

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-4-57-63>

ОЦЕНКА УПРУГОЙ ПОДАТЛИВОСТИ ТВЕРДОМЕРА ПРИ КИНЕТИЧЕСКОМ ИНДЕНТИРОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ

© Вячеслав Михайлович Матюнин*, Артём Юрьевич Марченков, Нуха Абусаиф, Никита Андреевич Стасенко

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия; * e-mail: MatyuninVM@mpei.ru

Статья поступила 22 июня 2018 г. Поступила после доработки 22 июня 2018 г. Принята к публикации 22 июня 2018 г.

При определении механических свойств материалов кинетическим индентированием с регистрацией диаграмм вдавливания необходим тщательный учет упругой податливости прибора — твердомера. От методики оценки и учета упругой податливости в наибольшей мере зависят определяемые значения модуля нормальной упругости испытуемых материалов. Поэтому проверку методик следует проводить при кинетическом индентировании материалов с известными, но сильно различающимися модулями нормальной упругости. К настоящему времени уже накоплен положительный опыт оценки и учета упругой податливости прибора при кинетическом индентировании материалов алмазной пирамидой, что отражено в соответствующих стандартах. Однако переносить этот опыт на кинетическое индентирование стальным или твердосплавным шаром нельзя без дополнительных исследований и экспериментальной проверки. В данной статье предложена методика оценки упругой податливости твердомера по кинетической диаграмме вдавливания шара, основанная на уравнении Г. Герца для случая упругого контакта шара с плоскостью. Установлена прямо пропорциональная связь дополнительных упругих деформаций звеньев прибора от нагрузки вдавливания, характерная для каждого прибора и не зависящая от диаметра шара. Эта связь позволяет учесть упругую податливость прибора программными средствами при регистрации и обработке диаграмм вдавливания шара. Выполнены эксперименты по определению модуля нормальной упругости и твердости кинетическим индентированием шаром различных материалов (сталь, алюминиевый, магниевый и титановый сплавы) с использованием существующей и предлагаемой методик учета упругой податливости прибора. В качестве основного критерия, подтверждающего достоверность методики, принято совпадение или близость значений модуля нормальной упругости одного и того же материала, определенных по диаграммам вдавливания шара и растяжения образца. Изложены преимущества и недостатки известной и предложенной методик, даны практические рекомендации по их использованию.

Ключевые слова: кинетическое (инструментальное) индентирование; сферический индентор; упругая податливость; твердость; модуль упругости.

EVALUATION OF THE ELASTIC COMPLIANCE OF THE HARDNESS TESTER IN KINETIC INDENTATION TESTS

© Vyacheslav M. Matyunin*, Artem Yu. Marchenkov, Nuha Abusaif, Nikita A. Stasenko

National research university "Moscow power engineering institute", Moscow, Russia; * e-mail: MatyuninVM@mpei.ru

Received June 22, 2018. Revised June 22, 2018. Accepted June 22, 2018.

When determining the mechanical properties of materials in kinetic indentation tests using indentation diagrams, careful consideration of the elastic compliance of the device, i.e., the hardness tester, is required. The determined values of the Young's modulus of the tested material substantially depend on the reliability of the method of evaluation and accounting for the elastic compliance. Therefore, verification of the test techniques based on kinetic indentation should be carried out using the materials with the known, but rather different values of the Young's modulus. Successful experience has been gained to date in the evaluating and accounting for the elastic compliance of the device upon kinetic indentation of the materials by a diamond pyramid which is reflected in the relevant standards. However, there is no way of transferring this experience to the kinetic indentation by a steel or carbide ball without additional research and experimental verification. We propose a technique for estimating the elastic compliance of a hardness tester using a kinetic ball indentation diagram based on the G. Hertz equation for the case of elastic contact of a ball with a plane. A linear correlation has been determined between the additional elastic deformations of the device and indentation load, which is characteristic of each device and independent on the ball diameter. The obtained dependence allows for correct consideration of the elastic compliance of the

device using software applications in recording and processing the ball indentation diagrams. Experiments have been carried out to determine the hardness and the Young's modulus through ball instrumented indentation of different materials (steel, aluminum alloy, magnesium alloy, and titanium alloy) using the existing and developed methods of taking into account the elastic compliance of the device. The coincidence or proximity of the values of the Young's modulus of the same material determined from the ball indentation diagrams and sample tensile tests is considered the main criterion proving the accuracy of the technique. The advantages and shortcomings of the known and proposed procedures are discussed along with practical recommendations for their applications.

