

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING

УДК 531.7
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-487-495>

Поступила в редакцию 04.05.2020
Received 04.05.2020

О. В. Мацулевич¹, А. П. Крень¹, Т. А. Протасеня¹, М. Н. Делендик²

¹*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

²*Филиал БНТУ «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров по менеджменту и развитию персонала», Минск, Республика Беларусь*

**ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО
ИНДЕНТИРОВАНИЯ**

Аннотация. Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения при измерении физико-механических характеристик конструкционных материалов методом динамического индентирования. Показано, что оценка погрешности измерений с помощью мер является неэффективной по причине большого разнообразия контролируемых материалов и широкого диапазона изменения их свойств. Разработана методика оценки точности измерений на основании погрешностей отдельных составляющих, которые входят в расчетную формулу, то есть путем определения погрешности косвенных измерений. В основе методики лежит оценка границ случайной погрешности измеряемых характеристик материала и неисключенных систематических погрешностей параметров, по которым рассчитываются искомые характеристики. Приведены результаты экспериментальных исследований, свидетельствующие о том, что в связи с различным характером зависимостей твердости и модуля упругости от регистрируемых параметров индентирования погрешность измерения модуля упругости превышает погрешность измерения твердости. Кроме того, установлено, что погрешность измерения характеристик материалов методом динамического индентирования превышает погрешность измерения методом статического индентирования и может быть уменьшена путем использования более точного оборудования для регистрации процесса испытательного удара. Полученные значения физико-механических характеристик материалов и погрешности их измерения свидетельствуют о том, что метод динамического индентирования позволяет эффективно решать задачу неразрушающего контроля твердости, модуля упругости и коэффициента деформационного упрочнения металлических конструкций и изделий с заданной погрешностью.

Ключевые слова: динамическое индентирование, погрешность измерения, косвенные измерения, твердость, модуль упругости.

Для цитирования: Оценка погрешности косвенных измерений физико-механических характеристик материалов методом динамического индентирования / О. В. Мацулевич [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №4. – С. 487–495. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-487-495>

Oleg V. Matsulevich¹, Alexander P. Kren¹, Tatsiana A. Pratasenia¹, Mikhail N. Delendik²

¹*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Branch of the BNTU “Intersectoral Institute for Staff Training and Retraining on Management and Personnel Development”, Minsk, Republic of Belarus*

**EVALUATION OF THE ERROR OF INDIRECT MEASUREMENTS OF PHYSICAL-MECHANICAL
CHARACTERISTICS OF MATERIALS BY DYNAMIC INDENTATION METHOD**

Abstract. The metrological problems of measuring the physic and mechanical characteristics of materials by dynamic indentation are considered. It is shown that the estimation of measurement error demanding the creation of the reference blocks is ineffective due to the wide variety of controlled materials and a wide range of changes in their properties. A technique has been developed for evaluating the accuracy of measurements based on the errors of individual parameters included

in the calculation equation, i.e. by determining the error of indirect measurements. The technique is based on the estimation of the boundaries of the random error of the measured characteristics of the material and the non-excluded systematic errors of the parameters that are used for the calculations of needed characteristics. The results of experimental studies are presented, indicating that due to the different character of the dependencies of hardness and elastic modulus, the error in measuring the elastic modulus exceeds the error in measuring hardness. In addition, it was found that the error in measuring the characteristics of materials by the dynamic indentation method exceeds the measurement error by the static indentation method and can be reduced by increasing the accuracy of the equipment used for the registration of impact process. The obtained values of the physic and mechanical characteristics of the materials and the values of the measurement error show that the dynamic indentation method can effectively solve the problem of non-destructive testing of hardness, elastic modulus, and strain hardening exponent of metals and products with an appropriate error.

