

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №10 (160). С.38-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №10 (160). P.38-48.

Научная статья
УДК 621.9.048.4
doi: 10.30987/2223-4608-2024-38-48

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

Олег Николаевич Федонин¹, д.т.н.
Сергей Юрьевич Съянов², к.т.н.

^{1,2} *Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия*

¹ rector@tu-bryansk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3511-699X>

² SERG620@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9829-4566>

Аннотация. Рассмотрена проблема технологического обеспечения эксплуатационных свойств и параметров качества поверхностного слоя деталей машин электроэрозионной обработкой. На основании физической картины протекания процесса электроэрозионной обработки получены теоретические и экспериментальные зависимости для установления параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин от режимов (напряжение, ток и длительность импульсов) для различных условий (свойств диэлектрической жидкости, физико-механических свойств материала инструмента и физико-механических свойств материала заготовки) электроэрозионной обработки. Анализируя представленные зависимости установлено, что на формирование параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей машин основное влияние оказывают режимы при различных условиях электроэрозионной обработки. Также установлено, что на формирование волнистости и макроотклонений поверхности помимо режимов для различных условий электроэрозионной обработки влияние оказывают также исходная волнистость и макроотклонения как заготовки, так и инструмента в зависимости от схемы обработки. В результате была установлена связь параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин с режимами электроэрозионной обработки, были определены возможности электроэрозионной обработки в обеспечении параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин. Полученные результаты позволяют научно обоснованно в зависимости от того, что необходимо обеспечить либо требуемые параметры качества поверхностного слоя, либо требуемые эксплуатационные свойства деталей машин определять режимы для различных условий электроэрозионной обработки. Это позволит реализовать одноступенчатый подход в обеспечении требуемых эксплуатационных свойств деталей машин электроэрозионной обработкой.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, геометрические параметры качества, физико-механические параметры качества, интенсивность изнашивания, предел выносливости, скорость коррозии, режимы и условия обработки

Для цитирования: Федонин О.Н., Съянов С.Ю. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин электроэрозионной обработкой // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 9 (159). С. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-38-48

Technological quality assurance of the surface layer and operational properties of machine parts through EDM process

Oleg N. Fedonin¹, D. Eng.
Sergey Yu. Syanov², PhD. Eng.

^{1,2} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ rector@tu-bryansk.ru

² SERG620@yandex.ru

Abstract. The problem of technological quality assurance and operational properties of the surface layer of machine parts through EDM process is viewed. Based on physics of EDM process, theoretical and experimental dependences for determining the parameters of the surface layer quality and the operational properties of machine parts on the modes (voltage, current and pulse duration) for various conditions (properties of dielectric fluid, physical and mechanical properties of the tool material and physical and mechanical properties of the workpiece material) of EDM process, are found. Studying these dependencies, it was also found that the formation of surface layer quality parameters and the service characteristics of machine parts are mainly influenced by modes under various conditions of EDM process. It was deemed that the formation of undulation and macro-deviations of the surface, in addition to the modes for various conditions of EDMing, is also influenced by the initial undulation and macro-deviations of both the workpiece and the tool, depending on the machining pattern. As a result, the relationship between quality parameters of the surface layer and the operational properties of machine parts depending on the modes of EDM process was found, the possibilities of EDMing of the quality parameters assurance for the surface layer and the operational properties of machine parts were determined. Obtained results allow us to determine the modes for various conditions of EDM process from scientific point of view. Either the required quality parameters of the surface layer or the required operational properties of machine parts determine different modes for various conditions of EDMing. This will make the implementation of a single-stage approach in ensuring the required operational properties of machine parts by EDM process possible.

Keywords: EDM process, geometric quality parameters, physical and mechanical quality parameters, wear intensity, endurance limit, corrosion rate, process modes and conditions

For citation: Fedonin O.N., Syanov S.Yu. Technological quality assurance of the surface layer and operational properties of machine parts through EDM process / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 10 (160). P. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-38-48

Введение

Электроэрозионная обработка преимущественно применяется для производства изделий сложной пространственной конфигурации и из труднообрабатываемых материалов. Обеспечение требуемых эксплуатационных свойств данных изделий будет определять их качество и надежность в целом. Проблема технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин и параметров качества поверхностного слоя электроэрозионными методами обработки является достаточно новой по сравнению с подобной проблемой при механических методах обработки, что определяет ее актуальность.

Исследованию электроэрозионной обработки посвящены работы Б.Н. Золотых, Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко, Н.К. Фотеева, В.П. Смоленцева, А.Л. Лившица и др. ученых. Анализ данных работ показал, что в настоящее время отсутствуют теоретические научно обоснованные методики определения

эксплуатационных свойств деталей машин и параметров качества поверхностного слоя в зависимости от режимов для различных условий электроэрозионной обработки. Для устранения указанного пробела необходимо получить теоретические уравнения параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств от режимов для различных условий электроэрозионной обработки на основании физической картины формирования параметров качества поверхностного слоя. Также необходимо установить возможности электроэрозионной обработки в обеспечении требуемых эксплуатационных свойств деталей машин и параметров качества поверхностного слоя.

