

УДК 620.178.15

*ОСИПОВ СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ, канд. техн. наук,
osip1809@rambler.ru*

*ОСИПОВ ОЛЕГ СЕРГЕЕВИЧ, канд. техн. наук,
ososipov@rambler.ru*

*Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

*ПОДШИВАЛОВ ИВАН ИВАНОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
ivanpodchivalov@list.ru*

*БЕРЖЕНАРУ НАТАЛЬЯ ВАЛЕРЬЕВНА, магистрант,
nbezhenaru@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

*ЖАНТЫБАЕВ АЛИБЕК АЙВАР-БАУРЖАНОВИЧ, магистрант,
drlivesey1305@gmail.com*

*Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПО ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПО РОКВЕЛЛУ

Значение твердости поверхностного слоя металла по Роквеллу, 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 твердости по Роквеллу. Проверена гипотеза 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 твердости по Роквеллу.

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

*SERGEI P. OSIPOV, PhD, A/Professor,
osip1809@rambler.ru*

*OLEG. S. OSIPOV, PhD, A/Professor,
ososipov@rambler.ru*

*Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia*

*IVAN I. PODSHIVALOV, PhD, A/Professor,
ivanpodchivalov@list.ru*

*NATAL'YA V. BERZHENARU, Undergraduate Student,
nbezhenaru@mail.ru*

Tomsk State University of Architecture and Building,

2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia
ALIBEK A. ZHANTYBAEV, Undergraduate Student,
Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia

ESTIMATION OF TECHNICAL CONDITION OF METAL PRODUCTS USING ROCKWELL HARDNESS TEST METHOD

The value of Rockwell hardness of the metal layer obtained by a single measuring is considered in this paper as a random variable. A study of the random variable distribution is described including the technical condition of the metal surface. A series of Rockwell hardness tests is presented to estimate its main parameters. It is assumed that the hardness distribution refers to the lognormal distribution class. A comparison of results obtained from mechanical and optical and visual tests shows that the technical condition of metal products can be estimated using the Rockwell hardness test method.

Keywords: hardness of metal; Rockwell hardness, technical condition; random variable; hardness distribution; lognormal distribution.

Введение

Во время длительной эксплуатации металлических изделий, механизмов, машин, конструкций и сооружений (далее металлических изделий) происходит ухудшение их технического состояния, вызванное воздействием различных механических, физических, химических, биологических и прочих факторов [1–4]. Наиболее значимыми процессами, приводящими к деградации металлических изделий, 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 изделий. Для оценки технического состояния металлических изделий в процессе их изготовления и эксплуатации применяют 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] используется, дополнительно к среднему значению твердости, одна из мер рассеяния анализируемой случайной величины, что повышает качество оценки технического состояния поверхности металлического изделия. 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 приборов, обладающих лучшей производительностью и уменьшенными уровнями воздействий на объекты испытаний, привело к внедрению способа оценки технического состояния металлических изделий с одновременной оценкой среднего значения твердости и некоторой меры рассеяния

твёрдости в ряде отраслей промышленности, транспорта и строительства [15–17]. Для описания плотности распределения твёрдости используют нормальное, логнормальное распределения, распределение Вейбулла и их модификации. Все указанные распределения являются двухпараметрическими. Возможно, что для оценки технического состояния металлических изделий, эксплуатируемых длительное время, недостаточно двух параметров твёрдости, рассматриваемой в качестве случайной величины.

1. Постановка эксперимента

1.1. Гипотезы

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

Объектами неразрушающих испытаний являются изделия из стали, в качестве которых выбраны стандартные образцы твёрдости 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 твёрдости как случайной величины сводится к минимуму. Встречаются два вида повреждений испытуемых изделий – многочисленные механические повреждения и коррозия. Поверхности некоторых изделий подвергались механическим воздействиям не в равной степени.

Оцениваемым параметром объектов испытаний (анализируемой случайной величиной) является твёрдость поверхности объекта по Роквеллу в шкале С – *HRC*. Диапазон изменения твёрдости поверхности испытуемых образцов находится в интервале от 16 до 70 единиц твёрдости по Роквеллу в шкале С – *HRC*.