Keywords: dynamic indentation, measurement error, indirect measurements, hardness, elastic modulus

For citation: Matsulevich O. V., Kren A. P., Pratasenia T. A., Delendik M. N. Evaluation of the error of indirect measurements of physical-mechanical characteristics of materials by dynamic indentation method. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 487–495 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-487-495>

Введение. Достоверный контроль физико-механических характеристик конструкционных материалов имеет большое значение, поскольку является основой для безопасной эксплуатации готовых изделий. Уже на предварительных стадиях проектирования происходит выбор материала с определенным набором свойств, которые позволят реализовать необходимые производственные циклы и при этом обеспечат наилучшие характеристики выпускаемой продукции. Кроме того, любая конструкция предполагает проведение ее расчета на прочность, жесткость, устойчивость, а также оценку остаточного ресурса, что возможно исключительно на основании достоверных данных о свойствах конструкционных материалов.

Современные задачи контроля наиболее значимых физико-механических характеристик конструкционных материалов, таких как твердость, модуль упругости, предел прочности, коэффициент деформационного упрочнения, параметры релаксации, ползучести и т. д., решаются в основном разрушающими методами (ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение»; ГОСТ 25.503-97 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие»; ГОСТ 3248-81 «Металлы. Метод испытания на ползучесть»). Реализация испытаний с использованием указанных методов требует наличия дорогостоящего лабораторного оборудования. Кроме того, разрушающие методы предполагают изготовление специальных образцов, что практически исключает возможность контроля готовых изделий ответственного назначения.

Этих недостатков лишен интенсивно развиваемый в настоящее время метод динамического индентирования (МДИ). Метод сочетает высокую информативность и достоверность инструментального индентирования (ГОСТ Р 8.748-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний»; СТБ 2495-2017 «Контроль неразрушающий. Определение физико-механических характеристик конструкционных материалов методами индентирования») с неразрушающим характером испытаний, обусловленным возможностью контроля изделий сложной формы без необходимости изготовления из них специальных образцов [1, 2]. Современная портативная измерительная аппаратура [3], реализующая данный метод, обеспечивает проведение сплошного оперативного контроля не только материалов на стадии производства, но и готовых изделий в процессе их технического обслуживания. Однако наряду со всеми преимуществами МДИ существует ряд сложностей с его метрологическим обеспечением.

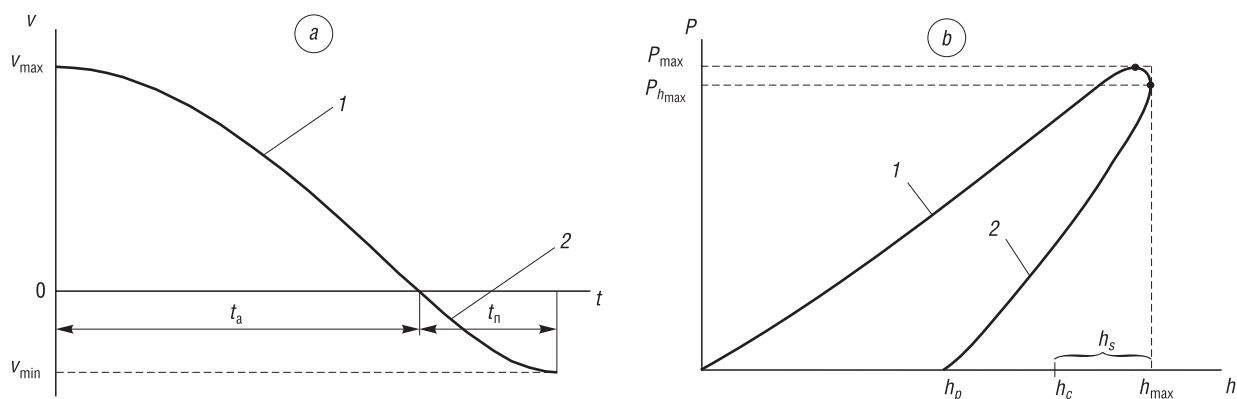
Цель и задачи исследования. Метрологическая аттестация приборов, реализующих МДИ, предполагает наличие эталонных образцов измеряемых характеристик. Но в настоящее время для этой цели могут использоваться только стандартизованные меры твердости (по шкалам Бринелля *HB*, Роквелла *HRC* и Виккерса *HV*), причем с рядом ограничений по диапазону измерения и контролируемым материалам. Эталонная база для измерения других физико-механических характеристик полностью отсутствует. Это связано с тем, что изготовление и аттестация мер или стандартных образцов нецелесообразны по причине большого разнообразия контролируемых материалов и, соответственно, широкого диапазона изменения их свойств.

