

## ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПО ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЁРДОСТИ ПО РОКВЕЛЛУ

*Жантыбаев А.А.<sup>1</sup>, Подшивало И.И.<sup>2</sup>, Берженару Н.В.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Томский политехнический университет, г. Томск*

*Научный руководитель: Осипов С.П., к. т.н., доцент кафедры  
физических методов и приборов контроля качества*

*<sup>2</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет*

***Аннотация.** Значение твердости поверхностного слоя металла, полученное в результате единичного акта измерения твердости, рассматривается в качестве случайной величины. Исследована связь плотности распределения случайной величины с техническим состоянием поверхности металлического изделия. Проведена серия экспериментальных работ по оценке основных параметров твёрдости по Роквеллу. Проверены гипотезы о принадлежности распределения твердости к классу логнормальных распределений. На основе сопоставления результатов механических и оптико-визуальных испытаний подтверждена возможность оценки технического состояния металлических изделий по результатам экспериментального определения плотности распределения твёрдости по Роквеллу.*

***Ключевые слова:** твердость металла; твёрдость по Роквеллу, техническое состояние; случайная величина; плотность распределения; логнормальное распределение.*

### *Введение*

Во время длительной эксплуатации металлических изделий, механизмов, машин, конструкций и сооружений (далее металлических объектов) происходит ухудшение их технического состояния, вызванное воздействием различных механических, физических, химических, биологических и прочих факторов [1–4]. Наиболее значимыми процессами, приводящими к деградации металлических объектов, являются абразивный износ, коррозия, циклические разнонаправленные механические воздействия высокой интенсивности, усталость металла. Максимальные уровни отрицательных воздействий испытывают поверхностные слои металла, поэтому оценка технического состояния объекта в целом характеризуется, не в последнюю очередь, состоянием поверхностных слоёв металлических объектов. Для оценки технического состояния металлических объектов в процессе их изготовления и эксплуатации при-

меняют методы механических испытаний, и прежде всего, измерение твердости [5–8]. В последние годы ускоренными темпами развиваются способы измерения твердости, совершенствуются приборы, их реализующие, расширяются области их применения [9–10]. В технических руководствах по применению измерителей твердости рекомендуется оценивать твердость по результатам измерений в нескольких точках объекта. В работах [11–14] рекомендовано, дополнительно к среднему значению твердости, использовать одну из мер рассеяния анализируемой случайной величины, что позволяет повысить качество оценки технического состояния поверхности металлического объекта. До недавнего времени применение упомянутой реализации метода измерения твердости сдерживалось низкой производительностью приборов, существенным воздействием на испытываемые поверхности, размерами инденторов. Появление на рынке более точных, обладающих лучшей производительностью и уменьшенными уровнями воздействий на объекты испытаний привело к внедрению способа оценки технического состояния металлических объектов с одновременной оценкой среднего значения твердости и некоторой меры рассеяния твердости в ряде отраслей промышленности, транспорта и строительства [15–17]. Для описания плотности распределения твердости используют нормальное, логнормальное распределение, распределение Вейбулла и их модификации. Все указанные распределения являются двухпараметрическими. Возможно, что для оценки технического состояния металлических объектов, эксплуатируемых длительное время, недостаточно двух параметров твердости, рассматриваемой в качестве случайной величины.

## *2. Постановка эксперимента*

### *2.1. Гипотезы*

Конкретизируем предположение, высказанное во введении, несколько сузив его. Для этого необходимо определиться с объектами испытаний и оцениваемым параметром.

*Объектами неразрушающих испытаний* являются изделия из стали, в качестве которых выбраны стандартные образцы твердости по Роквеллу, Викерсу и Бринеллю. Такие изделия, не побывавшие в эксплуатации и хранившиеся в идеальных условиях, отличаются высоким качеством обработки поверхности, поэтому влияние шероховатости поверхности изделий на оценку характеристик твердости, как случайной величины, сводится к минимуму. Встречаются два вида повреждений испытываемых объектов – многочисленные механические повреждения и коррозия. Поверхности некоторых объектов подвергались механическим воздействиям не в равной степени.

Оцениваемым параметром объектов испытаний (анализируемой случайной величиной) является твердость поверхности объекта по Роквеллу в шкале С –  $HRC$ . Диапазон изменения твердости поверхности испытываемых образцов находится в интервале от 16 до 70 единиц твердости по Роквеллу в шкале С –  $HRC$ .

В работе [18] показано, что анализируемая случайная величина распределена по нормальному закону. Твердость поверхности испытываемого образца не может принимать отрицательных значений, поэтому, например, в [11–15] для анализа твердости по Виккерсу используют комбинацию логнормального распределения и распределения Вейбулла.

