

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**

DOI: 10.26896/1028-6861-2017-83-11-47-51

УДК (UDC) 620.178.3

**ИЗУЧЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ НЕРАЗРУШАЮЩИМ ЭКСПРЕСС-МЕТОДОМ¹**

© В. И. Колмыков², Д. Н. Романенко², С. П. Неведьев³, Р. Р. Дема⁴, М. В. Харченко⁴,
Е. Ф. Романенко⁵, В. Н. Кононов⁴, Е. С. Замбржицкая⁴, О. А. Никитенко⁴

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по проекту № 11.2054.2017/4.6 в рамках государственного задания на 2017 – 2019 гг.

² Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия.

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия.

⁴ Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия; e-mail: nsp@ptmgtu.ru

⁵ Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Старооскольский филиал, г. Старый Оскол, Россия.

Статья поступила 31 мая 2017 г.

Представлены результаты усталостных испытаний стали 30 – 35 ХГС на лабораторной установке оригинальной конструкции, состоящей из усталостной машины, вихретокового датчика и электронного измерительного блока. Приведена структурная схема силового механизма изгиба образца при испытании. Для избежания биения образца выбран способ циклирования при постоянном напряжении. На основании предложенной теории разработан проходной вихретоковый преобразователь (датчик), который представляет собой цилиндрическую катушку из немагнитного материала с двумя обмотками. Представлены конструкция и эквивалентная схема обмоток датчика. Электронный блок измерительного комплекса состоит из низкочастотного генератора синусоидального тока Г-33, электронного счетчика оборотов двигателя, способного автоматически останавливать циклирование образца на заданном числе циклов, и анализатора гармоник С-4. Рассмотрен принцип работы установки. Полученные экспериментальные данные показали, что метод дает возможность в 30 – 40 раз сократить время испытаний, он удобен для определения действительного упрочняющего эффекта от различных видов обработки стали, поскольку позволяет определить предел выносливости до и после упрочнения. Вихретоковым методом можно измерять характеристики очень тонких поверхностных слоев, где, как известно, зарождаются усталостные трещины, поэтому он удобен при исследовании покрытий на сталях без разрушения в процессе испытания.

Ключевые слова: экспресс-метод; циклическое нагружение; магнитные свойства; усталостная прочность; сталь; неразрушающий вихретоковый метод.

**STUDY OF THE FATIGUE STRENGTH OF FERROMAGNETIC MATERIALS
BY RAPID NON-DESTRUCTIVE METHOD**

© V. I. Kolmykov, D. N. Romanenko, S. P. Nefed'ev, R. R. Dema, M. V. Kharchenko,
E. F. Romanenko, V. N. Kononov, E. S. Zambrzhitskaya, and O. A. Nikitenko

Submitted May 31, 2017.

The results of fatigue tests of steel 30 – 35 CHG carried out on a laboratory unit of original design are presented. The unit consists of a fatigue machine, eddy current sensor and electronic measurement module. The structural scheme of the force mechanism of specimen bending upon testing is presented. To avoid runoff of the sample we use cycling in conditions of steady stress. The developed eddy current transducer (sensor) consists of cylindrical coil made of a non-magnetic material with two windings (design and equivalent circuit of the sensor windings are also presented). It is shown that electronic block of the measuring complex consists of a low-frequency generator of sinusoidal current, electronic engine revolution counter capable of automatically stopping of the sample cycling at a given number of cycles, and harmonic analyzer. The operation procedure is considered. The experimental data thus obtained proved that the method provides up to 30 – 40-fold shortening of the test time which is rather convenient for determination of the actual strengthening effect attributed to different types of steel processing, since the endurance limit can be determined both before and after strengthening. The eddy current method provides studying of rather thin surface layers,

where fatigue cracks used to originate, thus being convenient for studying chemical heat treatment of steel surface and thin coatings without their destruction upon testing.

Keywords: express method; cyclic loading; magnetic properties; fatigue strength; steel; non-destructive eddy current method.

При разработке физической основы неразрушающего вихрекового метода определения усталостной прочности сталей использовали эффект изменения структурно-чувствительных магнитных характеристик металла при циклическом нагружении образца.

Специфика усталостного разрушения металлов состоит в том, что зародыши усталостных повреждений начинают образовываться в перенапряженных объемах на поверхности металла. При достижении некоторого порогового значения напряжений (истинного предела выносливости) необратимо изменяется магнитная (доменная) структура ферромагнетика, хотя кристаллическая структура еще не получает заметных повреждений.

