



## Разработка эталона твердости по Либу второго разряда

Рассмотрены технические принципы метода измерения твердости по шкалам Либя и текущее состояние метрологического обеспечения метода. В связи с разработкой гармонизированного стандарта и необходимостью реализации метрологической цепи согласно структуре обеспечения прослеживаемости, а также определения и распространения шкал твердости рассмотрены и обоснованы методические и технологические решения для реализации стационарного прибора, воспроизводящего метод Либя, для эталона второго разряда. Исходя из проведенного анализа предложена система измерения скорости на основе двух катушек индуктивности и представлен расчёт её параметров. Приведены результаты испытания макета стационарного прибора, воспроизводящего метод Либя, подтвердившие его соответствие требованиям иностранных стандартов и проекту гармонизированного стандарта.

V. A. Syasko<sup>1</sup>, K. V. Gogolinskiy<sup>2</sup>, A. A. Nikazov<sup>3</sup>

### Elaboration of Leeb hardness calibration machine

The article deals with the development of Leeb hardness secondary calibration machine. The article describes the technical principles of the Leeb hardness measurement method and the current state of metrological assurance in the Russian Federation. The analysis of Leeb hardness calibration machines of Germany and Switzerland are conducted. The draft of metrological traceability (metrological chain) for disseminating of Leeb hardness scales is proposed.

In connection with the development of harmonized standard and the need for the implementation of the metrological traceability of Leeb hardness method, as well as the identifying and disseminating of hardness scales, methodological and technological solutions for the Leeb hardness secondary calibration machine are considered. Based on the analysis of required metrological characteristics of secondary calibration machine and hardness reference blocks, the construction of velocity measuring system with two inductors and system parameters calculation with required metrological characteristics are suggested. Test results of Leeb hardness secondary calibration machine layout for HLD scale confirmed its compliance with international standards and the draft of harmonized standard. The obtained results can be used to develop the Leeb hardness secondary calibration machine to equip the standardization and metrology centers of the Russian Federation and abroad.

*Keywords: hardness, dynamic hardness, Leeb, hardness calibration machine*

Применение динамических методов контроля твердости, основанных на измерении параметров отскока падающего ударника, получило широкое распространение в последние десятилетия. Преимущества таких методов — малые габариты твердомеров и возможность их использования вне измерительных лабораторий непосредственно на поверхностях деталей, трубопроводах, объектах энергетики и т.д.

Чаще всего в портативных динамических твердомерах реализуется метод измерения твердости по Либу, раз-

работанный в Европе в 1970-х гг. сотрудниками фирмы Proseco. Суть метода заключается в измерении соотношения скоростей  $V_1$  падающего ударника до и после соударения с поверхностью испытуемого образца, при этом твердость по Либу  $HL$  рассчитывается в соответствии с формулой [1]  $HL = 100V_R/V_A$ , где  $V_R$  — скорость отскока ударника;  $V_A$  — скорость удара.

На сегодняшний день существует несколько различных шкал твердости по Либу для преобразователей, отличающихся радиусом  $R$  сферического инден-

тора и массой  $m$  ударника, а также его кинетической энергией  $E_A$  при ударе, зависящей от  $V_A$ .

Метрологическое обеспечение метода Либя в США и Европе регламентируется стандартами: DIN 50156 (1–3) [2–4], ASTM A956 [5], ISO/DIS 16859 (1–3) [6–8]. До настоящего времени из-за отсутствия стандарта на метод измерения твердости по Либу в Российской Федерации динамические твердомеры вносятся в Госреестр средств измерений под видом твердомеров по стандартизованным шкалам статических

Submitted 12.02.17

Accepted 20.02.17

**СЯСЬКО  
Владимир  
Александрович**



Профессор кафедры «Приборостроение» Национального минерального университета «Горный», Генеральный директор ООО «Константа» (Санкт-Петербург), д. т. н.

Научные интересы: контроль физико-механических характеристик микро- и наноструктурированных материалов

**ГОГОЛИНСКИЙ  
Кирилл Валерьевич**



Директор Всероссийского научно-исследовательского института метрологии имени Д.И. Менделеева (Санкт-Петербург), д. т. н.

