

УДК 621.9.047

DOI: 10.30987/article_5c0f808d952152.60216179

С.Ю. Сьянов, А.М. Папикян

УСТАНОВЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ВЗАИМОСВЯЗИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ С УСЛОВИЯМИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Обобщены результаты теоретических исследований влияния режимов электроэрозионной обработки на эксплуатационные свойства деталей. Показано, что на усталостную прочность и износо-

стойкость большее влияние оказывает напряжение, действующее между электродами.

Ключевые слова: усталостная прочность, износостойкость, электроэрозионная обработка, ЭЭО, качество поверхностного слоя.

S.Yu. Sianov, A.M. Papikyan

THEORETICAL INTERRELATION ASCERTAINMENT OF WEAR-RESISTANCE AND FATIGUE STRENGTH WITH CONDITIONS OF ELECTRO-EROSION TREATMENT

The high precision machining of metals with different hardness is possible with the use of alternative methods of processing. One of such methods is electro-erosion treatment (EET). The EET is efficient to use at processing complex parts the representatives of which are shaping parts (SP) of press-molds. During the electro-erosion treatment the residual stresses arise in the surface layer of material which is a reason of shaping parts destruction which results in a press-mold breakage on the whole. To solve this problem one should develop a complex of measures for reliability and life increase of shaping parts on the basis of ensur-

ing operational properties specified, required or utmost. For that there was established a theoretical correlation of electro-erosion treatment with operating abilities (fatigue strength and wear-resistance).

The theoretical dependences obtained will allow ensuring operating abilities required still at the design stage of a fabrication method of shaping parts that will decrease their breakage risks and increase press-mold life on the whole.

Key words: fatigue strength, wear-resistance, electro-erosion treatment, EET, surface layer quality.

Введение

Обработка металлов различной твердости с высокой точностью возможна при использовании нетрадиционных методов обработки. Одним из таких методов является электроэрозионная обработка (ЭЭО). ЭЭО заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности электропроводной заготовки под действием электрических разрядов между заготовкой и электродом-инструментом. ЭЭО экономически выгодно применять при обработке сложнопрофильных деталей, одними из представителей которых являются формообразующие детали (ФОД) пресс-форм.

При электроэрозионной обработке ФОД в поверхностном слое материала возникают остаточные напряжения, которые являются причиной разрушения формообразующих деталей, что приводит к поломке пресс-формы в целом [1; 3; 4]. Для

решения данной проблемы следует разработать комплекс мероприятий по повышению надежности и долговечности ФОД на основе обеспечения заданных, требуемых или предельных эксплуатационных свойств.

В настоящее время для обеспечения заданных эксплуатационных свойств деталей при ЭЭО применяют функционально-ориентированные технологии (рис. 1) [2; 5; 6; 7].

Основные этапы разработки функционально-ориентированных технологических процессов ЭЭО:

1) анализ основных элементов конструкции и выделение типовых поверхностей изделия;

2) определение служебных функций типовых поверхностей изделия;

3) определение эксплуатационного свойства или группы эксплуатационных

свойств, обеспечивающих выполнение поверхностью изделия служебной функции;

4) определение параметров качества поверхностного слоя, обеспечивающих эксплуатационное свойство или группу эксплуатационных свойств;

5) рассмотрение схемы технологического воздействия, вариантов и условий реализации технологических операций ЭЭО для обеспечения необходимых параметров качества поверхностного слоя.