Параметры качества поверхностного слоя

Формирование физико-механических и геометрических параметров качества поверхностного слоя при электроэрозионной обработке происходит в результате разрушения и

нагрева поверхностей за счет энергии электрического разряда между заготовкой и инструментом, которые разделены диэлектрической жидкостью.

Для теоретического определения параметров шероховатости поверхности необходимо:

– сопоставить энергии электрического импульсного разряда и тепловую, идущую на плавление объема материала;

– учесть коэффициент перекрытия лунок;

– сделать допущения о том, что режимы обработки усредняются, размеры всех лунок одинаковы и физико-механические свойства материалов и коэффициент перекрытия лунок постоянны на протяжении всей обработки.

Учитывая все вышесказанное, были выведены теоретические зависимости для расчета параметров шероховатости поверхности:

$$\left. \begin{aligned} R_{\max} &= \sqrt[3]{\frac{(2\beta-1) \cdot I \cdot U \cdot \tau_{\text{и}} \cdot \eta_{\text{и}}}{(4\beta+1) \cdot c_{\text{д}} \cdot \rho_{\text{д}} \cdot T_{\text{пл}}}} \\ R_z &= 0,84 \cdot R_{\max} \\ R_a &= 0,398 \cdot R_z \\ R_p &= 0,671 \cdot R_z \\ S_m &= 4,5 \cdot R_z \end{aligned} \right\} (1)$$

$$tp = 0,49 \cdot p^{1,02} \text{ при } p \leq 60\%$$

$$tp = 100 - 10 \cdot (100 - p)^{0,5} \text{ при } p > 60\%$$

где U – напряжение, В; I – ток, А; $\eta_{\text{и}}$ – коэффициент полезного действия энергии импульса

$$[1 - 3], \eta_{\text{и}} = \frac{0,92}{\sqrt{\frac{\lambda_{\text{и}} \cdot c_{\text{и}} \cdot \rho_{\text{и}}}{\lambda_{\text{д}} \cdot c_{\text{д}} \cdot \rho_{\text{д}}} + 1}}$$

ность материала инструмента и заготовки соответственно, Вт/(м·К); $c_{\text{и}}$, $c_{\text{д}}$ – удельная теплоемкость инструмента и заготовки соответственно, Дж/(кг·К); $\rho_{\text{и}}$, $\rho_{\text{д}}$ – плотность материала инструмента и заготовки соответственно, кг/м³; $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса, с; β – коэффициент перекрытия лунок; p – уровень сечения; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления материала заготовки, К.

На формирование волнистости и макроотклонений основное влияние оказывают следующие составляющие: исходные волнистость и макроотклонения детали и заготовки, и колебания технологических режимов обработки, которые в зависимости от схемы обработки могут оказывать влияние на формируемый параметр или нет. Произведя суммирование составляющих волнистости и макроотклонений по правилу суммирования случайных величин для различных схем обработки можно получить зависимости для определения максимальных макроотклонений H_{\max} и средней волнистости Wz поверхности.

Прямое и обратное копирование:

– электроэрозионное прошивание предварительно обработанных поверхностей:

$$Wz = \sqrt{10^{-4} \cdot \gamma^2 [(Wz_{\text{исх}}^{\text{и}})^2 + (Wz_{\text{исх}}^{\text{заг}})^2] + (Wz_{\text{исх}}^{\text{и}})^2 \cdot (1 - 0,02 \cdot \gamma) + \left(0,5 \sqrt[3]{\frac{I \cdot \tau_{\text{и}} \cdot \eta_{\text{и}}}{c_{\text{д}} \cdot \rho_{\text{д}} \cdot T_{\text{пл}}}}\right)^2 \cdot (\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}})^2}; \quad (2)$$

$$H_{\max} = \sqrt{(0,01 \cdot \gamma \cdot H_{\text{исх}}^{\text{заг}})^2 + (H_{\text{исх}}^{\text{и}} - 0,01 \cdot \gamma \cdot H_{\text{исх}}^{\text{и}})^2} \text{ при } \gamma < 100\%; \quad (3)$$

$$H_{\max} = \sqrt{(0,01 \cdot \gamma \cdot H_{\text{исх}}^{\text{заг}})^2 + (0,01 \cdot \gamma \cdot H_{\text{исх}}^{\text{и}} - H_{\text{исх}}^{\text{и}})^2} \text{ при } \gamma > 100\%; \quad (4)$$

– электроэрозионное прошивание в сплошном материале:

$$Wz = \sqrt{(Wz_{\text{исх}}^{\text{и}})^2 \cdot (1 - 0,02 \cdot \gamma + 10^{-4} \cdot \gamma^2) + \left(0,5 \sqrt[3]{\frac{I \cdot \tau_{\text{и}} \cdot \eta_{\text{и}}}{c_{\text{д}} \cdot \rho_{\text{д}} \cdot T_{\text{пл}}}}\right)^2 \cdot (\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}})^2}; \quad (5)$$

$$H_{\max} = \sqrt{(H_{\text{исх}}^{\text{и}})^2 \cdot (1 - 0,02 \cdot \gamma + 10^{-4} \cdot \gamma^2)}; \quad (6)$$

