

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 1 (175). С. 28-36.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 1 (175). P. 28-36.

Научная статья

УДК 621.9.048.7:620.22

doi: 10.30987/2223-4608-2026-1-28-36

## Влияние низкотемпературной плазменной обработки на структуру и электрофизические свойства поверхностного слоя металлических изделий

Борис Максович Бржозовский<sup>1</sup>, д.т.н.

Сергей Геннадьевич Гестрин<sup>2</sup>, д.ф.-м.н.

Елена Петровна Зинина<sup>3</sup>, д.т.н.

Владимир Васильевич Мартынов<sup>4</sup>, д.т.н.

<sup>1, 3, 4</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup> Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

<sup>1</sup> bmbasar85@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8486-4467>

<sup>2</sup> gestrin.s@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4882-4562>

<sup>3</sup> e-zinina@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>4</sup> v\_martynov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4177-0963>

**Аннотация.** Представлены результаты исследования процессов, протекающих в поверхностном слое металлического изделия в ходе и по результатам его низкотемпературной плазменной обработки. Подход к исследованию включал последовательное рассмотрение вопросов, связанных с нагревом поверхности изделия, который запускает процесс диффузионного насыщения (легирования) его поверхностного слоя заряженными частицами, формируемыми ионизационными процессами в плазме, и влияния легирования на электрофизические свойства поверхностного слоя (сопротивление и проводимость). По результатам решения уравнения теплопроводности показано, что нагрев поверхности изделия плазмой на участках, имеющих максимальную кривизну, может приводить к плавлению его материала. Это связано с тем, что на этих участках происходит сгущение линий напряженности СВЧ поля и электронная составляющая плазмы оказывает свое максимальное воздействие. Высокоэнергичные электроны, двигаясь против линий напряженности поля, попадают на эти участки поверхности и передают им свою энергию, обеспечивая их дополнительный разогрев. Выделяющаяся при этом теплота плавления поглощается при движении поверхности фазового перехода, обеспечивая большую глубину последующих структурных изменений поверхностного слоя изделия. Нагрев и расплав поверхностного слоя запускают процесс диффузии в него частиц (положительных и отрицательных ионов) из плазмы. Толщина диффузионного слоя может достигать нескольких десятков микрометров. При этом концентрация частиц медленно спадает с удалением от поверхности, что обеспечивает хорошую связь диффузионного слоя с материалом основы изделия. Внедрившись в поверхностный слой, частицы после нейтрализации создают точечные дефекты (междоузельные атомы в кристаллической решетке), что вызывает отклонения траектории и уменьшение (как следствие) скорости движения электронов в поверхностном слое, увеличивая, тем самым, его остаточное удельное сопротивление и снижая проводимость.

**Ключевые слова:** металлическое изделие, поверхностный слой, низкотемпературная плазменная обработка, нагрев, термодиффузия, точечные дефекты, сопротивление, проводимость

**Благодарности:** материал подготовлен в рамках выполнения научного исследования по гранту Российского научного фонда №19-19-00101

**Для цитирования:** Бржозовский Б.М., Гестрин С.Г., Зинина Е.П., Мартынов В.В. Влияние низкотемпературной плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя металлических изделий // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 1 (175). С. 28–36. doi: 10.30987/2223-4608-2026-1-28-36

## Low-temperature plasma treatment effect on the structure and electrophysical properties of the metalware surface layer

Boris M. Brzhozovsky<sup>1</sup>, D. Eng.

Sergey G. Gestrin<sup>2</sup>, Dr. Sci. in Physics and Mathematics

Elena P. Zinina<sup>3</sup>, D. Eng.

Vladimir V. Martynov<sup>4</sup>, D. Eng.

<sup>1, 3, 4</sup> Blagonravov Institute of Mechanical Engineering RAS (IMASH RAS), Moscow, Russia

<sup>2</sup> Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, Russia

<sup>1</sup> bmsar85@mail.ru

<sup>2</sup> gestrin.s@yandex.ru

<sup>3</sup> e-zinina@bk.ru

<sup>4</sup> v\_martynov@mail.ru

**Abstract.** The results of a study of the processes occurring in the metalware surface layer of a metal product under and based on the results of its low-temperature plasma treatment are presented. The research approach included a consistent consideration of issues related to surface heating that triggers the some diffusion saturation (alloying) of its surface layer with charged particles due to ionization in plasma, and the alloying effect on the electrophysical properties of the surface layer (resistance and conductivity). Based on the results of solving the thermal conductivity equation, it is shown that heating the surface with plasma in areas having maximum curvature can result in melting of its material. This is due to the fact that the microwave field strength lines thicken in these areas and the electronic component of the plasma exerts its maximum effect. High-energy electrons, moving against the field strength lines, fall on these surface areas and transfer their energy to them, providing them with additional heating. The released heat of melting in this case is absorbed during the movement of the phase transition surface, providing a greater depth of subsequent structural changes in the metalware surface layer. Heating and melting of the surface layer trigger some particles diffusion (positive and negative ions) from plasma into it. The thickness of the diffusion layer can reach several tens of micrometers. At the same time, the particle concentration slowly decreases with distance from the surface, which ensures a good connection of the diffusion layer with the base material of the product. Once embedded in the surface layer, the particles, after neutralization, create point defects (interstitial atoms in the crystal lattice), which causes trajectory deviations and as a result the velocity decrease of electrons in the surface layer, thereby increasing its residual resistivity, but reducing conductivity.