Задачу выявления локального зародыша усталостного повреждения металла решали путем регистрации магнитных изменений в ферромагнитной среде, вызванных напряжениями в кристаллической решетке металла.

Магнитные свойства ферромагнетиков, как известно, — нелинейные из-за наличия областей, спонтанно намагниченных до насыщения (доменов), и процессов, проходящих с ними в магнитном поле. Анализ этих магнитных процессов позволяет судить об эволюции доменной структуры, которая связана с внутренними напряжениями в металле.

В отсутствие внешнего магнитного поля поликристаллический ферромагнетик (металл) в целом намагничен, так как векторы спонтанной намагниченности доменов $\mathbf{I}_s$ ориентированы хаотически:

$$\sum \mathbf{I}_{si} V_i \cos \Theta_i = 0,$$

где $\mathbf{I}_{si}$ — вектор спонтанной намагниченности i -го домена; V_i — объем i -го домена; Θ_i — угол между $\mathbf{I}_{si}$ и фиксированным направлением.

При включении внешнего магнитного поля (внесении ферромагнетика в катушку с электрическим током) в ферромагнетике происходит перераспределение магнитных моментов элементарных областей (доменов) и появляется результирующая намагниченность. Рост намагниченности обусловлен двумя элементарными процессами: увеличением объемов доменов в энергетически выгодном направлении относительно внешнего поля H за счет перемещения их границ (процесс смещения) и повтором векторов спонтанной намагниченности доменов $\mathbf{I}_s$ по направлению внешнего поля (процесс вращения).

Смена механизмов процесса намагничивания (смещение — вращение) рассматривается как неравновесный фазовый переход, что соответствует так называемой точке бифуркации, которой, в свою очередь,

соответствует некоторое критическое значение величины внешнего магнитного поля H_k .

Внутренние напряжения, вызванные локальным скоплением дислокаций и других дефектов в микроскопическом объеме металла, образовавшиеся при циклической нагрузке, играют роль флуктуации, которая скачком переводит векторы $\mathbf{I}_s$ группы доменов в новое устойчивое положение путем вращения их по осям намагничивания кристаллов.

Такое скачкообразное изменение магнитных свойств, которое может быть зафиксировано измерительной аппаратурой, происходит при напряжении, равном пределу выносливости материала ($\sigma = \sigma_{-1}$).

Изменение намагничивания металла при прохождении через точку бифуркации можно измерить методом высших гармоник индукции магнитного поля. При $\sigma < \sigma_{-1}$ амплитуда высших гармоник индукции поля не изменяется, а при достижении предела усталости (σ_{-1}) — изменяется скачком.

Для проведения усталостных испытаний использовали лабораторную установку оригинальной конструкции, состоящую из усталостной машины, вихрекового датчика и электронного измерительного блока [1].

Механизм нагружения образца усталостной машины (рис. 1) состоит из двух кронштейнов, в которых крепятся вращающаяся цапга и направляющий патрон для размещения образца. Кронштейны соединены между собой силопередающими тягами.

Образец 1 устанавливают в захватах 2, вращающихся на оси кронштейнов 3. Захваты с помощью тяг 4, 5 и 6 соединены с траверсой 7, которая вращается на оси кронштейна 8. Траверса 7 имеет нагрузочное устройство P . С помощью нагрузки в образце (за счет его деформации изгибом) создаются напряжения σ .

Нагрузка P передает на тягу 6 усилие

$$Q = Pb/a = kP,$$

где $k = b/a$. Усилие Q действует на тяги 4 силами

$$F_4 = \frac{Q}{2 \cos a} = \frac{kP}{2 \cos a},$$

которые создают изгибающий момент

$$M^P = F_4 h = \frac{kPh}{2 \cos a}.$$

От собственного веса траверсы, тяг, захватов возникает постоянно действующий момент

