

ISSN 002-3566 (print)
УДК 620.178Поступила в редакцию 28.04.2016
Received 28.04.2016**В. А. Рудницкий, А. П. Крень, Г. А. Ланцман***Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь***СООТНОШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ И СТАТИЧЕСКОЙ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ**

Рассматриваются вопросы измерения твердости методом ударного вдавливания индентора. Показано, что превышение динамической твердости над статической может быть описано с помощью коэффициента динамичности, представляющего собой функцию свойств материала и условий испытаний. В рамках дислокационной теории показано влияние скорости деформации на величину твердости, при этом отличие значений коэффициента динамичности объясняется разной кристаллической структурой исследуемых материалов. С помощью прибора ИПМ-1К получены экспериментальные диаграммы динамического нагружения различных металлов: стали, алюминия, бронзы, латуни, меди, титана. Предложена методика калибровки динамических твердомеров для расчета статической твердости по Бринеллю без использования эталонных мер твердости.

Ключевые слова: твердость, металлы, индентирование, кристаллическая решетка, динамическоенагружение.

V. A. Rudnitsky, A. P. Kren, G. A. Lantsman*The Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***INVESTIGATION OF THE RATIO BETWEEN THE DYNAMIC AND STATIC HARDNESS OF METALS**

Problems of measurement of hardness by the dynamic indentation method are discussed. It is shown that an excess of dynamic hardness over static one can be described by the coefficient, which is a function of material properties and test conditions. In framework of the dislocation theory the influence of strain rate on hardness value is shown, and the difference in ratio between static and dynamic hardness can be explained by different crystal structure of materials. With the help of the device IPM-1K the experimental diagrams of dynamic loading of various metals: steel, aluminum, bronze, brass, copper, titanium were obtained. A method of calibration of dynamic hardness testers for calculation of the Brinell hardness without using standard hardness test blocks was proposed.

Keywords: hardness, metals, indentation, crystal lattice, dynamic loading.

Введение. Измерение твердости является одним из самых распространенных видов испытаний, используемых при решении различных практических задач в области материаловедения, трибологии, механики разрушения. Особенно это касается измерения динамической твердости, поскольку определение статической (точнее квазистатической) твердости может быть выполнено только в лабораторных условиях на специально изготовленных образцах-свидетелях, в то время как динамические ударные испытания можно проводить непосредственно на изделиях. Испытания проводятся с помощью широко распространенных ударных твердомеров, осуществляющих деформирование материала посредством жесткого бойка-индентора с энергией, как правило, не превышающей 15 мДж.

В то же время величины статической и динамической твердости могут отличаться по значению, поскольку измерения проходят при различных скоростях вдавливания. Принимая во внимание, что числа статической твердости в шкалах Бринелля, Роквелла, Виккерса являются общепринятыми, приведение результатов динамических измерений к статическим представляет практический интерес. В настоящей работе на основе анализа динамичности нагружения обосновываются теоретические положения, устанавливающие количественную связь между числами динамической и статической твердости. Рассматривается прибор, позволяющий регистрировать процесс ударного вдавливания индентора, и сама диаграмма ударного нагружения в координатах контактное усилие – глубина вдавливания, позволяющая изучить реакцию материала при деформировании.

Теоретические положения. В общем случае величина твердости H , которая с физической точки зрения является мерой сопротивления вдавливанию индентора, представляет собой функ-

цию деформации ε , скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ и коэффициента деформационного упрочнения n . Можно записать следующие выражения для статической H_s и динамической H_d твердости:

$$H_s = H_s(\varepsilon_s, n, \dot{\varepsilon}_s), \quad (1)$$

$$H_d = H_d(\varepsilon_d, n, \dot{\varepsilon}_d), \quad (2)$$

В (1), (2) можно получить выражения для деформации и скорости деформации для вдавливания сферического индентора в упругопластическое пространство при использовании формулы Тэйбора [1]:

$$\varepsilon = 0,2 \frac{d}{D}, \quad (3)$$

где d – диаметр пластического отпечатка в материале; D – диаметр сферического индентора.

