

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 621.78

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.011

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВХ9Л ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ НА ВОЗДУХЕ

Александр Яковлевич Зоркин¹, Игорь Владимирович Родионов²,
Надежда Александровна Вавилина³, Ирина Владимировна Перинская⁴,
Любовь Евгеньевна Куц⁵

^{1,2,3,4,5} Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., ул. Политехническая, 77, 410054, Саратов, Россия

¹ zorkin.alex@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8099-5267>

² iv.rodionov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0230-2128>

³emsvn@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7663-3870>

⁴ perinskayaiv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3825-2062>

⁵ kuts70@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5747-0498>

Аннотация. Выполнены экспериментальные исследования процесса лазерной термической обработки поверхности жаропрочного литейного сплава ВХ9Л в режиме импульсной генерации излучения. Путем лазерного импульсного сканирования получены оксидные покрытия толщиной 20-30 мкм с микротвердостью 8-11 ГПа. Методом растровой электронной микроскопии исследована структура сформированных термических оксидов в зависимости от мощности импульсного излучения. Построена кинетическая модель лазерного оксидирования металлов в составе сплава ВХ9Л на воздухе по механизму поверхностного зародышеобразования. При увеличении мощности лазера с 150 Вт до 200 Вт степень оксидирования металлической поверхности уменьшается с 26% до 12% вследствие повышения температуры металла и тенденции формирующегося оксида к разложению. Расчетные значения соответствуют полученным экспериментальным данным при размере критических зародышей 0,3 нм, теплоте десорбции атомарного кислорода 350000 Дж/моль и общем времени обработки 0,02 с. Установлено, что при лазерном оксидировании образцов из сплава ВХ9Л образованная оксидная фаза включает, в основном, оксиды хрома и титана. Содержание в составе модифицированной поверхности оксидов железа и никеля незначительна и соответствует «следовым» микроколичествам. Показано, что лазерное импульсное оксидирование может применяться как перспективный способ модификации при получении на изделиях механически прочных и коррозионноустойчивых металлооксидных пленок и покрытий.

Ключевые слова: сплав ВХ9Л, кинетическая модель лазерного оксидирования, механизм поверхностного зародышеобразования, оксидированная поверхность, режимы лазерного импульсного модификации.

Для цитирования: Зоркин А.Я., Родионов И.В., Вавилина Н.А., Перинская И.В., Куц Л.Е. Модификация поверхности жаропрочного сплава ВХ9Л лазерным импульсным оксидированием на воздухе // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 4. С. 487-496. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.011.

Original article

MODIFICATION SURFACE OF HEAT-RESISTANT VH9L CASTING ALLOY BY LASER PULSE OXIDATION IN AIR

Aleksandr Ya. Zorkin¹, Igor V. Rodionov², Nadezhda A. Vavilina³, Irina V. Perinskaya⁴, Lubov E. Kuts⁵

^{1,2,3,4,5} Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Politekhnicheskaya, 77, 410054, Saratov, Russia

¹ zorkin.alex@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8099-5267>

² iv.rodionov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0230-2128>

³emsvn@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7663-3870>

⁴ perinskayaiv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3825-2062>

⁵ kuts70@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5747-0498>

Abstract. Experimental studies of the process of laser thermal treatment of the surface of the heat-resistant casting alloy VH9L in the mode of pulsed radiation generation have been carried out. By means of laser pulse scanning oxide coatings with thickness of 20-30 μm with microhardness of 8-11 GPa are obtained. Using raster electron microscopy, the structure of the formed thermal oxides was studied depending on the power of pulsed radiation. A kinetic model of laser oxidation of metals in the composition of the VH9L alloy in air was built by the mechanism of surface nucleation. By increasing the laser power from 150 W to 200 W, the degree of oxidation of the metal surface decreases from 26% to 12% due to an increase in the metal temperature and the tendency of the formed oxide to decompose. The calculated values correspond to the obtained experimental data with a critical nucleus size of 0.3 nm, atomic oxygen desorption heat of 350,000 J/mol and a total processing time of 0.02 s. It was found that during laser oxidation of samples from alloy VH9L, the formed oxide phase mainly includes chromium and titanium oxides. The content of iron and nickel oxides in the modified surface composition is insignificant and corresponds to trace micro-quantities. It has been shown that laser pulse oxidation can be used as a promising modification method when producing mechanically strong and corrosion-resistant metal oxide films and coatings on articles.

Keywords: VH9L alloy, laser oxidation kinetic model, surface nucleation mechanism, oxidized surface, laser pulse modification modes.

For citation: Zorkin1 A.Ya., Rodionov I.V., Vavilina N.A., Perinskaya I.V. & Kuts L.E. (2025). Laser processing of multilayer coatings on metal. *Fundamental'nye problemy sovremennoego materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(4), 487-496. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.011.

Введение

Традиционным методам оксидирования металлов и сплавов посвящено большое количество научных работ. Они раскрывают технологические и физико-химические особенности таких процессов как оксидирование на воздухе, в атмосфере перегретого водяного пара, в смеси инертных и реакционных газов, в водных растворах различных кислот (анодирование, микродуговая обработка) с формированием оксидных пленок и покрытий самого разного функционального назначения [1-10].

