

Научная статья

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

УДК 621.78

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.013

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИМПУЛЬСНОМ ЛЕГИРОВАНИИ

Виталий Игоревич Проскуряков<sup>1†</sup>, Игорь Владимирович Родионов<sup>2</sup>,  
Владимир Александрович Кошуро<sup>3</sup>, Ирина Владимировна Перинская<sup>4</sup>,  
Любовь Евгеньевна Куц<sup>5</sup>

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

<sup>1</sup>prosku.94@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-6566-8536>

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

<sup>3</sup>dimirion@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0089-3331>

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

<sup>5</sup>kuts70@yandex.ru

**Аннотация.** В работе описаны результаты моделирования температурного воздействия единичного лазерного импульса на легирующую обмазку, нанесенную на нержавеющую хромоникелевую сталь 12X18H10T. Целью моделирования являлось определение возможности нагрева поверхности нержавеющей стали в расширенном диапазоне энергии импульса (0,08-1,34 Дж) до температуры интенсивных диффузионных процессов элементов легирующей обмазки. Поставленная цель решалась путем разработки геометрической и численной моделей. Моделирование проводилось в программном комплексе «Elcut 5.1», где решалась задача нестационарной теплопередачи для расчета переходного и установившегося температурного поля с учетом теплообмена элементов системы «окружающая среда-обмазка-образец». Проведенное моделирование позволило определить зависимости глубины, температуры и времени нагрева поверхностного слоя образцов от режимов импульсного излучения. Так, например, установлено, что при воздействии импульса лазерного излучения, сфокусированного в пятно диаметром 0,5 мм, при энергии импульса 0,92 Дж и длительности 0,5 мс, стальная основа нагреется на глубину 10 мкм до температуры 1600±50 °С. На глубине 100 мкм сталь нагревается до температуры 800-950 °С, что свойственно активному протеканию диффузионных процессов. Отметка глубиной 150 мкм характеризуется нагревом до 600-650 °С, что соответствует температуре высокого отпуска, при котором наблюдаются изменения кристаллической структуры. На основании полученных данных построены кривые, описывающие зависимость температуры стали на разной глубине, в разные моменты воздействия единичного лазерного импульса. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными данными, а именно: установлена толщина модифицированных поверхностных слоев образцов, значение которой варьирует в зависимости от режимов лазерной обработки и составляет в среднем 100-200 мкм; определена микротвердость диффузионного слоя; проведены элементный и рентгенофазовый анализы. Установлено соответствие между результатами численного моделирования и полученными экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** нержавеющая сталь, графитовая обмазка, лазерный импульс, нагрев поверхности, моделирование теплопроводности.

**Благодарности:** Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ (конкурс на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре – «Аспиранты»), проект № 19-33-90101.

**Для цитирования:** Проскуряков В.И., Родионов И.В., Кошуро В.А., Перинская И.В., Куц Л.Е. Моделирование тепловых процессов в поверхностном слое нержавеющей хромоникелевой стали при лазерном импульсном легировании // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 2. С. 243–257. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.013.

Original article

**MODELING OF THERMAL PROCESSES IN THE SURFACE LAYER OF STAINLESS CHROMIUM-NICKEL STEEL DURING LASER PULSED ALLOYING****Vitaly I. Proskuryakov<sup>1†</sup>, Igor V. Rodionov<sup>2</sup>, Vladimir A. Koshuro<sup>3</sup>,  
Irina V. Perinskaya<sup>4</sup>, Lubov' E. Kuts<sup>5</sup>**<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Politechnicheskaya Str., 77, Saratov, 410054, Russia<sup>1</sup>prosku.94@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-6566-8536><sup>2</sup>iv.rodionov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0230-2128><sup>3</sup>dimirion@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0089-3331><sup>4</sup>perinskayaiv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3825-2062><sup>5</sup>kuts70@yandex.ru

**Abstract.** The paper describes the results of a graphical representation and numerical simulation of the process of laser alloying of stainless chromium-nickel steel 12Cr18Ni10Ti with a preliminary applied alloying coating of graphite paste. As a result of the simulation, a problem was solved, the purpose of which was to determine the technological feasibility of the required heating of the stainless steel surface and the diffusion of alloying mixture elements in an extended range of pulse energy (0.08-1.34 J). Modeling has confirmed the possibility of the formation of a modified surface layer and a heat-affected zone (diffusion layer) characterized by structural changes as a result of laser pulsed alloying. The Elcut 5.1 software package was used to solve the problem of non-stationary heat transfer for calculating the transient and steady-state temperature field, taking into account the heat exchange of the elements of the "environment-coating-sample" system. The relevance was represented by such characteristics as the temperature distribution over time, the temperature gradient and heat flux in the zone of interaction of laser radiation and a layer of graphite coating. The modeling performed helped to determine the dependence of the depth, temperature and heating time of the surface layer of the samples on the modes of pulsed radiation. In particular, the curves of the dependence of the heating of the steel surface over the cross section of the sample at different depths on the time of exposure to a single laser pulse are plotted. The data obtained are necessary to build a more accurate plan for the experimental study, since allow to exclude irrational modes of laser processing, leading to excessive melting and overburning of the treated surface, or, conversely, which are ineffective for the course of thermal diffusion processes.

**Keywords:** stainless steel, laser alloying, graphite coating, surface heating, thermal conductivity modeling.

**Acknowledgements:** The research was carried out within the framework of the RFBR grant (competition for the best projects of fundamental scientific research carried out by young scientists studying in graduate school – "Post-graduate students"), project No. 19-33-90101.

**For citation:** Proskuryakov, V. I., Rodionov, I. V., Koshuro, V. A., Perinskaya, I. V. & Kuts, L. E. (2022). Modeling of thermal processes in the surface layer of stainless chromium-nickel steel during laser pulsed alloying. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(19), 243–257. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.013.

**Введение**

За последнее десятилетие применение и использование лазерных технологий затронуло множество самых различных научно-технических сфер и производственных направлений. Активно расширяются пути развития обработки рабочих поверхностей инструментов, элементов конструкций, узлов, механизмов и конструкционных материалов. В частности, ведутся масштабные исследования, посвящённые проблемам формирования равномерных структур и повышения прочностных характе-

ристических модифицируемой поверхности металлов и сплавов.

Известно, что лазерное импульсное легирование в слое обмазки увеличивает многообразие возможных структур и физико-механических свойств легированных слоев по сравнению с традиционными способами химико-термической обработки [1-4].

