

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.12737/article_5bd95a79601bb4.49440716

¹Сергиев А.П., ¹Макаров А.В., ^{1,*}Владимиров А.А., ¹Белов Н.В.¹Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал)
Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»
Россия, 309516, Белгородская обл., г. Старый Оскол, м-он Макаренко, д. 42
*E-mail: vladimirov.al.an@yandex.ru

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Аннотация. Дан анализ методов оценки твердости на основе вдавливания индентора. Представлено краткое описание состояния вопроса о методах оценки твердости металлических изделий. Описаны предложенные ранее и применяемые в настоящее время методы оценки твердости материалов и указаны авторы, предложившие их. Описано две схемы вдавливания шарика по методу Бринелля и приведено сопоставление параметров отпечатка шариками вдавливанием в зависимости от прилагаемой нагрузки. Приведено два алгоритма расчета твердости по методу Бринелля. Представлены схемы отпечатков, показывающих наращивание и вмятие металла по краям отпечатка, которые в большей степени зависят от упруго-пластических свойств материалов. Описаны результаты экспериментальных исследований по изменению глубины невозстановленного и восстановленного отпечатков от величины нагрузки. Указаны основные недостатки метода оценки твердости металлов по Бринеллю, заключающиеся в непостоянстве геометрических размеров отпечатков, неточности определения диаметра отпечатка и исключения из рассмотрения важнейшей характеристики материала – склонности к наклепу. Выявлены существенные недостатки, которые искажают физическую природу деформирования и разрушения материалов. Представлено описание метода измерения твердости металлов, основанного на определении непосредственным измерением глубины восстановленного отпечатка после удаления индентора или расчетом по формулам. Описан метод измерения твердости металлов, основанный на оценке твердости по диаграмме, охватывающей несколько значений. Отмечено, что существует адекватная функциональная зависимость усталости металлов с показателями твердости по методу Бринелля. Установлена необходимость отслеживания момента перехода упругой деформации в пластическую. Указано, что при разработке нового метода измерения твердости необходимо осуществлять сравнение результатов при напряжениях, измеряемых при одинаковых деформациях. Сформулированы перспективные направления оценки физико-механических характеристик материалов.

Ключевые слова: механизм нагружения, упругое последствие, пластичность, склонность к наклепу, истинное сопротивление разрушению.

Интерес к оценке твердости металлических изделий люди проявляли с древнейших времен. Взаимным соударением проверяли твердость топоров, мечей, орудий труда.

Мосс (1822 г.) предложил оценивать твердость царапанием. Кельверт и Джонс (1857 г.) оценивали твердость по величине нагрузки на рычаг для вдавливания усеченного конуса на глубину 3,5 мм после 30 сек. выдержки. Вейд (1865 г.) для оценки твердости применял вдавливание острия пирамидальной формы из закаленной стали при нагрузке 5 т. Бринелль (1900 г.) предложил простой и надежный метод определения твердости вдавливанием стального закаленного шарика Ø10 мм в поверхность образца при нагрузке 500 кг для цветных металлов и 3000 кг

для стали [1]. Мартенс (1905 г.) предложил измерять нагрузку при вдавливании закаленного стального шарика Ø5 мм на глубину 0,05 мм восстановленного отпечатка. Людвик (1907 г.) измерял глубину вдавленного конуса, включая наращенный буртик.

Метод Бринелля получил широкое распространение и был стандартизован в большинстве стран. В дальнейшем в качестве инденторов стали использоваться шарики из твердого сплава диаметрами 1; 2; 2,5; 5 и 10 мм с соответствующим изменением величины нагрузки, дополнительно вводя обозначение HBW (ГОСТ 9012-59; ISO 6506-1:2005).

Твердость по Бринеллю может рассчитываться двумя методами:

1. По методу восстановленного отпечатка твердость рассчитывается как отношение приложенной нагрузки к площади поверхности отпечатка

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

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

2. По методу невосстановленного отпечатка твердость определяется как отношение приложенной нагрузки к площади, внедренной в материал части индентора

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

где h – глубина внедрения индентора, мм.

