

УДК 621.9.015, 544.228

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ  
ТВЕРДОСТИ И РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА С ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА**  
Тявловский А. К., Тявловский К. Л., Жарин А. Л., Воробей Р. И., Гусев О. К., Пантелеев К. В.,  
Борисенок С. В., Самарина А. В.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Проведены исследования зависимости между твердостью поверхности стальных образцов и относительными значениями работы выхода электрона, измеряемыми по методу Кельвина-Зисмана. Для исследований использовался ряд однотипных образцов из стали 40X, закаленных на твердость от 25HRC до 48HRC. Результаты сопоставлялись с существующими математическими моделями, предполагающими наличие взаимосвязи между параметрами твердости и работы выхода электрона в виде степенной зависимости 6-й степени. Экспериментально показано, что твердость поверхности оказывает существенно меньшее влияние на работу выхода электрона, чем нарушения химического состава и коррозионный потенциал.

**Ключевые слова:** поверхность; твердость; модуль Юнга; работа выхода электрона; сканирующий зонд Кельвина.

**EXPERIMENTAL STUDY OF A FUNCTIONAL DEPENDENCE BETWEEN METAL'S SURFACE  
HARDNESS AND WORK FUNCTION**

**Tyavlovsky A., Tyavlovsky K., Zharin A., Vorobey R., Gusev O.,  
Pantsialeveu K., Borisyonok S., Samaryna A.**

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The dependence between steel samples' surface hardness and relative work function values measured with Kelvin-Ziesman technique was studied. The study used uniform samples of 40X steel hardened to 25HRC...48HRC. The results were compared with existing mathematical models that assume a power dependence of the 6<sup>th</sup> degree between the parameters of hardness and the work function. The experimental results prove that the influence of surface hardness on work function is much less than that of chemical composition variations and corrosion potential.

**Key words:** surface; hardness; Young's modulus; work function; scanning Kelvin probe.

*Адрес для переписки: Тявловский А. К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: tyavlovsky@bntu.by*

Интерес к бесконтактным измерениям работы выхода электрона (РВЭ) с поверхности методом сканирующего зонда Кельвина для выявления и картирования дефектов поверхности изделий из металлов и сплавов определяется полностью неразрушающим (не воздействующим на поверхность) характером данного метода, простотой технической реализации картирования поверхности с практически любым требуемым пространственным разрешением и исключительно высокой чувствительностью РВЭ к физическим, и в частности механическим, параметрам поверхности. Различными авторами измеряемые сканирующим зондом Кельвина значения РВЭ связываются с модулем Юнга [1] или пределом текучести [2] металла, комплексно с модулем Юнга и твердостью [3], либо с коррозионным потенциалом поверхности [4]. В частности, на основе теоретических выкладок *G. Hua* и *D. Li* предложена математическая модель, численно связывающая РВЭ  $\phi$  с модулем Юнга  $E$  [1] степенной зависимостью вида  $E \sim \alpha \phi^6$ , где  $\alpha$  – постоянная Маделунга. Авторами указанной работы в качестве подтве-

рждения математической модели приводится зависимость модуля Юнга от табличных значений РВЭ для различных металлов (рисунок 1), при этом другие факторы, такие как количество валентных электронов, форма кристаллической решетки и др., рассматриваются как второстепенные по сравнению с модулем Юнга, хотя и влияющие на значения РВЭ, что отражает разброс на графике реальных значений РВЭ для металлов, имеющих близкие значения модуля Юнга.

В работе [3] рассматривается взаимосвязь РВЭ с твердостью поверхности. По результатам математического моделирования показывается, что твердость поверхности по Виккерсу HV находится в прямой пропорциональной зависимости от модуля Юнга  $E$ , из чего следует аналогичный характер зависимости параметра твердости по Виккерсу от РВЭ в виде функции шестой степени:  $HV \sim \alpha \phi^6$ . Определение коэффициента пропорциональности между РВЭ и модулем Юнга или твердостью по Виккерсу требует знания физических и геометрических параметров кристаллической решетки металла, недоступных

для прямого измерения и/или определяемых только приближенно [1]. При этом измерения по методу Кельвина-Зисмана дают не собственно значения РВЭ, а значение контактной разности потенциалов (КРП)  $U_{CPD}$ , определяемое как

$$U_{CPD} = \frac{\varphi_{probe} - \varphi}{e}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{probe}$  – РВЭ чувствительного элемента зонда Кельвина,  $e$  – элементарный заряд.