**Keywords:** metal product, surface layer, low-temperature plasma treatment, heating, thermal diffusion, point defects, resistance, conductivity

**Acknowledgments:** the material was prepared as part of the scientific research under the grant of the Russian Science Foundation No. 19-19-00101

**For citation:** Brzhozovsky B.M., Gestrin S.G., Zinina E.P., Martynov V.V. Low-temperature plasma treatment effect on the structure and electrophysical properties of the metalware surface layer / Science intensive technology in mechanical engineering. 2026. № 1 (175). P. 28–36. doi: 10.30987/2223-4608-2026-1-28-36

### Введение

Известно, что для обработки металлических изделий различного назначения в плазме могут эффективно использоваться не только газовые разряды, но и создающие плазму низкоэнергетические электронные пучки с плотностью потока энергии 1...10 Вт/см<sup>2</sup> [1 – 4]. При этом результаты работ, связанных с изучением физических свойств и поведения поверхностного слоя обработанных в плазме изделий в процессе эксплуатации в различных условиях, включая экстремальные, позволили установить, что воздействие плазмы приводит к изменению механизма износа рабочих поверхностей изделий с традиционных видов

(абразивный, адгезионный и диффузионный) на механическое истирание. Основным следствием становятся минимальные (не превышающие 100 мкм) и в большинстве случаев локальные изменения пространственной формы контактных поверхностей, а также снижение интенсивности образования дефектов на них [5]. В совокупности это способствует повышению показателей надежности изделий, в частности, показателей долговечности [6]. В связи с этим представляет интерес исследование, связанное с изучением механизма влияния низкотемпературной плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя изделий.

### Исследование

Подход к исследованию включал последовательное рассмотрение вопросов, связанных с нагревом поверхности изделия (вплоть до ее плавления), который запускает процесс диффузионного насыщения (легирования) его поверхностного слоя заряженными частицами, формируемыми ионизационными процессами в плазме, и влиянием легирования на свойства поверхностного слоя, в частности, электрофизические (сопротивление и проводимость).

Для определения температуры  $T_1(x, t)$  внутри обрабатываемого изделия в процессе его нагрева использовалось уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1^2 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}. \quad (1)$$

При этом предполагалось, что ось  $Ox$  перпендикулярна к поверхности изделия, начало отсчета (точка  $x = 0$ ) лежит на его поверхности,  $a_1^2$  – коэффициент температуропроводности материала изделия.

Диффузионные процессы рассматривались со следующих позиций:

– обрабатываемое изделие, размещенное в рабочей камере технологической установки [6, 7], окружено плазмообразующей средой (газом): азотом, аргоном или их смесью, которая также содержит некоторые примеси: углерод и сложные углеводороды ( $C_nH_m$ , CO), поступающие в камеру по вакуум проводу в виде паров машинного масла, применяемого для смазки вакуумного насоса [8], фтор, испаряющийся при нагревании ленты, используемой для изоляции необрабатываемой части изделия, а также кислород;

– при зажигании в камере комбинированного газового разряда подачи в нее СВЧ энергии с потенциалом  $\varphi_{\text{СВЧ}}$  вокруг изделия формируется плазма, содержащая возникающие вследствие ионизации частиц газа положительные ионы  $N^+$ ,  $N_2^+$ ,  $Ar^+$ , и отрицательные ионы  $C^-$ ,  $O^-$ ,  $F^-$ , появляющиеся вследствие захвата атомами электрона, а также ионизированные молекулы сложных углеводородов. Способность присоединять электрон к атому ( $A + e^- \rightarrow A^- + \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – энергия сродства, выделяющаяся при присоединении электрона к

атому) характеризуется параметром, называемым сродством к электрону. Данная величина может принимать как положительные, так и отрицательные значения:  $\varepsilon(C) = + 1,262$  эВ/Атом,  $\varepsilon(O) = + 1,461$  эВ/Атом,  $\varepsilon(F) = + 3,401$  эВ/Атом,  $\varepsilon(N) = - 0,07$  эВ/Атом,  $\varepsilon(Ar) = - 1,0$  эВ/Атом. Атомы с большим положительным значением  $\varepsilon$  образуют устойчивые отрицательные ионы;

