

Научная статья

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

УДК 621.78

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.02.013

## МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ПИКОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Александр Яковлевич Зоркин<sup>1</sup>, Игорь Владимирович Родионов<sup>2</sup>,  
Надежда Александровна Вавилина<sup>3</sup>, Ирина Владимировна Перинская<sup>4</sup>,  
Любовь Евгеньевна Куц<sup>5</sup>, Павел Николаевич Устинов<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., ул. Политехническая, 77, 410054, Саратов, Россия

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

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

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

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

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

<sup>6</sup> azenrod@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2976-4963>

**Аннотация.** Построена модель лазерной обработки металлов пикосекундными импульсами позволяющая определить зависимость температуры и давления в облучаемом слое от энергии импульса, частоты света, диаметра луча, модуля всестороннего сжатия и теплоемкости металла. Модель основана на положении о том, что обработанный слой находится в изохорно-адиабатном состоянии, то есть за время действия работы короткого импульса длительностью порядка  $10^{-12}$  секунды успевают развиваться только процессы нагрева и теплового расширения, компенсируемого упругой деформацией сжатия с сохранением объема. Процессы теплопроводности, испарения развиваются за более длительное время, порядка  $10^{-10}$  секунды. Модель согласуется с известными экспериментальными результатами по производительности обработки порядка  $1 \text{ мм}^3/\text{с}$  при энергии импульса порядка  $0,4 \text{ мкДж}$ , длительности  $10^{-12}$  секунды и частоты следования импульсов  $50 \text{ МГц}$ .

**Ключевые слова:** лазерная обработка, пикосекундные импульсы, металлы, температура, давление, абляция, моделирование лазерного воздействия.

**Для цитирования:** Зоркин А.Я., Родионов И.В., Вавилина Н.А., Перинская И.В., Куц Л.Е., Устинов П.Н. Модель лазерной обработки металлов пикосекундными импульсами // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 2. С. 263-272. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.02.013.

Original article

## LASER PROCESSING OF MULTILAYER COATINGS ON METAL

Aleksandr Ya. Zorkin<sup>1</sup>, Igor V. Rodionov<sup>2</sup>, Nadezhda A. Vavilina<sup>3</sup>, Irina V. Perinskaya<sup>4</sup>,  
Lubov E. Kuts<sup>5</sup>, Pavel N.Ustinov<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Politekhnikeskaya, 77, 410054, Saratov, Russia

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

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

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

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

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

<sup>6</sup> azenrod@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2976-4963>

**Abstract.** A model of laser processing of metals with picosecond pulses is built, which allows determining the dependence of temperature and pressure in the irradiated layer on the pulse energy, light frequency, beam diameter, module of all-round compression and heat capacity of the metal. The model is based on the position that the over-

worked layer is in an isochoric-adiabatic state, that is, during the operation of a short pulse with a duration of about 10-12 seconds, only heating and thermal expansion processes can develop, compensated by elastic compression deformation while maintaining volume. The processes of thermal conductivity, evaporation develop in a longer time, about 10-10 seconds. The model is consistent with the known experimental results for processing efficiency of the order of 1 mm<sup>3</sup>/s with pulse energy of the order of 0.4 μJ, duration of 10-12 seconds and pulse repetition rate of 50 MHz.

**Keywords:** laser processing, picosecond pulses, metals, temperature, pressure, ablation, laser simulation.

**For citation:** Zorkin A.Ya., Rodionov I.V., Vavilina N.A., Perinskaya I.V., Kuts L.E., Ustinov P.N. (2026). Laser processing of multilayer coatings on metal. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(2), 263-272. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.02.013.

## Введение

Лазерная обработка ультракороткими импульсами используется при обработке отверстий микронных размеров, снятия тонких слоев с поверхности, получении нанопорошков, создания наноструктур, нанопинцетов-скальпелей [1]. Известные модели лазерной обработки учитывают различные физико-химические процессы, протекающие при взаимодействии излучения с веществом. Качество и производительность обработки зависит от многих параметров: длительности и энергии импульсов, частоты света, диаметра лазерного пятна, свойств обрабатываемых материалов. Существенным является влияние длительности импульсов.

При обработке ультракороткими импульсами процесс разрушения материала связан с абляцией микро- и наночастиц под действием высокого давления в зоне воздействия излучения, что позволяет получать наноструктуры [2-6].

В работе [2] рассмотрена модель лазерной обработки металлов пикосекундными импульсами с низкой плотностью энергии (50 мДж/см<sup>2</sup>). При длительности импульсов порядка 10<sup>-12</sup>с отмечается двухтемпературный механизм нагрева. Температура электронов значительно выше температуры кристаллической решетки, т.е. релаксация энергии электронов незначительна. При длительности импульсов более 10<sup>-11</sup>с решетка успевает нагреться.

В работе [3] рассмотрены процессы сверхбыстрого разлета плазмы, откольной абляции расплава, взрывного гидродинамического разлета сверхкритического флюида, релаксационные процессы. В фемтосекундном диапазоне происходит нагрев электронного газа, в пикосекундном – релаксация электронов и нагрев кристаллической решетки, абляционные процессы, в наносекундном – твердение расплава, охлаждение за счет теплопроводности и в ма-

лой степени за счет испарения. Скорость отлета жидкой пленки вблизи порога фазового взрыва составляет несколько километров в секунду и происходит в виде жидко-капельной смеси. Время отрыва флюида равно отношению его толщины к скорости звука в нем (акустическая разгрузка). Механизм абляции связывается с образованием тонкой прослойки флюидной фазы высокого давления между жидкой фазой и дном лунки. Вопрос о состоянии вещества в лунке является дискуссионным. При плотности энергии 1-10 Дж/см<sup>2</sup> фазовый взрыв вызывает быстрый гидродинамический разлет флюида с образованием ударных волн с давлениями 10<sup>2</sup> - 10<sup>3</sup> ГПа. В работе [4] показано, что при многоимпульсной обработке существенно влияет пробой воздуха в пятне при плотностях энергии 1-10 Дж/см<sup>2</sup> и длительности импульсов до 900 фс. Скорость обработки слабо зависит от длительности импульсов и частоты света. В работе [5] показано, что при облучении тандемным импульсом интенсивностью 10<sup>15</sup> Вт/см<sup>2</sup> с периодом следования менее 10 пс скорость обработки не отличается от одноимпульсного воздействия, т.е. второй импульс экранируется плазмой. Это приводит к уширению канала за счет плазменного травления. Таким образом, частота следования импульсов ограничена значением 100 МГц. В работе [6] определен порог абляции порядка 0,1 Дж/см<sup>2</sup>.

