

А. П. Крень*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ УДАРНЫМ ВДАВЛИВАНИЕМ
СФЕРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА**

Аннотация. Рассмотрены вопросы измерения пластических характеристик металлов. Показано, что характеристики материалов, используемые для сравнения их пластичности, не являются сопоставимыми и зависят в разной степени от величины деформации, скорости деформации, модуля упругости. В то же время более физически обоснована величина пластичности, которая определяется по соотношению пластической деформации к общей деформации. Показано, что одним из оптимальных методов измерения пластичности (индекса пластичности) является индентирование. Изучена возможность применения для этой цели ударного микроиндентирования и предложены выражения, позволяющие рассчитать пластичность по результатам однократного вдавливания сферического индентора. Показаны особенности расчета деформации при данном виде испытаний. Установлено, что значения пластичности, получаемые исходя из соотношений глубин пластического и упругого внедрения индентора, эквивалентны значениям, рассчитываемым исходя из энергетических соотношений при ударе. Проведены экспериментальные исследования на металлах, имеющих различные твердость и вид кристаллической решетки. Впервые показано влияние скорости деформации, деформации и энергии удара (предударной скорости) на рассчитываемое значение пластичности при вдавливании сферы со скоростями деформации $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$. Показано, что при достижении деформации, соответствующей началу наступления полной пластичности при индентировании, достигается максимальная чувствительность измеряемого параметра пластичности для различных металлов.

Ключевые слова: ударное индентирование, пластичность, скорость деформации, модуль упругости, сферический индентор

Для цитирования: Крень, А. П. Определение пластичности металлов ударным вдавливанием сферического индентора / А. П. Крень // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, №4. – С. 483–495. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-483-495>

Alexander P. Kren*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***DETERMINATION OF THE PLASTICITY OF METALS BY IMPACT INDENTATION
OF A SPHERICAL INDENTER**

Abstract. The problems of measuring the plastic characteristics of metals are considered. It is shown that the characteristics of materials used to compare their plasticity are not comparable and depend in the different degrees on the values of strain, strain rate, and modulus of elasticity. At the same time, the value of plasticity is more physically substantiated, which is determined by the ratio of plastic strain to total strain. It is shown that one of the optimal methods for measuring plasticity (plasticity index) is indentation. The possibility of using impact microindentation for this purpose is studied and expressions are proposed that allow calculating the plasticity based on the results of a single indentation of a spherical indenter. The specialties of the calculation of strain for this type of testing are shown. It was found that the values of plasticity obtained from the ratios of the depths of the plastic and elastic penetration of the indenter are equivalent to the values calculated from the energy ratios upon impact. Experimental studies have been carried out on metals with different hardness and type of crystal lattice. For the first time, the effect of strain rate, deformation, and impact energy (initial impact velocity) on the calculated value of plasticity when a sphere is impressed with strain rates of $\sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ is shown. It is shown that when the strain corresponding to the onset of full plasticity during indentation is reached, the maximum sensitivity of the measured plasticity parameter for various metals is achieved.

Keywords: impact indentation, plasticity, strain rate, elastic modulus, spherical indenter

For citation: Kren A. P. Determination of the plasticity of metals by impact indentation of a spherical indenter. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 483–495 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-483-495>

Введение. Определение пластических свойств металлов имеет большое значение при оценке качества изготовления как полуфабрикатов, так и готовых изделий. Пластичность является важнейшей характеристикой, по которой оценивается способность материалов претерпевать значительную пластическую деформацию перед разрушением. Благодаря этому свойству металлы поддаются ковке, прокатке, вытягиванию, штамповке. Это свойство обеспечивает перераспределение локальных напряжений по всему объему материала, тем самым уменьшая опасность разрушения.

Как известно, стандартизованными мерами пластичности принято считать относительное удлинение δ_p и относительное сужение ψ , определяемые при разрушении во время испытаний на растяжение на испытательных машинах (ISO 6892-1:2019 «Metallic materials – Tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature»). Относительное удлинение при разрыве δ_p представляет собой отношение приращения длины образца после его разрыва к первоначальной расчетной длине l_0 :

$$\delta_p = \frac{l_k - l_0}{l_0}, \quad (1)$$

где l_k – длина образца после разрыва.

Величину ψ рассчитывают как отношение уменьшения поперечного сечения разорванного образца к первоначальной площади поперечного сечения F_0 :

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0}, \quad (2)$$

где F_k – площадь поперечного сечения в месте разрыва.

Данные показатели определяются разрушающим методом, не относящимся к экспресс-методам, которые крайне необходимы при диагностике технического состояния потенциально опасного промышленного оборудования: трубопроводов, сосудов, работающих под избыточным давлением, несущих элементов конструкций. Нельзя подвергнуть сомнению важность параметров δ_p , ψ и других аналогичных им с технической точки зрения, однако с физической точки зрения они не всегда обоснованы. Хорошо известно, что δ_p , ψ зависят от величины деформации ε , чувствительны к скорости деформации и показателю деформационного упрочнения. В [1, 2] отмечается, что этот вид испытаний непригоден для малопластичных и хрупких материалов, таких как керамика, квазикристаллы, интерметаллиды, аморфные металлические сплавы и различные композиты. Кроме того, такой путь определения пластичности является довольно трудоемким. В связи с этим вопросы разработки неразрушающих методов оценки физически обоснованных параметров, характеризующих пластичность, являются в настоящее время актуальными.

Разработка оптимальных методов определения пластичности прежде всего связана с применением методов индентирования, поскольку твердость H по сути представляет собой комплексную механическую характеристику, являющуюся функцией как прочностных, так и пластических свойств материала. Выполнен ряд работ, в которых делаются попытки найти связь между различными характеристиками: твердостью, работой индентирования, вязкостью разрушения, пластичностью, пределом текучести и др. [3, 4]. Поскольку в промышленности пользуются в основном параметром δ_p , то прежде всего были найдены связи между H и δ_p . Так, в [5] для контроля пластичности низколегированной стали была предложена эмпирическая формула

$$\delta_p = 1725 \cdot H^{-0,79} (\%), \quad (3)$$

где H – твердость по Бринеллю, кг/мм².

Другая формула, приведенная в [6], относится к стали 09Г2 (ГОСТ 19 282-73):

$$\delta_p = -0,23HB + 67,6 (\%), \quad (4)$$

где HB – твердость по Бринеллю.

