

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-1-57-61>

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТВЕРДОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

© Александр Вячеславович Ильинский*, Алексей Владимирович Федоров, Ксения Андреевна Степанова, Игорь Юрьевич Кинжагулов, Игорь Олегович Краснов

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49; *e-mail: allill003@mail.ru

*Статья поступила 7 декабря 2018 г. Поступила после доработки 4 марта 2019 г.
Принята к публикации 27 июня 2019 г.*

Механические характеристики конструкционных металлических материалов — важнейшие показатели их качества. Для их определения в последние годы широко применяют методы Шора, Бринелля, Роквелла, Либа, Виккерса, инструментального индентирования и др. Один из интенсивно развивающихся методов определения механических характеристик — динамическое индентирование (метод разработан в Институте прикладной физики НАН Беларуси). В развитие метода динамического индентирования в данной работе предложены способы повышения точности оценки твердости конструкционных металлических материалов. В работе решены следующие задачи: измерены значения параметров контактного взаимодействия индентора с материалом образцов — твердости по Бринеллю — с помощью прибора динамического индентирования; рассчитаны поверхностная и объемная динамические твердости с учетом характеристик, полученных с помощью прибора ДИ; проведен сравнительный анализ оценок твердости, полученных разными подходами. В результате сравнительного анализа способов, а также их экспериментальной апробации установлено, что повышение точности оценки твердости может быть достигнуто путем использования «энергетического» подхода, основанного на оценке отношения суммарной работы к объему восстановленного отпечатка при динамическом индентировании конструкционных металлических материалов. Использование «энергетического» подхода позволило получить выборочное стандартное отклонение значений объемной динамической твердости, которое существенно ниже выборочного стандартного отклонения значений поверхностной динамической твердости и данных прибора динамического индентирования, что напрямую влияет на повышение точности оценки твердости при динамическом индентировании рассматриваемых материалов. На основании «энергетического» подхода предложен новый алгоритм обработки исходного сигнала при определении динамической твердости с помощью прибора динамического индентирования.

Ключевые слова: неразрушающий контроль; динамическое индентирование; механические характеристики; твердость; алгоритм; обработка сигнала.

STUDY OF THE DYNAMIC HARDNESS OF STRUCTURAL METAL MATERIALS

© Aleksandr V. Ilinskiy*, Alexey V. Fedorov, Ksenia A. Stepanova,
Igor U. Kinzhagulov, Igor O. Krasnov

Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49 Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia; *e-mail: allill003@mail.ru

Received December 7, 2018. Revised March 4, 2019. Accepted June 27, 2019.

The mechanical properties of structural metallic materials are the most important indicators of their quality. Different methods (i.e., the methods of Shore, Brinell, Rockwell, Leeb, Vickers, method of instrumental indentation, and others) are currently used for determination of the hardness — one of the most important mechanical characteristics of structural metal materials. Among them is the method of dynamic indentation first developed at the Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. With the goal of further developing of the method of dynamic indentation, we propose the procedures aimed at increasing the accuracy of assessing the hardness of structural metallic materials: parameters of the contact interaction of the indenter with the sample material (Brinell hardness values) were measured using a dynamic indentation (DI) device; the values of surface and volumetric dynamic hardness were calculated taking into account the characteristics obtained using a DI device; a comparative analysis of hardness estimates obtained by different approaches was carried out. As a result of the comparative analysis of the methods, as well as their experimental testing, it was shown that an increase in the

accuracy of hardness assessment can be achieved by using the “energy” approach based on assessing the ratio of the total work to the volume of the recovered indentation upon dynamic indentation of structural metal materials. The use of the “energy” approach provided obtaining the sample standard deviation of the volumetric dynamic hardness values, which, in turn, was significantly lower than the sample standard deviation of the surface dynamic hardness values and data of the dynamic indentation device, which directly affects an increase in the accuracy of hardness estimation during dynamic indentation of structural metal materials. Proceeding from the “energy” approach, a new algorithm for processing the initial signal is proposed when the dynamic hardness is determined using a dynamic indentation device.

Keywords: non-destructive testing; dynamic indentation; mechanical properties; hardness; algorithm; signal processing.

Введение

Механические характеристики конструкционных металлических материалов, определяющие их качество, оценивают с помощью испытаний на растяжение, сжатие, изгиб, кручение и др. В подавляющем большинстве такие испытания проводят с разрушением изделия, использованием стандартных образцов и стационарного оборудования, что затрудняет возможность оперативного контроля механических свойств объектов исследования.

