



# Метрологическое обеспечение динамических методов измерения твердости в Российской Федерации: существующие проблемы и пути их решения

Публикуется в порядке обсуждения

K. V. Gogolinsky, V. A. Syasko

## Dynamic Methods of Hardness Measurements. Metrological Assurance in the Russian Federation: Existing Problems and Ways of Solving Them

The article is devoted to existing problems of hardness measurements metrological assurance in the Russian Federation, particularly to hardness measurements by Leeb principle. Classification of hardness measurements methods is considered and the structure of the methods' metrological assurance is presented. The contradiction between existing in Russian Federation practice to acknowledge dynamic hardness gages as measurement instruments with following entering them into the State Register of Measuring Equipment and existing standard system and physical and technical principles of hardness measurement is grounded. The ways of solving that problem are offered.

### Измерения твердости. Общие принципы

Твердость — одна из важнейших механических характеристик материалов. Ее измерения широко распространены в промышленности при контроле технологических процессов, определении эксплуатационных характеристик изделий, выборе режимов механической обработки и типа режущего инструмента.

Одно из наиболее общих определений твердости — «способность материала сопротивляться деформации при вдавливании в него более твердого тела». Твердость — одно из наиболее интуитивно понятных механических свойств твердых тел. Качественное сравнение твердости различных материалов проводилось на протяжении всей истории технического прогресса человечества. Однако проблема количественного измерения твердости окончательно не решена до сих пор. Объясняется это тем, что твердость не является однозначной функцией основных (первичных) физических величин, а зависит от их сочетания, а также методики измерения. Значения твердости, как правило, не имеют размерности, а измеряются в так называемых «числах твердости».

Весь возможный диапазон таких чисел составляет «шкалу твердости». Шкалы твердости — шкалы порядка, которые в соответствии с п. 2.2.2 РМГ 83–2007 [1] характеризуются соотношениями эквивалентности и порядка по возрастанию (убыванию). Шкалы порядка позволяют установить отношение больше/меньше, но не дают возможности определить, на сколько или во сколько раз одно значение отличается от другого. Кроме того, для шкал порядка недопустимо изменение спецификации — описания правил и процедур воспроизведения данной шкалы (п. 2.1.3. [1]).

В соответствии с п. 6.2 РМГ 29–99 [2] твердомер — это средство измерений значений твердости, воспроизводящее и хранящее единицу твердости, размер которой принимают неизменным в течение известного интервала времени. Для того чтобы реализовать шкалу твердости, необходимо использовать твердомер, соответствующий спецификации на эту шкалу (в случае стандартизованной шкалы — стандарту), и выполнять измерение в соответствии с методикой, утвержденной для этой шкалы. Первичные эталоны шкал твердости представляют собой приборы, ре-

### ГОГОЛИНСКИЙ Кирилл Валерьевич

Генеральный директор ООО «НТТ-Константа» (Санкт-Петербург), к. т. н. Область интересов: методы и средства измерения свойств поверхности в микро- и нанометровых масштабах.



### СЯСЬКО Владимир Александрович

Генеральный директор ЗАО «Константа» (Санкт-Петербург), д. т. н. Научные интересы: контроль физико-механических характеристик материалов.



ализующие данную шкалу с наивысшей точностью. Меры твердости служат для определения метрологических характеристик рабочего средства измерения путем сравнения реализуемых им значений твердости с эталоном (передачи единицы в соответствии с п. 12.21 [2]). Изготовленный по стандарту твердомер при выполнении стандартизованной методики автоматически реализует соответствующую шкалу твердости и в общем случае не требует градуировки по мерам соответствующей шкалы.

Такое положение вещей накладывает ряд ограничений на конструкцию и применение твердомеров стандартизованных шкал:

- твердомер и методика измерений, не соответствующие спецификации (стандарту) на шкалу, не могут реализовывать данную шкалу;
- отсутствие размерности чисел твердости исключает возможность кос-

венных измерений в соответствии с п.5.11 [2], т.к. значение твердости не может быть выражено функциональной (математической) зависимостью от других измеряемых величин.

Из этого следует вывод: в общем случае исключена возможность сравнения и сопоставления чисел твердости из разных шкал, а также измерение твердомером одной шкалы значений твердости другой шкалы. Физико-техническое объяснение этого факта приведено в одном из следующих разделов статьи.

Первой известной шкалой твердости была шкала Мооса, предложенная в 1811 г., которая была составлена из 10 минералов от талька до алмаза в порядке способности царапать один другим. Несмотря на примитивность этой шкалы, ею пользуются до сих пор. По мере развития техники предлагались разные методы сравнительной оценки твердости материалов (в основном металлов). Наиболее удачные из них получили широкое распространение и в дальнейшем были стандартизованы:

- Бринелля (1900 г.): по размеру отпечатка шарового наконечника (индентора) при заданной нагрузке;
- Роквелла (1917 г.): по разнице глубины внедрения индентора в виде конуса в результате приложения основной и предварительной нагрузок;
- Виккерса (1925 г.): по отношению приложенной нагрузки к площади поверхности восстановленного отпечатка алмазного индентора в виде четырехгранной пирамиды;
- Шора (метод отскока, 1906 г.): по высоте отскока падающего бойка.

Перечисленные методы являются наиболее универсальными и широко применяемыми из большого количества других, имеющих специфические особенности. Все они были разработаны в начале прошлого века, и с тех пор совершенствуются только реализующие их приборы, при этом суть измерительных методов остается прежней. Развитие промышленных технологий с неизбежностью привело к созданию и распространению новых методов измерения твердости. Одно из таких направлений — развитие портативных твердомеров, позволяющих проводить оперативный контроль сложных изделий (в отличие от «классических» стационарных твердомеров, применяемых, в основном, в лабораторных условиях). К таким приборам относятся, в частности, твердомеры Либа, о которых пойдет речь далее и при использовании которых неизбежно возникает вопрос сопоставления результатов измерений

новыми методами с привычными шкалами твердости. Проблема усугубляется тем, что новые методы и реализующие их приборы зачастую не стандартизованы, а в конструкторской документации указываются значения в привычных законченных шкалах. Как было сказано выше, числа твердости разных шкал по своей сути нельзя связать между собой математическими зависимостями. Один из путей решения проблемы — градуировка приборов на «классических мерах твердости», т.е. экспериментальное определение взаимной корреляции «новых» чисел твердости с «классическими», для тех объектов и материалов, которые необходимо измерять в каждом конкретном случае.