Из представленных формул (3) и (4) следует, что пластичность выражается величиной, обратно пропорциональной статической твердости, величина которой отражает в том числе и прочностные свойства материала: связь твердости с пределом прочности хорошо известна

(ASTM A370-14. «Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products»). При этом формулы не являются универсальными, их можно использовать только для конкретных металлов. Кроме того, если сопоставлять формулы (1) и (2) с (3) и (4), то можно сделать вывод, что они содержат принципиально разные подходы к оценке пластичности. В первом случае усилие, прикладываемое к образцу, не нормируется, а учитывается только пластическая деформация в момент разрыва образца. Во втором – при оценке пластичности по твердости измеряется деформация (в виде площади отпечатка), строго привязанная к заданному усилию вдавливания.

В [1, 7, 8] впервые было введено понятие и развиты теоретические представления о новой характеристике пластичности δ_H , определяемой при вдавливании в материал алмазной пирамиды Виккерса. Параметр δ_H рассчитывается как отношение величины пластической деформации к общей деформации в отпечатке испытуемого материала, образованном вдавливанием пирамиды:

$$\delta_H = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_t} = 1 - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_t}, \quad (5)$$

где ε_p , ε_e и ε_t – соответственно пластическая, упругая и общая деформации в отпечатке.

Если применяемое оборудование позволяет производить запись кривой нагружения и разгрузки материала в координатах «контактное усилие P – перемещение индентора h », то характеристика пластичности может быть найдена также согласно выражению [9]

$$\delta_W = \frac{W_p}{W_t} = 1 - \frac{W_e}{W_t}, \quad (6)$$

где W_p , W_e и W_t – соответственно пластическая, упругая и общая работа деформирования материала.

Рассчитанная согласно (5) и (6) величина пластичности не равна значениям, получаемым по формулам (1)–(4), однако, как показано в [1], является физически более обоснованной. При этом для статического вдавливания установлено, что $\delta_H \approx \delta_W$ [9] при условии эквивалентности условий нагружения. Если рассматривать предложенный способ оценки пластичности δ_H с точки зрения практики, то необходимо отметить, что статическое индентирование пирамидой Виккерса требует тщательной подготовки поверхности и в настоящее время применяется, как правило, только при исследовании образцов. Способ практически не используется для контроля металлов в производственных условиях.

Цель настоящей работы – оценка возможности использования характеристик δ_H и δ_W для оценки пластичности металлов методом динамического (микроударного) индентирования, который может быть применен для исследования свойств непосредственно изделий. Эти исследования важны для неразрушающего контроля материалов, поскольку пластичность является одним из параметров, который используется при установлении остаточного ресурса оборудования.

Теоретические положения. Использование пирамиды для расчета δ_H имеет ряд преимуществ:

- 1) постоянная величина деформации (около 8 %),
- 2) квазистатическое вдавливание исключает эффекты вызванные скоростью деформации,
- 3) возможность оценки пластичности для хрупких материалов.

В то же время δ_H для металлов с объемноцентрированной кубической (ОЦК), гранецентрированной кубической (ГЦК) и гексагональной плотноупакованной (ГЦК) кристаллическими решетками находится в диапазоне 0,94–0,99. Такой малый диапазон изменения требует проведения высокоточных измерений, что в производственных условиях практически не возможно. Более удобным с этой точки зрения является применение динамического индентирования, которое не требует создания замкнутой силовой системы «образец – нагружающее устройство». В простейшем случае этот принцип реализован при измерении твердости по Шору, а также в твердомерах динамического принципа действия для измерения твердости по Либу. В последнее время развивается метод динамического инструментального индентирования различных материалов [10–12], позволяющий регистрировать весь процесс внедрения индентора.

В настоящей работе предлагается применить для оценки пластичности метод динамического индентирования (МДИ) и сферический индентор. Отказ от использования пирамиды в качестве индентора вызван тем, что, к сожалению, динамические нагрузки приводят к быстрому скалыванию острия пирамиды и получению недостоверных результатов. Сам МДИ заключается в однократном микроударном воздействии на материал жестким индентором и регистрации изменения во времени основных параметров ударного контакта: скорости внедрения $V(t)$ (рис. 1, *a*), контактного усилия $P(t)$, глубины внедрения $h(t)$. При этом оборудование для применения МДИ (описание приведено в следующем разделе) максимально удобно для испытания металлов, поскольку позволяет осуществлять быструю замену индентора (варьировать радиус наконечника) и изменять энергию удара. Это дает возможность получить различные соотношения величин пластической и упругой деформации в отпечатке для повышения чувствительности параметров ударного взаимодействия к изменению пластических свойств металлов.

Основным источником информации о свойствах материала при индентировании является зависимость «контактное усилие P – глубина вдавливания индентора h ». Типичный вид такой зависимости при испытании упругопластического материала показан на рис. 1, *b*. Она включает стадию нагружения, на которой глубина внедрения увеличивается, и стадию разгрузки, на которой происходит восстановление упругих деформаций, запасенных в материале при деформировании. Как видно из рис. 1, *b*, по зависимости можно непосредственно определить значения пластической h_p , упругой h_e и максимальной h_{max} глубин вдавливания индентора. Также она дает возможность рассчитать значение W_p , W_e и W_t через соответствующие площади под кривой нагружения.

Особенностью динамического нагружения по отношению к статическому является несовпадение максимального усилия и максимального внедрения во времени. Максимальное усилие достигается несколько ранее. Этот факт является интересным для дальнейшего исследования применительно к пластичности материалов.

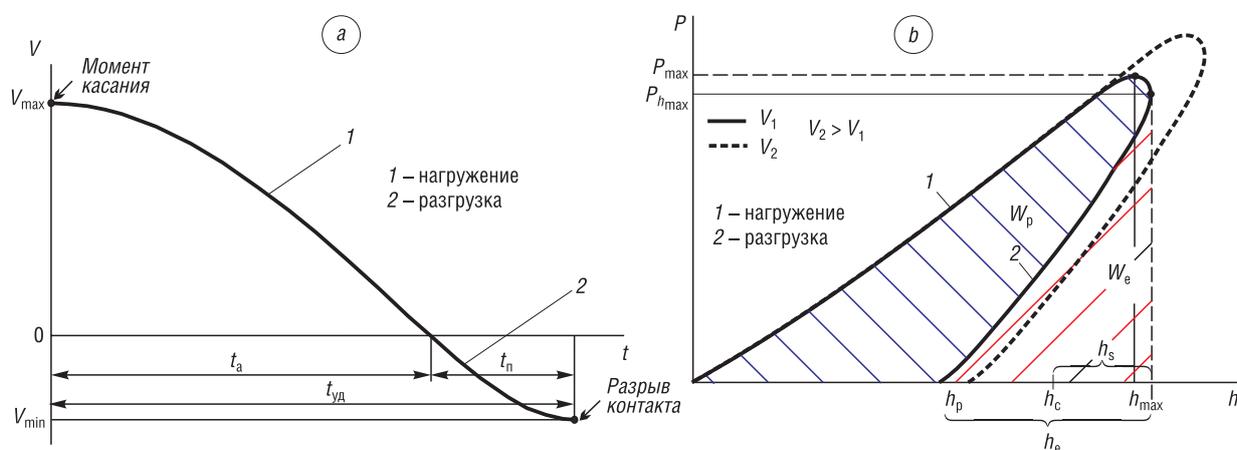


Рис. 1. Характерные зависимости, описывающие процесс внедрения индентора в металл: *a* – зависимость изменения скорости $V(t)$, *b* – изменение контактного усилия от глубины вдавливания $P(h)$

