

Научная статья

УДК 620.193

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31409>



А.И. Попов<sup>1</sup> ✉, В.Г. Теплухин<sup>1</sup>,  
М.М. Радкевич<sup>1</sup>, С.В. Беляков<sup>2</sup>, И.И. Власов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия;

<sup>3</sup> НИЦ «Курчатовский Институт» – ФГУП Всероссийский научно-исследовательский  
институт авиационных материалов, Москва, Россия

✉ [popov\\_ai@spbstu.ru](mailto:popov_ai@spbstu.ru)

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОПОВЕРХНОСТЕЙ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТЬЮ ЗА СЧЕТ СТРУЙНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

*Аннотация.* Работа направлена на изучение коррозионных свойств нержавеющей стали после снижения параметра шероховатости  $Ra$  поверхности струйной электролитно-плазменной обработкой. Исследования проводились с помощью электронной и атомно-силовой микроскопии и стандартных испытаний коррозионных характеристик. В процессе исследования изучали снижение параметра шероховатости  $Ra$  и морфология поверхности образцов для нержавеющей стали 20X13, 08X18H9T, AISI 304, AISI 310, AISI 316L, а также для никелевого жаропрочного сплава ЭП648. Исходная поверхность образцов была получена методом прокатки, пилением механической ножовкой, технологией SLM и технологией струйной электролитно-плазменной обработки. Впервые показана возможность снижения параметра среднеарифметической высоты поверхности  $Sa$  до чрезвычайно малой величины 11,800 нм за счет комбинированной размерной и финишной обработки нержавеющей стали. Выполнен электростатический расчет напряженности электрического поля на дефектах поверхности анода на наноуровне в программе COMSOL Multiphysics. Показано, что при формировании пленки окисного слоя, препятствующей прохождению электрических разрядов, формируется высокая напряженность электрического поля между пиками дефектов и границей окисного слоя до  $2,3 \cdot 10^{11}$  В/м. Показано, что уменьшение параметра шероховатости поверхности  $Ra$  возможно до чрезвычайно малых величин  $Ra$  0,004 мкм на базовой длине 10 мкм, что приводит к уменьшению числа микродефектов и увеличению свободной энергии Гиббса, уменьшению плотности тока коррозии в 3,6 раза. Повышение коррозионной стойкости за счет комбинированной струйной электролитно-плазменной технологии может быть использовано для обработки нержавеющей стали, используемых в нефтегазовой отрасли, таких как трубопроводы, технологические емкости, запорная арматура, турбинные лопатки.

*Ключевые слова:* анод, электролит, струя, плазма, нанощероховатость  $Ra$ , электростатика, электронная, атомно-силовая микроскопия, коррозионная стойкость.

*Благодарности.* Авторы выражают благодарность графическому дизайнеру Диане Александровне Поповой за подготовку иллюстраций. Статья представлена по итогам V международной отраслевой конференции «Материалы и технологии в нефтегазовой отрасли» (21–23 мая 2025 г., Санкт-Петербург, Российская Федерация).

Для цитирования:

Попов А.И., Теплухин В.Г., Радкевич М.М., и др. Формирование наноперехностей нержавеющей сталей с повышенной коррозионной стойкостью за счет струйной электролитно-плазменной обработки // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 118–133. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31409>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31409>



A.I. Popov<sup>1</sup> ✉, V.G. Teplukhin<sup>1</sup>,  
M.M. Radkevich<sup>1</sup>, S.V. Belyakov<sup>2</sup>, I.I. Vlasov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

<sup>3</sup> National Research Center “Kurchatov Institute” – Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials”, Moscow, Russia

✉ [popov\\_ai@spbstu.ru](mailto:popov_ai@spbstu.ru)

## FORMATION OF NANOSURFACES OF STAINLESS STEELS WITH INCREASED CORROSION RESISTANCE DUE TO JET ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT

**Abstract.** The work is aimed at studying the corrosion properties of stainless steels after reducing the *Ra* surface roughness parameter by jet electrolyte-plasma treatment. The studies were conducted using electron and atomic force microscopy and standard corrosion tests. During the study, the reduction of the *Ra* surface roughness parameter and the surface morphology of the samples were examined for stainless steels 20Kh13, 08Kh18N9T, AISI 304, AISI 310, AISI 316L, and the nickel heat-resistant alloy EP648. The initial surface of the samples was obtained by rolling, sawing with a mechanical hacksaw, SLM technology and electroplasma jet technology. For the first time, it was shown that the average surface height *Sa* can be reduced to an extremely low value of 11.800 nm by combining dimensional and finishing processing of stainless steel. An electrostatic calculation of the electric field strength on the surface defects of the anode was performed. It has been shown that the surface roughness parameter *Ra* can be reduced to an extremely low value of *Ra* 0.004 μm on a base length of 10 μm, which leads to a decrease in the number of microdefects and an increase in the Gibbs free energy, as well as a 3.6-fold decrease in the corrosion current density. The increased corrosion resistance achieved through the combined use of electroplasma and jetting technologies can be used for the treatment of stainless steels used in the oil and gas industry, such as pipelines, process vessels, valves, turbine blades.

**Keywords:** anode, electrolyte, jet, plasma, *Ra* nanoroughness, electrostatics, electron, atomic force microscopy, corrosion resistance.

**Acknowledgements:** The authors would like to thank graphic designer Diana Popova for preparing the illustrations. This article was presented at the 5<sup>th</sup> International Industry Conference “Materials and Technologies in the Oil and Gas Industry” (May 21–23, 2025, St. Petersburg, Russian Federation).

**Citation:**

Popov A.I., Teplukhin V.G., Radkevich M.M. et al., Formation of nanosurfaces of stainless steels with increased corrosion resistance due to jet electrolyte-plasma treatment, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 118–133, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31409>

**Введение.** Повышение коррозионной стойкости сталей является актуальной задачей. Это связано как со значительными экономическими потерями, так и рисками возникновения аварийных ситуаций для различных металлоконструкций [1]. Нержавеющие стали, широко используемые в нефтегазовой отрасли в качестве трубопроводов, технологических емкостей, запорной арматуры, также испытывают недостаток антикоррозионных свойств [2–4]. Поэтому в разных случаях для защиты поверхности нержавеющей стали дополнительно используется нанесение покрытий всех типов, обезуглероживание поверхности, катодная защита и другие способы [1, 5–8]. Одним из способов повышения коррозионной стойкости является снижение поверхностной энергии за счет выравнивания и уменьшения шероховатости поверхности [9]. Это приводит к увеличению свободной энергии Гиббса системы и препятствует прохождению коррозионных процессов, что ведет к повышению коррозионной стойкости материала в целом [10]. Одним из методов снижения шероховатости является электролитно-плазменная обработка [11, 12]. Данный метод можно разделить на два основных вида: обработку в электролитической ванне [13] и обработку струей электролита [14]. Каждый вид обработки имеет свои преимущества: для обработки в ванне это универсальность способа, не зависящая от формы изделия; для обработки струей электролита – более высокие параметры точности, скорости, экологичности [15]. К важным преимуществам струйной обработки можно отнести более низкий параметр шероховатости поверхности  $Ra$ . Однако при достаточно тщательном изучении влияния электролитно-плазменной обработки на коррозионную стойкость различных материалов в электролитической ванне [16–26] работ, посвященных обработке нержавеющей стали струей электролитической плазмы, недостаточно [27].

