

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ПО МАРТЕЛЮ ПРИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ИНДЕНТИРОВАНИИ – ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Мильман Ю.В., Мордель Л.В.

*Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины,
Киев, Украина,
milman@ipms.kiev.ua*

Определение твердости материалов с помощью жестких инденторов широко используется в технике и в исследовательской практике. Если раньше индентирование использовалось для приближенной оценки механических свойств, то в последние годы методы индентирования используются для определения целого ряда механических характеристик: предела текучести, деформационного упрочнения, вязкости разрушения и др. Индентирование также широко используется для анализа физических проблем прочности [1].

Как правило, в физических экспериментах используются пирамидальные инденторы (четырёхгранные и трёхгранные) и определяется твердость по Мейеру:

$$HM = \frac{P}{F}, \quad (1)$$

где P – нагрузка на индентор, а F – площадь проекции отпечатка твердости на поверхность образца. Применение пирамидальных инденторов обеспечивает подобие формы отпечатка твердости при изменении нагрузки на индентор и размера отпечатка твердости, а величина HM имеет физический смысл среднего контактного давления на площадке индентирования.

Энергетический подход к твердости был применен Мартелем в 1895 году [2]. Твердость по Мартелю HMR определялась как:

$$HMR = \frac{A}{V} \quad (2)$$

где A – работа деформации, а V – объем вытесненного из отпечатка твердости металла.

Таким образом HMR определяется энергией необходимой для образования единицы объема отпечатка твердости.

В опытах Мартеля шарик не удавалось измерить объем отпечатка под нагрузкой для определенной невосстановленной твердости, то определяли восстановленную твердость. В этом случае A в выражении (1) должно соответствовать работе, вызывающей остаточную пластическую деформацию.

Поскольку в этих опытах не удавалось измерить объем отпечатка под нагрузкой для определения невосстановленной твердости, то определяли восстановленную твердость. В этом случае A в выражении (1) должно соответствовать работе, вызывающей остаточную пластическую деформацию.

Тэйбор учел упругое восстановление отпечатка и получил выражение [3]:

$$HMR = \frac{mg \left(h_1 - \frac{3}{8} h_2 \right)}{V} \quad (3)$$

Твердость по Мартелло (HMR) имеет ту же размерность, что и HM и описывает тот же процесс, поэтому можно считать, что:

$$HMR = K HM, \quad (4)$$

где K – безразмерный параметр.

Твердость по Мартелло была введена для вычисления динамической твердости, но она также может использоваться и для вычисления статической твердости [4].

Авторы обратили внимание на то, что использование инструментального метода индентирования с записью кривой нагрузка на индентор P – перемещение индентора h дает простой метод расчета работы A , затраченной на образование отпечатка твердости. При этом, как следует из рис.1, может быть определена работа пластической деформации A_p , работа упругой деформации A_e и общая работа деформации A_t , так что $A_t = A_p + A_e$.

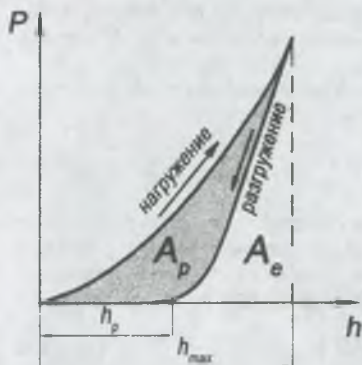


Рис.1. Диаграмма индентирования в координатах нагрузка на индентор P – перемещение индентора h

При определении HMR методом инструментального индентирования целесообразно использовать работу деформации A_t и определять объем невосстановленного отпечатка твердости V . В работе [5] дана методика расчета контактной глубины внедрения индентора h_c для трехгранного индентора Берковича и показано что площадь проекции отпечатка твердости на поверхность образца $F = 24,56h_c^2$. Поэтому объем отпечатка твердости равен

$$V = \frac{1}{3} F h_c = 8,19 h_c^3 \quad (5)$$

Методика определения HMR по результатам инструментального индентирования при $A = A_t$ и объемом отпечатка V , вычисленным по (5), впервые применена в настоящей работе для определения HMR ряда металлов и сплавов. Некоторые результаты приведены в табл. 1 Для