– на обрабатываемое изделие подается положительный потенциал смещения ( $\varphi_{\text{смещ.}}$ ), который может по модулю как превосходить, так и быть меньше, чем отрицательный плавающий потенциал, имеющийся на изделии вследствие его контакта с плазмой [7]. Таким образом, результирующий потенциал  $\varphi_{\text{изделия}} = \varphi_{\text{смещ.}} - U_f + \varphi_{\text{СВЧ}}$  может быть как положительным, так и отрицательным. Значение плавающего потенциала  $U_f = 35 \div 140$  В определяется уровнем СВЧ-мощности, подводимой в рабочую камеру установки [7]. В случае, если  $\varphi_{\text{изделия}} < 0$  к поверхности притягиваются положительные ионы  $N^+$ ,  $N_2^+$ ,  $Ar^+$ , которые в дальнейшем диффундируют внутрь, в результате чего происходит азотирование или аргонирование поверхностного слоя. Если  $\varphi_{\text{изделия}} > 0$ , то притягиваются ионы  $C^-$ ,  $O^-$ ,  $F^-$  и происходит насыщение поверхностного слоя углеродом, кислородом или фтором. При достаточно больших амплитудных значениях  $\varphi_{\text{СВЧ}(t)}$  возможна ситуация, когда в течение одной части периода на поверхность изделия поступают положительные ионы, а в течение другой части периода отрицательные ионы.

Продифференцировав обе стороны (1) по  $x$ , находим

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial T_1}{\partial x} = a_1^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{\partial T_1}{\partial x}. \quad (2)$$

Отсюда получаем уравнение для плотности теплового потока

$$\frac{\partial J_1}{\partial t} = a_1^2 \frac{\partial^2 J_1}{\partial x^2}, \quad (3)$$

где  $J_1(x, t) = -\kappa_1 \partial T_1 / \partial x$ ;  $\kappa_1 = C_1 \rho_1 a_1^2$  – коэффициент теплопроводности;  $C_1$  – удельная теплоемкость;  $\rho$  – плотность материала.

Тепловой поток внутри изделия ( $x \geq 0$ ) будем искать в виде

$$J_1(x, t) = A_1 + B_1 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right), \quad (4)$$

где  $A_1$  и  $B_1$  – некоторые константы, подлежащие определению,  $\operatorname{erf}(x/2a_1\sqrt{t})$  – интеграл ошибок.

Будем предполагать, что на поверхности изделия задано постоянное значение теплового потока, формируемого в диапазоне СВЧ-мощностей 100...200 Вт [7], который обеспечивает наиболее эффективную передачу энергии СВЧ поля электронной подсистеме плазмы

$$J_1(0, t) = J_0, \quad (5)$$

тогда, очевидно,  $A_1 = J_0$ , и из (4) имеем

$$J_1(x, t) = J_0 + B_1 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right). \quad (6)$$

Из (6) находим

$$-\kappa_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = J_0 + B_1 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right). \quad (7)$$

Интегрируя (7) по  $x$ , находим температуру внутри изделия, где  $C_1$  – константа.

$$T_1(x, t) = -\frac{J_0}{\kappa_1}x + C_1 - \frac{B_1}{\kappa_1} \int \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right) dx, \quad (8)$$

Из (8) получим

$$T_1(x, t) = -\frac{J_0}{\kappa_1}x + C_1 - \frac{B_1}{\kappa_1} 2a_1\sqrt{t} \left( \frac{x}{2a_1\sqrt{t}} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right) + \frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4a_1^2t}\right)}{\sqrt{\pi}} \right), \quad (9)$$

$$T_1(x, t) = -\frac{J_0}{\kappa_1}x + C_1 - \frac{B_1}{\kappa_1} \left( x \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right) + 2a_1\sqrt{\frac{t}{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a_1^2t}\right) \right). \quad (10)$$

Воспользуемся далее граничным условием при  $x \rightarrow \infty$ ,  $T_1(\infty, t) \rightarrow T_0$ , где  $T_0$  – начальная температура изделия

$$T_1(\infty, t) = T_0 = -\frac{J_0}{\kappa_1}x + C_1 - \frac{B_1}{\kappa_1}x. \quad (11)$$

