

Малеронок В.В., Алифанов А.В. Экспресс-метод оценки качества упрочненного слоя электропроводных металлических изделий с применением токов высокой частоты // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 67–72. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.4.08

Maleronok V.V., Alifanov A.V. Express method for assessing the quality of a strengthened metal products layer using high-frequency currents. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 67–72. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.4.08

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 21, № 4, 2019**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.4.08  
УДК 621.3.082:373

**В.В. Малеронок, А.В. Алифанов**

Барановичский государственный университет, Барановичи, Республика Беларусь

**ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ**

Предложен новый метод оценки качества упрочненного слоя металлических электропроводных изделий после их поверхностной высокоэнергетической (магнитно-импульсное, ионно-плазменное и др.) обработки. Разработанный метод основывается на появлении скин-эффекта при использовании тока высокой частоты. Используется последовательная схема включения изделия в измерительную электрическую цепь с применением генератора сигналов высокой частоты и осциллографа.

До проведения процесса упрочнения сигнал с генератора пропускается через изделие и снимается осциллограмма амплитудного значения напряжения. В результате измерения видно, что происходит падение напряжения (прямо пропорциональная величина полного электрического сопротивления) на поверхностном слое изделия, связанное с дефектами металла (нарушение кристаллической решетки, посторонние включения, наличие крупного зерна структуры). Затем происходит упрочнение изделия одним из высокоэнергетических методов (магнитно-импульсное, ионно-плазменное и др.), которое приводит к улучшению свойств металла (однородность, мелкодисперсность, восстановление структуры кристаллической решетки), что также улучшает его электрофизические свойства (уменьшение электросопротивления). Проводится повторное снятие осциллограммы напряжения сигнала высокой частоты. В результате сравнения падения напряжения (электрического сопротивления) до упрочнения и после него делается вывод о качестве проведенной обработки. Таким образом, разработанная методика исследования упрочненных слоев изделий позволяет производить оценку качества без разрушения изделия, требует малых затрат времени как на подготовку изделия к исследованию, так и на сам процесс измерения. С учетом простоты осуществления предлагаемого метода он может использоваться в качестве экспресс-метода для оценки качества упрочненного слоя металлических изделий.

**Ключевые слова:** металлические образцы, упрочнение изделий, токи высокой частоты, скин-эффект, высокоэнергетические методы, магнитно-импульсная, ионно-плазменное, осциллограмма, электросопротивление, напряжение тока, измерительная электрическая цепь.

**V.V. Maleronok, A.V. Alifanov**

Baranovichi State University, Baranovichi, Republic of Belarus

**EXPRESS METHOD FOR ASSESSING THE QUALITY OF A STRENGTHENED METAL  
PRODUCTS LAYER USING HIGH-FREQUENCY CURRENTS**

The article describes the application of an innovative method for assessing the quality of the hardened layer of products after high-energy processing methods (magnetic-pulse, ion-plasma, etc.). The developed method is based on the use of high-frequency current for the skin effect appearance, which causes current to flow through the surface product layer. A sequential scheme of connecting the product into the measuring circuit is used to implement the method using a high frequency signal generator and an oscilloscope.

Prior to the hardening process, the signal from the generator is passed through the product and an oscillogram of the amplitude value of the signal voltage is taken. As a result of the measurement, it can be seen that a voltage drop occurs (directly proportional to the electrical resistance value) on the surface product layer, which is associated with metal defects (crystal lattice disturbance, foreign inclusions, the presence of a large grain of the structure). Then the product is hardened by one of the high-energy methods (magnetic-pulse, ion-plasma, etc.), which leads to an improvement in the properties of the metal (homogeneity, fine dispersion), which also improves its electro-physical properties (decrease in electrical resistance). The oscillogram of the high-frequency signal voltage is repeated. As a result of a comparison of the voltage drop (electrical resistance), before and after the strengthening, it is concluded that the quality of the treatment carried out. In this way, the developed methodology for the study of hardened product layers allows quality assessment without destroying the product. The technique requires a small investment of time to prepare the product for research and the measurement process itself. Given the ease of implementation of the proposed method, it can be used as a rapid method to assess the quality of the hardened layer of metal products.

