

УДК 531.787

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭТАЛОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЧИСЕЛ ТВЁРДОСТИ КНУПА

П.В. Сорокина

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

Аннотация. В статье приводятся результаты измерений твёрдости эталонной установки для воспроизведения твёрдости по шкалам Кнупа. Оценены вклады отклонений прикладываемых сил от номинальных, вклад погрешности оптической системы в границы неисключённой систематической погрешности установки. Определены случайная погрешность и размах чисел твёрдости при воспроизведении шкал Кнупа.

Ключевые слова: твёрдость, метод Кнупа, эталонная установка, НСП, СКО.

METROLOGICAL INVESTIGATION OF A STANDARD SYSTEM FOR REPRODUCING KNOOP HARDNESS NUMBERS

P.V. Sorokina

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
psorokina@vniiftri.ru

Abstract. The article presents the results of measurements of the hardness of the standard system for reproducing the hardness on the Knoop scales. The contributions of deviations of the applied forces from the nominal ones, the contribution of the error of the optical system to the boundaries of the non-excluded systematic error of the system are estimated. The random error and the range of hardness numbers are determined when reproducing the Knoop scales.

Keywords: hardness, Knoop method, standard system, NSE, RMS.

Под твёрдостью понимается свойство материала сопротивляться упругим и пластическим деформациям при внедрении в него более твёрдого тела (индентора). Существуют различные методы измерения твёрдости металлических сплавов: по Роквеллу, Виккерсу, Бринеллю, Шору и Кнупу. Все перечисленные методы основаны на механическом воздействии индентора (наконечника) на исследуемый образец, например вдавливание индентора. Метод Кнупа более универсален и используется не только для определения твёрдости прочных металлических сплавов, но и для композитов, стекла и керамики.

Метод измерения твёрдости по Кнупу регламентирован ГОСТ Р ИСО 4545-1-2015. Сущность метода заключается во вдавливании алмазного наконечника в виде пирамиды с углами α и β между противоположными сторонами, равными $172,5^\circ$ и 130° соответственно, в поверхность испытуемого

образца под действием приложенной нагрузки (статистической силы) F и измерении длины диагонали d отпечатка, после снятия нагрузки. Числа твёрдости Кнупа (HK) определяют по формуле:

$$HK = 1,451F / d^2.$$

Одним из направлений развития метрологии является повышение точности измерений. Основными источниками погрешностей при воспроизведении чисел твёрдости Кнупа являются: погрешность приложения силы, погрешность оптической системы, отклонение геометрических параметров наконечника и время приложения нагрузки.

Целью данной работы является определение влияния отклонения приложения силы от номинальной и погрешности оптической системы на воспроизведение чисел твёрдости Кнупа. Работа поставлена в рамках совершенствования Государственного первичного специального эталона твёрдости металлов по шкалам Виккерса ГЭТ 31-2010.

Для определения отклонений силы от номинальных значений использовались весы лабораторные ВЛТЭ-1100. Допускаемые пределы погрешности весов (θ_v) составляют $\pm 0,03$ г. Ускорение свободного падения в методе Кнупа нормировано и принимается равным $9,807$ м/с².

В таблице 1 представлены отклонения измеренных сил ($\Delta_{\text{силы}}$) от номинальных.

Таблица 1

Номинал. значение силы, H	1 изм.	2 изм.	3 изм.	4 изм.	5 изм.	Среднее	Абсолютная погрешность
0,049	0,0488	0,0489	0,0488	0,0489	0,0491	0,04894	0,00006
0,098	0,0981	0,0979	0,0981	0,0982	0,0982	0,09807	0,00007
0,245	0,2451	0,2450	0,2452	0,2453	0,2451	0,24512	0,00012
0,490	0,4892	0,4897	0,4898	0,4895	0,4895	0,48951	0,00049
0,981	0,9796	0,9796	0,9797	0,9798	0,9801	0,97978	0,00122
1,961	1,9608	1,9609	1,9605	1,9604	1,9605	1,96064	0,00036
2,942	2,9418	2,9413	2,9416	2,9412	2,9416	2,94151	0,00049
4,903	4,9020	4,9010	4,9027	4,9026	4,9026	4,90219	0,00081
9,807	9,8055	9,8061	9,8055	9,8066	9,8055	9,80586	0,00114
19,61	19,6042	19,6042	19,6140	19,6140	19,6042	19,6100	0,00188

Границы неисключённой систематической погрешности (НСП) приложения силы определяются по формуле:

$$\theta_{\text{силы}} = \theta_v + \Delta_{\text{силы}}.$$

Коэффициент влияния силы (C_F) рассчитывается по формуле:

$$C_F = HK / F.$$

Вклад отклонения силы от номинальной в НСП воспроизведения чисел твёрдости Кнупа оценивается по формуле:

$$\Theta_F = C_F \theta_{\text{силы}}.$$

Для определения вклада погрешности оптической системы в воспроизведение чисел твёрдости по шкалам Кнупа используется объект-микрометр. Пределы погрешности объект-микрометра ($\theta_{\text{ом}}$) составляют $\pm 0,001$ мм.