Fig. 1. Typical dependences describing the process of penetration of the indenter into the metal: *a* – change of the velocity $V(t)$, *b* – change in the force from the depth of indentation $P(h)$

Рассмотрим возможность измерения параметра δ_H при динамическом индентировании сферическим индентором. Пластичность будем определять по формулам (5) и (6). Для выражения деформации воспользуемся рекомендациями Тейбора [13], в соответствии с которыми общая деформация ε_t в отпечатке (рис. 2) в момент достижения максимальной глубины вдавливания h_{max} будет равна

$$\varepsilon_t = 0,2 \frac{d_c}{D}, \quad (7)$$

где d_c – контактный диаметр пластического отпечатка, D – диаметр сферического наконечника индентора.

После завершения удара и восстановления упругих деформаций в отпечатке остается пластический отпечаток глубиной h_p , диаметр проекции которого остается равным контактному диаметру d_c [14, 15], а диаметр сферы, которой может быть описан отпечаток в испытуемом металле, становится равным D_1 . Диаметр D_1 всегда больше, чем диаметр сферического наконечника индентора D (см. рис. 2).

По аналогии с формулой (7) выражение для пластической деформации можно записать следующим образом:

$$\varepsilon_p = 0,2 \frac{d_c}{D_1}. \quad (8)$$

Найдем выражение, связывающее D и D_1 , используя геометрическое соотношение между d_c и контактной глубиной h_c . Для момента, соответствующего максимальному внедрению h_{max} , для развитых пластических деформаций можно записать [15]: $d_c = 2\sqrt{Dh_c}$. После завершения удара контактный диаметр будет равен: $d_c = 2\sqrt{D_1h_p}$. Откуда:

$$D_1 = D \frac{h_c}{h_p}. \quad (9)$$

Подставляя D_1 в формулу (8), получим выражение для пластической деформации:

$$\varepsilon_p = 0,2 \frac{d_c}{D} \frac{h_p}{h_c}. \quad (10)$$

Совместное решение выражений (5), (7) и (10) дает формулу для расчета динамической пластичности δ_H^d посредством значений глубин вдавливания:

$$\delta_H^d = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_t} = \frac{h_p}{h_c}. \quad (11)$$

Полученная для δ_H^d формула по своей сути аналогична формуле (5), полученной авторами [2] для пирамидального индентора при статическом вдавливании, однако измеряемые деформации будут существенно отличаться вследствие использования сферического наконечника и влияния скорости деформации на пластическую составляющую глубины вдавливания. Выражая h_c через h_{max} [16]: $h_c = h_{max} - 0,5h_c$, получим

$$\delta_H^d = \frac{h_p}{h_{max} - 0,5h_c}. \quad (12)$$

Формула (12) удобна для использования, поскольку все параметры для определения пластичности δ_H^d , входящие в формулу, берутся непосредственно из диаграммы динамического вдавливания (см. рис. 1, *b*).

Если рассматривать формулу (6), то для динамического индентирования ее можно преобразовать в более удобный вид, поскольку известна масса индентора m , его предударная скорость (скорость в момент касания) V_{max} и скорость отскока (в момент разрыва контакта индентора с образцом) V_{min} .

Так, полная энергия удара может быть рассчитана следующим образом:

$$W_t = \frac{mV_{max}^2}{2}; \quad (13)$$

энергия упругого отскока индентора:

$$W_c = \frac{mV_{min}^2}{2}; \quad (14)$$

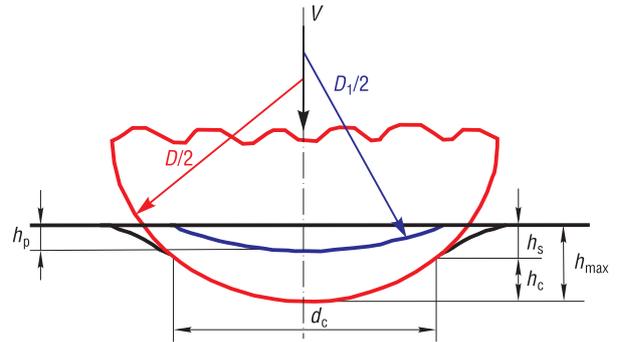


Рис. 2. Схематическое представление поперечного сечения отпечатка при деформировании материала сферическим индентором

Fig. 2. Schematic representation of the cross-section of the impression in material deformed by a spherical indenter

энергия пластического деформирования материала:

$$W_p = W_t - W_e. \quad (15)$$

Решая (6), (13)–(15) совместно, получаем:

$$\delta_w^d = 1 - \frac{V_{\min}^2}{V_{\max}^2} = 1 - e^2, \quad (16)$$

где e – коэффициент восстановления скорости.

Особенностью динамического индентирования является тот факт, что ударным процессом сложно управлять. Характеристики ударного контакта – усилие P , перемещение h , время удара $t_{уд}$ (см. рис. 1), скорость деформации являются взаимозависимыми. Невозможно изменить какой либо из параметров не изменив остальные. Основные соотношения между характеристиками ударного контакта изложены в [17]. Как следует из выражения (7), при индентировании сферой величина деформации $\varepsilon_t \neq \text{const}$, при этом будет изменяться соотношение между величиной пластической и упругой деформации и, следовательно, величина δ_H^d . Если сравнивать со статическим вдавливанием сферы, где фиксированным параметром является величина усилия, с которым нагружается образец, то при ударном микроиндентировании можно зафиксировать только предупредную энергию W_e , поскольку величины P , h , ε и другие определяются упругими и пластическими свойствами материала. Главной характеристикой, которая будет определять отклик материала на приложенное воздействие, будет скорость деформации, изменяющаяся в процессе удара. Среднюю скорость деформации $\bar{\varepsilon}_t$ можно определить как отношение ε_t к t_a – длительности внедрения индентора в металл до достижения h_{\max} (времени активного этапа удара):

$$\bar{\varepsilon}_t = 0,2 \frac{d_c}{D \cdot t_a}. \quad (17)$$

В то же время для сопоставления параметра пластичности для различных материалов удобно разделить материалы по твердости. При этом наиболее физически обоснованным параметром при контактном взаимодействии будет являться твердость по Мейеру, которая равна среднему контактному давлению в отпечатке при нагружении материала и может быть рассчитана по формуле

$$H_M^d = \frac{P_{\max}}{\pi D h_c} = \frac{P_{\max}}{\pi D (h_{\max} - 0,5 h_e)}. \quad (18)$$

Для изучения возможности использования представленных выражений для оценки пластичности на практике были проведены экспериментальные исследования на разработанном в Институте прикладной физики НАН Беларуси оборудовании.