Keywords: kinetic (instrumented) indentation; ball indenter; elastic compliance; hardness; Young modulus.

Кинетическое индентирование (в зарубежной терминологии — инструментальное индентирование — instrumented indentation) как сравнительно новый вид механических испытаний все шире используется при контроле механических свойств материалов на разных масштабных уровнях. Под кинетическим индентированием понимается процесс, при котором происходит внедрение индентора в испытуемый материал под действием плавно возрастающей нагрузки с последующим ее снятием и регистрацией диаграмм вдавливания в координатах нагрузка — перемещение индентора. При необходимости эти диаграммы регистрируют и в других координатах, например, нагрузка — время, перемещение индентора — время. Кинетическое индентирование выполняют на специальных автоматизированных приборах и установках, взаимодействующих с компьютером. Преимущества кинетического индентирования отмечены в отечественных и зарубежных публикациях, например в [1–7]. За последние семь лет в России уже введены в действие четыре стандарта по кинетическому индентированию: ГОСТ Р 8.748–2011, ГОСТ Р 8.904–2015, ГОСТ Р 56232–2014, ГОСТ Р 56474–2015. Причем первые два модифицированы по отношению к международным стандартам, третий разработан в России, а четвертый — специалистами России и Беларуси.

По кинетическим диаграммам вдавливания пирамиды чаще всего определяют твердость и модуль нормальной упругости материалов. А при вдавливании шара, помимо этих характеристик, можно оценить и такие, как, например, предел текучести, временное сопротивление, равномерную деформацию и др. [7]. Однако и при вдавливании пирамиды и при вдавливании шара необходимо учитывать упругую податливость прибора, которая проявляется в увеличении регистрируемых значений перемещения индентора за счет дополнительных упругих деформаций узлов прибора. Без учета упругой податливости прибора невозможно правильно рассчитать геометрические параметры отпечатка и поэтому определяемые значения твердости и особенно модуля нормальной упругости могут сильно отличаться от действительных.

К настоящему времени уже накоплен опыт оценки упругой податливости твердомера при индентировании алмазной пирамидой, что отражено в ГОСТ Р 8.904–2015 (приложение D). Для индентирования шаром таких сведений гораздо меньше. Вместе с тем в ГОСТ Р 56232–2014 рекомендуется и для индентирования шаром использовать методику, применяющуюся для индентирования алмазной пирамидой.

Учитывая более широкие возможности кинетического индентирования шаром при определении механических свойств материалов, авторы рассмотрели и экспериментально опробовали не только существующую, но и предложенную методику оценки упругой податливости прибора.

Исходя из ГОСТ Р 56232–2014, упругую податливость прибора определяют по линии разгрузки диаграммы вдавливания шара в координатах нагрузка F — глубина вдавливания индентора h (рис. 1) с использованием методики Оливера – Фарра [4, 5]. Согласно этой методике применительно к внедрению шара упругая податливость прибора

$$C_t = \frac{dh}{dF} = \frac{h_{\max} - h_r}{F_{\max}}, \quad (1)$$

где h_{\max} — максимальное значение глубины внедрения шара; h_r — глубина внедрения шара, соответствующая точке пересечения касательной к начальному участку линии разгрузки диаграммы с осью h (см. рис. 1, а).

С учетом упругой податливости прибора расчетная глубина контакта шара

$$h_c = h_{\max} - 0,75F_{\max}C_t. \quad (2)$$

Допущением в изложенной методике является условно принятая прямолинейность участка в начале линии разгрузки. Однако этот участок можно только приближенно принять за прямолинейный. Поэтому имеется некоторая неопределенность в проведении касательной, являющейся продолжением этого участка, что отрицательно сказывается на точности определения h_r . Вместе с тем авторы этой методики предлагают для повышения точности выразить степенной зависимостью начальный участок линии разгрузки и

использовать эту зависимость для нахождения касательной дифференцированием при F_{\max} .