С развитием лазерных технологий разрабатываются новые способы и раскрываются перспективные возможности применения лазерного излучения для обработки конструкционных материалов [11-19]. Сегодня активно проводятся исследования по упрочнению поверхностей металлов и сплавов с помощью воздействия лазера [20-22]. Известно, что при упрочнении

поверхностного слоя изделия применяют механически прочные и высокотвердые металлооксидные соединения, которые могут быть получены, в том числе путем лазерной обработки в условиях сканирования поверхности импульсными либо непрерывными световыми потоками.

Настоящие исследования посвящены процессу лазерного импульсного оксидирования конструкционного сплава марки ВХ9Л для обоснования принципиальной возможности получения упрочняющего оксидного слоя с определением особенностей механизма его формирования.

Целью данной работы является построение кинетической модели лазерного оксидирования металлов на воздухе по механизму поверхностного зародышеобразования при импульсном сканировании подложки из сплава ВХ9Л. Особенностью такой обработки является быстрое изменение температуры во времени и по про-

странным координатам. Известные модели зародышеобразования и роста зародышей металлооксидов не учитывают этой особенности. Модель включает такие параметры, как поверхностное натяжение оксида, теплоту адсорбции атомарного кислорода, активность кислорода, оксидов и металлов, высоту ступенек на поверхности. Эти параметры в большинстве случаев не определены и в модели они подбираются по экспериментальным данным по общей степени оксидирования, которая зависит от числа технологических проходов и скоростей нагрева и охлаждения подложки в процессе лазерной импульсной обработки.

Коэффициент отражения от гладких чистых металлических поверхностей близок к единице. Для уменьшения этого коэффициента на поверхность металла наносят различные поглощающие покрытия. Отражение и поглощение зависят от толщины, диэлектрических и проводящих свойств этих покрытий. Выбор оптимальных параметров материалов покрытий позволяет существенно снизить отражение и уменьшить мощность лазера, например, для плавления слоев металла, т.е. для наплавки различных функциональных материалов. В процессе наплавки свойства материалов покрытий существенно изменяются в зависимости от температуры. Поэтому под параметрами модели понимаются усредненные значения в диапазоне температур от нормальной до плавления. Коэффициент отражения изменяется в зависимости от толщины покрытия с периодом порядка длины волны. Поэтому необходимо также проводить усреднение по высоте микронеровностей получаемого профиля.

Методика исследования

Экспериментальные металлические пластины подвергались ультразвуковой очистке, промывке и сушке. Для модифицирующей лазерной обработки использовался твердотельный лазер на алюмоиттриевом гранате, активированном неодимом, с длиной волны излучения $\lambda=1,064$ мкм (частота $3 \cdot 10^{14}$ Гц, круговая частота $1,8 \cdot 10^{15}$ с⁻¹), диаметром фокусного пятна 0,5 мм в плоскости металлической подложки и длительностью импульса 2 мс в одноимпульсном режиме. Мощность импульсного излучения при обработке составляла значения 150 Вт, 170 Вт и 200 Вт.

Определение характера плавления металлической подложки в зависимости от мощности лазера осуществлялось методом оптической микроскопии с применением микроскопов

МБС-10М и Levenhuk D50L NG, а также методом электронной микроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа «Aspex EXplorer».

Металлографический анализ проводился по стандартной методике подготовки и исследования поперечных микрошлифов образцов с определением особенностей объемной структуры (формы и размера зерен, границ раздела фаз, геометрии замкнутых и открытых пор) и толщины поверхностного слоя. При измерениях глубины проплавления и определении толщины оксидных слоев дополнительно использовался цифровой толщиномер VOGEL. Для определения микротвердости оксидированной лазерным облучением поверхности применялся прибор ПМТ-3М с четырехгранным алмазным индентором. Измерения проводились при нагрузке на индентор, составляющей 50 гс.

Степень оксидирования определялась как отношение пика кислорода экспериментального образца к пику кислорода с окисленного эталона с толщиной оксидной пленки 1,5 мкм при рентгеноспектральном анализе в процессе электронной микроскопии.

Результаты и их анализ

В процессе облучения поверхности образцов лазерными импульсами формировалась оксидная пленка толщиной до 30 мкм при наибольшем задаваемом значении мощности лазера 200 Вт.

Степень окисления поверхности устанавливалась в ходе рентгеноспектрального анализа по изменению относительной интенсивности спектра содержания кислорода на исследуемых образцах (рис.1, 2, табл.).

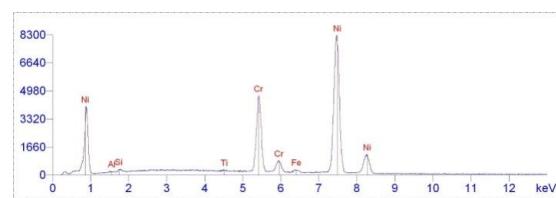


Рис. 1. Спектральный состав поверхности исходного образца

Fig. 1. Spectral composition of the initial sample surface

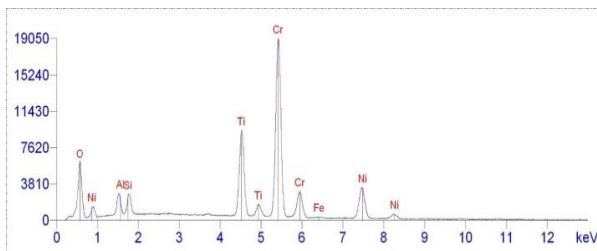


Рис. 2. Спектральный состав поверхности сплава ВХ9Л после лазерного импульсного оксидирования

Fig. 2. Spectral composition of VH9L alloy surface after laser pulse oxidation

В каждой точке плана обрабатывались 4 образца. Среднее квадратичное отклонение степени оксидирования составляло 15% во всех точках плана.