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

Сформулируем несколько предложений в форме гипотез применительно к измерению твёрдости по Роквеллу металлических изделий (испытуемых образцов) с различной степенью повреждения поверхности в процессе эксплуатации.

Гипотеза А. Твёрдость поверхности испытуемого образца как случайная величина распределена по логнормальному закону.

Выше подчёркнуто, что поверхности испытуемых образцов могут быть повреждены в разной степени. Сформулируем гипотезу, связанную с опровержением этого факта.

Гипотеза Б. Средние значения твёрдости противоположных поверхностей испытуемых образцов равны.

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

Невыполнение статистической гипотезы **B** позволяет сделать вывод о применимости на практике главной гипотезы.

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

1.2. Основные формулы

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

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

Оценивались следующие выборочные параметры – среднее значение твердости \overline{HRC} , среднеквадратичное отклонение твердости σ_{HRC} .

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

Формулы для вычисления \overline{HRC} , σ_{HRC} , $\overline{\ln HRC}$, $\sigma_{\ln HRC}$ имеют вид [19]

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

Для проверки гипотезы о принадлежности функции распределения случайной величины к тому или иному классу распределений применяется критерий Пирсона [Там же]. В критерии Пирсона сравниваются эмпирический коэффициент $\chi_{\text{эмп}}^2$ и табличный коэффициент $\chi_{\gamma}^2(k)$, где γ – 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. На первом этапе вся область изменения анализируемой случайной величины разбивается на несколько интервалов l , рекомендации по выбору этих интервалов приведены в работе [19]. 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 -й интервал; P_i – теоретическая вероятность попадания в i -й 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 γ из таблицы χ^2 [19] 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 верна гипотеза о том, что распределение случайной величины $x = \ln HRC$ относится к классу нормальных распределений с доверительной вероятностью, равной γ . 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.

2. Обработка экспериментальных данных

2.1. Проверка гипотезы А

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

В результате анализа данных, приведенных в табл. 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}	$\overline{\ln HRC}$	σ_{HRC}	$\sigma_{\ln HRC}$	$\chi^2_{эмп}$	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	+	
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 примечании: 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 табл. 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 и применяющегося для более тонких и менее массивных испытуемых образцов. Дополнительным достоинством прибора Константа – К5У является существенно меньшая повреждаемость поверхности испытуемого изделия, что обуславливается применением другого физического принципа для оценки твердости поверхности металла.

2.2. Проверка гипотезы Б

Целью исследований является обоснование возможности оценки технического состояния металлических изделий по результатам измерения твердости. В подразделе 2.1 приводятся результаты экспериментальной оценки выборочных параметров распределения твердости. К выборочным параметрам относятся \overline{HRC} – среднее значение твердости и σ_{HRC} – среднее квадратичное отклонение.

Проверим возможность идентификации материала объекта испытаний по среднему значению твердости и среднеквадратичному 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 испытуемых образцов.

Критерий Стьюдента основан на сравнении эмпирического коэффициента и табличного коэффициентов Стьюдента $t_{эмп}$ и $t_{\gamma}(k)$, где γ – 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 $t_{эмп}$ для рассматриваемой гипотезы Б имеет следующий вид:

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

Здесь индексы 1, 2 соответствуют поверхности испытуемого 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 табл. 2 приведены значения эмпирических коэффициентов Стьюдента $t_{эмп}$, рассчитанные по формуле (6). Исходные данные для расчетов взяты из табл. 1. В табл. 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 Б	+	-	-	+	+	+	-	+	+

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

2.3. Проверка гипотезы В

Анализ результатов, представленных в табл. 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 твердости.

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

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 испытываемых изделий по Роквеллу. Формируемая выборка значений твердости должна иметь значительный объем. В качестве критерия для оценки технического состояния испытываемых изделий предлагается использовать не только смещение оценок среднего значения и уровня рассеяния твердости по поверхности, но и изменение характера выборочного распределения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Batchelor, A.W.* Materials degradation and its control by surface engineering / A.W. Batchelor, L.N. Lam, M. Chandrasekaran. – London : Imperial college press, 2002. – V. 119. – 408 p.
2. *Structural changes of metallic surfaces induced by ultrasound* / S. Verdan, G. Burato, M. Comet, L. Reinert, H. Fuzellier // *Ultrasonics sonochemistry*. – 2003. – V. 10. – № 4. – P. 291–295.