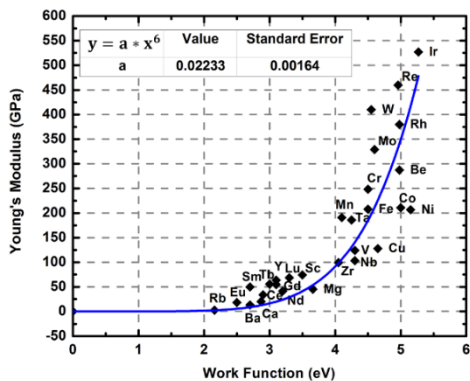


Рисунок 1 – Взаимосвязь модуля Юнга и РВЭ с поверхности различных металлов согласно [1]

В случае одного и того же металла (например, стали известного химического состава после различных режимов упрочняющей термообработки) параметры, составляющие коэффициент пропорциональности, можно в первом приближении считать постоянными, объединив их в общем множителе  $k$ . Тогда, полагая приведенные в [1] и [3] математические модели справедливыми, зависимость между твердостью и КРП участка поверхности металлического образца можно выразить в виде

$$HV = k(\varphi_{probe} - eU_{CPD})^6. \quad (2)$$

Отсюда следует, что выполнив ряд измерений  $U_{CPD}$  и  $HV$  для образцов из одного и того же металла и аппроксимировав полученную зависимость  $HV(U_{CPD})$  полиномом 6-й степени, можно однозначно определить неизвестные константы модели  $k$  и  $\varphi_{probe}$ , а зная  $\varphi_{probe}$  – найти из (1) абсолютную величину РВЭ поверхности образца, недоступную прямым измерениям по методу Кельвина-Зисмана.

Для решения этой задачи были подготовлены 6 образцов в виде шайб из стали 40Х, нарезанных из одного прутка и далее прошедших упрочняющую термообработку в различных режимах. Измеренные после термообработки значения твердости этих образцов составили 25HRC, 30HRC, 32HRC, 37HRC, 43HRC и 48HRC по шкале Роквелла. После этого методом сканирующего зонда Кельвина были определены средние значения КРП участков, на которых измерялась твердость. Результаты измерений сведены в таблицу. Для пересчета значений твердости по Роквеллу HRC в твердость по Виккерсу HV использовался

онлайн-калькулятор [5].

Таблица – Результаты измерения твердости и КРП

|                |     |     |     |     |     |     |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| HRC            | 25  | 30  | 32  | 37  | 43  | 48  |
| HV             | 255 | 285 | 303 | 351 | 424 | 490 |
| $U_{CPD}$ , мВ | 25  | 29  | 23  | 31  | 27  | 26  |

Можно видеть, что полученная экспериментальная зависимость  $HV(U_{CPD})$  не является монотонно возрастающей, что исключает возможность ее аппроксимации полиномом четного порядка. Приведенная на рисунке 2 в качестве примера аппроксимация экспериментальных данных полиномом нечетного (третьего) порядка также не является удовлетворительной даже с учетом известных погрешностей измерения КРП.

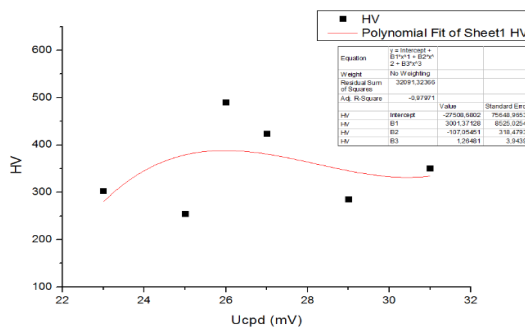


Рисунок 2 – Аппроксимация результатов экспериментального исследования зависимости  $HV(U_{CPD})$  степенным полиномом

Следует подчеркнуть, что полученные экспериментальные результаты не являются доказательством некорректности приведенных в [1] и [3] математических моделей. Измерительный сигнал сканирующего зонда Кельвина является многопараметрическим и зависит от большого числа параметров состояния поверхности [6], включая, в частности, ее окисленное состояние или присутствие загрязнений [4]. Это подтверждается приведенной на рисунке 3 картой распределения значений КРП одного из образцов, полученной в результате полного сканирования поверхности сканирующим зондом Кельвина. При однородном распределении твердости поверхности, обусловленном равномерностью режима термообработки, распределение КРП является существенно неравномерным, причем разброс значений в пределах одного образца значительно превышает разницу средних значений КРП между образцами с различной твердостью. Обращает на себя внимание четко прослеживаемый на визуализированном изображении рисунка 3 след спиртового маркера, которым была нанесена надпись «30HRC». Отклонение значений КРП в этой области на 20 мВ от среднего для данного образца подтверждает определяющее влияние отклонений химического состава (в данном случае, поверхностных загрязнений) на значения КРП и, соответственно, РВЭ механически однородной поверхности.