**Keywords:** steel samples, hardening of products, high frequency currents, skin effect, high energy methods, magnetic pulse, ion plasma, waveform, resistor, voltage current, measuring electrical circuit.

## Введение

Учеными Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси и Барановичского государственного университета успешно развивается перспективный метод упрочняющей обработки стальных изделий магнитно-импульсным воздействием. Под воздействием магнитно-импульсной обработки на поверхности стального изделия образуется упрочненный слой толщиной до 70 мкм. В этом слое устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла [1–4].

При других видах высокоэнергетической обработки также происходит воздействие именно на близкие к поверхности слои изделия [5–12], что приводит к изменению их физико-механических свойств (в частности, электросопротивления). Изменение электросопротивления поверхностного слоя заготовки будет свидетельствовать об изменении структуры материала вблизи поверхности. Таким образом, можно определить взаимосвязь между изменением электрического сопротивления и изменением структуры упрочненных слоев.

В связи с этим настоящая статья посвящена разработке экспресс-метода оценки качества обработанных изделий, заключающегося в измерении падения напряжения на упрочненном слое с последующим расчетом полного электрического сопротивления (прямопропорциональной величины) как показателя качества проведенной обработки.

## Основная часть

Контроль качества поверхности (физико-механических свойств) упрочненных изделий после магнитно-импульсной, ионно-плазменной и других методов высокоэнергетической обработки является важным моментом в производстве. Анализ физико-механических свойств материала можно проводить различными методами как разрушающего, так и неразрушающего контроля, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки<sup>1</sup> [13–15]. К числу наиболее существенных недостатков можно отнести: высокую стоимость оборудования для проведения исследования и значительные затраты времени как на подготовку изделия к исследованию, так и на само измерение.

Предлагается новый метод для измерения полного электрического сопротивления упрочнен-

ного слоя изделий, которое является показателем качества металла (однородность, мелкодисперсность, наличие или отсутствие структурных дефектов) после проведения его обработки. Для процесса измерения по данному методу необходимо применение генератора сигналов высокой частоты [16]. В случае приложения к электропроводящему изделию высокочастотного напряжения области, расположенные внутри проводника, будут обладать большим индуктивным сопротивлением. Это явление известно как скин-эффект. В результате этого эффекта переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое [17]. С учетом того факта, что при высокоэнергетических методах обработки (магнитно-импульсная, ионно-плазменная и др.) происходит воздействие именно на близкие к поверхности слои изделия, изменение сопротивления поверхностного слоя изделия будет свидетельствовать об изменении структуры материала вблизи поверхности. Изменение структуры (увеличение однородности, образование мелкодисперсной структуры, устранение дефектов) приводит не только к изменению электрического сопротивления приповерхностных слоев, но и к их упрочнению [18].

Для реализации предложенного метода измерения электрического сопротивления упрочненного слоя металлических изделий с применением токов высокой частоты предлагается использовать последовательную схему включения изделия.

На рис. 1 представлена последовательная схема включения изделия 3 в измерительную цепь. Она содержит генератор сигналов высокой частоты 1, два кольцевых контакта 4, осциллограф 2 с полосой пропускания, удовлетворяющей отношению 3:1 частоты зондирующего сигнала.

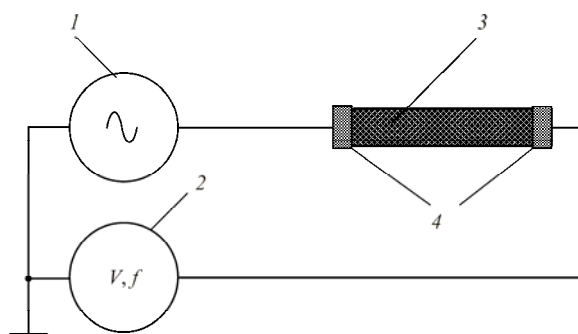


Рис. 1. Последовательная схема: включения изделия в измерительную цепь

<sup>1</sup> ГОСТ Р 7512–1982. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод / Государственный стандарт СССР. Введ. 1984–01–01. М., 1982. 26 с.