– разрезание, вырезание, шлифование и т. п.:

$$W_z = 0,5 \sqrt[3]{\frac{I \cdot \tau_{и} \cdot \eta_{и}}{c_d \cdot \rho_d \cdot T_{пл}}} \cdot (\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}}). \quad (7)$$

В зависимостях (2) – (7) $W_{исх}^{заг}$ – исходная волнистость заготовки, м; $W_{исх}^и$ – исходная волнистость инструмента, м; $H_{исх}^{заг}$ – исходные макроотклонения заготовки, м; $H_{исх}^и$ – исходные макроотклонения инструмента, м; $U_{\max} = U + \Delta U$ – максимальное напряжение при обработке, В; ΔU – перепад напряжения; $U_{\min} = U - \Delta U$ – минимальное напряжение при обработке, В; γ – относительный объемный износ электрод инструмента.

Основное влияние на формирование физико-механических параметров качества поверхностного слоя оказывают тепловые процессы, протекающие при обработке. Определив распределение температурного поля по глубине материала, тепловые и пластические деформации можно определить глубину слоя материала с измененными физико-механическими свойствами h , поверхностную микротвердость $H_{\mu 0}$ и остаточные напряжения σ_0 :

$$H_{\mu 0} = H_{\mu_{исх}} \left(\frac{\sigma_B (1 + 0,01 \psi_k)}{\sigma_T} - 1 \right) \times \exp \left(-1,5 \cdot 10^{-3} \left[T_0 + \frac{I \cdot U \cdot \tau_{и} \cdot \eta_{и}}{c_d \cdot \rho_d \cdot (2 \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_{и}})^3} \right] \times \exp \left(- \frac{\left[y - \sqrt{4 \cdot a_d \cdot \tau_{и} \cdot \ln \left(\frac{(T_{пл} - T_0) \cdot c_d \cdot \rho_d \cdot (2 \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_{и}})^3}{I \cdot U \cdot \tau_{и} \cdot \eta_{и}} \right)} \right]^2}{4 \cdot a_d \cdot \tau_{и}} \right) \right) + H_{\mu_{исх}}; \quad (8)$$

$$\sigma_0 = \frac{0,5 \cdot E \cdot \alpha_d \cdot I \cdot U \cdot \tau_{и} \cdot \eta_{и}}{c_d \cdot \rho_d \cdot (2 \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_{и}})^3} \times \exp \left(- \frac{\left[y - \sqrt{4 \cdot a_d \cdot \tau_{и} \cdot \ln \left(\frac{(T_{пл} - T_0) \cdot c_d \cdot \rho_d \cdot (2 \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_{и}})^3}{I \cdot U \cdot \tau_{и} \cdot \eta_{и}} \right)} \right]^2}{4 \cdot a_d \cdot \tau_{и}} \right) + \frac{\sigma_T}{2} \quad (9)$$

$$h = \sqrt{\left(4 \cdot a_d \cdot \tau_{и} \right) \cdot \ln \left[\frac{I \cdot U \cdot \tau_{и} \cdot \eta_{и}}{c_d \cdot \rho_d \cdot (2 \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_{и}})^3} \right] - 4 \cdot a_d \cdot \tau_{и} - \sqrt{- \left(4 \cdot a_d \cdot \tau_{и} \right) \cdot \ln \left[\frac{(T_{пл} - T_0) \cdot c_d \cdot \rho_d \cdot (2 \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_{и}})^3}{I \cdot U \cdot \tau_{и} \cdot \eta_{и}} \right]}}. \quad (10)$$

В зависимостях (8) – (10) σ_T – предел текучести материала поверхностного слоя детали перед электроэрозионной обработкой; σ_B – предел прочности материала поверхностного слоя детали; ψ_k – относительное сужение поперечного сечения образца из материала

детали перед его разрывом при испытаниях на растяжение; $H_{\mu_{исх}}$ – исходная микротвердость поверхностного слоя детали; a_d – коэффициент температуропроводности материала детали; E – модуль упругости первого рода; T_0 – температура окружающей среды;

α_d – коэффициент линейного расширения материала детали.