Средняя скорость пластической деформации в этом случае будет равна

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t_a} = 0,2 \frac{d}{Dt_a}, \quad (4)$$

где t_a – длительность вдавливания индентора при квазистатических испытаниях или длительность активной стадии удара (стадии нагружения) при динамическом вдавливании.

Обычно значения ε_d и ε_s при статическом и динамическом нагружениях близки, поскольку должно выполняться условие $0,24 < d/D < 0,6$, рекомендованное [2], по выбору нагрузки, обеспечивающей относительную независимость величины измеряемой твердости от глубины вдавливания. Коэффициент деформационного упрочнения n также имеет одно и то же значение, поскольку идет речь об одном и том же материале. Что же касается скоростей деформации $\dot{\varepsilon}_s$ и $\dot{\varepsilon}_d$, то для них наблюдается существенное различие. Например, принимая $d/D = 0,4$ и учитывая, что длительность квазистатического вдавливания индентора вместе с выдержкой под нагрузкой составляет в среднем 30 с (при измерении твердости по Бринеллю), скорость деформации $\dot{\varepsilon}_s$, согласно формуле (4), будет примерно равна $2,67 \cdot 10^{-3}$ 1/с. При измерении динамической твердости, оставляя $d/D = 0,4$, продолжительность t_a равна 20–50 мкс, что примерно соответствует скорости деформации $\dot{\varepsilon}_d = 2,28 \cdot 10^3$ 1/с. Таким образом, скорость деформации при динамическом вдавливании превышает статическую более чем на 6 порядков.

Если, как было обосновано ранее, принять, что $\varepsilon_d = \varepsilon_s$, а $n = \text{const}$, то, используя (1), (2), получаем, что H_d и H_s связаны между собой коэффициентом

$$H_d(\dot{\varepsilon}_d) = \gamma H_s(\dot{\varepsilon}_s), \quad (5)$$

где γ – коэффициент динамичности.

Из уравнения (5) следует, что величина γ является функцией только скоростей деформации при динамическом и статическом нагружениях, которые в свою очередь зависят от свойств материала (например, вида кристаллической решетки) и условий испытаний (например, температуры, формы индентора). В отличие от низкомолекулярных вязкоупругих материалов, где наблюдается вязкое сопротивление вдавливанию, пропорциональное скорости деформации, в металлах влияние скорости деформации проявляется значительно слабее и физически определяется недостатком времени для установления равновесного состояния материала при пластической деформации [3]. В литературе это явление иногда называют квазивязким сопротивлением [4]. Учет влияния $\dot{\varepsilon}$ может производиться с помощью степенного закона с малым показателем степени (например, [5]):

$$H_d = H_s \left(\frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^m, \quad (6)$$

где $\gamma = \left(\frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^m$ – коэффициент динамичности, величина m составляет порядка 0,1.

В литературе имеются и другие уравнения для оценки γ . В [6] приводится зависимость, полученная на основе анализа многочисленных экспериментов на стальных изделиях, для γ в виде функции предупредной скорости индентора v_0 :

$$\gamma = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \nu_0 \frac{355}{H_s}} \right), \quad (7)$$

где значения твердости H_s выражаются в виде чисел Бринелля.

В настоящей работе предлагается использовать физически более обоснованную зависимость для определения динамической твердости при условии одинаковых значений деформации:

$$H_d = H_s + Kn \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right). \quad (8)$$

Формула (8) содержит коэффициент K , имеющий размерность напряжения, который является функцией свойств контролируемого металла [7], а также его кристаллической структуры [4, 8].

Разделив зависимость (8) на H_s , получим выражение для коэффициента динамичности γ :

$$\gamma = \frac{H_d}{H_s} = 1 + \frac{K}{H_s} \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right), \quad (9)$$

из которого видно, что коэффициент γ всегда больше единицы и уменьшается с ростом H_s .