Оборудование. Для регистрации процесса контактного взаимодействия индентора с металлом использовался прибор, схема которого показана на рис. 3. Датчик прибора включает механизм разгона индентора, а входящая в состав датчика видеокамера дает возможность провести

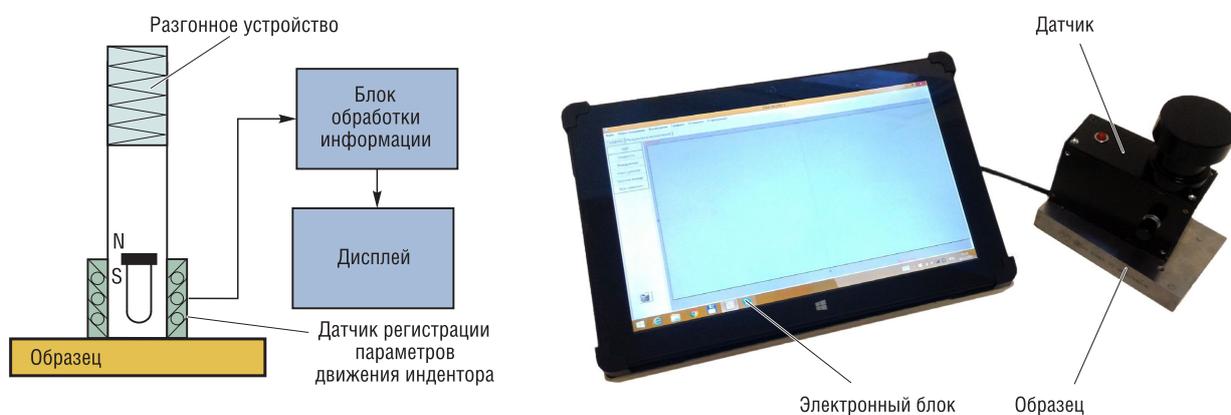


Рис. 3. Схема прибора динамического индентирования
Fig. 3. Design of the dynamic indentation device

его позиционирование для нанесения индентором удара в заданную точку материала. При падении индентора во время контакта с испытуемым материалом производится регистрация скорости перемещения индентора (см. рис. 1), измерение которой с последующим интегрированием и дифференцированием позволяет получить значения перемещения и контактного усилия соответственно. Подробное описание принципа регистрации скорости внедрения индентора в материал дано в [18].

При проведении исследований использовались два индентора со сферическими наконечниками, выполненными из карбида вольфрама, диаметром $D = 2,0$ мм и 3,18 мм. Масса индентора равнялась соответственно 6,3 г и 3,2 г. Реализация прибора и МДИ позволяет полностью автоматизировать процесс измерений и проводить измерения непосредственно на изделиях без ущерба для их последующей эксплуатации.

Экспериментальные исследования и результаты. Эксперименты по определению пластичности проводились на цветных металлах и сталях, имеющих различную твердость по Бринеллю (табл. 1). Образцы имели шероховатость менее Rz2 и геометрические размеры не менее $50 \times 50 \times 10$ мм. Во избежание вибраций, возникающих при ударе, образцы притирались на массивное основание (полированную плиту массой 20 кг) с помощью консистентной смазки (солидола). Индентирование проводилось с различной предупредной скоростью V_{max} в диапазоне 0,4–4,0 м/с, при этом достигаемая скорость деформации находилась в диапазоне 500–2500 c^{-1} , увеличиваясь с ростом твердости материала и предупредной скорости V_{max} . Как уже отмечалось, создать строго заданную одинаковую скорость деформации при ударе для всех материалов невозможно, поскольку время удара, величина контактного отпечатка и, соответственно, $\bar{\epsilon}_t$ определяются свойствами материала, в том числе и пластичностью, которая может быть рассчитана согласно выражениям (5) и (6).

На рис. 4 показана связь между параметрами δ_w^d и δ_H^d , которая построена с использованием значений, полученных для всего диапазона изменения V_{max} . Как видно связь носит характер близкий к линейному, а δ_w^d всегда несколько больше δ_H^d , при том что для статического индентирования характерна обратная ситуация [9].

Данные расхождения, возможно, вызваны различными принципами регистрации процесса индентирования, точностью определения параметров внедрения, а также допущениями (о нахождении материала в состоянии полной пластичности), принятыми при расчете d_c . Можно отметить, что чем больше значение δ_H^d , тем меньше ее расхождение с δ_w^d . При этом максимальные значения δ_w^d и δ_H^d получены при максимальных предупредных скоростях для материалов с низкой твердостью, для которых характерны развитые пластические деформации. В любом случае можно констатировать устойчивую связь между данными параметрами. Хотя точность измерения δ_w^d будет выше, поскольку в используемом оборудовании регистрируемым параметром

Характеристики испытуемых материалов
Characteristics of the materials tested

Материал	Твердость по Бринеллю, HB, или Роквеллу, HRC	Модуль упругости, Е _м , ГПа	Коэффициент Пуассона, ν_m
Сталь 10сп	105; 109 HB	200	0,28
Сталь У10А	183 HB; 62 HRC	200	0,28
Сталь 45	27,5; 45,7 HRC	200	0,28
Сталь 08Х18Н10Т	156 HB	200	0,28
Алюминиевый сплав 1050	75 HB	70	0,35
Алюминиевый сплав В96	142 HB	70	0,35
Латунь Л60	101; 106, 132, 136, 193 HB	115	0,35
Медь М1	68 HB	130	0,35
Никель НП1	143 HB	210	0,29
Сплав ВТ1-0	188 HB	110	0,36
Сплав ВТ-3	391 HB	110	0,36

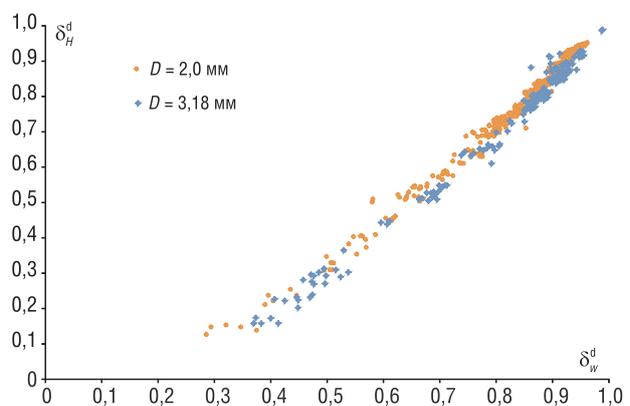


Рис. 4. Связь параметров δ_w^d и δ_H^d
Fig. 4. Ratio between parameters δ_w^d and δ_H^d

является $V(t)$, а остальные параметры определяются расчетом, в дальнейших исследованиях будем использовать величину δ_H^d как более обоснованную теоретически.