В то же время, имея аналитические зависимости для расчета свойств материала по параметрам индентирования, оценку точности измерений и, соответственно, подтверждение метрологических характеристик средств измерений можно проводить на основе погрешности определения отдельных составляющих, входящих в расчетную формулу, то есть на основании косвенных измерений [4].

Рассмотрим возможность применения данного подхода на примере измерения методом динамического индентирования твердости, модуля упругости и коэффициента деформационного упрочнения.

Методика определения физико-механических характеристик и применяемое оборудование. МДИ заключается в ударном вдавливании в испытуемый материал жесткого индентора и непрерывной регистрации параметров его движения (перемещения, скорости или ускорения). Эти параметры не являются независимыми величинами и связаны между собой. Например, если аппаратура, реализующая метод, использует датчик регистрации текущей скорости движения индентора $v(t)$, то значения перемещения $h(t)$ могут быть получены путем интегрирования скорости, а значения контактной силы $P(t)$ – дифференцирования скорости и последующего умножения на массу индентора M .

Исходными данными для расчетов при динамическом индентировании являются зависимость $v(t)$ (рисунок, *a*) и диаграмма ударного нагружения $P(h)$ (рисунок, *b*), описывающие активный и пассивный этапы удара продолжительностью t_a и t_n соответственно. На основании параметров индентирования, определяемых по кривым $v(t)$ и $P(h)$, может быть установлен ряд характеристик испытуемого материала, в том числе динамическая твердость H_D , модуль упругости E_D и коэффициент деформационного упрочнения ξ .



Типичный вид изменения текущей скорости индентора в процессе удара (*a*) и диаграммы динамического нагружения (*b*): 1 – активный этап удара, 2 – пассивный этап удара

A typical view of changes of the current velocity of the indenter during the impact process (*a*) and the dynamic loading diagram (*b*): 1 – active stage of impact, 2 – passive stage of impact

Динамическую твердость H_D определяют как отношение контактной силы $P_{h_{\max}}$, соответствующей максимальной глубине внедрения h_{\max} , к площади поперечного сечения A_c контактной поверхности (отпечатка) между индентором и испытуемым образцом (СТБ 2495-2017).

$$H_D = \frac{P_{h_{\max}}}{A_c}, \quad (1)$$

где $A_c = \pi d_c^2 / 4$, d_c – диаметр контактного отпечатка.

Значение d_c для сферического индентора диаметром D с достаточной для практики точностью рассчитывается с помощью выражения [3]

$$d_c = 2\sqrt{Dh_c}, \quad (2)$$

где h_c – контактная глубина внедрения.

Используя положения [5, 6], можно записать

$$h_c = h_{\max} - h_s = 0,5(h_{\max} + h_p), \quad (3)$$

где h_{\max} – максимальная глубина внедрения, h_s – упругий прогиб контура отпечатка, h_p – пластическая составляющая общей глубины внедрения, равная глубине отпечатка, остающегося на поверхности материала.