За более чем столетний опыт использования метода Бринелля сформулированы формулы для пересчета определения предела прочности σ_B , предела текучести σ_T , твердости по Виккерсу и Роквеллу по результатам замеров твердости по Бринеллю.

Множество технической документации содержит указания по измерению твердости методом Бринелля.

Полный анализ условий испытания твердости шариком был сделан Мейером в 1908 году. Исследование Мейера является одной из наиболее важных работ по теоретическим осмыслениям методов испытания на твердость [2].

Анализ Мейера и многолетний опыт использования метода Бринелля выявили существенные недостатки механизма формирования и оценки параметров отпечатка, не позволяющие в полной мере охарактеризовать весь комплекс механических свойств испытуемого материала.

Основными недостатками метода Бринелля являются следующие:

1. При испытании различных образцов по методу Бринелля получают отпечатки различных размеров. Хотя при этом и сохраняется закон пропорциональных сопротивлений, однако условия геометрического подобия не удовлетворяются. В качестве примера рассмотрим 2 варианта отпечатков шариком диаметром D , образующих хорды d_1 и d_2 с центральными углами φ_1 и φ_2 .

На рис. 1а показано, что отпечаток диаметром d_1 сделанный шариком с диаметром D на глубину h_1 , при приложенной нагрузке F_1 , имеет угол вдавливания φ_1 . Если тем же самым шариком сделать отпечаток, приложив меньшую нагрузку F_2 , 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.