Табл. Экспериментальные значения степени окисления металлической подложки

Tabl. Experimental values oxidation state of metal substrate

Степень окисления	Мощность лазера, Вт	Общее время обработки, с
0,24	150	0,02
0,17	170	0,02
0,12	200	0,02

Морфология пленок отличалась в зависимости от мощности импульсного излучения, что отчетливо визуализировалось при сканирующей электронной микроскопии (рис. 3).

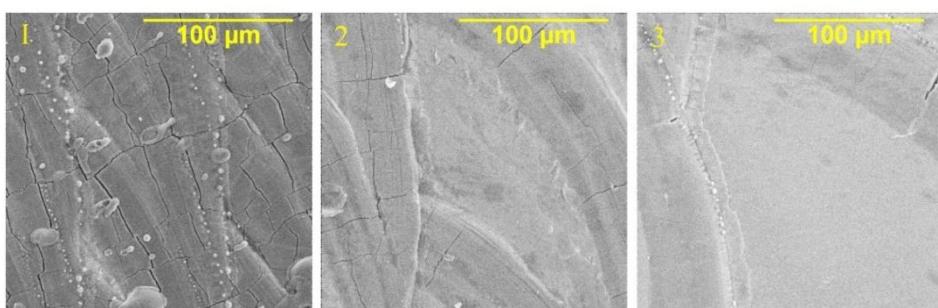


Рис. 3. Структура оксидных пленок при сканирующей электронной микроскопии подложек во вторичных электронах: 1 – образец №1, оксидированный при мощности лазера 150 Вт; 2 – образец №2, оксидированный при мощности лазера 170 Вт; 3 – образец №3, оксидированный при мощности лазера 200 Вт

Fig. 3. Structure oxide films during scanning electron microscopy of substrates in secondary electrons: 1 – sample No.1 oxidized at a 150 W laser power; 2 – sample No.2 oxidized at a 170 W laser power; 3 – sample No.3 oxidized at a 200 W laser power

При мощности 200 Вт структура оксидов характеризовалась более высокой однородностью и равномерностью профиля с минимальным количеством поверхностных дефектов.

Микротвердость оксидных слоев также отличалась в зависимости от режима облучения и достигала значений 8 ГПа при мощности 150 Вт, 8,8 ГПа при мощности 170 Вт и 11 ГПа при мощности 200 Вт, тогда как микротвердость контрольного образца составляла порядка 4,5 ГПа.

Кинетическая модель лазерного оксидирования

Скорость образования зародышей оксида на поверхности сплава равна [23]:

$$J_z = \frac{2 \cdot v_{am} \cdot n_z \cdot \Omega_a}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{-G_{zsv}}{h_z \cdot k_B \cdot T}}$$

где $v_a = \sqrt{\frac{8 \cdot k_B \cdot T}{\pi \cdot m_a}}$ – тепловая скорость молекул, м/с;

$n_{am} = \theta_a \cdot n_{sm}$ – поверхностная концентрация адсорбированных атомов кислорода, м⁻²;

$n_{sm} = 2 \cdot 10^{18}$ – число мест адсорбции на поверхности, м⁻²;

$\theta_a = \frac{b \cdot P_0}{1 + b \cdot P_0}$ – степень покрытия поверхности;

$b = \frac{h_n^2}{(k_B \cdot T)^2} \cdot \exp\left(\frac{q_d}{k_B \cdot T}\right)$ – адсорбционный коэффициент, Па⁻¹;

$q_d = \frac{Q_d}{N_A}$ - теплота десорбции атомарного кислорода, Дж/атом;

$P_0 = K_{eg} \cdot \sqrt{P_{O_2}}$ - парциальное давление атомарного кислорода, атм;

$P_0 = P_0 \cdot P_a$ - парциальное давление атомарного кислорода, Па;

$K_{eg} = \exp\left(\frac{-\Delta G_{eg}}{R \cdot T}\right)$ - константа равновесия реакции диссоциации молекулярного кислорода $O_2 = 2O$;

$\Delta G_{eg} = \Delta H_{eg} - T \cdot \Delta S_{eg}$ - стандартная энергия Гиббса реакции $O_2 = 2O$;

$\Delta G_{zsv} = \Delta G_{zsm} \cdot \frac{P_p}{M_m}$ - объемная энергия Гиббса образования оксида, Дж/м³;

$\Delta G_{zsm} = \Delta G_{os} - R \cdot T \cdot \ln\left(a_M^{X_{os,n,s}} \cdot P_{O_2}^{\frac{Y_{os,n,s}}{2}}\right)$ - молярная энергия Гиббса образования оксида $xM + y/2 O_2 = MxOy$, Дж/моль; a_m - активность металла; P_{O_2} - парциальное давление кислорода, атм;

