

УДК 620.178.15

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ПО БРИНЕЛЛЮ МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТИРОВАННОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

**О.А. Каток, научн. сотр., к.т.н., Н.П. Рудницкий, ст. научн. сотр., к.т.н.,
В.В. Харченко, профессор, д.т.н., Институт проблем прочности
имени Г.С. Писаренко НАН Украины, г. Киев**

Аннотация. Проведен сравнительный анализ известных методик определения твердости по Бринеллю методом инструментированного индентирования. Показаны достоинства предлагаемой методики Института проблем прочности (ИПП).

Ключевые слова: твердость по Бринеллю, метод инструментированного индентирования, диаграмма инструментированного индентирования, глубина вдавливания индентора.

ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ ЗА БРІНЕЛЛЕМ МЕТОДОМ ІНСТРУМЕНТОВАНОГО ІНДЕНТУВАННЯ

**О.А. Каток, наук. співр., к.т.н., М.П. Рудницький, ст. наук. співр.,
В.В. Харченко, професор, д.т.н., Інститут проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України, м. Київ**

Анотація. Проведено порівняльний аналіз відомих методик визначення твердості за Брінеллем методом інструментованого індентування. Показано переваги запропонованої методики Інституту проблем міцності (ІПМ).

Ключові слова: твердість за Брінеллем, метод інструментованого індентування, діаграма інструментованого індентування, глибина вдавливання індентора.

DETERMINATION OF BRINELL HARDNESS USING INSTRUMENTED INDENTATION TECHNIQUE

**O. Katok, researcher, Candidate of Technical Science, M. Rudnytskyi, senior
researcher, Candidate of Technical Science, V. Kharchenko, Professor, Doctor of
Technical Science, Institute of Strength Problems after H. Pisarenko,
NAS of Ukraine, Kyiv**

Abstract. A comparative analysis of the known procedures for determining the Brinell hardness using the instrumented indentation technique is carried out. The advantages of the technique developed by the Institute Strength Problems (IPS) are shown.

Key words: Brinell hardness, instrumented indentation test method, instrumented indentation curve, indentation depth.

Введение

В мировой практике значительное внимание уделяется усовершенствованию неразрушающих методов контроля состояния металла ответственного оборудования в процессе эксплуатации.

Анализ публикаций

Регистрация диаграммы индентирования в координатах усилие – глубина вдавливания индентора (метод инструментированного индентирования) [1] при неразрушающих испытаниях металла позволяет получать

намного больше информации о состоянии материала по сравнению со стандартными испытаниями на твердость. На основе обработки таких диаграмм разработан ряд методик определения характеристик механических свойств материалов, в том числе методики определения твердости по Бринеллю [2, 3].

В методике определения твердости по Бринеллю по глубине вдавливания индентора h , предложенной В.М. Матюниным [2], для устранения влияния упругой деформации узла измерения глубины вдавливания индентора на измерение глубины отпечатка используется уравнение пересчета глубины вдавливания индентора в глубину отпечатка t

$$t = h_p + \left(\frac{E_{mat}}{E_{ind} + E_{mat}} \right) h_e, \quad (1)$$

где E_{mat} и E_{ind} – модули Юнга испытываемого материала и индентора соответственно; h_p – пластическая составляющая глубины вдавливания индентора; h_e – упругая составляющая глубины вдавливания индентора, которая состоит из упругой составляющей индентора – h_{e_i} и материала – h_{e_s} .

При определении твердости по Бринеллю по методике В.М. Матюнина необходимо знать модуль Юнга испытываемого материала и индентора либо использовать допущение равенства этих модулей. При затруднении определения модуля Юнга испытываемого материала вместо уравнения (1) можно использовать уравнение Оливера [4]

$$t = h - \varepsilon (h - h_r), \quad (2)$$

где ε – поправочный коэффициент для индентора с шариком, равный 3/4; h_r – тангенс угла участка разгрузки, значение которого определяют из диаграммы в координатах усилие – глубина индентирования в точке пересечения касательной к циклу разгрузки F_{max} с осью перемещения индентора.

