УДК 006.91:621.753.38:531

# АНАЛИЗ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА УКРАИНЫ ЕДИНИЦ ТВЕРДОСТИ

- В.В. Скляров, кандидат технических наук, ученый секретарь ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков
- Я.С. Довженко, ведущий инженер ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков
- **В.И. Мощенок,** кандидат технических наук, заведующий кафедрой Харьковского национального автомобильно-дорожного университета
- С.В. Демченко, генеральный директор ООО "НПП "УКРИНТЕХ", г. Харьков



В.В. Скляров

Я.С. Довженко





C.E

С.В. Демченко

Описываются работы по определению коэффициентов чувствительности для шкалы Супер-Роквелла государственного первичного эталона Украины единиц твёрдости (ДЕТУ 02-04-99).

The work on definition of sensitivity coefficient for Super-Rockwell scale of the Ukrainian national primary standard of firmness units are described (DETU 02-04-99).

#### Введение

Определение значения твердости на ДЕТУ 02-04-99 зависит от результатов измерений различных параметров, таких, как масса нагрузок, диаметр сферического, радиус и угол сфероконического инденторов, глубина проникновения индентора, время приложения нагрузок, несовпадение оси державки индентора с осью приложения нагрузки. Каждая из этих величин имеет неопределенность, которая вносит свой вклад в общую неопределенность измерения твердости. При проведении международных сличений каждая из участвующих сторон предоставляет пилотной лаборатории бюджет неопределенности своего национального эталона. Под составлением бюджета неопределенности понимается формализованное изложение процедуры оценивания неопределенности измерения. Такая унифицированная схема наглядна, позволяет легко проверить процедуру вычисления неопределенности и сравнить её с аналогичными вычислениями в других лабораториях. Влияние изменения каких-либо параметров на результат измерения определяется коэффициентами чувствительности c1, ..., cN, которые описывают, как на изменение выходной величины Y будут влиять небольшие изменения в оценках  $x_1, ..., x_N$  входных величин  $X_1, ..., X_N$ . Для функции измерений  $Y=f(X_1, ..., X_N)$   $c_i$  равно частной производной первого порядка от f по  $X_i$ , вычисленной при  $X_1=x_1$ ,  $X_2=x_2, X_3=x_3$ , и т.д. [1].

#### Определение исследуемых параметров

Согласно [2], алгоритм измерения твердости на эталоне и использование мер твердости для передачи единицы твердости должны соответствовать ISO 6508-1:2005, ISO 6508-2:2005, ISO 6508-3:2005 [3– 5].

С учётом новой методологии в определении неопределенности (использование коэффициентов чувствительности) для эталонов твердости, обозначены следующие изменяющиеся составляющие бюджета неопределенности:

предварительная нагрузка,  $F_0$ ;

общая нагрузка, F;

диаметр сферического индентора (для шкал HRT),  $R_{\beta}$ ;

радиус наконечника сфероконического индентора (для шкал HRN),  $R_{\alpha}$ ;

угол сфероконического индентора (для шкал HRN),  $\alpha_{\text{m}};$ 

глубина индентирования, h;

скорость индентирования при общей нагрузке,  $V_{\rm fis};$ 

время действия предварительной нагрузки, *T*<sub>p</sub>; время действия общей нагрузки, *T*<sub>df</sub>;

несовпадение державки индентора с осью приложения нагрузки, *d*. Отношение изменения измеренных значений твердости  $\Delta H$  к изменению каждого из параметров  $\Delta x_i$ , составляющих бюджет неопределенности, и определяется как коэффициент чувствительности  $c_i$ :

$$c_{\rm i} = \frac{\Delta H}{\Delta x_{\rm i}}$$

Коэффициент чувствительности является величиной, находящейся в пределах допусков режимов работы эталона.

Коэффициент чувствительности для глубины индентирования для шкал HRN и HRT может быть определен из уравнений измерения для шкалы Супер-Роквелла, с учетом разных типов инденторов, по формуле [6]

$$G = 100 - \frac{h}{1},$$
 (1)

где *h* – глубина проникновения индентора в меру под действием полного нагружения, мкм.