Целью работы является повышение коррозионных свойств нержавеющей стали за счет снижения параметра шероховатости поверхности  $Ra$  до наноуровня струйной электролитно-плазменной обработкой. Задачами работы являются:

- оценка толщины модифицированного слоя;
- анализ параметра шероховатости поверхности  $Ra$  для разных периодов времени обработки;
- оценка толщины обезуглероженного слоя;
- оценка коррозионных свойств поверхности.

### **Методы и материалы**

В исследовании использовалась экспериментальная установка для струйной электролитно-плазменной обработки. Установка разработана и запатентована в ВШМ, ИММиТ, СПбПУ [28]. Сущность процесса заключается в комбинированной обработке поверхности нержавеющей стали (рис. 1). В начале происходит обработка струей электролита при достаточно больших объемных расходах электролита ( $Q = 10–300$  л/ч) и небольших напряжениях ( $U = 20–130$  В). Затем выполняется финишная обработка поверхности с использованием диффузного объемного разряда ( $Q = 2–10$  л/ч) и повышенном напряжении ( $U = 200–360$  В) Комбинированной обработке электролитной плазмой подвергались нержавеющей стали 20Х13, 08Х18Н9Т, AISI 304, AISI 310, AISI 316L, а также никелевый жаропрочный сплав ЭП648.

В качестве оборудования для измерения шероховатости поверхности были использованы: прибор измерения шероховатости профилометр MarSurf M 400 (Германия), профилометр MarSurf PS10 (Германия) со стандартным щупом PHT6-350, координатно-измерительная машина (КИМ) Mitutoyo модели Crysta-Apex S574 серии 191 (Япония).

Для оценки морфологии поверхности использовались: металлографический микроскоп МЕТАМ ЛВ 31 (ЛОМО, Россия), растровый электронный микроскоп SUPRA 55VP-25-78 (Германия), растровый электронный микроскоп модели Fei Inspect F50 (США) и атомно-силовой микроскоп модели Ntegra Aura (Россия).

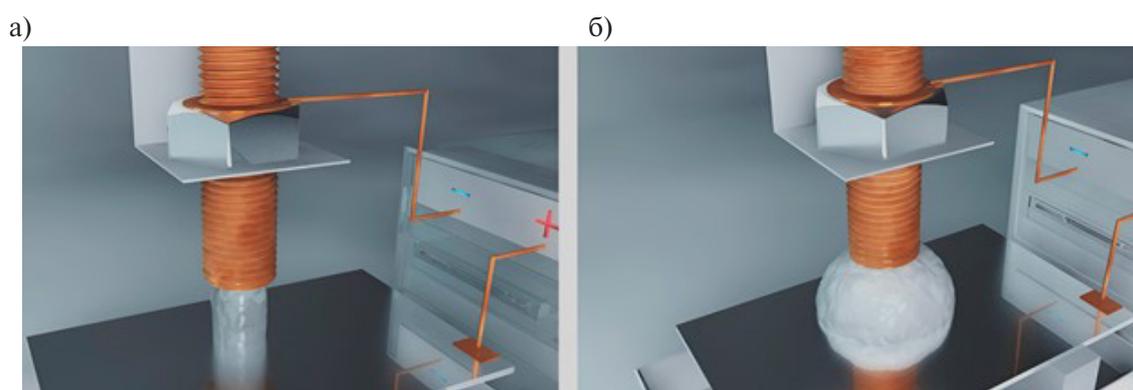


Рис. 1. Принципиальные схемы формирования электролитно-плазменных разрядов ( $Q = 2-300$  л/ч):  
 а) электролитно-плазменный разряд, формируемый в струе электролита ( $Q = 10-300$  л/ч);  
 б) диффузный объемный разряд ( $Q = 2-10$  л/ч)

Fig. 1. Schematic diagrams of the formation of electrolyte-plasma discharges ( $Q = 2-300$  l/h):  
 a) electrolyte-plasma discharge formed in an electrolyte jet ( $Q = 10-300$  l/h); b) diffuse volume discharge ( $Q = 2-10$  l/h)

Пределы допускаемой относительной погрешности измерений линейных размеров<sup>1</sup> по оси вертикальной оси «Z» атомно-силового микроскопа не более  $\pm 5\%$ .

Стандартные испытания коррозионных характеристик проводили в среде соленого раствора 3,5% NaCl с помощью потенциостата с программным обеспечением трехэлектродной ячейки, состоящей из рабочего электрода, электрода сравнения (Ag/AgCl) и вспомогательного электрода (Pt).

Для испытаний использовали образец площадью  $1 \text{ см}^2$ . Предварительно поверхность образца подвергали электролитно-плазменному полированию, затем обезжировали в ацетоне и промывали дистиллированной водой. Во время испытания фиксировали зависимость потенциала  $E$  от логарифма плотности тока  $\ln j$ . Анодный и катодный наклоны ( $b_a$ ,  $b_k$ ) рассчитывали, как тангенсы углов наклона анодной и катодной ветвей. Для расчета скорости коррозии использовали закон Фарадея:

$$v = \frac{I_{corr} * M}{n * F * \rho * A} * K, \quad (1)$$

где  $I_{corr}$  – ток коррозии, А;  $M$  – молярная масса металла;  $n$  – валентность металла в реакции;  $F$  – постоянная Фарадея;  $\rho$  – плотность, г/см<sup>3</sup>;  $A$  – площадь образца, м<sup>2</sup>;  $K$  – коэффициент пересчета единиц.

Ток коррозии вычислялся по следующей формуле:

$$I_{corr} = \frac{b_a * b_k}{2.303 * (b_a + b_k)} * R_p^{-1}, \quad (2)$$

где  $b_a$ ,  $b_k$  – кривые Тафеля (анодная и катодная);  $R_p^{-1}$  – поляризационное сопротивление.

<sup>1</sup> Технические условия ТУ 4254-001-58699387-2010: Нормативные и технические документы, устанавливающие требования к микроскопам, сканирующим зондовым Ntegra SPECTRA, Ntegra PRIMA, Ntegra VITA, Ntegra THERMA, Ntegra AURA, Ntegra MAXIMUS, Ntegra SOLARIS, Ntegra SOLARIS Duo, Ntegra TOMO, Ntegra LIFE; ГОСТ Р 8.700-2010. Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Методика измерений эффективной высоты шероховатости поверхности с помощью сканирующего зондового атомно-силового микроскопа. State system for ensuring the uniformity of measurements. Methods of surface roughness effective height measurements by means of scanning probe atomic force microscope.