Этот путь имеет следующие недостатки:

- приборы и методы измерений нестандартизованы, разные модели приборов измеряют по-своему;
- достоверные результаты измерений можно получить только на объектах, идентичных образцам, на которых проводилась градуировка. Если нужно контролировать другие объекты, то нужна градуировка по другим мерам из аналогичных материалов;
- данная схема не соответствует никаким стандартам и может применяться только в пределах одной организации «на свой страх и риск».

Другой, более сложный, но и более перспективный путь — стандартизация новых методов как самостоятельных шкал твердости, экспериментальное определение и утверждение таблицы пересчета одних шкал в другие. Достоинства:

- новые твердомеры стандартизованы и воспроизводят утвержденные шкалы твердости;
- результат измерений одинаков для всех моделей твердомеров и всех классов материалов; можно применять в конструкторской документации;
- если необходимо сопоставить значения твердости по новой шкале с привычными шкалами, то существуют стандартизованные таблицы пересчета для самых разных групп металлов и сплавов. Каждый производитель или пользователь может составить собственную таблицу пересчета для своих материалов, при

этом она будет универсальной для всех моделей твердомеров.

### Классификация методов измерения твердости и структура их метрологического обеспечения в РФ

По способу измерения методы измерения твердости делятся на статические, динамические и ультразвуковые (рис. 1). В статических твердомерах время приложения нагрузки на индентор составляет от единиц секунд до минут, а твердость определяется по размерам полученного отпечатка. Динамическими методами твердость определяют по параметрам отскока падающего бойка. Отдельно можно выделить ультразвуковые твердомеры, в которых происходит статическое нагружение колеблющегося на высокой частоте штока с индентором, а твердость определяется по измерению частоты колебаний. Для всех стандартизованных современных методов измерения твердости жестко оговорены геометрические характеристики и материал инденторов, способ внедрения и величины нагрузок, а также алгоритмы расчета значений твердости.

Существующая в настоящее время структура нормативной базы метрологического обеспечения измерений твердости в РФ представлена на рис. 2. В РФ стандартизованы следующие методы измерения твердости: Бринелля [3]; Роквелла: [4, 5]; Виккерса [6–9]; Шора [10]. В 2013 г. принят стандарт на метод инструментального индентирования [11].

Метрологическое обеспечение измерений твердости по различным шкалам в РФ основано на прослеживаемости ее значений от Государственных первичных специальных эталонов твердости (ГПСЭ) до рабочих средств измерений в соответствии с Государственными поверочными схемами (ГПС). ГПСЭ представляют собой единичные экземпляры приборов, реализующих соответствующую

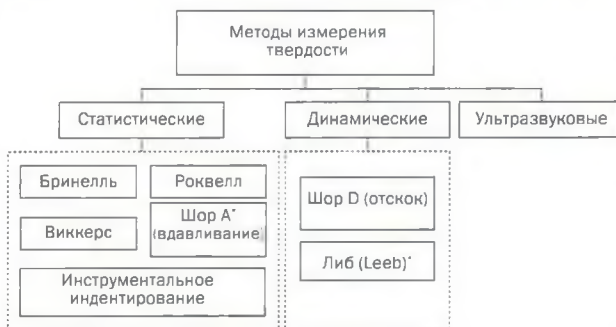


Рис. 1. Наиболее распространенные современные методы измерения твердости: \* — не стандартизованы в РФ

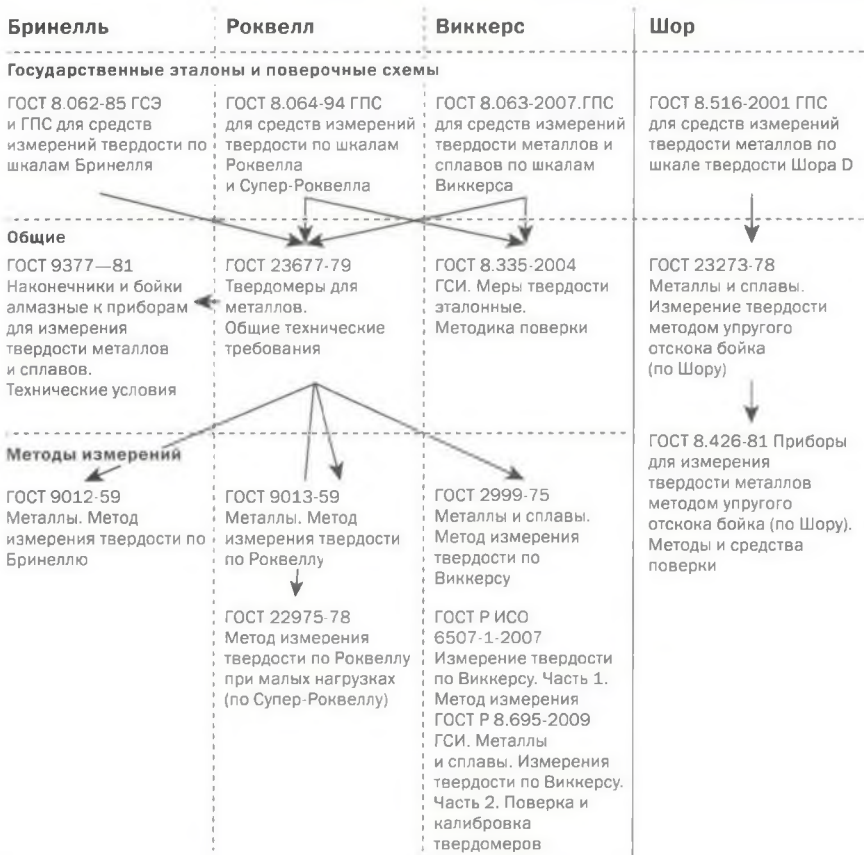


Рис. 2. Структура государственных стандартов в области измерений твердости

щий метод измерения, регламентированный стандартом. Передача размера шкал твердости от ГПСЭ осуществляется с помощью наборов мер, параметры которых и методики поверки также регламентированы стандартами [12, 13].

В нашей стране существуют ГПСЭ и ГПС для следующих методов измерения твердости:

- Бринелля [14], Роквелла и Супер-Роквелла [15], Виккерса [16]; Шора [17];
- ГПСЭ для метода инструментального индентирования входит в состав ГПСЭ по Виккерсу (гэт31-2010).

Также действуют нормативные документы, регламентирующие общие требования к конструкции твердомеров для разных шкал [18], к методам и средствам поверки [19] и к наконечникам (инденторам) [20].