Для получения эмпирических уравнений, связывающих параметры качества поверхностного слоя с режимами для различных условий электроэрозионной обработки, были проведены экспериментальные исследования с последующей их обработкой, в результате чего были получены следующие зависимости:

$$Y = b_0 \cdot A_{и}^{b_1} \cdot \Pi_d^{b_2} \cdot \Pi_{и}^{b_3}; \quad (11)$$

$$tm = 46,5 \pm 5,5 \% ; \quad (12)$$

$$H_{\mu 0} = 4,04 \cdot \frac{\Pi_{и}^{0,171}}{\Pi_d^{0,017}} ; \quad (13)$$

$$h_{\mu} = 10^{-3} \cdot \frac{A_{и}^{0,234} \cdot \Pi_{и}^{0,409}}{\Pi_d^{0,236}} ; \quad (14)$$

$$Sm_W = 0,275 \cdot \frac{A_{и}^{0,094} \cdot \Pi_d^{0,174}}{\Pi_{и}^{0,112}} . \quad (15)$$

Электроэрозионное прошивание:

$$Wz = 66,88 \cdot \frac{A_{и}^{0,11} \cdot \Pi_d^{0,025}}{\Pi_{и}^{0,119}} . \quad (16)$$

Электроэрозионное прошивание предварительно обработанных поверхностей:

$$Wz = 10,51 \cdot \frac{(Wz_{исх}^d)^{0,353} (Wz_{исх}^и)^{0,034}}{A_{и}^{0,358} \cdot \Pi_{и}^{0,126}} . \quad (17)$$

В зависимостях (11) – (17) Π_d – критерий фазовых превращений Палатника материала детали, Дж·Вт/м⁴; $A_{и}$ – энергия импульсов, Дж; $\Pi_{и}$ – критерий фазовых превращений Палатника материала инструмента, Дж·Вт/м⁴. В зависимости (11) значения коэффициентов b_0, b_1, b_2, b_3 для соответствующего параметра шероховатости Y приведены в табл. 1.

1. Значения коэффициентов b_0, b_1, b_2, b_3 для соответствующего параметра шероховатости Y

1. Values of coefficients b_0, b_1, b_2, b_3 for the corresponding roughness parameter Y

Y	R_{max} , мкм	Rz , мкм	Ra , мкм	Rp , мкм	Sm , мм
b_0	$4,118 \cdot 10^5$	$8,817 \cdot 10^4$	$2,224 \cdot 10^3$	$2,196 \cdot 10^5$	12,79
b_1	0,318	0,315	0,345	0,306	0,33
b_2	-0,103	-0,132	-0,02	-0,042	-0,043
b_3	-0,132	-0,073	-0,102	-0,205	-0,044

Полученные эмпирические (11) – (17) уравнения в значительной мере подтвердили теоретические (1) – (10) уравнения.

Эксплуатационные свойства деталей машин

Для вывода теоретических зависимостей связывающих эксплуатационные свойства деталей машин с режимами при различных условиях электроэрозионной обработки необходимо воспользоваться теоретическими зависимостями, связывающими эксплуатационные свойства деталей машин с параметрами

качества поверхностного слоя [3 – 10] и зависимостями (1) – (17), связывающими параметры качества поверхностного слоя с режимами для различных условий электроэрозионной обработки. В результате можно вывести теоретические зависимости, связывающие интенсивность изнашивания, скорость коррозии и усталостную прочность с режимами для различных условий электроэрозионной обработки.

Интенсивность изнашивания:

– в период приработки:

при обработке предварительно обработанных поверхностей:

$$I_h = \frac{0,06 \left(\sqrt[3]{\frac{0,024IU\tau_i\eta_i}{T_{пл}c_d\rho_d}} \right)^{0,67} \left(\frac{0,25P\Pi_d^{0,017}}{\Pi_i^{0,171}} \right)^{1,17} \left(1 + \frac{25,38\Pi_i^{0,171}(1+\mu^2)}{E\Pi_d^{0,017}} \right)^{0,5}}{n1 \left(\frac{3969a^3\rho_d^2c_d^2\sigma_b\tau_i(T_{пл}-T_0)}{EI^2U^2\eta_i^2\alpha_d} \right)^{ty} \sqrt[3]{\frac{10,37IU\tau_i\eta_i}{T_{пл}c_d\rho_d}}} \times$$

$$\times \left(2\pi \sqrt[3]{\frac{(Wz_{исх}^и)^2 \left(\frac{408000IU(\eta_i-1)}{T_i c_i \rho_i} + 1 \right) + \left(0,5(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}}) \sqrt[3]{\frac{I\eta_i\tau_i}{T_{пл}c_d\rho_d}} \right)^2}{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta_i - 1)^2 ((Wz_{исх}^и)^2 + (Wz_{исх}^д)^2) + \frac{T_i^2 c_i^2 \rho_i^2}{T_i c_i \rho_i}}}} \right)^{0,165} \times$$

$$\times \left(\sqrt[3]{(Hmax_{исх}^и)^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta_i - 1)^2}{T_i^2 c_i^2 \rho_i^2} + \frac{408000IU(\eta_i - 1)}{T_i c_i \rho_i} + 1 \right)} \right)^{0,165}, \quad (18)$$

где $n1$ – число циклов воздействия, которое приводит к разрушению материала; σ_b – предел прочности обрабатываемого материала;