При миллисекундных импульсах развиваются процессы плавления, испарения, что позволяет проводить сварку, наплавку и закалку из жидкого состояния [7-15]. При этом расплав выдавливается из лунки давлением паров. Качество обработки и точность являются низкими из-за интенсивного образования брызг и высокой шероховатости поверхности.

Известные модели не позволяют определить зависимость температуры нагрева и давления от совокупности параметров: энергии и длительности импульсов, частоты света, диа-

метра лазерного пятна и тепловых свойств металла. Целью данной работы является попытка получения такой зависимости. Модель должна согласовываться с известными экспериментальными данными по параметрам абляции и производительности процесса обработки (порядка нескольких мм<sup>3</sup> в минуту) [1].

**Модель лазерной обработки металлов ультракороткими импульсами**

При воздействии импульса нагревается слой толщиной порядка глубины проникновения волны в металл. В паузе между импульсами этот слой удаляется с образованием лунки. Прошедшая энергия луча расходуется в основном на нагрев слоя и упругую энергию в адиабатическом изохорном режиме, т.к. слой не успевает расшириться за время порядка 10<sup>-12</sup> с. При этом термическая деформация компенсируется деформацией объемного сжатия. При удалении слоя его упругая энергия переходит в кинетическую энергию струи по модели сжатой пружины. Твердая и жидкая фазы удаляются в виде диспергированных микрочастиц за время порядка 10<sup>-10</sup> с. Время испарения значительно больше. Если температура слоя превышает критическую порядка 9000 К [16,17], то слой удаляется в виде газа (флюида).

Давление объемного сжатия слоя равно:

$$\Delta P_\sigma = B \cdot (\Delta V_c / V_c).$$

Изменение объема равно термическому расширению:

$$\Delta V = \alpha_V \cdot \Delta T \cdot V_c,$$

где  $V_c = d \cdot A_L$  - объем нагретого слоя;

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

$d = \frac{1}{k_o \cdot n_l}$  - глубина проникновения поля в металл, м;  $n_l$  - мнимая часть коэффициента преломления волны в металле,  $k_o = \frac{\omega}{c_o}$  - волновое

число в вакууме;  $\omega$  - частота волны, с<sup>-1</sup>;  $c_o$  - скорость света в вакууме, м/с.

Термический коэффициент объемного расширения равен [18]:

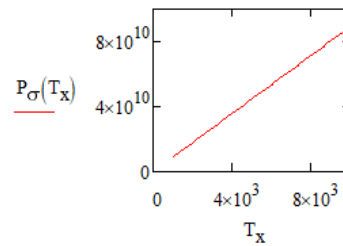
$$\alpha_V = \frac{\gamma_G \cdot C_{VV}}{B},$$

где:  $B$  - модуль всестороннего сжатия, Па;  $\alpha_V$  - термический коэффициент объемного расширения, К<sup>-1</sup>;  $\gamma_G$  - коэффициент Грюнайзена;  $C_{VV}$  - объемная теплоемкость, Дж/м<sup>3</sup> К.

Отсюда, давление равно:

$$\Delta P_\sigma = \gamma_G \cdot C_{VV} \cdot \Delta T.$$

Объемная теплоемкость равна произведению удельной теплоемкости на плотность и для железа равна 6,583·10<sup>6</sup> Дж/(м<sup>3</sup>К), а для меди 4,238·10<sup>6</sup> Дж/(м<sup>3</sup>К). Коэффициент Грюнайзена равен соответственно 1,78 и 2,1 [16,17]. Эти параметры при высоких температурах слабо зависят от температуры [18-20]. Модуль всестороннего сжатия принят равным 1·10<sup>10</sup> Па. Зависимость давления от температуры слоя показана на рис. 1.



**Рис.1.** Зависимость давления в слое (Па) от температуры (К)

**Fig. 1.** Layer pressure dependence (Pa) from temperature (K)

Температура слоя определяется из закона сохранения энергии: работа, совершенная над слоем лазерным лучом, расходуется на нагрев слоя и упругую энергию объемного сжатия:

$$T_2 \cdot E_u = C_{VV} \cdot \Delta T \cdot V_c + \Delta P_\sigma \cdot \Delta V_c,$$

где  $T_2$  - коэффициент поглощения излучения в слое;  $E_u$  - энергия импульса, Дж.

