

УДК [621.9.015+621.9.011]:621.9.048.4
DOI:10.30987/2223-4608-2021-11-30-37

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

Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин электроэрозионной обработкой

Приведены зависимости для определения геометрических и физико-механических параметров качества поверхностного слоя, износостойкости, скорости коррозии и предела выносливости в зависимости от режимов и условий электроэрозионной обработки деталей машин. Данные зависимости позволяют определить оптимальные режимы и условия электроэрозионной обработки для обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя (при двухступенчатом подходе – конструкторском и технологическом обеспечении эксплуатационных свойств), износостойкости, скорости коррозии и предела выносливости (при одноступенчатом подходе – непосредственном технологическом обеспечении).

Ключевые слова: интенсивность изнашивания; коррозионная стойкость; предел выносливости; электроэрозионная обработка; качество поверхностного слоя; условия обработки.

S.Yu. Syanov, Can.Sc.Tech.
(Bryansk State Technical University,
7, 50 let Oktyabrya Boulevard, Bryansk, 241035)

Technological quality assurance of the surface layer and operational properties of machine parts by electroerosion treatment

Dependences for determining geometric, physical and mechanical parameters of the surface layer quality, wear resistance, corrosion rate and endurance limit depending on the modes and conditions of electroerosion treatment of machine parts have been given. These dependences allow determining optimal modes and conditions of electroerosion treatment to ensure the required parameters of the quality of the surface layer (with a two-stage approach - design and technological support of operational properties), wear resistance, corrosion rate and endurance limit (with a single-stage approach - direct technological support).

Keywords: wear rate; corrosion resistance; endurance limit; electroerosion treatment; surface layer quality; processing conditions.

Качество и надежность изделий и, как следствие, их срок службы определяется эксплуатационными свойствами. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств изделий позволит сократить затраты на их изготовление и ремонт, а также обеспечить заданный срок службы.

Технологическое обеспечение эксплуата-

ционных свойств изделий можно осуществлять двумя методами: конструкторским и технологическим обеспечением (двухступенчатый подход) и непосредственно технологическим обеспечением (одноступенчатый подход).

При двухступенчатом подходе конструктор на основании требуемых эксплуатационных свойств задает параметры качества поверхно-

стного слоя, которые в дальнейшем должен обеспечить технолог при помощи соответствующих режимов и условий электроэрозионной обработки, т.е. для решения данной задачи необходимы четкие зависимости связывающие режимы и условия электроэрозионной обработки с параметрами качества поверхностного слоя деталей машин.

При одноступенчатом подходе технолог на основании требуемых эксплуатационных свойств должен назначить такие режимы и условия электроэрозионной обработки, которые их обеспечивали бы, т.е. для решения данной задачи необходимы четкие зависимости связывающие режимы и условия электроэрозионной обработки с требуемыми эксплуатационными свойствами деталей машин.

Таким образом, вопросы технологического обеспечения параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин электроэрозионной обработкой являются актуальными.

Технологическое обеспечение параметров качества поверхностного слоя

Разрушение электродов при электроэрозионной обработке происходит за счет импульсов технологического тока. Это приводит к удалению материала заготовки, за счет чего формируются геометрические параметры качества поверхностного слоя, а также к нагреву и охлаждению тонких поверхностных слоев с высокими скоростями, что приводит к изменению физико-механических свойств материала заготовки.

На основе анализа физической природы протекающих процессов и приняв во внимание допущения о том, что все лунки одинаковы и коэффициент перекрытия лунок β постоянен на протяжении всей обработки и равен своему среднему значению были получены теоретические зависимости для расчета параметров шероховатости поверхности [1, 2]:

$$Rz = \sqrt[3]{\frac{(2\beta - 1)IU\tau\eta}{(4\beta + 1)c_3\rho_3T_{пл}}}; \tag{1}$$

$$Ra = 0,4Rz; \tag{2}$$

$$Sm = \sqrt{\frac{8\beta + 4}{2\beta - 1}} Rz, \tag{3}$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, м; Rz – наибольшая высота профиля, м; Sm – средний шаг неровностей профиля, м; I – технологический ток, А; U – технологическое напряжение, В; τ – длительность импульса тока, мкс; c_3 – удельная теплоемкость мате-