Таким образом, формулу для вычисления твердости H_D через параметры, которые регистрируются при динамическом индентировании, можно записать в следующем виде:

$$H_D = \frac{2P_{h_{\max}}}{\pi D(h_{\max} + h_p)}. \quad (4)$$

Динамический модуль упругости определяют на основании значения приведенного динамического модуля упругости E_{rd} испытуемого материала и материала индентора, рассчитываемого по формуле (СТБ 2495-2017)

$$E_{rd} = \frac{6}{5} \frac{P_{h_{\max}}^2}{Mv_{\max}^2 e^2 d_c}. \quad (5)$$

Подставляя в формулу (5) выражения (2) и (3) и учитывая, что коэффициент восстановления скорости e равен отношению скорости отскока индентора v_{\min} к предупредной скорости v_{\max} , можно получить

$$E_{rd} = \frac{3\sqrt{2}}{5} \frac{P_{h_{\max}}^2}{Mv_{\min}^2 \sqrt{D(h_{\max} + h_p)}}. \quad (6)$$

Динамический модуль упругости испытуемого материала E_D рассчитывают по формуле

$$E_D = \frac{1 - \mu_m^2}{\frac{1}{E_{rd}} - \frac{1 - \mu_i^2}{E_i}}, \quad (7)$$

где μ_m и μ_i – коэффициенты Пуассона испытуемого материала и материала индентора соответственно, E_i – модуль упругости материала индентора.

Коэффициент деформационного упрочнения ξ устанавливают на основе известного выражения Мейера [3]

$$P_{\max} = ad_c^\gamma, \quad (8)$$

где a – коэффициент, зависящий от диаметра индентора и физико-механических характеристик испытуемого материала; $\gamma = \xi + 2$ – индекс Мейера.

Методика определения индекса γ , на основании которого можно рассчитать коэффициент ξ , описана в [3] и заключается в испытаниях образцов методом динамического индентирования при различной величине предупредной скорости индентора и расчете по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta \ln(P_{\max})}{\Delta \ln(d_c)}, \quad (9)$$

где $\Delta \ln(P_{\max})$ и $\Delta \ln(d_c)$ – изменения значений соответственно $\ln(P_{\max})$ и $\ln(d_c)$, вызванные увеличением предупредной скорости индентора.

Для проведения экспериментальных исследований нами использовался программно-аппаратный комплекс ИСУМ-1 [7], разработанный в рамках научно-технической программы Союзного государства «Мониторинг-СТ» и внесенный в Государственный реестр средств измерений Республики Беларусь. Прибор ИСУМ-1 реализует МДИ посредством магнитоиндукционного датчика с гравитационным разгоном индентора и обеспечивает прямое измерение скорости отскока индентора, контактной силы и глубины внедрения. Конструкция индентора позволяет проводить испытания широкого класса материалов, в том числе металлов с твердостью до

70 HRC. Масса индентора составляет 4,3 г, предударная скорость – 0,8–0,9 м/с. Наконечник индентора изготовлен из карбида вольфрама ($\mu_i = 0,24$, $E_i = 7,1 \cdot 10^{11}$ Па) и имеет сферическую форму с диаметром 2,3 мм.

Определение характеристик материалов проводилось на образцах, изготовленных из алюминиевого сплава ($\mu_m = 0,34$, твердость 81 HB), латуни ($\mu_m = 0,35$, твердость 132 HB) и стали ($\mu_m = 0,28$, твердость 105 HB и 27,1 HRC). Шероховатость испытуемой поверхности для всех образцов составила не более Ra 0,8.

Методика расчета погрешности и результаты измерений. Порядок определения результата и погрешности косвенных измерений устанавливает МИ 2083-90 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей». Согласно этому документу, значение искомой величины рассчитывается на основании средних значений аргументов (параметров, входящих в расчетные формулы). Соответственно, случайная погрешность искомой величины определяется исходя из средних квадратических отклонений аргументов. Однако такой подход допускается только в случае воспроизводимых измерений. В то же время при проведении испытаний методами индентирования измерения необходимо выполнять в различных местах образца, чтобы остающиеся отпечатки не оказывали влияния на последующие измерения. Поскольку образцы всегда имеют определенный разброс физико-механических характеристик, связанный с неоднородностью структуры металла, то измерения являются невоспроизводимыми. Поэтому значения характеристик, устанавливаемых методом динамического индентирования, следует рассчитывать для каждого наблюдения с последующим усреднением. Границы случайной погрешности результата измерения искомой величины Y в этом случае определяют по следующей формуле:

$$\varepsilon_Y = t_{P,n} S(\tilde{Y}), \quad (10)$$

где Y – измеряемая характеристика материала; $t_{P,n}$ – коэффициент Стьюдента, при доверительной вероятности $P = 0,95$ и количестве измерений $n = 10$ принимаемый равным 2,26 для всех искомых величин; $S(\tilde{Y})$ – среднее квадратическое отклонение результата измерения.