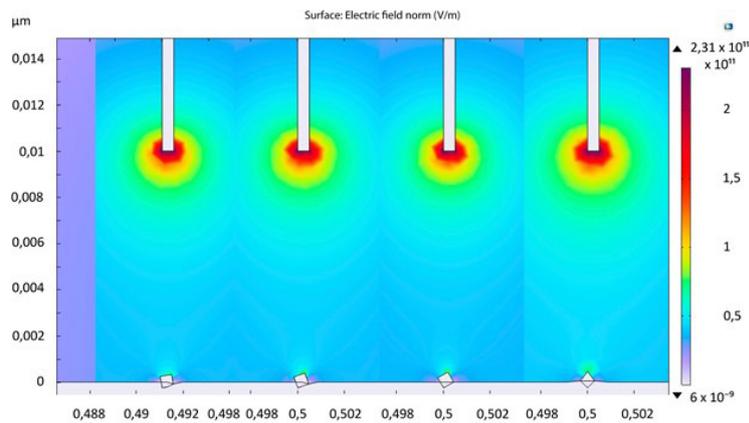


Рис. 2. Моделирование напряженности электрического поля на микродефектах в прианодной зоне  
 Fig. 2. Modeling of the electric field strength on microdefects in the anode zone

**Результаты моделирования напряженности электрического поля**

Возникающий при электролитно-плазменной обработке единичный электрический разряд различается по широкому спектру энергий. Это зависит от многих факторов величины напряжения, проводимости среды, высоты межэлектродного промежутка. При оценке напряженности электрического поля величину напряжения принимали 300 В, высоту межэлектродного промежутка – 10 нм. Величина напряжения соответствует рациональным режимам финишной обработки, а высота межэлектродного промежутка при возникновении разряда, подобного тлеющему, соответствует толщине оксидного слоя на поверхности анода (рис. 2).

Расчет производился по формуле:

$$\operatorname{div}(\varepsilon \operatorname{grad} U) = -\rho, \tag{3}$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $U$  – потенциал поля;  $\rho$  – объемная плотность свободных зарядов.

Принимая, что:

$$\rho = 0 \tag{4}$$

используя векторный дифференциальный оператор Гамильтона  $\nabla$ :

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla U) = -\rho, \quad E = -\nabla U, \tag{5}$$

где  $\nabla$  – оператор набла (Гамильтона);  $E$  – вектор напряженности электрического поля.

Для 2D моделирования, выражение (5) можно записать как:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\rho, \quad E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}. \tag{6}$$

**Результаты**

**Оценка толщины модифицированного слоя**

Оценка толщины модифицированного слоя проводилась для никелевого жаропрочного сплава ЭП648, полученного технологией SLM. Жаропрочный сплав ЭП648 был предварительно

обработан в электролитической ванне на стандартных режимах. Результаты замеров глубины модифицированного слоя для ЭП648 при направленном снижении шероховатости поверхности  $Ra$  0,4 мкм составляют в среднем 50 мкм. Измерение толщины модифицированного слоя для стали 08X18H9T при направленном снижении шероховатости струей электролитной плазмы до  $Ra$  0,020 мкм представляет определенную трудность и требует проведения дополнительных исследований.

#### *Динамика изменения параметра шероховатости поверхности $Ra$*

В процессе комбинированной струйной электролитно-плазменной поверхности зафиксировано изменение параметра шероховатости поверхности  $Ra$  и морфологии поверхности. Динамика изменения параметра шероховатости поверхности  $Ra$  и морфологии поверхности показана на рис. 3.

Изменение параметра шероховатости поверхности  $Ra$  оценивалось для образцов, полученных после пиления ножовочной пилой с исходным параметром шероховатости  $Rz > 160$  мкм. Однако снизить одним технологическим приемом шероховатость поверхности с 1-го класса до 14-го не представляется возможным. Поэтому в нашем случае использовалась комбинированная обработка, включающая в себя предварительную электролитическую обработку струей с последующей обработкой сфокусированным разрядом электролитной плазмы. Измеренные параметры<sup>2</sup> для 3D формы поверхности представлены в табл. 1.

Исследования показывают, что электрохимическая обработка струей электролита позволяет получить минимальный параметр шероховатости поверхности  $Ra$  0,2 мкм. С этого уровня шероховатости электролитно-плазменный разряд, шадяще воздействуя на микронеровности поверхности, «распыляет» микронеровности профиля, при этом сглаживая поверхность до более низких величин параметра шероховатости  $Ra$  0,012 мкм. По технологическому времени обработки струйная обработка имеет преимущества перед обработкой в ванне [14, 15, 27, 28]. Время струйной обработки в значительной мере зависит от эффективной площади катода, межэлектродного зазора и химического состава электролита.

Для сталей AISI 304, AISI 310, AISI 316L, для никелевого жаропрочного сплава ЭП648, полученного технологией SLM, наблюдается меньшее снижение параметра шероховатости поверхности. Для сталей AISI 304, AISI 310, AISI 316L это связано с химическим составом самих сталей, более слабо реагирующих на компоненты электролита по сравнению со сталью 08X18H9T.

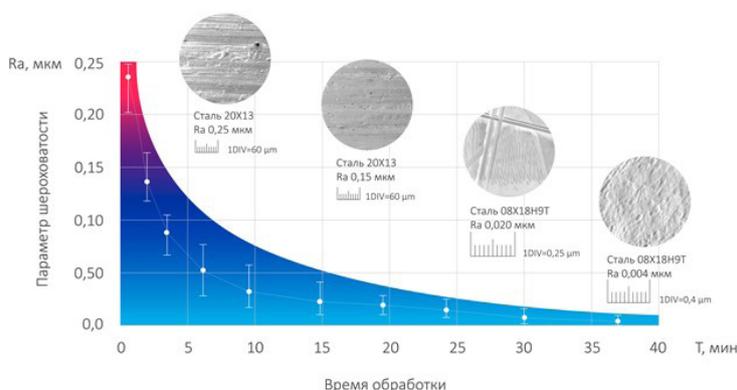


Рис. 3. Изменение параметра шероховатости поверхности  $Ra$  и морфологии поверхности в зависимости от времени обработки: образцы 1, 2 – поверхность стали 20X13; образцы 3, 4 – поверхность стали 08X18H9T

Fig. 3. Change in surface roughness parameter  $Ra$  and surface morphology depending on processing time:

samples 1, 2 – surface of 20Kh13 steel; samples 3, 4 – surface of 08Kh18N9T steel

<sup>2</sup> ISO 21920-2:2021 Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters; ISO 25178: Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: areal.