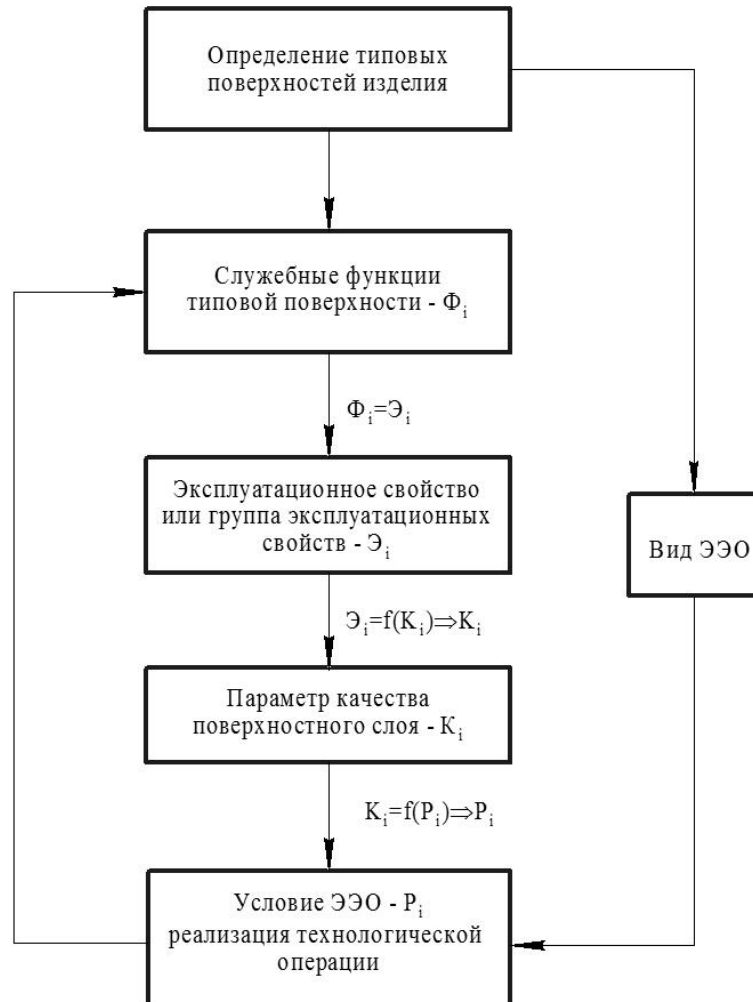


Рис. 1. Этапы разработки функционально-ориентированного технологического процесса электроэрозионной обработки

Целью проводимого теоретического исследования является получение теоретических зависимостей, описывающих взаимосвязь эксплуатационных свойств \mathcal{E}_i

(усталостной прочности и износостойкости) с условиями электроэрозионной обработки P_i , т.е. $\mathcal{E}_i=f(P_i)$.

Получение теоретических зависимостей взаимосвязи усталостной прочности и износостойкости с режимами электроэрозионной обработки

Усталостная прочность – свойство материала не разрушаться с течением времени под действием изменяющихся рабочих нагрузок. Разрушение происходит из-за появления микротрещин, их накопления, затем объединения в одно макроразрушение. При электроэрозионной обработке ФОД в поверхностном слое образу-

ются остаточные напряжения, что приводит к появлению микротрещин. Чтобы решить данную проблему, следует обеспечить такие режимы ЭЭО, которые не ухудшат показатели усталостной прочности.

Сопротивление усталости характеризуется коэффициентом

концентрации напряжений, который | рассчитывается по формуле [7]

$$\sigma_{\alpha} = 1 + \frac{200}{tmSm} [2\gamma R \max(R_{\max} - Rp)]^{0,5}, \quad (1)$$

где R_{\max} – наибольшая высота профиля шероховатости; R_p – расстояние от высшей точки наибольшего выступа профиля до линии единичных выступов в пределах базовой длины; Sm – средний шаг неровностей профиля шероховатости; tm – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; γ – коэффициент после электроэрозионной обработки, который необходимо определить в результате экспериментальных исследований.

В свою очередь, параметры шероховатости при ЭЭО можно рассчитать по теоретическим зависимостям [8; 9; 11]:

$$R_{\max} = 3 \sqrt{\frac{(2\beta - 1)IU\eta\tau}{(4\beta + 1)c\rho T_{\text{п}}}}; \quad (2)$$

$$R_p = 0,671R_z; \quad (3)$$

$$R_z = 0,84 \sqrt[3]{\frac{(2\beta - 1)IU\eta\tau}{(4\beta + 1)c\rho T_{\text{п}}}}; \quad (4)$$

$$Sm = 4,5R_z; \quad (5)$$

$$tm = 0,49p^{1,02}, \quad (6)$$

где β – коэффициент перекрытия лунок; I – сила тока; U – напряжение, подаваемое на

электроды; η – коэффициент полезного использования энергии импульса; τ – длительность импульсов; c – удельная теплоемкость материала; ρ – плотность материала; $T_{\text{п}}$ – температура плавления материала; p – уровень сечения (50%).