Другой способ определения твердости по Бринеллю, основанный на корреляционной зависимости между искомой величиной и пластической твердостью H_p , был предложен М.Б. Бакировым [3]

$$HB = 1,5 (H_p)^{0,9}, \quad (3)$$

где под пластической твердостью понимается твердость материала, найденная по формуле

$$H_p = \frac{F}{\pi D h_p}, \quad (4)$$

где D – диаметр сферического индентора.

Фактически методика Бакирова основана на таблице пересчета пластической твердости в твердость по Бринеллю, что требует дополнительного времени на обработку результатов. Точность такого метода будет зависеть от корреляционной зависимости (3).

Авторами работы разработана новая методика (далее – методика ИПП) [5]. Данная методика основана на корреляционной зависимости между твердостью по Бринеллю, полученной согласно ГОСТ 9012-59 [6], и параметром a , равным тангенсу угла наклона диаграммы инструментированного индентирования в координатах $F_{max} - h_p$, где F_{max} – максимальное усилие, прикладываемое к индентору в цикле нагружения, h_p – пластическая составляющая глубины вдавливания индентора, соответствующая циклу нагружения

$$HB = k_{1HB} \cdot a + k_{2HB}, \quad (5)$$

где k_{1HB} и k_{2HB} – параметры, эмпирические значения которых определяются путем статистической обработки общего массива экспериментальных данных, полученных для исследуемых материалов.

Параметры k_{1HB} и k_{2HB} равны 0,009 мм⁻¹ и 28,5 МПа соответственно в случае испытаний на установке УТМ-20НТ. Следует также отметить, что точность определения механических характеристик сталей не зависит от упругой деформации узла измерения глубины вдавливания индентора. Кроме того, отклонение результатов, полученных при использовании методики ИПП, от результатов, полученных по ГОСТ 9012-59, можно уменьшить за счет увеличения количества материалов, которые используются при установлении линейной зависимости (5).

Цель и постановка задачи

Представляет интерес проведение сравнительного анализа известных методик определения твердости HB методом инструментированного индентирования с целью выявления наиболее точной и эффективной методики.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Анализ методик определения твердости по Бринеллю методом инструментированного индентирования проводили на прямоугольных образцах $60 \times 40 \times 10$ мм из сталей 45, 15Х2МФА, 15Х2НМФА и металлов сварных швов 10ХМФТ, 08ХГМНТА. Чистота рабочей поверхности была не ниже $Ra = 0,06$. Твердость по Бринеллю HB , согласно ГОСТ 9012-59 [6], определяли на твердомере ХПО-250. Испытания методом инструментированного индентирования проводили согласно ISO 14577-1 [1] в статическом и циклическом режимах нагружения шариком $D = 2,5$ мм на лабораторной установке УТМ-20НТ [7, 8] при комнатной температуре. Диаграммы индентирования записывали в жестком режиме нагружения со скоростью перемещения индентора 0,05 мм/мин. Характерная диаграмма индентирования стали 15Х2НМФА в циклическом режиме нагружения приведена на рис. 1.

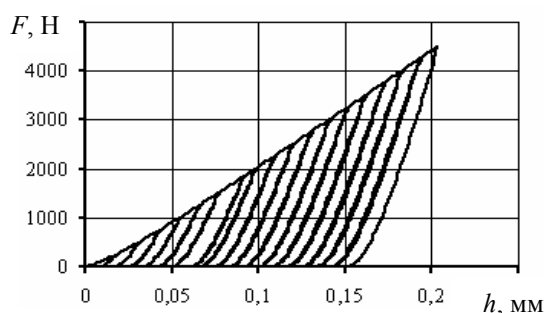


Рис. 1. Характерная диаграмма индентирования стали 15Х2НМФА в циклическом режиме нагружения

Значения твердости HB исследованных сталей, полученных по различным методикам и на разном оборудовании, представлены в табл. 1.

Как видно из таблицы, максимальное отклонение характеристик твердости, полученных по методике Матюнина [2], от характеристик

твердости, полученных по ГОСТ 9012-59, не превышало 4,8 %.

Расчеты твердости по Бринеллю, выполненные с использованием уравнения Оливера в методике Матюнина [2, 4], показали, что отклонение от результатов твердости HB , полученных по ГОСТ 9012-59, немного больше предыдущих и составило 5,2 %. Значения твердости, определенные по методике Бакирова [3] с использованием уравнений (3) и (4), показывают расхождение со значениями твердости HB , вычисленными по ГОСТ 9012-59, на 4,3 %.