$\Delta G_{os} = \Delta H_{os,n,s} - T \cdot \Delta S_{os}$ - стандартная энергия Гиббса образования оксида из простых веществ, Дж/моль;

$n_z = n_{am} \cdot \exp\left(\frac{-\Delta G_{zcv}}{k_B T}\right)$ - плотность критических зародышей на поверхности, м⁻²;

$\Delta G_{zcv} = -\frac{\pi \cdot h_z \cdot \gamma_{sl}^2}{\Delta G_{zsv}}$ - энергетический барьер для образования зародышей, Дж;

$\gamma_{sl} = \gamma_0 + (T - T_{\gamma_0}) \cdot \beta_{\gamma}$ - поверхностное натяжение оксида, Дж/м²;

$\Omega_a = (3 \cdot 10^{-10})^3$ - молекулярный объем, м³;

Линейная скорость роста зародышей по механизму полизародышевого двумерного зарождения равна:

$$R_z = \pi \cdot r_c^2 \cdot h_z$$

где

$r_c = \frac{-\gamma_{sl}}{\Delta G_{zsv}}$ - радиус критического зародыша, м;

h_z - высота зародыша, м;

h_n, k_B, N_A, R - постоянная Планка, постоянная Больцмана; число Авогадро, универсальная газовая постоянная;

ρ_p, M_m - плотность и молярная масса оксида.

Термодинамические данные брались из работы [24]. Активности металлов в сплаве принимались равными их мольным долям.

При действии точечного источника на поверхности полубесконечного тела распределение температуры имеет вид [25]:

$$T_r = T_0 + \frac{P_m}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_m \cdot r} \cdot (1 - \text{pnorm}(u_r(t, r), 0, 1)),$$

где $u_r = \frac{P_m}{2 \cdot \sqrt{\lambda_m \cdot t}}$;

$a_m = \frac{\lambda_m}{\rho_m \cdot c_m}$ - коэффициент температуропроводности, м²/с;

$\text{pnorm}(u_r(t, r), 0, 1)$ - функция распределения стандартной нормальной случайной величины; r - расстояние до точки наблюдения, м; t - время, с; T_0 - начальная температура, К;

$P_m = |S_m| \cdot A_L$ - эффективная мощность источника нагрева в металле, Вт [26, 27];

$S_m = \frac{c_0 \cdot \epsilon_0}{2} \cdot (|E_m|)^2 \cdot n_m$ - эффективная плотность мощности источника нагрева в металле, Вт;

$A_L = \frac{\pi \cdot d_L^2}{4}$ - площадь лазерного пятна, м²;

$E_m = t_{3m} \cdot E_{3n}$ - напряженность поля в металле, В/м;

$t_{3m} = \frac{2 \cdot k_{3z}}{k_{2z} + k_{mz}}$ - коэффициент прохождения волны в металле;

$E_{3n} = \sqrt{\frac{2 \cdot S_{3n}}{c_0 \cdot \epsilon_0 \cdot n_{3n}}}$ - напряженность поля в падающей волне, В/м.

$S_{3n} = \frac{P_L}{A_L}$ - плотность мощности в лазерном пятне, Вт/м²;

c_0, ϵ_0 - скорость света в вакууме и диэлектрическая постоянная;

n_m, n_{3n} - показатели преломления в металле и в воздухе;

k_{mz}, k_{3z} - волновые числа в металле и воздухе;

P_L - мощность лазера, Вт.

Количество оксида, образовавшегося за время t в кольце с радиусами r_o и r_n равно (в кг):

$$m_{oxt} = \int_{r_o}^{r_n} \int_0^t R_z \cdot \rho_p \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \, dt \, dr.$$

На рис. 4, 5 показаны зависимости массовой доли оксидов, образуемых в расплаве, от времени при лазерном оксидировании подложки с разной мощностью излучения.

Модельные данные учитывают оксидирование поверхности в условиях нагрева металлической подложки. С учетом окисления при охлаждении, а также количества проходов, содержание оксидов увеличится в 3-4 раза. Расчетные значения соответствуют экспериментальным при времени обработки 0,02 с, высоте критических зародышей 0,3 нм и теплоте десорбции атомарного кислорода 350000 Дж/моль.

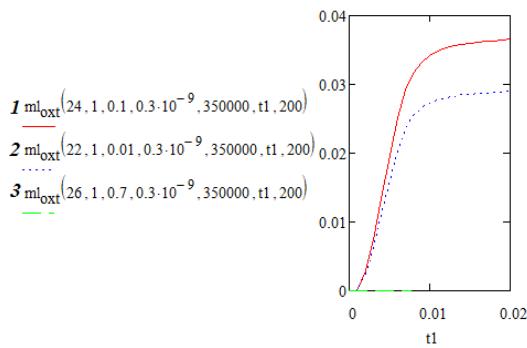


Рис. 4. Зависимость массовой доли оксидов титана, хрома и железа в расплаве от времени (с) при лазерном оксидировании сплава ВХ9Л при мощности лазера 200 Вт: 1 – TiO; 2 – Cr₂O₃; 3 – FeO

Fig. 4. Dependence mass fraction of titanium, chromium and iron oxides in melt on time (s) at laser oxidation of VH9L alloy at laser power 200 W: 1 – TiO; 2 – Cr₂O₃; 3 – FeO