Подставив уравнения (2-6) в уравнение (1), получим

$$\sigma_{\alpha} = 1 + \frac{1,86\gamma^{0,5}}{\sqrt[6]{(2\beta - 1)IU\eta\tau}} \cdot \sqrt[6]{(4\beta + 1)c\rho T_{\text{п}}}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что усталостная прочность зависит от силы тока, напряжения и длительности импульсов, а также от физико-механических свойств материала заготовки.

Исследования проводились для инструментальных штамповых сталей. На рис. 2, 3 и 4 приведены графики зависимостей усталостной прочности от режимов ЭЭО.

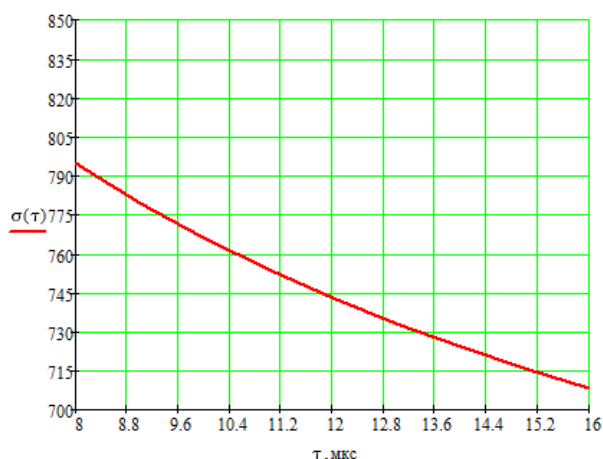


Рис. 2. График зависимости усталостной прочности от ширины импульса

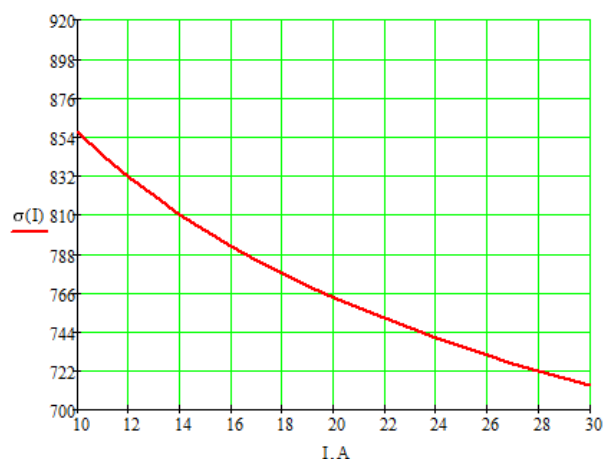


Рис. 3. График зависимости усталостной прочности от силы тока

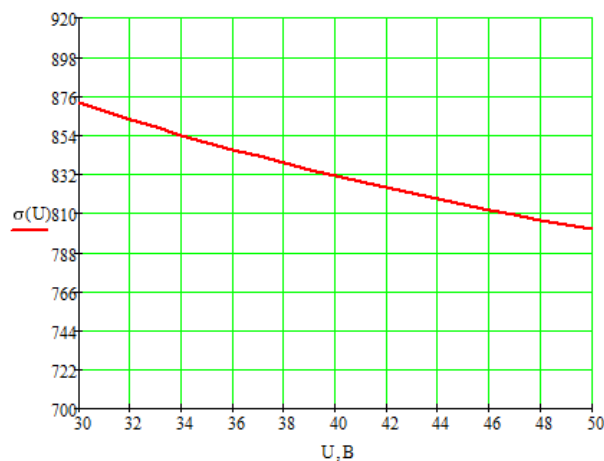


Рис. 4. График зависимости усталостной прочности от напряжения

Износостойкость – эксплуатационное свойство, определяющее способность поверхностных слоев деталей сопротивляться разрушению при трении скольжения, трении качения, а также при микроперемещениях, обусловленных воздействием вибраций. Трение и изнашивание деталей в значительной степени определяются формой и высотой шероховатости, а также направлением штрихов обработки.

Для оценки качества поверхностей трения предложен параметр, характеризующий равновесное состояние поверхностей трения [7]:

$$C_x = \frac{(RaWzH_{max})^{0,17}}{t_m^{1,5} S_m^{0,5} U^{0,67} \lambda}, \quad (8)$$

где H_{max} – макроотклонения поверхности; W_z – волнистость поверхности; R_a , S_m – параметры шероховатости поверхности; t_m – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; U_n – степень наклепа поверхностного слоя; λ – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений второго рода на износ.