С учетом приведенных соотношений это уравнение приводится к квадратному уравнению относительно температуры нагрева слоя в конце импульса:

$$\Delta T^2 \cdot \frac{\gamma_G^2 \cdot C_{VV}}{B} + \Delta T \cdot \frac{2 \cdot k_o \cdot E_u}{A_L \cdot C_{VV}} = 0.$$

Решением этого уравнения в хорошем приближении является

$$\Delta T = \frac{1}{(\gamma_G \cdot \alpha_V)} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_G^2 \cdot T_2}{B \cdot V_c} \cdot E_u}.$$

У металлов действительная и мнимая части показателя преломления близки и коэффициент прохождения равен [21]:

$$T_2 = \frac{2}{n_l}.$$

В этом случае коэффициент прохождения и глубина проникновения волны обратно пропорциональны мнимой части показателя преломления и отношение коэффициента прохождения и объема нагретого слоя равно:

$$\frac{T_2}{V_c} = \frac{2k_o}{A_L}.$$

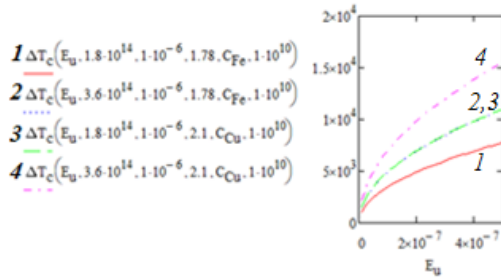
Тогда температура нагретого слоя будет равна:

$$\Delta T_{1cy} = \frac{1}{(\gamma_G \cdot C_{VV})} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{k_o \cdot B_y}{A_L} \cdot E_u}$$

Давление в слое:

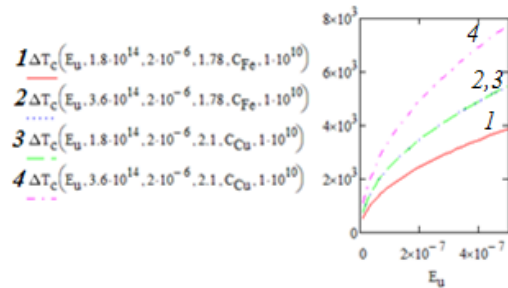
$$\Delta P_{2cy} = \sqrt{2 \cdot \frac{k_o \cdot B_y}{A_L} \cdot E_u}$$

При увеличении частоты света и уменьшения диаметра пятна температура слоя существенно растет (рис. 2, 3).



**Рис. 2.** Зависимость температуры слоя (К) от энергии импульса (Дж) при диаметре лазерного пятна 1 мкм: 1, 2 – железо; 3, 4 – медь; 1,3 – частота  $1,8 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$ ; 2, 4 – частота  $3,6 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$

**Fig. 2.** Dependence of layer temperature (K) on pulse energy (J) at laser spot diameter of 1 μm: 1, 2 - iron; 3, 4 - copper; 1,3 - frequency  $1.8 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$ ; 2, 4 - frequency  $3.6 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$

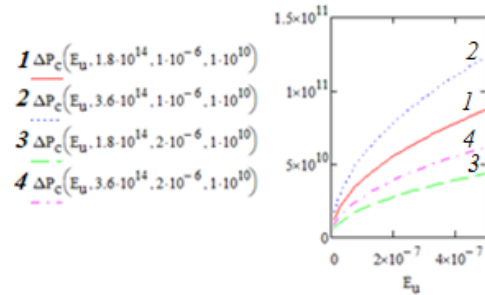


**Рис. 3.** Зависимость температуры слоя (К) от энергии импульса (Дж) при диаметре лазерного пятна 2 мкм 1, 2 – железо; 3, 4 – медь; 1,3 – частота  $1,8 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$ ; 2, 4 – частота  $3,6 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$

**Fig. 3.** Dependence of layer temperature (K) on pulse energy (J) at laser spot diameter 2 μm: 1, 2 - iron; 3, 4 - copper; 1,3 - frequency  $1.8 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$ ; 2, 4 - frequency  $3.6 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$

При увеличении частоты света и уменьшения диаметра пятна давление в слое также существенно растет (рис. 4). Температура слоя зависит от частоты волны, энергии импульса, диаметра луча, модуля сжатия и теплоемкости металла, и не зависит от длительности импуль-

са. Давление в слое зависит от этих же параметров, кроме теплоемкости.



**Рис. 4.** Зависимость давления в слое (Па) от энергии импульса (Дж): 1, 2 – диаметр лазерного пятна 1 мкм; 3, 4 – диаметр лазерного пятна 2 мкм; 1, 3 – частота  $1,8 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$ ; 2, 4 – частота  $3,6 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$

**Fig. 4.** Dependence of pressure in layer (Pa) on pulse energy (J): 1, 2 - laser spot diameter 1 mcm; 3, 4 - laser spot diameter 2 μm; 1, 3 - frequency  $1.8 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$ ; 2, 4 - frequency  $3.6 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$

Время отрыва нагретого слоя по модели сжатой упругой пружины при равноускоренном движении равно (рис. 5):

$$t_n = d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_m}{E_y}}$$

где  $E_y$  – модуль упругости, Па;  $d$  – глубина проникновения волны в металл, м;  $\rho_m$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Глубина проникновения волны в металл равна:

$$d = \frac{1}{k_o \cdot n_I}$$

где  $k_o = \frac{\omega}{C_o}$  – волновое число волны в вакууме, м<sup>-1</sup>;  $n_I$  – мнимая часть показателя преломления волны в металле.

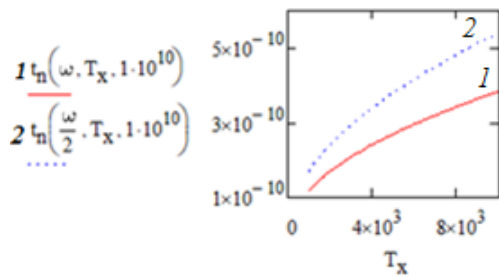
Показатель преломления волны в металле равен квадратному корню из относительной диэлектрической проницаемости [22]:

$$n_m = \sqrt{\epsilon_m},$$

где  $\epsilon_m = 1 + \chi_{em} + \chi_{me}$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\chi_{em}$  – диэлектрическая восприимчивость валентных электронов и кристаллической решетки порядка единицы;  $\chi_{me} = \frac{i \cdot \sigma_m}{\epsilon_o \cdot \omega}$  – диэлектрическая восприимчивость свободных электронов;

$\sigma_m = \frac{\sigma_{om}}{1 - i \cdot \omega \cdot \tau_{tm}}$  – динамическая проводимость, (Ом м)<sup>-1</sup>;  $\sigma_{om} = \frac{e_o^2 \cdot n_e \cdot \tau_{tm}}{m_e}$  – статическая проводимость, (Ом м)<sup>-1</sup>;  $\tau_{tm} = \frac{1}{v_{tm}}$  – время