риала заготовки, Дж/кг·°С; ρ_3 – плотность материала заготовки, кг/м³; $T_{пл}$ – температура плавления обрабатываемого материала, °С; β – коэффициент перекрытия лунок (для проектных расчетов принимается равным 1,29); η – коэффициент полезного использования энергии импульса, который можно определить по зависимости [1, 2]:

$$\eta = \frac{0,92}{\sqrt{\frac{\lambda_и c_и \rho_и}{\lambda_з c_з \rho_з} + 1}}, \tag{4}$$

где $\lambda_и, \lambda_з$ – теплопроводность материала инструмента и заготовки, Вт/м·°С; $c_и, c_з$ – удельная теплоемкость инструмента и заготовки, Дж/кг·°С; $\rho_и, \rho_з$ – плотность материала инструмента и заготовки, кг/м³.

Для определения стандартизованных параметров шероховатости поверхности деталей после электроэрозионной обработки были получены эмпирическими зависимостями [1]:

$$Y = b_0 A_и^{b_1} P_д^{b_2} P_и^{b_3}, \tag{5}$$

где $A_и$ – энергия импульсов (0,0125... 0,0002 Дж); $P_д$ – критерий фазовых превращений Палатника для материала детали (6,03·10¹⁴... 2,51·10¹⁴ Дж·Вт/м⁴); $P_и$ – критерий фазовых превращений Палатника для материала инструмента (2,227·10¹⁵... 5,979·10¹⁴ Дж·Вт/м⁴); b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты (табл. 1).

1. Значения коэффициентов уравнения для рассматриваемого параметра шероховатости поверхности

Y	b_0	b_1	b_2	b_3
$Rz, \text{ мкм}$	$4,118 \cdot 10^5$	0,318	-0,103	-0,132
$Ra, \text{ мкм}$	$2,224 \cdot 10^3$	0,345	-0,020	-0,102
$Sm, \text{ мм}$	12,79	0,330	-0,043	-0,044

На формирование волнистости поверхности при электроэрозионной обработке будут оказывать влияние исходная волнистость заготовки и инструмента, а также колебания технологических режимов обработки. Указанные факторы будут оказывать разное влияние при различных схемах формообразования деталей. Учитывая это, были получены теоретические зависимости для определения параметров волнистости при электроэрозионной обработке для различных схем формообразования деталей [2]:

– при обработке заранее подготовленных поверхностей:

$$Wz = \sqrt{\frac{10^{-4}\gamma^2((Wz_{исх}^и)^2 + (Wz_{исх}^{зар})) + (Wz_{исх}^и)^2(1 - 0,02\gamma) + \left(0,5 \sqrt[3]{\frac{I\tau\eta}{c_3\rho_3 T_{пл}}}\right)^2}{\left(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}}\right)^2}}; \quad (6)$$

– при обработке в сплошном материале:

$$Wz = \sqrt{\frac{(Wz_{исх}^и)^2(1 - 0,02\gamma + 10^{-4}\gamma^2) + \left(0,5 \sqrt[3]{\frac{I\tau\eta}{c_3\rho_3 T_{пл}}}\right)^2}{\left(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}}\right)^2}}; \quad (7)$$

– при разрезании или вырезании:

$$Wz = 0,5 \sqrt[3]{\frac{I\tau\eta}{c_3\rho_3 T_{пл}}} \left(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}}\right)^2, \quad (8)$$

где U_{max} – максимальное напряжение при обработке $U_{max} = U + \Delta U$, ΔU – перепад напряжения, В; U_{min} – минимальное напряжение при обработке $U_{min} = U - \Delta U$, В; τ – длительность импульса, с; $Wz_{исх}^{зар}$ – исходная волнистость заготовки, м; $Wz_{исх}^и$ – исходная волнистость инструмента, м; γ – относительный объемный износ электрод инструмента, %, который можно определить по теоретической или эмпирической зависимостям [3]:

$$\gamma = 20,4 \cdot 10^6 \frac{\eta_1 UI}{c_{и}\rho_{и}T_{и}}; \quad (9)$$

$$\gamma = 20,18 + 96,3A_{и} + 3,35 \cdot 10^{-15} \Pi_{и} - 8,65 \cdot 10^{-14} \Pi_{д}, \quad (10)$$

где η_1 – коэффициент, показывающий какое количество энергии идет на разрушение электрод инструмента; $T_{и}$ – температура плавления материала инструмента, К.