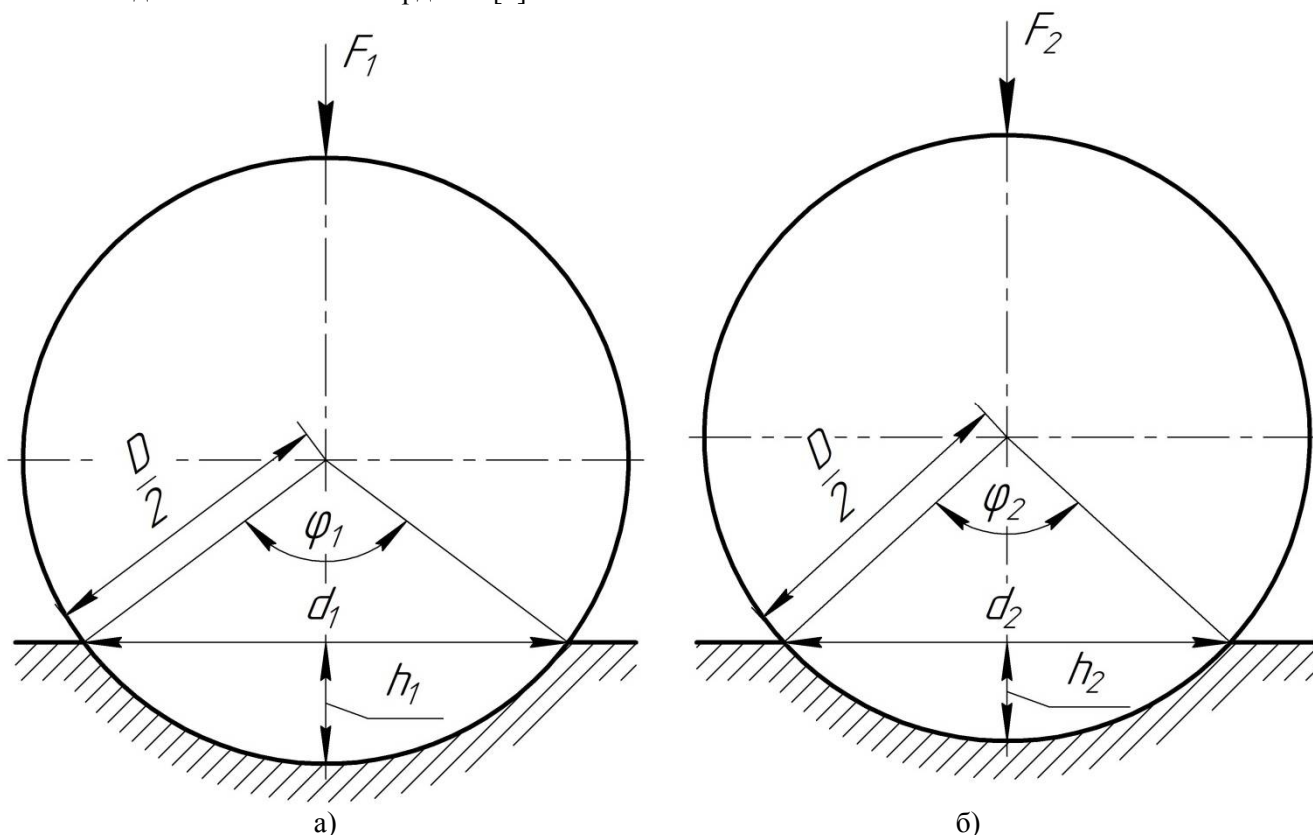


Рис. 1. Схема сопоставления параметров отпечатка шариками вдавливанием на хорду d_1 (а) и вдавливанием на хорду d_2 (б)

2. Основным недостатком измерения твердости по методу Бринелля является неточность определения диаметра отпечатка. В качестве примера рассмотрим отмеченное еще в исследовании Фосса и Брумфильда [3] по особо точному замеру восстанавливаемого отпечатка, сечения отпечатков представлены на рисунке 2. Измерение его истинных размеров затрудняется образованием на испытуемой поверхности второго контура отпечатка, вызываемого пластической деформацией материала. В некоторых случаях в

процессе нагружения деформируемый металл образует выступающую воронку на поверхности образца по краям отпечатка (рис. 2а). Диаметр отпечатка, замеренный на поверхности деформированного металла, может быть примерно вдвое больше диаметра невосстановленного отпечатка. Это явление называется наращиванием.

На рисунках 2а и 2б сплошная жирная линия представляет очертание положения вдавленного шарика относительно исходной поверхности образца и характеризуется параметрами d и h .