Кроме перечисленных выше методов и шкал твердости, стандартизованных в РФ, существует еще целый ряд методов, применяемых в инженерной практике и стандартизованных в Европе и США. Большое распространение в последние десятилетия приобрели твердомеры, основанные на измерении параметров отскока падающего бойка. Их преимущества — малые габариты

и возможность использования вне измерительных лабораторий непосредственно на поверхностях деталей, трубопроводах, объектах энергетики и т. п. В Госреестр СИ на сегодняшний день внесено более двух десятков твердомеров, обозначенных как «динамические», «портативные», «малогабаритные» или «переносные». В это число не входят «ультразвуковые» твердомеры. Несмотря на довольно большую историю разработки и применения динамических твердомеров, до сих пор не существует единства в терминологии, а также отсутствует унификация их конструкции и рабочих характеристик. В дальнейшем речь пойдет о динамическом методе, основанном на отскоке падающего бойка и известном как метод Либа. С использованием этого метода за рубежом разработано и применяется большое число приборов в самых разных отраслях промышленности.

#### Описание метода Либа

Метод измерения твердости HL Либа был разработан в Европе в 1970-х гг. сотрудниками компании Proceq [21]. Суть метода заключается в измерении соотношения скоростей  $v_1$  падающего бойка до и после соударения с поверх-

ностью исследуемого образца (рис. 3):  $HL = (v_R/v_A) \cdot 1000$ , где  $v_R$  — скорость отскока,  $v_A$  — скорость удара.

На сегодняшний день существует несколько различных шкал твердости по Либу для преобразователей, отличающихся формой наконечника (радиусом  $R$ ) и массой бойка  $M$ , а также его кинетической энергией  $E_A$  при падении. Метод стандартизован в США и Европе: DIN 50156 (1–3) [22–24], ASTM A956 [25], ISO/DIS 16859 (1–3) [26–28]. Приборы, основанные на этом методе, позиционируются как портативные твердомеры для практически всего спектра конструкционных металлов и сплавов: от алюминия до закаленных сталей.

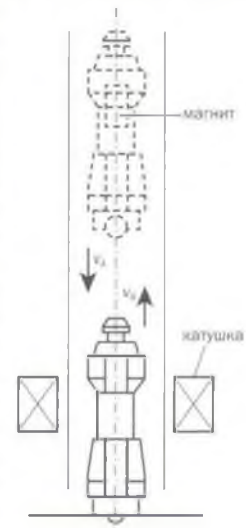


Рис. 3. Схема измерения твердости по Либу

В перечисленных стандартах строго определены технические параметры твердомеров, реализующих метод Либа:

- обозначение шкал: HLx (в зависимости от параметров бойка  $x = D, S, E, DL, D+15, C, G$ );
- нормируемые параметры (в качестве примера, для шкал D, S, E):
  - а) кинетическая энергия удара  $E_A = 11,5$  мДж;
  - б) скорость удара  $v_A = 2,05$  м/с;
  - в) максимальное расстояние наконечника индентора от поверхности образца при измерении скорости 2,00 мм;
  - г) масса бойка  $M = 5,45$  г;
  - д) радиус наконечника  $R = 1,5$  мм;
  - е) параметры образца: масса не менее 5 кг, толщина не менее 25 мм (незакрепленный) и 3 мм (закрепленный).

Числа твердости HL являются первичными при измерениях методом Либа. В стандартах рассматриваются вопросы соответствия значений HLx другим шкалам твердости. В частности, в ISO/DIS 16859-1 п.10 [26] говорится: «Не существует общей процедуры для точного преобразования шкалы твердости Либа в другие шкалы твердости Либа или иные шкалы твердости (не Либа)... Таких преобразований, поэтому, следует избегать, если не получить надежное

обоснование для преобразований с помощью сравнительных тестов».

В настоящее время метрологическое обеспечение измерений твердости по Либу основано на прослеживаемости к первичным эталонам, воспроизводящим основные шкалы данного метода. Такие эталоны имеются, по меньшей мере, в Германии [29] и Китае [30]. Передача шкал твердости рабочим средствам измерений обеспечивается мерами, разработанными специально для метода Либа.

#### Обоснования несоответствия метрологического обеспечения динамических твердомеров Либа в РФ существующей системе ГОСТ и физико-техническим принципам измерения твердости

##### Нормативное обоснование

В настоящее время государственными организациями, входящими в систему Росстандарта, проводятся испытания с целью утверждения типа с последующим внесением в Госреестр СИ динамических твердомеров, воспроизводящих с разной степенью соответствия метод Либа, как рабочих средств измерений по шкалам Бринелля, Роквелла, Виккерса и Шора. Авторы полагают, что подобная практика является ошибочной по изложенным ниже причинам.

Как было сказано, эталонная база и способы обеспечения прослеживаемости метрологических характеристик рабочих средств измерений (поверки) регламентированы группой ГОСТов, посвященных ГПСЭ и ГПС для твердомеров по соответствующим шкалам: Бринелля [14], Роквелла и Супер-Роквелла [15], Виккерса [16], Шора D [17].

Эти стандарты для первых трех поверочных схем в пунктах соответственно 3, 5 и 6 «Рабочие средства измерений» ссылаются на ГОСТ 23677–79 [18], содержащий общие требования для твердомеров, который, в свою очередь, ссылается на группу документов, регламентирующих методы измерений по перечисленным шкалам: «Настоящий стандарт распространяется на стационарные твердомеры Бринелля (типа ТБ), Роквелла (типа ТР), Супер-Роквелла (типа ТРС) и Виккерса (типа ТВ), предназначенные для измерения твердости по методам, установленным в ГОСТ 9012–59, ГОСТ 9013–59, ГОСТ 22975–78 и ГОСТ 2999–75».

В перечисленных стандартах содержатся описания технической реализации методов, устанавливаются требования к диапазонам прикладываемых

нагрузок, формам наконечников (инденторов), приводятся алгоритмы расчетов значений твердости и пр.

Кроме того, ГОСТ 8.063–2007 [16] для шкалы Виккерса в п.3.1 содержит буквальное описание процедуры измерений и формулы для расчета значений твердости HV по методу Виккерса, а в п. 3.2 шкалы твердости металлов по Виккерсу определяются как «Совокупность возможных значений твердости в числах, определяемых методом Виккерса при заданной статической нагрузке, прилагаемой к алмазному наконечнику».

Необходимо отметить, что все перечисленные выше методы являются «статическими», т.е. время приложения нагрузки на индентор может задаваться в диапазоне от нескольких секунд до нескольких минут. Данные методы определяют твердость по размерам образовавшегося отпечатка (восстановленного или невосстановленного).