Определение твердости — один из наиболее распространенных методов механических испытаний, который широко применяют как при исследовании механических свойств, так и при контроле качества материалов в процессе их производства и эксплуатации. Испытания на твердость разнообразны и отличаются друг от друга по способу приложения нагрузки (статические и динамические), типу нагружения, способу измерения параметров нагружения, максимальным значениям прикладываемой испытательной нагрузки и глубины индентирования, форме индентора, времени нагружения и др. [1]. В настоящее время широко используют статические (по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу), квазистатические (инструментальное индентирование) и динамические (по Шору, Либу) методы измерения твердости [2–4].

Один из перспективных неразрушающих способов безобразцовой оперативной оценки твердости материала — метод динамического индентирования (ДИ), регламентированный ГОСТ Р 56474–2015 [5]. Несмотря на значительные его преимущества проблема точности оценки твердости остается актуальной. В первую очередь это обусловлено различием между динамической и статической твердостью, так как напряженно-деформированное состояние поверхностных слоев материала может существенно меняться при переходе от постоянной к переменной контактной нагрузке.

Цель работы — повышение точности оценки твердости конструкционных металлических материалов.

Методика, материалы, оборудование

Метод ДИ основан на непрерывной регистрации процесса ударного локального контактного взаимодействия индентора с исследуемым материалом (регистрации текущей скорости движения индентора).

Скорость движения индентора в каждый момент времени регистрируют с помощью магнитоиндукционного первичного преобразователя, состоящего из постоянного магнита, жестко соединенного с индентором (система индентирования), и катушки индуктивности [6]. При пересечении магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом, в катушке индуктивности наводится электродвижущая сила (ЭДС) индукции $\varepsilon(t)$, пропорциональная скорости движения индентора $V(t)$ во всем временном диапазоне контактного взаимодействия индентора с материалом:

$$\varepsilon(t) = kV(t), \quad (1)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Используя значения $\varepsilon(t)$, получаем следующие временные зависимости скорости движения индентора $V(t)$, контактного усилия $F(t)$ и перемещения индентора (глубины индентирования) $h(t)$ [7]:

$$V(t) = \varepsilon(t)/k, \quad (2)$$

$$F(t) = -m dV(t)/dt, \quad (3)$$

$$h(t) = \int_{t_0}^{t_k} V(t) dt, \quad (4)$$

где m — масса системы индентирования; t_0 , t_k — моменты времени, соответствующие началу и завершению контакта индентора с материалом.

В результате обработки первичной измерительной информации с помощью приборов ДИ получаем зависимость $F(h)$ (рис. 1) для дальнейшей оценки твердости.

При ударном индентировании (см. рис. 1, этап 1) по мере увеличения контактного усилия выделяются две стадии внедрения (нагружения): упругое и упругопластическое. Упругая стадия

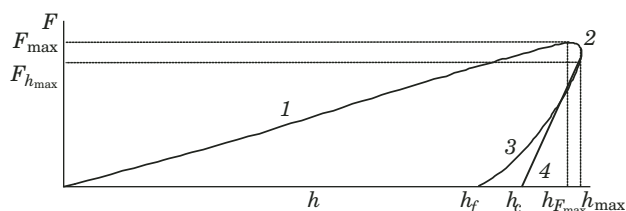


Рис. 1. Зависимость контактного усилия F от глубины внедрения индентора h : 1 – 3 — этапы нагружения, вязкоупругого и упругого разгрузений соответственно; 4 — касательная к кривой упругого разгрузения при максимальной глубине внедрения индентора h_{\max} ; F_{\max} , $h_{F_{\max}}$ — максимальное контактное усилие и глубина внедрения индентора при F_{\max} ; h_{\max} , $F_{h_{\max}}$ — максимальная глубина внедрения индентора и контактное усилие при h_{\max} ; h_f — остаточная глубина отпечатка после индентирования; h_c — точка пересечения с осью h касательной 4

Fig. 1. The dependence of the contact force F on the penetration depth of the indenter: 1, 2, 3 — stages of loading, viscoelastic and elastic unloading, respectively; 4 — tangent to the curve of elastic unloading at the maximum penetration depth of the indenter h_{\max} ; F_{\max} , $h_{F_{\max}}$ — the maximum contact force and indenter penetration depth at F_{\max} ; h_{\max} , $F_{h_{\max}}$ — the maximal penetration depth of the indenter and contact force at h_{\max} ; h_f — residual depth of indentation; h_c — the intersection point of the tangent 4 and axis h

