3. Kushner V.S., Vereshchaka A.S., Skhirtladze A.G., Negrov D.A., Burgonova O.Yu. *Materialovedenie: praktikum: ucheb. posobie = Materials science. Workshop: A textbook.* Omsk: Izd-vo OmGTU. 2011:165. (In Russ.)
4. Kuleshov S.S. Metal hardness measurement. *IN SITU.* 2015;(3):29–32. (In Russ.)
5. Denisova E.I., Kartashov V.V., Rychkov V.N. *Prikladnoe materialovedenie: metally i splavy = Applied materials science: Metals and alloys.* Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo un-ta, 2018:215. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 12.03.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 17.04.2022

Принята к публикации / Accepted 05.05.2022