ГОСТ 8.516–2001 [16] для динамической шкалы твердости по Шору, основанной на измерении высоты отскока падающего бойка, в п. 3.1 прямо определяет твердость HSD как измеренную в соответствии с ГОСТ 23273–78 [9]. Кроме того, для шкалы Шора действует ГОСТ 8.426–81 [31], регламентирующий средства и методы поверки твердомеров по Шору. Таким образом, в рамках существующей системы стандартов на поверочные схемы шкал твердости, поверке по соответствующей шкале твердости может подвергаться прибор, реализующий данную шкалу твердости в соответствии с ГОСТ.

Следовательно, твердомер, который по своей конструкции, методу измерений, форме бойка, алгоритму расчета значений твердости и другим существенным параметрам не соответствует ГОСТ на данную шкалу твердости, не может быть поверен по этой шкале в рамках существующих поверочных схем.

Приборы, реализующие метод Либа, ни по одному из существенных для методов измерения твердости параметров не соответствуют действующим стандартам на методы Бринелля, Роквелла, Виккерса и Шора, и вследствие этого не могут быть внесены в Госреестр СИ и поверяться как твердомеры по этим шкалам.

**Вывод 1.** Чтобы называться средством измерения по конкретной шкале твердости, регламентируемой соответствующим ГОСТ, твердомер должен реализовывать соответствующий этой шкале метод измерения. Динамические твердомеры по Либу не реализуют ни

один из стандартизованных в РФ методов. Следовательно, данные приборы вообще не могут быть признаны средствами измерений в рамках действующей системы стандартов.

##### Физико-техническое обоснование

Одно из наиболее общих определений твердости — «способность материала сопротивляться пластической деформации при вдавлении в него более твердого тела». Для металлов и их сплавов основной механизм пластической деформации — дислокационный, заключающийся в движении дефектов кристаллической решетки. Для чистых металлов характерна высокая подвижность атомов друг относительно друга и, следовательно, высокая пластичность. Однако введение в металлическую решетку различных примесей и легирующих добавок приводит зачастую к кардинальному изменению механических свойств (примеры: железо — сталь, алюминий — дюралюминий, медь — бронза). Меняются при этом не только пластические свойства, но и упругие, а также хрупкость, вязкость и пр. Кроме того, на подвижности дислокаций и, следовательно, пластичности сказывается не только химический состав сплава, но и его кристаллическая структура, которая может меняться в результате механической (наклеп) или термической (закалка, отжиг) обработки. Таким образом, пластичность, а, соответственно, твердость металлов и сплавов зависит от множества факторов.

Твердость материала как измеряемая величина не является однозначно определяемым свойством и зависит не только от его состава и структуры, но и от метода измерения, в частности от таких его параметров, как форма индентора, величина нагрузки (масштабный эффект), скорость нагружения.

##### Влияние формы индентора на измерение твердости

Наиболее полно упруго-пластические свойства твердых тел описываются зависимостью напряжения  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$  (рис. 4.). Как правило, эта зависимость измеряется в приближении одноосного сжатия (растяжения).

При внедрении индентора каждый участок поверхности в области контакта подвергается некоторой деформации  $\epsilon$ , при этом в материале возникает соответствующее напряжение  $\sigma$ . Сила, противодействующая внедрению индентора, есть интеграл всех напряжений по площади отпечатка. Когда индентор достигает своей максимальной глубины

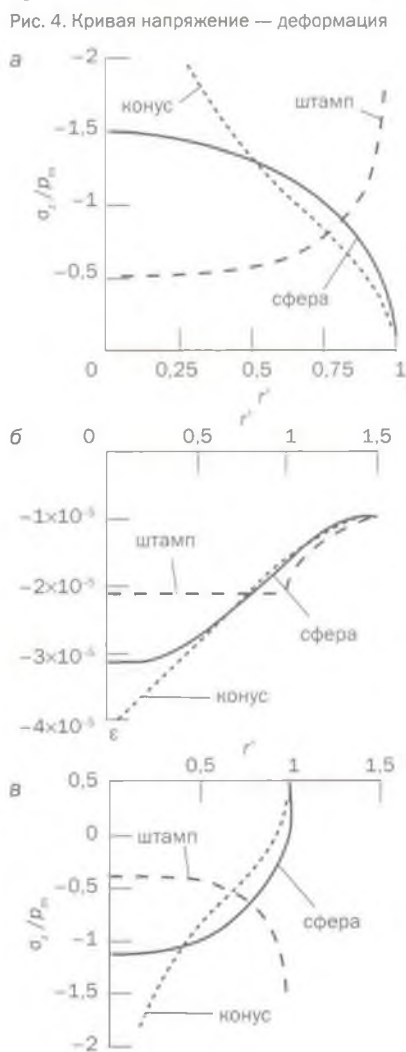


Рис. 5. Аналитические модели распределений контактного давления, деформаций и поверхностных упругих напряжений для сферического индентора, цилиндрического плоского штампа и конических инденторов в зависимости от нормированного расстояния от центра  $r = r/l$ , где  $l$  — радиус площади контакта: а — распределение нормированного контактного давления  $\sigma_z/p_m$ ; б — прогиб поверхности (смещения в мм, рассчитанные для  $p_m = 1$  МПа, радиуса окружности контакта 1 мм и для  $E = 70000$  МПа); в — значения нормированного поверхностного радиального напряжения  $\sigma_r/p_m$  (рассчитаны для коэффициента Пуассона 0,26;  $p_m$  — среднее контактное давление)

ны внедрения и останавливается, сила, приложенная к индентору, равна силе сопротивления материала. Если эту силу поделить на площадь проекции области контакта, то получится величина, имеющая физический смысл среднего контактного давления под индентором, измеряемая в паскалях (или Н/м<sup>2</sup>) [32].

Характер распределения нормированных значений контактного давления, напряжений и деформаций под индентором зависит от его формы (рис. 5) [33]. Поэтому, приложив одинаковую силу к разным инденторам, мы получим отпечатки с разной площадью. Описанный механизм приводит к тому, что шкалы твердости, использующие разные инденторы (Бринелль — шар, Роквелл — конус, Виккерс — пирамида), не имеют линейной корреляции между собой и могут быть точно сопоставлены только для материалов, имеющих одинаковую зависимость  $\sigma(\epsilon)$ . Поэтому таблицы пересчета между шкалами составлены для узких групп металлов и сплавов.

#### Влияние скорости нагружения

Приведенные рассуждения верны для случаев квазистатического нагружения, когда внедрение индентора происходит плавно, и индентор длительное время выдерживается под максимальной нагрузкой. Для всех статических методов время выдержки составляет от единиц до десятков секунд. За это время происходит максимальная релаксация напряженных состояний деформированного материала под индентором, а результат измерения не зависит от скорости движения дислокаций. Вклад упругой деформации под индентором при этом сказывается только на разнице площади т.н. невозстановленного отпечатка (под нагрузкой) и восстановленного отпечатка (после снятия нагрузки).