Произведем расчет глубины проникновения зондирующего сигнала определенной частоты от генератора в исследуемое изделие [19]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\mu_0\omega}} = c\sqrt{\frac{\rho\varepsilon_0}{\pi\mu_r f}},$$

где  $\Delta$  – толщина токопроводящего слоя (скин-слоя);  $\mu$  – магнитная проницаемость материала;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\rho$  – удельное сопротивление материала заготовки;  $c$  – скорость света в вакууме;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная системы СИ;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость;  $\omega$  – циклическая частота,  $\omega = 2\pi f$ , и  $f$  – частота сигнала.

Подставив известные значения  $c$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $\pi$ , получим упрощенную формулу для определения толщины токопроводящего слоя:

$$\Delta = 503\sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}. \quad (1)$$

Перед началом измерения производят контрольное снятие осциллограммы напряжения сигнала высокой частоты (без установки изделия). Для чего соединяют сигнальный выход генератора 1 и вход осциллографа 2 с помощью кольцевых кон-

тактов 4, производя измерение амплитудного значения напряжения сигнала ( $U_3$ ).

Зондирующий сигнал выбирают с частотой  $f$ , обеспечивающей проникновение на глубину, равную толщине упрочненного слоя, рассчитанную по формуле (1):

$$f = \frac{503^2 \rho}{\Delta^2 \mu_r}. \quad (2)$$

Затем изделие 3 устанавливают в кольцевые контакты 4. Сигнал с генератора 1 через первый кольцевой контакт 4 проходит через исследуемое изделие 3. Поскольку сигнал является высокочастотным и частота рассчитана с учетом толщины упрочненного слоя, сигнал протекает только по требуемой толщине поверхностного слоя (проявляется скин-эффект). Далее сигнал через второй кольцевой контакт 4 поступает на вход осциллографа 2, производится измерение амплитудного значения напряжения ( $U_и$ ) (рис. 2).

Далее изделие подвергается любому виду высокоэнергетических обработок (магнитно-импульсное, ионно-плазменное и др.) и проводится повторное снятие осциллограммы напряжения сигнала высокой частоты (рис. 3).