Если определение статической твердости стандартизовано и выполняется согласно принятым методикам, то способы выражения динамической твердости могут быть разными: через потери энергии при деформировании, длительность ударного контакта и др. Наиболее оптимально выразить твердость как отношение максимального контактного усилия P_{\max} к площади проекции пластического отпечатка A [9]:

$$H_d = \frac{P_{\max}}{A}, \quad (10)$$

где $A = \pi a^2$, a – радиус отпечатка, который связан с глубиной вдавливания формулой [9] (рис. 1):

$$a = \frac{d}{2} = \sqrt{Dh_c}. \quad (11)$$

Здесь D – диаметр сферического наконечника индентора; h_c – контактная глубина вдавливания или расстояние от вершины индентора до плоскости проекции пластического отпечатка [9]:

$$h_c = 0,5(h_{\max} + h_p) \quad (12)$$

(h_{\max} – максимальная глубина вдавливания индентора; h_p – глубина пластического отпечатка).

С учетом формул (11) и (12) выражение (10) для динамической твердости следующее:

$$H_d = \frac{2P_{\max}}{\pi D(h_{\max} + h_p)}. \quad (13)$$

Формулы (1)–(13) представляют собой теоретическую основу исследования и для их подтверждения необходимы экспериментальные данные.

Экспериментальное оборудование. Для проведения экспериментов использовался прибор типа ИПМ-1К, разработанный в Институте прикладной физики НАН Беларуси и внесенный в Госреестр средств измерений № РБ 03 03 4258 15.

Схема работы прибора показана на рис. 2. При падении индентора во время контакта с испытуемым материалом в катушке индуктивности наводится ЭДС, пропорциональная скорости перемещения индентора, измерение

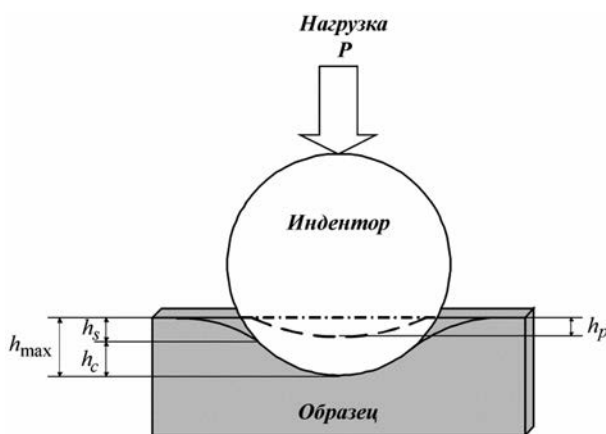


Рис. 1. Схема контакта индентора с материалом

которой с последующим интегрированием или дифференцированием позволяет получить значения перемещения или контактного усилия соответственно. Индентор датчика прибора изготовлен из карбида вольфрама, модуль упругости которого равен 710 ГПа, а твердость составляет свыше 1600 НВ. Масса индентора $m = 4,3$ г, диаметр сферического наконечника $D = 2,3$ мм, предупредительная скорость индентора составляла около 0,84 м/с.

Типичная диаграмма вдавливания, полученная на экспериментальной установке и используемая для определения параметров, входящих в расчетные формулы, представлена на рис. 3.

По диаграмме контактного взаимодействия можно четко определить значения максимального контактного усилия и перемещения, глубину пластического отпечатка и рассчитать другие величины, необходимые для определения динамической твердости.

Результаты эксперимента. Исследования проводились на образцах из металлических материалов, имеющих различную твердость: углеродистая сталь, медь, алюминий, латунь, бронза, титан. Характерные параметры индентирования, получаемые при их испытании, приведены в таблице.

По данным таблицы можно оценить диапазон изменения $\ln(\dot{\epsilon}_d / \dot{\epsilon}_s)$, который является довольно узким и находится в пределах 12,55–13,52. Исходя из данных таблицы, среднее значение равно 12,9. В таблице также приведена расчетная величина коэффициента γ . Среднее значение коэффициента K для сталей, рассчитанное по формуле (8), можно принять равным 49,3 МПа. Применительно к сталям наибольшие значения γ , как видно из таблицы, соответствуют малоуглеродистым сталям, прошедшим отпуск, а наименьшие значения – углеродистым закаленным и легированным сталям. Подставляя в формулу (9) значения $\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s}\right) = 12,9$ и учитывая принятую для стали величину $K = 49,3$ МПа, можно оценить реальный диапазон изменения динамического коэффициента γ с помощью следующего выражения:

$$\gamma = 1 + \frac{49,3}{H_s} 12,9 = 1 + \frac{636}{H_s}. \quad (14)$$

При испытании стали, имеющей статическую твердость 1000 МПа (≈ 102 НВ), получим $\gamma = 1,62$, а для высокоуглеродистой стали после термообработки с твердостью 6000 МПа – $\gamma = 1,06$.

