

УДК 621.9.047
DOI:10.30987/2223-4608-2020-12-18-21

С.Ю. Сьянов, к.т.н.
(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)
E-mail: SERG620@yandex.ru

Технологическое обеспечение износостойкости деталей машин электроэрозионной обработкой

На основе проведенных исследований предложены теоретические зависимости для определения интенсивности изнашивания в зависимости от режимов электроэрозионной обработки. Они позволяют определить оптимальные режимы электроэрозионной обработки для обеспечения требуемой износостойкости деталей машин.

Ключевые слова: износостойкость; интенсивность изнашивания; электроэрозионная обработка; качество поверхностного слоя; режимы электроэрозионной обработки.

S.Yu. Siyanov, Can. Sc. Tech.
(FSBEI HE "Bryansk State Technical University",
7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk, 241035)

Technological support of machinery wear-resistance with electro-erosion treatment

On the basis of the investigations carried out there are offered theoretical dependences for the definition of wear intensity depending on modes of electro-erosion treatment. They allow defining optimum modes of electro-erosion treatment to ensure machinery wear-resistance required.

Keywords: wear-resistance; wear intensity; electro-erosion treatment; surface layer quality; modes of electro-erosion treatment.

Надежность изделий машиностроения зависит от эксплуатационных свойств деталей и их соединений. Одним из основных эксплуатационных свойств является износостойкость. Износ поверхностных слоев при работе пар трения приводит к уменьшению размеров контактирующих деталей, что в свою очередь способствует выходу из строя как пар трения, так и изделия в целом. Поэтому вопрос технологического обеспечения износостойкости деталей машин является весьма актуальным.

В соответствии с ГОСТ 27674-88 износостойкость – это свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения. Износостойкость оценивается скоростью изнашивания или интенсивно-

стью изнашивания. Износостойкость зависит от параметров качества и физико-механических свойств поверхностного слоя деталей.

В работах [1 – 4] представлена зависимость для определения интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания от параметров качества и физико-механических свойств их поверхностного слоя:

$$I_h = \frac{1,2\pi}{n\lambda_m^{3/2} H_{\mu 0}^{3/2}} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi RaWzH_{\max})^{1/3}}{ESm}}, \quad (1)$$

где n – число циклов воздействия, которое приводит к разрушению материала; λ – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений на износ:

$$\lambda = [(\sigma_{\epsilon} - \sigma_0) / \sigma_a]^{t_y}, \quad (2)$$

где σ_{ϵ} – временное сопротивление разрыву, σ_0 – остаточные напряжения второго рода, σ_a – действующее значение амплитудного напряжения в поверхностном слое, t_y – параметр фрикционной усталости; t_m – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; $H_{\mu 0}$ – поверхностная микротвердость; Ra – среднее арифметическое отклонение профиля; Wz – параметр волнистости; H_{\max} – максимальное макроотклонение; Sm – средний шаг неровностей; E – модуль упругости первого рода; μ – коэффициент Пуассона.

Зависимости параметров качества и физико-механических свойств поверхностного слоя, а также износа электрод-инструмента от режимов электроэрозионной обработки получены в работах [4 – 6]:

$$Ra = \sqrt[3]{0.024 \frac{I \tau \eta}{c \rho T}}, \quad (3)$$

$$Sm = \sqrt[3]{10.37 \frac{I \tau \eta}{c \rho T}}, \quad (4)$$

$$t_{50} = 26,5, \quad (5)$$

параметр волнистости при обработке заранее обработанных поверхностей:

$$Wz = \sqrt{10^{-4} \gamma^2 [(Wz_{\text{исх}}^{\text{н}})^2 + (Wz_{\text{исх}}^{\text{зар}})^2] + (Wz_{\text{исх}}^{\text{н}})^2 (1 - 0,02\gamma) + \left(0,5 \sqrt[3]{\frac{I \tau \eta}{c \rho T}}\right)^2 (\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}})^2}, \quad (6)$$

при обработке в сплошном материале:

$$Wz = \sqrt{(Wz_{\text{исх}}^{\text{н}})^2 (1 - 0,02\gamma + 10^{-4} \gamma^2) + \left(0,5 \sqrt[3]{\frac{I \tau \eta}{c \rho T}}\right)^2 (\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}})^2}, \quad (7)$$

