

УДК 006.91:531

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ТВЁРДОСТИ ПО ШКАЛАМ РОКВЕЛЛА И СУПЕР-РОКВЕЛЛА

Э.Г. Асланян, А.Э. Асланян, А.Н. Щипунов

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
aslanyan@vniiftri.ru

В работе описана проблема, возникшая в результате внесения уточнений в определение шкал твёрдости Роквелла и Супер-Роквелла. Описаны факторы, влияющие на числа твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла. Приведено решение задачи обеспечения единства измерений твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла. Даны метрологические характеристики усовершенствованного Государственного первичного эталона твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла.

The work describes a problem that has arisen as a result of amending the definition of Rockwell and Super-Rockwell hardness scales. The factors affecting the hardness numbers on the Rockwell and Super-Rockwell scales are described. The solution of the problem of ensuring the uniformity of hardness measurements by Rockwell and Super-Rockwell scales is given. The metrological characteristics of the improved State primary standard of hardness on Rockwell and Super-Rockwell scales are given.

Ключевые слова: Государственный первичный эталон, шкалы твёрдости Роквелла, шкалы твёрдости Супер-Роквелла.

Key words: State primary standard, Rockwell hardness scales, Super-Rockwell hardness scales.

Широкое применение методов измерения твёрдости в промышленности обусловлено высокой производительностью измерений. Также значения твёрдости дают комплексное представление о механических свойствах металла. Измерения твёрдости имеют следующие преимущества перед другими видами измерений механических свойств металлов: в результате измерений изделия не разрушаются, следы измерений на поверхности изделий в большинстве случаев не имеют значения для эксплуатации, приборы для измерений твёрдости обладают более высокой производительностью, чем приборы, используемые для измерений прочностных характеристик или характеристик износостойкости.

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, 3, 4].

Самое широкое распространение в промышленности получили методы измерения твёрдости Роквелла и Супер-Роквелла, в которых твёрдость определяется по глубине внедрения наконечника в образец.

В России методы Роквелла и Супер-Роквелла регламентированы стандартами [5, 6]. Поверочная схема для средств измерений твёрдости описана в стандарте [7]. Уравнение измерения чисел твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла описывается формулой

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

Здесь 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 мкм, после снятия основной нагрузки и при действии предварительной нагрузки.

Можно выделить следующие факторы, влияющие на результат измерения твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла:

- 1) отклонение приложения предварительной нагрузки от номинальной;
- 2) отклонение приложения основной нагрузки от номинальной;
- 3) отклонение перемещения наконечника;
- 4) отклонения геометрических параметров наконечников от нормированных величин;
- 5) отклонения параметров измерительного цикла от нормированных значений.

Повышенные предварительные нагрузки дают более высокие измеряемые значения твёрдости, так как глубина внедрения наконечника (h_1), служащая в качестве начальной точки для расчёта разности глубин внедрения наконечника, становится больше. Увеличение основной нагрузки приводит к уменьшению значений твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла, так как глубина внедрения наконечника после снятия основной нагрузки (h_2) становится больше. В работе [8] показано, что при более низких уровнях твёрдости влияние отклонений нагрузок будет больше.

Влияние перемещения наконечника определяется исходя из формулы (1). При увеличении общей глубины внедрения наконечника уменьшается значение твёрдости. В качестве наконечников в методах Роквелла и Супер-Роквелла используются алмазный конус и стальной или твёрдосплавный шар.

Влияющими на числа твёрдости геометрическими параметрами наконечников являются угол между образующими конуса, радиус закругления вершины конуса, диаметр шара. При увеличении угла конуса числа твёрдости Роквелла и Супер-Роквелла увеличиваются, причём для низкого уровня твёрдости влияние угла конуса сильнее, чем для высокого уровня твёрдости. При увеличении радиуса закругления конуса твёрдость также возрастает, но

влияние радиуса закругления на числа твёрдости сильнее проявляется на высоком уровне твёрдости, чем на низком. Такая же тенденция увеличения значений твёрдости наблюдается при увеличении диаметра шарикового наконечника.