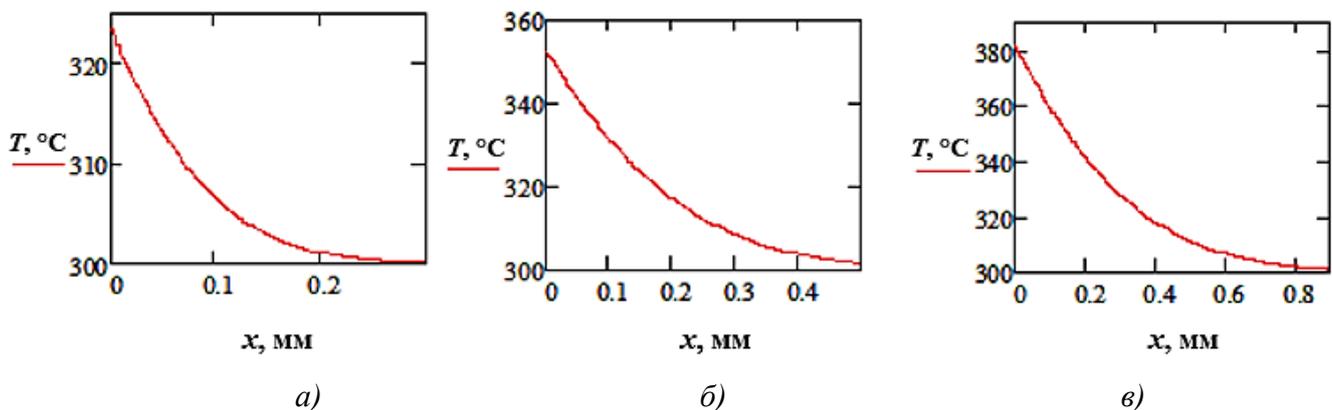


Рис. 1. Распределение температуры внутри изделия при  $J_0 = 10$  Вт/см<sup>2</sup> через  $t = 1$  мин (а);  $t = 5$  мин (б);  $t = 12$  мин (в) после начала обработки

Fig.1. Temperature distribution inside the product at  $J_0 = 10$  W/cm<sup>2</sup> within  $t = 1$  min (a);  $t = 5$  min (b);  $t = 12$  min (c) after the treatment start

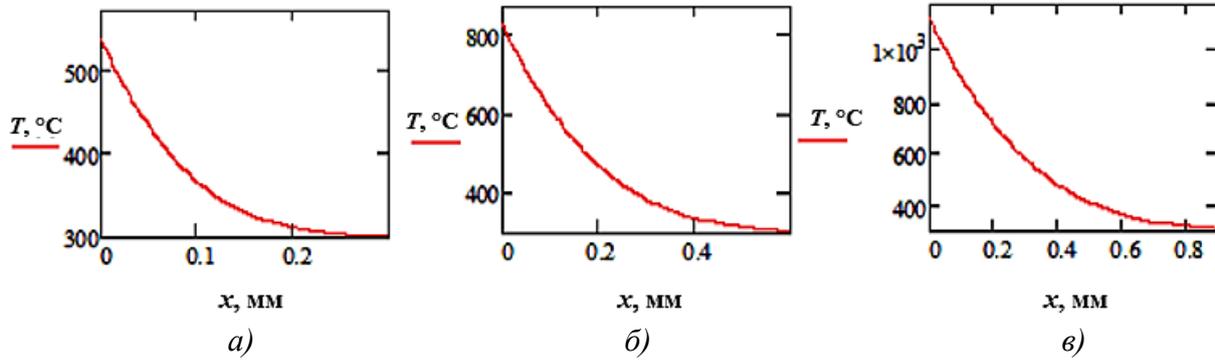


Рис. 2. Распределение температуры внутри изделия при  $J_0 = 100 \text{ Вт/см}^2$  через  $t = 1$  мин (а);  $t = 5$  мин (б);  $t = 12$  мин (в) после начала обработки

Fig.2. Temperature distribution inside the product at  $J_0 = 100 \text{ W/cm}^2$  after  $t = 1$  min (a);  $t = 5$  min (b);  $t = 12$  min (c) after the treatment start

Распределение температуры в поверхностном слое обрабатываемого изделия для различных значений теплового потока  $J_0$  на его поверхности представлено на рис. 1 и 2.

Отсюда находим  $C_1 = T_0$ ,  $B_1 = -J_0$ . Подставим найденные значения констант в (9)

$$T_1(x, t) = T_0 - \frac{J_0}{\kappa_1} x + \frac{J_0}{\kappa_1} \left( x \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2a_1\sqrt{t}} \right) + 2a_1\sqrt{\frac{t}{\pi}} \exp \left( -\frac{x^2}{4a_1^2 t} \right) \right). \quad (12)$$

Анализ полученных результатов показывает, что в течение характерного времени обработки ( $\sim 12$  мин [4, 7]) на участках, где значение теплового потока достигает  $100 \text{ Вт/см}^2$  (такими на поверхности являются участки, имеющие максимальную кривизну, например, кромки) изменение температуры может достигать значений, равных температуре плавления материала изделия. Это связано с тем, что на этих участках происходит сгущение линий напряженности СВЧ поля и электронная составляющая плазмы оказывает свое максимальное воздействие. Высокоэнергичные электроны, двигаясь против линий напряженности поля, попадают на эти участки поверхности и передают им свою энергию, обеспечивая их дополнительный разогрев. Выделяющаяся при этом теплота плавления поглощается при движении поверхности фазового перехода, обеспечивая большую глубину последующих структурных изменений поверхностного слоя изделия.