Волнистость поверхности после ЭЭО можно рассчитать по теоретической зависимости [8; 9; 11]

$$Wz = 0,5 \sqrt[3]{\frac{I \tau \eta}{c \rho T_{II}}} \left(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}} \right), \quad (9)$$

где I – сила тока; η – коэффициент полезного использования энергии импульса; τ – длительность импульсов; c – удельная теплоемкость материала; ρ – плотность мате-

риала; T_{II} – температура плавления материала; U_{max} – максимальное напряжение при обработке; U_{min} – минимальное напряжение при обработке.

Степень наклепа поверхностного слоя определяется формулой [9]

$$U_n = \frac{H - H_h}{H} \frac{h}{u}, \quad (10)$$

где H_h – микротвердость наклепанного слоя; H_n – микротвердость исходного материала.

В свою очередь, микротвердость наклепанного слоя при электроэрозионной обработке определяется формулой [8; 9; 11]

$$h_{\mu} = 10^{-3} \frac{A^{0,234} \Pi^{0,409}}{\Pi_d^{0,236}}, \quad (11)$$

где A_n – энергия импульса; Π_d – коэффициент фазовых превращений Палатника материала детали; Π_n – коэффициент фазовых превращений Палатника материала инструмента.

Коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений второго рода на износ, определяется формулой [7]

$$\lambda = \left(\frac{\delta_B - \delta^{nocm}}{\delta_a} \right)^t, \quad (12)$$

где δ_B – временное сопротивление разрушению; δ_a – действующее значение амплитудного напряжения на поверхности

трения; t – параметр фрикционной усталости при упругом контакте.

Подставив уравнения (2-6), (9-12) в уравнение (8), получим

$$C = \frac{\left[\sqrt[3]{\frac{I \tau \eta}{c \rho T}} \left(\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}} \right) H_{\max} \right]^{0,17}}{0,0005 \left(\frac{(2\beta - 1) I U \eta \tau}{(4\beta + 1) c \rho T n} \right)^{0,17} \left(\frac{H_u - \left(10^{-3} \frac{A^{0,234} \Pi_u^{0,409}}{\Pi_\delta^{0,236}} \right)}{H_u} \right)^{0,67} \left(\frac{\delta_B - \delta^{н\text{осм}}}{\delta_a} \right)^t} \quad (13)$$

Исследования проводились для инструментальных штамповых сталей. На рис.

5, 6 и 7 приведены графики зависимостей износостойкости от режимов ЭЭО.