На числа твёрдости оказывают значительное влияние скорость нагружения и продолжительность приложения измерительных нагрузок. Увеличение скорости нагружения приводит к уменьшению значений твёрдости, и этот эффект значительней при высоких уровнях твёрдости. При изменении длительности приложения нагрузки за счёт ползучести изменяется значение твёрдости материала. Более длительное приложение предварительной нагрузки приводит к увеличению твёрдости. Увеличенное время приложения основной нагрузки приводит к уменьшению твёрдости. Этот эффект более выражен при низких уровнях твёрдости.

В 2015 г. рабочей группой по измерениям твёрдости Консультативного комитета по измерениям массы Международного Бюро мер и весов принято уточнённое определение шкал твёрдости Роквелла и Супер-Роквелла. Уточнение касалось параметров измерительного цикла. Измерительный цикл представлен на рис. 1.

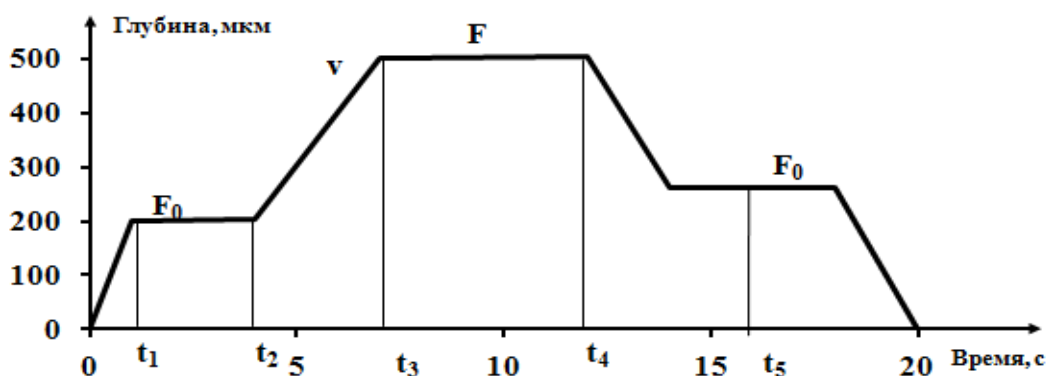


Рис. 1. Измерительный цикл при воспроизведении шкал твёрдости Роквелла и Супер-Роквелла согласно новым международным требованиям

В 2016 г. вышел новый международный стандарт [9], вносящий уточнения в 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 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 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.

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 (t_1) основной нагрузки ($t_3 - t_2$)	2–8 2–8	< 2 1–8
Время выдержки, с, предварительной нагрузки ($t_2 - t_1$) основной нагрузки ($t_4 - t_3$)	– 1–6	1–4 2–6
Время между снятием основной нагрузки и измерением остаточной глубины внедрения наконечника ($t_5 - t_4$), с	–	1–5
Скорость внедрения наконечника (v) за интервал времени, соответствующий значению нагрузки от $0,8F$ до $0,99F$, мкм/с F — основная нагрузка, F_0 — предвари- тельная нагрузка	–	20–40

При усовершенствовании эталона были поставлены следующие задачи: обеспечить процесс воспроизведения чисел твёрдости в соответствии с требованиями уточнённого метода Роквелла; уменьшить неисключённую систематическую погрешность (НСП) и среднеквадратическое отклонение (СКО) воспроизведения чисел твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла, обеспечить возможность измерений по новым шкалам твёрдости.

В конструкции эталона ГЭТ 30-94 [11] 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 располагал-

ся над шпинделем таким образом, чтобы его контактное усилие компенсировало силу трения качения в подшипниках.