Нагрев и расплав поверхностного слоя обеспечивают попадание в него положительных и отрицательных ионов из плазмы, которые после нейтрализации становятся точечными дефектами (междоузельными атомами)

в его структуре. Распределение концентрации этих дефектов определяется уравнением диффузии

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial n}{\partial x} \right) = \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (13)$$

где

$$D = D_0 \exp \left( -\frac{E}{k_B T} \right) - \quad (14)$$

коэффициент диффузии, зависящий от температуры  $T$ ;  $E$  – энергия активации процесса;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $n = n(x, t)$  – концентрация точечных дефектов. Как видно из рис. 1, 2, температура  $T$ , а, следовательно, и  $D$  зависят от расстояния до поверхности изделия  $x$ , однако, в силу малости размеров обрабатываемой части изделия ( $\leq 0,02$  м) этой зависимостью в дальнейшем можно пренебречь и уравнение (13) перепишем в виде

$$D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = \frac{\partial n}{\partial t}. \quad (15)$$

Продифференцировав левую и правую часть (15) по  $x$ , перейдем от (15) к уравнению для потока точечных дефектов  $\vec{j} = -D\nabla n$

$$\frac{\partial j}{\partial t} = D \frac{\partial^2 j}{\partial x^2} \quad (16)$$

Уравнение (16) по внешнему виду совпадает с уравнением (3) для теплового потока  $J_1$ . При постоянном значении потока  $j_0$  ионов технологического газа на поверхности обрабатываемого изделия

$$j(x, t) = j_0 + \text{B erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right). \quad (17)$$

Распределение концентрации дефектов в приповерхностном слое изделия определяется формулой аналогичной (12):

$$n(x, T) = -\frac{j_0}{D} x + \frac{j_0}{D} \left( x \cdot \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) + 2\sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \right). \quad (18)$$

В качестве примеров рассмотрим диффузию азота в нержавеющей стали и углерода в железе. В первом случае энергия активации  $E = 1,126$  эВ,  $D_0 = 4,6 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с [9]. Зависимость  $n(x, T)$  при  $j_0 = 10^{16}$  1/м<sup>2</sup>·с, времени обработки  $t = 720$  с и различных температурах

обрабатываемого изделия представлена на рис. 3. Во втором случае  $E = 0,87$  эВ,  $D_0 = 2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с; зависимость для  $n(x, T)$  при  $j_0 = 10^{16}$  1/м<sup>2</sup>·с, времени обработки  $t = 720$  с и различных температурах обрабатываемого изделия представлена на рис. 4.

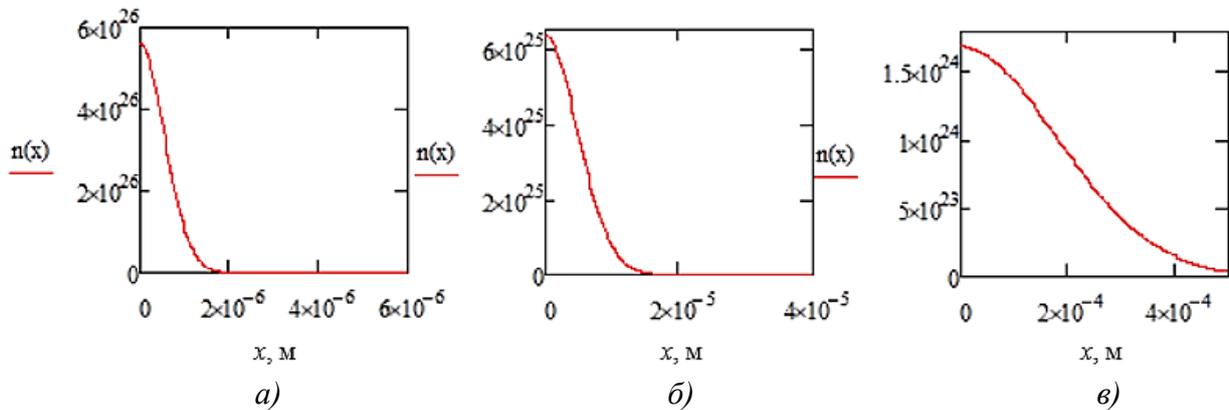


Рис. 3. Распределение концентрации  $n(x)$  (1/м<sup>3</sup>):  
а –  $T = 500$  К,  $D = 2,105 \cdot 10^{-16}$  м<sup>2</sup>/с; б –  $T = 600$  К,  $D = 1,634 \cdot 10^{-14}$  м<sup>2</sup>/с; в –  $T = 900$  К,  $D = 2,307 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с