релаксации электронов, с;  $\tau_{tm} = \frac{V_F}{L_p}$  - частота столкновения электронов с фононами, с<sup>-1</sup>;  $L_p = \frac{1}{n_a \cdot S_c}$  - длина свободного пробега электронов, м;  $S_c = \frac{h_p^2 \cdot T_n}{M_{mc} \cdot k_B \cdot \theta_D}$  - сечение столкновения электронов с фононами, м<sup>2</sup>;  $\theta_D = \frac{h_p}{k_B} \cdot \Omega_T$  - температура Дебая, К;  $\Omega_T$  - максимальная частота фононов, с<sup>-1</sup>;  $M_{mc} = \frac{M_m \cdot 10^{-3}}{N_A}$  - масса атомов, кг;  $V_F = (6 \cdot \pi^2)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{h_p}{m_e} \cdot \left(\frac{n_e}{2}\right)^{\frac{1}{3}}$  - скорость Ферми, м/с;  $n_e = \frac{1}{3 \cdot \pi^2 \cdot h_p^3} \cdot (2 \cdot m_e \cdot E_f)^{\frac{3}{2}}$  - концентрация свободных электронов, м<sup>-3</sup>;  $E_f$  - энергия Ферми, Дж;  $m_e = \frac{m_0}{1+0,22r_{so}}$  - эффективная масса электронов в металле, кг;  $i$  - мнимая единица;  $\epsilon_0$  - диэлектрическая постоянная;  $N_A$  - концентрация рассеивающих центров, м<sup>-3</sup>;  $h_p$  - постоянная планка;  $k_B$  - постоянная Больцмана;  $M_m$  - молярная масса;  $m_0$  - масса покоя электронная, кг;  $r_{c0}$  - параметр для железа 2,1; для меди 2,5 [18].



**Рис. 5.** Зависимость времени отрыва (с) микрочастиц от температуры (К): 1 – частота волны  $3,8 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ ; 2 – частота волны  $1,9 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ .

**Fig. 5.** Separation time (s) of microparticles versus temperature (K): 1 - wave frequency  $3.8 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$ ; 2 - ave frequency  $1.9 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$

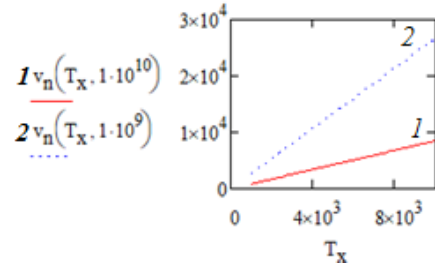
Скорость отрыва частиц (рис. 6):

$$v_n = \Delta P_c \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_m \cdot E_y}}$$

При температуре выше критической время разлета газа (флюида) оценим по выражению (рис. 7):

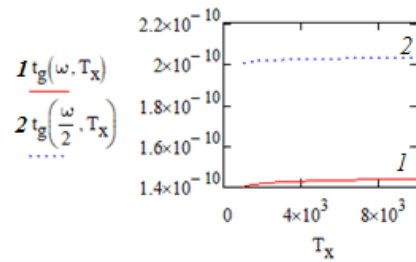
$$t_g = \frac{d}{v_T},$$

где  $v_T = \sqrt{\frac{3 \cdot k_B \cdot T_c}{M_{mc}}}$  - тепловая скорость атомов, м/с.



**Рис.6.** Зависимость скорости отрыва (м/с) микрочастиц от температуры слоя (К): 1 – модуль упругости  $1 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ ; 2 – модуль упругости  $1 \cdot 10^9 \text{ Па}$

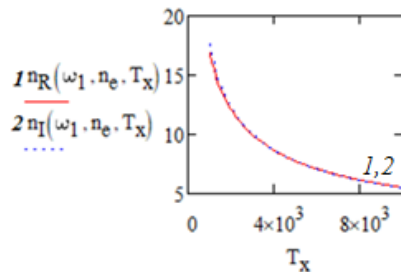
**Fig. 6.** Separation rate (m/s) of microparticles vs. layer temperature (K): 1 - modulus of elasticity  $1 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$ ; 2 - modulus of elasticity  $1 \cdot 10^9 \text{ Pa}$



**Рис. 7.** Зависимость времени разлета газа (с) при температуре выше критической от температуры (К)

**Fig. 7.** Dependence of gas flight time (s) at temperature above the critical one on temperature (K)

По данной модели выполняется условие равенства действительной и мнимой части показателя преломления металла (рис. 8).

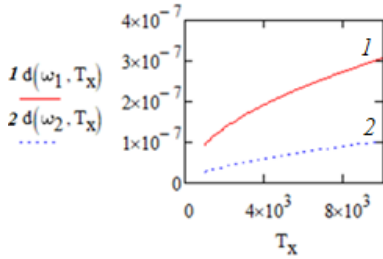


**Рис. 8.** Зависимость действительной и мнимой части показателя преломления металла от температуры (К)

**Fig. 8.** Dependence of real and imaginary part of metal refractive index on temperature (K)

Глубина проникновения волны также зависит от температуры и увеличивается при уве-

личении температуры и снижения частоты (рис. 9).