#### Влияние нагрузки/глубины индентирования

При измерениях твердости на разных глубинах имеет место т.н. «размерный эффект», заключающийся в изменении значений твердости при изменении нагрузки (и, следовательно, — глубины) индентирования даже для максимального однородных материалов. Этот эффект имеет сложную и не до конца изученную природу. Учитывается он тем, что в обозначении числа твердости ставят значенные прикладываемой нагрузки.

**Вывод 2.** Результат измерения твердости зависит от того, каким индентором, при каких нагрузках и в каких условиях проводилось измерение. Поэтому для су-

ществующих шкал твердости все эти параметры строго регламентированы.

#### Особенности динамических методов

Динамические методы измерения твердости имеют ряд особенностей, кардинально отличающих их от статических. Их принцип заключается в том, что падающий боек при ударе о поверхность измеряемого материала упруго отскакивает от нее. При этом часть кинетической энергии бояка теряется при взаимодействии с материалом. Процесс соударения определяется двумя факторами: упругим взаимодействием и рассеянием энергии бояка.

Упругая составляющая соударения зависит от площади образовавшегося отпечатка, т.е. собственно пластичности (твердости) материала, и модуля упругости. Для различных сплавов, которые могут иметь одинаковые значения статической твердости (например, некоторые марки дюралюминия, стали, титана), модуль упругости может отличаться в разы.

Энергетические потери также складываются из нескольких составляющих:

- энергия пластической деформации, пропорциональная объему деформированного материала; зависит собственно от пластических свойств (твердости) материала;
- тепловые потери; связаны с тепловыделением в процессе пластической деформации и поверхностным трением между наконечником и материалом;
- энергия акустических колебаний, возникающих в измеряемом объекте и бойке.

Таким образом, в динамических измерениях собственно пластичность материала, определяющая статическую твердость, только частично влияет на результаты измерений. Следовательно, корреляция между «статической» и «динамической» твердостью имеет в общем случае непредсказуемый характер. Кроме того, как было сказано выше, «динамическая» пластичность может существенно отличаться от квазистатической из-за конечности скорости распространения деформации.

В контексте сказанного корреляция между разными динамическими методами (Шора и Либа) может быть более высокой, однако не стопроцентной, т.к. эти методы имеют следующие отличия:

- начальная энергия (масса бояка и скорость соударения);
- форма индентора, влияющая, как было показано, на распределение механических напряжений под индентором;

• геометрическая форма (резонансные свойства) и масса бойка, определяющая акустические потери.

Вследствие перечисленных различий динамические шкалы Либа и Шора также не являются эквивалентными.

**Вывод 3.** Испытывать и поверять динамический твердомер, реализующий метод Либа, как «средство измерения по Виккерсу, Бринеллю, Роквеллу и Шору» (причем одновременно) недопустимо с точки зрения механики, физики твердого тела и метрологии. В качестве примера как минимум нелогичности такого подхода можно привести тот факт, что не существует статических твердомеров, измеряющих одновременно твердость по нескольким шкалам в рамках одной измерительной процедуры.

#### Пояснения к сложившейся практике

Схема метрологического обеспечения измерений твердости по шкале Либа, действующая в Европе, США и Китае, приведена на рис. 6б. В настоящее время приборы этого типа в качестве первичного информативного параметра измеряют значение твердости по Либу. При выполнении требований стандартов к техническим характеристикам преобразователей твердомеры, реализующие метод Либа, не требуют снятия градуировочной характеристики. Для калибровки (в российской терминологии — поверки) твердомеров по

Либу используются специальные меры твердости, к которым предъявляются другие требования, нежели к мерам для статических методов измерения твердости. Меры твердости по шкалам Либа обеспечивают прослеживаемость измерений к национальным эталонам [29, 30]. Таким образом, шкала Либа стандартизована наравне с классическими шкалами твердости.

Как правило, твердомеры Либа кроме значений твердости по шкале Либа имеют возможность индикации в других, более привычных шкалах твердости. Происходит это путем пересчета по таблицам, загруженным в память. В связи с потребностью в оперативном сопоставлении результатов измерений по Либу с другими шкалами для стандартизованных преобразователей были экспериментально получены таблицы соответствия для наиболее распространенных групп материалов, в частности для различных типов сталей, медных сплавов, бронз, алюминиевых сплавов и т. д. Эти таблицы для взаимного перевода разных шкал твердости друг в друга утверждены в Европе и США. Однако они относятся только к конкретным типам металлов и сплавов и позиционируются как справочные. Например, в стандарте ASTM E140–12b [33] говорится: «1.13 Пересчет значений твердости должен использоваться только при невозможности тестирования ма-

териала соответствующим способом, и делать это следует с осторожностью и при контролируемых условиях. Пересчитанные значения, даже полученные из уравнения, являются ориентировочными и могут быть неточными для конкретных приложений».

Требования и ограничения к использованию таблиц пересчета регламентированы международным стандартом ISO 18265 [35].

Таким образом, представляется перспективной стандартизация и внедрение шкалы Либа с целью использования ее в конструкторской документации в тех случаях, когда наиболее эффективным, а зачастую, единственно возможным средством контроля является дина-

мический твердомер Либа. В этом случае отпадает необходимость применения таблиц пересчета и риск значительной ошибки при измерениях.

В РФ сложилась практика, противоречащая изложенным выше общепринятым подходам. Соответствующая схема приведена на рис. 6а. Динамические твердомеры вносятся в Госреестр СИ под видом твердомеров по стандартизованным шкалам. При этом происходит подмена понятий, т. к. поверка проводится по мерам твердости соответствующих шкал для статических твердомеров. По сути, имеет место градуировка шкалы прибора путем подгонки нужных коэффициентов пересчета таким образом, чтобы его показания соответствовали значениям измеряемых мер. В то же время, если таким прибором провести измерения мер той же шкалы, но из другого материала, то он выдаст неверные значения. В результате прибор дает правильные результаты измерений только на материалах, аналогичных тем, из которых изготовлены меры, на которых он был поверен. При этом в описаниях типа, свидетельствах о поверке и руководствах по эксплуатации таких приборов не удалось найти ограничений их применимости для разных типов материалов. Таким образом, пользователи приборов вводятся в заблуждение относительно возможностей их использования и метрологических характеристик. Данный факт представляется весьма опасным, учитывая количество продаваемых в РФ приборов такого типа и отраслей, в которых они используются.