Также для определения параметров волнистости поверхности деталей после электроэрозионной обработки были получены эмпирические зависимости [1]:

– электроэрозионное прошивание в сплош-

ном материале:

$$Wz = 66,88 \frac{A_u^{0,11} \Pi_o^{0,02}}{\Pi_u^{0,119}}; \quad (11)$$

– электроэрозионное прошивание внутренних заранее обработанных полостей:

$$Wz = 10,51 \frac{(Wz_{исх}^{зар})^{0,353} (Wz_{исх}^и)^{0,034}}{A_{и}^{0,358} \Pi_{и}^{0,126}}; \quad (12)$$

– средний шаг волнистости по средней линии рассчитывается по зависимости:

$$Sm_w = 0,275 \frac{A_{и}^{0,094} \Pi_{д}^{0,174}}{\Pi_{и}^{0,112}}, \quad (13)$$

где $Wz_{исх}^{зар}$ – исходная волнистость заготовки (10...1,6 мкм); $Wz_{исх}^и$ – исходная волнистость поверхности инструмента (5,0...1,6 мкм).

Максимальные макроотклонения при электроэрозионной обработке в большей мере зависят от исходных макроотклонений инструмента и будут определяться по зависимости [2]:

$$H_{max} = \sqrt{(H_{max}^и_{исх})^2(1 - 0,02\gamma + 10^{-4}\gamma^2)}, \quad (14)$$

где $H_{max}^и_{исх}$ – исходные макроотклонения инструмента, м.

Для определения микротвердости и остаточных напряжений при электроэрозионной обработке, необходимо знать распределение температурного поля в поверхностном слое изделия, а также влияние фазовых превраще-

ний, протекающих в зоне обработки. Учитывая распределение температурного поля по глубине и исключая зону плавления материала, была получена теоретическая зависимость для расчета технологических остаточных напряжений при электроэрозионной обработке [2]:

$$\sigma_0 = \frac{-0,5E\alpha UI\tau\eta}{c_3\rho_3(2\sqrt{\pi a\tau})^3} \text{EXP} \left[-\frac{\left(y + \sqrt{4a\tau \ln \left(\frac{(T_{пл}-T_0)c_3\rho_3(2\sqrt{\pi a\tau})^3}{UI\tau\eta} \right)} \right)^2}{4a\tau} - \frac{\sigma_T}{2} \right], \quad (15)$$

где α – коэффициент линейного расширения материала, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; a – коэффициент температуропроводности заготовки, $\text{м}^2/\text{с}$; y – глубина поверхностного слоя материала, м ; T_0 – температура окружающей среды, К ; σ_T – предел текучести материала детали, МПа .

Для определения поверхностной микротвердости материала и глубины залегания слоя с измененными физико-механическими свойствами при электроэрозионной обработке были получены эмпирические зависимости [1, 2]:

$$H_{\mu 0} = 4,04 \frac{\Pi_{и}^{0,171}}{\Pi_{д}^{0,017}}; \quad (16)$$

$$h_{\mu} = 10^{-3} \frac{A_{и}^{0,234} \Pi_{и}^{0,409}}{\Pi_{д}^{0,236}}, \quad (17)$$

где $H_{\mu 0}$ – поверхностная микротвердость после обработки; h_{μ} – глубины материала с измененными физико-механическими свойствами, мм .

Полученные уравнения взаимосвязи пара-

метров качества поверхностного слоя деталей машин с условиями и режимами электроэрозионной обработки могут быть использованы для решения одноступенчатой задачи – технологического обеспечения износостойкости, коррозионной стойкости и усталостной прочности деталей машин электроэрозионной обработкой.

Технологическое обеспечение износостойкости, коррозионной стойкости и усталостной прочности

Для установления взаимосвязи условий и режимов электроэрозионной обработки с интенсивностью изнашивания необходимо в теоретические зависимости интенсивности изнашивания из [4, 5] подставить зависимости (1 – 3, 6 – 8, 14 – 16), в результате чего будут получены теоретические уравнения взаимосвязи интенсивности изнашивания поверхностей трения деталей машин от режимов и условий электроэрозионной обработки.