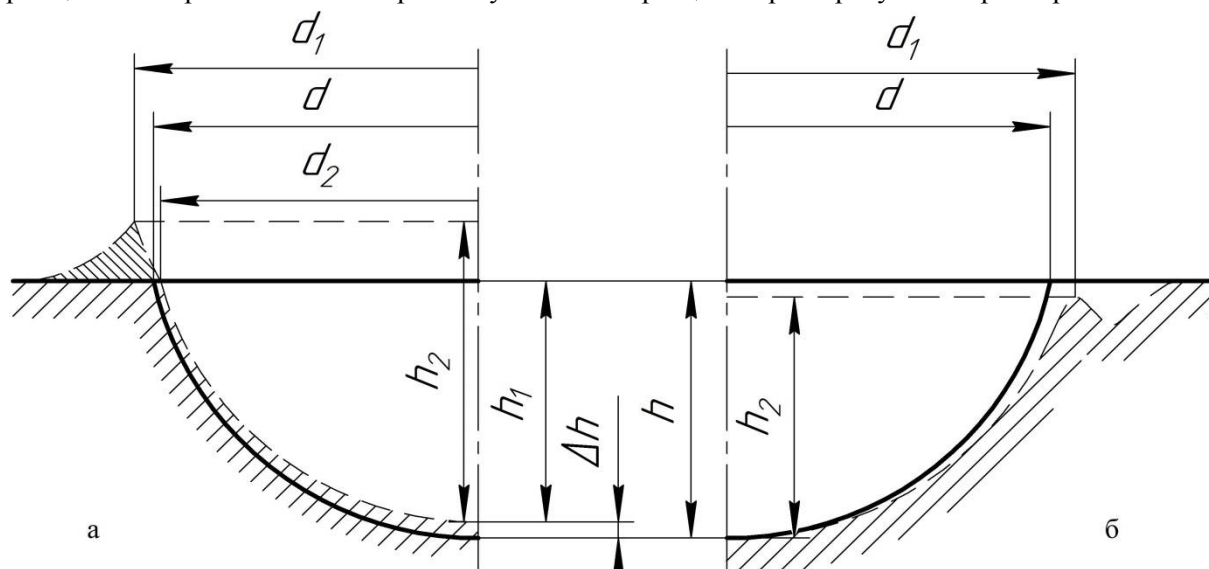


Рис. 2. Отпечаток, показывающий наращивание и вмятие металла по краям отпечатка:

d – диаметр отпечатка от исходной поверхности при вдавлении шарика;
 d_1 – диаметр восстановленного отпечатка по вершине; d_2 – диаметр восстановленного отпечатка по исходной поверхности; h – глубина невосстановленного отпечатка от исходной поверхности (действительная глубина вдавления индентора – шарика); h_1 – глубина восстановленного отпечатка от исходной поверхности;
 h_2 – глубина восстановленного отпечатка по вершине

На наращивание выступающей кромки расходуется часть усилия вдавливания, и для получения истинных результатов испытания это следует учитывать при измерении отпечатка, что отмечено было еще в исследовании Мозера [4]. Если явление наращивания не принимается во внимание, то закон пропорционального сопротивления не соблюдается. В этом случае получается отпечаток восстановленного диаметра по вершине d_1 вместо действительного диаметра отпечатка d . Если же при этом производится измерение глубины отпечатка, то возникает аналогичная проблема измерять максимальную глубину восстановленного отпечатка по вершине h_2 , глубину от начальной поверхности испытания h_1 или истинную глубину вдавливания при испытании h . Во многих случаях производится удаление выступа тонким шлифованием, но это вводит новые элементы погрешности.

Иначе формируется отпечаток при испытании металлов, обладающих высокой сжимаемостью. При вдавлении контактирующие поверхности будут стремиться сжаться еще больше, и

противодействие расширению на поверхности отпечатка вызовет растяжение материала за краями отпечатка. Это приведет к образованию отрицательного выступа, или вмятию, схематично показанному на рисунке 2б. в этом случае потеря усилия, затрачиваемого для пластического деформирования не учитывается.

Из всего выше сказанного можно сделать вывод, что 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. Самым существенным недостатком измерения твердости по методу Бринелля является игнорирование упруго-пластических свойств исследуемых материалов, т.е. параметров вязкости. Достаточно сопоставить комплекс физико-механических характеристик чугуна и аустенитной стали при одинаковых значениях твердости по Бринеллю, чтобы убедиться в несовершенстве метода Бринелля.

Восстановленный отпечаток – результат совместного влияния деформации вдавливаемого индентора и упругого последействия, величина которого в большинстве случаев весьма существенна, поскольку характеризует параметры вязкости и способность материала к упрочнению.

Метод оценки невосстановленного отпечатка по ГОСТ 9012-59, обладает всеми недостатками, отмеченными ранее в п. 1 и 2.

Еще в 1905 г. Мартенс [5] экспериментально оценил диапазон расхождения глубины восстановленных h_1 и невосстановленных h отпечатков при последовательном ступенчатом изменении нагрузки при вдавливании 5 мм стального шарика (табл. 1).

Полученные результаты показали весьма существенные различия восстановленных и невосстановленных значений глубины отпечатков.

Таблица 1

Изменение глубины невосстановленного h и восстановленного отпечатка h_1 от величины нагрузки

№ п/п	Нагрузка, кг	Невосстановленная глубина h , мм	Восстановленная глубина h_1 , мм	Величина упруго-пластической деформации Δh	
				мм	%
1	92	0,05	0,029	0,021	42
2	112	0,06	0,037	0,023	38,3
3	141	0,07	0,046	0,024	34,3
4	166	0,08	0,055	0,025	31,1
5	200	0,09	0,064	0,026	28,9

В последующих исследованиях предпринимались многочисленные попытки установить однозначные или обобщенные (комбинированные) параметры, адекватно характеризующие взаимосвязь параметров твердости с физико-механическими характеристиками материалов.