Для соблюдения значений всех параметров измерительного цикла с требуемым допуском гидравлический двигатель заменили на электродвигатель. Таким образом, скорость внедрения наконечника и время приложения, снятия и выдержки нагрузок контролируется изменением количества оборотов вала двигателя. Для улучшения метрологических характеристик была заменена вся механическая часть эталона на установку PHS DW (исследования аналогичной установки были проведены в работе [12]), а также устройство для измерения глубины внедрения наконечника (растровый цифровой длиномер ЦД1-МВТУ) на лазерный интерферометр. В ГЭТ 30-2018 шпиндель с наконечником перемещается в воздушном подшипнике, что делает силу трения пренебрежимо малой. Эталон находится на развязанном фундаменте, в результате чего исключено влияние вибраций на воспроизведение чисел твёрдости. Эталонное помещение оснащено системой контроля климата. Постоянная температура ($23,0 \pm 0,2$ °C) и относительная влажность (52 ± 2 %) уменьшают нестабильность измерения перемещения наконечника лазерным интерферометром. Усовершенствованный эталон представлен на рис. 2.

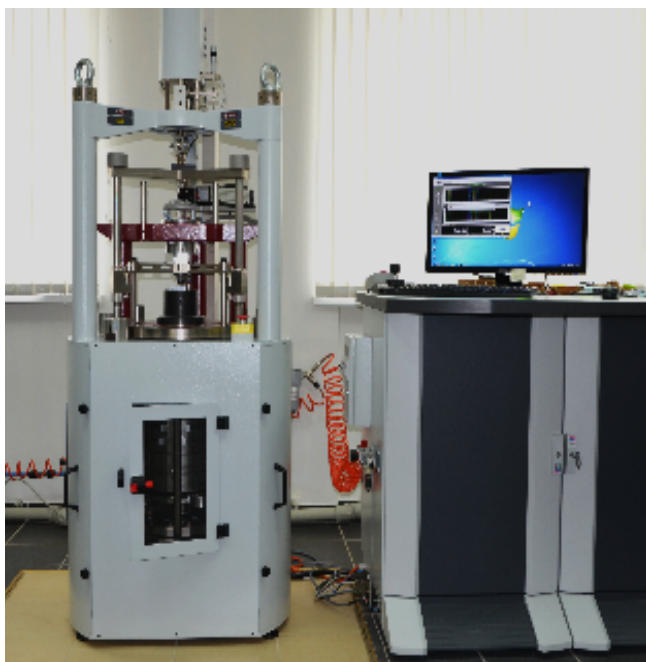


Рис. 2. Усовершенствованный Государственный первичный эталон твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла (ГЭТ 30-2018)

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 для шкал Роквелла и 1 — для шкал Супер-Роквелла. Коэффициенты чувствительности для остальных величин определялись экспериментальным путём. Суть экспериментов заключалась в изменении только одной из влияющих величин и определении изменения вследствие этого значений воспроизводимых чисел твёрдости. Отношение изменения значения числа твёрдости к изменению влияющей величины является коэффициентом чувствительности. Полученные коэффициенты чувствительности умножались на погрешности измерений каждого влияющего на воспроизведение чисел твёрдости фактора. Таким образом определялись составляющие НСП (неисключённой систематической погрешности) и СКО (среднего квадратического отклонения) воспроизведения чисел твёрдости Роквелла Государственным первичным эталоном [13]. В таблицах 2 и 3 соответственно показаны составляющие НСП и СКО воспроизведения чисел твёрдости.

Таблица 2

Составляющие НСП воспроизведения чисел твёрдости
по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла

Составляющая НСП	Значение для шкал Роквелла HR	Значение для шкал Супер-Роквелла ($\pm$) HR
Приложение основной нагрузки	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$
Приложение предварительной нагрузки	$\pm 0,06$	$\pm 0,04$
Перемещение наконечника	$\pm 0,025$	$\pm 0,05$
Угол наконечника	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$
Радиус закругления наконечника	$\pm 0,07$	$\pm 0,03$
Параметры измерительного цикла	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$

Таблица 3

Составляющие СКО воспроизведения чисел твёрдости
по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла

Составляющая СКО	Значение для шкал Роквелла HR	Значение для шкал Супер-Роквелла HR
Приложение основной нагрузки	0,002	0,02

Продолжение таблицы 3

Составляющая СКО	Значение для шкал Роквелла HR	Значение для шкал Супер-Роквелла HR
Приложение предварительной нагрузки	0,004	0,01
Перемещение наконечника	0,005	0,01
Угол наконечника	0,008	0,025
Радиус закругления наконечника	0,02	0,01

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 эталоном для 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 таблицах 4 и 5 представлено сравнение метрологических характеристик ГЭТ 30-94 и ГЭТ 30-2018.

Таблица 4

Шкалы и диапазоны чисел твёрдости,
реализуемые ГЭТ 30-94 и ГЭТ 30-2018.

Шкалы твёрдости	Диапазон чисел твёрдости ГЭТ 30-94	Диапазон чисел твёрдости усовершенствованного ГЭТ 30-2018
HRA	70 – 93	20 – 95
HRBW (HRB)	(25 – 100)	10 – 100 (10 – 100)

Продолжение таблицы 4

Шкалы твёрдости	Диапазон чисел твёрдости ГЭТ 30-94	Диапазон чисел твёрдости усовершенствованного ГЭТ 30-2018
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		Усовершенствованный 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

Выводы

Путём совершенствования ГЭТ 30-94 с целью реализации уточнённых методов Роквелла и Супер-Роквелла и внедрения Государственной поверочной схемы для средств измерений твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла достигнуто обеспечение единства измерений твёрдости по данным шкалам. Мероприятия по совершенствованию ГЭТ 30-94 решили проблему воспроизведения чисел твёрдости Роквелла и Супер-Роквелла в соответствии с современными международными требованиями.

Метрологические характеристики усовершенствованного эталона ГЭТ 30-2018 улучшены, удовлетворяют требованиям технического задания Росстандарта и находятся на уровне измерительных возможностей ведущих промышленно развитых стран мира.

Литература

1. Варнелло В.В. Измерение твёрдости металлов. М.: Изд-во стандартов, 1965.
2. Асланян Э.Г., Дойников А.С. О выражении неопределённости результатов измерений твёрдости // Законодательная и прикладная метрология. 2002. № 4. С. 38–40.
3. Асланян Э.Г. Измерения твёрдости // Российская метрологическая энциклопедия / под ред. академика РАН В.В. Окрепилова. Т. 1. СПб.: ИИФ «Лики России», 2015. С. 253–262.
4. Асланян Э.Г. Метрологическое обеспечение измерений твёрдости // Измерительная техника. 2005. № 1. С. 45–50.
5. ГОСТ 9013–59. Металлы. Метод измерения твёрдости по Роквеллу.
6. ГОСТ 22975–78. Металлы и сплавы. Метод измерения твёрдости по Роквеллу при малых нагрузках (по Супер-Роквеллу).
7. ГОСТ 8.064–94. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла.
8. Low S.R. NIST Recommended Practice Guide: Special Publication 960-5: Rockwell Hardness Measurement of Metallic Material, January 2001.
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. Кочин О.М., Асланян Э.Г., Козлов В.И., Мироненко А.В., Дмитриев Г.П. Совершенствование Государственного эталона единиц твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла. Методы и средства определения твёрдости материалов и изделий / Сб. материалов Всесоюз. научн.-техн. конф. Ч. 1. Иваново, 1990. С. 162–167.

12. Germak A., Liguori A., Origlia C. Experience in the metrological characterization of primary hardness standard machines // Hardmeko-2007. Japan, Tsukuba, 2007. P. 81–89.
13. Асланян Э.Г., Асланян А.Э., Гаврилкин С.М., Дойников А.С., Сорокина П.В., Щипунов А.Н. Государственный первичный эталон твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла ГЭТ 30-2018 // Измерительная техника. 2018. № 8. С. 3–7.