Рассмотрим, как изменяется параметр δ_H^d при варьировании V_{\max} от 0,4 до 4 м/с. Экспериментальные исследования показывают, что с увеличением V_{\max} значение δ_H^d также возрастает (рис. 5), при этом одновременно снижается разница $\Delta\delta_H^d$ между δ_H^d для различных материалов. Так, $\Delta\delta_H^d$ между сталью 27,5 HRC и сталью 45,7 HRC при $V_{\max} \approx 0,4$ м/с составляет 0,15 (27 %), а при $V_{\max} \approx 4,0$ м/с – 0,05 (6 %).

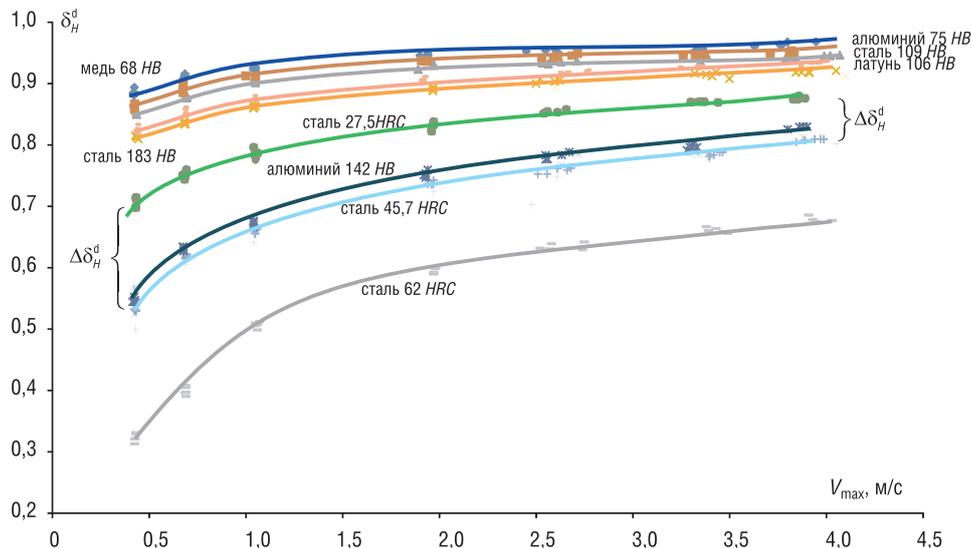


Рис. 5. Изменение δ_H^d при увеличении V_{\max} для различных образцов

Fig. 5. Change of δ_H^d at the increase of V_{\max} for different samples

Очевидно, что при одной и той же скорости V_{\max} для различных материалов достигается разная величина ε и $\dot{\varepsilon}_t$, вклад которых сложно разделить. Следует отметить, что материал при деформировании проходит различные стадии: упругую, упругопластическую и стадию полной пластичности. Соответственно энергия удара будет тратиться на создание как упругой деформации, так и пластической. Поэтому вполне естественно, что на начальном этапе значение модуля упругости будет оказывать значительное влияние на соотношение упругой и пластической деформации. При увеличении глубины внедрения h доля упругой деформации снижается, при этом максимальное значение деформации, которое может быть достигнуто, как следует из формулы (7), равно 0,2. Для этого необходимо, чтобы $d_c = D$. Однако для твердых материалов достичь $\varepsilon = 0,2$ в диапазоне скоростей 0,4–4,0 м/с не удастся, кроме того при росте V_{\max} , как показано, падает чувствительность параметра δ_H^d , поскольку $\Delta\delta_H^d$ между различными материалами падает. Таким образом, можно констатировать, что выбор оптимальной величины деформации, при которой будет достигнута оптимальная чувствительность, нуждается в определении.

Естественно, что чем выше доля пластической деформации, тем меньше влияние упругих характеристик материала. Однако если говорить о динамическом индентировании и его использовании для неразрушающего контроля реальных изделий, то следует учитывать, что на результаты измерений будут оказывать влияние волновые процессы при ударе. Поэтому применение слишком больших энергий удара не является приемлемым с этой точки зрения. В [19] установлено, что состояние полной пластичности достигается при отношении $\frac{d_c}{D} = 0,16 \div 0,20$ ($\varepsilon = 0,032 \div 0,040$ (или 3,2–4,0 %)) для материалов, у которых отношение $\frac{Y}{E^*} < 0,005$, и при $\frac{d_c}{D} = 0,2-0,3$ у материалов с $\frac{Y}{E^*} > 0,005$ (Y – предел текучести, E^* – приведенный модуль упругости; $\frac{1}{E^*} = \frac{1-v_M^2}{E_M} + \frac{1-v_i^2}{E_i}$, где v – коэффициент Пуассона, индексы M и i относятся к материалу и индентору соответственно).

На рис. 6, *a* показана зависимость δ_H^d от ε . Обращает на себя внимание изменение взаимного расположения зависимостей для некоторых материалов. Видно, что пластичность стали 45 (45,7 HRC) выше, чем алюминиевого сплава В96 (142 HB), хотя на предыдущем графике (см. рис. 5) наблюдалась обратная картина, которая в свою очередь совпадает с характером взаимного расположения зависимостей δ_H^d от $\bar{\varepsilon}_t$, для этих материалов на рис. 6, *b*. Из рис. 6, *b* можно сделать вывод, что пластичность алюминиевого сплава выше, чем у стали. Такая же ситуация наблюдается для образцов из стали 10сп (109 HB) и алюминиевого сплава 1050 (75 HB). Это вызвано тем, что при динамическом индентировании одновременно протекают два конкурирующих процесса, которые оказывают влияние на показатель пластичности: увеличение деформации (нарастание доли пластической деформации и соответственно увеличение δ_H^d) и рост скорости деформации, которая, как известно, сопровождается увеличением предела текучести, вследствие чего показатель пластичности падает (при том же значении деформации). На зависимость $\delta_H^d = f(V_{\max})$ влияют оба эти процесса. Это еще раз подтверждает, что сравнивать пластичность металлов по твердости не всегда правильно.