Определим коэффициенты чувствительности для глубины индентирования, взяв частные производные из уравнения (1):

$$\frac{\Delta \text{HRN}}{\Delta h} = -1; \quad \frac{\Delta \text{HRT}}{\Delta h} = -1.$$

Другие коэффициенты чувствительности эталона могут быть определены только экспериментально.

## Проведение измерений и представление результатов

Задача определения коэффициентов чувствительности сводится к измерению твердости образцовых мер 1-го разряда при различных вариациях бюджета неопределенности для каждого из диапазонов твердости, воспроизводимых эталоном. В соответствии с государственной поверочной схемой ДСТУ 3869-99, определены поддиапазоны шкалы Супер-Роквелла, представленные в табл. 1.

Название шкалы	Поддиапазоны шкалы
Шкала Супер-Роквелла	90–94 HRN 15
	40–50 HRN 30
	76–84 HRN 30
	43–54 HRN 45
	35–45 HRT 30
	70–82 HRT 30

Таблина 1

Для каждого из 6-ти поддиапазонов использовались по две меры твердости со значением твердости, которое находилось в пределах диапазона. Документ [4] регламентирует:

допустимое отклонение предварительной нагрузки  $F_0$  (до приложения и после снятия дополнительной загрузки F) должно составлять  $\pm 2\%$ ;

допустимое отклонение суммарной испытательной нагрузки должно составлять ±1 %, каждое отдельное значение *F* – находиться в пределах этого допустимого отклонения.

Таким образом, отклонения *F*<sub>0</sub> для шкалы Супер-Роквелла – 60 г. Отклонение *F* составляет от 150 до 450 г для шкалы Супер-Роквелла при максимальной нагрузке 45 кг.

Согласно ДСТУ ISO 6508-2:2005, сфероконический индентор должен иметь прилегающий угол (120±0,35)°, радиус сферы при вершине (0,2±0,005) мм. Сферический индентор для диапазона HRT должен иметь радиус (1,5875±0,0035) мм.

При исследовании алмазных сфероконических инденторов [7] были получены значения углов и диаметров, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Номер индентора	Угол конуса, °	Радиус наконечника, мм
945	119,637	0,2103
1048	119,428	0,1924
2111	120,247	0,1965
3524	120,358	0,2096

В соответствии с [3], время действия предварительной нагрузки не должно превышать 3 с ( $T_p \le 3$  с), время перехода от предварительной к основной нагрузке должно быть не менее 1 с, но не более 8 с (1 с <  $t_{apply} < 8$  с), время действия общей нагрузки  $T_{df}$  должно составлять от (4±2) с. Глубина отпечатка измеряется после снятия основной нагрузки и время считывания информации о глубине отпечатка (*final reading stabilization time*,  $t_{post}$ ) должно составлять от 3 до 5 с. Также важно соблюдать скорость индентирования при приложении общей нагрузки – 0,02 мм/с <  $V_{fis} < 0,04$  мм/с.

При проведении каждого эксперимента изменялся один из параметров (составляющая бюджета неопределенности), другие же принимались как постоянные. Измерения каждой составляющей бюджета неопределенности проводились пятью внедрениями индентора по всей площади меры твердости. На каждой из мер твердости, которые соответствуют шкалам с использованием стального шарика (HRT), проводилось 30 измерений (по 5 измерений каждого из 6-ти составляющих бюджета неопределенности). На каждой из мер твердости, которые соответствуют шкалам с использованием сфероконического индентора (HRN), проводилось также 30 измерений (по 5 измерений каждого из 6-ти составляющих бюджета неопределенности), поскольку параметры сфероконического индентора (угол и радиус) измеряются одновременно. По каждому диапазону, для каждой составляющей бюджета неопределенности, по полученным 5-ти точкам строим кривую измерений. Методом наименьших квадратов линейно аппроксимируем полученные точки на графике, определяем уравнение полученной прямой и коэффициент чувствительности (тангенс угла наклона прямой) для данной составляющей бюджета неопределенности в исследуемом диапазоне.