при обработке в сплошном материале:

$$I_h = \frac{0,06 \left(\sqrt[3]{\frac{0,024IU\tau_i\eta_i}{T_{пл}c_d\rho_d}} \right)^{0,67} \left(\frac{0,25P\Pi_d^{0,017}}{\Pi_i^{0,171}} \right)^{1,17} \left(1 + \frac{25,38\Pi_i^{0,171}(1+\mu^2)}{E\Pi_d^{0,017}} \right)^{0,5}}{n1 \left(\frac{3969a^3\rho_d^2c_d^2\sigma_b\tau_i(T_{пл}-T_0)}{EI^2U^2\eta_i^2\alpha_d} \right)^{ty} \sqrt[3]{\frac{10,37IU\tau_i\eta_i}{T_{пл}c_d\rho_d}}} \times$$

$$\times \left(2\pi \sqrt[3]{\frac{(Wz_{исх}^и)^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta_i - 1)^2}{T_i^2 c_i^2 \rho_i^2} + \frac{408000IU(\eta_i - 1)}{T_i c_i \rho_i} + 1 \right) + \left(0,5(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}}) \sqrt[3]{\frac{I\eta_i\tau_i}{T_{пл}c_d\rho_d}} \right)^2}{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta_i - 1)^2 ((Wz_{исх}^и)^2 + (Wz_{исх}^д)^2) + \frac{T_i^2 c_i^2 \rho_i^2}{T_i c_i \rho_i}}}} \right)^{0,165} \times$$

$$\times \left(\sqrt[3]{(Hmax_{исх}^и)^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10} I^2 U^2 (\eta_i - 1)^2}{T_i^2 c_i^2 \rho_i^2} + \frac{408000IU(\eta_i - 1)}{T_i c_i \rho_i} + 1 \right)} \right)^{0,165}; \quad (19)$$

при разрезании или вырезании:

$$I_h = \frac{0,06 \left(\sqrt[3]{\frac{0,024IU\tau_{и}\eta_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} \right)^{0,67} \left(\frac{0,25P\Pi_{д}^{0,017}}{\Pi_{и}^{0,171}} \right)^{1,17}}{n1 \cdot \left(\frac{3969a_{д}^3\rho_{д}^2c_{д}^2\sigma_{в}\tau_{и}(T_{пл} - T_0)}{EI^2U^2\eta_{и}^2\alpha_{д}} \right)^{ty} \cdot \sqrt[3]{\frac{10,37IU\tau_{и}\eta_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}}} \times$$

$$\times \left(1 + \frac{25,38\Pi_{и}^{0,171}(1 + \mu^2)}{E\Pi_{д}^{0,017}} \right)^{0,5} \left(\pi \cdot \left(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}} \right)^3 \sqrt{\frac{I\eta_{и}\tau_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} \right)^{0,165} \times$$

$$\times \left(\sqrt{(Hmax_{исх}^{и})^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_{и} - 1)^2}{T_{и}^2c_{и}^2\rho_{и}^2} + \frac{408000IU(\eta_{и} - 1)}{T_{и}c_{и}\rho_{и}} + 1 \right)} \right)^{0,165} ; \quad (20)$$

– в период нормального изнашивания:
 при обработке предварительно обработанных поверхностей:

$$I_h = \frac{0,038\sqrt{(30 - 30\mu^2)}}{n1 \left(E \sqrt[3]{\frac{10,37UI\eta_{и}\tau_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} \right)^{0,5} \left(\frac{3969a_{д}^3\rho_{д}^2c_{д}^2\sigma_{в}\tau_{и}(T_{пл} - T_0)}{EI^2U^2\eta_{и}^2\alpha_{д}} \right)^{ty} \left(4,04 \frac{\Pi_{и}^{0,171}}{\Pi_{д}^{0,017}} \right)^{1,5}} \times$$

$$\times \sqrt[12]{(Hmax_{исх}^{и})^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_{и} - 1)^2}{T_{и}^2c_{и}^2\rho_{и}^2} + \frac{408000IU(\eta_{и} - 1)}{T_{и}c_{и}\rho_{и}} + 1 \right)} \sqrt[18]{\frac{0,024UI\tau_{и}\eta_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} \times$$

$$\times \sqrt[12]{0,5 \left(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}} \right)^3 \sqrt{\frac{I\eta_{и}\tau_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} + (Wz_{исх}^{и})^2 \left(\frac{408000IU(\eta_{и} - 1)}{T_{и}c_{и}\rho_{и}} + 1 \right) +$$

$$+ \frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_{и} - 1)^2((Wz_{исх}^{и})^2 + (Wz_{исх}^{д})^2)}{T_{и}^2c_{и}^2\rho_{и}^2}} ; \quad (21)$$