В качестве примеров использования твердомеров, основанных на методе Либа как средств измерений по другим шкалам твердости, можно привести отраслевые нормативные документы Росатома и РЖД:

1. Инструкция Росэнергоатома: РД ЭО 0027–2005 [36]. В п. 5.3.1 прямо сказано: «Приборы, основанные на методе Лееба, используют для определения твердости по шкале Бринелля, Виккерса или Роквелла».

2. Руководящий документ ОАО РЖД РД 32 ЦВ 050–2005 [37]. В п. 4.1.6.3 дана ссылка на применение динамического твердомера МЕТ-Д1 [38] для измерения твердости по Виккерсу: «Контроль твердости наплавки износостойких поверхностей 240...300 НВ проводить твердомером портативным динамического типа МЕТ-Д1, зарегистрирован в Госреестре средств измерений № 22736–02».

Негативные последствия сложившейся в РФ практики поверки твердомеров

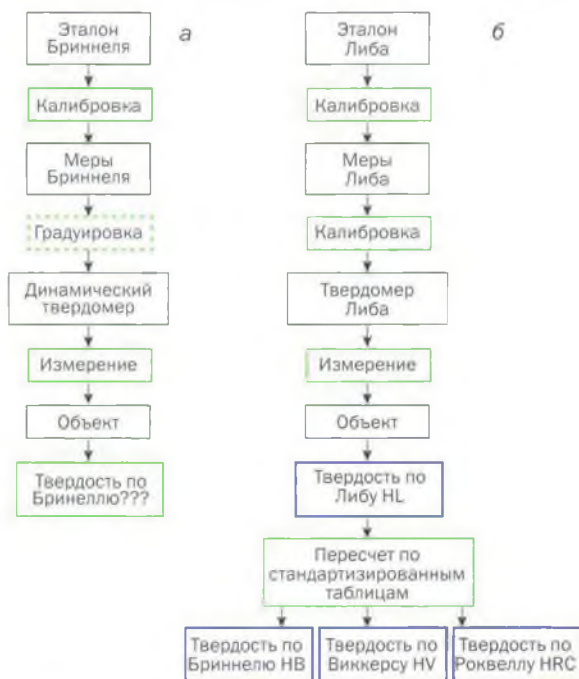


Рис. 6. Схемы обеспечения прослеживаемости измерений динамическими твердомерами: а — в Российской Федерации (шкала Бринелля взята в качестве примера); б — действующая в Европе, США и Китае и предлагаемая к реализации в РФ

ЛИБА по мерам других шкал твердости проявляются также в том, что отечественные «динамические» твердомеры успешно прошедшие поверку в РФ, не могут пройти процедуру калибровки за рубежом, в частности в Европе. Причиной этого является отличие параметров преобразователей и градуировка приборов по статическим мерам твердости. Соответствующий негативный опыт имеется у одного из производителей измерительного оборудования ЗАО «Константа». Такое положение в корне противоречит основным принципам и задачам участия нашей страны в международных метрологических организациях — Международной организации Законодательной Метрологии и Межправительственной Организации Метрической Конвенции, а также несовместимо с членством в ВТО. Указанные требования сформулированы, в частности, в Приказе Минпромторга России № 529 «Об утверждении Стратегии обеспечения единства измерений в России до 2015 года» от 17 июня 2009 г. [39]: «П. 2.8. абзац 2. Основной целью международного сотрудничества в области метрологии является создание глобальной системы измерений, образующей связанную систему, обеспечивающую такие условия, что повсюду в мире измерения могут выполняться на совместимой основе, с требуемой точностью, прозрачностью и на международной признанной основе».

### Выводы (предлагаемые мероприятия)

На основании изложенных фактов авторы считают необходимым предложить к обсуждению следующий путь решения рассматриваемой проблемы.

1. Органам Росстандарта рассмотреть и рекомендовать к утверждению в качестве стандарта РФ аутентичный перевод стандартов ISO 16859 (1-3) [26–28].

2. Запланировать создание Государственного первичного специального эталона твердости по ЛИБУ и Государственной поверочной схемы в соответствии с рис. 6б.

3. Разработать и провести испытания с целью утверждения типа мер по шкале ЛИБА.

Предложенные мероприятия позволят достичь следующих результатов:

1) унифицировать конструкции и рабочие параметры приборов различных производителей, предлагаемых как «портативные динамические твердомеры»;

2) обеспечить поверку твердомеров по шкале ЛИБА; при этом пересчет из-

меренных значений в другие шкалы твердости будет производиться по стандартизованным таблицам, как это практикуется в Европе, США и Китае;

3) исключить опасность возникновения непредсказуемых систематических погрешностей измерений при калибровке динамических твердомеров по мерам других шкал твердости;

4) обеспечить соответствие производимых приборов международным стандартам и тем самым облегчить продвижение на зарубежные рынки продукции российских приборостроительных компаний;

5) ускорить вовлечение российских предприятий в международную кооперацию (в том числе в рамках ВТО).

### Заключение

Научно-технический прогресс, развитие промышленных технологий требует адекватного совершенствования средств измерений. Государственные метрологические организации, всеобщее специальное оборудование и его метрологического обеспечения должно оперативно реагировать на быстро меняющиеся реалии современного мира. Расширение международной кооперации, связанное, в том числе, со вступлением в ВТО, требует обеспечения единства измерений не только на внутригосударственном, но и международном уровне. Развитие нормативной, эталонной и приборной базы современных методов и средств измерений в соответствии с мировыми тенденциями — одна из наиболее важных задач в этом направлении.

### Литература

1. РМГ 83–2007 ГСИ. Шкалы измерений. Термины и определения.
2. РМГ 29–99 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. П. 5.11. Косвенные измерения.
3. ГОСТ 9012–59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. — М.: Изд-во стандартов, 1959.
4. ГОСТ 9013–59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. — М.: Изд-во стандартов, 1959.
5. ГОСТ 22975–78. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (по Супер-Роквеллу). — М.: Изд-во стандартов, 1978.
6. ГОСТ 2999–75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. — М.: Изд-во стандартов, 1975.
7. ГОСТ Р ИСО 6507–1–2007. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения. — М.: Стандартинформ, 2008.
8. ГОСТ Р 8.695–2009 (ИСО 6507–2:2005). Металлы и сплавы. Измерения твердости по Виккерсу. Часть 2. Поверка и калибровка твердомеров. — М.: Стандартинформ, 2011.

9. ГОСТ 9450–76 (СТ СЭВ 1195–78). Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. — М.: Изд-во стандартов, 1976.