характерна для начала индентирования, когда под индентором не образуется пластической деформации. Однако после достижения внутренними напряжениями предельного упругого состояния происходит ее формирование и далее практически на всем этапе нагружения имеет место упругопластическая деформация. На этапе вязкоупругого разрушения (этап 2), при котором глубина внедрения увеличивается по мере уменьшения контактного усилия, характерен процесс эволюции внутренних полей упругих напряжений, вызванных деформационными дефектами кристаллического строения материала. В дальнейшем после достижения максимальной глубины внедрения индентора (этап 3) наблюдается упругое разрушение (стадия упругой деформации). Упругое восстановление (разгрузка) сопровождается не только уменьшением глубины внедрения индентора, но и увеличением радиуса кривизны поверхности восстановленного отпечатка, который можно определить по формуле

$$R' = R(1 + \alpha_y/2h_f), \quad (5)$$

где α_y — обратимое упругое сближение контактирующих тел; R — радиус кривизны индентора.

Отметим, что выражение (5) получено при допущении, что поверхность контактирующих тел вне зоны контакта не деформируется.

Поскольку отношение максимальной глубины внедрения индентора к остаточной глубине отпечатка после индентирования находится в диапазоне 1 – 1,6 и R' существенно не отличается

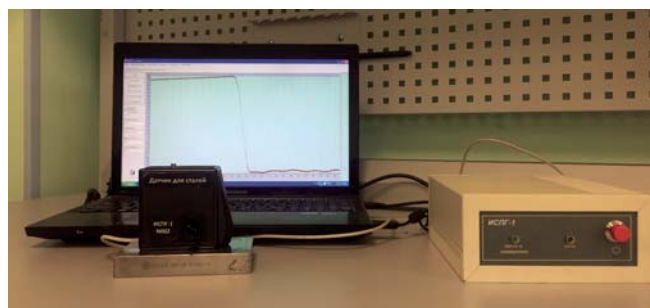


Рис. 2. Прибор для динамического индентирования

Fig. 2. A device for dynamic indentation

ся от R , допустили, что радиусы кривизны восстановленного отпечатка и индентора равны.

Используемый прибор (рис. 2) с преобразователем гравитационного разгона (радиус индентора $R = 0,75 \cdot 10^{-3}$ м, масса системы индентирования $m = 4,8 \cdot 10^{-3}$ кг, начальная скорость системы индентирования $V_0 = 0,9$ м/с) позволял не только измерять параметры контактного взаимодействия индентора с материалом, но и определять значение твердости по Бринеллю.

Испытания проводили на образцах (мерах твердости), имеющих следующие характеристики: образец 1 — 101 HB 10/1000/10, образец 2 — 383 HB 10/3000/10 (согласно ГОСТ 8.062–85).

При ДИ ударное контактное взаимодействие сопровождается преобразованием кинетической энергии системы индентирования в механическую работу упругопластической деформации испытуемого материала. При этом деформационный процесс носит объемный характер, т.е. динамическая твердость при ударе характеризует сопротивление внедрению не только на поверхности, но и в некотором объеме материала.

По результатам индентирования сферическим индентором (ГОСТ Р 56474–2015) поверхностную динамическую твердость оценивали по формулам

$$HD^{(S)} = F_{h_{\max}}/(2\pi R h_f) \quad (6)$$

или

$$HD^{(S)} = \frac{F_{h_{\max}}^2}{2\pi R_m} (V_{\max}^2 - V_{\min}^2), \quad (7)$$

где $F_{h_{\max}}$ — значение контактной силы, соответствующее максимальной глубине вдавливания; R — радиус индентора; h_f — остаточная глубина отпечатка после индентирования; m — масса системы индентирования; V_{\max} и V_{\min} — скорость индентора в начале и конце контактного взаимодействия.