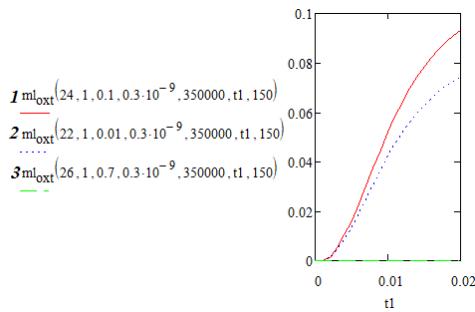


Рис. 5. Зависимость массовой доли оксидов титана, хрома и железа в расплаве от времени (с) при лазерном оксидировании сплава при мощности лазера 150 Вт: 1 – TiO; 2 – Cr₂O₃; 3 – FeO

Fig. 5. Dependence mass fraction of titanium, chromium and iron oxides in melt on time (s) at laser oxidation of alloy at laser power 150 W: 1 – TiO; 2 – Cr₂O₃; 3 – FeO

С увеличением мощности лазера степень оксидирования уменьшается. Это связано с тем, что при температуре выше 1800 К скорость образования зародышей оксида существенно уменьшается (рис. 6) вследствие уменьшения степени покрытия поверхности кислородом, а температура обработки снижается при уменьшении мощности лазера (рис. 7). Оксидная фаза включает оксиды хрома и титана. Содержание оксидов железа и никеля является незначительным.

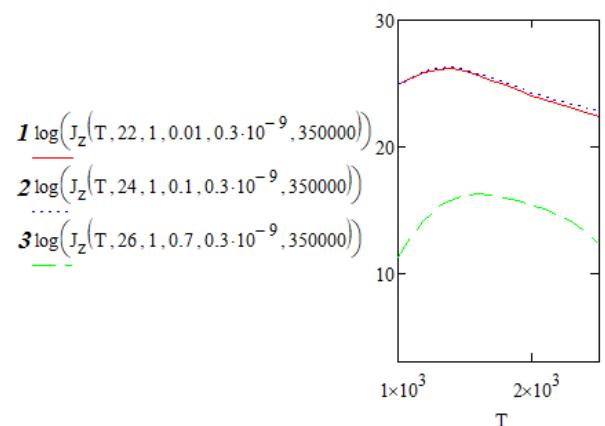


Рис. 6. Зависимость скорости образования зародышей оксидов (м⁻²) от температуры (К): 1 – TiO; 2 – Cr₂O₃; 3 – FeO

Fig. 6. Oxide nucleation rate (m⁻²) versus temperature (K): 1 – TiO; 2 – Cr₂O₃; 3 – FeO

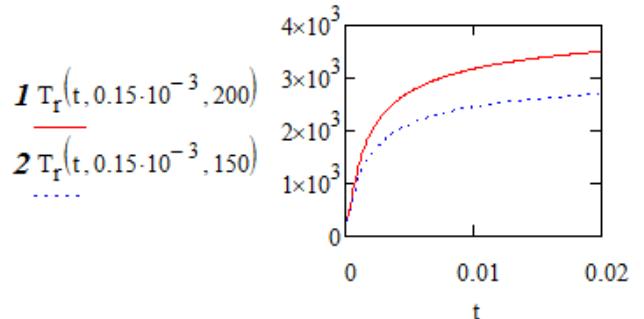


Рис. 7. Зависимость температуры (К) на расстоянии 0,15 мм от центра пятна фокусировки от времени (с) при разной мощности лазера: 1 – 200 Вт; 2 – 150 Вт

Fig. 7. Dependence temperature (K) at a distance 0.15 mm from the center of focusing spot on time (s) at different laser power: 1 – 200 W; 2 – 150 W

Оксид разлагается, если фактическое давление кислорода меньше равновесного давления при данной температуре, определяемого по выражению (рис. 8):

$$p_{O2p}(n, s, a_M, T) := \left(\frac{a_{MO}}{a_M \cdot K_{OS}(T, n, s)} \right)^{\frac{2}{y_{OS}_{n,s}}}$$

Так, для оксида титана TiO и оксида хрома Cr₂O₃ равновесное давление превышает факти-

ческое давление кислорода (0,2 атм) при температуре выше 2400 К, т.е. температура разложения этих оксидов при обработке на воздухе равна 2400 К. Температура разложения оксидов железа составляет 1300 К.

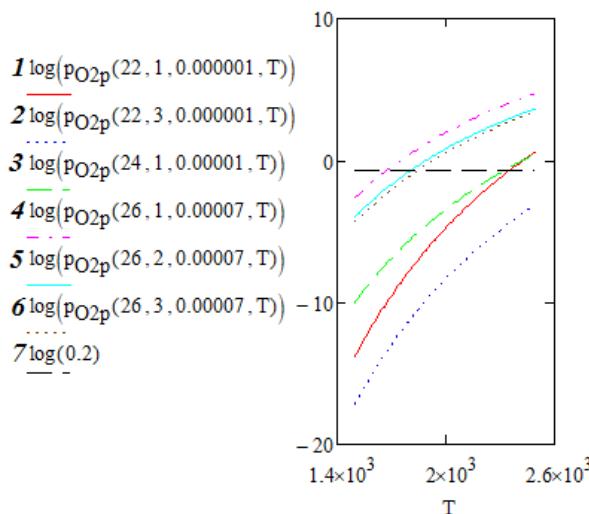


Рис. 8. Зависимость равновесного давления кислорода (атм) над оксидами в зависимости от температуры (К): 1 – TiO ; 2 – T_2O_3 ; 3 – Cr_2O_3 ; 4 – FeO ; 5 – Fe_2O_3 ; 6 – Fe_3O_4 ; 7 – фактическое давление кислорода 0,2 атм

