

УДК 620.178.152.22.089.5-021.477(476) + 620.178.152.341.089.5-021.477(476)

Е. П. Галат,
Е. А. Обозный

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ НАИЛУЧШИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ БЕЛГИМ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПО ШКАЛАМ ТВЕРДОСТИ БРИНЕЛЛЯ И ВИККЕРСА

Калибровочные и измерительные возможности лабораторий метрологических институтов могут быть оценены и подтверждены только по результатам взаимных сличений национальных первичных эталонов. В ходе проведения сличений выявляют факторы, влияющие на величину неопределенности полученных результатов. Участники имеют возможность проанализировать составляющие неопределенности и принять меры по снижению их влияния на суммарную неопределенность. Наилучшие измерительные возможности, подтвержденные в результате сличений, вносятся в базу Международного бюро мер и весов и позволяют осуществлять калибровку средств измерений, результаты которой признаются в рамках CIPM MRA (соглашения между национальными метрологическими институтами, которое служит технической основой для обеспечения взаимного признания национальных измерительных эталонов и для признания действительности сертификатов о калибровке и измерениях, выданных национальными метрологическими институтами). В статье приведены результаты сличений национальных первичных эталонов твердости по шкалам Бринелля и Виккерса метрологических институтов стран — членов КООМЕТ (Евро-Азиатского сотрудничества государственных метрологических учреждений). Сличения были выполнены в рамках деятельности ТК 1.6 (Технического комитета «Масса и связанные величины»), шифр темы — 341/RU/05. По результатам сличений определены рекомендуемые значения расширенной неопределенности, которые участники сличений могут внести в базу данных Международного бюро мер и весов (МБМВ).

The calibration and measurement capabilities of the laboratories of metrological institutes can only be assessed and confirmed based on the results of mutual comparisons of national primary standards. In the course of comparisons, the factors influencing the magnitude of the uncertainty of the results obtained are revealed. Participants have the opportunity to analyze the components of uncertainty and take measures to reduce their impact on the total uncertainty. Best Measurement Capabilities, confirmed because of comparisons, can be entered into the database of the International Bureau of Weights and Measures, and allow calibration of measuring instruments, the results of which are recognized within the framework of the CIPM MRA (an agreement between National Metrology Institutes that serves as the technical basis for ensuring the mutual recognition of national measurement standards and for recognizing the validity of calibration and measurement certificates issued by National Metrology Institutes). Comparisons carried out within the framework of the activities of TC 1.6 (Technical Committee on Mass and Related Quantities), code 341/RU/05. Based on the results of the comparisons, the recommended values of the expanded uncertainty were determined, which the participants of the comparisons can enter into the database of the International Bureau of Weights and Measures (BIPM).

Введение

В различных отраслях промышленности применяют материалы, работающие не только в нормальных, но и в экстремальных условиях. Поэтому очень важно знать механические свойства этих материалов с целью прогнозирования прочности, надежности и долговечности изделий и конструкций, произведенных из них. Для этого разработаны и стандартизованы различные методы оценок механических свойств материалов. Наиболее распространенными являются испытания на растяжение и сжатие, но у этих испытаний есть ряд недостат-

ков, самый существенный из которых — необходимость изготовления образцов определенной формы и размера, что повышает стоимость испытаний, и второй — чаще всего невозможность проведения испытаний готовых изделий. В этом смысле испытания на твердость являются прекрасной альтернативой, поскольку могут выполняться и на отдельных образцах, и на готовых изделиях, а учитывая, что это еще и неразрушающий метод контроля, детали после испытаний могут быть использованы по прямому назначению. Применение компактных переносных твердомеров позволяет

проводить испытания не только в лабораторных условиях, но и в местах эксплуатации машин и механизмов. По результатам измерения твердости можно, воспользовавшись эмпирическими зависимостями, оценить основные механические характеристики металла, такие как предел текучести или прочности.

Следует также отметить, что твердость не является физической величиной.