**Рис. 9.** Зависимость глубины проникновения волны в металл (м) от температуры (К): 1 – частота  $1,8 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$ ; 2 - частота  $3,6 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$

**Fig. 9.** Metal penetration depth (m) vs. temperature (K): 1 - frequency  $1.8 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$ ; 2 - frequency  $3.6 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$

Рассмотрим влияние температурной зависимости параметров процесса на динамику температуры слоя. Зависимость температуры слоя от времени определяется из уравнения баланса энергии в слое: изменение тепловой внутренней энергии равно поступающей энергии за вычетом упругой энергии и удаляемой энергии по механизмам теплового излучения, теплоотдачи, теплопередачи и испарения. Источник энергии действует в течение длительности импульса. Уравнение баланса энергии в динамическом режиме имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \cdot T_n = \frac{P_t \cdot K_L - P_\lambda - Q_n}{m_{cc} \cdot c_{Tm}}$$

где  $P_t = P_L - P_y$  - тепловая мощность нагрева слоя, Вт;  $P_L = T_2 \cdot P_{Lu}$  - общая мощность луча в слое, Вт;  $P_{Lu} = \frac{E_u}{\tau_u}$  - мощность лазерного луча, Вт;  $P_y = \frac{\gamma_g^2 \cdot c_v^2}{B_y \cdot \tau_u} \cdot V_c \cdot T_n^2$  - мощность, расходуемая на увеличение упругой энергии в слое, Вт;  $V_c = d \cdot A_L$  - объем слоя, м<sup>3</sup>;  $T_2 = 1 - R_2$  - коэффициент прохождения энергии в металл;  $R_2 = \frac{(n_R - 1)^2 + n_I}{(n_R + 1)^2 + n_I}$  - коэффициент отражения энергии от металла при нормальном падении [22];  $m_{cc} = A_L \cdot \rho_m \cdot d$  - масса взаимодействующего слоя, кг;  $A_L = \frac{\pi \cdot d_L^2}{4}$  - площадь лазерного пятна, м<sup>2</sup>;  $c_{Tm}$  - удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

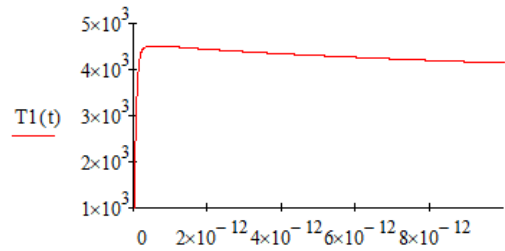
$P_\lambda = \alpha_T \cdot (T_n - T_{n0}) \cdot A_L + A_L \cdot \lambda \cdot \frac{(T_n - T_{n0})}{\sqrt{a_T \cdot \tau_u + t}} + \varepsilon_c \cdot \sigma_{CB} \cdot (T_n - T_{n0})^4 \cdot A_L$  - мощность тепловых потерь теплоотдачи, теплопередачи и теп-

лового излучения, Вт;

$Q_n = \frac{P_n}{k_B \cdot T_n} \cdot \frac{v_T}{4 \cdot N_A} \cdot A_L \cdot Q_m$  - мощность потерь на испарение, Вт;  $Q_m$  - теплота сублимации или испарения, Дж/моль;  $P_n = 133 \cdot 10^y$  - давление паров, Па;  $y = (-19710)/T_n + 13,27 - 1,27 \cdot \log$ ,  $a_T = \lambda / (C_v \cdot \rho_m)$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $K_L$  - коэффициент равный единице во время действия импульса;  $N_A$  - число Авогадро, моль<sup>-1</sup>;  $v_T$  - тепловая скорость, м/с;  $T_{n0}$  - начальная температура, К;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\alpha_T$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·К.

Упругая энергия объемного сжатия определяется как произведение давления в слое на изменение объема.

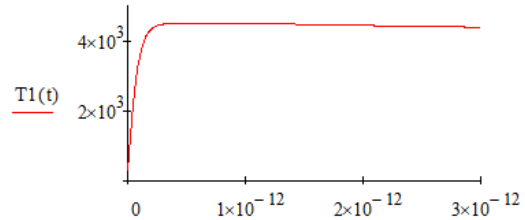
После окончания действия импульса слой незначительно охлаждается за время порядка  $1 \cdot 10^{-10}$  с (рис. 10).



**Рис. 10.** Зависимость температуры слоя (К) от времени (с):  $E_u = 4 \cdot 10^{-8}$  Дж;  $d_L = 2,0 \cdot 10^{-6}$  м;  $\tau_u = 1 \cdot 10^{-12}$  с;  $\omega = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$

**Fig.10.** Layer temperature (K) vs time (s):  $E_u = 4 \cdot 10^{-8}$  J;  $d_L = 2,0 \cdot 10^{-6}$  m;  $\tau_u = 1 \cdot 10^{-12}$  s;  $\omega = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$

В течение прохождения импульса максимальная температура достигается за время порядка половины длительности импульса (рис. 11).



**Рис. 11.** Зависимость температуры слоя (К) от времени (с):  $E_u = 1 \cdot 10^{-8}$  Дж;  $\omega = 2 \cdot \omega_1$ ;  $d_L = 1,0 \cdot 10^{-6}$  м;  $\tau_u = 1,0 \cdot 10^{-12}$  с;  $\omega = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$

**Fig.11.** Layer temperature (K) vs time (s):  $E_u = 1 \cdot 10^{-8}$  J;  $\omega = 2 \cdot \omega_1$ ;  $d_L = 1,0 \cdot 10^{-6}$  m;  $\tau_u = 1,0 \cdot 10^{-12}$  s;  $\omega = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$

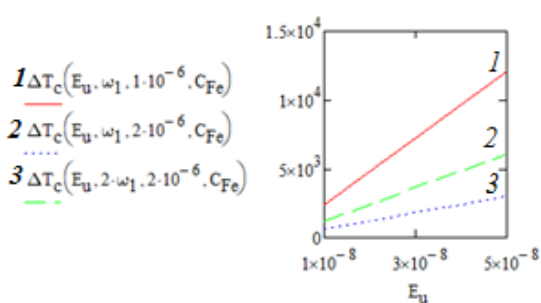
Температура в конце импульса, определенная по динамической модели, отличается от

температуры, определенной по стационарной модели, не более чем на 5%. Это подтверждает предположение о адиабатичности и изохорности процесса нагрева слоя.

