

Государственный первичный эталон твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла ГЭТ 30–2018

Э. Г. АСЛАНЯН, А. Э. АСЛАНЯН, С. М. ГАВРИЛКИН, А. С. ДОЙНИКОВ, П. В. СОРОКИНА, А. Н. ЩИПУНОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., e-mail: aslanyan@vniiftri.ru

Приведены результаты исследований по усовершенствованию Государственного первичного эталона твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла ГЭТ 30–94. Представлены модернизированные узлы эталона, улучшены его метрологические характеристики, рассчитан бюджет неопределённости измерений при воспроизведении чисел твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла. В процессе усовершенствования эталона внедрено 15 шкал твёрдости, ранее не используемых в России. Утверждён Государственный первичный эталон твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла ГЭТ 30–2018, который соответствует лучшим мировым аналогам.

Ключевые слова: твёрдость, числа твёрдости Роквелла и Супер-Роквелла, государственный первичный эталон, бюджет неопределённости, государственная поверочная схема.

The article presents the results of studies on the improvement of the national primary standard machine on Rockwell and Superficial Rockwell scales GET 30–94. The modernized nodes of the standard machine were considered, its metrological characteristics were studied, the budget of measurement uncertainty at the reproduction of hardness numbers on Rockwell and Superficial Rockwell scales was calculated. During the improvement of the standard machine, 15 new hardness scales (not previously used in Russia) were introduced. The approved national primary standard machine on Rockwell and Superficial Rockwell scales GET 30–2018 corresponds to the best world analogues.

Key words: hardness, Rockwell and Superficial Rockwell hardness numbers, national primary standard machine, budget of uncertainty, national hierarchy scheme.

Твёрдость – в общем случае свойство твёрдого тела сопротивляться внедрению в него других твёрдых тел. Числа твёрдости, измеренные разными методами и в разных условиях, представляют собой различные величины [1]. Твёрдость является не физической величиной, характеризующей материал, а порядковой величиной, зависящей не только от материала, но и от методов её воспроизведения [2].

Самое широкое распространение в промышленности получили методы измерения твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла, в которых твёрдость определяется по глубине внедрения алмазного конусного наконечника или стального (твёрдосплавного) шарикового наконечника в образец под действием предварительной и основной нагрузок. Глубину внедрения измеряют под действием предварительной нагрузки в начале и в конце измерительного цикла. Эти методы были предложены в 1914 г. двумя изобретателями Стэнли и Хью Роквеллами. Методы получили распространение в результате простой конструкции твердомеров, высокой производительности измерений и низкой чувствительности приборов к качеству поверхности измеряемого образца и окружающим условиям.

В 1975 г. был создан Государственный специальный эталон твёрдости металлов по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла ГЭТ 30–75, в котором глубину внедрения наконечника измеряли с помощью спирального микроскопа с номинальной ценой деления 0,3 мкм [3]. В 1994 г. этот эталон был усовершенствован: спиральный микроскоп заменили на измерительный комплекс, позволивший управ-

лять процессом измерений с помощью персонального компьютера. Глубина внедрения наконечника на ГЭТ 30–94 в автоматическом режиме измерялась растровым цифровым длиномером ЦД1-MBTU [4]. С усовершенствования ГЭТ 30–75 были начаты работы по автоматизации процесса измерений на государственных эталонах твёрдости с целью исключения субъективной погрешности оператора, удобства работы с эталоном и увеличения производительности измерений [5].

В России методы Роквелла и Супер-Роквелла регламентированы стандартами [6, 7]. Поверочная схема для средств измерений твёрдости описана в стандарте [8]. В 2016 г. вышел новый международный стандарт [9], уточняющий процедуру воспроизведения чисел твёрдости по указанным шкалам. Так как числа твёрдости являются порядковыми величинами [10], то изменение метода их воспроизведения в принципе влечёт некоторые изменения значений этих чисел. С появлением на российском рынке большого числа зарубежных приборов, реализующих уточнённые методы Роквелла и Супер-Роквелла, возникла необходимость в совершенствовании ГЭТ 30–94 для дальнейшего обеспечения единства измерений твёрдости.

В 2017 г. было закончено усовершенствование ГЭТ 30–94 с целью улучшения его метрологических и технических характеристик в результате замены растровой измерительной системы на лазерный интерферометр и модернизации ряда узлов эталона, позволивших свести к минимуму трение при перемещении наконечника.