В РМГ 29-2013 ГСИ «Метрология. Основные термины и определения» твердость определена как порядковая величина, зависящая от методов воспроизведения [1–3], и как таковая может входить только в эмпирические соотношения, и не имеет ни единиц измерения, ни размерности величины. Поэтому те источники, которые приводят значения твердости, к примеру, по Бринеллю в МПа, совершают грубейшую ошибку. Средства измерения твердости в соответствии с общепринятой мировой практикой прослеживаются до национальных первичных эталонов [4]. А корреляция национальных первичных эталонов осуществляется путем оценивания расширенной неопределенности измерений при проведении ключевых (предпочтительно) или дополнительных международных сличений. Именно с этой целью Всероссийским научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП «ВНИИФТРИ») была предложена тема ключевых региональных сличений по шкалам твердости Бринелля и Виккерса 341/RU/05, которую поддерживали национальные институты Беларуси (БелГИМ), Казахстана (РГП «КазИнМетр») и Украины (ННЦ «Институт Метрологии»). Пилотом сличений выступило ФГУП «ВНИИФТРИ», которое принимало участие в ключевых международных сличениях по шкалам твердости Бринелля и Виккерса по линии Международного бюро мер и весов (МБМВ), и, таким образом, участники региональных ключевых сличений могли оценить степени эквивалентности своих первичных эталонов. На заседании рабочей группы WGH\BIPM (Теддингтон, 2015 г.) было принято решение изменить статус основных сличений CCM.H-K2 на пилотную стадию и провести повторные измерения. Эти сличения позволили ФГУП «ВНИИФТРИ» быть связующим институтом в сличениях COOMET.M.H-K2 или COOMET 341/RU/05.

В ключевых региональных сличениях национальных эталонов твердости по шкалам Виккерса принимали участие национальные метрологические институты: Федеральное государственное унитарное предприятие «ВНИИФТРИ», Россия; Белорусский государственный институт метрологии (БелГИМ), Беларусь; Федеральный физико-технический институт (РТВ), Германия; Национальный научный центр «Институт метрологии» (ННЦ «Институт Метрологии»), Украина; Республиканское

государственное предприятие Казахстанский институт стандартизации и метрологии (РГП «КазИнМетр»), Казахстан. В дополнительных региональных сличениях национальных эталонов по шкалам твердости Бринелля принимали участие только ФГУП «ВНИИФТРИ», БелГИМ, ННЦ «Институт Метрологии», РГП «КазИнМетр».

Цель сличений – определить калибровочные возможности национальных эталонов твердости по шкалам Виккерса и Бринелля стран, участвующих в этих мероприятиях.

Цель работы – описать способы оценки расширенных неопределенностей измерений национальных первичных эталонов твердости по шкалам Бринелля и Виккерса в рамках сотрудничества ведущих метрологических институтов стран, входящих в КООМЕТ.

Проведение сличений

Процедура сличений заключалась в измерении национальными метрологическими институтами твердости эталонов сравнения (мер твердости) Виккерса и Бринелля и последующей оценке среднего значения результатов измерений и неопределенности полученных результатов. Числа твердости передавали от национальных эталонов рабочим эталонам посредством эталонных мер твердости. Первым измерения проводил институт-пилот сличений, затем меры твердости передавали другим участникам.

На мерах твердости были выделены поля, предназначенные для однократного измерения твердости участниками сличений. Каждому институту предназначалось пять полей для измерений по одной шкале твердости. После выполнения измерений последним участником меры твердости были возвращены в институт-пилот и проведены повторные измерения для оценки дрейфа твердости меры.

Каждый институт оценивал расширенную неопределенность измерений твердости по шкалам Виккерса и Бринелля на первичных эталонах [7, 8]. БелГИМ, исходя из потребностей промышленности на момент проведения сличений (2006 г.), принимал участие для уровней твердости по шкалам Бринелля 100 HBW 10/1 000/10, 200 HBW 10/3 000/10 и 400 HBW 10/3 000/10 и по шкалам Виккерса HV 5 и HV 30 на уровнях твердости 450 и 750. Остальные участники проводили сличения по шкалам Бринелля HBW 10/1 000/10, HBW 10/3 000/10, HBW 5/250/10, HBW 5/750/10 для уровней твердости HBW 100; HBW 200; HBW 400 и по шкалам Виккерса HV 1, HV 5, HV 30 для уровней твердости 450; 750.