Фундаментальное исследование по определению механических свойств металлов без разрушения выполнено в монографии М.С. Дрозда [6]. Обобщив 118 работ отечественных и зарубежных исследователей, автор предлагает новую единицу твердости, основанную на измерении глубины восстановленного отпечатка h_1 , которая определяется непосредственным измерением после удаления индентора или расчетом по известным формулам.

Глубина невосстановленного отпечатка

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

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

Тогда

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

величину упругого восстановления в центре отпечатка можно измерить из опыта, как это делал Мартенс [5] или рассчитать смещение центра отпечатка при вдавливании сферы в плоскую поверхность силой F , как частный случай задачи Герца:

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

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 модули Юнга соответственно материалов образца и шарика; R – радиус шарика.

Необходимо отметить, что предлагаемая методика определения величины восстановленного отпечатка h_1 зависит от точности измерения истинной глубины отпечатка h , на которую влияют три причины, отмеченные ранее.

В основу нового метода определения числа твердости М.С. Дрозд положил принцип геометрического подобия диаметров отпечатков с восстановленной глубиной h_1 , т.е. на любом этапе нагружения $\frac{F-F_0}{Dh_1} = const$, что маловероятно, поскольку постоянство пластической твердости в широком диапазоне изменения нагрузки практически не наблюдается в связи с исчерпанием ресурса пластичности.

При снятии нагрузки происходит упругое восстановление и глубины и диаметра отпечатка. Для различных материалов это восстановление неоднородно, поэтому установление общей зависимости между диаметрами и высотой восстановленных и невосстановленных отпечатков невозможно.

Твердость, измеренная с использованием истинной величины деформации (невосстановленной глубиной h), учитывает упруго-пластические свойства материала, реально определяющие весь комплекс физико-механических характеристик материала.

Принципиальную несостоятельность метода Бринелля Н.Н. Давиденков усматривает в том,

что исключается из рассмотрения важнейшая характеристика материала – склонность к наклепу [7].

Для оценки качества металлов по твердости Н.Н. Давиденков высказал мысль о необходимости оценивать твердость не по какому-то одному частному значению, а по диаграмме, которая охватывает несколько значений. Это исследование удалось осуществить только после того, как в 1949 г. М.П. Марковцом [8] был предложен способ количественного определения степени деформации в лунке по формуле

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

где D – диаметр шарика; d и h – диаметр и глубина восстановленного отпечатка, и разработан прибор для регистрации диаграммы «нагрузка – глубина вдавливания индентора».

Сравнение показателей прочности, определенной при испытаниях на растяжение, и по значениям твердости, проведенное группой авторов [10], показало возможность установления приближенных значений связи механических характеристик, полученных при испытании на растяжение с показателями твердости по методу Бринелля и выявить адекватную функциональную зависимость на усталость.

В работе [11] рассмотрены разновидности износа, взаимодействие трущихся материалов при отсутствии и наличии промежуточных сред. Проанализированы попытки установления взаимосвязи износостойкости с параметрами твердости и другими физико-механическими характеристиками материалов, приведены рекомендации по выбору комплексного метода оценки физико-механических параметров материала, определяющих его износостойкость.

При разработке нового метода измерения твердости совершенно очевидно, что оценка свойств материалов должна происходить сравнением результатов при напряжениях, измеряемых при одинаковых деформациях, так как комплекс физико-механических характеристик материалов определяется значениями параметров пластичности: пределом текучести $\sigma_{0,2}$, коэффициентом Мейера n и упругими постоянными – модулем упругости E и коэффициентом Пуассона μ .

Информация об авторах

Сергиев Аркадий Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта. E-mail: tomm_sti_misis@mail.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Россия, 309516, Белгородская обл., г. Старый Оскол, м-он Макаренко, д. 42.

