

УДК 006.91:621.753.38:531

В.В. Склярів, Я.С. Довженко

ННЦ «Інститут метрології», Харків

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ИНДЕНТИРОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТВЕРДОСТИ

*В статье описываются проведенные работы по исследованию влияния скорости индентирования при измерении твердости по шкале Роквелла. Определены коэффициенты чувствительности при различной скорости внедрения индентора в меру твердости. Получены зависимости измеренной твердости от скорости индентирования при использовании сфероконического индентора. Показано влияние скорости индентирования на расширенную неопределенность при измерении твердости в поддиапазоне 60-70 HRC. Работы проводились на государственном первичном эталоне Украины единиц твердости (ДЕТУ 02-04-99), в рамках подготовки эталона к международным сличениям по проекту КООМЕТ 560/UA/12.*

**Ключевые слова:** твердость, скорость индентирования, коэффициенты чувствительности, неопределенность.

### Постановка проблемы

Определение значения твердости зависит от результата измерений большего числа различных параметров, таких как масса нагрузок, диаметр сферического, радиус и угол сфероконического индентора, глубина проникновения индентора, время приложения нагрузок.

Каждая из этих величин имеет неопределенность, и эта неопределенность вносит 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  $c_1, \dots, c_N$ , которые описывают, как на изменение выходной величины  $Y$ , будут влиять изменения в оценках  $x_1, \dots, x_N$  входных величин  $X_1, \dots, X_N$ . Для функции измерений  $Y = f(X_1, \dots, X_N)$   $c_i$  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].

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]. В данной работе, на примере измерений

скорости индентирования, показано, как изменяется коэффициент чувствительности для скорости индентирования, и какие значения расширенной неопределенности при этом вычисляются.

### Определение условий проведения исследований

Учитывая новую методологию 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 HRB),  $R_\beta$ ;
- угол сфероконического индентора (для шкал HRC),  $\alpha_m$ ;
- радиус наконечника сфероконического индентора (для шкал HRC),  $R_\alpha$ ;
- глубина индентирования,  $h$ ;
- скорость индентирования при общей нагрузке,  $V_{fis}$ ;
- время действия предварительной нагрузки,  $T_p$ ;
- время действия общей нагрузки,  $T_{df}$ ;
- несовпадение державки индентора с осью приложения нагрузки,  $d$ .

Приведенные величин определяют уравнение измерения твердости в неявном виде:

$$HR = f(F_0, F, \alpha_m, R_\alpha, (R_\beta), h, V_{fis}, T_p, T_{df}, d). \quad (1)$$

Отношение изменения измеренных значений твердости  $\Delta H$  к измерению каждого из параметров  $\Delta x_i$ , составляющих бюджет неопределенности, и определяется как коэффициент чувствительности  $c_i$ :

$$c_i = \frac{\Delta H}{\Delta x_i} \quad (2)$$

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

Задача в определении коэффициентов чувствительности сводится к измерению твердости образцовых мер 1-го разряда при различных вариациях составляющих бюджета неопределенности для каждого из диапазона твердости, воспроизводимого эталоном.

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  $\pm 1\%$ , каждое отдельное значение  $F$  находится в пределах этого допустимого отклонения.

В соответствии с [3], время действия предварительной нагрузки не должно превышать 3 с ( $T_p \leq 3$  с), время перехода от предварительной к основной нагрузке должно быть не менее 1 с, но не более 8 с ( $1 \text{ с} < t_{\text{apply}} < 8 \text{ с}$ ), время действия общей нагрузки  $T_{df}$  должно составлять от 4 с  $\pm 2$  с. Глубина отпечатка измеряется после снятия основной

нагрузки, и время считывания информации о глубине отпечатка (final reading stabilization time,  $t_{\text{post}}$ )

должно составлять от 3 с до 5 с. Также важно соблюдать скорость индентирования при приложении общей нагрузки –  $20 \text{ мкм/с} < V_{\text{fis}} < 40 \text{ мкм/с}$ . Подобные работы, по исследованию скорости индентирования для поддиапазона шкалы Супер-Роквелла, проводились в NPL и NIST, и описаны в работе [6].