Сформулируем несколько предложений в форме гипотез применительно к измерению твердости по Роквеллу металлических объектов (испытываемых образцов) с различной степенью повреждения поверхности в процессе эксплуатации.

*Гипотеза А.* Твердость поверхности испытываемого образца как случайная величина распределена по логнормальному закону.

Выше подчеркнуто, что поверхности испытываемых образцов могут быть повреждены в разной степени. Можно сформулировать гипотезу, связанную с опровержением этого факта.

*Гипотеза Б.* Средние значения твердости противоположных поверхностей испытываемых образцов равны.

В случае, если гипотеза А не выполняется для некоторых образцов, то это будет свидетельством необходимости отказа от двухпараметрической характеристики твердости как случайной величины.

Невыполнения статистической гипотезы Б позволяет сделать вывод о применимости на практике главной гипотезы.

*Гипотеза В.* Наиболее полно техническое состояние металлического объекта может быть оценено по плотности распределения анализируемой случайной величины.

## 2.2. Основные формулы

Измерения проводились динамическим измерителем твердости с выбираемой шкалой Константой – К5Д в соответствии с рекомендациями, указанными в технической документации или методической литературе.

Для каждой из больших сторон испытываемого образца формировались выборка твердости –  $(HRC_1, HRC_2, \dots, HRC_n)$ , здесь  $n$  – объем выборки,  $n=100$  для всех испытываемых образцов. Испытывали 9 образцов.

Оценивались следующие выборочные параметры – среднее значение твердости  $\overline{HRC}$ , среднее квадратичное отклонение твердости  $\sigma_{HRC}$ .

Для проверки гипотезы **A** вычислялись  $\bar{x} = \overline{\ln HRC}$  и  $\sigma_{\ln HRC}$ .

Формулы для вычисления  $\overline{HRC}$ ,  $\sigma_{HRC}$ ,  $\overline{\ln HRC}$ ,  $\sigma_{\ln HRC}$  имеют вид [18]

$$\begin{aligned} \overline{HRC} &= \sum_{i=1}^n HRC_i & \sigma_{HRC} &= \frac{\sum_{i=1}^n (HRC_i - \overline{HRC})^2}{n-1} \\ \overline{\ln HRC} &= \sum_{i=1}^n \ln HRC_i & \sigma_{\ln HRC} &= \frac{\sum_{i=1}^n (\ln HRC_i - \overline{\ln HRC})^2}{n-1} \end{aligned} \quad (1)$$

Для проверки гипотезы о принадлежности функции распределения случайной величины тому или иному классу распределений применяется критерий Пирсона [18]. В критерии Пирсона сравниваются эмпирический коэффициент  $\chi_{\text{эмп}}^2$  и  $\chi_{\gamma}^2(k)$ , здесь  $\gamma$  – доверительная вероятность,  $k$  – число степеней свободы. По результатам этого сравнения выдается заключение о подтверждении или опровержении выдвинутой статистической гипотезы.

Вычисление эмпирического коэффициента  $\chi_{\text{эмп}}^2$  состоит из нескольких этапов [18]. На первом этапе вся область изменения анализируемой случайной величины разбивается на несколько интервалов  $l$ , рекомендации по выбору этих интервалов приведены в [18]. Эмпирический коэффициент  $\chi_{\text{эмп}}^2$  вычисляется по формуле

$$\chi_{\text{эмп}}^2 = \sum_{i=1}^l \frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i}, \quad (2)$$

где  $m_i$  – количество точек из анализируемой выборки, которые попали в  $i$ -ый интервал;  $P_i$  – теоретическая вероятность попадания в  $i$ -ый интервал.

В нашем случае анализируется логнормальное распределение, это означает, что натуральный логарифм от исходной случайной величины –  $x = \ln HRC$  является нормально распределенной случайной величиной. Поэтому теоретические вероятности  $P_i$  находятся с помощью следующего выражения

$$P_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\xi)^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (3)$$

где  $x_0, x_1, \dots, x_l$  – разбиение области определения случайной величины  $x$ . Для рассматриваемого случая  $x_0 = -\infty, x_l = \infty$ .

Будем задаваться значением доверительной вероятности  $\gamma = 0,95$ .

Число степеней свободы  $k$  вычисляется исходя из числа интервалов разбиения  $l$  и числа параметров распределения, для логнормального распределения их два

$$k = l - 2 - 1 = l - 3. \quad (4)$$

По значениям  $k$  и  $\gamma$  из таблицы  $\chi^2$  [18] находится табличное значение  $\chi_\gamma^2(k)$ . Отметим, что для каждого образца может быть свое число анализируемых интервалов и свое число степеней свободы. Как правило, число анализируемых интервалов не должно быть меньше 5, следовательно, число степеней свободы не меньше 2.