Чрезвычайно важно уловить момент перехода упругой деформации в пластическую, что невозможно установить при одинаковых условиях нагружения, применяемых при испытаниях по методу Бринелля.

Очевидно, что сравнение чисел твердости необходимо производить лишь при напряжениях, измеряемых при одинаковых деформациях по аналогии с испытаниями разрывных образцов.

Проведенный анализ и выявленные направления совершенствования методов определения твердости могут быть положены в основу разработки современного высокоточного метода оценки твердости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brinell J.A., II Congres Int. des Methodes dessai, Paris, 1900.
2. О'Нейл Г. «Твердость металлов и ее измерение», перевод с англ. Н.Д. Агеев, ГНТИ по черной и цветной металлургии. М-Л, 1940, 376 с.
3. Foss, F. and Brumfield, R., PASTM (1922). 22, 312.
4. Moser M., S. und E. (1925). 45, 343.
5. Marten S.A. Berlin, Sizb. (1903) p. 1035.
6. Давиденков Н.Н. Некоторые проблемы механики материалов. Лениздат, 1943. 152 с.
7. Дрозд М.С. Определение механических свойств металла без разрушения. М. «Металлургия», 1965, 170 с.
8. Марковец М.П. Построение диаграммы истинных напряжений по твердости и технологической пробе // Журн. техн. физики. 1949. Т. XIX, вып. 3. С. 371–382.
9. Ишлицкий А.Ю. Осесимметричная задача пластичности и проба Бринелля // Прикл. математика и механика. 1943. Т. 8. С. 201.
10. Мощенок В.И., Лазарова Н.А., Дощечкина И.В., Демченко С.В. Сравнение показателей прочности, определенной при испытаниях на растяжение, и по значениям твердости // Вестник ХНАДУ. 2016. вып. 73.
11. Сергиев А.П., Макаров А.В., Владимиров А.А., Белов Н.В. К вопросу об износостойкости технологического оборудования в машиностроении и металлургии. Russian Scientist. 2018. Т.2 №1. С. 13–22.

Макаров Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта. E-mail: makarov.av@mail.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Россия, 309516, Белгородская обл., г. Старый Оскол, м-он Макаренко, д. 42.

Владимиров Александр Андреевич, аспирант кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта. E-mail: vladimirov.al.an@yandex.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Россия, 309516, Белгородская обл., г. Старый Оскол, м-он Макаренко, д. 42.

Белов Николай Владимирович, аспирант кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта. E-mail: belov_nv@nlmk.com. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Россия, 309516, Белгородская обл., г. Старый Оскол, м-он Макаренко, д. 42.

Поступила в июле 2018 г.

© Сергиев А.П., Макаров А.В., Владимиров А.А., Белов Н.В., 2018

¹*Sergiev A.P., ¹Makarov A.V., ¹Vladimirov A.A., ¹Belov N.V.*

¹*Stary Oskol Technological Institute named after A. A. Ugarov (branch) NUST «MISIS»
Russia, 309516, Belgorod Region, Stary Oskol, Makarenko, 42*