## Проведение исследований и обработка результатов

При проведении эксперимента изменялась скорость индентирования от 2 мкм/с до 122 мкм/с, другие же составляющие (масса нагрузок, диаметр сферического, радиус и угол сфероконического инденторов, глубина проникновения индентора, время приложения нагрузок) принимались, как постоянные. Особенностью измерений в твердометрии является малая статистика результатов измерений вследствие ограниченных размеров исследуемой меры твердости. Так, даже при проведении международных сличений, для каждой из стран участниц, предоставляется возможности измерений в 5-6 контрольных точках.

На рис. 1 представлена зависимость измеренных значений твердости от скорости индентирования.

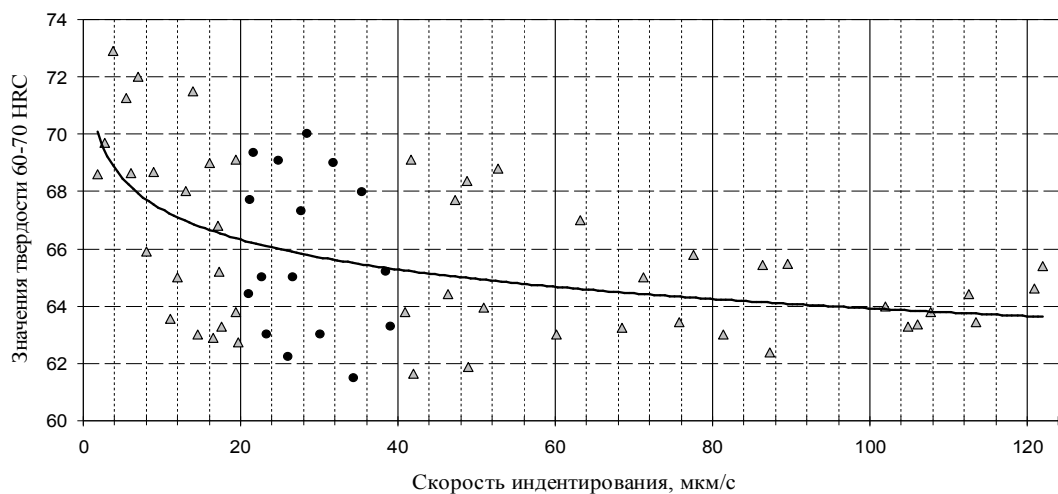


Рис. 1. Зависимость измеренных значений твердости от скорости индентирования

Методом наименьших квадратов линейно аппроксимируем, полученные точки на графике для каждого из участков (от 2 мкм/с до 20 мкм/с, от 20 мкм/с до 40 мкм/с и т.д.). Определяем уравнение полученной прямой и коэффициент чувствительности (тангенс угла наклона прямой) в каждом поддиапазоне скоростей.

Снижение скорости индентирования ниже 20 мкм/с (до 2 мкм/с) приводит к увеличению значений твердости. Увеличение скорости индентирования выше 40 мкм/с (от 40 до 122 мкм/с) приводит к

уменьшению значений твердости. При этом, естественно, изменяется коэффициент чувствительности для скорости индентирования, что приводит к изменению неопределенности для поддиапазона.

На рис. 2-7 представлены графики для определения коэффициентов чувствительности в зависимости от скорости индентирования.

В табл. 1 представлена зависимость изменения расширенной неопределенности при уменьшении и увеличении скорости индентирования для диапазона 60-70 HRC.