В период приработки:

– при обработке предварительно обработанных поверхностей:

$$I_h = \frac{0,06 \left(\sqrt[3]{\frac{0,024 IU \tau \eta}{T_{пл} c_3 \rho_3}} \right)^{0,67} \left(\frac{0,25 P \Pi_{д}^{0,017}}{\Pi_{и}^{0,171}} \right)^{1,17}}{n_1 \left(\frac{3969 a^3 \rho_3^2 c_3^2 \sigma_b \tau (T_{пл} - T_0)}{EI^2 U^2 \eta^2 \alpha} \right)^{t_y} \sqrt[3]{\frac{10,37 IU \tau \eta}{T_{пл} c_3 \rho_3}}} \cdot \left(1 + \frac{25,38 \Pi_{и}^{0,171} (1 + \mu^2)}{E \Pi_{д}^{0,017}} \right)^{0,5} \cdot \left(2\pi \sqrt{\frac{(W_{Z_{исх}}^и)^2 \left(\frac{408000 IU (\eta - 1)}{T_{и} c_{и} \rho_{и}} + 1 \right) + \left(0,5 (\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}})^3 \sqrt{\frac{I \eta \tau}{T_{пл} c_3 \rho_3}} \right)^2}{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta - 1)^2 ((W_{Z_{исх}}^и)^2 + (W_{Z_{исх}}^д)^2)} + \frac{T_{и}^2 c_{и}^2 \rho_{и}^2}}{T_{и}^2 c_{и}^2 \rho_{и}^2}} \right)^{0,165} \cdot \left(\sqrt{(H_{\max_{исх}}^и)^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta - 1)^2}{T_{и}^2 c_{и}^2 \rho_{и}^2} + \frac{408000 IU (\eta - 1)}{T_{и} c_{и} \rho_{и}} + 1 \right)} \right)^{0,165}, \quad (18)$$

где σ_b – предел прочности обрабатываемого материала; n_1 – число циклов воздействия, которое приводит к разрушению материала.

– при обработке в сплошном материале:

$$I_h = \frac{0,06 \left(\sqrt[3]{\frac{0,024IU\tau\eta}{T_{пл}c_3\rho_3}} \right)^{0,67} \left(\frac{0,25P\Pi_d^{0,017}}{\Pi_i^{0,171}} \right)^{1,17}}{n_1 \left(\frac{3969a^3\rho_3^2c_3^2\sigma_{в\tau}(T_{пл}-T_0)}{EI^2U^2\eta^2\alpha} \right)^{ty} \sqrt[3]{\frac{10,37IU\tau\eta}{T_{пл}c_3\rho_3}}} \cdot \left(1 + \frac{25,38\Pi_i^{0,171}(1+\mu^2)}{E\Pi_d^{0,017}} \right)^{0,5} \cdot \left(2\pi \sqrt{\left(W_{Z_{исх}^и} \right)^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta - 1)^2}{T_i^2 c_i^2 \rho_i^2} + \frac{408000IU(\eta - 1)}{T_i c_i \rho_i} + 1 \right) + \left(0,5(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}}) \sqrt[3]{\frac{I\eta\tau}{T_{пл}c_3\rho_3}} \right)^2} \right)^{0,165} \cdot \left(\sqrt{(H_{max_{исх}^и})^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta - 1)^2}{T_i^2 c_i^2 \rho_i^2} + \frac{408000IU(\eta - 1)}{T_i c_i \rho_i} + 1 \right)} \right)^{0,165} \quad (19)$$