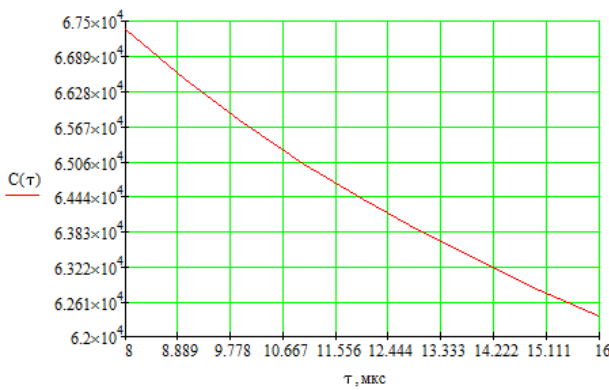


Рис. 5. График зависимости износостойкости от ширины импульса

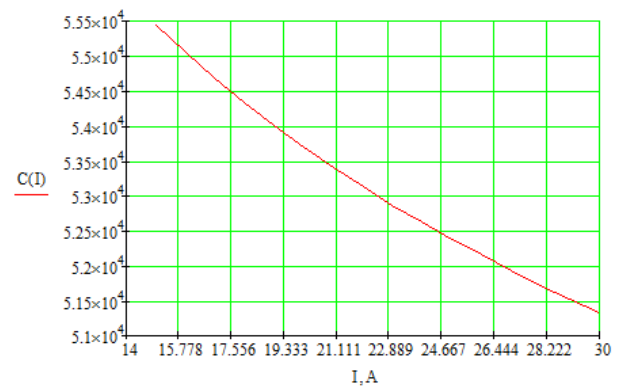


Рис. 6. График зависимости износостойкости от силы тока

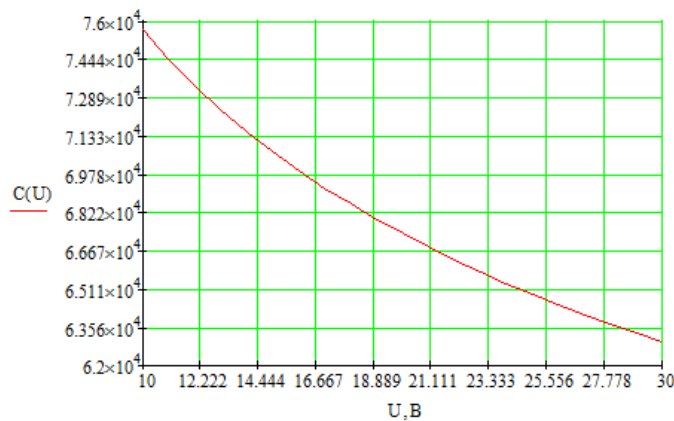


Рис. 7. График зависимости износостойкости от напряжения

Таким образом, анализируя зависимость (13) и графики, изображенные на рис. 5, 6 и 7, можно сделать вывод о том, что износостойкость зависит как от режимов электроэрозионной обработки, так и от физико-механических свойств материала детали.

На основе проведенных теоретических исследований были получены значе-

ния эксплуатационных параметров для различных режимов ЭЭО (таблица). Данные таблицы позволяют установить режимы электроэрозионной обработки, которые обеспечивают получение требуемых параметров усталостной прочности и износостойкости.

Таблица

Взаимосвязь усталостной прочности и износостойкости с условиями ЭЭО

Режим обработки		Режимы электроэрозионной обработки			
Технологические параметры	I, А	2,6	10 – 30	2,6	
	U, В	30	30	30 – 50	
	$\tau_{и}$, мкс	8 – 16	8	8	
Параметры, характеризующие эксплуатационные свойства	Износостойкость	С	$6,73 \cdot 10^4 - 6,28 \cdot 10^4$	$5,55 \cdot 10^4 - 5,15 \cdot 10^4$	$7,6 \cdot 10^4 - 6,1 \cdot 10^4$
	Усталостная прочность	σ	790-700	880 – 720	898 – 800

Заключение

В ходе проведенных теоретических исследований были получены функциональные зависимости взаимосвязи эксплуатационных свойств (усталостной прочности и износостойкости) с условиями электроэрозионной обработки. Из таблицы можно сделать вывод, что усталостная прочность и износостойкость зависят от силы тока, напряжения, подаваемого на

электроды, и длительности импульсов. Большее влияние на параметры эксплуатационных свойств оказывает напряжение, действующее между электродами.

Данные исследования позволят обеспечивать требуемые эксплуатационные свойства, что снизит риски поломки ФОД и увеличит срок службы пресс-формы в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федонин, О.Н. Обеспечение износостойкости и усталостной прочности поверхностей при электроэрозионной обработке / О.Н. Федонин, С.Ю. Сьянов, А.М. Папикян // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 11 (77). – С. 10–14.
2. Сьянов, С.Ю. Функционально-ориентированные технологии при электроэрозионной обработке / С.Ю. Сьянов, А.М. Папикян // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – № 2 (80). – С. 35–39.
3. Козлов, В.Г. Современные методы обработки металлов. Электроэрозионная обработка / В.Г. Козлов, В.С. Волков // Молодежный вектор развития аграрной науки. - 2015. - С. 180-184.
4. Сариллов, М.Ю. Выбор параметров управления качеством при электроэрозионной обработке поверхностей деталей / М.Ю. Сариллов, М.А. Покотило // Автоматизация. Современные технологии. - 2009. - № 4. - С. 3-9.
5. Брецих, А.Ф. Электроэрозионная обработка / А.Ф. Брецих В.И. Сысун // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. - 2010. - № 2 (107). - С. 78-82.
6. Михайлов, А.Н. Общие особенности функционально-ориентированных технологий и принципы ориентации их технологических воздействий и свойств изделий / А.Н. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XIV междунар. науч.-техн. конф. (г. Севастополь, 17-22 сент. 2007 г.): в 5 т. – Донецк: ДонНТУ, 2007. - Т. 3. - С. 38-52.
7. Михайлов, А.Н. Функционально-ориентированные технологии. Особенности синтеза новых и нетрадиционных свойств изделий / А.Н. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XV междунар. науч.-техн. конф. (г. Севастополь, 15-20 сент. 2008 г.): в 4 т. – Донецк: ДонНТУ, 2008. - Т. 2. - С. 290–314.
8. Syanov, S.Y. Theoretical determination of surface layer quality characteristics of workpieces, tool electrode wear and efficiency of spark eroding / S.Y. Syanov // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. - 2015.
9. Сьянов, С.Ю. Теоретическое определение параметров качества поверхностного слоя деталей, износа электрода-инструмента и производительности процесса при электроэрозионной обработке / С.Ю. Сьянов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 1 (49). – С. 67-73.
10. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. - М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
11. Сьянов, С.Ю. Технологическое управление параметрами качества поверхностного слоя деталей машин при электроэрозионной обработке / С.Ю. Сьянов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – № 6 (36). – С. 24-29.