Таблица 1

Параметры 3D поверхности по ISO 21920-2:2021 Nx\*Ny,  
объем выборки 65536 As, площадь выборки 2499,515 мкм\*мкм

Table 1

Parameters of the 3D surface according to ISO 21920-2:2021 Nx\*Ny,  
sampling volume 65536 As, sampling area 2499.515 μm\*μm

Обозначение параметра	Наименование параметра	Среднее значение ординаты	Размерность
Параметры высоты			
Sq	Среднеквадратичная высота поверхности	14,995	нм
Sa	Средняя арифметическая высота поверхности	11,800	нм
Ssk	Эксцесс распределения высоты	3,448	
Ssk	Неравномерность распределения по высоте	-0,151	
Sz	Максимальная высота поверхности	179,623	нм
S10z	Высота десяти точек	142,849	нм
Sp	Максимальная высота пика	141,813	нм
Sv	Максимальная глубина впадины	37,809	нм
Пространственные параметры			
Sds	Плотность вершин поверхности	2,209	1/мкм*мкм
Ssc	Средняя кривизна вершин	0,364	1/мкм
Std	Направление текстуры поверхности	-52,734	град.
Stdi	Индекс направления текстуры поверхности	0,520	
Srw	Радиальная длина волны	50,191	мкм
Srwi	Радиальная длина волны	0,0297	
Гибридные параметры			
Sdq	Среднеквадратичный уклон поверхности	0,0518	
Sdq6	Среднеквадратичный уклон площади	0,0337	
S2A	Проектируемая площадь	2499,515	
S3A	Площадь поверхности	2502,872	
Sdr	Коэффициент площади поверхности	0,134	%
Стандартная статистика. Параметры стандартной статистики			
	Объем выборки	65536	
	Площадь выборки	2499,515	мкм*мкм
	Среднее значение	24,540	нм
	Минимальное	37,809	нм
	Максимальное	141,813	нм
	Расстояние от вершины до пика	179,623	нм
	Среднеквадратичное значение, RMS	14,995	нм
	Средняя шероховатость	11,800	нм
Ssk	Асимметрия	-0,151	
Ska	Эксцесс	3,448	

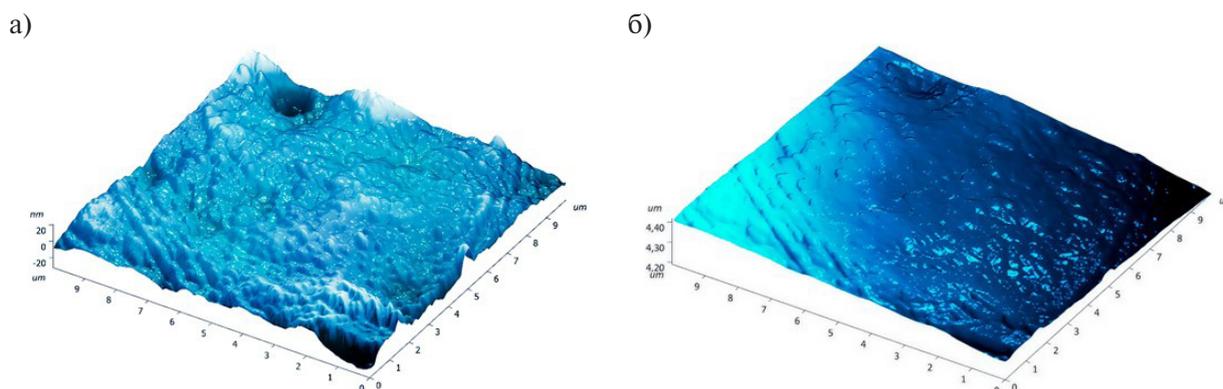


Рис. 4. Поверхность образца из стали 08X18N9T, обработанная комбинированной струйной электролитно-плазменной обработкой, с параметром шероховатости  $Ra$  0,004 мкм: а) диапазон высоты измерения нанощероховатости от  $-20,00$ – $20,00$  нм; б) диапазон высоты измерения нанощероховатости  $4,20$ – $4,40$  нм

Fig. 4. Surface of a 08X18N9T steel sample treated with a combined jet electrolyte-plasma treatment with a roughness parameter of  $Ra$  0.004  $\mu\text{m}$ : а) nanoroughness measurement height range of  $-20.00$ – $20.00$  nm; б) nanoroughness measurement height range of  $4.20$ – $4.40$  nm

Для сплава ЭП648 это прежде всего связано с внутренней ячеистой структурой материала, определяемой технологией SLM [33, 34]. Минимальное полученное значение параметра шероховатости  $Ra$  составило  $Ra$  0,004 мкм для площади  $10$  мкм<sup>2</sup>. Шероховатость поверхности  $Ra$  и морфология поверхности приведена на рис. 4.

Оценка морфологии показывает, что поверхность имеет единичный след от искрового разряда.

Проведенные исследования атомно-силовой микроскопией поверхности образцов, обработанных струйной электролитной плазмой, показывают, что уровень амплитуды колебаний кантилевера (уровень сигнала Mag) имеет рассогласования. Это может говорить о разных свойствах поверхности.

Дополнительно к этому подготовка образцов для электронной микроскопии с использованием стандартных травящих растворов Марбле, Хромпика, шавелевой кислоты и ионно-вакуумной очистки в среде аргона показала увеличение времени травления образцов до двух раз.

Это привело к необходимости проверки гипотезы повышения коррозионной стойкости при формировании нанощероховатости после струйной комбинированной обработки стандартными методами испытаний.

#### **Оценка коррозионной стойкости образцов после струйной комбинированной электролитно-плазменной обработки**

В процессе стандартных испытаний по коррозионной стойкости были получены кривые Тафеля для образцов без обработки и для образцов, обработанных по комбинированной технологии (рис. 5).

Оценка кривых Тафеля показывает снижение напряжения кривой  $b_a$  с  $872,16$  мВ до  $558,54$  мВ, что свидетельствует о замедлении процесса анодного растворения. Это может говорить о формировании более стабильного пассивного слоя. Уменьшение напряжения кривой  $b_k$  с  $109,72$  мВ до  $67,782$  мВ связано с подавлением катодных реакций, например, восстановлением кислорода.

#### **Расчет скорости коррозии**

$$v_{\text{кор}} = \frac{I_{\text{кор}} \cdot K \cdot EW}{\rho}, \quad (7)$$

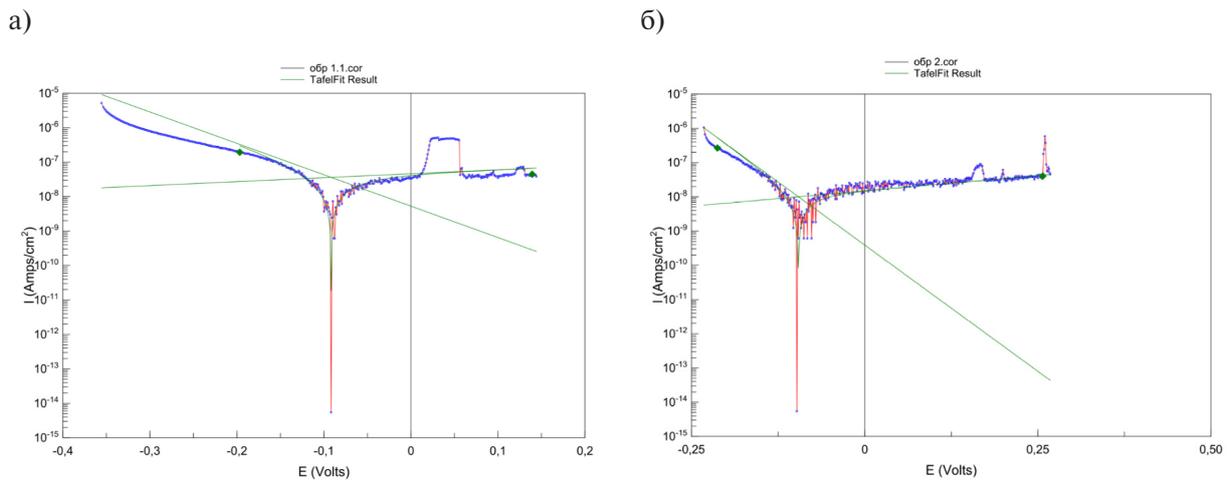


Рис. 5. Кривые Тафеля, полученные на поверхности образца из стали 08X18N9T:

- а) без электролитно-плазменной обработки с исходным параметром шероховатости поверхности  $Ra$  0,4 мкм;
- б) после комбинированной струйной электролитно-плазменной обработки с параметром шероховатости поверхности  $Ra$  11,800 нм

Fig. 5. Tafel curves obtained on the surface of a 08Kh18N9T steel sample:

- a) without electrolyte-plasma treatment with an initial surface roughness parameter  $Ra$  of 0.4  $\mu\text{m}$ ;
- b) after combined jet electrolyte-plasma treatment with a surface roughness parameter  $Ra$  of 11.800 nm

где  $K = 0.00327$  (константа для перевода единиц);  $EW = 27.93$  г/моль – эквивалентный вес железа, валентность +2;  $\rho = 7.85$  г/см<sup>3</sup> – плотность стали;  $I_{\text{кор}}$  – плотность тока коррозии: образец 1:  $3,619 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>; образец 2:  $1,0058 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>.

#### Результаты расчета

Образец с исходным параметром шероховатости поверхности  $Ra$  0,4 мкм:

$$v_{\text{кор}} = \frac{3.619 \cdot 10^{-8} \cdot 0.00327 \cdot 27.93}{7.85} \approx 4.21 \cdot 10^{-5} \text{ мм/год.}$$

Образец после комбинированной струйной электролитно-плазменной обработки с параметром шероховатости поверхности  $Ra$  0,004 мкм:

$$v_{\text{кор}} = \frac{1.0058 \cdot 10^{-8} \cdot 0.00327 \cdot 27.93}{7.85} \approx 1.17 \cdot 10^{-5} \text{ мм/год.}$$

#### Обсуждение

Анализ проведенных исследований показывает, что коррозионные свойства поверхностного слоя нержавеющей стали в значительной мере зависят от шероховатости поверхности  $Ra$ . При струйной электролитно-плазменной обработке наличие развитого макро- и микрорельефа приводит к тому, что между поверхностью (анодом) и противоположным электродом (катодом) на вершинах макро- и микронеровностей возникает высокая напряженность электрического поля, при которой происходит локализация линий напряженности на вершинах и в окрестности макро- микронеровностей с дальнейшим возникновением на их вершинах разряда, подобного тлеющему.

Обработкой поверхности струйным электролитно-плазменным разрядом удалось снизить параметр шероховатости поверхности  $Ra$  до чрезвычайно малой величины  $Ra$  0,004 мкм. Это соответствует лучшим мировым достижениям для проволочно-вырезной электроэрозионной обработки ( $Ra$  0,002 мкм), значительно превышает результаты обработки в электролитической ванне ( $Ra$  0,1 мкм) и превосходит результаты по электрохимическому полированию ( $Ra$  0,176 мкм) [13–15, 27, 28].

Уменьшение и сглаживание вершин микронеровностей приводит к тому, что поверхность снижает свою потенциальную энергию. При этом растет энергия Гиббса, что не дает осуществляться самопроизвольным реакциям коррозионного окисления на сглаженных микронеровностях поверхности. При этом поверхность становится значительно более инертной по отношению к окружающей агрессивной среде, что повышает ее коррозионные свойства.

Оценка электрохимических реакций показывает, что после струйной электролитно-плазменной полировки плотность тока коррозии уменьшилась в 3,6 раза. Это указывает на значительное улучшение коррозионной стойкости нержавеющей стали.

В целом для Тафелевских кривых наблюдается смещение потенциала коррозии  $E_{\text{корр}}$  в положительную область для поверхности после комбинированной электролитно-плазменной обработки, что характерно для пассивированных поверхностей. Данные экспериментов подтверждаются результатами работ зарубежных и отечественных исследователей по оценке электрохимических реакций [12, 27].

### Выводы

1. Минимально достигнутая величина среднеарифметической высоты шероховатости поверхности по площади  $Sa$  для выборки 2499,515 мкм\*мкм составила 11,800 нм.
2. Минимально достигнутая величина среднеарифметического из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины 10 мкм составила  $Ra$  0,004 мкм.
3. Электростатический расчет в программе COMSOL Multiphysics показал, что при возникновении пленки двойного окисного слоя формируется высокая напряженность электрического поля между пиками дефектов и границей окисного слоя до  $2,3 \cdot 10^{11}$  В/м, что гарантированно приводит к стеканию электрического разряда, подобного тлеющему, на пики дефектов и уменьшению шероховатости поверхности.
4. В процессе электролитно-плазменной обработки может формироваться коррозионно стойкий модифицированный слой толщиной до 50 мкм.
5. Скорость коррозии поверхности после струйной электролитно-плазменной обработки снижена на 72%. Плотность тока коррозии  $I_{\text{кор}}$  уменьшилась в 3,6 раза.
6. Изменение параметров Тафеля подтверждает модификацию поверхности.
7. Уменьшение параметра шероховатости поверхности  $Ra$  способствует образованию плотного поверхностного оксидного слоя, подавляющего электрохимические реакции.
8. Низкие значения  $I_{\text{кор}} < 40$  нА/см<sup>2</sup> характерны для пассивных нержавеющей сталей.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Голдобина Л.А., Шкрабак В.С., Орлов П.С.** Предупреждение аварий и катастроф на катодно-защищенных подземных трубопроводах бесконтактными методами идентификации коррозионного разрушения. Ярославль: ФГБОУВПО «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия», 2012. 204 с.

[2] **Власенко М.М.** Підвищення корозійної стійкості сталі 20 при електролітичному боруванні // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2013. Т. 102, № 4. С. 77–82.

