

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ТВЕРДОСТИ ДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



А. И. Потапов,
д-р техн. наук,
Санкт-Петербургский
горный университет,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: apot@mail.ru



В. А. Сясько,
д-р техн. наук,
ООО «Константа»,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: office@constanta.ru



К. В. Гоголинский,
д-р техн. наук,
ВНИИМ им. Д. И. Менделеева,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: k.v.gogolinskiy@vniim.ru



А. А. Никазов,
Санкт-Петербургский
горный университет,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: nikazov91@gmail.com

Рассмотрены проблемы обеспечения единства измерений твердости методом Либа (Leeb) в Российской Федерации (РФ). Представлена классификация методов измерения твердости, обоснована необходимость пересмотра существующей практики градуировки, поверки и применения динамических твердомеров. Рассмотрены технические принципы метода измерения твердости по шкалам Либа, а также исследовано влияние параметров измерительного преобразователя на результаты измерений. Предложена обобщенная структура обеспечения прослеживаемости для определения и распространения шкал твердости Либа как основа поверочной схемы, обеспечивающей достоверное значение твердости при измерениях.

Ключевые слова: твердость, динамическая твердость, Либ, метрологическое обеспечение.

A. I. Potapov (National Mineral Resource University, St. Petersburg, Russia);
V. A. Syasko (LLC Constanta, St. Petersburg, Russia);
K. V. Gogolinskiy (D. I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM),
St. Petersburg, Russia);
A. A. Nikazov (National Mineral Resource University, St. Petersburg,
Russia)

ENSURING UNIFORMITY OF HARDNESS MEASUREMENTS BY THE DYNAMIC METHOD IN THE RUSSIAN FEDERATION

The article deals with problems of metrological assurance of hardness measurements by the method of Leeb in the Russian Federation. Classification of hardness measurement techniques and essence of Leeb hardness measurements are considered. The difference of dynamic hardness measurement methods in metrological assurance in the Russian Federation and in the world practice are clarified. The need to revise the current calibration and verification scheme and dynamic hardness testers application are justified. The influence of the transducer parameters on the measurement results, such as impact velocity, are reviewed. The results of Leeb hardness measurements on Brinell reference test block and Leeb reference test block are compared. Based on the current verification scheme for dynamic hardness testers the generalized structure of the metrological traceability scheme for the determination and dissemination of Leeb hardness scales as a basis of the verification scheme, which provides true quantity value, is proposed.

Keywords: hardness, dynamic hardness, Leeb, metrological assurance.



Статья поступила в редакцию 03.08.2016

Received 03.08.2016

В соответствии с п. 6.2 РМГ 29–2013 [1] твердомер (средство измерений) – это техническое средство, предназначенное для измерений и имеющее нормированные (установленные) метрологические характеристики. Для того чтобы реализовать шкалу твердости, необходимо использовать твердомер, соответствующий спецификации на эту шкалу (в случае стандартизованной шкалы – стан-

дарту), и выполнять измерение в соответствии с утвержденной методикой. При этом первичные эталоны шкал твердости представляют собой приборы, реализующие данную шкалу с наивысшей точностью, а меры твердости служат для определения метрологических характеристик вторичных эталонов и рабочих средств измерения путем сравнения реализуемых ими значений твердости с

первичным эталоном (передачи единицы величины в соответствии с п. 8.6 [1]). Изготовленные в соответствии с требованиями стандарта твердомеры при выполнении стандартизованной методики измерений автоматически реализуют соответствующую шкалу твердости и в общем случае не требуют градуировки по мерам твердости.

Для стандартизованных современных методов измерения твердости (рис. 1) жестко оговорены геометрические характеристики и материал инденторов, способ внедрения и величины нагрузок, а также алгоритмы расчета значений твердости. В РФ стандартизованы следующие методы измерения твердости: Бринелля [2], Роквелла [3, 4], Виккерса [5 – 8], Шора [9]. В 2013 г. принят стандарт на метод инструментального индентирования [10], а в 2016 г. – стандарт на метод динамического индентирования [11].