В связи с этим авторы данной статьи выбрали другой подход к оценке упругой податливости прибора, основанный на уравнении Г. Герца для случая упругого контакта шара с плоскостью. Согласно этому подходу диаграмму вдавливания шара в упругой области получают в координатах нагрузка F – упругое сближение α_0 (см. рис. 1, б), в упругопластической области — в координатах нагрузка F – упругопластическое сближение α . Под упругим (α_0) и упругопластическим (α) сближениями следует понимать сближение центра шара с центром невосстановленной поверхности отпечатка. Принципиальное отличие в трактовке диаграмм на рис. 1 состоит в том, что диаграмма $F - \alpha$ представляет зависимость нагрузки F от упругопластического сближения α , в которое входит упругая деформация шара. При регистрации диаграммы $F - h$ в случае вдавливания алмазной пирамиды ее упругим сжатием можно пренебречь из-за высоких значений твердости и модуля упругости алмаза. При использовании стального закаленного шара необходимо учитывать его упругую деформацию при индентировании различных конструкционных сталей и сплавов. В области упругого индентирования до $F = F_{\text{уп}}$ упругое сближение α_0 состоит из упругих деформаций материала (W_M) и шара ($W_{\text{ш}}$):

$$\alpha_0 = W_M + W_{\text{ш}}. \quad (3)$$

В области упругопластического индентирования упругопластическое сближение α включает упругое ($\alpha_{\text{уп}}$) и пластическое (h) сближения:

$$\alpha = \alpha_{\text{уп}} + h. \quad (4)$$

Глубина невосстановленного отпечатка

$$t = h + W_M = \alpha - W_{\text{ш}}. \quad (5)$$

При равенстве модулей нормальной упругости испытуемого материала (E_M) и материала шара ($E_{\text{ш}}$) упругие деформации W_M и $W_{\text{ш}}$ равны между собой, а с учетом (3) – (5) глубина невосстановленного отпечатка

$$t = (\alpha + h)/2. \quad (6)$$

В случае неравенства E_M и $E_{\text{ш}}$ эта глубина составит

$$t = h + \gamma(\alpha_{\text{уп}}), \quad (7)$$

где коэффициент $\gamma = \frac{E_{\text{ш}}}{E_{\text{ш}} + E_M}$.

Если исключить упругую податливость прибора, то на упругом участке диаграммы вдавли-

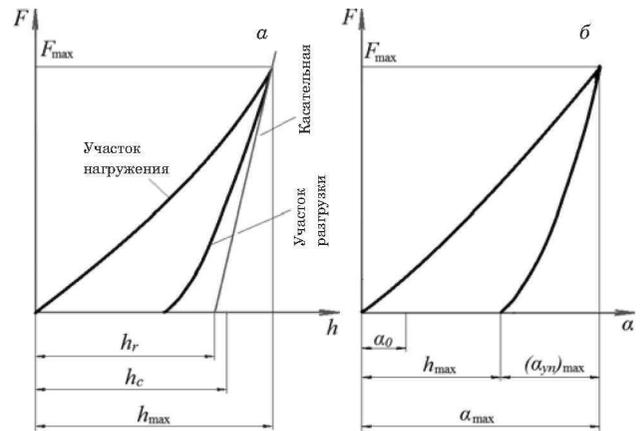


Рис. 1. Схемы диаграмм вдавливания шара $F - h$ (а) и $F - \alpha$ (б)

вания упругое сближение α_0 можно определить из формулы Г. Герца

$$F = \frac{4R^{0,5}}{3 \left(\frac{1 - \nu_M^2}{E_M} + \frac{1 - \nu_{\text{ш}}^2}{E_{\text{ш}}} \right)} \alpha_0^{1,5}, \quad (8)$$

где R — радиус шара; ν_M и $\nu_{\text{ш}}$ — коэффициенты Пуассона испытуемого материала и материала шара соответственно.

Приняв $J_M = \frac{1 - \nu_M^2}{E_M}$ и $J_{\text{ш}} = \frac{1 - \nu_{\text{ш}}^2}{E_{\text{ш}}}$, из (8) можно получить

$$\alpha_0 = \left[\frac{9F^2}{16R} (J_M + J_{\text{ш}})^2 \right]^{1/3}. \quad (9)$$

В частном случае — при $J_M = J_{\text{ш}} = J$ — из (9) следует

$$\alpha_0 = \left[\frac{9F^2}{16R} 4J^2 \right]^{1/3}. \quad (10)$$

На упругом участке диаграммы вдавливания к упругому сближению α_0 добавляется дополнительная упругая деформация $\Delta\alpha$ звеньев прибора, а поэтому регистрируемое упругое сближение

$$\alpha'_0 = \alpha_0 + \Delta\alpha. \quad (11)$$

Если располагать упругим участком реальной диаграммы вдавливания, то, определив по нему несколько значений α'_0 , F и рассчитав α_0 для каждого F , можно найти связь $\Delta\alpha$ с F для исследуемого твердомера. Для установления такой связи был проведен ряд экспериментов.