3. *Corrosion kinetics of Steel T91 in flowing oxygen-containing lead–bismuth eutectic at 450 °C* / C. Schroer, O. Wedemeyer, A. Skrypnik, J. Novotny, J. Konys // *Journal of Nuclear Materials*. – 2012. – V. 431. – № 1. – P. 105–112.
4. Ларин, П.Г. Обоснование факторов, оказывающих влияние на надежность специальной техники в особых условиях эксплуатации / П.Г. Ларин, Л.В. Жуков, И.Н. Кравченко // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 3 (Часть 2). – С. 262–266.
5. *Walley, S.M. Historical origins of indentation hardness testing* / S.M. Walley // *Materials Science and Technology*. – 2012. – V. 28. – № 9–10. – P. 1028–1044.
6. *A comparative study of the microstructure and mechanical properties of HTLA steel welds obtained by the tungsten arc welding and resistance spot welding* / H. Ghazanfari, M. Naderi, M. Iranmanesh, M. Seydi, A. Poshteban // *Materials Science and Engineering: A*. – 2012. – V. 534. – P. 90–100.
7. Гоголинский, К.В. Об унификации определения твердости и возможности перехода при ее измерении к размерным величинам / К.В. Гоголинский, В.Н. Решетов, А.С. Усеинов // *Измерительная техника*. – 2011. – № 7. – С. 28–34.
8. *Basic mechanical properties of layered steels* / M. Černý, J. Filípek, P. Mazal, P. Dostál // *Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendelinae brunensis*. – 2012. – V. 61. – P. 25–38.
9. *Fischer-Cripps, A.C. Contact Mechanics* / A.C. Fischer-Cripps // *Nanoindentation*. – Springer New York, 2011. – 282 p.
10. *Lucca, D.A. Nanoindentation: Measuring methods and applications* / D.A. Lucca, K. Herrmann, M.J. Klopstein // *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. – 2010. – V. 59. – № 2. – P. 803–819.
11. Оценка поврежденности материала по рассеянию характеристик упругости и статической прочности / А.А. Лебедев, И.В. Маковецкий, Н.Р. Музыка, Н.Л. Волчек, В.П. Швец // *Проблемы прочности*. – 2006. – № 2. – С. 5–14.
12. Музыка, Н.Р. Влияние вида нагружения на процесс накопления повреждений в материале / Н.Р. Музыка, В.П. Швец // *Проблемы прочности*. – 2014. – № 1. – С. 130–136.
13. Лебедев, А.А. Метод оценки вязкости разрушения материала по рассеянию характеристик твердости / А.А. Лебедев, Н.Р. Музыка, В.П. Швец // *Проблемы прочности*. – 2007. – № 6 – С. 5–12.
14. Лебедев, А.А. Оценка поврежденности конструкционных сталей по параметрам рассеяния характеристик твердости материалов в нагруженном и разгруженном состояниях / А.А. Лебедев, В.П. Швец // *Проблемы прочности*. – 2008. – № 3. – С. 29–37.
15. Кинетика накопления рассеянных повреждений в поликристаллических материалах с разным размером зерна при малых деформациях / А.А. Лебедев, В.П. Ламашевский, Н.Р. Музыка, В.П. Швец, Е.В. Ефименко // *Проблемы прочности*. – 2011. – № 5. – С. 32–44.
16. Сосновский, Л.А. Рассеяние механических свойств рельсовой стали / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов, А.А. Кебинов // *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 / А.С. Кузьбожев, Р.В. Агинец, О.В. Смирнов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2007. – № 12. – С. 49–53.
18. *Natrella, M.G. Experimental statistics* / M.G. Natrella. – New York : Courier Dover Publications, 2013. – 515 p.
19. Корн, Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Т. Корн, Г. Корн. – М. : Наука. 1973. – 831 с.