Химическим составом поверхности, ее микротвердостью и однородностью структуры можно управлять путем регулирования следующих основных параметров обработки: типа и толщины наносимой легирующей обмазки, фракционного состава используемого порошка,

вида технологической газовой среды, геометрии фокусировки лазерного излучения, мощности и скорости сканирования луча. Yamaguchi T. описывает исследования процесса лазерного легирования аустенитной нержавеющей стали AISI 304 (ее аналогом является сталь марки 08X18H10) с использованием светопроницающей смолы в качестве источника углеродного элемента. Установлено, что при обработке лазером средней мощности карбид титана распределялся равномерно в ванне расплава и твердость модифицированной зоны, увеличилась примерно до 1200 HV. Когда средняя мощность лазера была повышена, отмечалось образование интерметаллической  $\beta$ -фазы, что приводило к растрескиванию поверхности [5]. В другом случае F. Laroudie и др. сообщили, что твердость поверхности нержавеющей стали 316L (аналог 08X16H11M3), легированной лазером с использованием порошка карбида титана, составила около 280 HV [6]. В этом случае большая часть карбида титана находилась в больших кластерах, поэтому твердость вне кластеров показала лишь незначительное увеличение. В. AlMangour и соавторы отмечали, что армированные карбидом титана композиты из нержавеющей стали 316L были получены методом селективного лазерного плавления [7]. Твердость этих композитов была равной ~400 HV и на нее существенно влияли размер зерен карбида титана и плотность получаемых композитов.

Однако, несмотря на научный и практический интерес в научно-технической литературе мало информации о том, как условия лазерной обработки влияют на конечный результат, в частности на толщину диффузионного слоя и его микротвердость. Зачастую приходится экспериментально определять рациональные режимы лазерной обработки (ЛО), толщину предварительно нанесенной на поверхность образца легирующей обмазки, что, несомненно, увеличивает объем научно-исследовательской работы. Решить подобную задачу возможно путем проведения численного моделирования процесса лазерной обработки [8-11].

В связи с этим, целью работы являлась разработка геометрической и численной моделей, позволяющих установить изменение и распределение температуры по сечению металла в зоне взаимодействия лазерного импульса и слоя легирующей графитовой обмазки, нанесенной на поверхность нержавеющей стали.

## Методика проведения эксперимента

Согласно научным представлениям о лазерном импульсном легировании металлов и сплавов с заранее нанесенным на обрабатываемую поверхность слоем обмазки или другого вещества (светопроницающая смола), процесс модификации поверхности изделий из нержавеющей хромоникелевых сталей будет проходить в несколько стадий [12,13]. Схематично процесс лазерного легирования можно представить в виде геометрической модели, описывающей физические процессы в слое легирующей обмазки и в слое поверхности металлической основы (рис.1).

На каждой стадии будут проходить определенные изменения структуры и свойств системы «обмазка-металлическая основа»:

- на первой стадии (рис.1а) происходит распределение тепла, выделяемого лазерным излучением (1) в малом объеме пятна. Тепло частично уходит с конвекционным потоком (6) в окружающую среду, большая часть распределяется за счет теплопроводности (5), накапливается в слое легирующей обмазки (2) и нагревает металлическую основу (3);

- вторая стадия (рис.1б) характеризуется образованием ванны (8) расплава, в которой происходит перемешивание элементов системы «обмазка-основа» (легирующий элемент, минеральное масло, поверхностный слой металлической основы). Происходит диффузия (7) элементов расплава в область нагретого материала. За счет сверхбыстрого отвода тепла в металлическую основу происходят процессы частичной кристаллизации ванны расплава, что приводит к образованию модифицированного и диффузионно упрочненного слоев (9-10);

- третья стадия (рис.1в) заключается в образовании новых локально упрочненных участков основы, связанных с предыдущей областью обработки за счет коэффициента перекрытия пятен фокусировки;

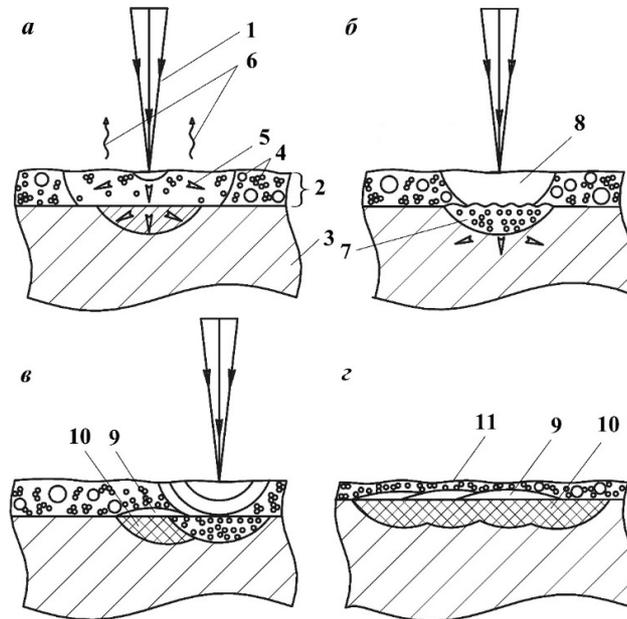
- четвертая или заключительная стадия (рис.1г) – на данном этапе происходит охлаждение системы до нормальной температуры и окончательное формирование модифицированного слоя и области структурных изменений.

При быстрой кристаллизации после лазерной обработки возможно появление ячеистых, ленточных и химически однородных микроструктур, а также «замораживание» выделенных новых метастабильных фаз, что способст-

вует изменению как качественных показателей, так и физико-механических характеристик обрабатываемого материала [14-17].

Разработанная геометрическая модель не противоречит известным данным и позволяет

наглядно представить наиболее важные стадии процесса модификации поверхности стали лазерным импульсным легированием, что особенно необходимо при разработке численной модели.



**Рис.1.** Схема процесса модификации поверхности лазерным импульсным легированием: *а* – стадия нагрева, *б* – стадия образования ванны расплава, *в* – стадия начала формирования диффузионных зон, *г* – стадия окончания формирования диффузионных зон (окончательной кристаллизации): 1 – лазерное излучение; 2 – слой обмазки; 3 – металлическая основа; 4 – частицы графита; 5 – распределение теплового потока; 6 – процессы конвекции; 7 – область диффузионных процессов; 8 – ванна расплава, состоящая из элементов обмазки и основы образца; 9 – модифицированный поверхностный слой; 10 – область структурных изменений, состоящая из диффузионного слоя и зоны термического воздействия; 11 – слой спеченной графитовой обмазки

**Fig.1.** Scheme of the process of surface modification by laser pulsed doping: *a* – stage of heating, *b* – stage of formation of a melt pool, *c* – stage of the beginning of formation of diffusion zones, *d* – stage of completion of formation of diffusion zones (final crystallization): 1 – laser radiation; 2 – a layer of coating; 3 – metal base; 4 – graphite particles; 5 – heat flow distribution; 6 – convection processes; 7 – area of diffusion processes; 8 – bath of melt, consisting of elements of the coating and the base of the sample; 9 – modified surface layer; 10 – area of structural changes, consisting of a diffusion layer and a heat-affected zone; 11 – a layer of sintered graphite coating

Указанная геометрическая модель процесса лазерного импульсного легирования в слое обмазки дополнялась, путем моделирования методом конечных элементов с использованием программы «Elcut 5.1». Решалась задача нестационарной теплопередачи для расчета переходного и установившегося температурного поля с учетом теплообмена элементов системы «окружающая среда-обмазка-основа».