На рис. 1–6 представлены графики проведенных экспериментов по определению коэффициентов чувствительности для диапазона 70–82 HRT 30. Аналогичные графики проведенных экспериментов построены для определения коэффициентов чувствительности для подиапазонов 90–94 HRN 15, 40–50 HRN 30, 76–84 HRN 30, 43–54 HRN 45, 35–45 HRT 30.









Изменение времени действия предварительной нагрузки, с





Таблица 3

Параметр	Описание параметра	Символ коэф- фициента чув- ствительности	Коэффициент чувствительности			
ед. изм.			90–94 HRN 15	40–50 HRN 30	76–84 HRN 30	43–54 HRN 45
<i>F</i> <sub>0</sub> , H	Предварительная нагруз- ка	$\frac{\Delta HR}{\Delta F_0}$	0,6	0,7	0,45	0,47
<i>F</i> , H	Общая нагрузка	$\frac{\Delta HR}{\Delta F}$	-0,06	-0,2	0,08	-0,25
<i>R</i> <sub>α</sub> , мм	Радиус сфероконического индентора	$\frac{\Delta HR}{\Delta R_{\beta}}$	0,45	-0,41	0,38	0,41
α, °	Угол сфероконического индентора	$\frac{\Delta HR}{\Delta \alpha}$	$0,\!45$	-0,41	0,38	0,41
$V_{fis}$ , мкм/с	Скорость индентирования при общей нагрузке	$\frac{\Delta HR}{\Delta V_{\rm fis}}$	-0,5	-0,5	-0,5	-0,08
<i>T</i> <sub>p</sub> , c	Время действия предва- рительной нагрузки	$\frac{\Delta HR}{\Delta T_{\rm p}}$	0,1	0,1	0,1	-0,2
T <sub>df</sub> , c	Время действия общей нагрузки	$\frac{\Delta HR}{\Delta T_{\rm df}}$	0,1	0,1	0,1	-0,2

### Таблица 4

Параметр		Символ коэффи-	Коэффициент чувствительности		
ед. изм. Описание параметра циента чуво тельност		циента чувстви- тельности	35–45 HRT 30	70–82 HRT 30	
<i>F</i> <sub>0</sub> , H	Предварительная нагрузка	$\frac{\Delta HR}{\Delta F_0}$	0,1	0,085	
<i>F</i> , H	Общая нагрузка	$\frac{\Delta HR}{\Delta F}$	-0,35	-0,38	
<i>R</i> <sub>β</sub> , мм	Диаметр сферического ин- дентора	$\frac{\Delta HR}{\Delta R_{\beta}}$	-0,085	-0,07	
$V_{\sf fis}$ , мкм/с	Скорость индентирования при общей нагрузке	$\frac{\Delta HR}{\Delta V_{\rm fis}}$	-0,2	-0,2	
<i>T</i> <sub>p</sub> , c	Время действия предвари- тельной нагрузки	$\frac{\Delta HR}{\Delta T_{\rm p}}$	0,1	0,1	
T <sub>df</sub> , c	Время действия общей на- грузки	$\frac{\Delta HR}{\Delta T_{\rm df}}$	0,1	0,1	

В табл. 3 представлены коэффициенты чувствительности для шкалы Супер-Роквелла с использованием сфероконического индентора.

В табл. 4 представлены коэффициенты чувствительности для шкалы Супер-Роквелла с использованием сферического индентора.

На основании определенных коэффициентов чувствительности составляется бюджет неопреде-

ленности по каждому поддиапазону. Согласно [2] проводится вычисление суммарной стандартной и расширенной неопределенностей.

В качестве примера в табл. 5 представим бюджет неопределенности для поддиапазона 70–82 HRT30.