Таблица 1. Результаты испытаний образцов**Table 1.** The results of testing samples

Статистические характеристики	Образец 1					Образец 2				
	V_{\max} , м/с	V_{\min} , м/с	h_f , мкм	$F_{h\max}$, Н	HB	V_{\max} , м/с	V_{\min} , м/с	h_f , мкм	$F_{h\max}$, Н	HB
	0,90	0,27	23,68	136,38	94,16	0,91	0,51	16,14	198,46	372,56
	0,93	0,27	23,79	124,48	90,58	0,89	0,53	17,36	251,63	400,31
	0,89	0,27	24,32	148,83	87,35	0,91	0,53	17,04	227,73	390,24
	0,90	0,27	23,09	129,79	94,97	0,91	0,53	17,10	227,14	386,10
	0,88	0,27	25,66	156,93	93,87	0,91	0,54	16,82	232,98	400,47
	0,91	0,28	23,03	140,98	102,53	0,92	0,50	16,99	218,43	361,40
	0,90	0,27	25,08	148,36	89,85	0,90	0,52	16,96	229,95	379,18
	0,90	0,27	24,18	146,49	88,21	0,90	0,51	16,64	221,38	367,32
	0,87	0,27	23,37	153,06	100,90	0,90	0,52	16,91	226,77	387,17
	0,90	0,27	24,32	129,99	93,67	0,90	0,53	17,33	231,74	390,44
\bar{q}	0,90	0,27	24,05	141,53	93,61	0,91	0,53	16,93	226,62	383,52
$s(q)$	0,02	0	0,85	10,97	5,02	0,01	0,01	0,35	13,30	13,22

С учетом «энергетического» подхода [8 – 10] формула для определения твердости материала имеет вид

$$H(V) = W_{\text{total}}/V_f, \quad (8)$$

где $W_{\text{total}} = mV_{\max}^2/2$ — начальная кинетическая энергия движения индентора; $V_f = \pi h_f^2(R - 1/3h_f)$ — объем восстановленного отпечатка.

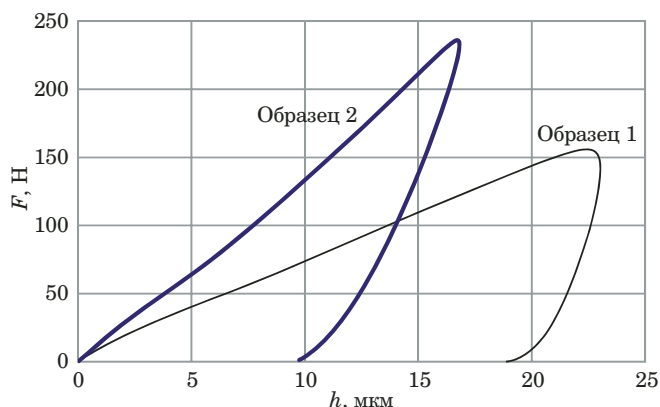
Учитывая (8) объемную динамическую твердость оценивали по формуле

$$HD^{(V)} = W_{\text{plast}}/V_f, \quad (9)$$

где $W_{\text{plast}} = m(V_{\max}^2 - V_{\min}^2)/2$ — механическая работа, затрачиваемая на упругопластическую деформацию материала.

Алгоритм эксперимента включал в себя:

измерения значений параметров контактного взаимодействия индентора с материалом образ-

**Рис. 3.** Зависимость $F(h)$ для образцов 1 и 2**Fig. 3.** Dependence $F(h)$ for samples 1 and 2

цов и твердости по Бринеллю с помощью прибора ДИ;

расчет поверхностной и объемной динамической твердости по формулам (7) и (9);

сравнительный анализ полученных данных.

Обсуждение результатов

Результаты индентирования представлены в табл. 1 (в том числе, рассчитанные с помощью заданных в прибор значений твердости HB). Стандартную неопределенность (среднее значение \bar{q} и выборочное стандартное отклонение $s(q)$) оценивали по ГОСТ Р 54500.3–2011.

Таблица 2. Результаты расчета динамической твердости, МПа**Table 2.** Test results of calculations of the dynamic hardness, МПа

Статистические характеристики	Образец 1		Образец 2	
	$HD^{(S)}$	$HD^{(V)}$	$HD^{(S)}$	$HD^{(V)}$
	1114,70	1044,28	3003,67	4126,62
	872,43	1111,56	3470,99	3642,36
	1325,93	1045,49	4212,98	3874,12
	1011,10	1042,76	4137,75	3924,12
	1513,54	1018,38	4516,37	3782,50
	1181,84	1052,48	3657,18	4105,76
	1320,93	1042,86	4253,01	3912,81
	1267,87	1059,32	3882,85	3972,23
	1527,48	957,91	4195,65	3857,08
	1009,40	1047,70	4412,39	3830,41
\bar{q}	1214,52	1042,47	4174,31	3902,80
$s(q)$	217,42	37,90	631,34	144,19

Зависимости $F(h)$, полученные в результате испытаний, представлены на рис. 3.

Результаты расчета поверхностной и объемной динамической твердости по формулам (7) и (9) приведены в табл. 2.