Таблица 1

Параметры измерительного цикла для методов Роквелла и Супер-Роквелла

Параметр измерительного цикла	Значение параметра в соответствии с требованиями	
	прежними	новыми
Время приложения, с предварительной нагрузки основной нагрузки	2–8 2–8	<2 1–8
Время выдержки, с предварительной нагрузки основной нагрузки	– 1–6	1–4 2–6
Время между снятием основной нагрузки и измерением остаточной глубины внедрения наконечника, с	–	1–5
Скорость внедрения наконечника за интервал времени, соответствующий достижению прикладываемой нагрузки от $0,8F$ до $0,99F$, мкм/с	–	20–40

При усовершенствовании ГЭТ 30–94 были поставлены следующие задачи:

обеспечить процесс воспроизведения чисел твёрдости в соответствии с требованиями уточнённого метода Роквелла;

уменьшить неисключённую систематическую погрешность (НСП) и среднее квадратическое отклонение (СКО) воспроизведения чисел твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла:

обеспечить возможность измерений по новым шкалам твёрдости.

В соответствии с [9] изменения в методах воспроизведения чисел твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла касаются параметров измерительного цикла. В табл. 1 показано сравнение прежних и новых требований к воспроизведению чисел твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла, где F – основная нагрузка.

Изменения воспроизводимых чисел твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла из-за уточнения параметров измерительного цикла составило не более 0,2 HR, что заметно

Таблица 2

Границы НСП и СКО предварительной и основной нагрузок на
ГЭТ 30–2018

Нагрузка	Значение нагрузки, Н	НСП, Н	СКО, Н
Предварительная	29,42	±0,03	0,005
	98,07	±0,08	0,005
Основная	1471	± 1,1	0,03
	980,7	± 0,9	0,02
	588,4	± 0,5	0,02
	441,3	± 0,3	0,05
	294,2	± 0,2	0,02
	147,1	± 0,1	0,003

для национальных первичных эталонов, но мало по сравнению с погрешностями средств измерений.

В конструкции ГЭТ 30–94 изначально была использована гидравлическая система приложения и снятия нагрузки. Недостатком этой системы являлось изменение скорости внедрения наконечника при изменении температуры масла в системе во время работы на эталоне. Также для передвижения шпинделя с наконечником использовали шариковые подшипники, что приводило к появлению силы трения качения в механической системе и, как следствие, уменьшению прикладываемой нагрузки к наконечнику. В качестве устройства измерения перемещения наконечника применяли растровый цифровой дальномер ЦД1-МВТУ, датчик которого располагался над шпинделем таким образом, чтобы его контактное усилие

компенсировало силу трения качения в подшипниках.

Для соответствия значений всех параметров измерительного цикла требуемым допускам гидравлический двигатель поменяли на электродвигатель. Таким образом, скорость внедрения наконечника и время приложения, снятия и выдержки нагрузок можно контролировать количеством оборотов вала двигателя. Для улучшения метрологических характеристик ГЭТ 30–94 вся его механическая часть заменена на установку PHS DW (исследования аналогичной установки были проведены в работе [11]), а устройство для измерения глубины внедрения наконечника (растровый цифровой длиномер ЦД1-MBTU) – на лазерный интерферометр. В усовершенствованном эталоне, утвержденном как Государственный первичный эталон твердости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла ГЭТ 30–2018, шпиндель с наконечником перемещается в воздушном подшипнике, что делает силу трения пренебрежимо малой. ГЭТ 30–2018 находится на развязанном фундаменте, в результате чего исключено влияние вибраций на воспроизведение чисел твердости. Эталонное помещение оснащено системой контроля климата. Поддержание постоянной температуры ($23,0 \pm 0,2$) °C и относительной влажности (52 ± 2) % уменьшает нестабильность измерения перемещения наконечника лазерным интерферометром.

Уравнение измерения чисел твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла описывается формулой

$$HR = C_1 - (h_2 - h_1)/C_2, \quad (1)$$

где по определению шкал C_1 – константа, $C_1=100$ для шкал Роквелла и Супер-Роквелла с конусным наконечником и шкал Супер-Роквелла с шариковым наконечником, $C_1=130$ для шкал Роквелла с шариковым наконечником; C_2 – константа, $C_2=2$ мкм для шкал Роквелла и $C_2=1$ мкм для шкал Супер-Роквелла; h_1 – глубина внедрения наконечника, измеряемая в микрометрах, под действием предварительной нагрузки;

h_2 – глубина внедрения наконечника, измеряемая в микрометрах, после снятия основной нагрузки и под действием предварительной нагрузки.