Кроме перечисленных методов и шкал твердости, стандартизованных в РФ, существуют методы, широко применяемые в инженерной практике и стандартизованные в Европе и США. Большое распространение в последние десятилетия приобрели твердомеры, основанные на измерении параметров отскока падающего ударника. Их преимущества – малые габариты и возможность использования вне измерительных лабораторий непосредственно на поверхностях деталей, трубопроводах, объектах энергетики и т.п. В частности, в Европе в 70-х гг. прошлого века сотрудниками компании Рросец был разработан метод измерения твердости по Либу [12]. Суть метода заключается в измерении соотношения скоростей v_i падающего ударника до и после соударения с поверхностью испытуемого образца (рис. 2). Твердость по Либу HL рассчитывается в соответствии с формулой

$$HL = 1000 \frac{v_R}{v_A},$$

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 индентора и массой m ударника, а также его кинетической энергией E_A при ударе. Метод стандартизован в США и Европе: DIN 50156 (1 – 3) [13 – 15],

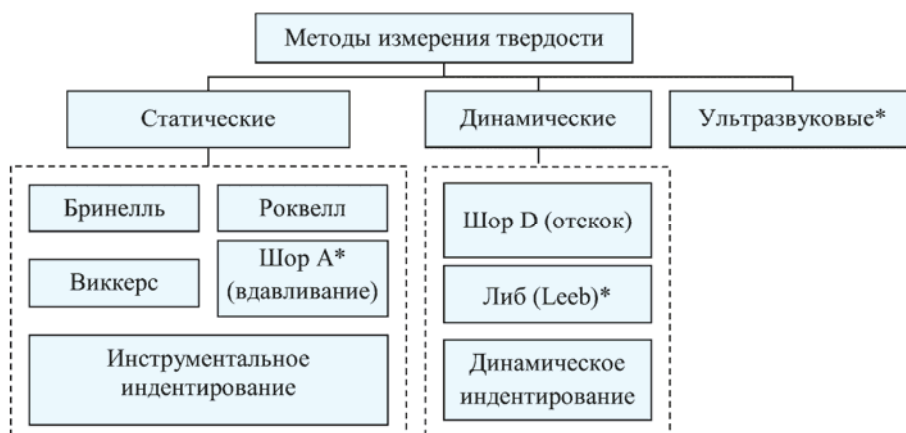


Рис. 1. Наиболее распространенные современные методы измерения твердости

* – не стандартизованы в РФ

ASTM A956 [16], ISO/DIS 16859 (1 – 3) [17 – 19]. Приборы, основанные на этом методе, позиционируются как портативные твердомеры практически для всего спектра конструкционных металлов и сплавов – от алюминия до закаленных сталей.

В перечисленных стандартах определены технические параметры твердомеров, реализующих метода Либа:

- обозначение шкал: HLX (в зависимости от параметров ударника $X = D, S, E, DL, D+15, C, G$);
- нормируемые параметры (в качестве примера, для шкал D, E):
 - а) кинетическая энергия удара $E_A = 11,5$ мДж;
 - б) скорость удара $v_A = 2,05$ м/с;

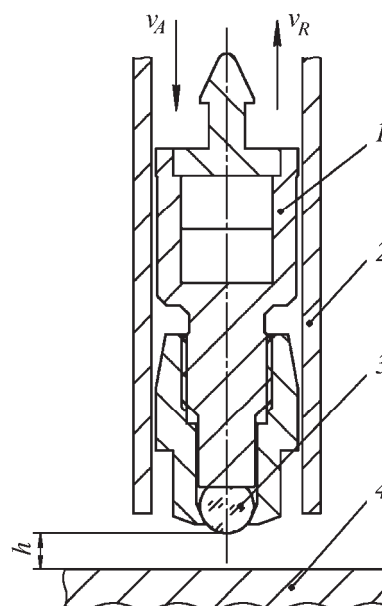


Рис. 2. Схема измерения твердости по Либу:

1 – корпус ударника; 2 – направляющая трубка; 3 – сферический наконечник индентора; 4 – испытуемый образец