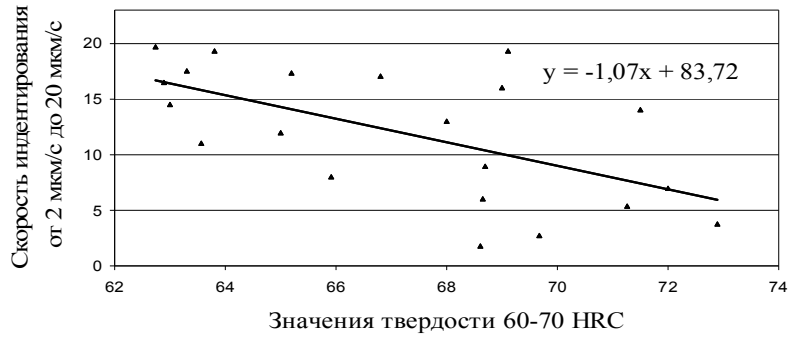


Рис. 2. Изменение скорости инденування от 2 мкм/с до 20 мкм/с

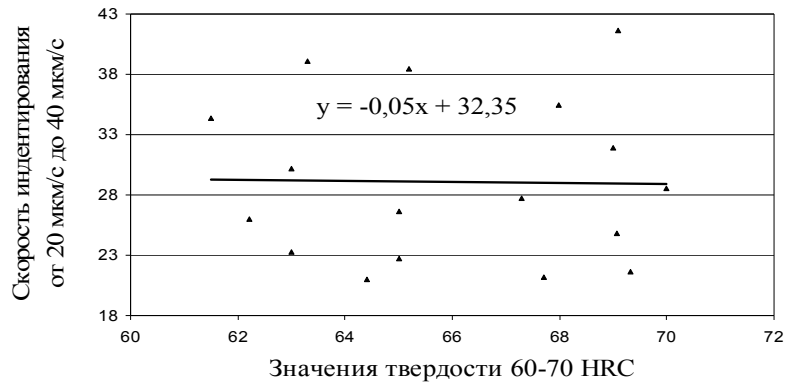


Рис. 3. Изменение скорости инденування от 20 мкм/с до 40 мкм/с

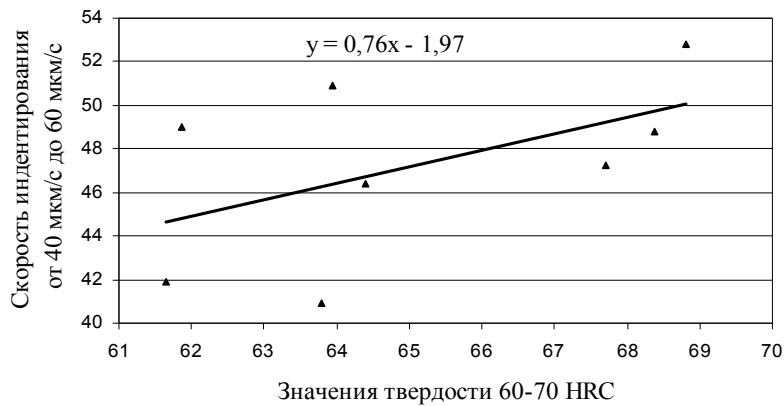


Рис. 4. Изменение скорости инденування от 40 мкм/с до 60 мкм/с

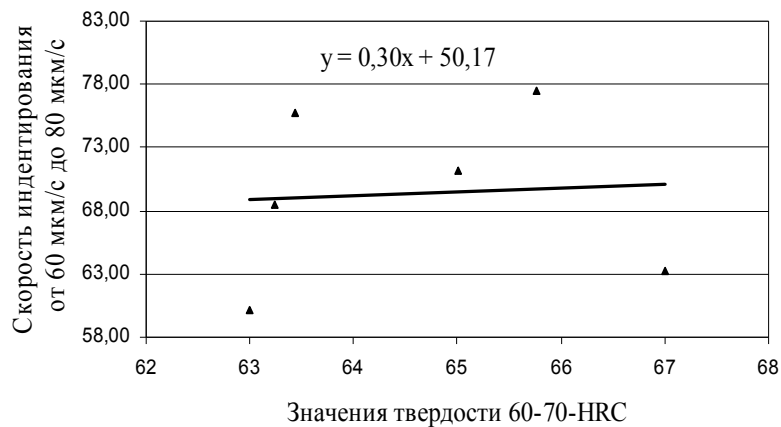


Рис. 5. Изменение скорости инденування от 60 мкм/с до 80 мкм/с

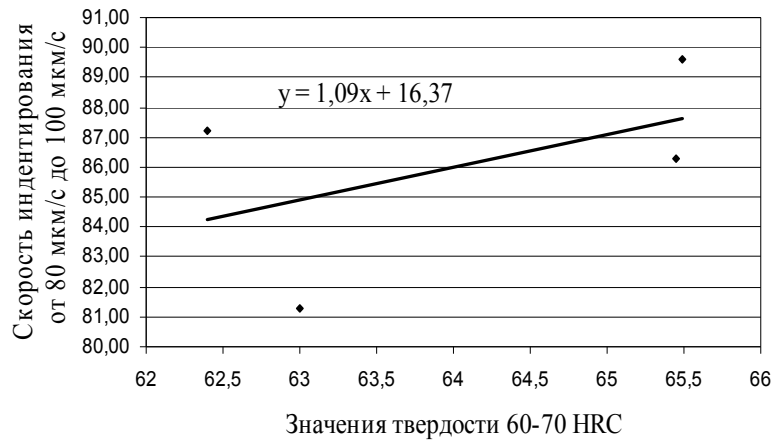


Рис. 6. Изменение скорости индентирования от 80 мкм/с до 100 мкм/с

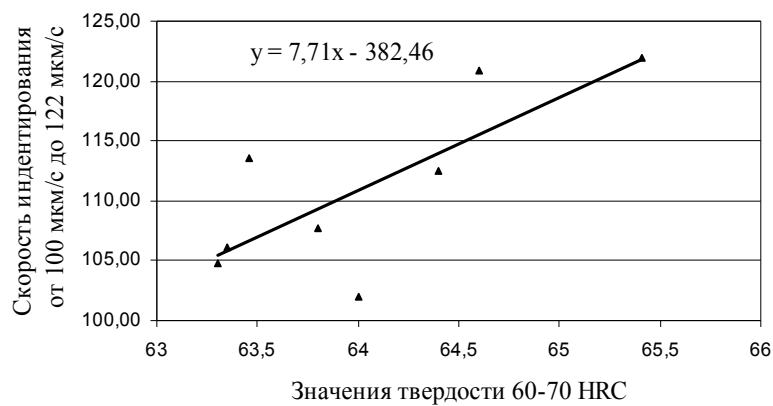


Рис. 7. Изменение скорости индентирования от 100 мкм/с до 122 мкм/с

Таблица 1

Зависимость изменения расширенной неопределенности

	Скорость индентирования, мкм/с					
	от 2 до 20	от 20 до 40	от 40 до 60	от 60 до 80	от 80 до 100	от 100 до 122
$c_i = \Delta H / \Delta x_i$	-1,07	-0,05	0,76	0,30	1,09	7,71
$U_p$ , HRC	0,948	0,391	0,727	0,458	0,963	6,244

Для поддиапазона 60-70 HRC рассчитанная расширенная неопределенности при скорости индентирования в соответствии с [3] составляет 0,391 HRC при  $p=0,95$ . Данные расчеты подтверждают необходимость четкого соблюдения диапазона скорости нагружения индентора (скорости индентирования).

На основании определенных коэффициентов чувствительности составляется бюджет неопределенности по каждому поддиапазону. Согласно [2] проводится вычисление суммарной стандартной и расширенной неопределенностей. В качестве примера представим бюджет неопределенности для поддиапазона 60-70 HRC (табл. 2).

При проведении международных сличений, вычисленные значения расширенной неопределенности

сравниваются со значениями расширенной неопределенности стран-участников международных сличений.

Для каждого поддиапазона твердости строятся графики, отображающие измеренные каждым из участников сличений значения твердости с расширенной неопределенностью.

В качестве примера, на рис. 8 отображено графическое представление результата измерения для поддиапазона 60 – 70 HRC по шкале Роквелла.