В ГЭТ 30–2018 обеспечена прослеживаемость всех величин, влияющих на воспроизведение чисел твёрдости, к государственным первичным эталонам единицы силы – ньютона, единицы длины – метра, единицы времени – секунды.

Погрешность воспроизведения чисел твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла зависит от отклонения от номинальных значений следующих величин: предварительных и основных нагрузок; перемещений наконечника; геометрических параметров наконечников; заданных временных и скоростных параметров измерительного цикла. Для нахождения вклада влияющих факторов в воспроизведение чисел твёрдости необходимо определить коэффициенты чувствительности. Исходя из формулы (1) коэффициенты чувствительности к перемещению наконечника составляют 0,5 и 1 для шкал Роквелла и Супер-Роквелла, соответственно. Коэффициенты чувствительности остальных величин определяли экспериментальным путём. Суть экспериментов заключалась в изменении только одной из влияющих величин и определении последующих изменений значений воспроизводимых чисел твёрдости. Отношение изменений значений числа твёрдости и влияющей величины является коэффициентом чувствительности.

Прослеживаемость прикладываемых нагрузок к Государственному первичному эталону единицы силы ГЭТ 32–2011 осуществлялась с помощью рабочих эталонов (РЭ) единицы силы 2-го разряда по [12]. В табл. 2 представлены систематические и случайные погрешности приложенных предварительных и основных нагрузок на ГЭТ 30–2018.

Прослеживаемость измерения перемещения наконечника и геометрических параметров наконечника к Государственному первичному эталону единицы длины – метру ГЭТ 2–2010 осуществлялась РЭ 1-го разряда в соответствии с [13]. Границы НСП измерения перемещения наконечника составляют $\pm 0,05$ мкм, СКО – не более 0,01 мкм.

Прослеживаемость временных параметров измерительного цикла к Государственному первичному эталону единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1–2018 осуществлялась с помощью электронного секундомера. Границы НСП задания временных параметров измерительного цикла составляют не более $\pm 0,3$ с.

Угол между образующими алмазного наконечника Роквелла и радиуса закругления вершины наконечника измеря-

Т а б л и ц а 3
Составляющие НСП и СКО воспроизведения чисел твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла

Составляющая	НСП		СКО	
	Шкалы Роквелла, HR	Шкалы Супер-Роквелла, ($\pm$) HR	Шкалы Роквелла, HR	Шкалы Супер-Роквелла, ($\pm$) HR
Приложенная нагрузка:				
основная	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	0,002	0,02
предварительная	$\pm 0,06$	$\pm 0,04$	0,004	0,01
Перемещение наконечника	$\pm 0,025$	$\pm 0,05$	0,005	0,01
Характеристики наконечника:				
угол	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	0,008	0,025
радиус закругления	$\pm 0,07$	$\pm 0,03$	0,02	0,01
Параметры измерительного цикла	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	–	–

ли с применением установки Gal-Indent, входящей в состав ГЭТ 30–2018. Метрологические характеристики установки исследовали методом косвенных измерений с помощью РЭ 1-го разряда [13]. Границы НСП измерений угла наконечника и радиуса закругления составили $\pm 0,03^\circ$ и $\pm 1,3$ мкм, соответственно.

В результате проведённых исследований систематических и случайных составляющих погрешностей воспроизведения чисел твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла получены значения НСП и СКО, обусловленные влияющими величинами. В табл. 3 показаны составляющие НСП и СКО воспроизведения чисел твёрдости.

Т а б л и ц а 4
Шкалы и диапазоны чисел твёрдости, реализуемые ГЭТ 30-94 и ГЭТ 30-2018

Шкалы твёрдости	ГЭТ 30–94	ГЭТ 30–2018
HRA	70–93	20–95
HRBW (HRB)	(25–100)	10–100 (10–100)
HRC	20–67	20–70
HRD	–	40–77
HREW (HRE)	–	70–100 (70–100)
HRFW (HRF)	–	60–100 (60–100)
HRGW (HRG)	–	30–94 (30–94)
HRHW (HRH)	–	80–100 (80–100)
HRKW (HRK)	–	40–100 (40–100)
HR15N	70–94	70–94
HR30N	40–86	40–86
HR45N	20–78	20–78
HR15TW (HR15T)	(62–93)	62–93 (62–93)
HR30TW (HR30T)	(15–82)	15–82 (15–82)
HR45TW (HR45T)	(10–72)	10–72 (10–72)