Без учета расхода энергии луча на накопление упругой энергии в слое температура в конце импульса более чем в 5 раз превышает температуру, определенную с учетом упругой энергии, и определяется по формуле (рис. 12,13):

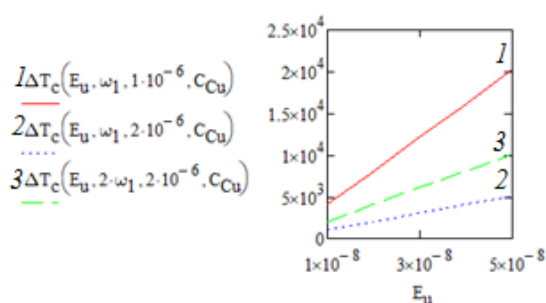
$$\Delta T = \frac{2 \cdot E_u \cdot \omega}{C_v \cdot c_o \cdot A_L}$$

где  $C_v = c_{tm} \cdot \rho_m$  - объемная теплоемкость, слабо зависящая от температуры при высоких температурах, Дж/(м<sup>3</sup> К).



**Рис. 12.** Зависимость температуры нагрева слоя железа от энергии импульса (Дж): 1 –  $d_L=1,0 \cdot 10^{-6}$  м;  $\omega=1,8 \cdot 10^{14}$  с<sup>-1</sup>; 2 –  $d_L=2,0 \cdot 10^{-6}$  м;  $\omega=1,8 \cdot 10^{14}$  с<sup>-1</sup>; 3 –  $d_L=2,0 \cdot 10^{-6}$  м;  $\omega=3,6 \cdot 10^{14}$  с<sup>-1</sup>

**Fig. 12.** Dependence of iron layer heating temperature on pulse energy (J): 1 –  $d_L=1,0 \cdot 10^{-6}$  m;  $\omega=1,8 \cdot 10^{14}$  s<sup>-1</sup>; 2 –  $d_L=2,0 \cdot 10^{-6}$  m;  $\omega=1,8 \cdot 10^{14}$  s<sup>-1</sup>; 3 –  $d_L=2,0 \cdot 10^{-6}$  m;  $\omega=3,6 \cdot 10^{14}$  s<sup>-1</sup>



**Рис. 13.** Зависимость температуры нагрева слоя меди от энергии импульса (Дж): 1 –  $d_L=1,0 \cdot 10^{-6}$  м;  $\omega=1,8 \cdot 10^{14}$  с<sup>-1</sup>; 2 –  $d_L=2,0 \cdot 10^{-6}$  м;  $\omega=1,8 \cdot 10^{14}$  с<sup>-1</sup>; 3 –  $d_L=2,0 \cdot 10^{-6}$  м;  $\omega=3,6 \cdot 10^{14}$  с<sup>-1</sup>

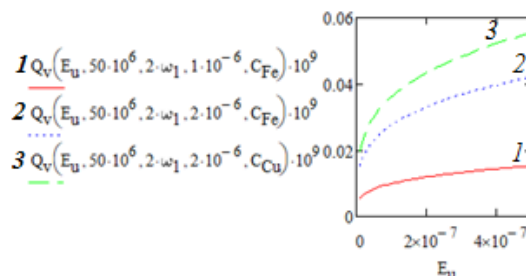
**Fig. 13.** Dependence of copper layer heating temperature on pulse energy (J): 1 –  $d_L=1,0 \cdot 10^{-6}$  m;  $\omega=1,8 \cdot 10^{14}$  s<sup>-1</sup>; 2 –  $d_L=2,0 \cdot 10^{-6}$  m;  $\omega=1,8 \cdot 10^{14}$  s<sup>-1</sup>; 3 –  $d_L=2,0 \cdot 10^{-6}$  m;  $\omega=3,6 \cdot 10^{14}$  s<sup>-1</sup>

Объемная производительность обработки

равна произведению объема удаляемого материала за один импульс на частоту следования импульсов (рис.14):

$$Q_v = V_c \cdot F_n,$$

где  $V_c = d \cdot A_L$ .



**Рис. 14.** Зависимость объемной производительности обработки (мм<sup>3</sup>/с) при частоте следования импульсов 50 МГц и частоте света  $3,8 \cdot 10^{14}$  Гц: 1 – железо, диаметр пучка 1 мкм; 2 – железо, диаметр пучка 2 мкм; 3 – медь, диаметр пучка 2 мкм

**Fig. 14.** Volumetric processing capacity (mm<sup>3</sup>/s) at 50 MHz pulse rate and light frequency  $3,8 \cdot 10^{14}$  Hz: 1 - iron, beam diameter 1 μm; 2 - iron, beam diameter 2 μm; 3 - copper, beam diameter 2 μm

Производительность увеличивается при повышении энергии импульса, диаметра пучка и уменьшении теплоемкости. Медь обрабатывается быстрее, чем железо в 1,5 раза. Частота света слабо влияет на производительность в рассмотренных пределах. Рассчитанные зависимости соответствуют экспериментальным данным, приведенным в работе [1].

### Заключение

Построена модель лазерной обработки металлов пикосекундными импульсами.

При воздействии импульса нагревается слой толщиной порядка глубины проникновения волны в металл. За время порядка  $10^{-10}$  с этот слой удаляется с образованием лунки. Поглощенная электронным газом энергия релаксирует с передачей энергии кристаллической решетке за время порядка  $10^{-12}$  с. Поглощенный импульс является триггером для запуска последующих процессов абляции, т.е. определяющую роль играет количество поглощенной энергии, поэтому модель справедлива и для фемтосекундных импульсов. Прошедшая энергия луча расходуется в основном на нагрев слоя и упругую энергию в адиабатическом изохорном режиме, т.к. слой не успевает расширяться за время порядка  $10^{-12}$  с. При этом термическая деформация компенсируется деформацией объ-

емного сжатия. При удалении слоя его упругая энергия переходит в кинетическую энергии струи по модели сжатой пружины. Твердая и жидкая фазы удаляются в виде диспергированных микрочастиц за время порядка  $10^{-10}$  с. Время испарения значительно больше. Если температура слоя превышает критическую порядка 9000 К, то слой удаляется в виде газа (флюида). Модель позволяет определить зависимость температуры слоя в зависимости от энергии импульса, частоты света, диаметра луча и теплоемкости металла. Получена простая зависимость температуры от этих параметров, следующая из равенства действительной и мнимой частей показателя преломления для металлов. Расчетные зависимости производительности обработки и параметры абляции (давление, скорость разлета частиц) от параметров процесса согласуются с известными данными [1].