при обработке в сплошном материале:

$$I_h = \frac{0,038\sqrt{(30 - 30\mu^2)} \sqrt[12]{(Hmax_{исх}^{и})^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_{и} - 1)^2}{T_{и}^2c_{и}^2\rho_{и}^2} + \frac{408000IU(\eta_{и} - 1)}{T_{и}c_{и}\rho_{и}} + 1 \right)}}{n1 \left(E \sqrt[3]{\frac{10,37UI\eta_{и}\tau_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} \right)^{0,5} \left(\frac{3969a_{д}^3\rho_{д}^2c_{д}^2\sigma_{в}\tau_{и}(T_{пл} - T_0)}{EI^2U^2\eta_{и}^2\alpha_{д}} \right)^{ty} \left(4,04 \frac{\Pi_{и}^{0,171}}{\Pi_{д}^{0,017}} \right)^{1,5}} \times$$

$$\times \sqrt[18]{\frac{0,024UI\tau_{и}\eta_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} \sqrt[12]{\left(0,5 \left(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}} \right)^3 \sqrt{\frac{I\eta_{и}\tau_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} + (Wz_{исх}^{и})^2 \times \right.}$$

$$\left. \times \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_{и} - 1)^2}{T_{и}^2c_{и}^2\rho_{и}^2} + \frac{408000IU(\eta_{и} - 1)}{T_{и}c_{и}\rho_{и}} + 1 \right) \right)} ; \quad (22)$$

при разрезании или вырезании:

$$I_h = \frac{0,028\sqrt{(30 - 30\mu^2)}}{n1 \left(E^3 \sqrt{\frac{10,37U\eta_i\tau_i}{T_{пл}c_d\rho_d}} \right)^{0,5} \left(\frac{3969a_d^3\rho_d^2c_d^2\sigma_b\tau_i(T_{пл} - T_0)}{EI^2U^2\eta_i^2\alpha_d} \right)^{ty} \left(4,04 \frac{\Pi_i^{0,171}}{\Pi_d^{0,017}} \right)^{1,5}} \times \sqrt{\left(\sqrt{(H\max_{исх}^i)^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_i - 1)^2}{T_i^2c_i^2\rho_i^2} + \frac{408000IU(\eta_i - 1)}{T_i c_i \rho_i} + 1 \right)} \times \right)^{0,33} \times \sqrt{\frac{0,024UI^2\eta_i^2\tau_i^2}{T_{пл}^2\rho_d^2c_d^2}} \pi(\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}})} \quad (23)$$

Так же интенсивность изнашивания при электроэрозионной обработке можно определить с точки зрения энергетического подхода к процессу электроэрозионной обработки и трения [11]. В результате чего можно получить уравнение взаимосвязи режимов электроэрозионной обработки с интенсивностью изнашивания:

– для цилиндрических поверхностей:

$$I_h = b_0 \left(\frac{Nfqf_i h \left(\sqrt{\frac{\lambda_i c_i \rho_i}{\lambda_d c_d \rho_d} + 1} \right)^{b_1}}{0,92\pi dbUI} \right) ; \quad (24)$$

– для плоских поверхностей:

$$= b_0 \left(\frac{Nfqf_i h \left(\sqrt{\frac{\lambda_i c_i \rho_i}{\lambda_d c_d \rho_d} + 1} \right)^{b_1}}{0,92lbUI} \right) , \quad (25)$$

где N – нормальная нагрузка; f – коэффициент трения; h – толщина удаляемого материала; f_i – частота следования импульсов; q – скважность импульсов; l – длина трущейся поверхности; b – ширина трущейся поверхности; b_0 и b_1 – коэффициенты.

Скорость коррозии:

$$v_k = \frac{494b_0v_{k0}}{\sqrt[3]{\frac{UI\eta_i\tau_i}{T_{пл}\rho_dc_d}}} \times \left(\frac{\left(\frac{\sigma_b(1 + 0,01\psi_k)}{\sigma_T} - 1 \right) \times \left(T_0 + \frac{UI\eta_i\tau_i}{\rho_dc_d(2 \cdot \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_i})^3} \times \left(y - \sqrt{4 \cdot a_d \cdot \tau_i \cdot \ln \left(\frac{(T - T_0)\rho_dc_d(2 \cdot \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_i})^3}{UI\eta_i\tau_i} \right)} \right)^2 \right)}{4 \cdot a_d \cdot \tau_i} \right)^{b_1} \times K_T K_c K_\Theta K_{pH}, \quad (26)$$

где; $v_{к0}$ – 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); b_0 и b_1 – коэффициенты, зависящие от марки и состояния материала (для нетермоупрочненной стали $b_0 = 1,0$; $b_1 = 5,2$; для термоупрочненной низколегированной стали $b_0 = 0,713$; $b_1 = 5,72$; для термоупрочненной среднелегированной стали $b_0 = 0,74$; $b_1 = 5,57$); K_T – коэффициент, учитывающий влияние толщины пленки влаги h на

поверхности детали; K_c – коэффициент, учитывающий агрессивность коррозионной среды; K_Θ – коэффициент, учитывающий влияние температуры коррозионной среды на скорость коррозии детали; K_{pH} – коэффициент, учитывающий влияние концентрации ионов H^+ на скорость коррозии детали [6, 8, 10]; U_n – степень упрочнения материала поверхностного слоя; $R_v = 0,55 R_z$; tm – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; Sm – средний шаг неровностей.