$$M^{P_0} = \frac{P_0 h}{2 \cos a}.$$

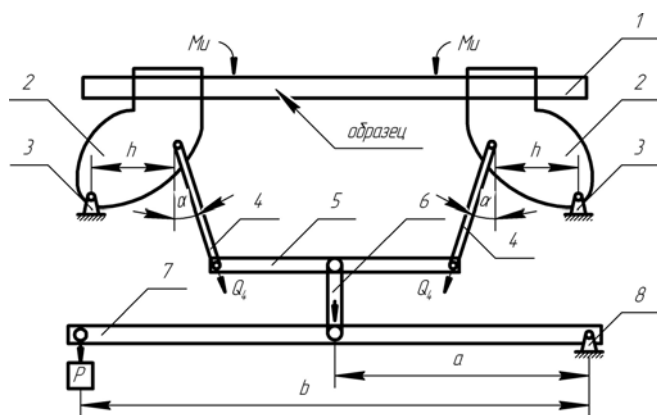


Рис. 1. Кинематическая схема нагружного устройства усталостной машины: 1 — образец; 2 — захваты с цангой и патроном; 3 — кронштейны; 4–6 — тяги; 7 — траверса; 8 — кронштейны

Полный изгибающий момент

$$M = M^P + M^{P_0} = \frac{(kP + P_0)h}{2\cos \alpha}.$$

Поскольку $M = W\sigma = 0,1d^3\sigma$, где W — момент сопротивления, то максимальное напряжение в образце:

$$\sigma_{\max} = \frac{(kP + P_0)h}{0,1d_{\min}^3 2\cos \alpha},$$

где $d_{\min}$ — расчетный диаметр части образца, расположенной под индикаторной обмоткой датчика.

Для данной установки (с учетом масс захватов и траверсы) расчет позволяет получить

$$\sigma_{\max} = \frac{750}{d_{\min}^3} + \frac{738}{d_{\min}^3} P, \text{ кгс/мм}^2.$$

При ступенчатом повышении нагрузки на ΔP напряжение увеличивается на

$$\Delta\sigma = \frac{738}{d_{\min}^3} \Delta P.$$

Например, при $d_{\min} = 5$ мм и нагрузке на траверсе $P = 5$ кгс

$$\sigma_{\max} = \frac{750}{125} + \frac{738}{125} \cdot 5 = 35,5 \text{ кгс/мм}^2 \text{ (348 МПа)}.$$

При $\Delta P = 2,45$ кгс/мм² величина $\Delta\sigma = 2,45$ кгс/мм² (24 МПа).

Таким образом, увеличение нагрузки на $\Delta P = 5$ Н повышает напряжение в сечении образца на $\Delta\sigma = 24$ МПа. Погрешность измерений составляет $\pm\Delta\sigma/2$, т.е. ± 12 МПа, относительная погрешность измерений — 3,5 %.

Образец помещают в захваты, в один из которых вмонтирована цанга, а в другой — патрон. Хвостовики цанги и патрона насажены в подшипники, закрепленные соосно в захватах. Конец хвостовика цанги

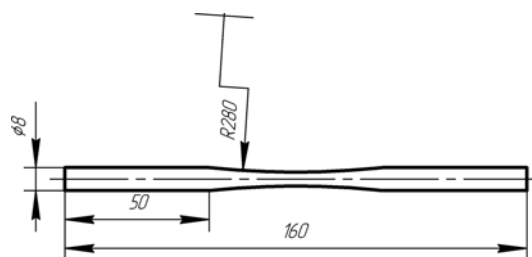


Рис. 2. Образец для усталостных испытаний

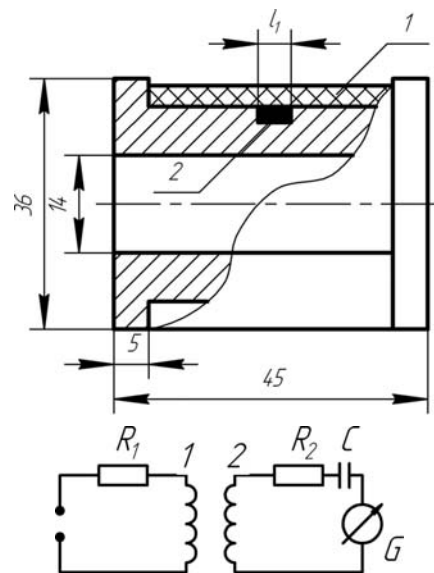


Рис. 3. Конструкция и эквивалентная схема обмоток датчика вихревых токов: 1 и 2 — первичная и вторичная обмотки

соединяют с муфтой Эйлера с валом двигателя. Муфта Эйлера позволяет передавать крутящий момент на оси, расположенные под углом в одной плоскости. В результате при нагрузке P происходит изгиб образца с поворотом захватов, а вращение от двигателя передается образцу без реактивных моментов. Свободный конец образца смещается в патроне, обеспечивая «мягкое» циклическое нагружение.