Если выполняется условие

$$\chi_{\text{эмп}}^2 < \chi_\gamma^2(k), \quad (5)$$

то гипотеза о том, что распределение случайной величины  $x = \ln HRC$  относится к классу нормальных распределений с доверительной вероятностью равной  $\gamma$ . Для каждого испытуемого образца параметры нормального распределения –  $\overline{\ln HRC}$  и  $\sigma_{\ln HRC}$  вычисляются с помощью выражений (1).

Если условие (5) не выполняется, то предлагаемая гипотеза отвергается с соответствующей доверительной вероятностью.

### 3. Обработка экспериментальных данных

#### 3.1 Проверка гипотезы А

В процедуру испытаний были вовлечены 9 образцов. Измерения проводились с двух сторон. В таблицу 1 сведены результаты оценки следующих 1 параметров  $\overline{HRC}$ ,  $\sigma_{HRC}$ ,  $\overline{\ln HRC}$ ,  $\sigma_{\ln HRC}$  и  $\chi_{\text{эмп}}^2$ . В таблице 1 также указывается соответствие (+) или несоответствие (–) гипотезе А экспериментальных данных для рассматриваемого образца.

В результате анализа данных, приведенных в таблице 1 можно сделать следующий вывод – гипотеза о том, что твердость как случайная величина имеет логнормальное распределение (гипотеза А), подтверждается в 10 случаях, а не подтверждается в 8 случаях. Очевидно, что изначально обе измерительные поверхности одного и того же образца были практически идентичными по твердости.

Таблица 1 – Сводная таблица обработки экспериментальных данных\*

№ образца	$\overline{HRC}$	$\overline{\ln HRC}$	$\sigma_{HRC}$	$\sigma_{\ln HRC}$	$\chi_{\text{эмп}}^2$	Соответствие гипотезе	Примечание
1-1	43,844	3,77	5,88	0,143	29,634	-	ММП
1-2	44,781	3,80	4,88	0,112	1,649	+	
2-1	31,834	3,45	4,8	0,150	2,040	+	
2-2	34,073	3,52	3,02	0,088	2,097	+	

№ образца	$\overline{HRC}$	$\overline{\ln HRC}$	$\sigma HRC$	$\sigma \ln HRC$	$\chi^2_{эмп}$	Соответствие гипотезе	Примечание
3-1	32,18	3,40	2,34	0,084	18,024	-	ММП
3-2	34,163	3,52	3,96	0,111	7,071	-	ММП
4-1	30,82	3,42	3,77	0,125	8,687	+	
4-2	30,864	3,42	4,71	0,158	9,341	+	
5-1	48,745	3,83	4,44	0,094	35,889	+	
5-2	49,157	3,89	3,93	0,085	18,315	-	ММП, КП
6-1	56,523	4,03	3,44	0,062	5,536	+	
6-2	57,187	4,01	1,73	0,032	24,859	-	ММП, КП
7-1	20,57	3,02	1,52	0,071	4,158	+	
7-2	19,949	2,99	1,39	0,066	6,665	+	
8-1	21,818	3,08	1,16	0,050	28,724	-	ММП
8-2	21,825	3,08	1,04	0,044	18,793	-	ММП
9-1	16,948	2,83	0,84	0,048	8,262	-	ММП
9-2	16,764	2,82	0,967	0,056	1,671	+	ММП

\* В примечаниях: ММП – многочисленные механические повреждения; КП – коррозионные поражения.

Для объяснения полученных расхождений были проведены визуально-оптические испытания образцов с помощью простейших оптических приборов – измерительной лупы HORIZON 10×4 и микроскопа МПБ-2. Особые отличия поверхности оформлены в виде примечаний, отмеченных в таблице 1. Анализ полученных испытаний и результатов экспериментальных исследований показал, что расхождение заключений о характере распределения твердости как случайной величины для разных поверхностей одного и того же объекта объясняется степенью поражения поверхности коррозией или степенью механических повреждений. Указанный вывод качественно свидетельствует о том, что характер распределения твердости как случайной величины изменяется при механических и химических воздействиях на поверхность металла. В пользу этого вывода говорят и результаты работы [16].