Fig. 3. Distribution of  $n(x)$  concentration (1/m<sup>3</sup>):  
а –  $T = 500$  °К,  $D = 2,105 \cdot 10^{-16}$  м<sup>2</sup>/с; б –  $T = 600$  °К,  $D = 1,634 \cdot 10^{-14}$  м<sup>2</sup>/с; в –  $T = 900$  °К,  $D = 2,307 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с

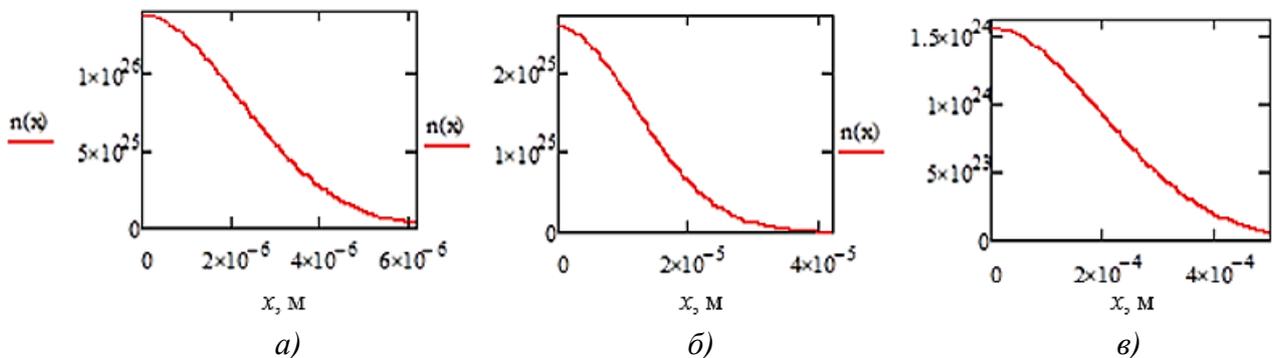
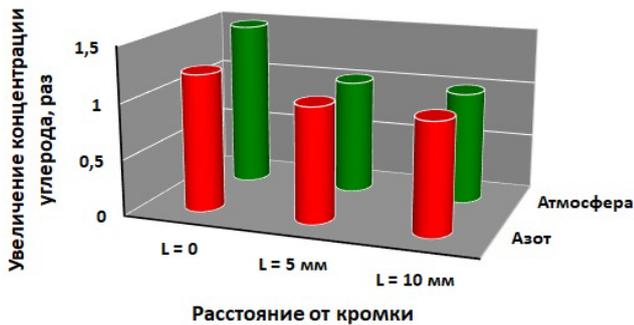


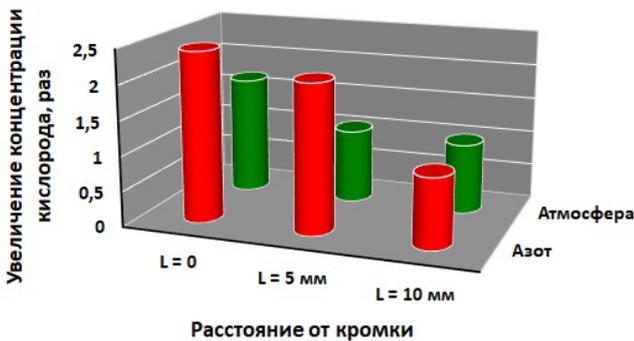
Рис. 4. Распределение концентрации  $n(x)$  (1/м<sup>3</sup>):  
а –  $T = 500$  К,  $D = 3,464 \cdot 10^{-15}$  м<sup>2</sup>/с; б –  $T = 600$  К,  $D = 9,996 \cdot 10^{-14}$  м<sup>2</sup>/с; в –  $T = 900$  К,  $D = 2,714 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с

Fig. 4. Distribution of  $n(x)$  concentration (1/m<sup>3</sup>):  
а –  $T = 500$  °К,  $D = 3,464 \cdot 10^{-15}$  м<sup>2</sup>/с; б –  $T = 600$  °К,  $D = 9,996 \cdot 10^{-14}$  м<sup>2</sup>/с; в –  $T = 900$  °К,  $D = 2,714 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с

Анализ полученных результатов показывает, что на участках, где температура является максимальной (рис. 3 и 4, в), толщина диффузионного слоя может достигать нескольких десятков микрометров. При этом концентрация внедренных в поверхностный слой дефектов медленно спадает с удалением от поверхности, что обеспечивает хорошую связь диффузионного слоя с материалом основы (матрицей) изделия.