– при разрезании или вырезании:

$$I_h = \frac{0,06 \left(\sqrt[3]{\frac{0,024IU\tau\eta}{T_{пл}c_3\rho_3}} \right)^{0,67} \left(\frac{0,25P\Pi_d^{0,017}}{\Pi_i^{0,171}} \right)^{1,17}}{n_1 \cdot \left(\frac{3969a^3\rho_3^2c_3^2\sigma_{в\tau}(T_{пл}-T_0)}{EI^2U^2\eta^2\alpha} \right)^{ty} \cdot \sqrt[3]{\frac{10,37IU\tau\eta}{T_{пл}c_3\rho_3}}} \cdot \left(1 + \frac{25,38\Pi_i^{0,171}(1+\mu^2)}{E\Pi_d^{0,017}} \right)^{0,5} \cdot \left(\pi \cdot \left(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}} \right) \sqrt[3]{\frac{I\eta\tau}{T_{пл}c_3\rho_3}} \right)^{0,165} \cdot \left(\sqrt{(H_{max_{исх}^и})^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta - 1)^2}{T_i^2 c_i^2 \rho_i^2} + \frac{408000IU(\eta - 1)}{T_i c_i \rho_i} + 1 \right)} \right)^{0,165} \quad (20)$$

В период нормального изнашивания:

– при обработке предварительно обработанных поверхностей:

$$I_h = \frac{0,038 \sqrt{(30 - 30\mu^2)}}{n_1 \left(E \sqrt[3]{\frac{10,37UI\eta\tau}{T_{пл}c_3\rho_3}} \right)^{0,5} \left(\frac{3969a^3\rho_3^2c_3^2\sigma_{в\tau}(T_{пл}-T_0)}{EI^2U^2\eta^2\alpha} \right)^{ty} \left(4,04 \frac{\Pi_i^{0,171}}{\Pi_d^{0,017}} \right)^{1,5}}{\sqrt[12]{(H_{max_{исх}^и})^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta - 1)^2}{T_i^2 c_i^2 \rho_i^2} + \frac{408000IU(\eta - 1)}{T_i c_i \rho_i} + 1 \right)} \sqrt[18]{\frac{0,024UI\tau\eta}{T_{пл}c_3\rho_3}} \cdot \sqrt[12]{0,5(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}}) \sqrt[3]{\frac{I\eta\tau}{T_{пл}c_3\rho_3}} + (W_{Z_{исх}^и})^2 \left(\frac{408000IU(\eta - 1)}{T_i c_i \rho_i} + 1 \right) + \frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta - 1)^2 ((W_{Z_{исх}^и})^2 + (W_{Z_{исх}^н})^2)}{T_i^2 c_i^2 \rho_i^2}}} \quad (21)$$

– при обработке в сплошном материале:

$$I_h = \frac{0,038 \sqrt{(30 - 30\mu^2)^{12}} \sqrt{(H\max_{исх}^H)^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta - 1)^2}{T_{и}^2 c_{и}^2 \rho_{и}^2} + \frac{408000 IU (\eta - 1)}{T_{и} c_{и} \rho_{и}} + 1 \right)}}{n_1 \left(E^3 \sqrt{\frac{10,37 UI \eta \tau}{T_{пл} c_3 \rho_3}} \right)^{0,5} \left(\frac{3969 a^3 \rho_3^2 c_3^2 \sigma_B \tau (T_{пл} - T_0)}{EI^2 U^2 \eta^2 \alpha} \right)^{ty} \left(4,04 \frac{\Pi_{и}^{0,171}}{\Pi_{д}^{0,017}} \right)^{1,5}} \cdot \sqrt[18]{\frac{0,024 UI \eta \tau}{T_{пл} c_3 \rho_3}} \sqrt[12]{\frac{0,5 (\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}})^3 \sqrt{\frac{I \eta \tau}{T_{пл} c_3 \rho_3}} + (Wz_{исх}^H)^2 \cdot \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta - 1)^2}{T_{и}^2 c_{и}^2 \rho_{и}^2} + \frac{408000 IU (\eta - 1)}{T_{и} c_{и} \rho_{и}} + 1 \right)}{}} \quad (22)$$

– при разрезании или вырезании:

$$I_h = \frac{0,028 \sqrt{(30 - 30\mu^2)}}{n_1 \left(E^3 \sqrt{\frac{10,37 UI \eta \tau}{T_{пл} c_3 \rho_3}} \right)^{0,5} \left(\frac{3969 a^3 \rho_3^2 c_3^2 \sigma_B \tau (T_{пл} - T_0)}{EI^2 U^2 \eta^2 \alpha} \right)^{ty} \left(4,04 \frac{\Pi_{и}^{0,171}}{\Pi_{д}^{0,017}} \right)^{1,5}} \cdot \sqrt[0,33]{\left(\sqrt{(H\max_{исх}^H)^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta - 1)^2}{T_{и}^2 c_{и}^2 \rho_{и}^2} + \frac{408000 IU (\eta - 1)}{T_{и} c_{и} \rho_{и}} + 1 \right)} \cdot \sqrt[3]{\frac{0,024 UI^2 \eta^2 \tau^2}{T_{пл}^2 \rho_3^2 c_3^2}} \pi (\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}}) \right)} \quad (23)$$