Величина $S(\tilde{Y})$ рассчитывается согласно выражению

$$S(\tilde{Y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n(n-1)}}, \quad (11)$$

где Y_i – результаты вычислений искомой величины по отдельным измерениям; $\bar{Y} = \sum_{i=1}^n Y_i / n$ – среднее значение искомой величины.

Границы неисключенной систематической погрешности (НСП) результата измерения искомой величины Y будем определять согласно МИ 2083-90 по формуле

$$\Theta_Y = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial Y}{\partial z_i} \right)^2} \Theta_{z_i}, \quad (12)$$

где z_i – аргументы, входящие в формулу для расчета искомой характеристики материала; Θ_{z_i} – границы НСП аргументов; $\partial Y / \partial z_i$ – частные производные функции искомой величины по соответствующим аргументам; m – количество аргументов; k – поправочный коэффициент, принимаемый равным 1,1 при доверительной вероятности $P = 0,95$.

Рассмотрим, как определяются границы НСП всех параметров, входящих в формулы (3), (6), (7) и (9).

Физико-механические характеристики материала индентора μ_i и E_i , а также коэффициент Пуассона испытуемого материала μ_m являются справочными данными. Значения диаметра D и массы M индентора измерялись с помощью оптического профилометра MicroXAM 800 (KLA-Tencor Corporation, Германия) и прецизионных весов Ohaus RV313 (Ohaus, США) соответственно. НСП параметров D и m принималась равной основной допускаемой погрешности использованных средств измерений и составила: $\Theta_D = 0,1 \%$, $\Theta_m = 1 \cdot 10^{-6}$ кг, что в процентном выражении относительно измеренного значения массы индентора составило 0,2 %.

Погрешность измерения скорости индентора определялась по методике, приведенной в СТБ 2495-2017, путем сбрасывания индентора с известной высоты L и сравнения значения предупредной скорости индентора v_{\max} , отображаемой прибором, со значением скорости v_{\max}^p , рассчитанным по формуле $v_{\max}^p = \sqrt{2gL}$ (g – ускорение свободного падения, принимаемое равным $9,81 \text{ м/с}^2$). В силу одинакового способа регистрации предупредной скорости v_{\max} и скорости отскока v_{\min} погрешности их измерения принимались одинаковыми. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что относительная погрешность измерения предупредной скорости не превышает 1 %. Это значение принималось в качестве наибольшей допустимой погрешности скорости индентора, соответственно НСП параметра v_{\min} рассчитывалась по формуле

$$\Theta_{v_{\min}} = 0,01 \cdot \bar{v}_{\min}, \quad (13)$$

где \bar{v}_{\min} – среднее значение скорости отскока индентора в серии.

Погрешность измерения глубины внедрения определялась путем измерения профиля отпечатка с помощью оптического профилометра MicroHAM 800 и сравнения полученной глубины отпечатка с показаниями прибора h_p . Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что относительная погрешность измерения величины h_p не превышает 4 %. В силу одинакового способа измерения различных составляющих глубины внедрения полученную относительную погрешность можно принять равной для h_{\max} и h_p . НСП данных параметров при определении физико-механических материалов устанавливалась согласно выражениям:

$$\Theta_{h_p} = 0,04 \cdot \bar{h}_p, \quad (14)$$

$$\Theta_{h_{\max}} = 0,04 \cdot \bar{h}_{\max}, \quad (15)$$

где $\bar{h}_p, \bar{h}_{\max}$ – средние значения параметров h_{\max} и h_p в серии.