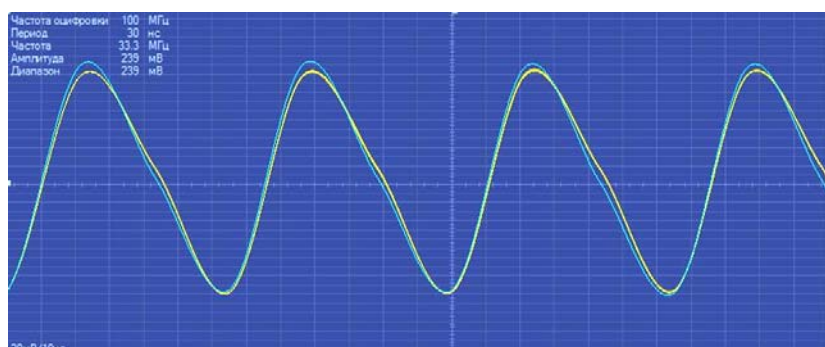


Рис. 2. Осциллограмма напряжения при подключении образца до упрочнения

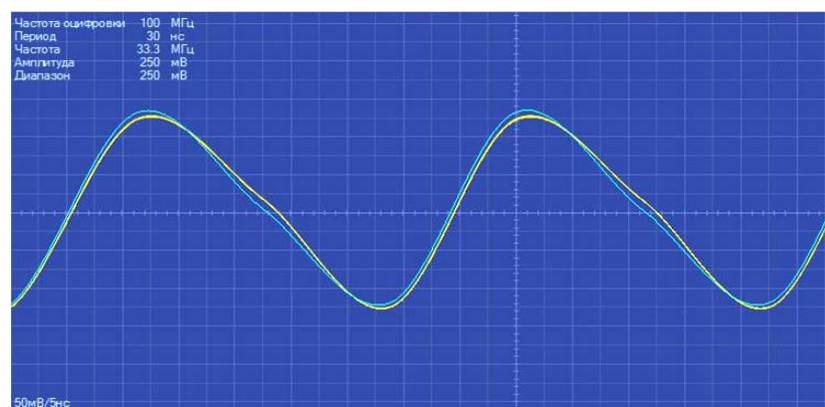


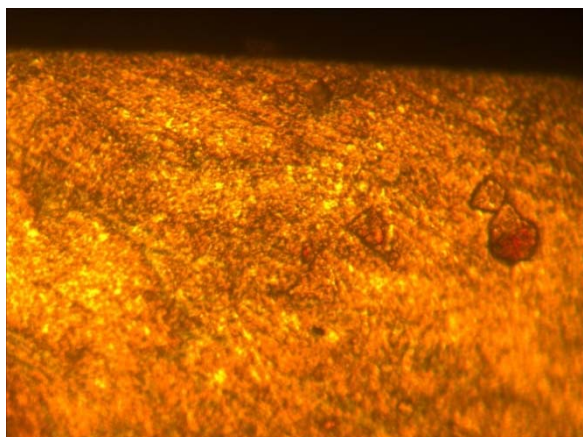
Рис. 3. Осциллограмма напряжения при подключении образца после упрочнения

Зафиксированные амплитудные значения эталонного сигнала  $U_э$  и амплитудные значения напряжения с установленным изделием  $U_и$  позволяют получить разницу напряжений ( $U_э - U_и$ ): это и есть падение напряжения на изделии. Затем по заданному значению тока  $I_з$  надо произвести расчет полного электрического сопротивления  $R_{полн}$  [20]:

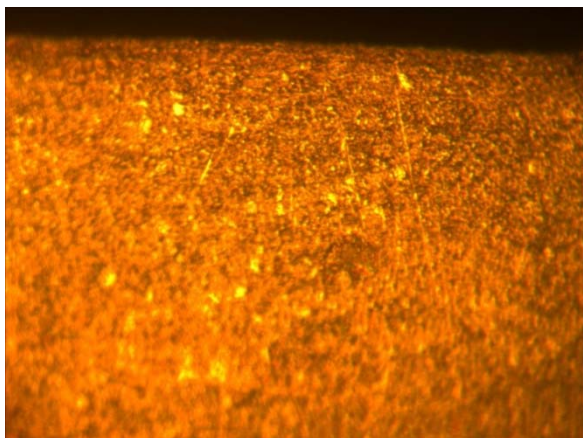
$$R_{полн} = \frac{U_э - U_и}{I_з}. \quad (3)$$

Если по данному алгоритму произвести измерение полного сопротивления до проведения обработки изделия и после него, то полученная информация от сравнения величин сопротивлений говорит о качестве упрочненного слоя (однородность, мелкодисперсность, отсутствие искривления кристаллической решетки и др.), которое напрямую влияет на величину полного электрического сопротивления.

Так, было произведено воздействие на изделие стали Р6М5 импульсным электромагнитным полем (МИО) и получены снимки микроструктуры до проведения упрочнения и после него (рис. 4).



а



б

Рис. 4. Структура образцов: а – до МИО и б – после МИО

Из рис. 4, а видно, что до проведения МИО поверхностный слой изделия содержал посторонние включения и имел крупную структуру зерна, а следовательно, обладал повышенным электрическим сопротивлением, чему соответствует амплитудное значение напряжения полученной осциллограммы на рис. 2 (239 мВ).

Затем изделие было упрочнено с помощью МИО, что привело к получению более однородной структуры и наличию мелкозернистости (см. рис. 4, б) и как результат уменьшению электрического сопротивления упрочненного слоя, о чем свидетельствует повышение амплитудного значения полученной осциллограммы на рис. 3 (250 мВ).

Сравнение амплитудных значений напряжения позволяет проводить экспресс-оценку качества проведенной обработки (однородность, мелкодисперсность, отсутствие искривления кристаллической решетки и др.).

При необходимости можно получить точное значение электросопротивления упрочненного слоя по формуле (3). Для этого по формуле (2) зондирующий сигнал выбирают с частотой  $f$ , обеспечивающей проникновение на глубину, равную толщине упрочненного слоя. Тогда по измеренному значению падения напряжения и заданной силе тока можно рассчитать полное электросопротивление упрочненного слоя изделия после обработки любым видом высокоэнергетического воздействия.