Интерес представляли такие параметры, как распределение температуры во времени, температурный градиент и тепловой поток в зоне взаимодействия лазерного импульса и слоя графитовой обмазки. Указанные парамет-

ры необходимы для подтверждения гипотезы геометрической модели, а также для построения плана дальнейшего экспериментального исследования.

Для решения задачи нестационарной теплопередачи учитывались следующие данные и задавались граничные условия:

#### 1. Геометрические.

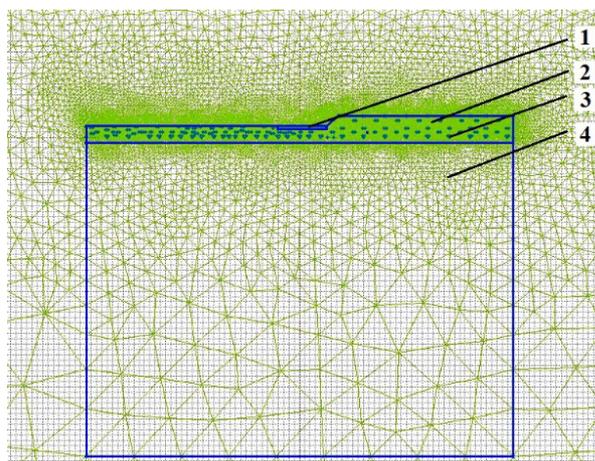
Геометрическая модель отображает опытный образец нержавеющей стали 12X18H10T толщиной 3 мм, диаметром 4 мм с нанесенной на поверхность графитовой обмазкой (ГОСТ 8295-73) толщиной  $250 \pm 25$  мкм. Образец рас-

положен в воздушной среде. Условно принято, что тепловой контакт у образца происходит только с воздухом. В модели рассматривалось ограниченное количество воздуха в виде круга, радиус которого составлял 15 мм.

Графитовая паста состоит из высоковязкого минерального масла и частиц графита (до 10 % от общего состава) дисперсностью 15-20 мкм. Условно обмазка задавалась как слой минерального масла с хаотично расположенными частицами графита. Объемная область тепловыделения от единичного лазерного импульса, сфокусированного в пятно диаметром 0,5 мм на слое обмазки (рис.2) задавалась в виде диска, имеющего диаметр лазерного пятна (0,5 мм). Толщину области тепловыделения (диска) задавали 20 мкм исходя из предположения, что графитовые частицы, известной дисперсности, создавали соответствующую шероховатость поверхности обмазки. При воздействии лазерного излучения, тепло будет выделяться на вершинах и впадинах поверхности обмазки. Объем тепловыделения исходя из этого составлял 0,003925 мм<sup>3</sup> и рассчитывался по формуле:

$$V = \pi \times (0,5 \times \varnothing_{\text{имп}})^2 \times 0,02. \quad (1)$$

После выделения элементов системы и задания их свойств строилась сетка конечных элементов.



**Рис.2.** Графическое представление лазерной модификации опытного образца: 1 – лазерный импульс, сфокусированный в пятно, 2 – высоковязкое минеральное масло легирующей обмазки, 3 – частицы графита, 4 – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т

**Fig.2.** Graphical representation of the laser modification of the prototype: 1 – laser pulse focused into a spot, 2 – high-viscosity mineral oil of the doping mixture, 3 – graphite particles, 4 – stainless steel 12Kh18N10T

## 2. Тепловыделение от лазерного излучения.

Тепловыделение в области 1 (рис.2) определялось согласно полученным данным зависимости энергии импульса ( $E$ , Дж) от напряжения лампы накачки установки для термофизической когерентной модификации поверхности LRS-50A. Длина волны излучения задавалась согласно характеристикам установки LRS-50 А и составляла 1,064 мкм.

Для экспериментального определения мощности и энергии лазерного излучения использовали прибор «Laserstar» от «OPHIR», Laser Measurement Group. При этом напряжение лампы накачки изменялось от 200 В до 500 В с шагом 25 В, а длительность импульса не изменялась и составляла 0,5 мс. Результаты измерения мощности и энергии импульса представлены в Табл.1.

Энергия импульса измерялась при форме импульса нормального распределения Гаусса. Согласно теореме Гаусса нормального распределения, полученные значения энергии импульса пересчитывались в объем плотности тепловыделения Вт/м<sup>3</sup> по формуле:

$$Q = a \cdot \exp\left(\frac{-\tau^2}{b}\right), \quad (2)$$

где:  $a$  – максимальное значение энергии импульса, рассчитываем в виде Вт/м<sup>2</sup> – если задаем через ребро или в виде Вт/м<sup>3</sup>;  $b$  – смещение относительно нуля, принимаем равным 0;  $\tau$  – величина характеризующая длительность импульса гаусса, при моделировании установлено, что  $\tau =$  половине длительности импульса.

При задании объемного тепловыделения учитывались реальные значения энергии импульса установки (0,08 Дж) при напряжении лампы накачки 250 В (минимальный режим, при котором визуально наблюдались изменения морфологии поверхности), 0,92 Дж при напряжении лампы накачки 400 В (режим с наиболее качественной равномерно распределенной структурой поверхности) и 1,34 при напряжении 450 В (режим, при котором обрабатываемая поверхность сильно оплавилась).

## 3. Длительность процесса теплораспределения от единичного импульса.

Длительность импульса на установке при обработке и моделировании составляла 0,005 с. При моделировании лазерной обработки время распределения тепла ограничивалось 0,03 с, т.к. при этом происходит охлаждение всей системы до нормальной температуры, решение задачи проводилось с шагом 0,0001 с.

Таблица 1. Среднестатистические результаты измерения величины энергии импульса

Table 1. Average statistical results of pulse energy measurements

Диаметр пятна фокусировки, мм	Напряжение лампы накачки U, В	Энергия импульса, Дж	Мощность, Вт
0,5	200	—*	0
0,5	225	—*	0
0,5	250	0,08	160
0,5	275	0,2	400
0,5	300	0,31	620
0,5	325	0,42	840
0,5	350	0,59	1180
0,5	375	0,76	1520
0,5	400	0,92	1840
0,5	425	1,14	2280
0,5	450	1,34	2680
0,5	475	1,6	3200
0,5	500	1,84	3680

\*Примечание: на данных образцах не хватило чувствительности прибора.

4. Теплофизические свойства системы «нержавеющая сталь 12Х18Н10Т + частицы графита + высоковязкое минеральное масло + воздух».