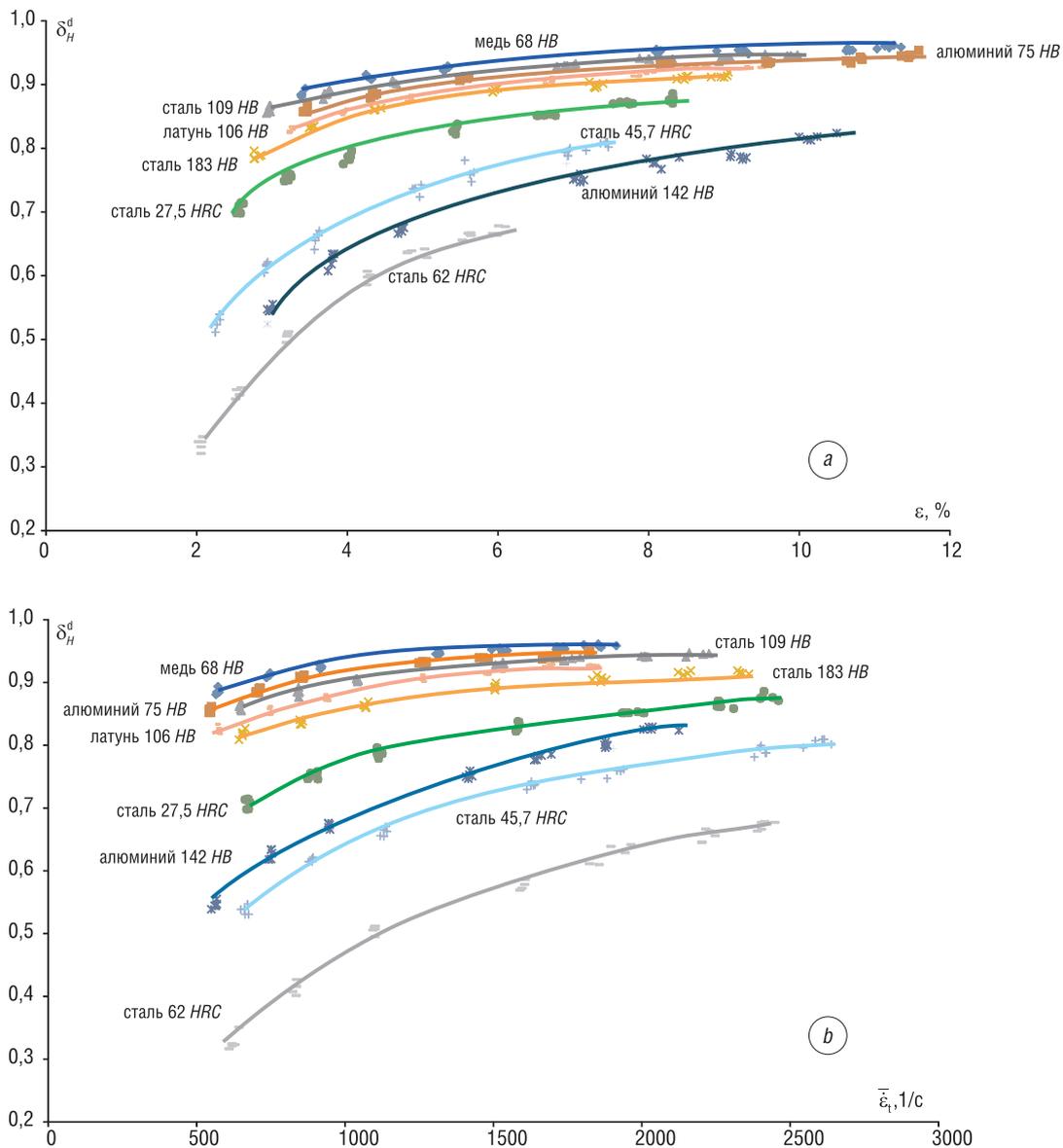


Рис. 6. Влияние деформации и скорости деформации на значение пластичности: *a* – зависимость δ_H^d от ε , *b* – зависимость δ_H^d от $\bar{\varepsilon}_t$

Fig. 6. Influence of the strain and strain rate on plasticity: *a* – dependence δ_H^d on ε , *b* – dependence δ_H^d on $\bar{\varepsilon}_t$

Для сравнения пластичности различных материалов удобно воспользоваться предложенным в [9] подходом: проводить сравнение δ_H^d в зависимости от параметра, учитывающего влияние модуля упругости E_M и коэффициента Пуассона $\frac{H_M^d}{E_M}(1 - \nu_M - 2\nu_M^2)$. При этом необходимо выбрать оптимальные параметры индентирования для обеспечения максимальной чувствительности.

На рис. 7, а показаны зависимости $\delta_H^d = f\left(\frac{H_M^d}{E_M}(1 - \nu_M - 2\nu_M^2)\right)$, полученные при различных V_{max} . Видно, что при увеличении V_{max} эта зависимость приближается к линейной, однако при этом теряется чувствительность (угол наклона прямой уменьшается). При скорости $V_{max} \approx 1,0$ м/с зависимость становится практически линейной. Здесь необходимо отметить, что при данной V_{max} все материалы деформируются более чем на 4 % и находятся в состоянии полной пластичности. Дальнейшее увеличение предударной скорости становится с точки зрения контроля нецелесообразным, поскольку снижение чувствительности будет непосредственно оказывать влияние на погрешность измерений.