### Заключение

Разработан метод измерения падения напряжения (полного электрического сопротивления) на упрочненном слое изделий из токопроводящих материалов как показателя качества (однородности, мелкодисперсности, бездефектности) после проведения магнитно-импульсной, ионно-плазменной и других видов высокоэнергетической обработки.

Методика проведения исследования представляет собой экспресс-оценку качества упрочненной поверхности по анализу падения напряжения (электрического сопротивления) на упрочненном слое путем сравнения результатов измерения до упрочнения и после его проведения.

### Список литературы

1. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А.В. Алифанов, А.В. Акулов, Ж.А. Попова, А.С. Демянчик // Литье и металлургия. – 2012. – № 3. – С. 77–82.
2. Алифанов А.В., Попова Ж.А., Ционенко Н.М. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле // Литье и металлургия. – 2012. – № 4. – С. 25–35.

3. Modeling of non-stationary diffusion of alloying elements on exposure of steel samples to magnetic pulses / A. Alifanov, A. Miliukova, Zh. Popova, D. Tsionenko // TRANSFER 2014: 15-th Int. Sci. Conf., Trencin Slovakija, 23–24 Oct. 2014 / Alexander Dubcek University of Trencin. – Trencin, Slovakija, 2014. – P. 10–14.

4. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А.В. Алифанов, Д.А. Ционенко, А.М. Милокова, Н.М. Ционенко // Вестник Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2016. – № 4. – С. 31–36.

5. Чаевский В.В. Комбинированная гальваническая и ионно-плазменная обработка лезвий ножей дереворежущего инструмента // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: тр. IX Междунар. евраз. симп., г. Екатеринбург, 23–25 сентября 2014 г. / под науч. ред. В.Г. Новоселова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. лесотехн. ун-та, 2014. – С. 202–206.

6. Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы. – М.: Металлургия, 1990. – 216 с.

7. Белый А.В., Кукареко В.А., Лободаева О.В. Ионно-лучевая обработка металлов, сплавов и керамических материалов / Физ.-техн. ин-т. – Минск, 1998. – 220 с.

8. Бертяев Б.И., Завестовская И.Н., Игошин В.И. Сравнительный анализ двух- и трехстадийных термических циклов при поверхностной лазерной закалке сталей // Физика и химия обработки материалов. – 1986. – № 5. – С. 88.

9. Бирюков В.П. Влияние распределения плотности мощности лазерного луча на повышение износостойкости поверхностей трения // Вестник машиностроения. – 2008. – № 3. – С. 33.

10. Лахтин Ю.М., Гуляева Т.В., Тарасова Т.В. Структура и свойства стали 20Х13 после лазерной обработки // МИТОМ. – 1988. – № 10. – С. 36.

11. Вологин М.Ф., Калашников В.В., Нерубай М.С. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.

12. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 237 с.

13. Горелик С.С. Рентгенографический и электрографический анализ. – М.: Металлургия, 1985. – 182 с.

14. Авдеев Б.Я. Основы метрологии и электрические измерения: учеб. для вузов / под общ. ред. Е.М. Душина. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.

15. Кане М.М. Основы научных исследований в технологии машиностроения. – Минск: Вышэйшая школа, 1987. – 231 с.

16. Алифанов А.В., Малеронко В.В., Богданович И.А. Исследование влияния магнитно-импульсной обработки поверхностного слоя стальных образцов на их физико-механические свойства // Вестник БарГУ. Технические науки. – 2017. – № 5. – С. 18–24.

17. Алферов А.А. Анализ существующих инженерных математических моделей учета поверхностного эффекта в токопроводящих жилах силовых кабелей // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2015. – № 2. – С. 62–69.

18. Алифанов А.В., Малеронко В.В., Ционенко Д.А. Исследование упрочненных магнитно-импульсной обра-

боткой поверхностных слоев металлических изделий с помощью токов высокой частоты // Актуальные проблемы прочности: монография: в 2 т. / под общ. ред. В.В. Рубаника. – Витебск, 2018. – Т. 2, гл. 6. – С. 111–124.