**НИКАЗОВ  
Артём Александрович**



Аспирант кафедры «Приборостроение» Национального минерального университета «Горный» (Санкт-Петербург)

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University; CONSTANTA Ltd, St. Petersburg, Russia; 9334343@gmail.com

<sup>2</sup> D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia; info@vniim.ru

<sup>3</sup> Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia; nikazov91@gmail.com

методов. На практике производители твердомеров, обозначаемых как «динамические», «портативные», «малогабаритные» или «переносные», по сути, реализуют с теми или иными допущениями метод измерения твердости по Либу. Ситуация с метрологическим обеспечением динамических методов подробно рассмотрена в [9, 10].

В ООО «КОНСТАНТА» разработан проект гармонизированного стандарта на метод измерения твердости по Либу на основе стандартов [6–8]. На проект стандарта получены положительные отзывы, в том числе из ФГУП ВНИИФТРИ. Стандарт определяет требования к твердомерам, предназначенным для измерения твердости металлов и сплавов по Либу, ударникам, испытуемым образцам, методикам поверки твердомеров, требования к производству и поверке эталонных мер твердости, а также требования к эталонам и средствам измерений.

Для реализации метрологической цепи согласно структуре обеспечения прослеживаемости, а также для определения и распространения шкал твердости Либу (рис. 1) необходима разработка эталона не только первого, но и второго разряда, для многочисленных центров стандартизации и метрологии (ЦСМ).

После принятия стандарта должно произойти достаточно быстрое увеличение парка твердомеров, реализующих метод Либу, а также мер твердости для их поверки. В связи с этим необходимо будет оснастить большое число ЦСМ эталонами второго разряда, которые должны иметь заданные технические характеристики при минимальной цене, определяемой их себестоимостью. Рассмотрим их возможные конструкции.

Проект стандарта определяет комплект (стационарный прибор, воспроизводящий метод Либу, и комплект средств измерений для поэлементного контроля его параметров) и параметры эталона второго разряда:  $V_A$ ,  $m$ ,  $R$  и материал индентора, проверяемые при поэлементной поверке (табл. 1), а также диапазоны твердости и метрологические характеристики при поверке по эталонным мерам твердости 1-го разряда. В ударных преобразователях рабочих средств измерений (твердомерах) ударник разгоняется до необходимой скорости при помощи пружины. В известных эталонных установках ударник разгоняется под воздействием гравитационного поля Земли.

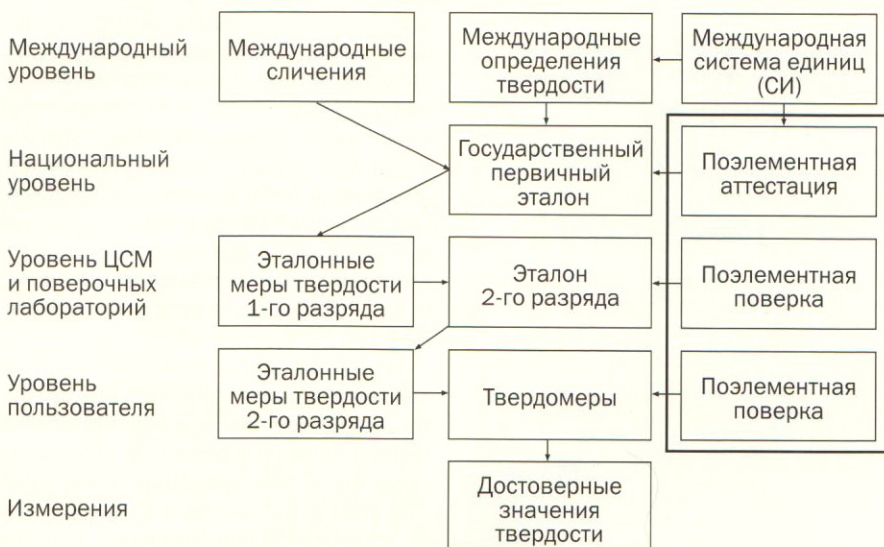


Рис. 1. Обобщенная структура обеспечения прослеживаемости (метрологической цепи) для определения и распространения шкал твердости Либу