- [3] **Шаехов М.Ф., Кадыров Ф.Ф., Гатина Э.Б.** Повышение коррозионной стойкости нержавеющей сталей путем обработки высокочастотной плазмой пониженного давления // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 17. С. 40–41.
- [4] **Zuo Z., Zhang J., Hou Q., Zhang C., Wang K., Duan J., Chen X., Hou B.** Study on the effect of different cathodic protection potentials on the growth of mixed bacteria and cathodic protection efficiency. *Chemistry*. 7(2) (2025) 54. DOI: 10.3390/chemistry7020054
- [5] **Кононенко Р.В., Майзель И.Г.** Диагностика нефтепромысловых трубопроводов с внутренним защитным покрытием на основе эпоксидной смолы // Вестник ИРГТУ. 2012. Т. 71, № 12. С. 50–53.
- [6] **Кононенко Р.В., Майзель И.Г.** Контроль качества внутреннего покрытия трубопровода // Вестник ИРГТУ. 2013. Т. 77, № 6. С. 17–21.
- [7] **Осербаева А.К., Нуруллаев Ш.П., Гуро В.П.** Термодинамика ингибирования коррозии сталей в присутствии азот и фосфорсодержащих соединений // Евразийский союз ученых (ЕСУ). 2019. Т. 62, № 5. С. 61–65.
- [8] **Паршутин В.В., Пасинковский Е.А., Парамонов А.М., Коваль А.В., Чернышева Н.В.** Новые способы повышения коррозионной стойкости металлов химико-термической обработкой при анодном электролитном нагреве // Электронная обработка материалов. 2012. Т. 48, № 1. С. 88–92.
- [9] **Исламова А.Г., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г.** Влияние шероховатости на поверхностную энергию и смачиваемость поверхностей меди и стали // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Т. 7, № 1 (25). С. 60–78. DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-60-78
- [10] **Андреев Ю.Я.** Вакансионная термодинамическая модель поверхностной энергии твердых металлов // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2012. Т. 48, № 1. С. 29–38.
- [11] **Крит Б.Л., Кусманов С.А.** Перспективы локальной плазменно-электролитной обработки // Быстрозакаленные материалы и покрытия. 2024. С. 147–151.
- [12] **Синькевич Ю.В.** Влияние электроимпульсного полирования на коррозионную стойкость углеродистых конструкционных и коррозионностойких сталей // Инновационные технологии в машиностроении (ред. В.П. Табаков, Д.В. Кравченко). 2022. С. 126–131.
- [13] **Danilov I., Paul R., Hackert-Oschätzchen M., Zinecker M., Quitzke S., Schubert A.** Random sequential simulation of the resulting surface roughness in plasma electrolytic polishing of stainless steel. *Procedia CIRP*, 95 (2020) 981–986. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.255
- [14] **Quitzke S., Danilov I., Morgenstern R., Martin A., Lampke T., Schubert A.** Microstructure and topography of laterally confined porous anodic oxides produced with high growth rate in a maskless two-phase jet setup. *Journal of Applied Electrochemistry*, 55 (2025) 753–768. DOI: 10.1007/s10800-024-02192-y
- [15] **Quitzke S., Kröning O., Safranchik D., Zeidler H., Danilov I., Martin A., Böttger-Hiller F., Essel S., Schubert A.** Design and setup of a jet-based technology for localized small scale Plasma electrolytic Polishing. *Journal of Manufacturing Processes*, 75 (2022) 1123–1133. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.01.064
- [16] **Корякина С.Р.** Влияние анодной электролитно-плазменной обработки на коррозионное поведение поверхности // Ступени роста – 2018. 2018. С. 74.
- [17] **Volosova M.A., Kusmanov S.A., Tambovskiy I.V., Mukhacheva T.L., Mitrofanov A.P., Suminov I.V., Grigoriev S.N.** Increasing the wear and corrosion resistance of a CP-Ti surface by Plasma Electrolytic Borocarburing and Polishing. *Surfaces*, 7 (4) (2024) 824–837. DOI: 10.3390/surfaces7040054
- [18] **Нарулин К.Ю., Коновалова О.А., Вейнов В.П., Котков А.О.** Исследование влияния электролитно-плазменной обработки поверхности медицинского инструмента на повышение ее коррозионной стойкости // Бутлеровские сообщения. 2022. Т. 72, № 11. С. 114–119. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/22-72-11-114
- [19] **Кусманов С.А., Силкин С.А., Белкин П.Н.** Особенности коррозионного поведения стали после электролитно-плазменного диффузионного насыщения и полирования // Современные электрохимические технологии и оборудование – 2019. 2019. С. 336–338.

- [20] **Кусманов С.А., Силкин С.А., Белкин П.Н.** Влияние электролитно-плазменного полирования на коррозионную стойкость конструкционных сталей после их анодного насыщения азотом, бором и углеродом // *Электрохимия*. 2020. Т. 56, № 4. С. 385–394. DOI: 10.31857/S042485702004009X
- [21] **Примак Д.Ю.** Влияние режимов обработки электролитно-плазменной нитроцементации на изменение коррозионной стойкости стали // *Ступени роста* – 2019. 2019. С. 118–119.
- [22] **Рахадиллов Б.К., Кусаинов Р.К., Бақыт Ж.Ә., Байжан Д.Р., Қадырболат Н.Е.** Трибологические и коррозионные свойства сталей 45 и 65Г, используемых в сельскохозяйственной технике, после электролитно-плазменного упрочнения // *Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки*. 2024. Т. 15, № 3. С. 388–397. DOI: 10.53360/2788-7995-2024-3(15)-48
- [23] **Ширвель А.А., Касач А.А., Кубрак П.Б., Курило И.И.** Влияние электролитно-плазменной обработки Ti на его коррозионное поведение в биологических средах // *Инновационные материалы и технологии*. 2022. С. 256–258.
- [24] **Кусманов С.А., Гришина Е.П., Белкин П.Н., Кусманова Ю.В., Кудрякова Н.О.** Повышение коррозионной стойкости низкоуглеродистых сталей электролитно-плазменным насыщением азотом и углеродом // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017. Т. 740, № 2. С. 52–59.
- [25] **Курбанбеков Ш.Р., Мусахан Н.П., Халик С.Ш.** Влияние электролитно-плазменной обработки на фазовый состав и коррозионную стойкость поверхности нержавеющей стали 12X18H10T // *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2024. № 3. С. 3–7.
- [26] **Дьяков И.Г.** Коррозионные свойства сталей после анодного электролитно-плазменного насыщения азотом и углеродом // *Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии*. 2017. С. 6.
- [27] **Ghezri A., Pratama K., Scholl Y., Küenzi A., Nelis T., Burger J., Bessire C.** Energy Efficient jet polishing via electrolytic plasma enhances corrosion resistance in stainless steel. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8 (2024) 289. DOI: 10.3390/jmmp8060289
- [28] **Попов А.И.** Гидродинамические особенности струйного электролитно-плазменного разряда // *Технология машиностроения*. 2023. № 6. С. 5–17. DOI: 10.34641/ТМ.2023.252.6.043
- [29] *Технические условия ТУ 4254-001-58699387-2010: Нормативные и технические документы, устанавливающие требования к микроскопам, сканирующим зондовым Ntegra SPECTRA, Ntegra PRIMA, Ntegra VITA, Ntegra THERMA, Ntegra AURA, Ntegra MAXIMUS, Ntegra SOLARIS, Ntegra SOLARIS Duo, Ntegra TOMO, Ntegra LIFE*
- [30] ГОСТ Р 8.700-2010 НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Государственная система обеспечения единства измерений МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ВЫСОТЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА State system for ensuring the uniformity of measurements. Methods of surface roughness effective height measurements by means of scanning probe atomic force microscope.
- [31] ISO 21920-2:2021 Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
- [32] ISO 25178: Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: areal.
- [33] **Babič M., Šturm R., Gălăţanu T.-F., Száva I.-R., Száva I.** Modeling Porosity Surface of 3D Selective Laser Melting Metal Materials. *Fractal Fract.* 9 (2025) 331. *Технические условия ТУ 4254-001-58699387-2010: Нормативные и технические документы, устанавливающие требования к микроскопам, сканирующим зондовым Ntegra SPECTRA, Ntegra PRIMA, Ntegra VITA, Ntegra THERMA, Ntegra AURA, Ntegra MAXIMUS, Ntegra SOLARIS, Ntegra SOLARIS Duo, Ntegra TOMO, Ntegra LIFE390/fractalfract9060331*
- [34] **Long T., Yu J., Long Y., Suo M., Zhou J.** A novel coupling approach of smoothed particle hydrodynamic with discrete element method for simulating selective laser melting process, *Physics of Fluids*. 37 (3) (2025). DOI: 10.1063/5.0256271