а)



б)

Рис. 5. Результаты энерго-дисперсионного анализа содержания углерода (а) и кислорода (б) в поверхностном слое образцов из стали 40 на различных расстояниях  $L$  от торцов

Fig. 5. Results of energy dispersion analysis of carbon (a) and oxygen (b) contents in the surface layer of 40 steel samples at various distances  $L$  from the ends

Достоверность результатов исследования вопросов, связанных с нагревом поверхности изделия и диффузионного насыщения его поверхностного слоя заряженными частицами плазмы, подтверждена данными, полученными при энерго-дисперсионном анализе содержания в поверхностном слое углерода и кислорода у 6-ти образцов из стали 40 диаметром 10

мм и длиной 50 мм после их низкотемпературной плазменной обработки в среде азота и в атмосфере (рис. 5).

Электроны при своем движении сквозь кристаллическую решетку металла рассеиваются не только на ее узлах, совершающих тепловые колебания, но и на статических дефектах структуры, нарушающих периодичность потенциального поля кристалла. Рассеяние на статических дефектах структуры не зависит от температуры. Поэтому при приближении температуры к абсолютному нулю сопротивление реальных металлов стремится к некоторому постоянному предельному значению, которое называется остаточным сопротивлением. В соответствии с правилом Матиссена полное удельное сопротивление  $\rho$  представляет собой сумму:

$$\rho = \rho_T + \rho_{ост}, \quad (19)$$

где  $\rho_T$  – удельное электрическое сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на тепловых колебаниях узлов кристаллической решетки;  $\rho_{ост} = \rho_{точ. деф.} + \rho_{соб. деф.}$  – остаточное удельное сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на статических дефектах структуры: точечных ( $\rho_{точ. деф.}$ ) – нейтрализованных ионах, внедренных из плазмы в междоузлия кристаллической решетки поверхностного слоя изделия в результате процесса термодиффузии, и собственных ( $\rho_{соб. деф.}$ ) – вакансиях, атомах внедрения и замещения, изначально находившихся в кристаллической решетке металла, дислокациях и на границах зерен.

В наибольшей степени значение остаточного сопротивления определяется рассеянием электронов на точечных дефектах вследствие отклонения траектории и уменьшения (как следствие) скорости их движения в первоначальном направлении.

Для оценки величины остаточного сопротивления можно воспользоваться соотношением [10]:

$$\rho_{ост} \sim \frac{n_{пр} \sigma_t p F}{e^2 n_e}, \quad (20)$$

где  $n_e$  – концентрация электронов в металле;  $n_{пр}$  – концентрация точечных дефектов

(см. (18), рис. 3, 4);  $\sigma_t$  – транспортное сечение рассеяния;  $p_F = h(3\pi^2 n_e)^{1/3}$  – импульс Ферми;  $e$  – заряд электрона. Подставляя в (20) численные значения величин  $n_{пр} \approx 10^{26} \text{ м}^{-3}$ ,  $n_e \sim a^{-3} \approx 10^{28} \text{ м}^{-3}$ ,  $\sigma_t \sim a^2 \approx 4 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ ,  $v_F \sim 10^6 \text{ м/с}$ ,  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ ,  $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ , находим:

$$\rho_{ост} \sim \frac{10^{26} \cdot 4 \cdot 10^{-20} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^6}{1,6^2 \cdot 10^{-38} \cdot 10^{28}} \approx 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (21)$$

Так, удельное сопротивление железа при температуре  $T = 293 \text{ К}$ , обусловленное рассеянием электронов на тепловых колебаниях узлов кристаллической решетки,  $\rho_T \approx 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , из чего следует, что  $\rho_{ост}$  составляет  $\sim 14 \%$  от  $\rho_T$ . Это означает, что в зависимости от концентрации частиц, внедренных в поверхность изделия, вклад  $\rho_{ост}$  в повышение  $\rho$  (и, соответственно, снижение проводимости) может варьироваться и составлять от 1 до 20 %. С учетом же того, что воздействие низкотемпературной плазмы вызывает изменения не только структуры (искажает кристаллическую решетку), но и фазового состава (способствует образованию нанокластеров и аморфной связи, изменяющих период решетки) поверхностного слоя [6], приводящие к уменьшению длины свободного пробега электронов, общее увеличение его сопротивления может достигать 100 %.

### Выводы

Результаты выполненного исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Низкотемпературная плазма оказывает неравномерное воздействие на обрабатываемую поверхность металлического изделия, следствием чего становится ее неравномерный прогрев. Участки поверхности с максимальной кривизной (в частности, кромки), на которых происходит сгущение линий напряженности СВЧ поля и тепловой поток может достигать  $100 \text{ Вт/см}^2$ , за время обработки прогреваются до температуры  $\sim 1000 \text{ К}$ . Это приводит к тому, что температура доходит до значений температуры плавления материала.

2. В зависимости от знака результирующего потенциала изделия на поверхность из плазмы вследствие ионизации

технологического газа поступают положительные ионы азота и/или аргона, отрицательные ионы углерода, кислорода или фтора (появляющиеся вследствие захвата атомами электрона), ионизированные молекулы сложных углеводородов (попадающие в камеру при работе форвакуумного насоса в системе ее откачки), которые в дальнейшем диффундируют внутрь поверхности, насыщая ее, и создают точечные дефекты.