Табл. 1. Параметры эталона второго разряда по методу Либу

Параметр	Ед. измерения	Тип ударного преобразователя						
		D	S	E	DL	D+15	C	G
Скорость удара $V_A$	м/с	2,05	2,05	2,05	1,82	1,70	1,40	3,00
Предельно допустимое отклонение скорости удара	м/с	$\pm 0,0025$	$\pm 0,0025$	$\pm 0,0025$	$\pm 0,0020$	$\pm 0,0020$	$\pm 0,0020$	$\pm 0,0050$
Масса ударника $m$	г	5,45 $\pm 0,03$	5,45 $\pm 0,03$	5,45 $\pm 0,03$	7,25 $\pm 0,03$	7,75 $\pm 0,03$	3,10 $\pm 0,03$	20,0 $\pm 0,03$
Радиус сферического наконечника индентора $R$	мм	1,500 $\pm 0,003$	1,500 $\pm 0,003$	1,500 $\pm 0,003$	1,390 $\pm 0,003$	1,500 $\pm 0,003$	1,500 $\pm 0,003$	2,500 $\pm 0,003$
Материал индентора		WC-Co*	C**	PCD***	WC-Co	WC-Co	WC-Co	WC-Co
Твердость индентора по Виккерсу	HV2	1600 $\pm$ 50	1600 $\pm$ 50	$\geq 4500$	1600 $\pm$ 50	1600 $\pm$ 50	1600 $\pm$ 50	1600 $\pm$ 50

\*Вольфрам-карбид кобальта  
\*\*Керамика  
\*\*\*Поликристаллический алмаз

Табл. 2. Диапазоны твердости по Либу и метрологические характеристики эталонов второго разряда при поверке по эталонным мерам твердости первого разряда

Тип ударного преобразователя	Диапазоны твердости, HL*	Минимальная повторяемость, %	Предельная погрешность, %
D, D+15	< 500	1,0	$\pm 2,0$
	500–700	1,0	$\pm 1,5$
	> 700	1,0	$\pm 1,0$
DL, S	< 700	1,0	$\pm 2,0$
	700–850	1,0	$\pm 1,5$
	> 850	1,0	$\pm 1,0$
C, E	< 600	1,0	$\pm 2,0$
	600–750	1,0	$\pm 1,5$
	> 750	1,0	$\pm 1,0$
G	< 450	1,0	$\pm 2,0$
	450–600	1,0	$\pm 1,5$
	> 600	1,0	$\pm 1,0$

\* HLD для ударных преобразователей типа D; HLD+15 для ударных преобразователей типа D+15; HLDL для ударных преобразователей типа DL; HLS для ударных преобразователей типа S; HLC для ударных преобразователей типа C; HLE для ударных преобразователей типа E; HLG для ударных преобразователей типа G.

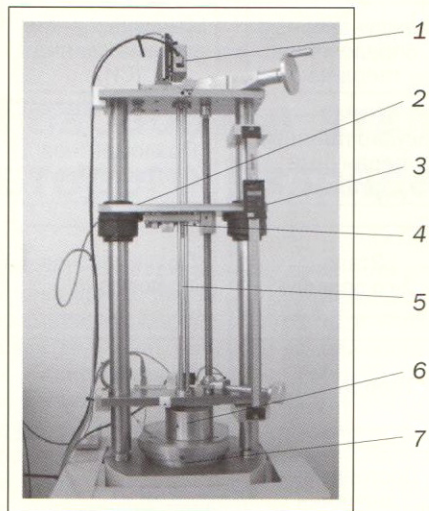


Рис. 2. Структура и техническая реализация эталона на основе интерферометра: 1 — лазерный интерферометр, 2 — система позиционирования высоты сброса ударника, 3 — цифровая линейка, 4 — ударник, 5 — направляющие стержни, 6 — мера твердости, 7 — стол

Известны две реализации эталонных установок, принципиально отличающихся способом измерения скорости ударника: на основе лазерного интерферометра и на основе катушки индуктивности.

Система измерения скорости на основе лазерного интерферометра используется в эталоне, разработанном в Германии (рис. 2). Установка реализует непрерывное измерение скорости движения ударника в процессе падения и отскока. Для измерения используется лазерный интерферометр на базе He-Ne-лазера фирмы SIOS Messtechnik GmbH, который имеет стабилизированную частоту излучения. В данной конструкции форма ударников отличается от применяемых в твердомерах, так как они должны обеспечивать отражение луча интерферометра.