По результатам графического представления результатов делается вывод о подтверждении или неподтверждении заявленных значений неопределенности для каждого участника по каждому из поддиапазону твердости.

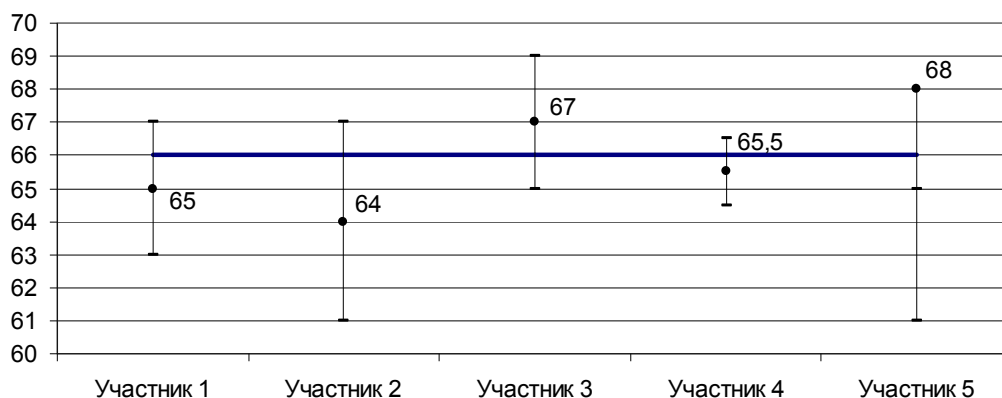


Рис. 8. Результаты международных сличений в опорной точке 66 HRC

Таблица 2

Бюджет неопределенности для поддиапазона 60-70 HRC

Параметр, ед. изм.	Отличие от номинального значения, $\Delta x_i$	Стандартная неопределенность, $u(x_i) = \frac{\Delta x_i}{\sqrt{3}}$	Коэффициент чувствительности, $c_i = \frac{\Delta H}{\Delta x_i}$	Отклонение значения твердости, $\Delta H_i = \Delta x_i \times c_i$ , HRC	Вклад неопределенности, $u_i(H) = c_i \times u(x_i)$ , HRC
$F_0$ , Н	0,2	0,115	-0,17	-0,034	-0,020
F, Н	1,5	0,886	-0,15	-0,225	-0,130
$\alpha_m$ , °	0,1	0,058	0,19	0,019	0,011
$R_\alpha$ , мм	1,0	0,577	0,19	0,19	0,110
l, мкм	0,1	0,058	0,5	0,05	0,029
$V_{fis}$ , мкм/с	0,7	0,404	-0,05	-0,035	-0,020
$T_p$ , с	0,2	0,115	0,03	0,006	0,003
$T_{df}$ , с	0,2	0,115	0,03	0,006	0,003
d, мкм	0,3	0,173	0,5	0,15	0,087
Стандартная неопределенность $u(H) = \sqrt{\sum_i u_i^2(H)}$ , HRC					0,195
Расширенная неопределенность $U_p = k \times u(H)$ , HRC					0,391

## Выводы

При проведении международных сличений в области твердометрии, выполнение требований ISO 6508 - 1: 2005, ISO 6508 - 2:2005, ISO 6508 - 3: 2005 обеспечивает правильность расчетов и обработку результатов. Корректно представленные расчеты и результаты сличений позволяет (в случае положительных результатов) подтвердить соответствующую строку СМС (calibration and measurement capabilities) о калибровочных и измерительных возмож-

ностях страны. Положительные результаты международных сличений и строка СМС представляются на сайте JCRB (Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and the BIPM) – Объединенного Комитета международного бюро мер и весов (МБМВ) и Региональной метрологической организации (РМО). СМС строка характеризует качество метрологических услуг, предоставляемых потребителям на постоянной основе метрологической организацией страны, что важно при торговых и экономических связях между ними.