Как уже отмечалось ранее, измеренные значения контактной силы P и глубины внедрения h определяются путем дифференцирования: $P = Mdv/dt$, и интегрирования: $h = \int V(t)dt = dt \cdot \sum V_i$, зависимости текущей скорости индентора v от времени t соответственно. Исходя из СТБ 2495-2017 относительную погрешность измерения контактной силы в этом случае допускается определять на основании относительной погрешности измерения глубины внедрения по формуле $\Delta P/P = \Delta h/h + \Delta M/M$. Поскольку погрешность глубины внедрения, принятая равной 4 %, значительно превышает погрешность массы индентора (0,2 %), величиной $\Delta M/M$ можно пренебречь. Таким образом, НСП параметра $P_{h_{\max}}$ можно определять аналогично h_{\max} :

$$\Theta_{P_{h_{\max}}} = 0,04 \cdot \bar{P}_{h_{\max}}. \quad (16)$$

В соответствии с МИ 2083-90 погрешность результата косвенного измерения Δ_Y искомой величины Y определяется в зависимости от соотношения Θ_Y/S_Y между НСП искомой величины и ее средним квадратическим отклонением. Если Θ_Y/S_Y находится в диапазоне от 0,8 до 8, что справедливо для всех испытанных образцов, то Δ_Y вычисляется по формуле

$$\Delta_Y = K(\varepsilon_Y + \Theta_Y), \quad (17)$$

Т а б л и ц а 1. Результаты измерения динамической твердости образцов

T a b l e 1. Results of measuring the dynamic hardness of samples

Материал	\bar{H}_D , МПа	Θ_{H_D} , МПа	Θ_{H_D} , %	S_{H_D} , МПа	ε_{H_D} , МПа	ε_{H_D} , %	Δ_{H_D} , МПа	Δ_{H_D} , %
Алюминий 81 HB	684,3	36,9	5,4	9,1	20,6	3,0	43,7	6,4
Латунь 132 HB	1455,2	78,8	5,4	27,8	62,9	4,3	101,3	7,0
Сталь 105 HB	1551,6	83,8	5,4	25,6	57,9	3,7	103,4	6,7
Сталь 27,1 HRC	3119,7	169,9	5,5	51,2	115,7	3,7	208,6	6,7

где K – коэффициент, определяемый в зависимости от принятой доверительной вероятности и отношения Θ_Y/S_Y .

В табл. 1–3 приведены средние по 10 измерениям значения твердости, модуля упругости и индекса Мейера испытанных образцов, рассчитанные по формулам (4), (7) и (9), а также погрешности измерения данных характеристик.

Обсуждение результатов и выводы. Результаты проведенных исследований показали, что погрешность измерения модуля упругости методом динамического инден-

Т а б л и ц а 2. Результаты измерения модуля упругости образцов

Table 2. Results of measuring the elastic modulus of samples

Материал	\bar{E}_D , ГПа	Θ_{E_D} , ГПа	Θ_{E_D} , %	S_{E_D} , ГПа	ε_{E_D} , ГПа	ε_{E_D} , %	Δ_{E_D} , ГПа	Δ_{E_D} , %
Алюминий 81 HB	71,4	7,3	10,2	0,9	2,0	2,8	7,4	10,4
Латунь 132 HB	101,8	10,8	10,6	1,9	4,2	4,2	11,4	11,3
Сталь 105 HB	213,7	25,7	12,0	2,9	6,6	3,1	24,6	11,5
Сталь 27,1 HRC	214,9	25,9	12,1	3,5	7,9	3,7	25,7	12,0

Т а б л и ц а 3. Результаты измерения индекса Мейера

Table 3. Results of measuring the Meyer index

Материал	γ	Θ_γ	Θ_γ , %	S_γ	ε_γ	ε_γ , %	Δ_γ	Δ_γ , %
Алюминий 81 HB	2,057	0,081	3,9	0,035	0,08	3,8	0,121	5,9
Латунь 132 HB	2,1	0,101	4,8	0,043	0,1	4,7	0,151	7,2
Сталь 105 HB	2,139	0,136	6,4	0,067	0,152	7,1	0,219	10,2
Сталь 27,1 HRC	2,221	0,145	6,5	0,06	0,135	6,1	0,212	9,6