Система измерения скорости с катушкой индуктивности реализована в эталоне, разработанном на базе твердомера Equotip 3 (рис. 3). В системе используется катушка индуктивности и ударник с постоянным магнитом в корпусе, аналогичный рабочим средствам измерения швейцарского производителя. Ударник с встроенным магнитом, пролетая сквозь катушку индуктивности со скоростью  $V_A$  при падении, наводит в ней ЭДС, амплитудой  $E_A$ . При отскоке, двигаясь через катушку вверх со скоростью  $V_R$ , наводит в ней ЭДС амплитудой  $E_R$  противоположной полярности (рис. 4). В рамках работы над стандартом был разработан макет

стационарного прибора, воспроизводящего метод Либа, для эталона второго разряда. Для решения задачи измерения скорости была выбрана система с использованием катушек индуктивности. Согласно стандартам для вычисления кода Либа используется отношение скоростей удара и отскока, однако в рабочих средствах измерений, в соответствии с теми же стандартами, расчёт кода по Либу выполняется по формуле:  $HL = 100 E_R/E_A$ .

На взгляд авторов система с катушкой индуктивности является предпочтительной ввиду того, что она аналогична технологическому решению, используемому в рабочих средствах измерений. При этом для измерения  $V_A$  предлагается установка дополнительной катушки индуктивности.

Система измерения  $V_A$  (рис. 5) состоит из двух катушек L1 и L2, расположенных друг от друга на расстоянии  $\Delta h$ . ЭДС с катушек поступают через измерительные усилители на входы аналого-цифровых преобразователей микроконтроллера, вычисляющего значение скорости.

Расчеты показали, что для ударника типа D  $V_A = 2,05 \pm 0,0025$  м/с обеспечивается при сбросе свободно падающего ударника с высоты  $H = 214 \pm 0,26$  мм.

Скорость ударника должна измеряться при  $h$  не более 2 мм. После прохождения катушки L2 со скоростью  $V$  скорость ударника продолжает линейно увеличиваться до требуемой скорости  $V_A = V + gt$ .

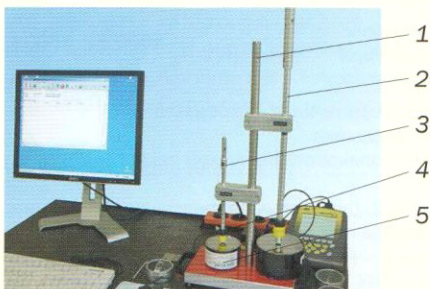


Рис. 3. Эталон на базе твердомера Equotip 3 фирмы Proceq (Швейцария): 1 — несущая стойка, 2 — направляющая трубка для датчика типа D, 3 — направляющая трубка для датчика типа G, 4 — катушка индуктивности, 5 — мера твердости

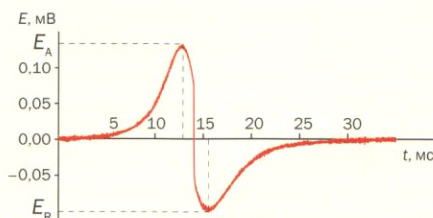


Рис. 4. Диаграмма ЭДС, наведенной на катушке индуктивности при измерении твердости

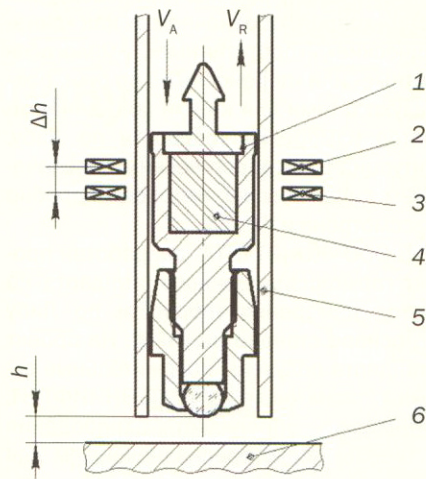


Рис. 5. Структура системы измерения  $V_A$  с двумя катушками индуктивности: 1 — ударник, 2 — дополнительная катушка L1, 3 — основная катушка L2, 4 — постоянный магнит ударника, 5 — направляющая трубка, 6 — испытуемый образец

При этом  $h = t(V_A + V)/2$ .