В качестве перспективных направлений для исследований является определение объединяющего все методы (Виккерс, Бринелль, Шор, Кnoop и т.д.) алгоритма проведения экспериментов по определению значений твердости материалов. Данное исследование важно при уточнении существующей таблицы сравнения чисел твердости, определенных различными методами, согласно ASTM E140-07 [7]. Кроме того, таблицы перевода чисел твердости из одного метода в другой имеют в своей основе постулат, что твердость не зависит от нагрузки индентирования и представляет собой константу для конкретного материала.

На практике же, каждый из методов измерения твердости использует свою диаграмму индентирования (алгоритм измерений). В этой связи, в качестве основного критерия для пересчета чисел твердости, полученных разными методами, может быть принята глубина внедрения индентора определенной формы в зависимости от приложенной нагрузки [8].

Таким образом, за основу, при разработке методик пересчета чисел твердости от одного метода к другому может быть принята общая диаграмма индентирования, но с использованием общего индентора или группы однотипных (одинаковая форма, но разный диаметр наконечника) инденторов.

Четкое соблюдение алгоритма измерений значений твердости важно при решении задачи моделировании процесса индентирования для прогнозирования твердости вновь создаваемых материалов или материалов с напылением.

## Список литературы

1. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». – С.-Пб: ФГУП „Всероссийский НИИ метрологии 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)».
3. ISO 6508-1: Metallic Materials – Rockwell hardness test (scale A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T) – Part 1: Test method, Geneva, International Organization for Standardization, 2005.
4. ISO 6508-2: Metallic Materials – Rockwell hardness test (scale A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T) – Part 2: Verification and calibration of the testing machine, Geneva, International Organization for Standardization, 2005.
5. ISO 6508-3: Metallic Materials – Rockwell hardness test (scale A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T) – Part 3: calibration of reference blocks, Geneva, International Organization for Standardization, 2005.
6. Brice L., Low S., Jiggetts R. Determination of sensitivity coefficients for Rockwell hardness scales HRA, HR15N, HR30N. NIST, XVIII IMEKO World congress “Metrology for a Sustainable Development, September, 17-22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil.
7. Standard Hardness Conversion Table for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers, Rockwell hardness, Superficial Hardness, Knoop hardness and Scleroscope hardness: ASTM E140-07 – 07.2010. – 21 p.
8. Моценко В.И. Новые методы определения твердости материалов / В.И. Моценко. – Х.: ХНАДУ, 2012. – 324 с.

Поступила в редколлегию 12.02.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШКОРОСТІ ІНДЕНТУВАННЯ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ТВЕРДОСТІ

В.В. Склярів, Я.С. Довженко

*В статті описуються проведені роботи по дослідженню впливу шкороності індентування при вимірюванні твердості за шкалою Роквелла. Визначені коефіцієнти чутливості при різній швидкості введення індентору в міру твердості. Отримані залежності вимірюваної твердості від швидкості індентування для сфероконічного індентору. Показано вплив швидкості індентування на розширену невизначеність при вимірюванні твердості в під діапазоні 60-70 HRC. Роботи проводились на державному первинному еталоні України одиниць твердості (ДЕТУ 02-04-99), в рамках підготовки еталона до міжнародних звірень за проектом КООМЕТ 560/UA/12.*

**Ключові слова:** твердість, швидкість індентування, коефіцієнт чутливості, невизначеність.

## THE INFLUENCE RESEARCH OF THE INDENTATION SPEED IN THE HARDNESS MEASUREMENT

V.V. Skliarov, Y.S. Dovzhenko

*The article describes the performed works on the research of influence of the indentation speed in the hardness measurement on the Rockwell's scale. The sensitivity coefficients over a full range of indenter penetration speeds in the measure of hardness are defined. The dependences of measured hardness from indentation speed while using spherical and conical indenter are received. The influence of the indentation speed on the expanded uncertainty at the hardness measurement in the range of 60-70 HRC is presented. The works were held using the national primary standard of hardness units of Ukraine (DETU 02-04-99), within the framework of preparing the standard to the international comparisons according to the project COOMET 560/UA/12.*

**Key words:** the hardness, the indentation speed, the sensitivity coefficient, the uncertainty.