19. Шпиганович А.Н., Довженко С.В. Анализ влияния высших гармонических составляющих на безотказность электроизоляционных покрытий [Электронный ресурс] // Журн. науч. публ. аспирантов и докторантов. – 2008. – URL: <http://www.jurnal.org/articles/2008/elect7.html> (дата обращения: 27.03.2019).

20. Основы электродинамики // Подготовка к ЦТ (ЕГЭ), задачи по физике и математике: сайт. – 2014. – URL: [http://fizmat.by/kursy/jelektricheskij\\_tok/Om\\_cepj](http://fizmat.by/kursy/jelektricheskij_tok/Om_cepj) (дата обращения: 27.03.2019).

## References

1. Alifanov A.V., Akulov A.V., Popova Zh.A., Demianchik A.S. Magnitno-impul'snaia uprochniaushchaia obrabotka izdelii iz konstruktсионnykh i instrumental'nykh staley [Magnetic-pulse hardening treatment of structural and tool steels]. *Lit'e i metallurgija*, 2012, no. 3, pp. 77–82.

2. Alifanov A.V., Popova Zh.A., Tsionenko N.M. Mekhanizm uprochneniia legirovannykh staley v impul'snom magnitnom pole [Mechanism of hardening of alloyed steels in a pulsed magnetic field]. *Lit'e i metallurgija*, 2012, no. 4, pp. 25–35.

3. Alifanov A., Miliukova A., Popova Zh., Tsionenko D. Modeling of non-stationary diffusion of alloying elements on exposure of steel samples to magnetic pulses. *TRANSFER 2014: 15-th Int. Sci. Conf., Trencin Slovakija. Alexander Dubcek University of Trencin. Trencin, Slovakija*, 2014, pp. 10–14.

4. Alifanov A.V., Tsionenko D.A., Miliukova A.M., Tsionenko N.M. Magnitostriktionnyi mekhanizm obrazovaniia melkodispersnoi struktury v stal'nykh izdeliakh pri magnitno-impul'snom vozdeistvii [Magnetostriuctive mechanism of formation of fine-dispersed structure in steel products under magnetic-pulse influence]. *Vestnik Nats. akad. nauk Belarusi. Ser. fiz.-mat. Navuk*, 2016, no. 4, pp. 31–36.

5. Chaevskii V.V. Kombinirovannaia gal'vanicheskaja i ionno-plazmennaja obrabotka lezviy nozhei derevorezhushchego instrumenta [Combined electroplating and ion-plasma treatment of wood cutting tool blades]. *Derevobrabotka: tekhnologii, oborudovanie, menedzhment XXI veka: tr. IX Mezhdunar. evraz. simp.* Ed. V.G. Novoselova. *Ekaterinburg: Izd-vo Ural. gos. lesotekhn. un-ta*, 2014, pp. 202–206.

6. Komarov F.F. Ionnaia implantatsiia v metally [Ion implantation in metals]. *Moscow: Metallurgija*, 1990, 216 p.

7. Belyi A.V., Kukareko V.A., Lobodaeva O.V. Ionno-luchevaia obrabotka metallov, splavov i keramicheskikh materialov [Ion-beam treatment of metals, alloys and ceramic materials]. *Fiz.-tekhn. in-t. Minsk*, 1998, 220 p.

8. Bertiaev B.I., Zavestovskaja I.N., Igoshin V.I. Sravnitel'nyi analiz dvukh- i trekhstadiinykh termicheskikh tsiklov pri poverkhnostnoi lazernoi zakalke staley [Comparative Analysis of Two- and Three-stage Thermal Cycles at Surface Laser Hardening of Steels]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov*, 1986, no. 5, pp. 88.

9. Biriukov V.P. Vliianie raspredeleniia plotnosti moshchnosti lazernogo luchu na povyshenie iznosostoiki

poverkhnostei treniia [Influence of laser beam power density distribution on friction surfaces wear resistance increase]. *Vestnik mashinostroeniia*, 2008, no. 3, pp. 33.

10. Lakhtin Iu.M., Guliaeva T.V., Tarasova T.V. Struktura i svoistva stali 20Kh13 posle lazernoi obrabotki [Structure and properties of 20X13 steel after laser treatment]. Moscow: MITOM, 1988, no. 10, pp. 36.