В таблице 2 представлены погрешности оптической системы для длин диагоналей ($\Delta_{\text{диаг}}$), соответствующих числам твёрдости Кнупа 60 и 2500 для всех используемых нагрузок.

Таблица 2

Номинальное значение интервала шкалы объект-микрометра, мкм	Интервал между делениями шкалы объект-микрометра по показаниям твердомера, мкм	Абсолютная погрешность измерения, мкм
9,94	9,97	0,03
19,97	20,03	0,06
29,92	29,86	–0,06
39,92	39,90	–0,02
50,07	50,36	0,29
59,73	60,01	0,28
69,76	69,26	–0,5
79,12	79,00	–0,12
89,9	90,12	0,22
99,86	100,02	0,16
199,95	200,12	0,17
299,79	299,99	0,2
399,89	400,10	0,21
499,88	501,00	1,12

Границы НСП оптической системы определяются по формуле:

$$\theta_{\text{ос}} = \theta_{\text{ом}} + \Delta_{\text{диаг}}.$$

Коэффициент влияния оптической системы (C_d) рассчитывается по формуле:

$$C_d = \frac{-2HK}{d}.$$

Вклад погрешности оптической системы в НСП воспроизведения чисел твёрдости Кнупа оценивается по формуле:

$$\Theta_d = C_d \theta_{\text{ос}}.$$

В таблице 3 представлены вклады составляющих НСП воспроизведения чисел твёрдости Кнупа, связанные с приложением силы и оптической системой, для разных шкал Кнупа.

Таблица 3

Сила, H	Шкала	Уровень твёрдости HK	$\Theta_F HK$	$\Theta_d HK$
0,049	HK0,005	60	0,4	0,8
		2500	18,2	66,6
0,098	HK0,01	60	0,3	0,7
		2500	10,9	61,1
0,245	HK0,025	60	0,1	0,2
		2500	4,2	59,1
0,49	HK0,05	60	0,1	0,2
		2500	4,0	41,8
0,981	HK0,1	60	0,09	0,1
		2500	3,9	37,9
1,961	HK0,2	60	0,02	0,1
		2500	0,9	34,2
2,942	HK0,3	60	0,02	0,09
		2500	0,7	32,8
4,903	HK0,5	60	0,02	0,08
		2500	0,6	26,3
9,807	HK1	60	0,01	0,06
		2500	0,4	8,0
19,61	HK2	60	0,01	0,01
		2500	0,3	8,0

Из таблицы 3 следует, что вклад отклонения силы от номинальной увеличивается с уменьшением значения силы. Вклад погрешности оптической системы в воспроизведение чисел твёрдости Кнупа увеличивается с уменьшением длины диагонали. Таким образом, прогнозируется наибольшее значение НСП воспроизведения чисел твёрдости Кнупа для значения твёрдости 2500 НК 0,005.

Случайная составляющая погрешности воспроизведения чисел твёрдости Кнупа определялась экспериментально путём измерения твёрдости на мерах. На основании полученных результатов измерений определялось СКО среднего.

Результаты измерений твёрдости приведены в таблице 4.

Таблица 4

Шкала	Значение твёрдости меры	Результаты измерений НК					СКО НК	Размах НК
		1	2	3	4	5		
НК1	797,4	801,6	801,5	797,4	794,8	791,5	2,0	10,1
НК0,1	879,6	877,6	865,6	880,2	894,1	880,5	4,6	28,5
НК0,005	909,3	915,1	901,7	889,1	915,2	925,5	6,3	36,3
НК1	536,2	538,1	534,1	538,3	541,2	529,3	2,1	11,8
НК0,1	585,1	575,3	577,4	597,4	590,1	585,5	4,1	22,1
НК0,005	746,2	745,7	759,6	724,7	739,5	761,5	6,8	36,8
НК1	265,2	266,0	264,4	265,4	267,3	263,2	0,7	4,1
НК0,1	276,9	274,4	281,4	279,5	276,5	273,0	1,6	8,5
НК0,005	328,1	338,6	315,4	341,6	324,9	319,9	5,2	26,2

Полученный размах чисел твёрдости Кнупа удовлетворяет требованиям ТЗ: от 1 до 100 НК.

Заключение

В результате проведённых исследований обнаружено увеличение вклада отклонения силы от номинальной и погрешности оптической системы в НСП воспроизведения чисел твёрдости Кнупа при уменьшении величины прикладываемой силы и измеряемой диагонали отпечатка. Анализ данных из таблицы 3 показал, что вклад погрешности оптической системы в воспроизведение чисел твёрдости Кнупа больше вклада отклонения прикладываемой силы. СКО воспроизведения чисел твёрдости Кнупа находится в диапазоне от 0,7 до 6,8 НК в зависимости от твёрдости меры. Размах чисел твёрдости установки удовлетворяет требованиям технического задания по совершенствованию ГЭТ 31-2010.

Список литературы

ГОСТ Р ИСО 4545-1-2015. Материалы металлические. Определение твёрдости по Кнупу. Часть 1. Метод испытания. — М.: Стандартиформ, 2015.

Статья поступила в редакцию: 22.03.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 31.03.2022 г.

Статья принята в работу: 05.04.2022 г.