Давление в слое пропорционально температуре и объемной теплоемкости с коэффициентом пропорциональности, равным коэффициенту Грюнайзена и составляет десятки ГПа при температуре порядка 10000 К. Такая зависимость следует из рассмотрения адиабатического изохорного процесса нагрева слоя, т.к. другие процессы (расширение, теплоотвод, испарение, абляция), кроме нагрева слоя, не успевают развиться за время пикосекундного импульса. Энергия импульса в основном расходуется на нагрев ионной решетки за счет взаимодействия фононов с разогретыми электронами, т.к. время релаксации энергии электронов порядка  $10^{-14}$  с значительно меньше длительности импульса  $10^{-12}$  с, а теплоемкость электронного газа значительно меньше теплоемкости кристаллической решетки. Если температура нагрева не превышает критическую температуру фазового перехода в газовую фазу, то за время порядка  $10^{-10}$  с после окончания импульса за счет внутреннего растягивающего давления происходит отрыв твердых или жидких микрочастиц по механизму упругой пружины. Если температура превышает критическую, то разрушение слоя происходит выплеском струи частично ионизированного газа (плазмы) со степенью ионизации несколько процентов, наблюдаемую в виде свечения. Если обработка идет на воздухе, то свечение возможно за счет сгорания микрочастиц.

Температура в конце импульса, определенная по динамической модели с учетом температурной зависимости параметров, отличается от температуры, определенной по стационарной модели, не более чем на 5%. Это подтверждает предположение о адиабатичности и изохорно-

сти процесса нагрева слоя. Без учета расхода энергии луча на накопления упругой энергии в слое расчетная температура в конце импульса более чем в 5 раз превышает температуру, определенную с учетом упругой энергии

Производительность увеличивается при повышении энергии импульса, диаметра пучка и уменьшении теплоемкости. Медь обрабатывается быстрее, чем железо. Частота света слабо влияет на производительность в рассмотренных пределах.

### Список литературы

1. Агранат, М.Б. Фемтосекундный лазер: достижения и перспективы / М.Б. Агранат // Энергия: экономика, техника, экология, 2017. - № 6. - С. 2-10.
2. Завестовская, И.Н. Лазерная абляция металлов пикосекундными импульсами низкой плотности / И.Н. Завестовская, А.П. Канавин // Краткие сообщения по физики ФИАН. - 2017. - №12. - С. 72-78.
3. Ионин, А.А. Абляция поверхности материалов под действием ультракоротких лазерных импульсов / А.А. Ионин, С.И. Кудряшов, А.А. Самохин // УФН. - 2017. - Т. 187. - № 2. - С. 159-172.
4. Кононенко, Т.В. Сравнительное исследование абляции материалов фемтосекундными и пико/наносекундными лазерными импульсами / Т.В. Кононенко, В.И. Конов, С.В. Гарнов, Р. Даниелиус, А. Пискарскас, Г. Тамошаускас, Ф. Даусингер// Квантовая электроника. – 1999. - Т. 28. - № 2. - С. 167–172.
5. Кононенко, В.В. Абляция стали при облучении поверхности тандемными импульсами высокой интенсивности / В.В. Кононенко, В.И. Конов // Квантовая электроника. -2018. - Т. 48. - № 1. - С. 40-44.
6. Локтионов, Е.Ю. Определение спектрально-энергетических порогов лазерной абляции под действием ультракоротких лазерных импульсов в вакууме / Е.Ю. Локтионов, Ю.С. Протасов, Ю.Ю. Протасов // Инженерный журнал: наука и инновации. - 2013. - № 10. - С. 1-12.
7. Технологические лазеры: Справочник. Т.1 / Под ред. Г.А. Абельснитова. - М.: Машиностроение, 1991. - 442 с.
8. Проскураков, В.И. Формирование состава и характеристик поверхности хромоникелевой стали 12X18H10T при лазерном модифицировании в слое экспериментальной легирующей обмазки / В. И. Проскураков, И. В. Родионов // Журнал технической физики. – 2022. –

Т. 92, №1. – С. 84-91.

9. 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.

10. Лазерная наплавка порошка титанового сплава ВТ6 на нержавеющую сталь 08Х18Н10Т при импульсном воздействии излучения / И.В. Родионов, П.Н. Устинов, И.В. Перинская, Л.Е. Куц // Вопросы электротехнологии. – 2023. – № 4 (41). – С. 40-50.

11. Зоркин, А.Я. Нелинейная динамика лазерной наплавки титановых покрытий / А.Я. Зоркин, И.В. Родионов, Н.А. Вавилина // Вопросы электротехнологии. – 2024. – № 4 (45). – С. 40-47.

12. Проскураков, В.И. Изменение характеристик поверхности стали 12Х18Н10Т при лазерном модифицировании в слое графитовой пасты, содержащей наночастицы диоксида титана / В.И. Проскураков, И.В. Родионов // Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47, № 10. – С. 50-54.

13. Зоркин, А.Я. Модифицирование поверхности жаропрочного сплава ВХ9Л лазерным импульсным оксидированием на воздухе / А.Я. Зоркин, И.В. Родионов, Н.А. Вавилина, И.В. Перинская, Л.Е. Куц // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2025. – Т. 22. – № 4. – С. 487-496.