10. ГОСТ 23273–78. Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору). — М.: Изд-во стандартов, 1985.

11. ГОСТ Р 8.748–2011 (ИСО 14577–1:2002). Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний. — М.: Стандартинформ, 2011.

12. ГОСТ 9031–75. Меры твердости образцовые. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1975.

13. ГОСТ 8.335–2004. Меры твердости эталонные. Методика поверки. — М.: Стандартинформ, 2006.

14. ГОСТ 8.062–85. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений твердости по шкалам Бринелля. — М.: Изд-во стандартов, 1985.

15. ГОСТ 8.064–94. Государственная поверочная схема для средств измерений твердости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла. — М.: Изд-во стандартов, 1994.

16. ГОСТ 8.063–2007. Государственная поверочная схема для средств измерений твердости металлов и сплавов по шкалам Виккерса. — М.: Стандартинформ, 2007.

17. ГОСТ 8.516–2001. Государственная поверочная схема для средств измерений твердости металлов по шкале твердости Шора D. — М.: Изд-во стандартов, 2002.

18. ГОСТ 23677–79. Твердомеры для металлов. Общие технические требования. — М.: Изд-во стандартов, 1979.

19. ГОСТ 8.398–80. Приборы для измерения твердости металлов и сплавов. Методы и средства поверки. — М.: Изд-во стандартов, 1980.

20. ГОСТ 9377–81. Наконечники и бойки алмазные к приборам для измерения твердости металлов и сплавов. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1987.

21. Leeb D. New dynamic method for hardness testing of metallic materials/VDI-Report № 308, pp.123–128, 1978.

22. DIN 50156–1. Metallic materials — Leeb hardness test — Part 1: Test method. — Deutsches Institut für Normung E.V., 2007.

23. DIN 50156–2. Metallic materials — Leeb hardness test — Part 2: Verification and calibration of the testing devices. — Deutsches Institut für Normung E.V., 2007.

24. DIN 50156–3. Metallic materials — Leeb hardness test — Part 3: Calibration of reference blocks. — Deutsches Institut für Normung E.V., 2007.

25. ASTM A956–12. Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products. — ASTM International, 2012.

26. ISO/DIS 16859–1. Metallic materials — Leeb hardness test — Part 1: Test method.

27. ISO/DIS 16859–2. Metallic materials — Leeb hardness test — Part 2: Verification and calibration of the testing devices.

28. ISO/DIS 16859–3. Metallic materials — Leeb hardness test — Part 3: Calibration of reference test blocks.

29. Herrmann K. Reference measuring instrument for calibration of Leeb-hardness. — Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Scientific news from division 5, review of the Annual Rep., 2007. [http://www.ptb.de/en/org/5/nachrichten5/archiv/2007/nachrichten5\\_2007.htm](http://www.ptb.de/en/org/5/nachrichten5/archiv/2007/nachrichten5_2007.htm)

30. Shi Wei, Zeng Wu, Li Qingzhong. Leeb Hardness Standard with Laser Measuring: In:

XX IMEKO World Congress «Metrology for Green Growth». — Busan, Republic of Korea, September 9–14, 2012.

31. ГОСТ 8.426–81. Приборы для измерения твердости металлов методом упругого отскока бойка (по Шору). Методы и средства поверки. — М.: Изд-во стандартов, 1981.

32. Гоголинский К. В., Решетов В. Н., Усеинов А. С. Об унификации определения твердости и возможности перехода при ее измерении к размерным величинам. — Измерительная техника. 2011. № 7. С. 28.

33. Fischer-Cripps A. C. Introduction to Contact Mechanics. — New York: Springer-Verlag, 2007. — 221 с.

34. ASTM E140-12b1. Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness.

35. ISO 18265:2013. Metallic materials — Conversion of hardness values.

36. РД ЭО 0027–2005. Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости. — М.: ФГУП «Концерн Росэнергоатом», 2005.

37. РД 32 ЦВ 050–2005. Методика выполнения измерений надпрессорной балки, боковых рам, пружин и рессорного комплекта при проведении плановых видов ремонта тележек 18–100. — М.: ОАО «РЖД», 2005.

38. Твердомеры портативные. Паспорт и методика поверки. [http://www.tverdomer.ru/\\_files/passport\\_portable\\_hardness\\_testers\\_met.pdf](http://www.tverdomer.ru/_files/passport_portable_hardness_testers_met.pdf)

39. Приказ Минпромторга России № 529 «Об утверждении Стратегии обеспечения единства измерений в России до 2015 года» от 17 июня 2009 г.

## References

1. RMG 83–2007 GSI. «Shkaly izmereniy. Terminy i opredeleniya» [«Scales of measurements. Terms and definitions»] (in Russ.).

2. RMG 29–99 GSI. «Metrologiya. Osnovnye terminy i opredeleniya. P. 5.11. Kosvennye izmereniya» [«Metrology. Basic terms and definitions. Item 5.11. Indirect measurements»] (in Russ.).

3. GOST 9012–59. «Metally. Metod izmereniya tverdosti po Brinellyu» [«Metals. Brinell hardness test»]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 1959 (in Russ.).

4. GOST 9013–59. «Metally. Metod izmereniya tverdosti po Rokvellu» [«Metals. Rockwell hardness test»]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 1959 (in Russ.).

5. GOST 22975–78. «Metally i splavy. Metod izmereniya tverdosti po Rokvellu pri mal'kikh nagruzkakh (po Super-Rokvellu)» [«Metallic materials. Rockwell hardness test under low loads (using Super-Rockwell test)»]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 1978 (in Russ.).

6. GOST 2999–75. «Metally i splavy. Metod izmereniya tverdosti po Vickersu» [«Metallic materials. Vickers hardness test»]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 1975 (in Russ.).

7. GOST R ISO 6507–1–2007. «Metally i splavy. Izmerenie tverdosti po Vickersu. Chast' 1. Metod izmereniya» [«Metallic materials. Vickers hardness test. Pt. 1: Test method»]. Moscow, Standartinform, 2008 (in Russ.).

8. GOST R 8.695–2009 (ISO 6507–2:2005). Металлы и сплавы. Измерения твердости по Виккерсу. Часть 2. Поверка и калибровка твердомеров [«Metallic materials. Vickers hardness test. Pt. 2: Verification and calibration of testing machines»]. Moscow, Standartinform, 2011 (in Russ.).

9. GOST 9450–76 (ST SEV 1195–78). «Izmerenie mikrotverdosti vdavlivaniemalmaznykh nakonechnikov» [«Measurements microhardness by diamond instruments indentation»]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 1976 (in Russ.).