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**ПОПОВ Александр Иннокентьевич** – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: popov\_ai@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5227-1094>

**ТЕПЛУХИН Василий Гельевич** – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: cornfield@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0535-7899>

**РАДКЕВИЧ Михаил Михайлович** – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: radmich@mail.ru

**БЕЛЯКОВ Сергей Владимирович** – аспирант, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), без степени.

E-mail: gidravlik2013@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3864-6855>

**ВЛАСОВ Иван Игоревич** – инженер, НИЦ «Курчатовский Институт» – ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, без степени.

E-mail: vlasovteh@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1857-9109>

## **REFERENCES**

[1] **L.A. Goldobina, V.S. Shkrabak, P.S. Orlov**, Preduprezhdenie avarii i katastrof na katodnozaschishchennykh podzemnykh truboprovodakh beskontaktnymi metodami identifikatsii korrozionnogo razrushe-niia [Prevention of accidents and disasters on cathodically protected underground pipelines using non-contact methods for identifying corrosion damage]. Iaroslavl': FGBOUVPO «Iaroslavskaiia gosudarstvennaia sel'skokhoziaistvennaia akademiia», 2012. 204 p.

[2] **M. Vlasenko**, Increase of corrosion stability of steel 20 at electrolytic borating. Bulletin of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 4 (102) (2013) 77–82.

[3] **M.F. Shaekhov, F.F. Kadyrov, E.B. Gatina**, Povyshenie korrozionnoi stoikosti nerzhaveiushchikh stalei putem obrabotki vysokochastotnoi plazmoi ponizhennogo davleniia [Improving the corrosion resistance of stainless steels by treating them with high-frequency, low-pressure plasma]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University], 15 (17) (2012) 40–41.

[4] **Z. Zuo, J. Zhang, Q. Hou, C. Zhang, K. Wang, J. Duan, X. Chen, B. Hou**, Study on the effect of different cathodic protection potentials on the growth of mixed bacteria and cathodic protection efficiency. Chemistry, 7(2) (2025) 54. DOI: 10.3390/chemistry7020054

[5] **R.V. Kononenko, I.G. Maizel**, Diagnosis of gathering lines with internal epoxy resin-based protective coating. Proceedings of Irkutsk State Technical University, 12 (71) (2012) 50–53.

[6] **R.V. Kononenko, I.G. Maizel**, Quality control of pipeline internal coating. Proceedings of Irkutsk State Technical University, 6 (77) (2013) 17–21.

[7] **A.K. Oserbaeva, S.P. Nurullaev, V.P. Guro**, Thermodynamics of inhibiting corrosion of steels in the presence of nitrogen and phosphorus containing compounds. Eurasian Union of Scientists, 5 (62) (2019) 61–65.

[8] **V.V. Parshutin, E.A. Pasinkovskii, A.M. Paramonov, A.V. Koval', N.V. Chernysheva**, Novye sposoby povysheniia korrozionnoi stoikosti metallov khimiko-termicheskoi obrabotkoi pri anodnom elektrolitnom nagreve [New methods for increasing the corrosion resistance of metals by chemical-thermal treatment with anodic electrolytic heating]. *Electronic Processing of Materials*, 1 (48) (2012) 88–92.

[9] **A.G. Islamova, D.V. Feoktistov, E.G. Orlova**, Influence of the copper and steel surfaces' roughness on surface energy and wettability. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 1 (7) (2021) 60–78. DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-60-78

[10] **Iu.Ia. Andreev**, Vakansionnaia termodinamicheskaiia model' poverkhnostnoi energii tverdykh metallov [Vacancy thermodynamic model of the surface energy of solid metals]. *Fizikokhimiia poverkhnosti i zashchita materialov* [Surface physicochemistry and material protection], 1 (48) (2012) 29–38.

[11] **B.L. Krit, S.A. Kusmanov**, Perspektivy lokal'noi plazmenno-elektrolitnoi obrabotki [Prospects of local plasma-electrolyte treatment]. *Bystrozakalennyye materialy i pokrytiia* [Rapidly hardened materials and coatings], (2024) 147–151.

[12] **Y.V. Sinkevitch**, Influence of electric pulse polishing on the corrosion resistance of carbon structural and corrosion resistant steels. *Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii* [Innovative technologies in mechanical engineering] (eds. V.P. Tabakov, D.V. Kravchenko), (2022) 126–131.

[13] **I. Danilov, R. Paul, M. Hackert-Oschätzchen, M. Zinecker, S. Quitzke, A. Schubert**, Random sequential simulation of the resulting surface roughness in plasma electrolytic polishing of stainless steel. *Procedia CIRP*, 95 (2020) 981–986. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.255

[14] **S. Quitzke, I. Danilov, R. Morgenstern, A. Martin, T. Lampke, A. Schubert**, Microstructure and topography of laterally confined porous anodic oxides produced with high growth rate in a maskless two-phase jet setup. *Journal of Applied Electrochemistry*, 55 (2025) 753–768. DOI: 10.1007/s10800-024-02192-y

[15] **S. Quitzke, O. Kröning, D. Safranchik, H. Zeidler, I. Danilov, A. Martin, F. Böttger-Hiller, S. Essel, A. Schubert**, Design and setup of a jet-based technology for localized small scale Plasma electrolytic Polishing. *Journal of Manufacturing Processes*, 75 (2022) 1123–1133. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.01.064

[16] **S.R. Koriakina**, Vliianie anodnoi elektrolitno-plazmennoi obrabotki na korrozionnoe povedenie poverkhnosti [The influence of anodic electrolytic plasma treatment on the corrosion behavior of the surface]. *Stupeni rosta – 2018* [Stages of growth – 2018], (2018) 74.