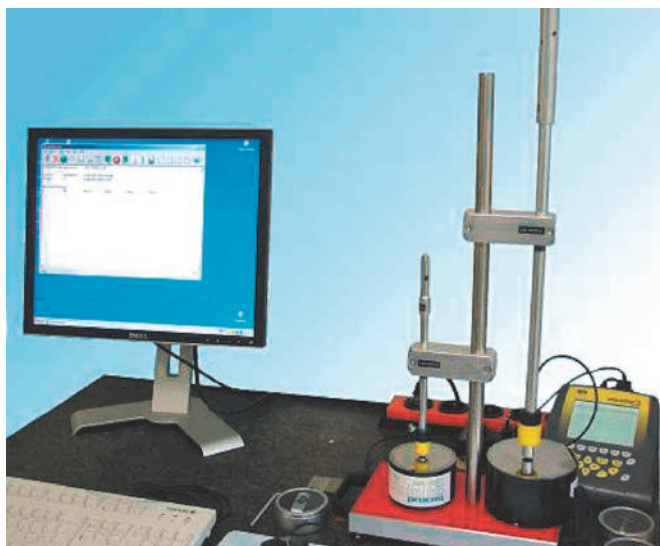


Рис. 3. Первичный эталон шкал твердости Либ в Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Германия

в) максимальное расстояние h от наконечника индентора до поверхности образца при измерении скорости не более 2,00 мм;

г) масса ударника $m = 5,45$ г;

д) радиус наконечника $R = 1,5$ мм;

е) параметры образца: масса не менее 5 кг, толщина не менее 25 мм (незакрепленного) и 3 мм (закрепленного).

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 [20] (рис. 3) и Китае [21]. Передача шкал твердости рабочим средствам измерений обеспечивается мерами твердости, разработанными специально для метода Либ.

В настоящее время в Российской Федерации сложилась практика, противоречащая общепринятым подходам. Динамические твердомеры вносятся в Госреестр средств измерений под видом твердомеров по стандартизованным шкалам статических методов. На сегодняшний день внесено большое число твердомеров, обозначенных как «динамические», «портативные», «малогабаритные» или «переносные», по сути, реализующих с теми или иными допущениями метод измерения твердости по Либу. При этом происходит подмена понятий, имеет место градуировка шкалы прибора путем подгонки нужных коэффициентов пересчета таким образом, чтобы его показания соответствовали значениям измеряемых мер твердости соответствующих шкал для статических твердомеров мер, по которым проводится и поверка. 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 проградуирован и поверен.

Это объясняется тем, что динамические методы измерения твердости имеют ряд особенностей, кардинально отличающих их от статических методов. Их принцип заключается в том, что падающий ударник при взаимодействии с поверхностью испытуемого образца упруго отскакивает от нее. При этом часть кинетической энергии ударника теряется при взаимодействии с материалом. Процесс соударения определяется двумя факторами – упругим взаимодействием и рассеянием энергии ударника. Упругая составляющая соударения зависит от площади образовавшегося отпечатка, т.е. собственно пластичности (твердости) материала, и его 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:

- энергии пластической деформации, пропорциональной объему деформированного материала, которая зависит собственно от пластических свойств (твердости) материала;

- тепловых потерь, которые связаны с тепловыделением в процессе пластической деформации и поверхностным трением между наконечником и материалом;

- энергии акустических колебаний, возникающих в измеряемом объекте и ударнике.

Таким образом, при динамических измерениях 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, «динамическая» пластичность может существенно отличаться от квазистатической из-за конечности скорости распространения деформации.

Также следует отметить, что корреляция между динамическими методами измерения твердости по Шору и Либу может быть более высокой, однако не стопроцентной, так как эти методы имеют отличия по начальной энергии и геометрии ударников, а также по форме инденторов. Вследствие перечисленных различий динамические шкалы Либ и Шора также не являются эквивалентными.