Fig. 8. Equilibrium pressure (atm) over oxides versus temperature (K):
1 – TiO ; 2 – T_2O_3 ; 3 – Cr_2O_3 ; 4 – FeO ; 5 – Fe_2O_3 ;
6 – Fe_3O_4 ; 7 – actual oxygen pressure 0.2 atm

Толщина материала не влияет на процесс, если эта толщина больше глубины проплавления. Неоднородность поверхности (шероховатость) не влияет на процесс, если высота неровностей меньше длины волны излучения. Угол падения волны и шероховатость могут быть учтены при корректировке коэффициента прохождения волны в сплав.

Модель применима для жаропрочных сплавов разного химического состава. В процессе моделирования достаточно указать состав конкретного сплава и стандартные энергии Гиббса образования оксидов из простых веществ. Поверхностные напряжения, размер критических зародышей оксида, высота ступени роста примерно одинаковы для всех прочных оксидов. Модель позволяет также определять степень оксидирования в зависимости от парциального давления кислорода.

Температурная неравномерность учитывается при одноимпульсной обработке. При

многоимпульсной обработке модель справедлива при скорости обработки менее 5 мм/с и скважности импульсов более 10, когда после каждого импульса сплав успевает охладиться.

Физические особенности модифицируемой поверхности не влияют на процесс, если толщина измененного поверхностного слоя на порядок меньше глубины проплавления.

Проведенные экспериментальные исследования и анализ рассмотренной кинетической модели показывают, что процесс получения функциональных оксидных пленок и покрытий с помощью облучения металлической подложки импульсным лазером является самодостаточным и может применяться в технологиях оксидирования конструкционных металлических материалов наравне с распространенными методами газотермического и электрохимического оксидирования.

Заключение

В работе построена одноимпульсная модель лазерного оксидирования жаропрочного сплава ВХ9Л. Модель позволяет определить зависимость степени оксидирования от времени взаимодействия лазерного пучка с поверхностью по механизму двумерного зародышеобразования с учетом распределения температуры в зоне взаимодействия. Параметрами модели являются мощность и диаметр лазерного пучка, парциальное давление кислорода в газовой фазе, комплексный показатель преломления луча в металле и в среде, поверхностное напряжение оксидных включений, активности металлов в сплаве. По экспериментальным данным о степени окисления в зависимости от мощности лазерного пучка модель позволяет определить такие параметры процесса, как теплоту десорбции атомарного кислорода с поверхности, размер критических зародышей, поверхностное напряжение и др. Объяснен эффект снижения степени оксидирования при повышении мощности излучения. Так, при увеличении мощности лазера с 150 Вт до 200 Вт степень оксидирования уменьшается с 26 до 12% вследствие тенденции оксидов к разложению при повышении температуры. Расчетные значения соответствуют экспериментальным при размере критических зародышей 0,3 нм, теплоте десорбции атомарного кислорода 350000 Дж/моль и общем времени обработки 0,02 с. Оксидные фазы сплава ВХ9Л включают окси-

ды хрома и титана вследствие их низкой (отрицательной) энергии образования.

Уточнение модели связано с учетом распределения температуры при многоточечной лазерно-импульсной обработке.