Известно, что свойства обмазки и изделия изменяются в результате нагрева. Соответственно при моделировании процесса можно задать их среднюю величину в выбранном температурном диапазоне. В нашем случае обработка проводилась на воздухе без использования каких-либо защитных газовых сред. Следовательно, при построении модели необходимо учитывать удельную теплоемкость  $C$  (Дж/кг·К),

коэффициент теплопроводности  $\lambda$  (Вт/м·К), плотность  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) всех элементов системы, а именно стали, воздуха, слоя обмазки состоящего из масла и графита.

Приведенные характеристики задавались согласно справочным данным (Табл.2,3) [18, 19].

Теплофизические свойства обмазки задавались комплексно, то есть отдельно задавались свойства основы графитовой пасты (минерального масла) и добавочного компонента (графита).

Таблица 2. Теплофизические свойства нержавеющей стали 12Х18Н10Т

Table 2. Thermophysical properties of stainless steel 12Kh18N10T

Температура	Коэффициент температуропроводности	Коэффициент теплопроводности	Плотность	Удельная теплоемкость	Удельное электрическое сопротивление
$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha \times 10^6, 1/\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \times \text{C})$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$C, \text{Дж}/(\text{кг} \times \text{C})$	$\rho_{эл} \times 10^9, \text{Ом} \times \text{м}$
20		15	7900		725
100	16.6	16	—	462	792
200	17.0	18	—	496	861
300	17.2	19	—	517	920
400	17.5	21	—	538	976
500	17.9	23	—	550	1028
600	18.2	25	—	563	1075
700	18.6	27	—	575	1115
800	18.9	26	—	596	—
900	19.3	—	—	—	—

Таблица 3. Теплофизические свойства графита

Table 3. Thermophysical properties of graphite

Т, К	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/К·м	Удельная теплоемкость $C$ , Дж/кг·К
100	414	139
120	–	185
150	–	268
200	375	417
250	–	567
300	335	714
400	296	1000
500	237	1230
600	217	1390
700	197	1510
800	158	1630
900	138	1710
1000	132	1790
1100	120	1860
1200	114	1900
1300	110	1940
1400	106	1980
1500	105	2020
1600	103	2040
1700	101	2060
1800	–	2080
1900	–	2090
2000	–	2100

Условно в модели весь объем графитовой пасты был разделен на 2 блока. Учитывались теплофизические свойства компонентов пасты до и в момент воздействия лазерного импульса. В частности, коэффициент теплопроводности  $\lambda$  минерального масла до импульсного воздействия равнялся 2 (Вт/К·м), удельная теплоемкость  $C=1400$  (Дж/кг·К), значение плотности  $\rho$  составляло 1000 (кг/м<sup>3</sup>). В момент воздействия лазерного импульса на обрабатываемую поверхность показатели задавались следующие:  $\lambda=9$  (Вт/К·м),  $C=1800$  (Дж/кг·К),  $\rho=1700$  (кг/м<sup>3</sup>).

Учитывались также и теплофизические свойства воздуха, значения которого имели следующий вид:  $\lambda=0,024$  (Вт/К·м),  $C=1005$  (Дж/кг·К),  $\rho=1,16$  (кг/м<sup>3</sup>).

##### 5. Распределение тепла по границам элементов системы.

Для корректного решения задачи учитывалось распределение тепла на границах элементов, а также тепловые потери в результате конвекции и радиации (излучения).

Принималось, что граница воздуха имеет стационарную температуру, равную 0. Поскольку движение воздуха не рассматривалось, то на границе «металл-воздух» конвекция не задавалась. Согласно известным литературным данным металл не должен прогреваться до температур свыше 500 °С, соответственно доля теплотеря на излучение равнялась 0. На границе металл-обмазка не предусмотрено наличие зазора, соответственно конвекция и излучение в данном случае не учитывались. Заслуживает внимания граница поверхности пятна тепловыделения и воздуха в момент воздействия лазерного импульса, где теплотери были учтены. Коэффициент излучения (черноты) при этом составил  $\beta=0,7$ , а коэффициент конвекции  $\alpha=1$  Вт/К·м<sup>2</sup>.

После построения модели, задания свойств, проводилось решение нестационарной теплопередачи при условии постоянной мощности  $Q$ , выделяющейся на поверхности по формуле:

$$T(z,t) = \frac{2}{\lambda} \sqrt{a \times t} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \times \exp\left(-\frac{z}{\sqrt{a \times t}}\right) - \frac{z}{2\sqrt{a \times t}} \left[ 1 - \Phi\left(\frac{z}{2\sqrt{a \times t}}\right) \right] \right\} \times Q, \quad (3)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $z$  – глубина проникновения;  $\Phi$  – интеграл Гаусса;  $\lambda$  – теплопроводность,  $t$  – длительность.

С целью подтверждения результатов численного моделирования, согласно известной методике, описанной в работе [20], проводилось лазерное легирование образцов из нержавеющей хромоникелевой стали 12X18H10T в слое обмазки из графитовой пасты.

Из модифицированных образцов были изготовлены поперечные микрошлифы. Проводились исследования микроструктуры поверхностного слоя стали, а именно при помощи оптической системы микротвердомера «ПМТ-3М» определялись границы модифицированного поверхностного слоя, слоя закалки и основы стали. Микротвердость измерялась с использованием микротвердомера ПМТ-3М с индентором Виккерса при нагрузке 0,9807 N (ISO 6507-1:2005).

Для определения влияния легирующей обмазки на структурные изменения проводился ЭРДФА на электронном микроскопе "MIRA II LMU" с детектором "INCA PentaFETx3".

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводился с помощью дифрактометра «ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific)» ЦКП «НОЦ нанотехнологий и наноматериалов» СГТУ им. Гагарина Ю.А. при  $\text{Cu-K}\alpha$ -излучения ( $\lambda = 0,15412$  нм) в диапазоне углов  $2\Theta$  (5-90 град.) и библиотеки международных электронной базы дифракционных стандартов COD-Inorg Rev248644 от 03.03.2020 в программе Match Version 1.11.

### Результаты исследования и их анализ

В результате решения задачи нестационарной теплопередачи при режиме 400\_0,5, где 400 – напряжение лампы накачки (В), 0,5 – диаметр сфокусированного в пятно лазерного импульса (мм), были получены данные распределения температуры по сечению образца в разный момент времени. Согласно полученным результатам поверхность образца нагревается до  $1800 \pm 25$  °C на глубину 10 мкм за 0,0025 с, до  $1350 \pm 10$  °C на глубину 50 мкм за 0,0027 с, до  $950 \pm 10$  °C на глубину 100 мкм за

0,0032 с, до  $650 \pm 10$  °C на глубину 150 мкм за 0,004 с.

Кинетика нагрева стального образца в начальный момент воздействия лазерного импульса представлена на рис.3.