Время  $t$  прохождения расстояния  $h$  может быть найдено из решения квадратного уравнения:

$$h = t(V_A + V)/2 = t(V_A + V_A - gt)/2 = V_A t - gt^2/2;$$

$$\text{откуда } gt^2 - 2V_A t + 2h = 0$$

$$t = [V_A - (V_A^2 - 2hg)^{1/2}]/g = [2,05 - (2,05^2 - 2 \cdot 0,002 \cdot 9,819)^{1/2}]/9,819 \approx 0,978 \text{ мс.}$$

Для обеспечения требуемых характеристик необходимо контролировать фактическую скорость и высоту  $h$ . Выполнить это можно по фиксации моментов прохождения ударником катушек L1 и L2, соответствующих амплитудам  $E_{A1}$  и  $E_{A2}$  (рис. 4). Фиксация  $t_1$  выполняется по пику ЭДС при прохождении катушки L1, а фиксация  $t_2$  — при прохождении катушки L2 на расстоянии  $\Delta h$  между ними. Параметры определяются из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} h = V_A t_1 + gt_1^2/2; \\ h + \Delta h = V_A t_2 + gt_2^2/2. \end{cases}$$

Расстояние между измерительными катушками  $\Delta h = V_A(t_2 - t_1) + g(t_2^2 - t_1^2)/2$ .

Скорость в момент удара:

$$V_A = [\Delta h - g(t_2^2 - t_1^2)/2]/(t_2 - t_1).$$

С учётом того, что  $\Delta t = t_2 - t_1$ , имеем:  $V_A = (\Delta h/\Delta t) - g(t_1^2 + \Delta t/2)$ .

На точность вычисления скорости влияют погрешности измерения  $\Delta h$  и  $\Delta t$ . Чувствительность к вариации  $\Delta h$ :  $S_{V_A}(\Delta h) = d(V_A)/d(\Delta h) = (1/\Delta t)$ .

При допустимой погрешности задания расстояния между катушками от истинного значения  $\delta_{\Delta h}$  погрешность измерения скорости  $V_A$  составит:  $\Delta V_A = S_{V_A}(\Delta h) \cdot \delta_{\Delta h} = \delta_{\Delta h}/\Delta t$ .

Допустимое отклонение скорости определено стандартом:  $\Delta V_A = \pm 2,5 \text{ мм/с}$ . Тогда предельно допустимая погрешность задания расстояния между катушками:  $\delta_{\Delta h} = \Delta V_A \Delta t$ .

Чувствительность к погрешности измерения времени движения ударника после пика ЭДС:

$$S_{V_A}(t_1) = d |V_A| / d(t_1) = d |[\Delta h / (t_2 - t_1)] - g[t_1 + (t_2 - t_1)/2]| / d(t_1) = \Delta h / \Delta t^2 + g/2;$$

$$S_{V_A}(t_2) = d |V_A| / d(t_2) = d |[\Delta h / (t_2 - t_1)] - g[t_1 + (t_2 - t_1)/2]| / d(t_2) = \Delta h / \Delta t^2 + g/2.$$

Общая чувствительность к погрешности измерения времени с учётом равной вероятности знака погрешности:

$$S_{V_A}(t) = |S_{V_A}(t_1)| + |S_{V_A}(t_2)| = 2\Delta h / \Delta t^2 + g.$$

При допустимой погрешности измерения времени  $\delta_t$  погрешность измерения скорости  $V_A$  составит:

$$\Delta V_A = S_{V_A}(t) \delta_t = (2\Delta h / \Delta t^2 + g) \delta_t.$$

Так как  $\Delta V_A = \pm 2,5 \text{ мм/с}$ , то предельно допустимая погрешность измерения времени  $\delta_t = \Delta V_A / (2\Delta h / \Delta t^2 + g) = \Delta V_A \Delta t^2 / (2\Delta h + g\Delta t^2)$ .