В качестве испытуемого материала использовали образцовую плитку твердостью 470 HV10. Кинетическое индентирование выполняли шара-

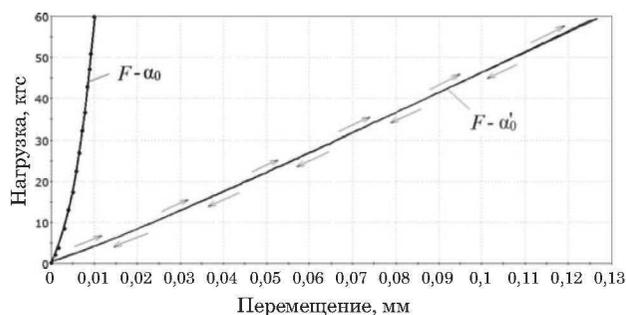


Рис. 2. Экспериментальная $F - \alpha'_0$ и расчетная $F - \alpha_0$ диаграммы вдавливания шара ($D = 30,17$ мм) в упругой области

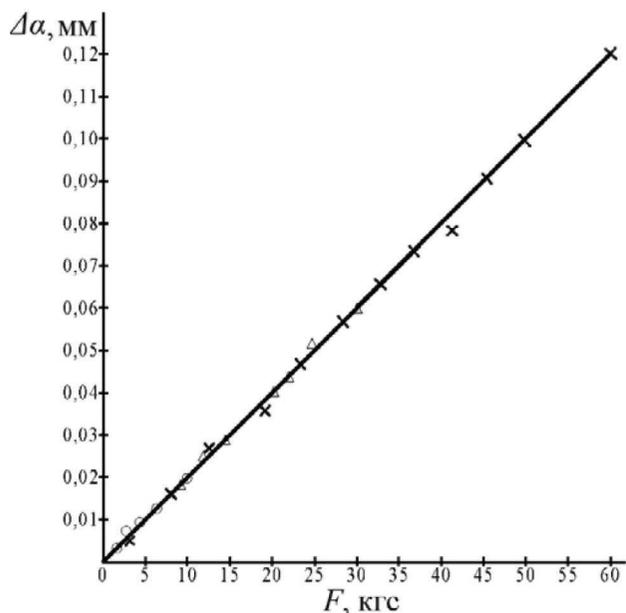


Рис. 3. Зависимость $\Delta\alpha$ от F в упругой области при вдавливании шаров диаметрами D , равными 10 (○), 15,04 (△) и 30,17 мм (×)

ми диаметрами D , равными 30,17, 15,04 и 10 мм. Материал шаров — сталь ШХ20СГ твердостью 60 HRC (990 HV10). Выбор указанных плитки и диаметров шаров обусловлен необходимостью получения упругого участка диаграммы вдавливания с достаточной протяженностью, чтобы измерить по нему не менее 10 значений F и α'_0 . Кроме того, использование разных шаров из одного материала позволяет выявить влияние D на связь $\Delta\alpha$ с F . Индентирование выполняли на автоматизированном приборе МЭИ-ТА [7] и универсальной машине Instron 5982, переоборудованной для испытаний вдавливанием в режиме сжатия.

Максимальные нагрузки вдавливания, до которых индентирование каждого шара происходило в упругой области, были установлены при

условии совпадения линий нагружения и полной разгрузки диаграммы.

На рис. 2 представлена диаграмма вдавливания $F - \alpha'_0$ в упругой области, полученная на машине Instron 5982 при нагружении и разгрузке шара диаметром $D = 30,17$ мм. Здесь же показана расчетная зависимость Г. Герца $F - \alpha_0$, а стрелками — направления совпадающих линий нагружения и разгрузки.