при разрезании или вырезании:

$$Wz = 0,5 \sqrt[3]{\frac{I \tau \eta}{c \rho T}} (\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}}), \quad (8)$$

$$H_{\mu 0} = 4,04 \frac{\Pi_{\text{н}}^{0,171}}{\Pi_{\text{д}}^{0,017}}, \quad (9)$$

$$\sigma_0 = \sigma_a = \frac{1}{2} E \alpha \left[\frac{U \tau \eta}{c \rho (2 \sqrt{\pi a \tau})^3} \text{EXP} \left[- \frac{\left(y + \sqrt{4 a \tau \ln \left(\frac{(T - T_0) c \rho (2 \sqrt{\pi a \tau})^3}{U \tau \eta} \right)} \right)^2}{4 a \tau} \right] \right]. \quad (10)$$

Максимальные макроотклонения при электроэрозионной обработке в большей мере зависят от исходных макроотклонений инструмента и будут определяться по зависимости:

$$H_{\max} = \sqrt{(H_{\max}^{\text{н}})^2 (1 - 0,02\gamma + 10^{-4} \gamma^2)}, \quad (11)$$

$$\gamma = 20,4 \cdot 10^6 \frac{(1 - \eta) U I}{c_{\text{н}} \rho_{\text{н}} T_{\text{н}}}, \quad (12)$$

где I – технологический ток; U – технологическое напряжение; τ – длительность импульса

тока; η – коэффициент полезного использования энергии импульса; c – удельная теплоем-

кость материала изделия; ρ – плотность материала изделия; T – температура плавления обрабатываемого материала; U_{\max} – максимальное напряжение при обработке, $U_{\max} = U + \Delta U$ (ΔU – перепад напряжения); U_{\min} – минимальное напряжение при обработке, $U_{\min} = U - \Delta U$; $Wz_{\text{исх}}^{\text{зар}}$ – исходная волнистость заготовки; $Wz_{\text{исх}}^{\text{н}}$ – исходная волнистость инструмента; γ – относительный объемный износ электрода-инструмента; $\Pi_{\text{и}}$ – критерий Палатника материала инструмента; $\Pi_{\text{д}}$ – критерий Палатника материала детали; α – коэффициент линейного расширения материала; a – температуропроводность материала; $c_{\text{и}}$ – удельная теплоемкость материала инструмента; $\rho_{\text{и}}$ – плотность материала инструмента; $T_{\text{и}}$ – температура плавления материала ин-

струмента; T_0 – температура окружающей среды.

Подставляя зависимость (10) в (2) получим зависимость (13) для определения коэффициента, учитывающего влияние поверхностных остаточных напряжений на износ. Подставляя в зависимость (1) зависимости (3) – (13) получим окончательные зависимости для определения интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания в зависимости от режимов и условий электроэрозионной обработки. Полученные зависимости позволят определять оптимальные режимы и условия электроэрозионной обработки от требуемой интенсивности изнашивания, а также технологически обеспечивать износостойкость деталей машин электроэрозионной обработкой.

$$\lambda = \left[\sigma_{\text{в}} / \left(\frac{0,5E\alpha U\tau\eta}{c\rho(2\sqrt{\pi a\tau})^3} \text{EXP} \left[-\ln \left(\frac{(T - T_0)c\rho(2\sqrt{\pi a\tau})^3}{U\tau\eta} \right) \right] - 1 \right) \right]^{t_y} \quad (13)$$

При обработке заранее обработанных поверхностей:

$$I_{\text{и}} = \frac{0,038\sqrt{(30 - 30\mu^2)}^{12} \sqrt{(H\text{max}_{\text{исх}}^{\text{н}})^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta - 1)^2}{T_{\text{и}}^2 c_{\text{и}}^2 \rho_{\text{и}}^2} + \frac{408000IU(\eta - 1)}{T_{\text{и}} c_{\text{и}} \rho_{\text{и}}} + 1 \right)} \sqrt{\frac{0,024UI\tau\eta}{T_{\text{рс}}}}}{n \left(E^3 \sqrt{\frac{10,37UI\eta\tau}{T_{\text{рс}}}} \right)^{0,5} \left(\frac{3969\alpha^3 \rho^2 c^2 \sigma_{\text{в}} \tau (T - T_0)}{E I^2 U^2 \eta^2 \alpha} \right)^{t_y} \left(4,04 \frac{\Pi_{\text{и}}^{0,171}}{\Pi_{\text{д}}^{0,017}} \right)^{1,5}} \times \frac{\sqrt{0,5 \left(\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}} \right)^2 \sqrt{\frac{I\eta\tau}{T_{\text{рс}}}} + (Wz_{\text{исх}}^{\text{н}})^2 \left(\frac{408000IU(\eta - 1)}{T_{\text{и}} c_{\text{и}} \rho_{\text{и}}} + 1 \right) + \frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta - 1)^2 (Wz_{\text{исх}}^{\text{н}})^2 + (Wz_{\text{исх}}^{\text{д}})^2}{T_{\text{и}}^2 c_{\text{и}}^2 \rho_{\text{и}}^2}}}{n \left(E^3 \sqrt{\frac{10,37UI\eta\tau}{T_{\text{рс}}}} \right)^{0,5} \left(\frac{3969\alpha^3 \rho^2 c^2 \sigma_{\text{в}} \tau (T - T_0)}{E I^2 U^2 \eta^2 \alpha} \right)^{t_y} \left(4,04 \frac{\Pi_{\text{и}}^{0,171}}{\Pi_{\text{д}}^{0,017}} \right)^{1,5}}$$

При обработке в сплошном материале:

$$I_{\text{и}} = \frac{0,038\sqrt{(30 - 30\mu^2)}^{12} \sqrt{(H\text{max}_{\text{исх}}^{\text{н}})^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta - 1)^2}{T_{\text{и}}^2 c_{\text{и}}^2 \rho_{\text{и}}^2} + \frac{408000IU(\eta - 1)}{T_{\text{и}} c_{\text{и}} \rho_{\text{и}}} + 1 \right)}}{n \left(E^3 \sqrt{\frac{10,37UI\eta\tau}{T_{\text{рс}}}} \right)^{0,5} \left(\frac{3969\alpha^3 \rho^2 c^2 \sigma_{\text{в}} \tau (T - T_0)}{E I^2 U^2 \eta^2 \alpha} \right)^{t_y} \left(4,04 \frac{\Pi_{\text{и}}^{0,171}}{\Pi_{\text{д}}^{0,017}} \right)^{1,5}} \times \frac{\sqrt{\frac{0,024UI\tau\eta}{T_{\text{рс}}}} \sqrt{0,5 \left(\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}} \right)^2 \sqrt{\frac{I\eta\tau}{T_{\text{рс}}}} + (Wz_{\text{исх}}^{\text{н}})^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta - 1)^2}{T_{\text{и}}^2 c_{\text{и}}^2 \rho_{\text{и}}^2} + \frac{408000IU(\eta - 1)}{T_{\text{и}} c_{\text{и}} \rho_{\text{и}}} + 1 \right)}}{n \left(E^3 \sqrt{\frac{10,37UI\eta\tau}{T_{\text{рс}}}} \right)^{0,5} \left(\frac{3969\alpha^3 \rho^2 c^2 \sigma_{\text{в}} \tau (T - T_0)}{E I^2 U^2 \eta^2 \alpha} \right)^{t_y} \left(4,04 \frac{\Pi_{\text{и}}^{0,171}}{\Pi_{\text{д}}^{0,017}} \right)^{1,5}}$$

При разрезании или вырезании:

$$I_{\text{и}} = \frac{0,028\sqrt{(30 - 30\mu^2)}}{n \left(E^3 \sqrt{\frac{10,37UI\eta\tau}{T_{\text{рс}}}} \right)^{0,5} \left(\frac{3969\alpha^3 \rho^2 c^2 \sigma_{\text{в}} \tau (T - T_0)}{E I^2 U^2 \eta^2 \alpha} \right)^{t_y} \left(4,04 \frac{\Pi_{\text{и}}^{0,171}}{\Pi_{\text{д}}^{0,017}} \right)^{1,5}} \times$$

$$K \sqrt{\frac{\left(\pi \left(\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}} \right) \sqrt{\left(H_{\max_{\text{ИСК}}} \right)^2 \left(\frac{4.16 \cdot 10^{10} \rho^2 U^2 (\eta-1)^2}{T_{\text{и}}^2 c_{\text{и}}^2 \rho_{\text{и}}^2} + \frac{408000 U (\eta-1)}{T_{\text{и}} c_{\text{и}} \rho_{\text{и}}} + 1 \right) \sqrt{\frac{0.024 U^2 \eta^2 \tau^2}{T^2 \rho^2 c^2}} \right)^{0.33}}{\pi \left(E \sqrt{\frac{10.37 U \eta \tau}{T \rho c}} \right)^{0.5} \left(\frac{3969 a^2 \rho^2 c^2 \sigma_{\text{и}} \tau (T-T_0)}{E T^2 U^2 \eta^2 a} \right)^{0.5} \left(4.04 \frac{\rho_{\text{и}}^{2.171}}{\rho_{\text{и}}^{2.017}} \right)^{1.5}}$$