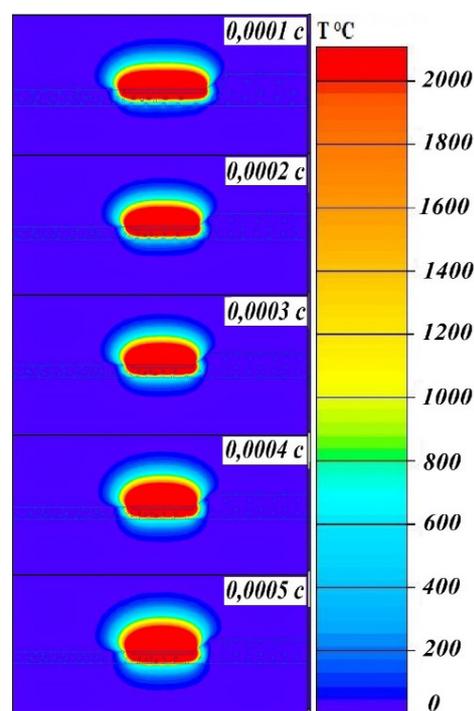
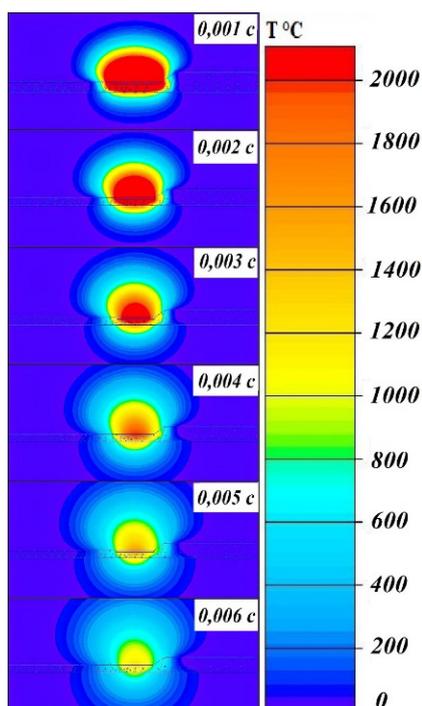


Рис.3. Модель нагрева обрабатываемого участка единичным лазерным импульсом

Fig.3. Model of heating the treated area by a single laser pulse

Цветная карта показывает изменение во времени выбранной физической величины – распределения температуры нагрева. Согласно полученным результатам моделирования отчетливо визуализируется влияние длительности импульса на величину нагрева поверхности. Так, показано, что заданного в ходе эксперимента значения длительности импульсного воздействия 0,5 мс достаточно для расплавления легирующей обмазки и начала нагрева поверхности стального образца до температуры  $1050 \pm 25$  °C на глубину  $10 \pm 2$  мкм.

Более интенсивный нагрев поверхности отмечен спустя 0,5 мс после окончания воздействия лазерного импульса. Однако уже через 0,001 с наблюдается резкое охлаждение системы «обмазка-образец» (рис.4).



**Рис.4.** Модель охлаждения обрабатываемого участка после воздействия единичным лазерным импульсом

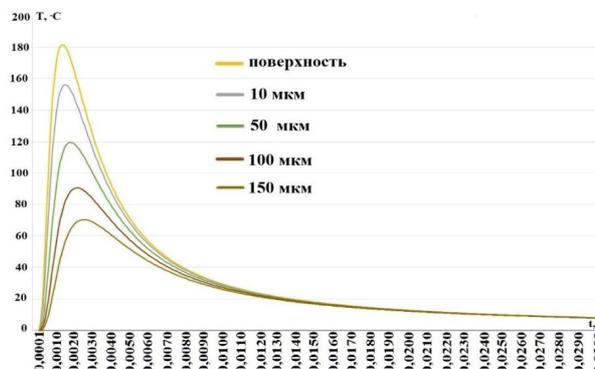
**Fig.4.** Model of cooling of the treated area after exposure to a single laser pulse

Следует отметить, что охлаждение поверхности с нанесенной графитовой обмазкой обусловлена как кратковременным воздействием высококонцентрированного источника тепловыделения, так и отводом тепла в глубь основы образца. На данном этапе зафиксирована максимальная глубина проплавления поверхности стали, составляющая до 10 мкм, где температура достигает  $1600 \pm 50$  °С, что на 200 °С превышает температуру плавления сплава 12Х18Н10Т. Кроме того, построенная модель показала, что временной интервал 0,002-0,004 с характеризуется максимальным по глубине (до 200 мкм) нагревом материала образца до  $1000 \pm 50$  °С.

По полученным результатам решения нестационарной теплопередачи режима 250\_0,5 (0,08 Дж), построены 5 кривых зависимости нагрева поверхностного слоя стали от времени (рис.5).

При данном режиме лазерной обработки образцов с обмазкой, согласно полученным зависимостям, поверхность стали прогревается до температур, не превышающих  $180 \pm 10$  °С, что соответствует значениям температур традиционного низкого отпуска. Опираясь на по-

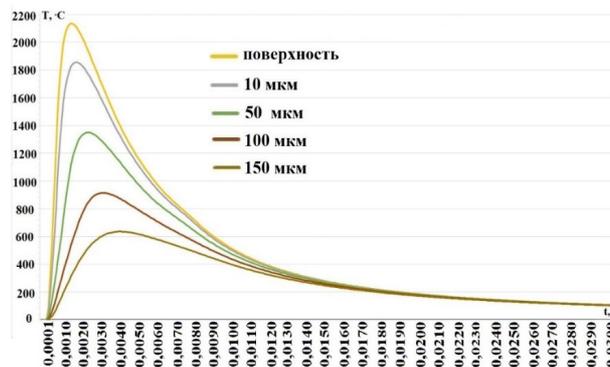
лученные данные, было установлено пороговое (начальное) значение напряжения лампы накачки для проведения экспериментального исследования лазерного импульсного легирования.



**Рис.5.** Зависимость глубины нагрева поверхности стали от температуры воздействия лазерного импульса при напряжении лампы накачки 250 В

**Fig.5.** Dependence of the depth of heating of the steel surface on the temperature of the laser pulse at a pump lamp voltage of 250 V

Решение нестационарной теплопередачи режима 400\_0,5 (0,92 Дж), также позволило получить данные распределения температуры по сечению образца в разный момент времени (рис.6).