сравнения HMR и HM и определения константы K в (4) рассмотрим случай инструментального индентирования, когда нагрузка P возрастает от 0 до некоторого P_{max} , а затем снимается. При этом кривая нагружения на рис.1 удовлетворительно описывается степенной зависимостью:

$$P = kh^n,$$

где коэффициент k и показатель степени n – константы [6].

В этом случае

$$A_t = \int_0^{h_{max}} P dh = \int_0^{h_{max}} kh^n dh = \frac{k}{n+1} h_{max}^{n+1} = \frac{P_{max} h_{max}}{n+1} \quad (6)$$

Величина контактной глубины внедрения индентора h_c несколько меньше регистрируемой прибором для инструментального индентирования глубины h_{max} вследствие упругого прогиба поверхности образца вокруг отпечатка твердости. Введем параметр $\alpha = \frac{h_{max}}{h_c}$. Тогда

$$HMR = \frac{3P_{max} h_{max}}{(n+1)Fh} = \frac{3\alpha}{n+1} HM, \quad (7)$$

используя (5) и (6) получаем в уравнении (4):

$$K = \frac{3\alpha}{n+1} \quad (8)$$

Обычно α несколько больше 1, а n несколько меньше 2 [6]. Поэтому $K > 1$ (см. табл.1).

Таблица 1. Значения твердости по Мартелю HMR и твердости по Мейеру HM , а также расчетного и экспериментального значения константы K в (4) для меди, алюминия, монокристалла молибдена и сплавов алюминия

Материалы	P , г	HMR , кг/мм ²	HM , кг/мм ²	K	$K_{\text{эксперимент}}$
Al	50	72,10	56,91	1,28	1,30
Cu	100	119,9	99,46	1,24	1,29
Mo	150	334,5	267,36	1,34	1,31
Al-4,45Mg-0,7Mn-0,13Cr	150	133,09	116,2	1,13	1,14
Al-4,45Mg-0,4Mn-0,3Sc-0,1Zr	150	167,09	146,6	1,13	1,14
Al-6Zn-2,3Mg-1,5Cr-0,3Sc-0,1Zr	150	286,5	207,08	1,13	1,17

Из табл. 1 видно, что действительно HMR несколько больше HM . Причем расчет K по [8] хорошо совпадает с экспериментальным значением K . Отметим, что HMR при инструментальном индентировании может быть определено более точно чем HM , поскольку для определения HMR не требуются значения упругих характеристик металлов.

Применение рассмотренного энергетического подхода к определению твердости существенно расширяет возможности методов индентирования. Авторами показано, что твердость по Мартелю может быть применена при описании ряда процессов, в которых HM теряет физический смысл. Например, это относится к процессу пробивания мишени недеформируемым кинетическим ударником, который рассматривается как «глубокое индентирование» и для его описания с успехом используется выражение (2).

Список литературы

1. Ю.В. Мильман Новые методики микромеханических испытаний материалов методом локального нагружения жестким индентором. В кн.: «Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя». К.: Наукова думка, 1998, с.637-656.
2. M. Martell. Commission des Méthodes D'Essai des Matériaux de Construction. Paris, Ministère des Travaux Publics, 1895. v.3, p.261-277.
3. D. Tabor. The hardness of metals. Clarendon Press: Oxford, 1951. 130 p.
4. В.К. Григорович. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976, 230 с.
5. W.C. Oliver, G.M. Pharr. A new improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and sensing indentation experiments. Journal of Materials Research, 1992, v.7, is.6, p.1564-1583.
6. Yu.V. Milman, A.A. Golubenko, S.N. Dub. Indentation size effect in nanohardness. Acta Materialia, 2011, v.59, p.7480-7487.