Анализ показывает, что оцифровка ЭДС с выходов катушек должна производиться с частотой  $f_{\text{нб}} = 1 \text{ МГц}$ . При этом определение моментов  $t_1$  и  $t_2$ , соответствующих пикам ЭДС, а также момента удара должны производиться после оцифровки ЭДС с полосой пропускания 100 кГц. Расстояние  $\Delta h = 1 \text{ мм}$  должно быть обеспечено с погрешностью не хуже  $\pm 10 \text{ мкм}$ .

По результатам проведённой работы был разработан макет стационарного прибора, воспроизводящего метод Либа, для эталона твердости второго разряда по шкале D, параметры которого приведены в табл. 3. Катушки индуктивности L1 и L2 имели следующие размеры: внутренний диаметр 12 мм, внешний диаметр 17 мм, длина намотки 0,5 мм.

Табл. 3. Параметры макета эталона твердости по Либу второго разряда (по шкале D)

Параметры	Ед. измерения	Значения
Скорость удара, $V_A$	м/с	$2,05 \pm 0,0025$
Высота сброса ударника	мм	$214 \pm 0,26$
Масса ударника, $m$	г	$5,45 \pm 0,03$
Радиус сферического индентора, $R$	мм	$1,5 \pm 0,003$
Материал индентора		WC-Co
Твердость индентора по Виккерсу	HV2	$1\ 600 \pm 50$
Частота оцифровки ЭДС	МГц	1
Расстояние между катушками, $\Delta h$	мм	$1 \pm 0,01$
Расстояние $h$	мм	<2

Предварительные испытания макета эталона были произведены с использованием комплекта мер твердости HLD491,5, HLD608 и HLD770, изготовленных компанией Proceq и поверенных в Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). При измерениях на мерах  $\Delta V_A < \pm 2,5 \text{ мм/с}$ . Результаты измерений представлены в табл. 4.

Табл. 4. Результаты экспериментов

Шкала твердости	HLD		
Твердость эталонной меры твердости, ед. тв.	491,5	608	770
Показания прибора, ед. тв.	1	484	600
	2	487	599
	3	489	601
	4	488	605
	5	490	605
	6	483	607
	7	484	603
	8	485	604
	9	486	607
	10	487	605
Среднее значение показаний, ед. тв.	487	604	764
Абс. погрешность, ед. тв.	5	4	6
Размах показаний, ед. тв.	5	2	1
СКО	2,3	2,8	3,3
Повторяемость, %	0,5	0,5	0,4
Предельная погрешность, %	0,97	0,72	0,78

Выполненные эксперименты с использованием разработанного макета стационарного прибора, воспроизводящего метод Либа, показали, что предложенные технические решения могут быть положены в основу при разработке эталона твердости по Либу второго разряда для центров стандартизации и метрологии.

#### Литература

1. Leeb D. New dynamic method for hardness testing of metallic materials. — In: VDI-Report № 308, 1978, pp. 123–128.
2. DIN 50156-1:2007/Metallic materials — Leeb hardness test — Part 1: Test Method.
3. DIN 50156-2:2007/Metallic materials — Leeb hardness test — Part 2: Verification and calibration of the testing devices.
4. DIN 50156-3:2007/Metallic materials — Leeb hardness test — Part 3: Calibration of reference blocks.
5. ASTM A956/Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products. 2012.
6. ISO/DIS 16859-1:2015/Metallic materials — Leeb hardness test — Part 1: Test method.
7. ISO/DIS 16859-2:2015/Metallic materials — Leeb hardness test — Part 2: Verification and calibration of the testing devices.
8. ISO/DIS 16859-3:2015/Metallic materials — Leeb hardness test — Part 3: Calibration of reference test blocks.

9. Гоголинский К.В., Сясько В.А. Метрологическое обеспечение динамических методов измерения твердости в Российской Федерации: существующие проблемы и пути их решения. — В мире НК. 2014. № 1 (63). С. 69–76.

10. Потапов А.И., Сясько В.А., Гоголинский К.В., Никазов А.А. Обеспечение единства измерений твердости динамическим методом в Российской Федерации. — Контроль. Диагностика. 2016. № 12. С. 44–50.

Статья получена 12 февраля 2017 г., в окончательной редакции — 20 февраля