11. Vologin M.F., Kalashnikov V.V., Nerubai M.S. Primenenie ul'trazvuka i vzryva pri obrabotke i sborke [Application of ultrasound and explosion in processing and assembly]. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 264 p.

12. Markov A.I. Ul'trazvukovaia obrabotka materialov [Ultrasonic material processing]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 237 p.

13. Gorelik S.S. Rentgenograficheskii i elektrograficheskii analiz [Radiographic and electrographic analysis]. Moscow: Metallurgiiia, 1985, 182 p.

14. Avdeev B.Ia. Osnovy metrologii i elektricheskie izmereniia [Basic metrology and electrical measurements]. Ed. E.M. Dushina. 6nd., Leningrad: Energoatomizdat, 1987, 480 p.

15. Kane M.M. Osnovy nauchnykh issledovaniy v tekhnologii mashinostroeniia [Basics of scientific research in mechanical engineering technology]. Minsk: Vysheishaia shkola, 1987, 231 p.

16. Alifanov A.V., Maleronok V.V., Bogdanovich I.A. Issledovanie vliianiia magnitno-impul'snoi obrabotki poverkhnostnogo sloia stal'nykh obraztsov na ikh fiziko-mekhanicheskie svoistva [Investigation of the influence of magnetic-pulse treatment of the surface layer of steel samples on their physical and mechanical properties]. *Vestnik BarGU. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 5, pp. 18–24.

17. Alferov A.A. Analiz sushchestvuiushchikh inzhenernykh matematicheskikh modelei ucheta poverkhnostnogo effekta v tokoprovodiashchikh zhilakh silovykh kabelei [Analysis of existing engineering mathematical models of surface effect accounting in current-conducting conductors of power cables]. *Vestnik GGTU im. P.O. Sukhogo*, 2015, no. 2, pp. 62–69.

18. Alifanov A.V., Maleronok V.V., Tsionenko D.A. Issledovanie uprochnennykh magnitno-impul'snoi obrabotkoi poverkhnostnykh sloev metallicheskh izdelii s pomoshch'iu tokov vysokoi chastoty [Investigation of the hardened magnetic-pulse reworking surface layers of metal prod-

ucts with high-frequency currents]. *Aktual'nye problemy prochnosti: monografiia*. Ed. V.V. Rubanika. Vitebsk, 2018, vol. 2, gl. 6, pp. 111–124.

19. Shpiganovich A.N., Dovzhenko S.V. Analiz vliianiia vysshikh garmonicheskikh sostavliaiushchikh na bezotkaznost' elektroizoliatsionnykh pokrytii [Analysis of the influence of higher harmonic components on the reliability of electrical insulating coatings]. *Zhurn. nauch. publ. aspirantov i doktorantov*, 2008, at available: <http://www.jurnal.org/articles/2008/elect7.html> (accessed 27 Mart 2019).

20. Osnovy elektrodinamiki [Basics of electro-dynamics] Podgotovka k TsT (EGE), zadachi po fizike i matematike: sait, 2014, at available: [http://fizmat.by/kursy/jelektricheskij\\_tok/Om\\_cepti](http://fizmat.by/kursy/jelektricheskij_tok/Om_cepti) (accessed 27 Mart 2019).

Получено 05.07.19

Опубликовано 26.11.19

#### Сведения об авторах

**Малеронок Владимир Владимирович** (Барановичи, Республика Беларусь) – магистр технических наук, аспирант, старший преподаватель кафедры оборудования и автоматизации производства Барановичского государственного университета; e-mail: s-tm.v.v@mail.ru.

**Алифанов Александр Викторович** (Барановичи, Республика Беларусь) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оборудования и автоматизации производства Барановичского государственного университета; e-mail: alifanov\_aav@mail.ru.

#### About the authors

**Vladimir V. Maleronok** (Baranovichi, Republic of Belarus) – Master of Technical Sciences, Graduate Student, Senior Lecturer, Department of Equipment and Industrial Automation, Baranovichi State University; e-mail: s-tm.v.v@mail.ru.

**Alexander V. Alifanov** (Baranovichi, Republic of Belarus) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Equipment and Industrial Automation, Baranovichi State University; e-mail: alifanov\_aav@mail.ru.