тирования (см. табл. 2), незначительно изменяющаяся для различных материалов и составляющая в среднем 11,3 %, превышает погрешность измерения твердости (в среднем 6,7 %) (см. табл. 1). Это обусловлено разницей в НСП измерения данных характеристик, поскольку случайные погрешности измерения твердости ε_{HD} и модуля ε_{ED} практически одинаковы (в среднем 3,7 и 3,5 % соответственно). Более высокие значения Θ_{ED} (в среднем 11,2 %) по сравнению с Θ_{HD} (в среднем 5,4 %) объясняются характером зависимостей твердости и модуля упругости от регистрируемых параметров индентирования, в частности квадратичной зависимостью E_D от контактной силы $P_{h_{max}}$. Погрешность измерения индекса γ , на основании которого можно рассчитать коэффициент деформационного упрочнения, составила для различных материалов от 5,9 до 10,2 %.

Сравнивая полученные результаты с результатами измерения характеристик материалов методом статического индентирования, приведенными в [8], можно сделать вывод, что общая погрешность измерения при использовании метода динамического индентирования имеет более высокие значения. Например, погрешности измерения динамической твердости Δ_{HD} и статической Δ_{HT} составляют в среднем соответственно 6,8 и 2,2 %, погрешности измерения динамического модуля упругости Δ_{ED} и статического Δ_{ET} – 10,2 и 3,9 %, Это обусловлено прежде всего сложностью высокоточной регистрации процесса испытательного удара, продолжительность которого при испытаниях металлов равна 20–50 мкс. Инструментальные погрешности датчиков, применяемых для измерения глубины внедрения и контактной силы при статическом индентировании, составляют соответственно 0,15–0,5 и 1 % [8], при динамическом индентировании – 4 %. Таким образом, основным направлением снижения погрешности измерения физико-механических характеристик материалов при использовании МДИ является повышение точности используемого оборудования.

В то же время необходимо отметить, что полученные значения погрешности измерения физико-механических характеристик методом динамического индентирования являются вполне приемлемыми для использования реализующих данный метод приборов в качестве рабочих средств измерений. Применение разработанных приборов позволит значительно расширить номенклатуру изделий, для которых необходимо осуществлять неразрушающий контроль таких характеристик, как модуль упругости и коэффициент деформационного упрочнения. При этом результаты измерения модуля упругости испытанных образцов (71,4 ГПа для алюминия, 101,8 ГПа для латуни, 213,7 и 214,9 ГПа для стали) хорошо согласуются со справочными данными для использованных материалов (70 ГПа, 100 и 210 ГПа соответственно).

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № T20УКА-002).

Acknowledgements

This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant no. T20УКА-002).

Список использованных источников

1. Extraction of mechanical properties of materials through deep learning from instrumented indentation / Ming Dao Lu Lu [et al.] // PNAS, Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2020. – Vol. 117, № 13. – P. 7052–7062. <https://doi.org/10.1073/pnas.1922210117>
2. Gao, Chenghui. Instrumented indentation of fused silica by Berkovich indenter / Chenghui Gao, Ming Liu // J. Non-Cryst. Solids. – Vol. 475, № 1. – P. 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.09.006>
3. Kren, A. P. Determination of the Strain-Hardening Exponent of a Metallic Material by Low-Speed Impact Indentation / A. P. Kren, V. A. Rudnitskii // Russian Metallurgy (Metally). – 2019. – Vol. 2019, № 4. – P. 478–483. <https://doi.org/10.1134/S0036029519040220>
4. Rabinovich, S. G. Evaluating Measurement Accuracy: A Practical Approach / S. G. Rabinovich. – New York: Springer-Verlag, 2010. – 272 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1456-9>
5. Oliver, W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Res. – 1992. – Vol. 7, iss. 6. – P. 1564–1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
6. Fischer-Cripps, A. C. Critical review of claims for ultra-hardness in nanocomposite coatings / A. C. Fischer-Cripps, S. J. Bull, N. Schwarzer // Philos. Mag. – 2012. – Vol. 92, № 13. – P. 1601–1630. <https://doi.org/10.1080/14786435.2011.652688>
7. Применение метода ударного микроиндентирования для оценки механических характеристик и дефектности структуры углеродных композиционных материалов / А. П. Крень [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 469–477. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-469-477>
8. Крень, А. П. Оценка погрешности определения физико-механических характеристик материалов при их контроле методом индентирования / А. П. Крень, О. В. Мацулевич, М. Н. Делендик // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 3. – С. 263–271. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-3-263-271>