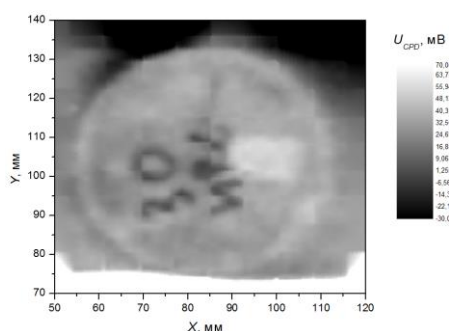


Рисунок 3 – Карта распределения относительных значений РВЭ образца с твердостью 30HRC

Можно сделать вывод, что, несмотря на теретически обоснованную взаимосвязь твердости и работы выхода электрона с поверхности металла, для реальных образцов, даже при тщательной предварительной подготовке их поверхности (как в описываемых исследованиях), влияние коррозионных явлений и поверхностных загрязнений многократно превосходит влияние физических факторов, таких как твердость и модуль Юнга. Поскольку реальные поверхности металлов всегда характеризуются неоднородностью распределения коррозионного потенциала и / или локальными загрязнениями, то визуализируемые методом сканирующего зонда Кельвина неоднородности

распределения КРП должны трактоваться как дефекты структуры и неоднородности химического состава поверхности образца, а не как различие механических свойств участков поверхности.

#### Литература

1. Hua, G. Generic relation between the electron work function and Young's modulus of metals / G. Hua, D. Li // Applied Physics Letters. – 2011, V. 99. – P. 041907.
2. Hua, G. The correlation between the electron work function and yield strength of metals / G. Hua, D. Li // Phys. Status Solidi B. – 2012. – P. 1–4.
3. Lu, H. Dependence of the mechanical behavior of alloys on their electron work function—An alternative parameter for materials design / H. Lu, G. Hua, D. Li // Applied Physics Letters. – 2013, V. 103. – P. 261902.
4. In Situ Time-Lapse SKPFM Investigation of Sensitized AA5083 Aluminum Alloy to Understand Localized Corrosion / Y. Liew [et al.] // J. Electrochem. Soc. – October 2020. – P. 1–28.
5. Steel Hardness Conversion Table [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.steelexpress.co.uk/steel-hardness-conversion.html>.
6. Многопараметрические измерения электрического потенциала поверхности с использованием адаптивной односигнальной модели / К. Л. Тявловский [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2008, № 2. – С. 27–32.

УДК 621.383

### МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОГО ФОТОТРАНЗИСТОРА

Тявловский К. Л., Воробей Р. И., Гусев О. К., Свистун А. И., Тявловский А. К., Шадурская Л. И.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Описана структура и основные характеристики мультипараметрического сенсора на основе полевого фототранзистора. Применение полупроводников с многозарядной примесью позволяет реализовать качественно новые преобразовательные характеристики.

**Ключевые слова:** полевой фототранзистор; полупроводник; многозарядная примесь; управление характеристикой чувствительности.

### MULTI -PARAMETRIC SENSORS BASED ON FIELD PHOTOTRANSISTOR

Tyavlovsky K., Vorobey R., Gusev O., Svistun A., Tyavlovsky A., Shadurskaya L.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The structure and basic characteristics of the multi -parametric sensors based on field phototransistor are described. The use of semiconductors with a multi-charged admixture allows you to realize a qualitatively new composition of the transformative characteristics.

**Key words:** field phototransistor; semiconductor; multifaceted admixture; control of the characterization of sensation.

*Адрес для переписки: Тявловский К. Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by*

Сенсоры должны избирательно преобразовывать измеряемую физическую величину в электрический сигнал в форме, удобной для передачи, обработки и сравнения с эталонной мерой. Однако в ряде случаев используются сенсоры, способные воспринимать и преобразовывать несколько физических величин с возможностью разделения одного измерительного сигнала путем использования специальных методик

и алгоритмов измерения [1]. Такие мультипараметрические сенсоры могут быть реализованы на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью, слабо легированных глубокими примесями [2], формирующими в запрещенной зоне несколько энергетических уровней (рисунок 1) с разными зарядовыми состояниями. Особенности процессов перезарядки различных энергетических