Выражение (14) характеризуется высокой стабильностью, что подтверждает теоретическую возможность определения H_s по данным H_d для сталей вне зависимости от их фазового состава

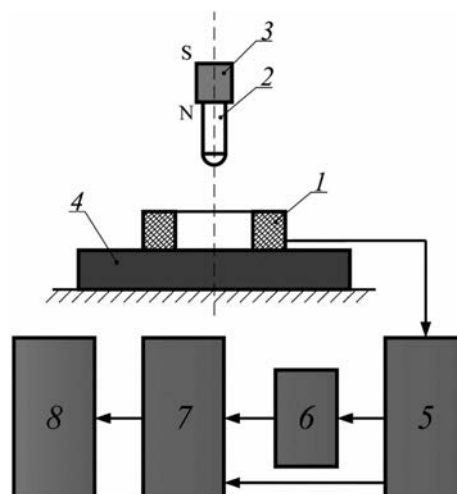


Рис. 2. Схема экспериментальной установки динамического индентирования для определения твердости металлов: 1 – катушка индуктивности; 2 – индентор; 3 – постоянный магнит; 4 – образец; 5 – предварительный усилитель; 6 – блок синхронизации; 7 – аналого-цифровой преобразователь; 8 – устройство вывода информации

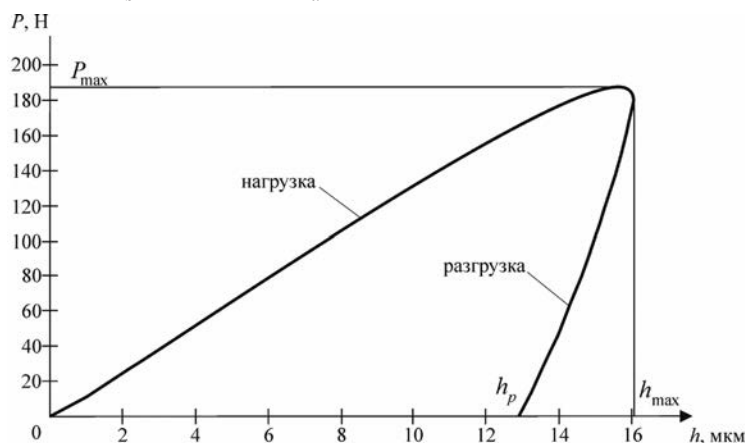


Рис. 3. Типичная зависимость изменения нагрузки от глубины индентирования

Сравнительные характеристики, получаемые при деформировании металлов

Материал	НВ, МПа	H_s , МПа	$\dot{\epsilon}_s$	$\dot{\epsilon}_d$	$\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s}\right)$	H_d , МПа	$\gamma = \frac{H_d}{H_s}$	K (8)	K (15)
Алюминий	64	628	0,0027	845	12,64	663	1,06	2,78	2,71
	68	667	0,0026	852	12,69	698	1,05	2,44	
	145	1422	0,0034	957	12,55	1470	1,03	3,79	
Бронза	80	785	0,0027	925	12,76	940	1,20	12,16	14,06
Латунь	103	1010	0,0023	958	12,92	1230	1,22	17,00	
	108	1059	0,0023	965	12,95	1320	1,25	20,12	
	135	1324	0,0021	981	13,07	1480	1,12	11,91	
	96	942	0,0024	953	12,88	1110	1,18	13,06	
	158	1550	0,0032	1010	12,65	1800	1,16	19,76	
Медь	48	471	0,003	847	12,55	630	1,34	12,68	
	69	677	0,0028	922	12,69	890	1,31	16,79	
Титан	192	1884	0,0029	1040	12,78	2490	1,32	47,46	50,73
Сталь	106	1040	0,0023	1080	13,06	1690	1,63	49,78	
	107	1050	0,0023	1080	13,06	1690	1,61	49,02	
	143	1403	0,0031	1120	12,81	2100	1,50	54,44	
	270	2649	0,0025	1160	13,05	3320	1,25	51,45	
	438	4297	0,002	1185	13,30	4960	1,15	49,87	
	703	6896	0,0016	1170	13,52	7450	1,08	40,95	

и вида термообработки. Оно служит основой для использования динамических твердомеров, которые в настоящее время калибруются по эталонным мерам твердости.