REFERENCES

1. *Batchelor A.W., Lam L.N., Chandrasekaran M. Materials degradation and its control by surface engineering*. London : Imperial College Press, 2002. V. 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. V. 10. No. 4. Pp. 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. V. 431. No. 1. Pp. 105–112.
4. Larin P.G., Zhukov L.V., Kravchenko I.N. Obosnovanie faktorov, okazuyvayushchikh vliyaniya na nadezhnost' spetsial'noi tekhniki v osobyykh usloviyakh ekspluatatsii [Justification of factors affecting the reliability of special equipment in special operating conditions]. *Fundamental Research*, 2014. No. 3 (Part 2). Pp. 262–266. (rus)
5. Walley S.M. Historical origins of indentation hardness testing. *Materials Science and Technology*, 2012. V. 28. No. 9–10. Pp. 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. Pp. 90–100.
7. Gogolinskii K.V., Reshetov V.N., Useinov A.S. Ob unifikatsii opredeleniya tverdosti i vozmozhnosti perekhoda pri ee izmerenii k razmernym velichinam [Unification of hardness determination and possibility of transferring it to dimensional values]. *Measurement Techniques*, 2011. No. 7. Pp. 28–34. (rus)
8. Černý M., Filípek J., Mazal P., Dostál P. Basic mechanical properties of layered steels. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2012. V. 61. Pp. 25–38.
9. Fischer-Cripps A.C. Nanoindentation. – New York : Springer, 2011. 282 p.
10. Lucca D.A., Herrmann K., Klopstein M.J. Nanoindentation: Measuring methods and applications. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010. V. 59. No. 2. Pp. 803–819.
11. Lebedev A.A., Makovetskii I.V., Muzyka N.R., Volchek N.L., Shvets V.P. Otsenka povrezhdenosti materiala po rasseyaniyu kharakteristik uprugosti i staticheskoi prochnosti [Assessment of damage level in materials by elasticity characteristic scattering and static strength]. *Strength of Materials*, 2006. V. 38. No. 2. Pp. 5–14. (rus)
12. Muzyka N.R., Shvets V.P. Vliyanie vida nagruzheniya na protsess nakopleniya povrezhdenii v material [Effect of a loading mode on damage accumulation in the material]. *Strength of Materials*, 2014. V. 46. No. 1. Pp. 130–136. (rus)
13. Lebedev A.A., Muzyka N.R., Shvets V.P. Metod otsenki vyazkosti razrusheniya materiala po rasseyaniyu kharakteristik tverdosti [A method for fracture toughness assessment by the scatter of hardness characteristics]. *Strength of Materials*, 2007. V. 39. No. 6. Pp. 5–12. (rus)
14. Lebedev A.A., Shvets V.P. Otsenka povrezhdenosti konstruktsionnykh stali po parametram rasseyaniya kharakteristik tverdosti materialov v nagruzhenom i razgruzhenom sostoyaniyakh [Assessment of constructional steel damages using parameters of hardness characteristics scattering in loaded and unloaded states]. *Strength of Materials*, 2008. V. 40. No. 3. Pp. 29–37. (rus)
15. Lebedev A.A., Lamashevskii V.P., Muzyka N.R., Shvets V.P., Efimenko E.V. Kinetika nakopleniya rasseyannykh povrezhdenii v polikristallicheskiykh materialakh s raznym razmerom zerna pri malykh deformatsiyakh [Accumulation kinetics of scattered damages in polycrystalline materials with various grain sizes under small deformations]. *Strength of Materials*, 2011. V. 43. No. 5. Pp. 32–44. (rus)
16. Sosnovskii L.A., Makhutov N.A., Kebikov A.A. Rasseyanie mekhanicheskikh svoystv rel'sovoi stali [Mechanical property scattering of rail steel]. *Industrial Laboratory*, 2007. V. 73. No. 11. Pp. 59–62. (rus)
17. Kuz'bozhev A.S., Aginei R.V., Smirnov O.V. Issledovanie variatsii tverdosti trubnoi stali 17G1S v khode staticheskogo nagruzheniya [Study of variations in hardness of the tube steel 17G1C upon static loading]. *Industrial Laboratory*, 2007. V. 73. No. 12. Pp. 49–53. (rus)
18. Natrella M.G. Experimental statistics. New York : Courier Dover Publications, 2013. 515 p.
19. Korn T., Korn G. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow : Nauka Publ., 1973. 831p. (rus)