Для определения значений твердости по Бринеллю, согласно методике ИПП [5], параметр a определяли из диаграммы инструментированного индентирования в координатах $F_{\max} - h_p$. Типичные диаграммы $F_{\max}(h_p)$ для сталей 08ХГМНТА, 15Х2МФА, 10ХМФТ, 15Х2НМФА и 45 приведены на рис. 2. Различия между значениями твердости, полученными с использованием предложенной методики и общепринятым методом по ГОСТ 9012-59, не превышают ± 3 % и находятся в пределах погрешности определения твердости в соответствии с государственными стандартами.

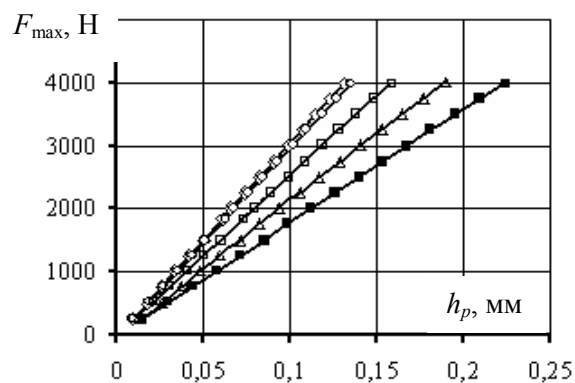


Рис. 2. Диаграммы инструментированного индентирования в координатах $F_{\max} - h_p$, для сталей: \diamond – 08ХГМНТА; \circ – 15Х2МФА; \square – 10ХМФТ; Δ – 15Х2НМФА; \blacksquare – 45

Таблица 1 Результаты определения твердости по Бринеллю, согласно ГОСТ 9012-59 и методом инструментированного индентирования

Марка стали	ГОСТ 9012-59, [6]	Методика Матюнина [2]	Методика Матюнина и уравнение Оливера [2, 4]	Методика Бакирова [3]	Методика ИПП [5]
45	183,7	192	192	191	189
15Х2НМФА	222	226	227	224	223
08ХГМНТА	306	310	316	318	301
15Х2МФА	297,3	304	310	310	294
10ХМФТ	255	264	261	264	254

Выводы

Проведен сравнительный анализ ряда методик (Матюнина, Бакирова, ИПП) определения твердости по Бринеллю методом инструментированного индентирования. Методика ИПП оказалась наиболее точной. Разница между значениями твердости, полученными с использованием методики ИПП и общепринятым методом по ГОСТ 9012-59, не превышает $\pm 3\%$.

Литература

1. ISO 14577-1:2002 – ISO 14577-3:2002 – Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.
2. Матюнин В.М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов / В.М. Матюнин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 216 с.
3. РД ЭО 0027-94. Инструкция по определению характеристик механических свойств металла оборудования атомных электростанций безобразовыми методами по характеристикам твердости. – Т. 1, 2. – М.: Концерн Росэнергоатом, 1994. – 68 с.
4. Oliver W.C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load displacement sensing indentation experiments / W.C. Oliver, G.M. Pharr / J. Mater. Res. – 2002. – Vol. 7, № 6. – P. 1564–1583.
5. Каток О.А. Определение механических свойств сталей методом непрерывного индентирования / О.А. Каток, В.В. Харченко, А.В. Дроздов и др. // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2008. – Вып. 31. – С. 208–213.
6. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. – Введ. впервые 01.01.1960. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 38 с.
7. Харченко В.В. Установка для определения механических характеристик конструкционных материалов методом инструментированного индентирования / В.В. Харченко, Н.П. Рудницкий, О.А. Катов и др. / Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2007. – Вып. 28. – С. 140–147.
8. Патент № 57446 G 01 N3/40. Установка для реєстрації діаграми інструментованого індентування / Заявник та патентовласник Інститут проблем міцності НАНУ 01201010123; заявл. 16.08.2010; опубл. 25.02.2011. – Бюл. № 4.

Рецензент: И.П. Гладкий, профессор, к.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 18 августа 2011 г.