Усталостная прочность:

$$\sigma_{-1} = \sqrt{\frac{\sigma_{-1}^{исх} \left(\sigma + \left(\frac{0,5E\alpha_d UI\tau_i\eta_i}{c_d\rho_d (2\sqrt{\pi a_d \tau_i})^3} \text{EXP} \left(-\ln \left(\frac{(T_{пл} - T_0)c_d\rho_d (2\sqrt{\pi a_d \tau_i})^3}{UI\tau_i\eta_i} \right) \right) + \frac{\sigma_T}{2} \right) \right)}{(2,07q + 1)^{-1}}}, \quad (27)$$

где $\sigma_{-1}^{исх}$ – предел выносливости образца без концентрации напряжений, МПа; q – коэффициент чувствительности материала детали к концентрации напряжений [4, 5, 10], σ – напряжения от нагрузки, МПа.

Анализируя зависимости (18) – (27) можно утверждать, что основное влияние на эксплуатационные свойства оказывают физико-механические свойства материалов детали и инструмента, энергия импульсов и свойства диэлектрической жидкости, а также что к возрастанию интенсивности изнашивания, усталостной прочности и повышению коррозионной стойкости материалов приводит увеличение энергии импульсов.

Выводы

В ходе теоретических и экспериментальных исследований были выявлены возможности [3, 11] электроэрозионной обработки для обеспечения качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин. Установлена связь между этими параметрами и режимами обработки при различных условиях [3, 11].

Для применения результатов исследований разработан алгоритм (рис. 1) и программа,

автоматизирующие определение режимов обработки для достижения требуемых значений параметров качества или эксплуатационных свойств. Это позволяет обоснованно выбирать режимы обработки и сокращает время технологической подготовки производства.

Необходимые исходные данные включают марку материала, наличие предварительной обработки, требуемые параметры качества поверхности или эксплуатационные свойства, а также данные о предварительной обработке, волнистости и макроотклонениях поверхности детали и инструмента. Результаты ввода сравниваются с данными банка возможностей электроэрозионной обработки, что позволяет определить возможность достижения заданных параметров и перейти к следующему этапу алгоритма.

В базе данных инструментальных материалов содержится информация о марках и характеристиках материалов. Из базы данных выбирается первый материал инструмента и учитывая какой параметр качества поверхности или эксплуатационное свойство необходимо получить, определяется энергия импульса для достижения данного параметра. Затем рассчитываются остальные параметры качества поверхностного слоя для выбранного

материала. Процедура выбора и расчетов повторяется для каждого материала в базе данных инструментальных материалов. Далее определяется производительность с учетом

полученных режимов электроэрозионной обработки. Рекомендуется тот режим, который обеспечивает максимальную производительность.