Для каждой диаграммы вдавливания в 10–15 точках определяли F и α'_0 . Затем для каждого значения F рассчитывали α_0 по формулам (9)–(10), в которых принято: $E_m = E_{III} = E = 21\,500$ кгс/мм²; $\nu_m = \nu_{III} = \nu = 0,3$; $J_m = J_{III} = J = 0,0000423$ мм²/кгс. Располагая значениями α'_0 и α_0 при каждой нагрузке F , можно было рассчитать $\Delta\alpha$ и установить ее связь с F (рис. 3).

Статистическая обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов показала, что между $\Delta\alpha$ и F наблюдается общая прямо пропорциональная связь для всех диаметров шаров с коэффициентом корреляции $r = 0,999$:

$$\Delta\alpha = kF, \quad (12)$$

где k — коэффициент пропорциональности, который характеризует упругую податливость прибора или испытательной машины. В данном случае для машины Instron 5982 коэффициент $k = 0,00215$ мм/кгс.

Аналогичная прямо пропорциональная зависимость $\Delta\alpha$ от F была получена и для прибора МЭИ-ТА, но с другим коэффициентом пропорциональности — $k = 0,00011$ мм/кгс.

Установленная прямо пропорциональная связь $\Delta\alpha$ с F , не зависящая от D , позволяет более просто определить коэффициент пропорциональности k для любых прибора или машины по двум-трем точкам упругой части диаграммы вдавливания одного шара, а затем использовать ее для шаров разного диаметра.

Недостатком предлагаемой методики оценки и учета упругой податливости прибора является предположение о единой прямо пропорциональной связи $\Delta\alpha$ с F для различных диапазонов индентирования, включая микро- и нанодиапазоны. К настоящему времени эта методика пока опробована только в макродиапазоне индентирования.

Преимущество данной методики состоит в простоте ее использования и возможности автоматизированного учета программными средствами при регистрации и обработке диаграммы вдавливания $F - \alpha$.

Для экспериментальной проверки изложенной методики оценки и учета упругой податливости прибора были определены по диаграммам