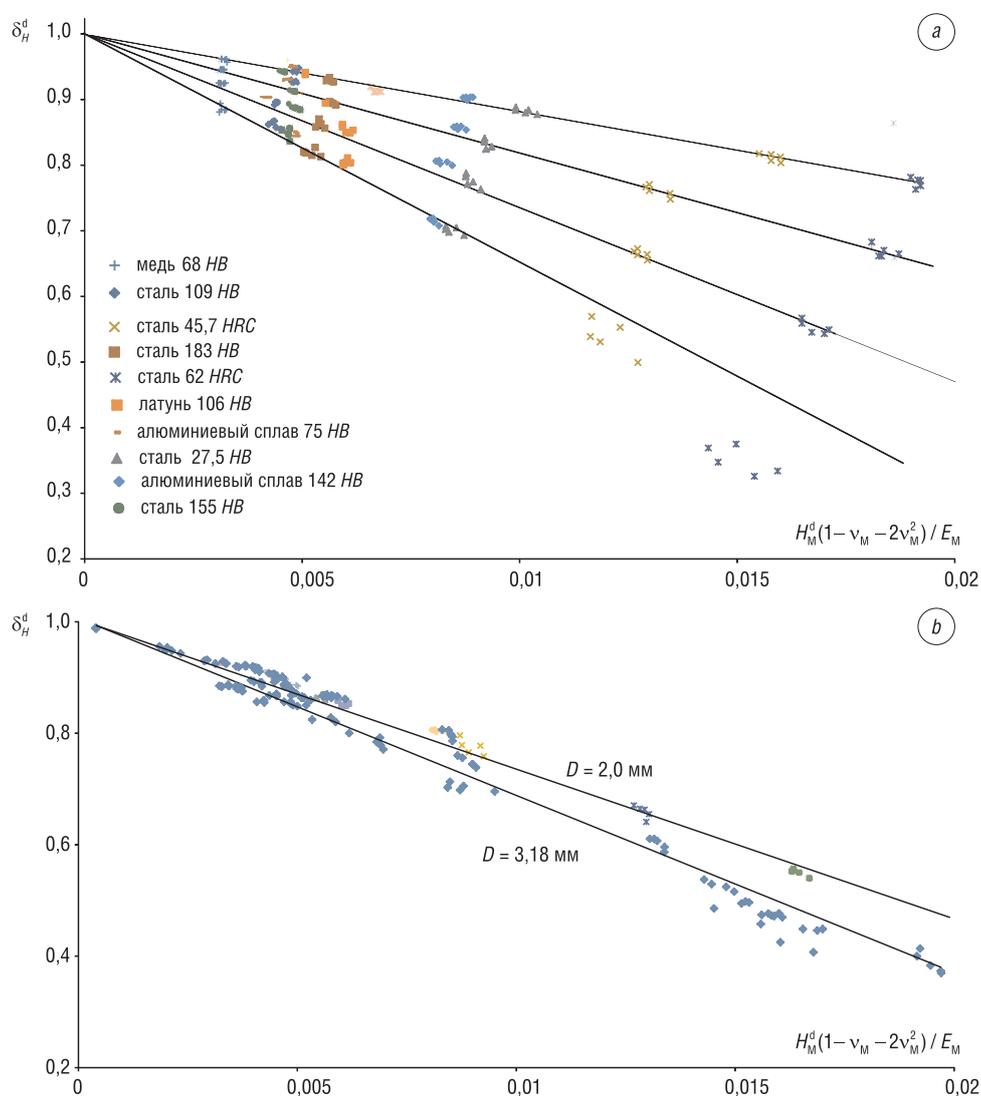


Рис. 7. Зависимость δ_H^d от соотношения $\frac{H_M^d}{E_M}(1 - \nu_M - 2\nu_M^2)$ при различных V_{max} : а – для индентора $D = 2,0$ мм; б – сравнение данных для инденторов $D = 2,0$ и $3,18$ мм

Fig. 7. Dependence δ_H^d on $\frac{H_M^d}{E_M}(1 - \nu_M - 2\nu_M^2)$ at the different V_{max} : а – indenter $D = 2.0$ mm; б – comparison between the data for indenters with $D = 2.0$ and 3.18 mm

Проведенные эксперименты позволяют утверждать, что для получения линейной зависимости необходимым условием, по-видимому, является создание деформаций более 4 %. Если материалы не являются твердыми, то это состояние наступает ранее, и если сократить круг исследуемых материалов, то можно снизить предупредительную скорость и получить больший диапазон изменения пластичности. Это важный факт для неразрушающего контроля, поскольку, как правило, металлы, несущие нагрузки, не имеют высокой твердости во избежание их охрупчивания и внезапного разрушения.

Если обратиться к рис. 7, *b*, то можно отметить, что диаметр индентора в данном случае не оказывает существенного влияния. Зависимости для разных инденторов оказываются близки. Этот факт объясняется тем, что в данном случае соотношение D/m позволяет получить близкие значения скорости деформации (отличающиеся во всем диапазоне на не более чем 10 %).

Выводы. В работе исследована возможность определения параметра пластичности методом динамического микроударного индентирования сферическим индентором. Предложены выражения для определения этого параметра, позволяющие использовать в расчетах непосредственно данные кривой ударного нагружения.

Показана близость значений параметра пластичности, рассчитываемого исходя из глубин внедрения индентора и исходя из энергетических параметров индентирования (через коэффициент восстановления скорости).

Изучено влияние величины деформации и скорости деформации на значение параметра пластичности. Показано изменение чувствительности параметра пластичности при изменении предупредительной скорости. Проведено сравнение параметра пластичности для различных металлов.

Полученные данные позволяют наметить вопросы, представляющие интерес для дальнейшего изучения: разделение вклада величины деформации и скорости деформации в значение параметра пластичности, сопоставление данных с параметром пластичности, определенным статическим индентированием, установление связи указанного параметра с пределом текучести, определение чувствительности к деформационному упрочнению и температуре.

Благодарности

Автор выражает благодарность члену-корреспонденту Национальной академии наук Украины, доктору технических наук, профессору Ю. В. Мильману за полезное обсуждение результатов данной работы.

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

Acknowledgements

Author thank Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor Yu. V. Milman for a helpful discussion of the results of this work.

This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant no. T20UКА-002).

Список использованных источников

1. Milman, Yu. V. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement / Yu. V. Milman, B. A. Galanov, S. I. Chugunova // *Acta Metallurgica et Materialia*. – 1993. – Vol. 41, №9. – P. 2523–2532. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(93\)90122-9](https://doi.org/10.1016/0956-7151(93)90122-9)
2. Milman, Yu. V., Plasticity determined by indentation and theoretical plasticity of materials / Yu. V. Milman, S. I. Chugunova, I. V. Goncharova // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics*. – 2009. – № 73. – P. 1215–1222. <https://doi.org/10.3103/S1062873809090093>
3. Arunkumar, S. A review of indentation theory / S. Arunkumar // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5, № 11, part 3. – P. 23664–23673. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.156>
4. 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>
5. Дрозд, М. С. Определение механических свойств металла без разрушения / М. С. Дрозд. – М.: Металлургия, 1965. – 171 с.
6. Геллер, А. Л. О возможности оценки качества металлургической продукции с помощью чисел твердости / А. Л. Геллер // *Заводская лаборатория*. – 1970. – Т. 36, № 12. – С. 1514–1519.
7. Milman, Yu. V. Plasticity characteristic obtained by indentation technique for crystalline and noncrystalline materials in the wide temperature range / Yu. V. Milman, S. I. Chugunova, I. V. Goncharova // *High Temp. Mater. Processes*. – 2006. – Vol. 25, № 1–2. – P. 39–46. <https://doi.org/10.1515/HTMP.2006.25.1-2.39>
8. Cheng, Y. T. Scaling, dimensional analysis, and indentation measurements / Y. T. Cheng, C. M. Cheng // *Mater. Sci. Eng., R*. – 2004. – Vol. 44, № 4–5. – P. 91–149. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2004.05.001>