Таблица 5
Границы НСП и СКО воспроизведения чисел твёрдости Роквелла и Супер-Роквелла на ГЭТ 30–94 и ГЭТ 30–2018

Метрологические характеристики эталона	ГЭТ 30–94		ГЭТ 30–2018	
	Шкалы Роквелла, HR	Шкалы Супер-Роквелла, HR	Шкалы Роквелла, HR	Шкалы Супер-Роквелла, HR
Границы НСП	± 0,25	± 0,5	± 0,2	± 0,3
СКО	0,08	0,16	0,04	0,04

Таблица 6
Неопределённости измерений при воспроизведении чисел твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла

Неопределённость измерений	ГЭТ 30–94		ГЭТ 30–2018	
	Шкалы Роквелла, HR	Шкалы Супер-Роквелла, HR	Шкалы Роквелла, HR	Шкалы Супер-Роквелла, HR
Стандартная неопределённость:				
по типу А	0,08	0,16	0,04	0,04
по типу В	0,11	0,21	0,08	0,12
Суммарная стандартная неопределённость	0,2	0,3	0,09	0,13
Расширенная неопределённость (k=2)	0,4	0,6	0,18	0,26

Наибольшие составляющие НСП связаны с приложением основной нагрузки, наибольшие составляющие СКО – с измерением геометрических параметров наконечника. Шкалы твёрдости Роквелла и Супер-Роквелла являются шкалами порядка, поэтому СКО, НСП, неопределённость измерений при воспроизведении чисел твёрдости вычислены по модели линеаризации шкалы вблизи значений чисел.

Доверительные границы НСП воспроизведения чисел твёрдости ГЭТ 30–2018 при доверительной вероятности 0,99 рассчитывали по формуле

$$\theta_{HR} = \pm 1,4 \left[\sum (C_i \theta_i)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где C_i – коэффициент чувствительности для i -й влияющей величины; θ_i – границы НСП i -й влияющей величины.

СКО воспроизведения чисел твёрдости Роквелла и Супер-Роквелла определяли по формуле

$$S_{HR} = \left[\sum (C_i S_i)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где S_i – СКО результата измерений i -й величины.

В табл. 4–6 представлено сравнение метрологических характеристик ГЭТ 30–94 и ГЭТ 30–2018.

Существенное уменьшение систематической погрешности воспроизведения чисел твёрдости Роквелла и Супер-Роквелла связано с введением новой системы приложения нагрузки. В ГЭТ 30–2018 отсутствуют силы трения при движении шпинделя с наконечником, что существенно уменьшает составляющие погрешности, обусловленные приложением основной и предварительной нагрузок. Также применение для измерения перемещения наконечника прецизионной системы (лазерного интерферометра) позволило уменьшить составляющую погрешности, связанную с измерением глубины внедрения наконечника.

Одновременно с усовершенствованием эталона был разработан проект государственной поверочной схемы. Передача чисел твёрдости Роквелла и Супер-Роквелла от ГЭТ 30–2018 осуществляется методом прямых измерений твёрдости рабочего эталона 1-го разряда (эталонной меры твёрдости первого разряда). От РЭ 1-го разряда методом сравнения с помощью компаратора числа твёрдости передаются РЭ 2-го разряда (эталонной мере твёрдости второго

разряда). От РЭ 2-го разряда методом прямых измерений числа твёрдости передаются средствам измерений – твердомерам Роквелла и Супер-Роквелла.

Заключение. Исследования по усовершенствованию ГЭТ 30–94 проведены во ВНИИФТРИ с 2015 по 2017 гг. в соответствии с техническим заданием Росстандарта. Метрологические характеристики ГЭТ 30–2018 улучшены, удовлетворяют заявленным требованиям технического задания. Утверждённый эталон позволяет обеспечить единство измерений твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла. В процессе совершенствования эталона было внедрено 15 новых шкал твёрдости Роквелла и Супер-Роквелла. Числа твёрдости Роквелла и Супер-Роквелла воспроизводятся на ГЭТ 30–2018 в соответствии с современными международными требованиями. Метрологические характеристики ГЭТ 30–2018 находятся на уровне измерительных возможностей ведущих промышленно развитых стран мира.