References

1. Lu Lu Ming Dao, Punit Kumar, Upadrasta Ramamurty, George Em Karniadakis, Subra Suresh. Extraction of mechanical properties of materials through deep learning from instrumented indentation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, vol. 117, no. 13, pp. 7052–7062. <https://doi.org/10.1073/pnas.1922210117>
2. Chenghui Gao, Ming Liu. Instrumented indentation of fused silica by Berkovich indenter. *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 475, no. 1, pp. 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.09.006>
3. Kren A. P., Rudnitskii V. A. Determination of the Strain-Hardening Exponent of a Metallic Material by Low-Speed Impact Indentation. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2019, no. 4, pp. 478–483. <https://doi.org/10.1134/S0036029519040220>
4. Rabinovich S. G. *Evaluating Measurement Accuracy: A Practical Approach*. New York, Springer-Verlag, 2010. 272 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1456-9>
5. 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, iss. 6, pp. 1564–1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
6. Fischer-Cripps A. C., Bull S. J., Schwarzer N. Critical review of claims for ultra-hardness in nanocomposite coatings. *Philosophical Magazine*, 2012, vol. 92, no. 13, pp. 1601–1630. <https://doi.org/10.1080/14786435.2011.652688>
7. Kren A. P., Delendik M. N., Pratasenya T. A., Kinzhagulov I. Y. Application of the impact microindentation method for estimation of the mechanical characteristics and defects of the structure of carbon materials and products. *Vestsi Natsyonal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 469–477 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-469-477>
8. Kren A. P., Matsulevich O. V., Delendik M. N. Error estimation of the physical and mechanical characteristics measurements by indentation. *Pribory i metody izmerenii = Devices and Methods of Measurements*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 263–271 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-3-263-271>

Информация об авторах

Мацулевич Олег Владимирович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: matsulevich.o.v@gmail.com

Крень Александр Петрович – доктор технических наук, заведующий лабораторией контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-9658-1003>. E-mail: alekspk@mail.ru

Information about the authors

Oleg V. Matsulevich – Ph. D (Engineering), Senior Researcher of the Mechanical Testing Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: matsulevich.o.v@gmail.com

Alexander P. Kren – D. Sc. (Engineering), Head of the Mechanical Testing Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-9658-1003>. E-mail: alekspk@mail.ru

Протасеня Татьяна Анатольевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: 5657397@gmail.com

Делендик Михаил Николаевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Безопасность технологических процессов и производств», филиал Белорусского национального технического университета «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров по менеджменту и развитию персонала» (ул. Минина, 23, корп. 2, 220014, Минск, Республика Беларусь). E-mail: delendik@mipk.by

Tatsiana A. Pratasenia – Ph. D (Engineering), Senior Researcher of the Mechanical Testing Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: 5657397@gmail.com

Mikhail N. Delendik – Ph. D (Engineering), Head of the Chair “Safety of Technological Processes and Manufacture”, Branch of the Belarusian National Technical University “Intersectoral Institute for Staff Training and Retraining on Management and Personnel Development” (23/2, Minin Str., 220014, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: delendik@mipk.by