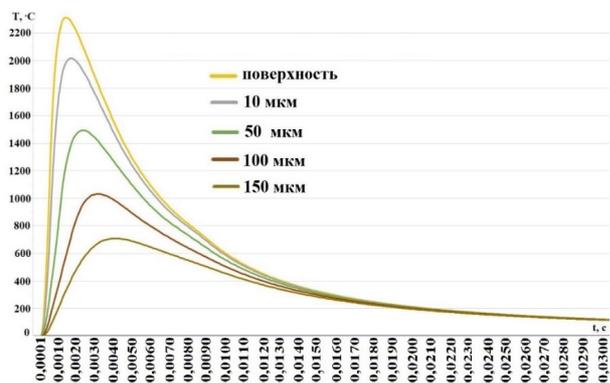
**Рис.6.** Зависимость глубины нагрева поверхности стали от температуры воздействия лазерного импульса при напряжении лампы накачки 400 В

**Fig.6.** Dependence of the depth of heating of the steel surface on the temperature of the action of a laser pulse at a pump lamp voltage of 400 V

Согласно модели было установлено, что в результате лазерного импульсного легирования при энергии импульса 0,92 Дж (напряжение лампы накачки 400 В) стальная основа нагреется на глубину до 10 мкм до температуры

1600±50 °С. Данная температура соответствует температуре плавления стали, равной 1400 °С. Известно, что диффузионные процессы в сталях интенсивно протекают при температурах свыше 600 °С. Результаты моделирования показали, что сталь нагревается до температуры 800-950 °С на глубину 100 мкм, следовательно на данной глубине будут активно протекать процессы диффузии. Согласно полученной модели, стальная основа нагревается до температур 600-650 °С на глубину 150 мкм, что соответствует температуре высокого отпуска, при котором наблюдаются изменения кристаллической структуры.

Моделирование теплопроводности системы «обмазка-основа» при напряжении лампы накачки 450 В также позволило получить распределение температуры по времени на различной глубине поверхностного слоя стали (рис.7).



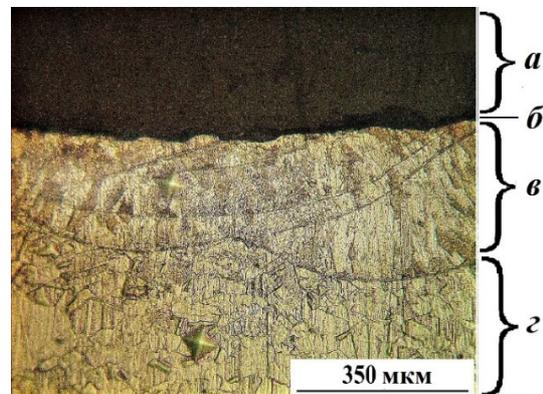
**Рис.7.** Зависимость глубины нагрева поверхности стали от температуры воздействия лазерного импульса при напряжении лампы накачки 450 В

**Fig.7.** Dependence of the depth of heating of the steel surface on the temperature of the laser pulse at a pump lamp voltage of 450 V

Графические данные, описывающие кинетику нагрева системы при данном режиме, показали, что обрабатываемая поверхность глубиной до 10 мкм нагревается до 2000±25 °С, что существенно превышает температуру плавления стали 12Х18Н10Т. На глубину 50 мкм поверхность стали нагреется до 1500±25 °С, что также соответствует критическому значению температур для обрабатываемого материала. Установлено, что температура поверхностного слоя стали глубиной от 100 до 150 мкм, варьирует в диапазоне 700-1050±25 °С, что соответствует теплофизическим условиям протекания диффузионных процессов. Исходя из полученных результатов моделирования лазерного импульсного легирования, следует, что при

напряжении лампы накачки 450 В процессы насыщения поверхностного слоя стали элементами обмазки возможны на глубину 150 мкм. Однако в виду оплавления поверхности последующее повышение напряжения лампы накачки считается нецелесообразным и данный режим можно считать предельным, позволяющим осуществлять импульсное легирование в слое графитовой пасты.

Установлено соответствие между результатами численного моделирования и полученными экспериментальными данными структурного анализа поперечных микрошлифов, где отчетливо визуализируются границы модифицированного поверхностного слоя и зоны термического воздействия (рис.8).



**Рис.8.** Микроструктура поверхности образца после лазерной обработки при напряжении лампы накачки 400 В и диаметре пятна фокусировки 0,5 мм, где *a* – эпоксидная смола; *b* – модифицированный слой; *c* – зона термического воздействия; *d* – основа стали (поле зрения 800 мкм)

**Fig.8.** The microstructure of the sample surface after laser treatment at a pump lamp voltage of 400 V and a focusing spot diameter of 0.5 mm, where *a* – epoxy resin; *b* – modified layer; *c* – heat-affected zone; *d* – steel base (field of view 800 μm)

По результатам исследования микроструктуры подготовленных микрошлифов установлено, что в результате лазерной обработки для всех серий образцов характерно формирование модифицированного поверхностного слоя, толщина которого варьирует в диапазоне 2-10 мкм в зависимости от режимов ЛО. В зависимости от температурных условий в поверхностном слое обрабатываемой стали могут протекать структурные изменения по алгоритму закалки, отпуска или отжига. Также выявлено образование диффузионного слоя, характер которого представлен в таблице 4.

**Таблица 4.** Влияние режимов ЛО опытных образцов нержавеющей стали 12Х18Н10Т на толщину и микротвердость диффузионного слоя

**Table 4.** Influence of the LO modes of the prototype samples of 12Kh18N10T stainless steel on the thickness and microhardness of the diffusion layer

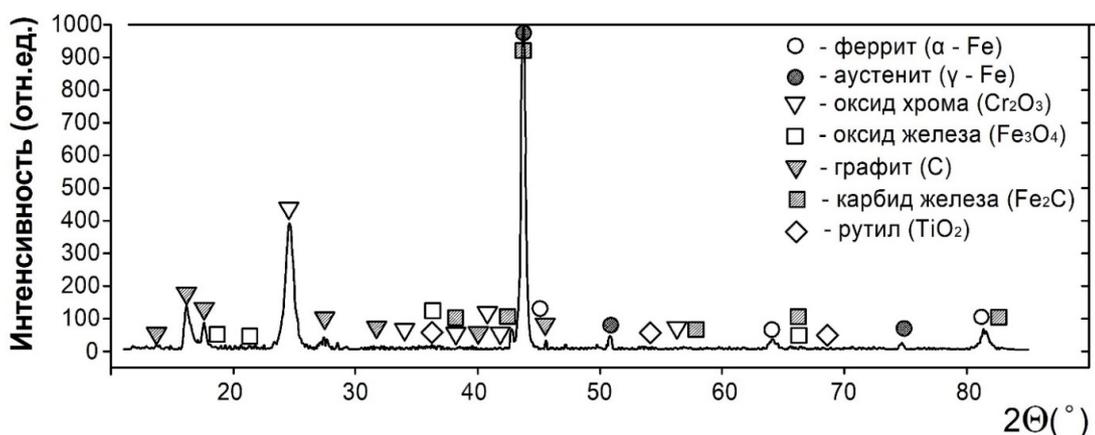
Режим ЛО		Толщина зоны термического воздействия, h (μm)	Микротвердость	
d, мм	U, В		HV	H, GPa (±0,1)
контрольный		–	174	1,7
0,5	250	130±5	293	2,87
	300	150±5	286	2,79
	350	165±5	453	4,48
	400	185±5	503	4,93
	450	210±5	564	5,56
1	250	110±5	381	3,74
	300	125±5	270	2,64
	350	140±5	341	3,33
	400	160±5	312	3,06
	450	170±5	302	2,96

Протекание диффузионных процессов на глубине до 250 мкм подтверждается также и результатами растровой электронной микроскопии (РЭМ). Анализ элементного состава модифицированного слоя показал наличие в исследуемой области С, О, Al, Si, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, которые распределены по глубине сплава неравномерно.