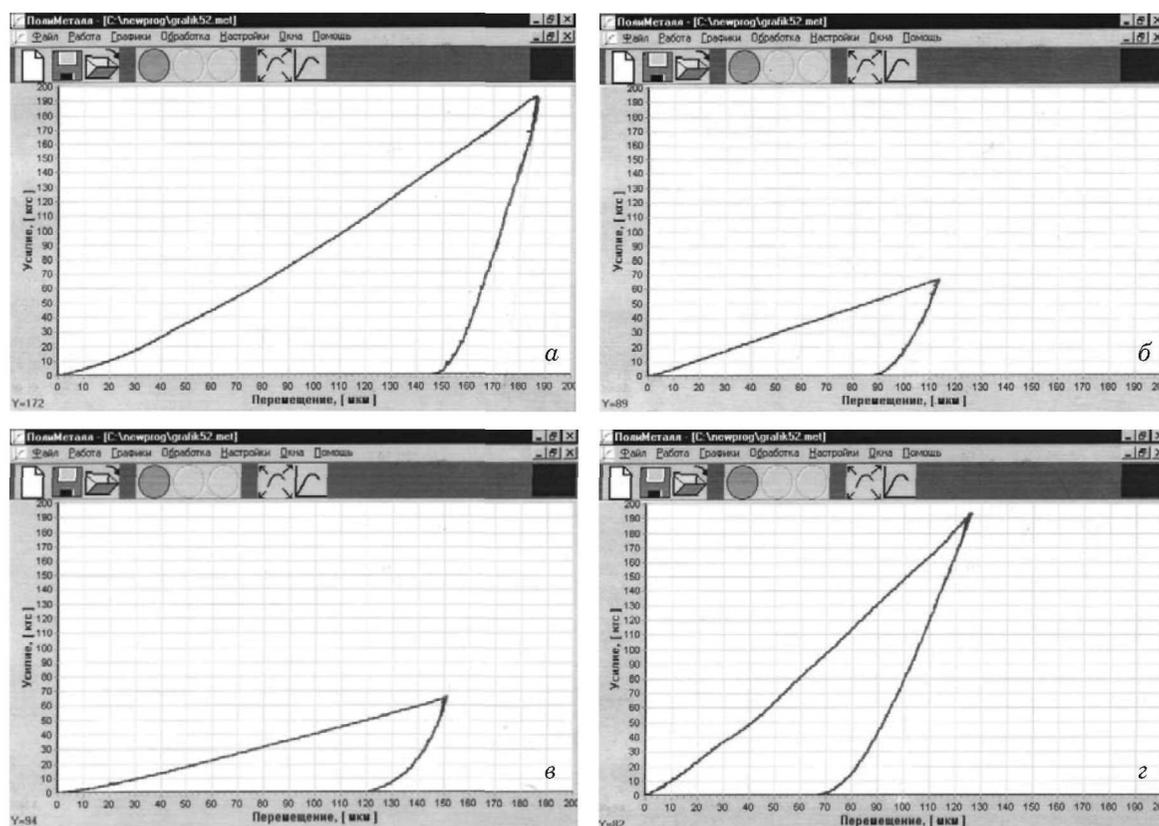


Рис. 4. Диаграмма вдавливания $F - \alpha$ для стали ЭП184 (а), алюминиевого сплава Д16 (б), магниевого сплава МА2-1 (в), титанового сплава 5В (г)

вдавливания значения модуля нормальной упругости и твердости по Бринеллю различных материалов. Следует отметить, что из всех механических характеристик материала модуль упругости в наибольшей степени зависит от упругой податливости прибора. Поэтому, сравнивая значения модуля упругости, определяемые вдавливанием индентора и другим стандартным способом, например, растяжением образцов, можно сделать вывод о пригодности той или иной методики. Для испытаний растяжением и вдавливанием использовали материалы, сильно различающиеся модулем упругости: сталь ЭП184, алюминиевый сплав Д16, магниевый сплав МА2-1, титановый сплав 5В. Вначале модуль упругости E оценивали на машине Instron 5982 при растяжении

образцов с применением экстензометра Instron GL25 с базой 25 мм. Твердость по Бринеллю HB определяли на аттестованном приборе МЭИ-Г7 по диаметру отпечатка при вдавливании шара диаметром $D = 2,5$ мм (ГОСТ 9012–59). В табл. 1 приведены полученные значения E и HB для испытанных материалов.

Испытания кинетическим индентированием выполняли на автоматизированном приборе МЭИ-ГА, для которого уже была получена связь $\Delta\alpha$ с F . Диаметр шара выбран таким же — 2,5 мм, как и для прибора МЭИ-Г7, на котором определяли твердость по Бринеллю HB .

На рис. 4 представлены диаграммы вдавливания $F - \alpha$ испытанных материалов. Значения максимальных нагрузок вдавливания F_{max} для

Таблица 1. Результаты определения модуля нормальной упругости E методом растяжения образцов и твердости по Бринеллю HB с измерением диаметра отпечатка d (ГОСТ 9012–59) испытанных материалов

Материал и его марка	E		HB	
	Н/мм ²	кгс/мм ²	Н/мм ²	кгс/мм ²
Сталь ЭП184	208 335	21 237	1570	160
Алюминиевый сплав Д16	71 417	7280	760	77,5
Магниевый сплав МА2-1	41 300	4210	535	54,5
Титановый сплав 5В	114 581	11 680	2727	278

каждого материала выбраны близкими к значениям нагрузок, рекомендуемых ГОСТ 9012-59 для шара диаметром $D = 2,5$ мм в зависимости от уровня твердости испытываемого материала.

По полученным диаграммам вдавливания определяли твердость индентирования по Бринеллю HB_{IT} и модуль упругости E_{IT} при индентировании согласно ГОСТ Р 56232-2014.

Твердость HB_{IT} находили с использованием h_c , рассчитанной по формуле (2):

$$HB_{IT} = F_{\max}/(\pi Dh_c). \quad (13)$$

Для расчета E_{IT} вначале определяли приведенный модуль упругости при вдавливании

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2C_t \sqrt{A_p}}, \quad (14)$$

где $A_p = \pi a_c^2$ — площадь поперечного сечения контактной поверхности шара радиусом $a_c = \sqrt{h_c D - h_c^2}$.