Л и т е р а т у р а

1. Варнелло В. В. Измерение твёрдости металлов. М.: Изд-во стандартов, 1965.
2. Асланян Э. Г., Дойников А. С. О выражении неопределённости результатов измерений твердости // Законодательная и прикладная метрология. 2002. № 4. С. 38–40.
3. Асланян Э. Г. Измерения твёрдости // в кн. Россий-

ская Метрологическая Энциклопедия / Под ред. академика РАН В. В. Окрепилова Т. 1. СПб.: ИИФ «Лики России», 2015. С. 253–262.

4. Кочин О. М., Асланян Э. Г., Козлов В. И., Мироненко А. В., Дмитриев Г. П. Совершенствование Государственного эталона единиц твердости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла. Методы и средства определения твердости материалов и изделий // Сб. материалов Всесоюз. научн.-техн. конф. Ч. 1. Иваново, 1990. С. 162–167.

5. Асланян Э. Г. Метрологическое обеспечение измерений твердости // Измерительная техника. 2005. № 1. С. 45–50.

6. ГОСТ 9013–59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу.

7. ГОСТ 22975–78. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (по Супер-Роквеллу)

8. ГОСТ 8.064–94. ГСИ. Государственная поверочная

схема для средств измерений твердости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла.

9. ISO 6508-1:2016. Metallic materials – Rockwell hardness test – Part 1: Test method.

10. РМГ 29–2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.

11. Germak A., Liguori A., Origlia C. Experience in the metrological characterization of primary hardness standard machines // Hardmeko-2007. 2007, Tsukuba, Japan, P. 81–89.

12. ГОСТ 8.640–2014. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений силы.

13. ГОСТ Р 8.763-2011. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 50 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм.

Дата принятия: 04.06.2018.

535.243.25

Государственный первичный эталон единиц спектральных коэффициентов направленного пропускания, диффузного и зеркального отражений в диапазоне длин волн от 0,2 до 20,0 мкм ГЭТ 156–2015

А. Ю. ДУНАЕВ, Ю. М. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ, С. П. МОРОЗОВА, В. И. САПРИЦКИЙ, Г. С. ФИДАНИЯ, А. А. ЕРИКОВА

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: dunaev@vniiofi.ru

Представлен состав Государственного первичного эталона единиц спектральных коэффициентов направленного пропускания, диффузного и зеркального отражений в диапазоне длин волн от 0,2 до 20,0 мкм ГЭТ 156–2015. Приведены метрологические характеристики эталона.

Ключевые слова: спектрофотометрия, направленное пропускание, диффузное отражение, зеркальное отражение, оптические свойства материалов, ключевые сличения.

Structure of the State Primary Standard GET 156–2015, intended for measurements of spectral regular transmittance, spectral diffuse and spectral regular reflectance in the wavelength range from 0,2 to 20,0 μm is presented. The metrological characteristics of the Standard are given.

Key words: spectrophotometry, spectral regular transmittance, spectral diffuse reflectance, spectral regular reflectance, optical properties of materials, uncertainties, key comparison.

Спектрофотометрические измерения коэффициента направленного пропускания и отражения оптических материалов и покрытий необходимы во всех отраслях промышленности, науки и техники, в сельском хозяйстве, экологии и медицине. Единицы спектральных коэффициентов направленного пропускания (СКНП), зеркального и диффузного отражений (СКЗО и СКДО) оптических материалов характеризуют фундаментальные свойства веществ. Поэтому необходимо установить шкалу этих единиц с последующей прослеживаемостью всего существующего парка измерительных приборов к ней.

Для воспроизведения и передачи единиц СКНП, СКДО и СКЗО во ВНИИОФИ создан Государственный первичный эталон единиц спектральных коэффициентов направленного

пропускания, диффузного и зеркального отражений в диапазоне длин волн от 0,2 до 20,0 мкм ГЭТ 156–2015. Установки, входящие в состав эталона реализуют, в том числе, методы измерений Эрба и Тейлора [1, 2].

В состав ГЭТ 156–2015 входят несколько прецизионных установок и приборов:

установка для воспроизведения и передачи единиц СКНП, оптической плотности и СКЗО в диапазоне длин волн 0,2–2,5 мкм;

установка для воспроизведения и передачи единиц СКНП и оптической плотности в диапазоне длин волн 2,5–20,0 мкм на основе инфракрасного (ИК) Фурье-спектрометра Perkin Elmer «SPECTRUM GX OPTICA»;