Вычисленные значения расширенной неопределенности сравниваются со значениями расши-

					Таблица 5
Параметр, ед. изм.	Отличие от номинального значения, $\Delta x_{i}$	Стандартная неопределённость, $u(x_i) = \frac{\Delta x_i}{\sqrt{3}}$	Коэффициент чувствительно- сти, $c_i = \frac{\Delta H}{\Delta x_i}$	Отклонение значения твер- дости, $\Delta H_i = \Delta x_i \cdot c_i,$ HRC	Вклад неопределен- ности, $u_i(H) = c_i \cdot u(x_i),$ HRC
<i>F</i> <sub>0</sub> , H	0,2	0,115	0,0085	0,017	0,01
$F, \mathbf{H}$	1,5	0,886	-0,38	-0,57	-0,329
$R_{\beta}$ , мм	1,0	0,577	-0,07	-0,07	-0,04
<i>l</i> , мкм	0,1	0,058	1,00	0,10	0,058
$V_{\sf fis}$ , мкм/с	0,7	0,404	-0,20	-0,14	-0,081
<i>T</i> <sub>p</sub> , c	0,2	0,115	0,10	0,02	0,012
$T_{df}, c$	0,2	0,115	0,10	0,02	0,012
<i>d</i> , мкм	0,3	0,173	0,50	0,15	0,087
Стандартная неопределенность $u(H) = \sqrt{\sum_{i} u_i^2(H)}$ , HRC					0,357
Расширенная неопределенность $U_{p} = k \cdot u(H)$ , HRC					0,715

ренной неопределенности стран-участников международных сличений. Для каждого поддиапазона твердости строятся графики, отображающие измеренные каждым из участников сличений значения твердости с расширенной неопределенностью. По результатам графического представления результатов делается вывод о подтверждении или неподтверждении заявленных значений неопределенности для каждого участника по каждому из поддиапазонов твердости.

#### Заключение

Определенные при создании ДЕТУ 02-04-99 границы неисключенной систематической погрешности  $\Theta$  и среднее квадратическое отклонение результата измерений S учитывали экспериментальные результаты, полученные только при нагружении 3, 15, 30 и 45 кгс для шкалы Супер-Роквелла [8]. Новая методология составления бюджета неопределенности для стран-участниц международных сличений позволяет представить все составляющие бюджета неопределенности для каждого из поддиапазонов твердости в отдельности. Значения расширенных неопределенностей для каждого поддиапазона уточнены и соответствуют значениям расширенной неопределенности национальных эталонов стран-членов COOMET (Cooperation in Metrology and central European Countries), APMP (Asian Pasific Metrology Program) и ССМ (Consultative Committee for Mass and Related Quantities).

В качестве перспективных направлений исследований можно обозначить исследование существующего парка инденторов, с целью проведения международных сличений с использованием и мер твердости, и инденторов, и исследование отклонения значений бюджета неопределенности при увеличении допусков и времени приложения предварительной и общей нагрузок, скорости индентирования.

## Список литературы

- 1. Применение "Руководства по выражению неопределенности измерений". – СПб.: ГП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева", 2001. – 20 с.
- 2. Calibration guide EURAMET/cg-16/v.01. Guidelines on the estimation of uncertainty in hardness measurements (originally EA-10/16).
- Metallic Materials Rockwell hardness test (scale A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T). Part 1: Test method: ISO 6508-1:2005. – Geneva: International Organization for Standardization, 2005. – (Международный стандарт).
- Metallic Materials Rockwell hardness test (scale A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T). Part 2: Verification and calibration of the tasting machine: ISO 6508-2:2005. – Geneva: International Organization for Standardization, 2005. – (Международный стандарт).
- 5. Metallic Materials Rockwell hardness test (scale A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T). Part 3: Calibration of reference blocks: ISO 6508-3:2005. – Geneva: International Organization for Standardization, 2005. – (Международный стандарт).
- Low S.R. Rockwell hardness measurement of metallic materials: Special publication 960-5 / S.R. Low. – NIST, 2001. – 116 p.
- Довженко Я.С. Экспериментальные исследования влияния геометрии индентеру при измерении твердости / Я.С. Довженко, К.П. Неежмаков, В.В. Скляров // Український метрологічний журнал. 2012. № 3. С. 43–47.
- Государственные первичные эталоны единиц твердости по шкалам Бринелля и Виккерса, Роквелла и Супер-Роквелла / Г.С. Сидоренко, В.Б. Большаков, Я.С. Довженко [и др.] // Український метрологічний журнал. – 1999. – Вип. 2. – С. 51–55.