10. GOST 23273–78. «Metally i splavy. Izmerenie tverdosti metodom uprugogo otkoska boyka (po Shoru)» [«Metals and alloys. Measurements of shore hardness with method of striker recoil»]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 1985 (in Russ.).

11. GOST R 8.748–2011 (ISO 14577–1:2002) «Metally i splavy. Izmerenie tverdosti i drugikh kharakteristik materialov pri instrumentalnom indentirovanii. Chast' 1. Metod ispytaniya» [«Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1. Test method»]. Moscow, Standartinform, 2011 (in Russ.).

12. GOST 9031–75. «Mery tverdosti obraztsovye. Technicheskie usloviya» [«Standardized blocks of hardness. Specifications»]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 1975 (in Russ.).

13. GOST 8.335–2004 «Mery tverdosti etalonnye. Metodika poverki» [«Hardness standard blocks. Method of verification»]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 2006 (in Russ.).

14. GOST 8.062–85. «Gosudarstvennyy spetsialnyy etalon i gosudarstvennaya poverochnaya schema dlya sredstv izmereniy tverdosti po shkalam Brinellya» [«State special standard and state verification schedule for means measuring Brinell hardness»]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 1985 (in Russ.).

15. GOST 8.064–94. «Gosudarstvennaya poverochnaya schema dlya sredstv izmereniy tverdosti po shkalam Rokvella i Super-Rokvella» [«State verification schedule for means measuring hardness on Rockwell and Super-Rockwell scales»]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 1994 (in Russ.).

16. GOST 8.063–2007. «Gosudarstvennaya poverochnaya schema dlya sredstv izmereniy tverdosti po shkalam Vickersa» [«State verification schedule for means measuring metals and alloys hardness on Vickers scales»]. Moscow, Standartinform, 2007 (in Russ.).

17. GOST 8.516–2001. «Gosudarstvennaya poverochnaya schema dlya sredstv izmereniy tverdosti po shkale tverdosti Shora D» [«State verification schedule for means measuring hardness of metals according to Shore D hardness scales»]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 2002 (in Russ.).

18. GOST 23677–79. «Tverdomery dlya metall'ov. Obschie technicheskie trebovaniya» [«Hardness testing machines for metals. General technical requirements»]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 1979 (in Russ.).

19. GOST 8.398–80. «Pribory dlya izmereniya tverdosti metallov i splavov. Metody i sredstva poverki» [«Hardness testing machines for metals and alloys. Methods and means of verification»]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, Moscow, 1980 (in Russ.).

20. GOST 9377–81. «Nakonechniki i boykialmaznye k priboram dlya izmereniya tverdosti metallov i splavov. Technicheskie usloviya» [«Diamond indenters and hammers for metals and alloys hardness testing machines. Specifications»]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 1987 (in Russ.).

21. Leeb D. New dynamic method for hardness testing of metallic materials. VDI-Report no. 308, 1978, pp.123–128.

22. DIN 50156–1. «Metallic materials — Leeb hardness test — Part 1: Test method». — Deutsches Institut fur Normung E.V., 2007.

23. DIN 50156–2. «Metallic materials — Leeb hardness test — Part 2: Verification and calibration of the testing devices». — Deutsches Institut fur Normung E.V., 2007.

24. DIN 50156–3. «Metallic materials — Leeb hardness test — Part 3: Calibration of reference blocks». — Deutsches Institut fur Normung E.V., 2007.

25. ASTM A956–12. «Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products». — ASTM International, 2012.

26. ISO/DIS 16859–1. «Metallic materials — Leeb hardness test — Part 1: Test method».

27. ISO/DIS 16859–2. «Metallic materials — Leeb hardness test — Part 2: Verification and calibration of the testing devices».

28. ISO/DIS 16859–3. «Metallic materials — Leeb hardness test — Part 3: Calibration of reference test blocks».

29. Herrmann K. «Reference measuring instrument for calibration of Leeb-hardness». Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Scientific news from division 5. review of the Annual Report, 2007. [http://www.ptb.de/en/org/5/nachrichten5/archiv/2007/nachrichten5\\_2007.htm](http://www.ptb.de/en/org/5/nachrichten5/archiv/2007/nachrichten5_2007.htm)

30. Shi Wei, Zeng Wu, Li Qingzhong. «Leeb Hardness Standard with Laser Measuring». In: XX IMEKO World Congress «Metrology for Green Growth». — Busan, Republic of Korea, September 9–14, 2012.

31. GOST 8.426–81. «Pribory dlya izmereniya tverdosti metallov metodom uprugogo otkoska boyka (po Shoru). Metody i sredstva poverki» [«Shore rebound hardness testing machines. Methods and means of verification»]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 1981 (in Russ.).

32. Gogolinsky K.V., Reshetov V.N., Useinov A.S. Izmeritel'naya tekhnika [Measurement Technology]. 2011, no.7, pp. 28–34 (in Russ.).

33. Fischer-Cripps A. C. «Introduction to Contact Mechanics». New York, Springer-Verlag, 2007, 221 pp.

34. ASTM E140-12b1. «Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness».

35. ISO 18265:2013. «Metallic materials — Conversion of hardness values».

36. RD EO 0027–2005. «Instruktsiya po opredeleniyu mekhanicheskikh svoystv metalla oborudovaniya atomnykh stantsiy bezobraztsovymi metodami po kharakteristikam tverdosti» [«Mechanical properties estimation direction for nuclear power plant metal by sample less methods of hardness investigation»]. Moscow, FGUP «Rosenergoatom», 2005.

37. RD 32 TSB 050–2005. «Metodika vypolneniya izmereniy nadressornoj balki, bokovykh ram, pruzhin i ressornogo kompleksa pri provedenii planovykh bidov remonta telezhek 18–100» [«Measuring procedure for springs, side frames and others while scheduled repair of 18–100 train car»]. Moscow, ОАО РЖД, 2005 (in Russ.).

38. «Tverdomery portativnye. Pasport i metodika poverki» [«Portable hardness. Certificate and verification procedure»]. [http://www.tverdomer.ru/\\_files/passport\\_portable\\_hardness\\_testers\\_met.pdf](http://www.tverdomer.ru/_files/passport_portable_hardness_testers_met.pdf)

39. Приказ Минпромторга России no. 529 «Об утверждении Стратегии обеспечения единства измерений в России до 2015 года» от 17 июня 2009. [«Russia Industry and Trade Department Executive order no. 529 «Russian police of traceability support till 2015», issued June 14, 2009»].

Статья получена 13 февраля 2014 г.,  
в окончательной редакции — 17 марта