Аналогично для установления взаимосвязи условий и режимов электроэрозионной обработки со скоростью коррозии необходимо в теоретические зависимости скорости коррозии из [6, 7] подставить зависимости (1 – 3, 16), в результате чего будет получено теоретическое уравнение взаимосвязи скорости коррозии от режимов и условий электроэрозионной обработки:

$$v_k = \frac{494 b_0 v_{k0} \left(4,04 \frac{\Pi_{и}^{0,171}}{H_{исх} \Pi_{д}^{0,017}} - 1 \right)^{b_1}}{\sqrt[3]{\frac{UI \eta \tau}{T_{пл} c_3 \rho_3}}} K_T K_C K_{\Theta} K_{pH}, \quad (24)$$

где b_0 и b_1 – коэффициенты, зависящие от марки и состояния материала [6, 7]; v_{k0} – скорость коррозии образца сравнения (эталонного образца), изготовленного из того же материала, что и рассматриваемое изделие, но без механической обработки, в определенных стандартных (эталонных) условиях (в дистиллированной воде); K_T – коэффициент, учитывающий влияние толщины пленки влаги на поверхности детали [6, 7]; K_C – коэффициент, учитывающий агрессивность коррозионной среды [6, 7]; K_{Θ} – коэффициент, учитывающий влияние температуры коррозионной среды на скорость коррозии детали [6, 7]; K_{pH} – коэф-

фициент, учитывающий влияние концентрации ионов H^+ на скорость коррозии детали [6, 7].

Также для установления взаимосвязи условий и режимов электроэрозионной обработки с пределом выносливости необходимо в теоретические зависимости коэффициента концентрации напряжения и эффективного коэффициента концентрации напряжения из [4, 5] подставить зависимости (1 – 3, 15), в результате чего будет получено теоретическое уравнение взаимосвязи предела выносливости от режимов и условий электроэрозионной обработки:

$$\sigma_{-1} = \frac{\sqrt{\sigma_{исх}^{-1} \left(\sigma + \left(\frac{0,5 E \alpha UI \eta \tau}{c \rho (2 \sqrt{\pi} a \tau)^3} \text{EXP} \left(-\ln \left(\frac{(T - T_0) c \rho (2 \sqrt{\pi} a \tau)^3}{UI \eta \tau} \right) \right) + \frac{\sigma_T}{2} \right)}}{(2,07q + 1)^{-1}} \quad (25)$$

где q – коэффициент чувствительности материала детали к концентрации напряжений [4, 5]; σ – напряжения от нагрузки, МПа; $\sigma_{-1}^{исх}$ – предел выносливости образца без концентрации напряжений, МПа.

Анализ зависимостей (1 – 17) позволил определить возможности электроэрозионной об-

работки (табл. 2) и то, что на формирование параметров качества поверхностного слоя при электроэрозионной обработке основное влияние оказывает энергия импульса технологического тока, физико-механические свойства и исходные параметры качества поверхностного слоя инструмента и заготовки.

2. Возможности электроэрозионной обработки в обеспечении точности размеров и параметров качества поверхностей деталей машин

Метод электроэрозионной обработки		Черновая	Получистовая	Чистовая
Квалитет		12 – 14	9 – 12	7 – 9
Параметры качества поверхностного слоя детали	Ra , мкм	18...391	1,4...21	0,5...2,2
	Rz , мкм	55...1170	4,5...64	1,6...6,5
	Sm , мм	0,21...4,43	0,016...0,24	0,006...0,025
	Wz , мкм	1,5...4,9	0,69...2,8	0,5...1,5
	Sm_w , мм	1,5...10,5	0,65...1,8	0,5...1,05
	h_n , мм	0,15...4,5	0,03...0,35	0,01...0,06
	u_n , %	25...30	25...30	25...30
	h_0 , мм	0,15...4,5	0,03...0,35	0,01...0,06
	$\pm\sigma_{ост}$, МПа	150...350	150...200	100...150
	H_{max} , мкм, 1000 мм	80...200	25...100	15...50
Технологические параметры	I , А	10...90	0,25...10	0,1...0,25
	U , В	18...27	13,5...20	9...13,5
	τ , мкс	200...100 000	5...200	1...50