**E-mail: vladimirov.al.an@yandex.ru*

ANALYSIS OF HARDNESS TEST METHODS AND PROSPECTS OF IMPROVEMENT

Abstract. *The analysis of hardness test methods based on indentation is demonstrated. A brief description of hardness testing of metal is presented. The article describes previously proposed and currently used methods for hardness test of materials and provides the methods' authors. Two schemes for indentation of the ball according to Brinell hardness test are described. Parameters of balls' impression by indentation depending on the applied load are compared. Two algorithms for calculating the Brinell hardness exist. The diagrams show the build-up and indentation of metal along the edges of impression, which depends on the elastic-plastic properties of materials. The results of experimental research on change in restored and unrestored depth of impressions by the load are described. The main drawbacks of Brinell hardness test are shown. They include the inconstancy of geometric dimensions of impression, the inaccuracy of determining impression diameter and the exception to consider the most important material characteristic - the tendency to cold-hardening. Significant deficiencies that distort the physical nature of deformation and fracture of materials are revealed. A description of metals hardness test method is given. It is based on determination of direct measurement of reconstructed depth of impression after the removal of the indenter or by using the calculation formulas. A hardness test method is described. It is based on an assessment of hardness under a chart covering several values. According to the Brinell method, there is an adequate functional dependence of metal fatigue with hardness indicators. The necessity to monitor the moment of transition of elastic deformation into plastic is established. It is indicated, the development of new hardness testing requires comparison of results under the load measured at the same deformations. The perspective directions of assessment the physico-mechanical characteristics of materials are formulated.*

Keywords: *loading mechanism, elastic aftereffect, plastic, additive tendency, actual fracture resistance*

REFERENCES

1. Brinell J.A., II Congres Int. des Methodes dessai, Paris, 1900.
2. O'Hale G. "The hardness of metals and its measurement", translation from English. N.D. Ageev, SNTI on ferrous and non-ferrous metallurgy. M-L, 1940, 376 p.
3. Foss F., Brumfield R., PASTM (1922), 22, 312.
4. Moser, M., S. und E, 1925, 45, 343 p.
5. Marten S.A. Berlin, Sizb. 1903, 1035 p.
6. Davidenkov N.N. Some problems of the mechanics of materials. Lenizdat, 1943, 152 p.
7. Drozd M.S. Determination of mechanical properties of metal without destruction. M. "Metallurgy", 1965, 170 p.
8. Markovets M.P. Construction of a diagram of true stresses by hardness and a process sample. tech. physics, 1949, T. XIX, vol. 3, pp. 371 – 382.
9. Ishlitsky A.Yu. Axisymmetric problem of plasticity and Brinell test. Prikl. mathematics and mechanics, 1943, vol. 8, pp. 201.
10. Moshenok V.I., Lazarova N.A., Doshechkina I.V., Demchenko S.V. Comparison of strengths determined during tensile tests and hardness values. Vestnik Khnadu, 2016, Issue. 73.

11. Sergiev A.P., Makarov A.V., Vladimirov A.A., Belov N.V. Towards the question of wear-resistance of technological equipment in machine building and metallurgy. *Russian Scientist*, 2018, vol. 2, no. 1, pp. 13–22.

Information about the author

Sergiev, Arkady P. PhD, Professor. E-mail: tomm_sti_misis@mail.ru. Sary Oskol Technological Institute named after A. A. Ugarov (branch) NUST «MISIS». Russia, 309516, Belgorod Region, Sary Oskol, Makarenko, 42.

Makarov, Alexey V. PhD, Assistant professor. E-mail: makarov.av@mail.ru. Sary Oskol Technological Institute named after A. A. Ugarov (branch) NUST «MISIS». Russia, 309516, Belgorod Region, Sary Oskol, Makarenko, 42.

Vladimirov, Alexander A. Postgraduate student. E-mail: vladimirov.al.an@yandex.ru. Sary Oskol Technological Institute named after A. A. Ugarov (branch) NUST «MISIS». Russia, 309516, Belgorod Region, Sary Oskol, Makarenko, 42.

Belov, Nikolay V. Postgraduate student. E-mail: belov_nv@nlmk.com. Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) NUST «MISIS». Russia, 309516, Belgorod Region, Sary Oskol, Makarenko, 42.

Received in July 2018

Для цитирования:

Сергиев А.П., Макаров А.В., Владимиров А.А., Белов Н.В. Анализ методов измерения твердости и перспективы их совершенствования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №10. С. 119–125. DOI: 10.12737/article_5bd95a79601bb4.49440716

For citation:

Sergiev A.P., Makarov A.V., Vladimirov A.A., Belov N.V. Analysis of hardness test methods and prospects of improvement. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2018, no. 10, pp. 119–125. DOI: 10.12737/article_5bd95a79601bb4.49440716