Испытывали образцы круглого сечения на чистый изгиб с вращением. Максимальные напряжения должны быть созданы под индикаторной обмоткой вихре-токового датчика, поэтому среднюю часть образца выполняли по радиусу R (рис. 2). Это обеспечивало измерение σ в заданном сечении образца и разрушение его в этом месте в случае необходимости проверки результатов разрушающим способом с построением кривой усталости. Образец $\varnothing 8^{+0,05}$ мм (см. рис. 2) изготавливали путем бесцентровой шлифовки, затем обрабатывали по радиусу R шлифовальным кругом и получали профиль образца до $\varnothing 5^{+0,02}$ мм. Рабочую часть образца полировали до $Ra \approx 0,05$ мкм. При необходимости на образце могут быть выполнены концентраторы напряжений.

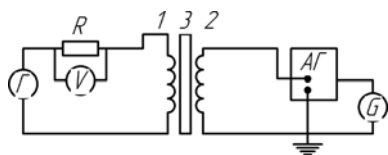


Рис. 4. Схема подключения измерительных приборов: Г — генератор синусоидальных сигналов; 1 и 2 — намагничивающая и измерительная обмотки датчиков; 3 — образец; АГ — анализатор гармоник; G — гальванометр

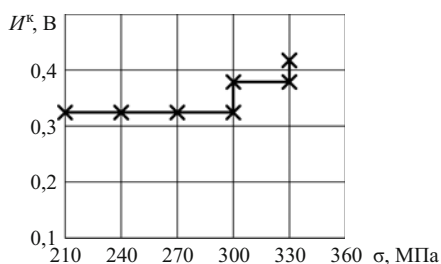


Рис. 5. Результаты определения предела усталости σ_{-1} по скачку амплитуды высшей гармоники ε_2

Циклическое упрочнение и разупрочнение материала приводит к уменьшению или увеличению прогиба образца λ . Явление связано с изменением объемной структуры решетки (движением дислокаций, дисклиний). Эффект может достигать 15 %. В случае развития усталостной трещины прогиб образца изменяется внутри цикла. Поэтому при жестком закреплении обоих концов образца (циклирование при постоянной деформации) может наблюдаться его биение. В связи с этим нами выбран способ циклирования при постоянном напряжении. Это обеспечено тем, что один конец образца без проскальзывания зажимается цангой в зажиме, а другой конец может перемещаться вдоль оси патрона.

Основы теории применения вихревых токов для измерения механических свойств ферромагнетиков даны для проходных и накладных типов датчиков. Проходной вихретоковый преобразователь (датчик) представляет собой цилиндрическую катушку из немагнитного материала с двумя обмотками. Конструкция и эквивалентная схема обмоток датчика приведены на рис. 3.

Каркас датчика изготовлен из текстолита. Ширина катушки $L = 36$ мм, а ширина первичной обмотки — 45 мм. Первичная обмотка выполнена проводом ПЭВ $\varnothing 0,3$ мм рядовой намоткой (виток к витку) с числом витков $W_1 = 600$. Для вторичной обмотки проточен паз

шириной $l_1 = 3$ мм и глубиной $h = 1,5$ мм. Эта обмотка из провода ПЭЛ $\varnothing 0,05$ имеет число витков $W_2 = 1500$. Проходной диаметр датчика $D = 14$ мм. Концы обмоток выведены и распаяны на «гребенку» датчика.

Образец размещают по оси датчика таким образом, чтобы его середина располагалась под измерительной обмоткой датчика. На первичную обмотку от генератора подают переменный синусоидальный ток, который создает в образце переменное магнитное поле.

Под действием поля индуцируются вихревые токи, которые наводят ЭДС во вторичной обмотке датчика:

$$\varepsilon_2 = j\omega W_2 \frac{d\psi_c}{dt},$$

где ω — циклическая частота поля; ψ_c — магнитный поток в стержне.

Вторичная ε_2 содержит высшие гармоники, чувствительность амплитуды которых к механическим напряжениям на порядок выше, чем у основной гармоники.

Глубина проникновения магнитного поля в образец вычисляется по формуле

$$\delta = 50,3 \sqrt{\frac{1}{\mu f \gamma}},$$

где f — частота поля; μ — диэлектрическая проницаемость металла; γ — магнитная проницаемость; для большинства металлов $\gamma = 1$, а $\mu \approx 1000$ (в средних полях H).