Список литературы

- Гнеденков, С. В. Композиционные многофункциональные покрытия на металлах и сплавах, формируемые плазменным электролитическим оксидированием / С. В. Гнеденков, С. Л. Синебрюхов, В. И. Сергиенко. – Владивосток: «Издательство Дальнаука», 2013. – 460 с.
- Rodionov, I. V. Microstructure of biocompatible steam-heat oxide coatings on titanium implants / I. V. Rodionov // Metal Science and Heat Treatment. – 2014. – Vol. 55, No. 11-12. – P. 599-602.
- Патент РФ №2722754. Устройство для формирования электрохимическим оксидированием покрытий на вентильных металлах или сплавах: заявл. 23.04.2019: опубл. 03.06.2020 / А. А. Никифоров, М. Ю. Куприков.
- Hamdy, A. S. Electrochemical impedance studies of sol-gel based ceramic coatings systems in 3.5% NaCl solution / A. S. Hamdy, D. P. Butt, A. A. Ismail // Electrochimica Acta. – 2007. – Vol. 52, No. 9. – P. 3310-3316.
- Родионов, И. В. Термическое оксидирование как технология упрочняющей обработки поверхности стали 12Х18Н9Т / И. В. Родионов, А. Н. Ромахин // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2013. – №6 (24). – С. 37-43.
- Родионов, И. В. Металлооксидные имплантационные системы в современной медицинской технике / И. В. Родионов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2013. – Т. 10, № 1. – С. 98-104.
- Родионов, И. В. Применение технологии анодного оксидирования при создании биосовместимых покрытий на дентальных имплантатах / И. В. Родионов, Ю. В. Серянов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 2, № 1(12). – С. 77-87.
- Azumi, K. Changes in the properties of anodic oxide films formed on titanium during long-term immersion in deaerated neutral solutions / K. Azumi, N. Yasui, M. Seo // Corrosion Science. – 2000. – Vol. 42, No. 5. – P. 885-896.
- The response of anodized materials sealed in acetate-containing baths to atmospheric exposure / V. Lopez, J. A. Gonzalez, A. Bautista [et al.] // Corrosion Science. – 1998. – Vol. 40, No. 4-5. – P. 693-704.
- Родионов, И. В. Термооксидные покрытия остеофиксаторов из стали 12Х18Н9Т, полученные воздушно-термическим оксидированием / И. В. Родионов // Инженерная физика. – 2008. – № 6. – С. 56-64.
- Казанский, Н. Л. Формирование требуемого энергетического воздействия при лазерной обработке материалов с применением фокусаторов излучения / Н. Л. Казанский, С. П. Мурzin, С. Ю. Клочков // Компьютерная оптика. – 2005. – № 28. – С. 89-93.
- Мурzin, С. П. Тепловое воздействие на материалы комбинированных энергетических потоков при плазменно-лазерном нанесении покрытий / С. П. Мурzin // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2002. – Т. 4, № 1. – С. 81-86.
- Импульсная лазерная обработка поверхности композитного материала в процессах формирования широкополосных антиотражающих покрытий / И. Д. Парфимович, Ф. Ф. Комаров, О. В. Мильчанин [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 1. – С. 21-27.
- Prokhorenko, V. A. Adaptive control system for technological operation of laser processing of brittle non-metallic materials / V. A. Prokhorenko, Yu. V. Nikitjuk, V. S. Smorodin // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2024. – No. 4(61). – P. 78-81.
- Лискович, А. А. Лазерная обработка материалов, нагретых до высокой температуры / А. А. Лискович // Актуальные проблемы науки и техники: Материалы II Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию ИМИ - ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», Сарапул, 19-21 мая 2022 года. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2022. – С. 157-161.
- Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика / В. П. Вейко, М. Н. Либенсон, Г. Г. Червяков, Е. Б. Яковлев. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 311 с.
- Лазерная обработка материалов с изменением химического состава поверхностного слоя / В. С. Голубев, И. И. Вегера, О. Чернавицкая, В. В. Чаевский // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 7. – С. 34-42.
- Зоркин, А. Я. Тепловая модель и особенности формирования морфологии покрытия оксида алюминия при импульсной лазерной наплавке / А. Я. Зоркин, И. В. Родионов, П. Н. Устинов // Вопросы электротехнологии. – 2024. – № 2(43). – С. 14-23.
- Получение ультрамелкодисперсных структур на титановом сплаве ВТ6 лазерным диспергированием тонких оксидных пленок / В. И. Проскуряков, И. В. Родионов, Е. В. Ситников, С. А. Бородина // Фундаментальные про-

блемы современного материаловедения. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 14-20.

20. Huseynov, A. Selection of grinding wheels for the machining of precision parts with increased surface hardness by laser / A. Huseynov, I. Nazarov, F. Huseynli, M. Safarov // Universum: technical sciences. – 2025. – №. 3-6 (132). – Р. 48-53.

21. Усольцева, А. В. Исследование режимов лазерной обработки неметаллических материалов / А. В. Усольцева // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 51-59.

22. Формирование упрочненного поверхностного слоя при комплексном лазерном воздействии на кромку реза деталей из конструкционных углеродистых сталей / И. В. Минаев, С. Н. Кутепов, Д. С. Клементьев [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2023. – Т. 13, № 2. – С. 55-69.

23. Сангал, К. Травление кристаллов. - М.: Изд-во «Мир», 1990. – 492 с.

24. Смитлз К. Дж. Металлы. М.: Металлургия, 1980. – 447 с.

25. Теория сварочных процессов / Под ред. В.В. Фролова. - М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.

26. Гроссе П. Свободные электроны в твердых телах. М.: Мир, 1982. – 270 с.

27. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. - 4-е изд. М.: Физматлит, 2001. – 656 с.

Информация об авторах

А. Я. Зоркин – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

И. В. Родионов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Н. А. Вавилина – старший преподаватель кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

И. В. Перинская – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Л. Е. Куц – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