В результате анализа уравнений (18 – 23) можно сделать вывод о том, что интенсивность изнашивания тем выше, чем выше напряжение и ток обработки и тем меньше, чем выше длительность импульсов технологического тока электроэрозионной обработки (рис. 1). Также в результате расчета по уравнениям (18 – 23) можно установить, что интенсивность изнашивания лежит в пределах от 10^{-7} до 10^{-13} во всем диапазоне режимов обработки.

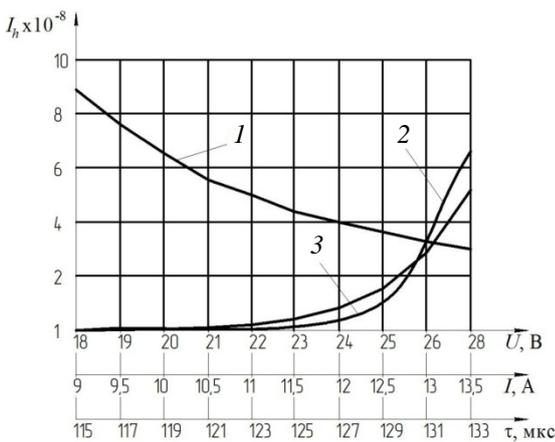


Рис. 1. Интенсивность изнашивания в зависимости от режимов электроэрозионной обработки:
 1 – от длительности импульса ($U = 27$ В; $I = 13,5$ А);
 2 – от силы тока ($U = 27$ В; $\tau = 175$ мкс); 3 – от напряжения ($I = 13,5$ А; $\tau = 175$ мкс)

Анализ полученной зависимости (24) показывает, что основное влияние на скорость коррозии при электроэрозионной обработке оказывают напряжение, ток и длительность импульсов технологического тока, причем с ростом указанных режимов скорость коррозии будет уменьшаться (рис. 2).

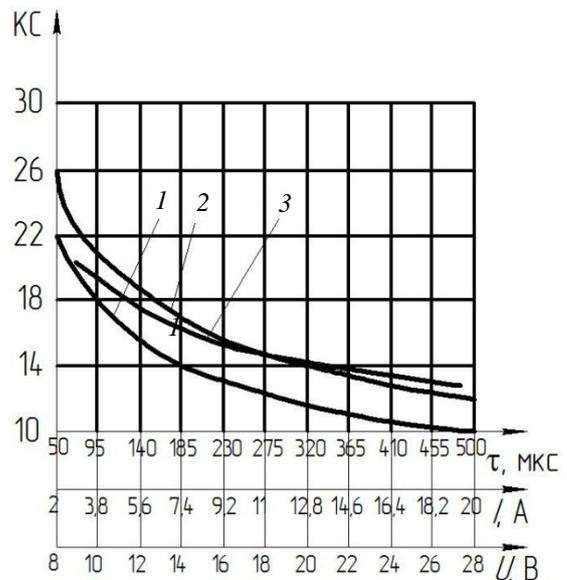


Рис. 2. Относительная скорость коррозии в зависимости от режимов электроэрозионной обработки:
 1 – от длительности импульса ($U = 27$ В; $I = 13,5$ А);
 2 – от силы тока ($U = 27$ В; $\tau = 200$ мкс); 3 – от напряжения ($I = 13,5$ А; $\tau = 200$ мкс)

Анализ полученной зависимости (25) показывает, что основное влияние на предел выносливости при электроэрозионной обработке оказывают напряжение, ток и длительность импульсов технологического тока, причем с ростом напряжения и тока предел выносливости будет возрастать, а с ростом длительности импульсов технологического тока уменьшаться (рис. 3).