При $f = 2,5 \cdot 10^3$ Гц значение

$$\delta = 50,3 \sqrt{\frac{1}{2,5 \cdot 10^3 \cdot 10^3}} = 0,03 \text{ см} = 0,3 \text{ мм}.$$

Таким образом, вторичная ЭДС датчика содержит интегральную информацию о свойствах тонкого поверхностного слоя металла.

Электронный блок измерительного комплекса состоит из низкочастотного генератора синусоидального тока Г-33, электронного счетчика оборотов двигателя, способного автоматически останавливать циклирование образца на заданном числе циклов, и анализатора гармоники С-4, который раскладывает ε_2 датчика в ряд Фурье и выделяет амплитуду нужной высшей гармоники сигнала датчика. Схема подключения приборов показана на рис. 4. Предусмотрено отключение поля в датчике во время циклического нагружения образца ключом К.

Экспериментальные данные для определения предела усталости стали 30 – 35 ХГС

Параметры	Нагрузка P, Н						
	0	35	40	45	50	55	60
Напряжение σ , МПа	0	210	240	270	300	330	360
Амплитуда гармоники I_k^* , мВ	32	31	32	32	38	43	—

Работу на установке выполняли в следующем порядке. В начале определяли критическое значение внешнего магнитного поля. Для этого образец центрировали в датчике так, чтобы его наименьшее сечение установилось под измерительной обмоткой датчика. Затем от генератора ток намагничивания подавали в первичную обмотку датчика и наведенная во вторичной обмотке ЭДС поступала на анализатор С-4. Сила тока плавно увеличивалась, и по прибору G отмечалось изменение амплитуды выбранной высшей гармоники. При повышении тока амплитуда поднималась, затем падала и далее резко возрастала (осцилляция высшей гармоники). Минимум амплитуды соответствовал критическому значению магнитного поля H_k , при котором векторы I_s доменов находятся в неустойчивом термодинамическом состоянии. Дальнейшие измерения проводили в режиме НК.

Намагничивающий ток отключался, и в образце внешней нагрузкой P создавалось предварительное напряжение σ , меньшее предполагаемого σ_{-1} . Включали электродвигатель и образец испытывали на чистый изгиб с вращением в течение $N = 10^3$ циклов. После этого образец разгружали, включали поле H_k и измеряли амплитуду гармоники I_k^* . Далее нагрузку наращивали на выбранный шаг ΔP , проводили испытание на базе $N = 10^3$ циклов и измеряли амплитуду I_k^* выбранной гармоники (см. таблицу). Если эта амплитуда не изменялась, то это означало, что в материале образца еще не образовался зародыш усталостного повреждения.

Нагрузку наращивали до тех пор, пока не появится резкий скачок амплитуды высшей гармоники сигнала вихретокового датчика.

Напряжение σ , при котором наблюдали скачок I_k^* , соответствует пределу усталости σ_{-1} материала образца с погрешностью $\pm \Delta\sigma/2$. В таблице и на рис. 5 приведены результаты испытания образца стали 30 – 35 ХГС на данной установке.

Из таблицы видно, что скачок амплитуды I_k^* (более 12 % при погрешности измерения 3 %) произошел при изменении напряжения σ в образце от 270 до 300 МПа. Поэтому можно принять, что предел усталости материала $\sigma_{-1} = 285 \pm 15$ МПа с ошибкой $\varepsilon = 5$ %.

Для сравнения использовали стандартный метод Локати и получили $\sigma_{-1} = 280 \pm 36$ МПа [2 – 6], т.е. результаты практически совпали.

Таким образом, преимущество вихретокового метода перед всеми другими известными методами определения усталостных свойств металлов заключается в том, что для испытания используется только один образец, который к тому же не разрушается в процессе испытания. Этот метод позволяет в 30 – 40 раз сократить время испытаний [7, 8]. Он удобен для определения действительного упрочняющего эффекта от различных видов обработки стали, поскольку дает возможность оценить предел выносливости до и после упрочнения. Вихретоковый метод позволяет изме-