Для иллюстрации изложенного рассмотрим результаты исследований влияния скорости удара на результат измерения HLD с преобразователем типа D, для которого стандарт [16] устанавливает $m = 5,45 \pm 0,05$ г и $v_A = 2,05 \pm 0,1$ м/с. Испытания

проводили на мерах твердости производства фирмы Medet. Использовался преобразователь с одним и тем же ударником, но варьировалась скорость удара. Все измерения проводили в одном пространственном положении преобразователя (вертикальное, удар сверху вниз). Все полученные результаты являются осреднением пяти измерений (табл. 1). Также приведены пересчитанные по таблицам Proceq-1989 соответствующие значения твердости по Виккерсу.

Из табл. 1 видно, что при увеличении v_A и E_A показания уменьшаются, соответственно, при уменьшении v_A и E_A показания увеличиваются.

Также было выполнено сличение результатов измерений и пересчета, выполненных на мерах твердости МТБ 2-го разряда, поверенных в «Тест-С.-Петербург», и мерах твердости HLD производства Proceq, поверенных в Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Германия. Все измерения проводились преобразователем типа D в одном пространственном положении (вертикальное, удар сверху вниз). Пересчет полученных результатов измерений HLD в HB проводился с использованием таблиц Proceq-1989 (табл. 2).

Видно, что отклонение ΔHLD при измерениях на мерах 491,5 HLD, 608 HLD и 770 HLD имеет один знак, однако для полученных пересчетных значений твердости HB_n отклонения имеют знакопеременный характер, что можно объяснить только тем, что меры в комплекте МТБ имеют отличающиеся механические свойства.

Это подтверждает то, что твердомер, который по своей конструкции, методу измерений, форме индентора, алгоритму расчета значений твердости и другим существенным параметрам не соответствует стандарту на данную шкалу твердости, не может быть поверен по этой шкале в рамках существующих поверочных схем. Приборы, реализующие динамические методы измерения твердости (в частности, метод Либа), ни по одному из существенных для методов измерения твердости параметров не соответствуют действующим стандартам на методы измерения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Вик-

1. Результаты измерений преобразователем типа D при разных скоростях удара при массе ударника 5,45 г

v_A , м/с	Твердость меры, HLD (HV)			
	376 (122)	540 (265)	674 (439)	813 (719)
2,33	365 (114)	531 (254)	656 (412)	797 (679)
2,10	366 (116)	539 (263)	667 (427)	805 (698)
2,05	371 (118)	541 (265)	670 (433)	807 (703)
2,00	374 (121)	543 (267)	670 (433)	812 (719)
1,70	380 (125)	553 (278)	686 (458)	820 (840)

2. Сличение результатов измерений и пересчета, выполненных преобразователем типа D на мерах твердости МТБ 2-го разряда и мерах твердости HLD

Параметр	№ измерения	Меры твердости МТБ			Меры твердости HLD		
		Твердость меры HB_m			Твердость меры HLD_m		
		96,6	179	371	491,5	608,0	770,0
Результаты измерений HLD	1	362	437	644	492	612	781
	2	364	430	649	490	618	782
	3	352	440	645	493	619	778
	4	352	429	642	496	613	772
	5	352	441	635	490	618	778
	6	361	446	642	486	615	779
	7	350	442	643	492	617	781
	8	352	435	646	498	614	780
	9	355	439	630	493	609	779
	10	354	438	645	490	621	783
Средний результат измерений HLD_n		355	438	391	492	616	779
Размах показаний HLD		14	17	19	12	12	11
Средний результат измерений (пересчет) HB_n		108	168	380			
Отклонение $\Delta HB = HB_m - HB_n$		+11*	-11**	+9***			
Отклонение $\Delta HLD = HLD_m - HLD_n$					+1	+8	+9

* Соответствует $\Delta HLD \approx +10$.

** Соответствует $\Delta HLD \approx -10$.

*** Соответствует $\Delta HLD \approx +8$.

керсу и Шору и вследствие этого не могут быть внесены в Госреестр средств измерений и поверяться как твердомеры по этим шкалам. Это недопустимо с точки зрения механики, физики твердого тела и метрологии.