С целью определения структурного состояния модифицированной поверхности об-

разцов стали, выяснения причины и возможности повышения физико-механических характеристик был проведен рентгенофазовый анализ.

РФА показал, что после предварительной воздушно-абразивной обработки и последующей ЛО с использованием графитовой пасты в качестве легирующей обмазки в приповерхностном слое стали 12Х18Н10Т содержится аустенит (γ-Fe) и феррит (α-Fe) что похоже на исходную сталь (рис.9) [21-24].



**Рис.9.** Дифрактограмма поверхностного слоя образца стали 12Х18Н10Т, прошедшего ЛО

**Fig.9.** X-ray diffraction pattern of the surface layer of a steel sample 12Kh18N10T, passed through LO

В результате обработки сформировалась фаза карбида железа Fe<sub>2</sub>C, что является показателем термической обработки. Установлено наличие фазы графита. Зафиксировано наличие оксида железа Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, оксида хрома Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ру-

тила (TiO<sub>2</sub>), что косвенно говорит о нагреве металла в среде с содержанием кислорода – т.е. о протекании процесса оксидирования. При этом рутил – это высокотемпературный оксид, который образуется после нагрева титана на воздухе

при температуре 850 °С, следовательно, поверхность образца нагревалась свыше указанной температуры, что подтверждает построенная компьютерная модель.

Согласно полученным данным, следует, что в результате ЛО произошли процессы цементации и окисления поверхности, что позволило получить в поверхностном слое стали смесь карбида железа и высокопрочных оксидов. Выдвинутое предположение косвенно объясняет увеличение микротвердости модифицированной поверхности.

По интенсивности пиков с учетом ЭРДФА содержания в модифицированной поверхности выявленных фаз установлено, что основную его долю составляют оксид хрома  $Cr_2O_3$  и  $\alpha$ -Fe.

### Выводы

Согласно выдвинутой гипотезе и известным результатам исследования процесса лазерного импульсного легирования поверхности металлов и сплавов с нанесенной на нее обмазкой построена схематическая модель, описывающая физические процессы, протекающие в структуре нержавеющей стали в момент воздействия лазерных импульсов.

Проведенное численное моделирование процесса лазерного импульсного легирования способствовало определению того, на какую глубину, до какой температуры, и за какое время прогреется поверхностный слой металл основы при различных режимах лазерной обработки. В частности, моделирование показало, что при напряжении лампы накачки 250 В, диаметре пятна фокусировки 0,5 мм и длительности импульса 0,5 мс поверхность стали нагревается до температур, не превышающих  $180 \pm 10$  °С, что соответствует значениям температур традиционного низкого отпуска. При напряжении 400 В и длительности импульсного воздействия 0,5 мс на стали образуется область структурных изменений глубиной 150 мкм, диффузионный слой до 100 мкм и упрочненный модифицированный поверхностный слой толщиной до 10 мкм. Напряжение лампы накачки 450 В при лазерном импульсном легировании приводит к существенному оплавлению поверхности стали и образованию неоднородности ее структуры.

Моделированием тепловых процессов подтверждена выдвинутая гипотеза о возможности формирования в результате лазерного им-

пульсного легирования нержавеющей стали в слое графитовой обмазки модифицированного поверхностного слоя с диффузионным слоем и зоной термического воздействия, характеризующейся изменениями объемной структуры.

Оптическое исследование микроструктуры показало формирование диффузионного приповерхностного слоя, толщиной до 200 мкм в зависимости от режимов ЛО, что в определенной степени отождествляется с результатами численного моделирования. Установлено, что микротвердость в сформированном слое, в ряде случаев, более чем в два раза превосходит значение микротвердости стальной основы. Диффузию элементов в обрабатываемую поверхность подтверждает совокупность элементного и рентгенофазового анализов.

Таким образом, установлено соответствие между результатами численного моделирования и полученными экспериментальными данными.

Полученные модели позволят установить изменение и распределение температуры по сечению металла в зоне взаимодействия лазерного импульса и слоя легирующей графитовой обмазки, нанесенной на поверхность нержавеющей стали.

### Список литературы

1. Martínez S., Lamikiz A., Ukar E., Calleja A., Arrizubieta J.A., de Lacalle L.L. Analysis of the regimes in the scanner-based laser hardening process // *Optics and Lasers in engineering*. 2017. V. 90. P. 72–80.
2. Moradi M., Arabi H., Nasab S.J., Benyounis K.Y. A comparative study of laser surface hardening of AISI 410 and 420 martensitic stainless steels by using diode laser // *Optics & Laser Technology*. 2019. V. 111. P. 347–357.
3. Gestwa W. The Influence of Composition Chemical of Nanofluids on Hardness and Wear Resistance of Laser-Treated C20 Steel // *Advances in Manufacturing*. 2018. P. 641–650.
4. Piasecki A., Kotkowiak M., Makuch N., Kulka M. Wear behavior of self-lubricating boride layers produced on Inconel 600-alloy by laser alloying // *Wear*. 2019. V. 426. P. 919–933.
5. Yamaguchi T., Hagino H. Formation of a titanium-carbide-dispersed hard coating on austenitic stainless steel by laser alloying with a light-transmitting resin // *Vacuum*. 2018. V. 155. P. 23–28.