3. Насыщение поверхности дефектами способствует формированию слоя, толщина которого может достигать нескольких десятков микрометров, а концентрация внедренных дефектов медленно спадает по мере удаления от поверхности, что обеспечивает хорошую связь слоя с материалом основы (матрицей), увеличивает его удельное сопротивление и снижает проводимость.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gavrilo N.V., Mamaev A.S., Chukin A.V. Nitriding of Stainless Steel in Electron-Beam Plasma in the Pulsed and DC Generation Modes // Journal of Surface Investigation. 2017. Vol. 11, edition 6. Pp. 1167–1172.
2. Шабашов В.А., Гаврилов Н.В., Козлов К.А. Структура поверхностных слоев метастабильной аустенитной нержавеющей стали, азотированной в плазме электронного пучка // Физика металлов и металловедение. 2018. Т. 119, № 8. С. 802–810.
3. Burdovitsin V.A., Golosov D.A., Oks E.M. Electron beam nitriding of titanium in medium vacuum // Surface and Coatings Technology. 2019. Vol. 358. Pp. 726–731.
4. Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В. Основные результаты и направления дальнейших исследований по низкотемпературному плазменному формированию композитных структур на рабочих поверхностях геометрически сложных металлических изделий // Научно-технические технологии в машиностроении. 2022. №8 (134). С. 20–26.
5. Martynov V.V., Brzhozovskii B.M., Azikov N.S. Low-temperature plasma technique for skin structure consolidation // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Pp. 2387–2394.
6. Brzhozovskii B.M., Zinina E.P., Martynov V.V. Low-temperature plasma hardening impact on the properties of the cutting tool working part // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. 124. Pp. 183–195.
7. Brzhozovskii B.M., Brovkova M.B., Gestrin S.G. A study of anode area physical parameters of asymmetric combined gas discharge // Heliyon. 2021. № 5. e07006 p.

8. Черепнин Н.В. Основы очистки, обезгаживания и откочки в вакуумной технике. М.: Советское радио, 1967. 408 с.

9. Фёдоров А.А. Диффузия азота в нержавеющей стали // Технические науки в России и за рубежом: материалы III Междунар. науч. конф. М.: Буки-Веди, 2014. С. 85–88.

10. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика, т. X. Теоретическая физика М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 528 с.

## REFERENCES

1. Gavrilov N.V., Mamaev A.S., Chukin A.V. Nitriding of Stainless Steel in Electron-Beam Plasma in the Pulsed and DC Generation Modes // Journal of Surface Investigation. 2017. Vol. 11, edition 6. Pp. 1167–1172.

2. Shabashov V.A., Gavrilov N.V., Kozlov K.A. The structure of surface layers of metastable austenitic stainless steel nitrided in an electron beam plasma // Physics of Metals and Metal Science. 2018, vol. 119, no. 8, pp. 802–810

3. Burdovitsin V.A., Golosov D.A., Oks E.M. Electron beam nitriding of titanium in medium vacuum // Surface and Coatings Technology. 2019. Vol. 358. Pp. 726–731.

4. Brzhozovsky B.M., Zinina E.P., Martynov V.V. The main results and directions of further research on low-

temperature plasma formation of composite structures on the working surfaces of geometrically complex metal products // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2022, no. 8 (134), pp. 20–26.

5. Martynov V.V., Brzhozovskii B.M., Azikov N.S. Low-temperature plasma technique for skin structure consolidation // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. 117. Issue 7–8. Pp. 2387–2394.

6. Brzhozovskii B.M., Zinina E.P., Martynov V.V. Low-temperature plasma hardening impact on the properties of the cutting tool working part // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. 124. Pp. 183–195.

7. Brzhozovskii B.M., Brovkova M.B., Gestrin S.G. A study of anode area physical parameters of asymmetric combined gas discharge // Heliyon. 2021. 7. e07006 p.

8. Cherepnin N.V. Fundamentals of cleaning, decontamination and pumping in vacuum technology. Moscow: Sovetskoe radio, 1967. 408 p.

9. Fedorov A.A. Nitrogen diffusion in stainless steel // Technical sciences in Russia and abroad: proc. of the III-th International Scientific Conference. Moscow: Buki-Vedi, 2014, pp. 85–88.

10. Lifshits E.M., Pitaevsky L.P. Physical kinetics, T. H. Theoretical physics Moscow: Nauka, Main Editorial Office of the Physico-mathematical literature, 1979, 528 p.

**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 18.05.2025; одобрена после рецензирования 30.05.2025; принята к публикации 14.06.2025.

The article was submitted 18.05.2025; approved after reviewing 30.05.2025; assepted for publication 14.06.2025.