Выводы

Негативные последствия сложившейся в РФ практики градуировки и поверки динамических твердомеров по мерам статических шкал твердости проявляются также в том, что отечественные «динамические» твердомеры, успешно прошедшие поверку в РФ, не могут пройти процедуру калибровки и поверки за рубежом, в частности в Европе. Причиной этого является отличие параметров преобразователей от указанных выше и градуировка приборов по статическим мерам твердости, а также за-



Рис. 4. Обобщенная структура обеспечения прослеживаемости (метрологической цепи) для определения и распространения шкал твердости Либа

прет использования мер твердости статических твердомеров (например, по Виккерсу) для калибровки и поверки твердомеров, реализующих динамические и ультразвуковые методы измерения твердости.

Такое положение в корне противоречит основным принципам и задачам участия России в международных метрологических организациях, 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.

На основании изложенных материалов исследований авторы считают необходимым предложить к обсуждению следующий путь решения рассматриваемой проблемы:

1) органам Росстандарта инициировать разработку национального стандарта «Металлы и сплавы. Измерение твердости по Либу. Метод измерения, поверка и калибровка твердомеров и мер твердости» на основании международных стандартов ISO 16859 (1 – 3);

2) запланировать создание Государственного первичного специального эталона твердости по Либу и Государственной поверочной схемы на основании представленной на рис. 4 обобщенной структуры обеспечения прослеживаемости (метрологи-

ческой цепи) для определения и распространения шкал твердости по Либу;

3) разработать и провести испытания в целях утверждения типа мер твердости по шкалам Либа.

Предложенные мероприятия позволят достичь следующих результатов:

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

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

3) обеспечить поверку твердомеров по шкалам Либа. При этом пересчет результатов измерений в другие шкалы

твердости будет проводиться по стандартизованным таблицам, как это практикуется в Европе, США и Китае;

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).

Библиографический список

1. РМГ 29–2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения; введен 01.01.2015.
2. ГОСТ 9012–59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. С изм. М.: Стандартинформ, 2006.
3. ГОСТ 9013–59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. С изм. М.: Изд-во стандартов, 2001.
4. ГОСТ 22975–78. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (по Супер-Роквеллу). С изм. М.: Изд-во стандартов, 1992.
5. ГОСТ 2999–75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. С изм. М.: Изд-во стандартов, 1987.
6. ГОСТ Р ИСО 6507-1–2007. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения. М.: Стандартинформ, 2008.

7. **ГОСТ Р 8.695–2009 ГСИ.** Металлы и сплавы. Измерения твердости по Виккерсу. Часть 2. Поверка и калибровка твердомеров. М.: Стандартинформ, 2011.

8. **ГОСТ 9450–76 (СТ СЭВ 1195–78).** Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. С изм. М.: Изд-во стандартов, 1993.

9. **ГОСТ 23273–78.** Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору). С изм. М.: Изд-во стандартов, 1988.

10. **ГОСТ Р 8.748–2011 (ИСО 14577-1:2002) ГСИ.** Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний. М.: Стандартинформ, 2013.

11. **ГОСТ Р 56474–2015.** Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2015.

12. **Leeb D.** New Dynamic Method for Hardness Testing of Metallic Materials // VDI-Report № 308. 1978. P. 123 – 128.

13. **DIN 50156-1.** Metallic Materials. Leeb Hardness Test. Part 1. Test Method. 2007.

14. **DIN 50156-2.** Metallic Materials. Leeb Hardness test. Part 2. Verification and Calibration of the Testing Devices. 2007.

15. **DIN 50156-3.** Metallic Materials. Leeb Hardness test. Part 3. Calibration of Reference Blocks. 2007.

16. **ASTM A956.** Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products. 1997.

17. **ISO/DIS 16859-1.** Metallic Materials. Leeb Hardness Test. Part 1. Test Method. 2016.

18. **ISO/DIS 16859-2.** Metallic Materials. Leeb Hardness Test. Part 2. Verification and Calibration of the Testing devices. 2016.

19. **ISO/DIS 16859-3.** Metallic Materials. Leeb Hardness Test. Part 3. Calibration of Reference Test Blocks. 2016.