В нашем случае первичной информацией о твердости является динамическая твердость, а конечным результатом – статическая твердость, поэтому преобразуем формулу (9), выразив H_s через H_d :

$$\gamma = \frac{H_d}{H_d - K \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s}\right)}. \quad (15)$$

На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости динамического коэффициента γ от динамических чисел твердости H_d для стали, латуни, меди и алюминия, имеющих различную величину предварительного термического или деформационного упрочнения. Показано значение γ для образца из титана, которое по величине достаточно близко к значениям γ для сталей. Для описания зависимости $\gamma = f(H_d)$ использовалось значение логарифма $\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s}\right) = 12,9$, а коэффициент K , полученный при аппроксимации, имел различные значения: 50,73 МПа для стали; 14,06 МПа для латуни, меди; 2,71 МПа для алюминия (таблица) и по величине был близок к значениям, полученным по формуле (8).

Из рис. 4 можно сделать следующие выводы. Динамический коэффициент γ **растет с уменьшением** статической твердости, что объясняется увеличением величины пластической деформации, повышающей сопротивление динамическому вдавливаю индентора, и приближается к единице при высокой твердости. Единой зависимости динамического коэффициента γ для всех металлов не существует, а имеется семейство кривых $\gamma = \gamma(H_d)$, описываемых уравнением (15), с различными коэффициентами K . В области низких значений чисел твердости наименьшее отклонение динамической твердости от статической (малое значение γ) **наблюдается для алюминия**, наибольшее отклонение – для сталей.

Влияние скорости деформации на величину твердости объясняется дислокационной теорией, согласно которой сопротивление сдвигу при пластическом течении определяется действием сил трения перемещения дислокаций по атомным плоскостям скольжения [3]. Различие кривых $\gamma = \gamma(H_d)$ можно объяснить разной кристаллической структурой металлов [4]. Медь, латунь и алюминий имеют гранцентрированную кубическую решетку, у которой плоскости скольжения имеют более плотную упаковку атомов по сравнению со сталью, имеющей объемно центрированную кубическую решетку, чем и объясняется высокая пластичность этих металлов. Образец из титана имеет гексаго-

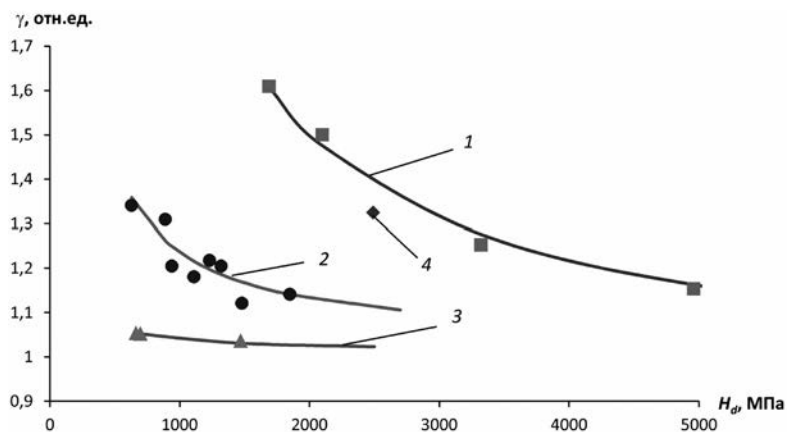


Рис. 4. Зависимость динамического коэффициента γ от значений динамической твердости для стали (1), меди, бронзы и латуни (2), алюминия (3), точка (4) соответствует образцу из титана; сплошными линиями показаны аппроксимирующие зависимости, соответствующие формуле (15) для указанных материалов