[17] **M.A. Volosova, S.A. Kusmanov, I.V. Tambovskiy, T.L. Mukhacheva, A.P. Mitrofanov, I.V. Suminov, S.N. Grigoriev**, Increasing the wear and corrosion resistance of a CP-Ti surface by Plasma Electrolytic Borocarburing and Polishing. *Surfaces*, 7 (4) (2024) 824–837. DOI: 10.3390/surfaces7040054

[18] **K.Yu. Nagulin, O.A. Konovalova, V.P. Veynov, A.O. Kotkov**, Study of the effect of electrolytic-plasma treatment of the surface of a medical instrument on increasing its corrosion resistance. *Butlerov Communications*, 11 (72) (2022) 114–119. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/22-72-11-114.

[19] **S.A. Kusmanov, S.A. Silkin, P.N. Belkin**, Osobennosti korrozionnogo povedeniia stali posle elektrolitno-plazmennogo diffuzionnogo nasyscheniia i polirovaniia [Features of corrosion behavior of steel after electrolytic-plasma diffusion saturation and polishing]. *Modern Electrochemical Technologies and Equipment – 2019*, (2019) 336–338.

[20] **S.A. Kusmanov, S.A. Silkin, P.N. Belkin**, Effect of plasma-electrolytic polishing on the corrosion resistance of structural steels after their anodic saturation with Nitrogen, Boron, and Carbon. *Russian Journal of Electrochemistry*, 4 (56) (2020) 356–364. DOI: 10.1134/S1023193520040084

[21] **D.Iu. Primak**, Vliianie rezhimov obrabotki elektrolitno-plazmennoi nitrotsementatsii na izmenenie korrozionnoi stoikosti stali [The influence of electrolytic plasma nitrocarburing processing modes on the change in corrosion resistance of steel]. *Stupeni rosta – 2019* [Stages of growth – 2019], (2019) 118–119.

[22] **B. Rakhadilov, P. Kussainov, Zh. Bakyt, D. Baizhan, N. Kadyrbolat**, Tribological and corrosion properties of 45 and 65G steels used in agricultural machinery after electrolytic-plasma hardening. *Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences*, 3 (15) (2024) 388–397. DOI: 10.53360/2788-7995-2024-3(15)-48

- [23] **A.A. Shirvel', A.A. Kasach, P.B. Kubrak, I.I. Kurilo**, Vliianie elektrolitno-plazmennoi obrabotki Ti na ego korrozionnoe povedenie v biologicheskikh sredakh [The influence of electrolytic-plasma treatment of Ti on its corrosion behavior in biological environments]. *Innovation Materials and Technologies*, (2022) 256–258
- [24] **S.A. Kusmanov, E.P. Grishina, P.N. Belkin, Yu.V. Kusmanova, N.O. Kudryakova**, Raising the corrosion resistance of low-carbon steels by electrolytic-plasma saturation with nitrogen and carbon. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, 2 (740) (2017) 52–59.
- [25] **Sh.R. Kurbanbekov, N.P. Musakhan, S.Sh. Khalik**, Vliianie elektrolito-plazmennoi obrabotki na fazovyi sostav i korrozionnuu stoikost' poverkhnosti nerzhaveiushchei stali 12KH18N10T [The influence of electrolytic plasma treatment on the phase composition and corrosion resistance of the surface of 12X18H10T stainless steel]. *Nauka, novye tekhnologii i innovatsii Kyrgyzstana* [Science, new technologies and innovations in Kyrgyzstan]. 3 (2024) 3–7.
- [26] **I.G. D'iakov**, Korrozionnye svoystva stali posle anodnogo elektrolitno-plazmennogo nasyshcheniia azotom i uglerodom [Corrosion properties of steels after anodic electrolyte-plasma saturation with nitrogen and carbon]. *Sovremennye metody v teoreticheskoi i eksperimental'noi elektrokhemii* [Modern methods in theoretical and experimental electrochemistry]. 2017. S. 6.
- [27] **A. Ghezri, K. Pratama, Y. Scholl, A. Küenzi, T. Nelis, J. Burger, C. Bessire**, Energy Efficient jet polishing via electrolytic plasma enhances corrosion resistance in stainless steel. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8 (2024) 289. DOI: 10.3390/jmmp8060289
- [28] **A.I. Popov**, Gidrodinamicheskie osobennosti struynogo elektrolitno-plazmennogo razriada. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 6 (2023) 5–17. DOI: 10.34641/TM.2023.252.6.043
- [29] TU 4254-001-58699387-2010 *Texnicheskie usloviya: Normativny'e i texnicheskie dokumenty'*, ustanavlivayushhie trebovaniya k mikroskopam, skaniruyushhim zondovy'm Ntegra SPECTRA, Ntegra PRIMA, Ntegra VITA, Ntegra THERMA, Ntegra AURA, Ntegra MAXIMUS, Ntegra SOLARIS, Ntegra SOLARIS Duo, Ntegra TOMO, Ntegra LIFE [Regulatory and Technical Documents Establishing Requirements for Microscopes, Scanning Probe Microscopes Ntegra SPECTRA, Ntegra PRIMA, Ntegra VITA, Ntegra THERMA, Ntegra AURA, Ntegra MAXIMUS, Ntegra SOLARIS, Ntegra SOLARIS Duo, Ntegra TOMO, Ntegra LIFE]. Moscow. "MDT Nanotechnology" 2010, 8 p. (In Russ).
- [30] GOST R 8.700-2010 *Natsional'ny'j standart rossijskoj federatsii gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij metodika izmerenij e'ffektivnoj vy'soty' sherokovatosti poverkhnosti s pomoshch'yu skaniruyushhego zondovogo atomno-silovogo mikroskopa* [State system for ensuring the uniformity of measurements. Methods of surface roughness effective height measurements by means of scanning probe atomic force microscope] Publ., 2010, 12 p. (In Russ).
- [31] ISO 21920-2:2021 *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.*
- [32] ISO 25178: *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: areal.*
- [33] **M. Babič, R. Šturm, T.-F. Gălățanu, I.-R. Száva, I. Száva**, Modeling porosity surface of 3D selective laser melting metal materials. *Fractal and Fractional*, 9 (6) (2025) 331. DOI: 10.3390/fractalfract9060331
- [34] **T. Long, J. Yu, Y. Long, M. Suo, J. Zhou**, A novel coupling approach of smoothed particle hydrodynamic with discrete element method for simulating selective laser melting process. *Physics of Fluids*, 37 (3) (2025) 033341. DOI: 10.1063/5.0256271

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Alexander I. POPOV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
 E-mail: [popov\\_ai@spbstu.ru](mailto:popov_ai@spbstu.ru)  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5227-1094>

**Vasili G. TEPLUKHIN** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: cornfield@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0535-7899>

**Mikhail M. RADKEVICH** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: radmich@mail.ru

**Sergei V. BELYAKOV** – *Bauman Moscow State Technical University.*

E-mail: gidravlik2013@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3864-6855>

**Ivan I. VLASOV** – *National Research Center “Kurchatov Institute” – Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials”.*

E-mail: vlasovteh@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1857-9109>

**Поступила: 20.07.2025; Одобрена: 19.10.2025; Принята: 13.11.2025.**

**Submitted: 20.07.2025; Approved: 19.10.2025; Accepted: 13.11.2025.**