Зная E_r , $E_{ш}$, $\nu_{ш}$, ν_m , рассчитывали

$$E_{IT} = \frac{E_{ш} E_r (1 - \nu_m^2)}{E_{ш} - E_r (1 - \nu_{ш}^2)}. \quad (15)$$

По тем же диаграммам вдавливания (см. рис. 4) находили модуль упругости E_m и невосстановленную твердость по Бринеллю HB_t с использованием предложенной методики учета упругой податливости и формулы (7) для определения невосстановленной глубины отпечатка t . Модуль упругости E_m определяли по формуле М. Матлина, исходящей из уравнения Г. Герца, но с поправкой на пластическую деформацию в

упругопластической области вдавливания индентора [8]:

$$E_m = \frac{1 - \nu_m^2}{\frac{4(\alpha - h)\sqrt{R(\alpha + h)}}{3F} + \frac{1 - \nu_{ш}^2}{E_{ш}}}. \quad (16)$$

Невосстановленная твердость по Бринеллю

$$HB_t = \frac{F_{\max}}{\pi D t_c}, \quad (17)$$

где t_c — глубина невосстановленного отпечатка при F_{\max} , рассчитанная по формуле (7).

В табл. 2 приведены значения h_c , HB_{IT} , E_{IT} , рассчитанные по формулам (2), (13), (15), а также t_c , E_m , HB_t , вычисленные по формулам (7), (16), (17) соответственно. Из нее следует, что различия значений модулей упругости E_{IT} и E_m для стали ЭП184, алюминиевого сплава Д16 и магниевого сплава МА2-1, определенных с использованием двух методик учета упругой податливости прибора, не превышает 3,5 %. При этом для титанового сплава 5В это различие оказалось больше — 12 %. Если сравнивать значения модуля упругости, определенные индентированием и растяжением, то для стали, алюминиевого и магниевого сплавов они отличаются не более чем на 3,7 %. При этом для титанового сплава модуль упругости занижен на 7,1 % и завышен на 5,6 % при определении по стандартной и предлагаемой методикам. Однако если воспользоваться двумя методиками и рассчитать средние значения модуля упругости для одного и того же материала, то различия с результатами растяжения существенно снижаются и не превышают 5 %.

Таблица 2. Характеристики материалов, определенные по диаграммам вдавливания шара с использованием существующей и предлагаемой методик оценки упругой податливости прибора МЭИ-ТА ($D = 2,5$ мм)

Характеристика материала	Существующая методика оценки упругой податливости прибора (ГОСТ Р 56232-2014)				Предлагаемая методика оценки упругой податливости прибора			
	ЭП184	Д16	МА2-1	5В	ЭП184	Д16	МА2-1	5В
F_{\max} , Н (кгс)	1883 (192)	638 (65)	638 (65)	1893 (193)	1883 (192)	638 (65)	638 (65)	1893 (193)
h_c , мм	0,178	0,1047	0,139	0,104	—	—	—	—
t_c , мм	—	—	—	—	0,1568	0,1018	0,138	0,09
HB_{IT} , Н/мм ² (кгс/мм ²)	1344 (137)	776 (79,1)	585 (59,6)	2315 (236)	—	—	—	—
HB_t , Н/мм ² (кгс/мм ²)	—	—	—	—	1530 (156)	796 (81,3)	589 (60)	2678 (273)
E_r , Н/мм ² (кгс/мм ²)	117092 (11936)	57967 (5909)	37101 (3782)	77734 (7924)	—	—	—	—
E_{IT} , Н/мм ² (кгс/мм ²)	215349 (21952)	69749 (7110)	40201 (4098)	106439 (10850)	—	—	—	—
E_m , Н/мм ² (кгс/мм ²)	—	—	—	—	208099 (21213)	68768 (7010)	41624 (4243)	120967 (12331)

Твердости по Бринеллю при индентировании HV_{IT} и HV_t , определенные по двум методикам, различаются для испытанных материалов аналогично модулю упругости. Самое большое различие наблюдалось для титанового сплава. Однако значения HV_t ближе к значениям HV , чем HV_{IT} . Вместе с тем следует отметить, что HV_t , HV_{IT} и HV могут заметно различаться между собой, поскольку методики их определения основаны на разных подходах.