рять характеристики очень тонких поверхностных слоев, где, как известно, зарождаются усталостные трещины, поэтому он удобен при исследовании покрытий на сталях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаповалова Ю. Д., Емельянов С. Г., Якиревич Д. И. Ускоренное определение усталостных свойств сталей вихревым методом. — Курск: Курский государственный технический университет, 2009. — 134 с.
2. Gadalov V. N., Romanenko D. N., Kolmykov D. V., Korenevskii N. A., Chernysheva E. V., Ziborova T. N. Low-temperature nitro-cementation to improve the life of resurfaced tractor crankshafts / Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30. Issue 11. P. 1090 – 1091.
3. Gadalov V. N., Romanenko D. N., Samoilov V. V., Nikolaenko A. V., Grigor'ev S. B. Procedure of evaluating the surface roughness of the electrospray coating after burnishing with mineral ceramics / Russian Journal of Non-Ferrous Metals. September 2012. Vol. 53. Issue 4. P. 348 – 350.
4. Kolmykov V. I., Romanenko D. N., Abyshev K. I., Nasteka V. V. Effect of structural characteristics on abrasive wear resistance and impact strength of facing and carbonitrided coatings / Chemical and Petroleum Engineering. January 2015. Vol. 50. Issue 9 – 10. P. 610 – 613.
5. Kolmykov V. I., Romanenko D. N., Abyshev K. I., Kolmykov D. V., Bedin V. V. Efficiency of surface hardening by carburizing steel objects operating under abrasive wear conditions / Chemical and Petroleum Engineering. May 2015. Vol. 51. Issue 1 – 2. P. 58 – 61.
6. Shcherenkova I. S., Shkatov V. V., Gadalov V. N., Romanenko D. N. Study of electrolytic chromium coatings with ultradisperse superhard fillers / Chemical and Petroleum Engineering. July 2015. Vol. 51. Issue 3. P. 277 – 282.
7. Нефедьев С. П., Дёма Р. Р., Котенко Д. А. Абразивная и ударно-абразивная износостойкость твёрдых наплавленных покрытий / Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. 2015. Т. 15. № 1. С. 103 – 106.
8. Nefedev S. P., Vdovin K. N., Emelyushin A. N. Peculiarities of forming of the wear resistant cast iron coating structure on steel 45 upon plasma-powder surfacing / Materials Science Forum. 2016. Vol. 870. P. 141 – 148.

REFERENCES

1. Shapovalova Yu. D., Emel'yanov S. G., Yakirevich D. I. Accelerated determination of the fatigue properties of steels by the vortex method. — Kursk: Kursk State Technical University, 2009. — 134 p. [in Russian].
2. Gadalov V. N., Romanenko D. N., Kolmykov D. V., Korenevskii N. A., Chernysheva E. V., Ziborova T. N. Low-temperature nitro-cementation to improve the life of resurfaced tractor crankshafts / Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30. Issue 11. P. 1090 – 1091.
3. Gadalov V. N., Romanenko D. N., Samoilov V. V., Nikolaenko A. V., Grigor'ev S. B. Procedure of evaluating the surface roughness of the electrospray coating after burnishing with mineral ceramics / Russian Journal of Non-Ferrous Metals. September 2012. Vol. 53. Issue 4. P. 348 – 350.
4. Kolmykov V. I., Romanenko D. N., Abyshev K. I., Nasteka V. V. Effect of structural characteristics on abrasive wear resistance and impact strength of facing and carbonitrided coatings / Chemical and Petroleum Engineering. January 2015. Vol. 50. Issue 9 – 10. P. 610 – 613.
5. Kolmykov V. I., Romanenko D. N., Abyshev K. I., Kolmykov D. V., Bedin V. V. Efficiency of surface hardening by carburizing steel objects operating under abrasive wear conditions / Chemical and Petroleum Engineering. May 2015. Vol. 51. Issue 1 – 2. P. 58 – 61.
6. Shcherenkova I. S., Shkatov V. V., Gadalov V. N., Romanenko D. N. Study of electrolytic chromium coatings with ultradisperse superhard fillers / Chemical and Petroleum Engineering. July 2015. Vol. 51. Issue 3. P. 277 – 282.
7. Nefedev S. P., Dema R. R., Kotenko D. A. Abrasive and shock-abrasive wear resistance of deposited hard coatings / Vestn. Yuzh.-Ural. Gos. Univ. Ser. Metallurgiya. 2015. Vol. 15. N 1. P. 103 – 106 [in Russian].
8. Nefedev S. P., Vdovin K. N., Emelyushin A. N. Peculiarities of forming of the wear resistant cast iron coating structure on steel 45 upon plasma-powder surfacing / Materials Science Forum. 2016. Vol. 870. P. 141 – 148.