Видно, что выборочное стандартное отклонение значений объемной динамической твердости существенно ниже аналогичного показателя для поверхностной динамической твердости. Это свидетельствует о том, что данный подход можно использовать для повышения точности определения твердости материалов.

Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что такую характеристику, как объемная динамическая твердость материала, можно с успехом использовать как дополнительный (к традиционным) (ГОСТ Р 56474–2015) показатель. При ее определении с применением «энергетического» метода (в отличие от проекционной (поверхностной) динамической твердости) оценивается отношение работы упругопластической деформации к объему восстановленного отпечатка. Предложенный подход может быть использован для совершенствования (повышения точности) оценки твердости конструкционных металлических материалов с помощью приборов динамического индентирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колмаков А. Г., Терентьев В. Ф., Бакиров М. Б. Методы измерения твердости. — М., 2005. — 149 с.
2. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / J. Mater. Res. 2004. Vol. 19. N 1. P 3 – 21.
3. Головин Ю. И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикроразмерах, тонких приповерхностных слоях и пленках (обзор) / Физика твердого тела. 2008. Т. 50. № 12. С. 2113 – 2142.
4. Баринов А. В. Анализ физико-механических свойств материалов, используемых в изделиях ракетно-космической техники / III Всероссийский конгресс молодых ученых: сб. тр. — СПб.: НИУ ИТМО, 2014. С. 159.
5. Vriend N. M., Kren A. P. Determination of the viscoelastic properties of elastomeric materials by the dynamic indentation method / Polymer Testing. 2004. Vol. 23. N 4. P. 369 – 375.

6. Рудницкий В. А., Крень А. П. Испытание эластомерных материалов методами индентирования. — Минск: Белорусская наука, 2007. — 228 с.
7. Рабцевич А. В., Мацулевич О. В. Новые возможности метода динамического индентирования в приборе «Импульс-2М» / Вестник Гомельского государственного технического университета. 2007. № 2(29). С. 29 – 36.
8. Мощенок В. И. Современная классификация методов определения твердости / Автомобильный транспорт. 2010. Вып. 25. С. 129 – 132.
9. Огар П. М., Тарасов В. А., Турченко А. В., Федоров И. Б. Применение кривых кинетического индентирования сферой для определения механических свойств материалов / Системы, методы, технологии. 2013. Вып. 1(17). С. 41 – 47.
10. Мильман Ю. В., Чугунова С. И., Гончарова И. В. Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования / Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2011. № 4. С. 182 – 187.

REFERENCES

1. Kolmakov A. G., Terentiev V. F., Bakirov M. B. Methods for measuring hardness. — Moscow, 2005. — 149 p. [in Russian].
2. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / J. Mater. Res. 2004. Vol. 19. N 1. P 3 – 21.
3. Golovin U. I. Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicroscopic volumes, thin near-surface layers and films (review) / Fiz. Tv. Tela. 2008. Vol. 50. N 12. P 2113 – 2142 [in Russian].
4. Barinov A. V. Analysis of physical and mechanical properties of materials used in products of rocket and space technology / III All-Russian Congress of Young Scientists: collection of works. — SPb: NIU ITMO, 2014. P. 159 [in Russian].
5. Vriend N. M., Kren A. P. Determination of the viscoelastic properties of elastomeric materials by the dynamic indentation method / Polymer Testing. 2004. Vol. 23. N 4. P. 369 – 375.
6. Rudniskiy V. A., Kren A. P. Testing of elastomeric materials by indentation methods. — Minsk: Belarusskaya nauka, 2007. — 228 p. [in Russian].
7. Rabysevich A. V. New possibilities of the dynamic indentation method in the Impulse-2M device / Vestn. Gorn. Gos. Tekhn. Univ. 2007. N 2(29). P. 29 – 36 [in Russian].
8. Moshenok V. I. Modern classification of methods for determining hardness / Avtomobil. Transport. 2010. Issue 25. P. 129 – 132 [in Russian].
9. Ogar P. M., Tarasov V. A., Turchenko A. V., Fedorov I. B. Application of curves of kinetic indentation by a sphere for determination of mechanical properties of materials / Sist. Met. Tekhnol. 2013. N 1(17). P. 41 – 47 [in Russian].
10. Milman U. V., Chugunova S. I., Goncharova I. V. The plasticity characteristic, determined by the method of indentation / Fiz. Radiats. Povrezhd. Radiats. Materialoved. 2011. N 4. P. 182 – 187 [in Russian].