References

1. Gnedenkov, S. V. (2013). Composite multi-functional coatings on metals and alloys formed by plasma electrolytic oxidation. *Dalnauka Publishing*, P.460 (In Russ.).
2. Rodionov, I. V. (2014). Microstructure of biocompatible steam-heat oxide coatings on titanium implants. *Metal Science and Heat Treatment*, 55 (11-12), 599-602.
3. Russian Patent No. 2722754. Device for forming coatings on valve metals or alloys by electrochemical oxidation: filed on 23.04.2019; published on 03.06.2020 / A. A. Nikiforov, M. Yu. Kuprikov.
4. Hamdy, A. S. (2007). Electrochemical impedance studies of sol-gel based ceramic coatings systems in 3.5% NaCl solution. *Electrochimica Acta*, 52(9), 3310-3316.
5. Rodionov, I. V. (2013). Thermal oxidation as a technology for surface hardening of 12X18H9T steel. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 6 (24), 37-43. (In Russ.).
6. Rodionov, I. V. (2013). Metal-oxide implantation systems in modern medical engineering. *Fundamental'nye problemy sovremennoego materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 10(1), 98-104. (In Russ.).
7. Rodionov, I. V. (2006). Application of anodic oxidation technology in the creation of biocompatible coatings on dental implants. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2, (1(12)), 77-87. (In Russ.).
8. Azumi, K. (2000). Changes in the properties of anodic oxide films formed on titanium during long-term immersion in deaerated neutral solutions. *Corrosion Science*, 42(5), 885-896.
9. Lopez, V. (1998). The response of anodized materials sealed in acetate-containing baths to atmospheric exposure. *Corrosion Science*, 40(4-5), 693-704.
10. Rodionov, I.V. (2008). Thermo-oxide coatings of osteosurgical fixators made of 12X18H9T steel obtained by air-thermal oxidation. *Inzheineriya fizika*, 6, 56-64. (In Russ.).
11. Kazansky, N. L. (2005). Formation of the required energy effect in laser processing of materials using radiation focusing devices. *Komp'yuternaya optika*, 28, 89-93. (In Russ.).
12. Murzin, S. P. (2002). Thermal effect on materials of combined energy flows during plasma-laser coating deposition. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 4(1), 81-86. (In Russ.).
13. Parfimovich, I. D., Komarov, F. F., Milchanin, O. V., et al. (2020). Pulsed laser treatment of the surface of composite material in the processes of forming broadband antireflection coatings. *Doklady Nacional'noj akademii nauk Belarusi*,

- 64(1), 21-27. (In Russ.).
14. Prokhorenko, V. A. (2024). Adaptive control system for technological operation of laser processing of brittle non-metallic materials. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*, 4(61), 78-81.
15. Liskovich, A. A. (2022). Laser processing of materials heated to high temperature. *Aktual'nye problemy nauki i tekhniki: Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, posvyashchennoj 70-letiyu IMI - IzhGTU i 60-letiyu SPI (filial) FGBOU VO «IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova»*, 157-161. (In Russ.).
16. Interaction of Laser Radiation with Matter. Power Optics / V. P. Veiko, M. N. Libenson, G. G. Chervyakov, E. B. Yakovlev (2008). Moskva: FIZMATLIT, P.311. (In Russ.).
17. Golubev, V. S., Vegera, I. I., Chernashus, O., Chaevsky, V. V. (2019). Laser processing of materials with changes in the chemical composition of the surface layer. *Vestnik Baranovichskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 7, 34-42. (In Russ.).
18. Zorkin, A. Ya. (2024). Thermal Model and Features of Oxide Aluminum Coating Morphology Formation during Pulsed Laser Cladding. *Voprosy elektrotehnologii*, 2(43), 14-23. (In Russ.).
19. Proskuryakov, V. I., Rodionov, I. V., Sitenikov, E. V., Borodina, S. A. (2020). Obtaining ultrafine-dispersed structures on VT6 titanium alloy by laser dispersion of thin oxide films. *Fundamental'nye problemy sovremennoj materialovedeniya* (Basic Problems of Material Science (BPMS)), 17(1), 14-20. (In Russ.).
20. Huseynov, A. (2025). Selection of grinding wheels for the machining of precision parts with increased surface hardness by laser. *Universum: technical sciences*, 3-6 (132), 48-53.
21. Usoltseva, A.V. (2023). Study of laser processing modes of non-metallic materials. *Bulletin IzhSTU named after M.T. Kalashnikov*, 26(2), 51-59. (In Russ.).
22. Minaev, I. V., Kutepov, S. N., Klementyev, D. S. Formation of a strengthened surface layer with a complex laser effect on the cutting edge of parts made of structural carbon steels. *News of Southwestern State University. Series: Machinery and Technology*, 13(2), 55-69. (In Russ.).
23. Sangwal, K. (1990). *Crystal Etching*. M.: Izd-vo «Mir», P. 492 c. (In Russ.).
24. Smithlz, K. J. (1980). *Metals*. M.: Metalurgiya, P. 447. (In Russ.).
25. Theory of Welding Processes (1988) / Edited by V.V. Frolov. M.: Vysshaya shkola, P. 559. (In Russ.).
26. Grosse, P. (1982). *Free Electrons in Solids*. M.: Mir, P. 270. (In Russ.).
27. Landau L.D., Lifshitz E.M. (2001). *Electrodynamics of Continuous Media*. 4-e izd. M.: Fizmatlit, P. 656 c. (In Russ.).

Information about the authors

A. Ya. Zorkin - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

I. V. Rodionov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

N. A. Vavilina - Senior Lecturer at the Department Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

I. V. Perinskaya - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department 'Welding and Metallurgy' at Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

L. E. Kuts - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department 'Welding and Metallurgy' at Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 06.10.2025; одобрена после рецензирования 24.11.2025; принятая к публикации 01.12.2025.

The article was received by the editorial board on 06 Oct. 2025; approved after reviewing 24 Nov. 2025; accepted for publication 01 Dec. 2025.