*Замечание.* Используемый в экспериментах динамический измеритель твердости металлов Константа – К5Д не в полной мере соответствует поставленной задаче, он имеет значительную погрешность единичного измерения твердости и малую разрядность. Более предпочтительным было бы применение для измерения твердости прибора Константа – К5У того же производителя, отличающегося более высокой точностью оценки твердости, применяющегося для более тонких и менее массивных испытуемых образцов. Дополнительным достоинством прибора Константа – К5У является существенно меньшая повреждаемость поверхности испы-

туемого изделия, что обуславливается применением другого физического принципа для оценки твердости поверхности металла.

### 3.2. Проверка гипотезы Б

Целью исследований является обоснование возможности оценки технического состояния металлических изделий по результатам измерения твердости. В разделе 3.1 приводятся результаты экспериментальной оценки выборочных параметров распределения твердости. К выборочным параметрам относятся  $\overline{HRC}$  – среднее значение твердости и  $\sigma_{HRC}$  – среднее квадратичное отклонение.

Проверим возможность идентификации материала объекта испытаний по среднему значению твердости и среднему квадратичному отклонению. Исходя из цели исследований, будем сравнивать данные по парам, то есть для двух поверхностей каждого образца. Воспользуемся критерием Стьюдента для проверки статистической гипотезы **Б** о равенстве средних значений твердости противоположных поверхностей испытываемых образцов.

Критерий Стьюдента основан на сравнении эмпирического коэффициента и табличного коэффициентов Стьюдента  $t_{\text{эмп}}$  и  $t_{\gamma}(k)$ , здесь  $\gamma$  – доверительная вероятность,  $k$  – число степеней свободы. Число степеней свободы связано с объемами исходных выборок  $n_1$  и  $n_2$  простейшим соотношением –  $k=n_1+n_2-2$ . Формула для вычисления эмпирического коэффициента Стьюдента  $t_{\text{эмп}}$  для рассматриваемой гипотезы **Б** имеет следующий вид

$$t_{\text{эмп}} = \frac{|\overline{HRC}_1 - \overline{HRC}_2|}{\sqrt{\frac{\sigma_{HRC_1}^2}{n_1} + \frac{\sigma_{HRC_2}^2}{n_2}}}, \quad (6)$$

здесь индексы 1, 2 соответствуют поверхности испытываемого образца.

Табличное значение коэффициента Стьюдента для доверительной вероятности  $\gamma=0,95$  и числа степеней свободы  $k=198$  равно  $t_{0,95}(198)=2,04$ .

В таблице 2 приведены значения эмпирических коэффициентов Стьюдента  $t_{\text{эмп}}$ , рассчитанные по формуле (6). Исходные данные для расчетов взяты из таблицы 1. В таблице 2 знак «+» означает подтверждение гипотезы **Б** с заданной доверительной вероятностью, а знак «-» свидетельствует о том, что гипотеза **Б** не подтвердилась.

Таблица 2 – Проверка гипотезы **Б** по критерию Стьюдента

Параметр	Образец								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_{эмп}$	1,226	3,948	4,311	0,073	0,694	1,724	3,014	0,045	1,436
Согласие с гипотезой <b>Б</b>	+	–	–	+	+	+	–	+	+

Полученные результаты свидетельствуют о наличии образцов, у которых средние значения твердости поверхностей различаются с доверительной вероятностью 95 %.

### 3.3. Проверка гипотезы *В*

Анализ результатов представленных в таблицах 1 и 2 позволяет утверждать, что существующих подходов к оценке технического состояния металлического объекта по анализируемой случайной величине недостаточно. Указанный вывод свидетельствует о том, что наиболее полно техническое состояние металлического объекта может быть оценено по плотности распределения твёрдости.

Получение более достоверных данных для комплексной проверки гипотезы **В** связано с необходимостью в проведении большего объема (большое количество образцов) исследований выборочных характеристик твердости как случайной величины с помощью более точных и широкодиапазонных измерителей твердости и привлечения более совершенных методов оценки качества испытуемых изделий, например, цифровых оптических микроскопов.

### 3. Выводы

В результате анализа экспериментальных данных можно с определенной долей уверенности сделать вывод о возможности оценки технического состояния металлических изделий в процессе эксплуатации по измерениям твердости поверхности испытуемых изделий по Роквеллу. Формируемая выборка значений твердости должна иметь значительный объем. В качестве критерия для оценки технического состояния испытуемых изделий предлагается использовать не только смещения оценок среднего значения и уровня рассеяния твердости по поверхности, но изменение характера выборочного распределения.

### Список информационных источников

1. Batchelor A. W., Lam L. N., Chandrasekaran M. Materials degradation and its control by surface engineering. – London : Imperial college press, 2002. – Vol. 119. – 408 p.