По результатам измерений твердости по шкалам Виккерса определяли степени эквивалентности участников сличений по отношению к результатам ключевых международных сличений националь-

Таблица 1

**Результаты сличений национальных эталонов по шкалам Виккерса
для уровней твердости HV 450 и HV 750**

Шкалы	Параметр	ФГУП «ВНИИФТРИ»	РТВ	РГП «КазИнМетр»	БелГИМ	ННЦ «Инсти- тут Метро- логии»
HV 450						
HV 5	$\frac{U}{H_{cp}}$	4,2 479,3	7,0 477,7	5,9 476,4	4,8 478,9	2,6 484,4
HV 30	$\frac{U}{H_{cp}}$	3,9 475,1	4,3 476,1	4,1 479,8	5,3 472,0	2,2 476,8
HV 750						
HV 5	$\frac{U}{H_{cp}}$	7,8 732,1	13,5 736,0	10,9 729,4	7,9 718,7	4,6 718,7
HV 30	$\frac{U}{H_{cp}}$	7,2 720,5	8,0 728,0	7,7 732,9	8,1 717,1	4,0 728

Таблица 2

**Степени эквивалентности и их неопределенности по отношению к результатам
ключевых сличений по линии МБМВ для уровней твердости HV 450 и HV 750**

Шкалы	Параметр	ФГУП «ВНИИФТРИ»	РГП «КазИнМетр»	БелГИМ	ННЦ «Институт Метрологии»
HV 450					
HV 30	$\frac{U_d}{d}$	5,0 -3,6	5,0 1,0	5,2 -6,9	4,8 -1,9
HV 750					
HV 30	$\frac{U_d}{d}$	11,3 -0,5	11,3 11,9	11,4 -3,9	11,0 7,0

ных первичных эталонов по шкалам Виккерса по линии МБМВ [9]. Степени эквивалентности определяли по формуле:

$$d_i = H_i + \Delta - H_{ref} \quad (2)$$

где d_i – степень эквивалентности i -го метрологического института;

H_i – результаты измерений твердости в ключевых региональных сличениях;

Δ – аддитивная поправка, определяемая как разность значений, полученных связующим институтом в ключевых сличениях МБМВ и региональных сличениях;

H_{ref} – опорное значение ключевых сличений МБМВ.

Критерием корреляции оцененных неопределенностей измерений твердости по шкалам Виккерса в национальных метрологических институтах с результатами ключевых сличений по линии МБМВ служило выражение:

$$|d_i| < 2U_{di} \quad (3)$$

где U_{di} – неопределенность степени эквивалентности.

Если степень эквивалентности меньше удвоенной неопределенности измерений степени эквивалентности, то оценки расширенных неопределенностей измерений национальных эталонов твердости стран – участниц региональных сличений согласуются с результатами международных ключевых

Таблица 3

Результаты сличений национальных эталонов по шкалам Бринелля для уровней твердости HBW 100, HBW 200, HBW 400

Шкалы	Параметр	Опорное значение	ФГУП «ВНИИФТРИ»	РГП «КазИнМетр»	БелГИМ	ННЦ «Институт Метрологии»
HBW 100						
HBW 10/1 000/15	U H_{cp}	0,3 100,0	0,7 100,1	0,5 100,1	0,7 99,4	0,7 100,5
HBW 200						
HBW 10/3 000/15	U H_{cp}	0,6 218,4	1,6 217,8	0,7 218	1,9 219,2	1,6 220,2
HBW 400						
HBW 10/3 000/15	U H_{cp}	1,2 428,3	3,1 426,8	1,7 428,2	3,5 426,3	2,5 430,5

Таблица 4

Оценка минимальной расширенной неопределенности измерений твердости по шкалам Бринелля для СМС-строк

Шкалы	Параметр	Опорное значение	ФГУП «ВНИИФТРИ»	РГП «КазИнМетр»	БелГИМ	ННЦ «Институт Метрологии»
HBW 100						
HBW 10/1 000/15	$U_{смс}$ χ^2 χ^{2n-1} E_n	100,0	0,7 5,16 7,81 0,1	0,5 5,16 7,81 0,16	0,7 5,16 7,81 1,02	0,7 5,16 7,81 0,74
HBW 200						
HBW 10/3 000/15	$U_{смс}$ χ^2 χ^{2n-1} E_n	218,4	1,6 7,62 7,81 0,37	0,7 7,62 7,81 0,88	1,9 7,62 7,81 0,46	1,9 7,62 7,81 1,23
HBW 400						
HBW 10/3 000/15	$U_{смс}$ χ^2 χ^{2n-1} E_n	428,3	3,1 5,35 7,81 0,52	1,7 5,35 7,81 0,08	3,5 5,35 7,81 0,61	2,5 5,35 7,81 1,005

сличений и могут считаться калибровочными возможностями метрологических институтов.

Для дополнительных региональных сличений национальных эталонов по шкалам Бринелля пред-

усмотрена процедура оценки расширенных неопределенностей измерений [10] для создания записей о калибровочных возможностях институтов – участников сличений в информационной базе МБМВ.