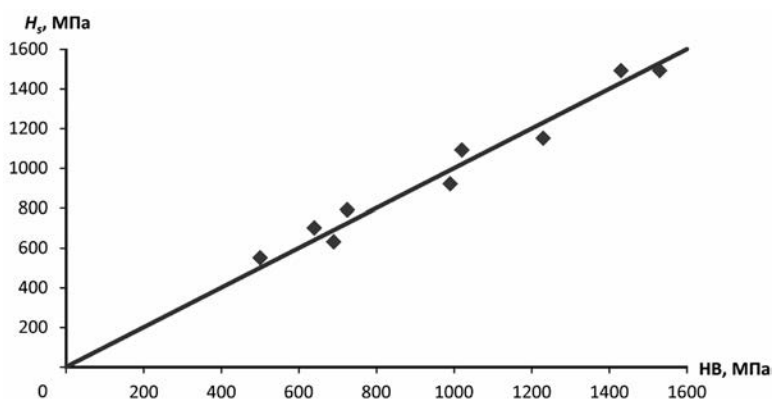


Рис. 5. Соответствие статической твердости H_s , полученной по результатам динамических испытаний, и статической твердости HB

нальную плотноупакованную решетку, механизм пластической деформации которого в виде двойникования значительно отличается от скольжения, наблюдаемого в кубических решетках.

Для оценки достоверности полученных выражений были выполнены следующие эксперименты. На образцах из стали, латуни, меди и алюминия, не использовавшихся в предыдущих исследованиях, вначале с помощью установки динамического индентирования в соответствии с формулой (13) определялась динамическая твердость как среднее из трех измерений. После чего, учитывая группу металлических материалов (сталь, латунь, медь, алюминий), для каждого значения твердости с помощью зависимостей рис. 4 определяли коэффициент динамичности γ . Разделив значения динамической твердости на величину γ , получили статические числа твердости H_s . На этих же образцах определяли статическую твердость с помощью прибора Бринелля. Сопоставление измеренных значений статической твердости HB (переведенных в мегапаскалы), полученных на приборе Бринелля, и твердости H_s , рассчитанной по данным динамических испытаний, показано на рис. 5.

Как следует из рис. 5, между значениями твердости наблюдается хорошее соответствие, позволяющее использовать ее динамические измерения для получения общепринятых статических чисел твердости без применения операции тарировки динамических твердомеров на эталонных мерах. Расчеты показывают, что погрешность измерения не превышает 8%, при этом отклонение измеренных значений не превышает 10 ед. Бринелля во всем рассматриваемом диапазоне.

Заключение. На основании известных литературных данных и собственных результатов экспериментальных исследований предложена методика перевода динамических чисел твердости в общепринятые статические числа с использованием коэффициента динамичности, который является функцией отношения скоростей деформаций, твердости и свойств материала, определяемых видом кристаллической решетки. Приводятся уравнения для коэффициента дина-

мичности для стали, латуни, меди, бронзы и алюминия, экспериментальная проверка которых подтвердила возможность использования приборов динамического индентирования без потери точности для оценки свойств металлов в статических числах твердости. Приведена схема прибора, реализующего метод динамического индентирования, разработанного в Институте прикладной физики НАН Беларуси, позволяющего получать непрерывную диаграмму вдавливания сферического индентора. Характерные параметры данной диаграммы (максимальная контактная сила, глубина упругого и пластического вдавливания) являются достаточными для расчета твердости металлов.