14. Влияние режимов лазерной наплавки порошка карбида вольфрама на характеристики поверхности стали 12Х18Н10Т / И.В. Родионов, П.Н. Устинов, И.В. Перинская, Л.Е. Куц // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2024. – № 2 (285). – С. 41-46.

15. Зоркин, А.Я. Лазерная обработка многослойных покрытий на металлической подложке / А.Я. Зоркин, И.В. Родионов, Н.А. Вавилина // Вопросы электротехнологии. – 2025. – № 1 (46). – С. 16-25.

16. Медведев, А.Б. Широкодиапазонное многофазное уравнение состояния железа / А.Б. Медведев // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50. – №5. – С. 91-108.

17. Гилев, С.Д. Малопараметрическое уравнение состояния меди / С.Д. Гилев // Физика горения и взрыва. – 2018. – Т. 54. – № 4. – С. 107-122.

18. Ашкрофт, Н. Физика твердого тела / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. М.: Мир, 1979. – Т.2. – 120 с.

19. Беломестных, В.Н. Коэффициент Пуас-

сона и параметр Грюнайзена твердых тел / В.Н. Беломестных В.Н., Е.П. Теслева // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – №5. – С.8-12.

20. Смитлз, К.Дж. Металлы / К.Дж. Смитлз - М.: Металлургия, 1980. – 447 с.

21. Гроссе П. Свободные электроны в твердых телах / П. Гроссе. - М.: Мир, 1982. - 270 с.

22. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. - 4-е изд. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. - 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.*

*П.Н. Устинов – ассистент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.*

### References

1. Agranat, M.B. (2017). Femtosecond laser: achievements and prospects. *Energy: economics, technology, ecology*, 6, 2-10. (In Russ.).

2. Zavestovskaya, I.N. (2017). Laser ablation of metals with low-density picosecond pulses. *Brief reports on physics FIAN*, 12. 72-78. (In Russ.).

3. Ionin, A.A. Ablation of the surface of materials under the influence of ultrashort laser pulses. *UFN*, 187, 2, 159-172. (In Russ.).

4. Kononenko, T.V. (1999). Comparative study of ablation of materials by femtosecond and pico/nanosecond laser pulses. *Quantum electronics*, 28, 2, 167-172. (In Russ.).

5. Kononenko, V.V. (2018). Steel ablation during surface irradiation with high-intensity tandem pulses. *Quantum electronics*, 48, 1, 40-44. (In Russ.).
6. Loktionov, E.Yu. (2013). Determination of speck-trawl-energy thresholds of laser ablation under the action of ultrashort laser pulses in vacuum. *Engineering journal: science and innovation*, 10, 1-12. (In Russ.).
7. Technological lasers: Reference. (1991) / Ed. G.A. Abelsitova. - M.: *Mechanical Engineering*, 1, 442 p. (In Russ.).
8. Proskuryakov, V.I. (2022). Formation of the composition and characteristics of the surface of nickel-chromium steel 12Kh18N10T during laser modification in the layer of experimental alloying coating. *Journal of Technical Physics*, 92, 1, 84-91. (In Russ.).
9. Zorkin, A.Ya. (2024). Thermal model and features of the formation of the morphology of the aluminum oxide coating during pulsed laser surfacing. *Questions of electrical technology*, 2 (43), 14-23. (In Russ.).
10. Rodionov, I.V. (2023). Laser deposition of titanium alloy powder VT6 on stainless steel 08X18H10T under pulsed radiation. *Electrical engineering issues*, 4 (41), 40-50. (In Russ.).
11. Zorkin, A.Ya. (2024). Nonlinear dynamics of laser surfacing of titanium coatings. *Questions of electrical technology*, 4 (45), 40-47. (In Russ.).
12. Proskuryakov, V.I. (2021). Change in the surface characteristics of steel 12X18H10T during laser modification in a layer of graphite paste containing titanium dioxide nanoparticles. *Letters to the Journal of Technical Physics*, 47, 10, 50-54. (In Russ.).
13. Zorkin, A.Ya. (2025). Surface modification of heat-resistant alloy VKh9L laser pulsed oxidation in air. *Fundamental problems of modern materials science*, 22, 4, 487-496. (In Russ.).
14. Rodionov, I.V. (2024). Influence of modes of laser surfacing of tungsten carbide powder on the surface characteristics of steel 12X18H10T. *Izvestia Volgograd State Technical University*, 2 (285), 41-46. (In Russ.).
15. Zorkin, A.Ya. (2025). Laser processing of multi-layer coatings on a metal substrate. *Questions of electrical technology*, 1 (46), 16-25. (In Russ.).
16. Medvedev, A.B. (2014). Wide-range multiphase equation of state of iron. *Physics of combustion and explosion*, 50, 5, 91-108. (In Russ.).
17. Gilev, S.D. (2018). Low-parameter equation of state of copper. *Physics of combustion and explosion*, 54, 4, 107-122. (In Russ.).
18. Ashcroft, N. (1979). *Solid State Physics*. M.: Mir, 2, 120. (In Russ.).
19. Belomestnykh, V.N. (2003). Poisson coefficient and Gruneisen parameter of solids. *News of Tomsk Polytechnic University*, 306, 5, 8-12. (In Russ.).
20. Smithles, C.J. *Metals*. (1980). M.: *Metalurgy*, 447. (In Russ.).
21. Grosse, P. (1982). *Free electrons in solids*. M.: Mir, 270. (In Russ.).
22. Landau L.D., Lifshitz E.M. (200). *Electrodynamics of continuous media*. - 4th ed. M.: *Fizmatlit*, 656. (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.

P.N. Ustinov - department Head of the Department Welding and Metallurgy assistant, 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 18.02.2026; одобрена после рецензирования 25.05.2026; принята к публикации 01.06.2026.

The article was received by the editorial board on 18 Feb. 2026; approved after reviewing 25 May 2026; accepted for publication 01 Jun. 2026.