Результаты сличений

Средние значения твердости H_{cp} и расширенные неопределенности измерений U_{cp} по шкалам Виккерса, полученные метрологическими институтами, представлены в табл. 1.

Степени эквивалентности и их неопределенности приведены в табл. 2, откуда следует, что критерий (3) выполняется и информация о калибровочных возможностях метрологических институтов по шкалам Виккерса может быть внесена в базу данных МБМВ.

Результаты дополнительных региональных сличений национальных эталонов по шкалам Бринелля представлены в табл. 3.

В табл. 4 рассчитаны минимальные расширенные неопределенности $U_{смс}$ измерений для внесения в качестве калибровочных и измерительных возможностей (calibration and measurement capabilities – СМС) в базу данных МБМВ на основании критериев корреляции χ , χ^{2n-1} , рассчитанных в соответствии с [10]. Результаты измерений для каждого национального метрологического института являются согласованными, так как выполняется условие $\chi < \chi^{2n-1}$.

Полученные участниками сличений результаты согласуются между собой. На основании проведенных измерений и оценок расширенных неопределенностей измерений БелГИМ опубликовал измерительные возможности в базе данных МБМВ. Национальные метрологические институты Казахстана и Украины в базе данных МБМВ опубликовали измерительные возможности по шкалам Виккерса. Калибровочные возможности этих институтов по шкалам Бринелля находятся в стадии публикации. ФГУП «ВНИИФТРИ» также подтвердило калибровочные возможности по шкалам Бринелля и Виккерса [11]. Приобретен опыт оценки неопределенности при измерении твердости как с использованием твердомеров-компараторов, так и национальных эталонов.

Список использованной литературы

1. Дойников, А. С. Современное состояние понятийно-терминологической системы метрологии / А. С. Дойников // Альманах современной метрологии. – 2016. – № 3. – С. 9–25.
2. Метрологическое обеспечение измерений твердости / Э. Г. Асланян [и др.] // Измерительная техника. – 2005. – № 1. – С. 45–50.
3. Дойников, А. С. Лекции по метрологии / А. С. Дойников. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018. – 292 с.
4. Traceability in hardness measurements: from the definition to industry [Electronic resource] /

A. Germak, K. Herrmann, S. Low // Metrologia. – 2010. – Vol. 47, № 2. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/47/2/S07>.

5. Germak, A. Analysis and estimation of possible large systematic error in Brinell hardness measurements / A. Germak, C. Origlia // Recent Advancement of Theory and Practice in Hardness Measurement: Proceedings of Hardmeko 2007, Tsukuba, 19–21 November 2007. – Tsukuba, 2007. – P. 76–80.

6. Hattori, K. Practical points of Brinell indentation diameter measurement using optical microscope / K. Hattori // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1065, № 6.

7. Aslanyan, A. RMO Brinell supplementary comparison COOMET M.H.-S4 [Electronic resource] / A. Aslanyan [et. al.] // Metrologia. – 2020. – Vol. 57, № 1A. – P. 07003. – Mode of access: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/57/1A/07003/meta>.

8. Aslanyan, E. Final report on RMO Vickers key comparison COOMET M.H.-K1 [Electronic resource] / E. Aslanyan [et al.] // Metrologia. – 2013. – Vol. 50, № 1A. – P. 07015. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/50/1A/07015>.

9. Herrmann, K. Final report on CCM Vickers hardness key comparison [Electronic resource] / K. Herrmann // Metrologia. – 2006. – Vol. 43, № 1A. – P. 07010. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/1A/07010>.

10. Руководство по оцениванию данных дополнительных сличений КООМЕТ [Электронный ресурс]: Рекомендация КООМЕТ: R/GM/19:2016, утв. на 26-м заседании комитета КООМЕТ 19–20 апреля 2016 г. – Режим доступа: http://www.coomet.org/DB/isapi/cmt_docs/2016/5/2LWQGO.pdf. – Дата доступа: 10.06.2021.

11. Асланян, А. Э. Региональные сличения национальных первичных эталонов твердости по шкалам Виккерса и Бринелля [Электронный ресурс] / А. Э. Асланян // Измерительная техника. – 2021. – № 8. – С. 21–24. – Режим доступа: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-21-24>.

Евгений Павлович ГАЛАТ,

кандидат технических наук,
ведущий инженер по метрологии
производственно-исследовательского отдела
измерений механических величин БелГИМ;
Евгений Александрович ОБОЗНЫЙ,
заместитель начальника
производственно-исследовательского отдела
измерений механических величин БелГИМ

Дата поступления 02.03.2022