2. Verdan, S., Burato, G., Comet, M., Reinert, L., Fuzellier, H. Structural changes of metallic surfaces induced by ultrasound // *Ultrasonics sonochemistry*. – 2003. – Vol. 10. – No. 4. – P. 291–295.
3. Schroer, C., Wedemeyer, O., Skrypnik, A., Novotny, J., Konys, J. Corrosion kinetics of Steel T91 in flowing oxygen-containing lead–bismuth eutectic at 450° C // *Journal of Nuclear Materials*. – 2012. – Vol. 431. – No 1. – P. 105–112.
4. Ларин, П.Г., Жуков, Л.В., Кравченко, И.Н. Обоснование факторов, оказывающих влияние на надежность специальной техники в особых условиях эксплуатации // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 3–2. – С. 262–266.
5. Walley, S.M. Historical origins of indentation hardness testing // *Materials Science and Technology*. – 2012. – Vol. 28. – No. 9–10. – P. 1028–1044.
6. Ghazanfari, H., Naderi, M., Iranmanesh, M., Seydi, M., Poshteban, A. A comparative study of the microstructure and mechanical properties of HTLA steel welds obtained by the tungsten arc welding and resistance spot welding // *Materials Science and Engineering: A*. – 2012. – Vol. 534. – P. 90–100.
7. Гоголинский, К.В., Решетов, В.Н., Усеинов, А.С. Об унификации определения твердости и возможности перехода при ее измерении к размерным величинам // *Измерительная техника*. – 2011. – № 7. – С. 28–34.
8. Černý, M., Filípek, J., Mazal, P., & Dostál, P. Basic mechanical properties of layered steels // *Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendelinae brunensis*. – 2012. – V. 61. – P. 25–38.
9. Fischer-Cripps, A.C. *Contact Mechanics // Nanoindentation*. – Springer New York, 2011. – 282 p.
10. Lucca, D.A., Herrmann, K., Klopstein, M.J. Nanoindentation: Measuring methods and applications // *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. – 2010. – Vol. 59. – No. 2. – P. 803–819.
11. Лебедев, А. А., Маковецкий, И. В., Музыка, Н. Р., Волчек, Н. Л., Швец, В. П. Оценка поврежденности материала по рассеянию характеристик упругости и статической прочности // *Проблемы прочности*. – 2006. – № 2. – С. 5–14.
12. Музыка, Н. Р., Швец, В. П. Влияние вида нагружения на процесс накопления повреждений в материале // *Проблемы прочности*. – 2014. – № 1. – С. 130–136.
13. Лебедев, А. А., Музыка, Н. Р., Швец, В. П. Метод оценки вязкости разрушения материала по рассеянию характеристик твердости // *Проблемы прочности*. – 2007. – № 6 – С. 5–12.

14. Лебедев, А. А., Швец, В. П. Оценка поврежденности конструкционных сталей по параметрам рассеяния характеристик твердости материалов в нагруженном и разгруженном состояниях // Проблемы прочности. – 2008. – № 3. – С. 29–37.

15. Лебедев, А.А., Ламашевский, В.П., Музыка, Н.Р., Швец, В.П., Ефименко, Е.В. Кинетика накопления рассеянных повреждений в поликристаллических материалах с разным размером зерна при малых деформациях // Проблемы прочности. – 2011. – № 5. – С. 32–44.

16. Сосновский, Л.А., Махутов, Н.А., Кебиков, А.А. Рассеяние механических свойств рельсовой стали // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – № 11. – С. 59–62.

17. Кузьбожев, А.С., Агинец, Р.В., Смирнов, О.В. Исследование вариации твердости трубной стали 17Г1С в ходе статического нагружения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – № 12. – С. 49–53.

18. Natrella, M.G. Experimental statistics. – New York: Courier Dover Publications, 2013. – 515 p.

19. Корн, Т., Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М: Наука. 1973. – 831с.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА ИЗ ОБРАЗЦОВ БЕТОНА, АРМИРОВАННОГО СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРОЙ**

*Корзенюк И.Н.*

*<sup>1</sup>Томский политехнический университет, г. Томск  
Научный руководитель: Фурса Т.В., д. ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников,*

Из года в год на строительном рынке появляются новейшие, инновационные продукты, во многом превосходящие по характеристикам существующие. К таким, недавно появившимся продуктам, относится стеклопластиковая арматура.

Стеклопластиковая арматура является уникальным материалом, вобравшим в себя все самые лучшие качества прочих арматур и исключая из себя их недостатки. Применение бетона, армированного стеклопластиковой арматурой в сельскохозяйственном, промышленном и энергетическом строительстве позволяет решить такую проблему, как