Таким образом, в результате теоретических и экспериментальных исследований получены уравнения взаимосвязи параметров качества поверхностного слоя с условиями и режимами электроэрозионной обработки, что позволило установить возможности электроэрозионной обработки в обеспечении точности размеров и параметров качества поверхностей деталей машин. Эти данные можно использовать при двухступенчатом подходе технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин электроэрозионной обработкой. Также получены уравнения взаимосвязи интенсивности изнашивания, скорости коррозии и предела выносливости с режимами и условиями электроэрозионной обработки, что позволит реализовать одноступенчатый подход технологического обеспечения эксплуатаци-

онных свойств деталей машин электроэрозионной обработкой.

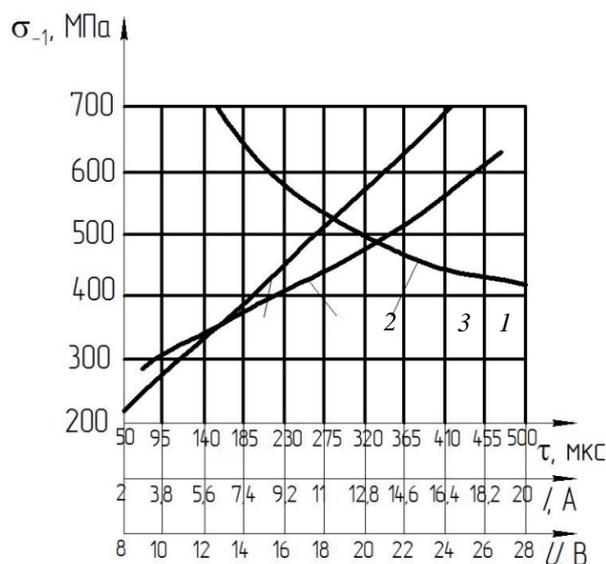


Рис. 3. Предел выносливости в зависимости от режимов электроэрозионной обработки:

1 – от длительности импульса ($U = 27$ В; $I = 13,5$ А);
2 – от силы тока ($U = 27$ В; $\tau = 200$ мкс); 3 – от напряжения ($I = 13,5$ А; $\tau = 200$ мкс)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сьянов, С.Ю. Разработка технологического процесса электроэрозионной обработки // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – №2 (55). – С. 49-57.
2. Сьянов, С.Ю. Технологическое обеспечение износостойкости деталей машин электроэрозионной обработкой // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – №12 (114). – С. 18-21.
3. 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.
4. Качество машин: Справочник. В 2 т. Т. 1 / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
5. Суслов, А.Г., Дальский, А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
6. Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: Коллективная монография: Т. 5 / А.С. Верещагин, О.Н. Федонин и др. – Москва: Издательский дом «Спектр», 2015. – 464 с.
7. Федонин, О.Н. Обеспечение коррозионной стойкости деталей машин при механической обработке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2004. – №3 (24). – С. 22-25.

REFERENCES

1. Syanov, S.Yu. Development of the technological process of electroerosion treatment // Vestnic of the Bryansk State Technical University, 2017, no.2 (55), p. 49-57.
2. Syanov, S.Yu. Technological provision of wear resistance of machine parts by electroerosion treatment // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2020, no.12 (114), pp. 18-21.
3. Fedonin, O.N., Syanov, S.Yu., Fomchenkova, N.I. Control of tool wear and process performance during electroerosion treatment // Vestnic of the Bryansk State Technical University, 2014, no. 3, p. 85-88.
4. The quality of machines, reference book. Vol. 2t. T. 1 / A.D. Suslov, E.D. Brown, N.A. Vitkevich et al., li.: Mashinostroenie, 1995, 256 p.
5. Suslov, A.G., Dalsky, A.M. Scientific foundations of mechanical engineering technology. - M.: Mashinostroenie, 2002, 684 p.
6. Progressive machine-building technologies, equipment and tools: Collective monograph: Vol. 5 /A.S. Vereshchagin, O.N. Fedonin et.al., Moscow: Publishing House "Spectrum", 2015, 464 p.
7. Fedonin, O.N. Ensuring corrosion resistance of machine parts during machining // Metalworking (technology, equipment, tools), 2004, no.3 (24), pp. 22-25.

Рецензент д.т.н.
Владислав Павлович Смоленцев