1. Fedonin, O.N. Surface wear-resistance and fatigue strength support during electro-erosion treatment / O.N. Fedonin, S.Yu. Siyanov, A.M. Papikyan // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.11 (77). – pp. 10-14.
2. Sianov, S.Yu. Functionally-oriented technologies at electro-erosion treatment / S.Yu. Siyanov, A.M. Papikyan // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.2 (80). – pp. 35-39.
3. Kozlov, V.G. Modern methods of metal processing. Electro-erosion treatment / V.G. Kozlov, V.S. Volkov // *Youth Vector of Agricultural Science Development*. – 2015. – pp. 180-184.
4. Sarilov, M.Yu. Choice of quality control parameters at electro-erosion treatment of part surfaces / M.Yu. Sarilov, M.A. Pokotilo // *Automation. Modern Technologies*. – 2009. – No.4 – pp. 3-9.
5. Bretskikh, A.F. Electro-erosion treatment / A.F. Bretskikh, V.I. Sysun // *Proceedings of Petrozadsk State University*. 2010. – No.2 (107). – pp. 78-82.
6. Mikhailov, A.N. General peculiarities of functionally-oriented technologies and orientation principles of their technological impacts and product properties / A.N. Mikhailov // *Mechanical Engineering and Technosphere of the XXI-st Century: Proceedings of the XIV –th Inter. Scientif.-Tech. Conf.* (Sevastopol, September 17-22, 2007): in 5 Vol. – Donetsk: DonNTU, 2007. – Vol.3. – pp. 38-52.
7. Mikhailov, A.N. Functionally-oriented technologies. Synthesis peculiarities of new and alternative properties products / A.N. Mikhailov // *Mechanical Engineering and Technosphere of the XXI-st Century: Proceedings of the XV-th Inter. Scientif.-Tech. Conf.* (Sevastopol, September 15-20, 2008): in 4 Vol. – Donetsk: DonNTU, 2008, Vol.2. – pp. 290-314.
8. Syanov, S.Y. Theoretical determination of surface layer quality characteristics of workpieces, tool electrode wear and efficiency of spark eroding / S.Y. Syanov // *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems*. – 2015.
9. Sianov, S.Yu. Theoretical definition of quality parameters of parts surface layer, tool electrode wear and process productivity at electro-erosion treatment / S.Yu. Siyanov // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2016. – No.1 (49). – pp. 67-73.
10. Suslov, A.G. *Scientific Fundamentals of Engineering Technique* / A.G. Suslov, A.M. Dalsky. – M.: Mechanical Engineering, 2002. – pp. 684.
11. Siyanov, S.Yu. Technological control of surface layer quality parameters in machinery at electro-erosion treatment / S.Yu. Siyanov // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – No.6. (36). – pp. 24-29.

Статья поступила в редакцию 03.10.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета

Петрешин Д.И.

Статья принята к публикации 12.11.18.

Сведения об авторах:

Сьянов Сергей Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизированные технологические системы» Брянского государственного технического университета, тел. (4832) 58-82-85, e-mail: SERG620@mail.ru.

Sianov Sergey Yurievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Automated Technological Systems”, Bryansk State Technical University, e-mail: SERG620@mail.ru.

Папикян Алина Мушеговна, аспирант кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 58-82-85, e-mail: Папикан-алина@mail.ru.

Papikyan Alina Mushegovna, Post graduate student of the Dep. “Engineering Technique”, Bryansk State Technical University, e-mail: Папикан-алина@mail.ru.