Анализируя полученные теоретические зависимости, можно сделать вывод о том, что интенсивность изнашивания возрастает с ростом напряжения и тока электроэрозионной обработки и уменьшается с ростом длительности импульсов электроэрозионной обработки, о чем свидетельствуют графики (рис. 1).

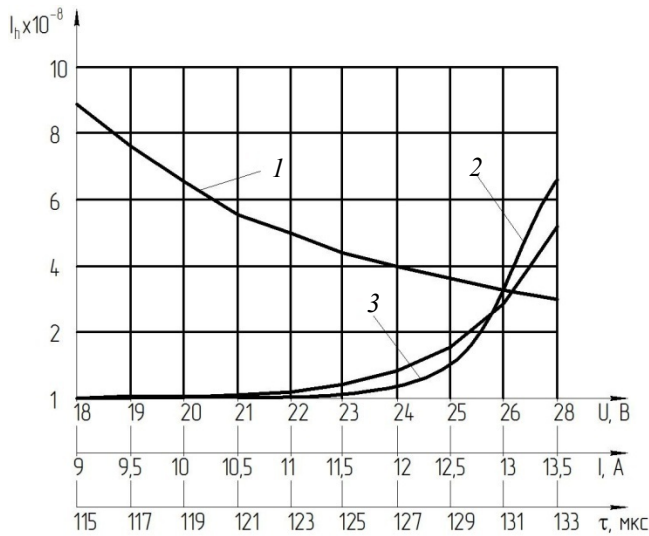


Рис. 1. Интенсивность изнашивания в зависимости от длительности импульса 1 ($U = 27 \text{ В}$; $I = 13,5 \text{ А}$), силы тока 2 ($U = 27 \text{ В}$; $\tau = 175 \text{ мкс}$) и напряжения 3 ($I = 13,5 \text{ А}$; $\tau = 175 \text{ мкс}$)

Интенсивность изнашивания после электроэрозионной обработки во всем диапазоне режимов лежит от 10^{-8} при черновой обработке до 10^{-15} при чистовой обработке на основе результатов расчета по полученным теоретическим зависимостям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Качество машин:** Справочник. В 2 т. Т. 1 / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.

2. **Инженерия** поверхности деталей / А.Г. Суслов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2009 – 320 с.

3. **Суслов, А.Г.** Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002 – 684 с.

4. **Справочник технолога** / под общей ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.

5. **Сьянов, С.Ю.** Разработка технологического процесса электроэрозионной обработки // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – № 2 (55). – С. 49 – 57.

6. **Федонин, О.Н., Сьянов, С.Ю., Фомченкова, Н.И.** Управление износом инструмента и производительностью процесса при электроэрозионной обработке // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – № 3. – С. 85 – 88.

REFERENCES

1. *Machinery Quality:* reference book. In 2 Vol., Vol.1. / A.G. Suslov, E.D. Braun, N.A. Vitkevich et al. – M.: Mechanical Engineering, 1995. – pp. 256.

2. *Parts Surface Engineering* / A.G. Suslov [et al.]; under the editorship A.G. Suslova. – M.: Mechanical Engineering, 2009 – pp. 320.

3. Suslov, A.G. *Scientific Fundamentals of Engineering Technique* / A.G. Suslov, A.M. Dalsky. – M.: Mechanical Engineering, 2002 – pp. 684.

4. *Technologist's Reference Book* / under the general editorship of A.G. Suslov. M.: Innovation Mechanical Engineering, 2019. – pp. 800.

5. Siyanov, S.Yu. Development of engineering process for electro-erosion treatment // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2017. – No.2(55). – pp. 49-57.

6. Fedonin, O.N., Siyanov, S.Yu., Fomchenkova, N.I. Control of tool wear and process capacity at electro-erosion treatment // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2014. – No.3. – pp. 85-88.

Рецензент д.т.н. А.И. Болдырев