Таким образом, выполнены анализ и экспериментальная проверка существующей и предложенной методик оценки упругой податливости прибора — твердомера при кинетическом индентировании материалов шаром. Предложенная методика, основанная на уравнении Г. Герца для случая упругого контакта шара с плоскостью, позволяет учесть программными средствами упругую податливость прибора при регистрации и обработке диаграмм вдавливания шара. В качестве основного критерия, подтверждающего достоверность методики, приняты совпадение или близость значений модуля нормальной упругости одного и того же материала, определенных по диаграммам вдавливания шара и растяжения образца. Экспериментальная проверка методик выполнена на стали, алюминии, магниевом и титановом сплавах с сильно различающимися значениями модуля нормальной упругости. Показано, что каждая из изложенных методик имеет свои преимущества и недостатки. Поэтому целесообразно использовать обе методики при определении механических свойств материалов кинетическим индентированием. При нахождении средних значений одной и той же механической характеристики с использованием двух рассмотренных методик результаты испытаний кинетическим индентированием будут более достоверными.

Еще одно немаловажное обстоятельство заключается в том, что разброс значений механических характеристик, определяемых индентированием, может быть вызван также и другими причинами, например, неоднородностью структуры материала, низким качеством подготовки его поверхности к испытаниям, погрешностями измерений, регистрации и обработки диаграмм вдавливания и т.д. В связи с этим необходима автоматизация процессов индентирования и расчетов механических характеристик материалов программными средствами при взаимодействии прибора с компьютером и статистической обработкой результатов испытаний. Это позволит снизить погрешности определения механических свойств за счет исключения влияния «человеческого фактора» при измерениях и обработке диаграмм вдавливания. Если поставлена задача определить минимальное количество испытаний для

определения механических свойств с заданной точностью, то это возможно, например, по программе Metall, разработанной в НИУ «МЭИ» [7] и опробованной на практике с положительным результатом.

Проведенные эксперименты показали, что при отсутствии прибора — твердомера для регистрации диаграммы вдавливания можно воспользоваться другими испытательными машинами, например, машиной Instron 5982 или аналогичной ей при нагружении материала индентором в режиме сжатия. Упругую податливость такой машины также можно оценить по диаграмме вдавливания, что и было продемонстрировано в данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бульчев С. И., Алехин В. П., Терновский А. П. Об определении физико-механических свойств материалов методом непрерывного вдавливания индентора / Физика и химия обработки материалов. 1976. № 2. С. 54 – 58.
2. Бульчев С. И., Алехин В. П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. — М.: Машиностроение, 1990. — 224 с.
3. Федосов С. А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием. — М.: МГУ, 2004. — 98 с.
4. Oliver W. C., Pharr G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / Journal of materials research. 1992. Vol. 7. N 6. P. 1564 – 1583.
5. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / Materials Res. Soc. 2004. Vol. 19. N 1. P. 3 – 20.
6. Головин Ю. И. Наноиндентирование и его возможности. — М.: Машиностроение, 2009. — 312 с.
7. Матюнин В. М. Индентирование в диагностике механических свойств материалов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2015. — 288 с.
8. Дрозд М. С., Матлин М. М., Сидякин Ю. И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. — М.: Машиностроение, 1986. — 224 с.

REFERENCES

1. Bulychev S. I., Alekhin V. P., Ternovskiy A. P. Evaluation of materials mechanical properties using instrumented indentation / Fiz. Khim. Obrab. Mater. 1976. N 2. P. 54 – 58 [in Russian].
2. Bulychev S. I., Alekhin V. P. Materials instrumented indentation test. — Moscow: Mashinostroenie, 1990. — 224 p. [in Russian].
3. Fedosov S. A., Peshek L. The application of microindentation methods for materials mechanical properties evaluation. — Moscow: Izd. MGU, 2004. — 98 p. [in Russian].
4. Oliver W. C., Pharr G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / Journal of materials research. 1992. Vol. 7. N 6. P. 1564 – 1583.
5. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / Materials Res. Soc. 2004. Vol. 19. N 1. P. 3 – 20.
6. Golovin Yu. I. Nanoindentation and its potential. — Moscow: Mashinostroenie, 2009. — 312 p. [in Russian].
7. Matyunin V. M. Indentation as the materials mechanical properties diagnostics method. — Moscow: Izd. dom MЭI, 2015. — 288 p. [in Russian].
8. Drozd M. S., Matlin M. M., Sidiyakin Yu. I. Engineering calculations for elastic-plastic contact strain. — Moscow: Mashinostroenie, 1986. — 224 p. [in Russian].