9. Plasticity of Materials Determined by the Indentation Method / Yu. V. Milman [et al.] // Prog. Phys. Met. – 2018. – Vol. 19, № 3. – P. 271–308. <https://doi.org/10.15407/ufm.19.03.271>
10. Kren, A. Determination of the physic and mechanical characteristics of isotropic pyrolytic graphite by dynamic indentation method / A. Kren, T. Protasenyia // Russ. J. Nondestr. Test. – 2014. – Vol. 50, № 7. – P. 419–425. <https://doi.org/10.1134/S1061830914070079>
11. Kren, A. Determination of the critical stress intensity factor of glass under conditions of elastic contact by the dynamic indentation method / A. Kren // Strength of Materials. – 2009. – Vol. 41, № 6. – P. 628–636. <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9172-x>
12. Kren, A. Influence of the temperature during control of of the elastic modulus of a road pavement by the local contact straining method / A. Kren // Russ. J. Nondestr. Test. – 2010. – Vol. 46, № 8. – P. 611–617. <https://doi.org/10.1134/S1061830910080103>
13. Tabor, D. The Hardness of metals / D. Tabor. – London: Oxford Univ. Press, 1951. – 173 p. https://doi.org/10.1299/jsmemag.56.414_592_5
14. Tirupataiah, Y. A comprehensive analysis of static indentation process / Y. Tirupataiah, G. Sundararajan // Mater. Sci. Eng. – 1987. – Vol. 91. – P. 169–180. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(87\)90295-3](https://doi.org/10.1016/0025-5416(87)90295-3)
15. Johnson, K. Contact Mechanics / K. Johnson. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1985. – 452 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139171731>
16. Oliver, W. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology / W. Oliver, G. Pharr // J. Mater. Res. – 2004. – Vol. 19, № 1. – P. 3–20. <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>
17. Influence of the Dynamic Indentation Parameters on the Behavior of Metals during the Penetration of an Indenter with a Spherical Tip / A. P. Kren [et al.] // Russ. Metall. – 2021. – № 4. – P. 563–569. <https://doi.org/10.1134/S0036029521040170>
18. Kren A. Determination of the relaxation function for viscoelastic materials at low velocity impact / A. Kren, A. Naumov // Int. J. Impact Eng. – 2010. – Vol. 37, № 2. – P. 170–176. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.08.001>
19. Mesarovic, S. Dj. Spherical indentation of elastic–plastic solids / S. Dj. Mesarovic, N. A. Fleck // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1999. – Vol. 455. – P. 2707–2728. <https://doi.org/10.1098/rspa.1999.0423>

References

1. Milman Yu. V., Galanov B. A., Chugunova S. I. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1993, vol. 41, no. 9, pp. 2523–2532. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(93\)90122-9](https://doi.org/10.1016/0956-7151(93)90122-9)
2. Milman Yu. V., Chugunova S. I., Goncharova I. V. Plasticity determined by indentation and theoretical plasticity of materials. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2009, no. 73, pp. 1215–1222. <https://doi.org/10.3103/S1062873809090093>
3. Arunkumar S. A review of indentation theory. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 11, part 3, pp. 23664–23673. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.156>
4. 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>
5. Drozd M. S. *Determination of the Mechanical Properties of Metal without Destruction*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1965. 171 p. (in Russian).
6. Geller A. L. On the possibility of assessing the quality of metallurgical products using hardness numbers. *Zavodskaya laboratoriya* [Factory Laboratory], 1970, vol. 36, no. 12, pp. 1514–1519 (in Russian).
7. Milman Yu. V., Chugunova S. I., Goncharova I. V. Plasticity characteristic obtained by indentation technique for crystalline and noncrystalline materials in the wide temperature range. *High Temperature Materials and Processes*, 2006, vol. 25, no. 1–2, pp. 39–46. <https://doi.org/10.1515/HTMP.2006.25.1-2.39>
8. Cheng Y. T., Cheng C. M. Scaling, dimensional analysis, and indentation measurements. *Materials Science and Engineering: Reports*, 2004, vol. 44, no. 4–5, pp. 91–149. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2004.05.001>
9. Milman Yu. V., Chugunova S. I., Goncharova I. V., Golubenko A. A. Plasticity of Materials Determined by the Indentation Method. *Progress in Physics of Metals*, 2018, vol. 19, no. 3, pp. 271–308. <https://doi.org/10.15407/ufm.19.03.271>
10. Kren A., Protasenyia T. Determination of the physic and mechanical characteristics of isotropic pyrolytic graphite by dynamic indentation method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, no. 7, pp. 419–425. <https://doi.org/10.1134/S1061830914070079>
11. Kren A. Determination of the critical stress intensity factor of glass under conditions of elastic contact by the dynamic indentation method. *Strength of Materials*, 2009, vol. 41, no. 6, pp. 628–636. <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9172-x>
12. Kren A. Influence of the temperature during control of of the elastic modulus of a road pavement by the local contact straining method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, vol. 46, no. 8, pp. 611–617. <https://doi.org/10.1134/S1061830910080103>
13. Tabor D. *The Hardness of Metals*. London, Oxford University Press, 1951. 173 p. https://doi.org/10.1299/jsmemag.56.414_592_5
14. Tirupataiah Y., Sundararajan G. A comprehensive analysis of static indentation process. *Materials Science and Engineering*, 1987, no. 91, pp. 169–180. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(87\)90295-3](https://doi.org/10.1016/0025-5416(87)90295-3)
15. Johnson K. *Contact Mechanics*. Cambridge, Cambridge University Press, 1985. 452 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139171731>

16. Oliver W., Pharr G. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, 2004, vol. 19, no. 1, pp. 3–20. <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>

17. Kren A. P., Rudnitskii V. A., Lantsman G. A., Khudoley A. L. Influence of the Dynamic Indentation Parameters on the Behavior of Metals during the Penetration of an Indenter with a Spherical Tip. *Russian Metallurgy*, 2021, no. 4, pp. 563–569. <https://doi.org/10.1134/S0036029521040170>

18. Kren A., Naumov A. Determination of the relaxation function for viscoelastic materials at low velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, vol. 37, no. 2, pp. 170–176. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.08.001>

19. Mesarovic S. Dj, Fleck N. Spherical indentation of elastic–plastic solids. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1987, vol. 455, pp. 2707–2728. <https://doi.org/10.1098/rspa.1999.0423>

Информация об авторе

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 author

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