Список использованных источников

1. Tabor, D. *The Hardness of Metals* / D. Tabor. – London: Oxford University Press, 1951. – 173 p.
2. ISO 6506-1:2014 "Metallic materials – Brinell hardness test – Part 1: Test method".
3. Степанов, Г. В. Поведение конструкционных материалов в упругопластических волнах нагрузки / Г. В. Степанов. – Киев: Наукова думка, 1978. – 111 с.
4. Koeppel, B. J. Dynamic indentation hardness of metals / B. J. Koeppel, G. Subhash // IUTAM Symposium on Micro and Macro structural Aspects of Thermoplasticity / The series Solid Mechanics and its Application. – 2002. – Vol. 62. – P. 447–456.
5. Mroz, Z. Mathematical models of inelastic material behavior / Z. Mroz // Solid Mechanics division. – Waterloo: University of Waterloo Press, 1973. – P. 120–146.
6. Дрозд, М. С. О некоторых факторах, определяющих уровень динамического коэффициента твердости / М. С. Дрозд, Ю. И. Славский // Тр. Волгоградского политехнического института. – 1972. – Вып. 4. – С. 39–55.
7. Степанов, Г. В. Сопротивление металлов динамическому внедрению индентора / Г. В. Степанов, Э. Г. Сафаров // Проблемы прочности. – 1986. – № 5. – С. 80–83.
8. Koeppel, B. J. An experimental technique to investigate the dynamic indentation hardness of materials / B. J. Koeppel, G. Subhash // Experimental Techniques. – 1997. – Vol. 21, N 3. – P. 16–18.
9. Oliver, W. C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Res. – 2004. – Vol. 19, N 1. – P. 4–20.

References

1. Tabor, D. (1951), *The Hardness of Metals*, Oxford University Press, London, GB.
2. ISO 6506–1:2014 "Metallic materials – Brinell hardness test – Part 1: Test method".
3. Stepanov, G. V. (1978), *Povedenie konstruktsonnykh materialov v uprugoplasticheskikh volnakh nagruzki* [The behavior of engineering materials under the elastic-plastic stress waves], Naukova dumka, Kiev, UA.
4. Koeppel, B. J. and Subhash, G. (2002), "Dynamic indentation hardness of metals". *IUTAM Symposium on Micro and Macro structural Aspects of Thermoplasticity. The series Solid Mechanics and its Application*, vol. 62, pp. 447–456.
5. Mroz, Z. (1973), "Mathematical models of inelastic material behavior", *Solid Mechanics division*, University of Waterloo Press, Waterloo, BE, pp. 120–146.
6. Drozd, M. S. and Slavskij, Yu. I. (1972), "About some factors determining the level of the dynamic hardness coefficient", *Trudy Volgogradskogo politekhnicheskogo instituta* [Proceedings of the Volgograd Polytechnic Institute], no. 4, pp. 39–55.
7. Stepanov, G. V. (1986), "Resistance of the metal to the dynamic impression of the indenter", *Problemy prochnosti* [Strength Problems], no. 5, pp. 80–83.
8. Koeppel, B. J. and Subhash, G. (1997), "An experimental technique to investigate the dynamic indentation hardness of materials", *Experimental Techniques*, vol. 21, no. 3, pp. 16–18.
9. Oliver, W. C. and Pharr, G. M. (2004), "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. 4–20.

Информация об авторах

Рудницкий Валерий Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник. Институт прикладной физики НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 16, Беларусь). E-mail: rudnitsky@iaph.bas-net.by

Крень Александр Петрович – доктор технических наук, заведующий лабораторией контактно-динамических методов контроля. Институт прикладной физики НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 16, Беларусь). E-mail: alekspk@mail.ru

Ланцман Герман Аркадьевич – магистрант. Институт прикладной физики НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 16, Беларусь). E-mail: germanlantsman@gmail.com

Information about the authors

Rudnitsky Valery Arkadievich – D. Sc. (Engineering), Professor. The Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus (16, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Belarus). E-mail: rudnitsky@iaph.bas-net.by

Kren Alexander Petrovich – D. Sc. (Engineering), Head of the mechanical testing laboratory. The Institute of Applied Physics of the National academy of science of Belarus (16, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Belarus). E-mail: alekspk@mail.ru

Lantsman German Arkadevich – undergraduate. The Institute of Applied Physics of the National academy of sciences of Belarus (16, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Belarus). E-mail: germanlantsman@gmail.com

Для цитирования

Рудницкий, В. А. Соотношение динамической и статической твердости металлов / В. А. Рудницкий, А. П. Крень, Г. А. Ланцман // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 4. – С. 16–22.

For citation

Rudnitsky V. A., Kren A. P., Lantsman G. A. Investigation of the ratio between the dynamic and static hardness of metals. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, of physical-technical series. 2016, no. 4, pp. 16–22.