20. **Herrmann K.** Reference Measuring Instrument for Calibration of Leeb-Hardness // Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Scientific News from Division 5, Review of the Annual Report, 2007. URL: http://www.ptb.de/en/org/5/nachrichten5/archiv/2007/nachrichten5_2007.htm

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

References

1. Metrology. Basic terms and definitions. (2015). *State system for ensuring the uniformity of measurements No. RMG 29-2013 GSI.* [in Russian language]

2. Metals. Method for measuring hardness in Brinell scale. (2006). *Ru Standard No. GOST 9012-59.* Moscow: Standartinform. [in Russian language]

3. Metals. Method for measuring hardness in Rockwell scale. (2001). *Ru Standard No. GOST 9013-59.* Moscow: Izdatel'stvo standartov. [in Russian language]

4. Metals and alloys. The method of measuring the hardness in Rockwell scale at low loads (Super-Rockwell). *Ru Standard No. GOST 22975–78.* Moscow: Izdatel'stvo standartov. [in Russian language]

5. Metals and alloys. The method of measuring the hardness in Vickers scale. (1987). *Ru Standard No. GOST 2999–75.* Moscow: Izdatel'stvo standartov. [in Russian language]

6. Metals and alloys. The method of measuring the hardness in Vickers scale. Part 1. Measuring method. (2008). *Ru Standard No. GOST R ISO 6507-1–2007.* Moscow: Standartinform. [in Russian language]

7. Metals and alloys. The method of measuring the hardness in Vickers scale. Part 2. Verification and calibration of hardness testers. (2011). *Ru Standard No. GOST R 8.695–2009 GSI.* Moscow: Standartinform. [in Russian language]

8. Measurement of microhardness by indentation of diamond tips. (1993). *Ru Standard No. GOST 9450-76 (ST SEV 1195-78).* Moscow: Izdatel'stvo standartov. [in Russian language]

9. Metals and alloys. Measurement of hardness by the elastic rebound of the striker (Shore hardness). (1988). *Ru Standard No. GOST 23273–78.* Moscow: Izdatel'stvo standartov. [in Russian language]

10. Metals and alloys. Measurement of hardness and other properties of materials at the tool indentation. Part 1. Test method. (2013). *Ru Standard No. GOST R 8.748–2011 (ISO 14577-1:2002) GSI.* Moscow: Standartinform. [in Russian language]

11. Space systems. Non-destructive testing of physical and mechanical properties of materials and coatings for space technology by dynamic indentation. General requirements. (2015). *Ru Standard No. GOST R 56474–2015.* Moscow: Standartinform. [in Russian language]

12. Leeb D. (1978). New dynamic method for hardness testing of metallic materials. *VDI-Report № 308*, pp. 123-128.

13. Metallic materials. Leeb hardness test. Part 1. Test method. (2007). *Standard No. DIN 50156-1.*

14. Metallic materials. Leeb hardness test. Part 2. Verification and calibration of the testing devices. (2007). *Standard No. DIN 50156-2.*

15. Metallic materials. Leeb hardness test. Part 3. Calibration of reference blocks. (2007). *Standard No. DIN 50156-3.*

16. Standard test method for Leeb hardness testing of steel products. (1997). *Standard No. ASTM A956.*

17. Metallic materials. Leeb hardness test. Part 1. Test method. (2016). *Standard No. ISO/DIS 16859-1.*

18. Metallic materials. Leeb hardness test. Part 2. Verification and calibration of the testing devices. (2016). *Standard No. ISO/DIS 16859-2.*

19. Metallic materials. Leeb hardness test. Part 3. Calibration of reference test blocks. (2016). *Standard No. ISO/DIS 16859-3.*

20. Herrmann K. (2007). *Reference measuring instrument for calibration of Leeb-hardness.* Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Scientific News from Division 5, Review of the Annual Report. Available at: http://www.ptb.de/en/org/5/nachrichten5/archiv/2007/nachrichten5_2007.htm

21. Shi Wei, Zeng Wu, Li Qingzhong. (2012). *Leeb hardness standard with laser measuring.* XX IMEKO World Congress «Metrology for Green Growth», Busan, Republic of Korea, September 9-14, 2012.