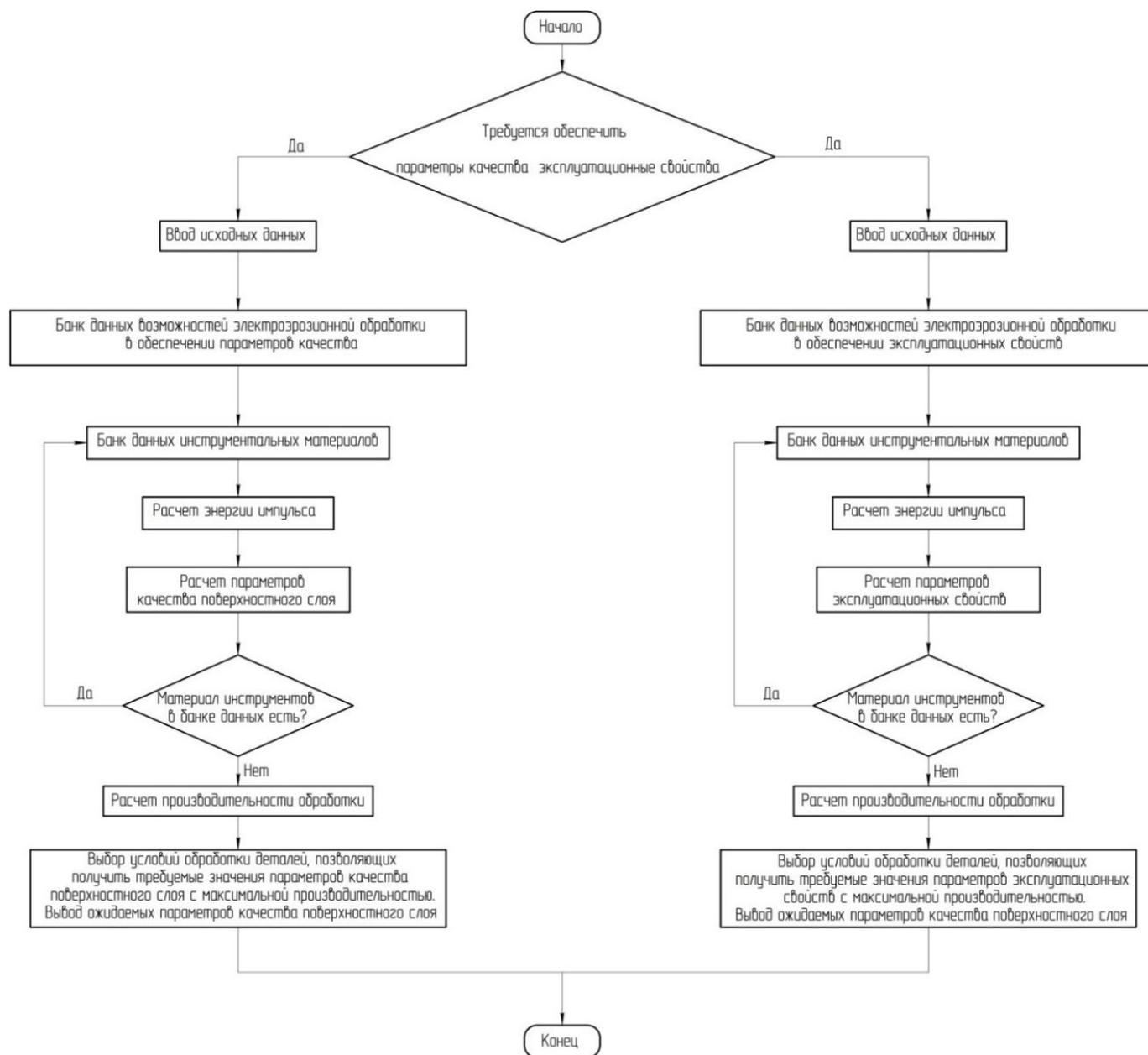


Рис. 1. Алгоритм определения условий электроэрозионной обработки в зависимости от требуемых параметров качества поверхностного слоя или эксплуатационных свойств

Fig. 1. Algorithm for determining the conditions of EDM process depending on the required parameters of the surface layer quality or operational properties

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Съянов С.Ю. Разработка технологического процесса электроэрозионной обработки // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 2 (55). С. 49–57.
2. Съянов С.Ю. Технологическое обеспечение износоустойчивости деталей машин электроэрозионной

обработкой // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 12 (114). С. 18–21.

3. Съянов С.Ю. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин электроэрозионной обработкой // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 11 (125). С. 30–37.

4. Качество машин: Справ. в 2 т. / Под общ. ред. А. Г. Сулова. М.: Машиностроение, 1995. 253 с.

5. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения М.: Машиностроение, 2002. 684 с.

6. Верещагин А.С., Федонин О.Н. и [др]. Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: Коллективная монография: Т. 5. Москва: Издательский дом «Спектр», 2015. С. 464.

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

8. Федонин О.Н. Обеспечение коррозионной стойкости деталей машин при механической обработке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты), 2004. № 3. С. 22–25

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

10. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2022. 552 с.

11. Суслов А.Г., Сьянов С.Ю. Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости деталей машин электроэрозионной обработкой // Научные технологии в машиностроении. 2023. №3 (141). С. 19–22.

REFERENCES

1. Syanov S.Yu. Development of technological process of electro-erosion processing // Bulletin of the Bryansk State Technical University. 2017, no. 2 (55), pp. 49–57.

2. Syanov S.Yu. Technological provision of wear resistance of machine parts by electro-erosion processing

//Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2020, no. 12 (114), pp. 18–21.

3. Syanov S.Yu. Technological provision of wear resistance of machine parts by electro-erosion processing //Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2020, no. 12 (114), pp. 18–21.

4. Machine Quality: Reference book in 2 volumes / Under the editorship of A. G. Suslov. М.: Mechanical Engineering, 1995, 253 p.

5. Suslov A.G., Dalsky A.M. Scientific foundations of mechanical engineering technology. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 684 p.

6. Vereshchagin A.S., Fedonin O.N. et. al. Progressive machine-building technologies, equipment and tools: joint monograph: vol. 5. Moscow: Spectrum Publishing House, 2015, p. 464.

7. Parts Surface Engineering / A.G. Suslov [et al.]; under the editorship of A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 320 p.

8. Fedonin O.N. Ensuring corrosion resistance of machine parts during machining // Metalworking (technology, equipment, tools), 2004, no. 3, pp. 22–25

9. Technologist's Reference Book / under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Innovation Mechanical Engineering, 2019, 800 p.

10. Fundamentals of technological support and reliability improvement of mechanical engineering articles/ ed. by A.G. Suslov. Moscow: Innovation Mechanical Engineering, 2022, 552 p.

11. Suslov A.G., Syanov S.Yu. Single-stage technological provision of wear resistance of machine parts during electro-erosive processing. // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023, no.3(141), pp. 19–22.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.04.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 15.04.2024.

The article was submitted 05.04.2024; approved after reviewing 10.04.2024; assepted for publication 15.04.2024.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.10.2024. Выход в свет 30.10.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» 241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+