6. Laroudie F., Tassin C., Pons M. Hardening of 316L stainless steel by laser surface alloying // *J. Mater. Sci.* 1995. 30. P. 3652–3657.
7. AlMangour B., Grzesiak D., Yang J. In-situ formation of novel TiC-particle-reinforced 316L stainless steel bulk-form composites by selective laser melting // *J. Alloy. Comp.* 2017. 706. P. 409–418.
8. Anandan S., Pityana S., Majumdar J.D. Structure–property–correlation in laser surface alloyed AISI 304 stainless steel with WC+ Ni+ NiCr // *Materials Science and Engineering: A.* 2012. V. 536. P. 159–169.
9. Zhong M., Liu W., Zhang H. Corrosion and wear resistance characteristics of NiCr coating by laser alloying with powder feeding on grey iron liner // *Wear.* 2006. V. 260, N 11 P. 12. P. 1349–1355.
10. Majumdar J.D. Development of wear resistant composite surface on mild steel by laser surface alloying with silicon and reactive melting // *Materials Letters.* 2008. V. 62, N 27. P. 4257–4259.
11. Kruth J.P., Levy G., Klocke F., Childs T.H.C. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing // *CIRP annals.* 2007. V. 56, N 2. P. 730–759.
12. Nyoungh-Keun Lee Laser cladding with Al-36% Si powder paste on A319 Al alloy surface to improve wear resistance // *Journal of Welding and Joining.* 2017. V. 35, N 2. P. 58–62.
13. Ким В.А., Башков О.В., Сатаева И.В. Локальное лазерное легирование нержавеющей стали 12Х18Н10Т // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.* 2016. Т. 1, № 2. С. 64–70.
14. Галенко П.К., Харанжевский Е.В., Данилов Д.А. Высокоскоростная кристаллизация конструкционной стали при лазерной обработке поверхности // *Журнал технической физики.* 2002. Т. 72, № 5. С. 48–55.
15. Sahoo C.K., Masanta M. Effect of pulse laser parameters on TiC reinforced AISI 304 stainless steel composite coating by laser surface engineering process // *Optics and Lasers in Engineering.* 2015. V. 67. P. 36–48.
16. Ким В.А. и др. Лазерное упрочнение углеродистой стали У10 // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.* 2018. Т. 1, № 2. С. 75–82.
17. Проскуряков В.И., Родионов И.В. Исследование изменения износостойкости поверхности нержавеющей стали, полученной лазерным импульсным легированием в слое обмазки // *Известия Волгоградского государственного технического университета.* 2021. № 6. С. 61–65.
18. Станкус С.В., Савченко И.В., Багинский А.В., Верба О.И., Прокопьев А.М., Хайрулин Р.А. Коэффициенты теплопроводности нержавеющей стали 12Х18Н10Т в широком интервале температур // *Теплофизика высоких температур.* 2008. Т. 46, № 5. С. 795–797.
19. Станкус С.В. и др. Теплофизические свойства графита МПГ-6 // *Теплофизика высоких температур.* 2013. Т. 51, № 2. С. 205–209.
20. Проскуряков В.И., Родионов И.В. Лазерное импульсное легирование коррозионно-стойкой хромоникелевой стали 12Х18Н10Т с использованием графитовой пасты // *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2020. Т. 16, № 5(185). С. 224–228.
21. Вологжанина С.А., Иголкин А.Ф., Петкова А.П. Исследование влияния низких температур и деформаций на свойства аустенитной стали 12Х18Н10Т // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки.* 2019. Т. 25, № 4. С. 83–93.
22. Проскуряков В.И., Родионов И.В. Формирование состава и характеристик поверхности хромоникелевой стали 12Х18Н10Т при лазерном модифицировании в слое экспериментальной легирующей обмазки // *Журнал технической физики.* 2022. Т. 92, В. 1. С. 84–91.
23. Proskuryakov V.I., Rodionov I.V. Changes in the Surface Characteristics of 12Kh18N10T Steel after Laser Modification in a Graphite Paste Layer Containing Titanium Dioxide Nanoparticles // *Technical Physics Letters.* V. 47, N 5. 2021. P. 527–531.
24. Proskuryakov V., Rodionov I., Borodina S. The effect of graphite coating on the composition, structure and microhardness of the surface of structural chromiumnickel steel during laser pulse processing // *Journal of Physics: Conference Series.* 2020. V. 1695. P. 012069.

#### Информация об авторах

В. И. Проскуряков – аспирант Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

И. В. Родионов – доктор технических наук, профессор Саратовского государственного

технического университета имени Гагарина Ю.А.

В. А. Кошуро – кандидат технических наук, доцент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

И. В. Перинская – кандидат технических наук, доцент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Л. Е. Куц – кандидат технических наук, доцент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

### References

- Martínez, S., Lamikiz, A., Ukar, E., Calleja, A., Arrizubieta, J. A. & de Lacalle, L. L. (2017). Analysis of the regimes in the scanner-based laser hardening process. *Optics and Lasers in engineering*, 90, 72–80.
- Moradi, M., Arabi, H., Nasab, S. J. & Benyounis, K. Y. (2019). A comparative study of laser surface hardening of AISI 410 and 420 martensitic stainless steels by using diode laser. *Optics & Laser Technology*, 111, 347–357.
- Gestwa, W. (2018). The Influence of Composition Chemical of Nanofluids on Hardness and Wear Resistance of Laser-Treated C20 Steel. *Advances in Manufacturing*, 641–650.
- Piasecki, A., Kotkowiak, M., Makuch, N. & Kulka, M. (2019). Wear behavior of self-lubricating boride layers produced on Inconel 600-alloy by laser alloying. *Wear*, 426, 919–933.
- Yamaguchi, T. & Hagino, H. (2018). Formation of a titanium-carbide-dispersed hard coating on austenitic stainless steel by laser alloying with a light-transmitting resin. *Vacuum*, 155, 23–28.
- Laroudie, F., Tassin, C. & Pons, M. (1995). Hardening of 316L stainless steel by laser surface alloying. *J. Mater. Sci.*, 30, 3652–3657.
- AlMangour, B., Grzesiak, D. & Yang, J. (2017). In-situ formation of novel TiC-particle-reinforced 316L stainless steel bulk-form composites by selective laser melting. *J. Alloy. Comp.*, 706, 409–418.
- Anandan, S., Pityana, S. & Majumdar, J. D. (2012). Structure–property–correlation in laser surface alloyed AISI 304 stainless steel with WC+ Ni+ NiCr. *Materials Science and Engineering: A*, 536, 159–169.
- Zhong, M., Liu, W. & Zhang, H. (2006). Corrosion and wear resistance characteristics of NiCr coating by laser alloying with powder feeding on grey iron liner. *Wear*, 11(260), 1349–1355.
- Majumdar, J. D. (2008). Development of wear resistant composite surface on mild steel by laser surface alloying with silicon and reactive melting. *Materials Letters*, 27(62), 4257–4259.
- Kruth, J. P., Levy, G., Klocke, F. & Childs, T. H. C. (2007). Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP annals*, 2(56), 730–759.
- Hyoungh-Keun, Lee (2017). Laser cladding with Al-36% Si powder paste on A319 Al alloy surface to improve wear resistance. *Journal of Welding and Joining*, 2(35), 58–62.
- Kim, V. A., Bashkov, O. V. & Satayeva, I. V. (2016). Lokal'noye lazernoye legirovaniye nerzhavayushchey stali 12KH18N10T. *Uchenyye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2(1), 64–70. (In Russ.).
- Galenko, P. K., Kharanzhevskiy, E. V. & Danilov, D. A. (2002). Vysokoskorostnaya kristallizatsiya konstruktsionnoy stali pri lazernoy obrabotke poverkhnosti. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 5(72), 48–55. (In Russ.).
- Sahoo, C. K. & Masanta, M. (2015). Effect of pulse laser parameters on TiC reinforced AISI 304 stainless steel composite coating by laser surface engineering process. *Optics and Lasers in Engineering*, 67, 36–48. (In Russ.).
- Kim, V. A. et. al. (2018). Lazernoye uprochneniye ughlerodistoy stali U10. *Uchenyye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2(1), 75–82. (In Russ.).
- Proskuryakov, V. I. & Rodionov, I. V. (2021). Issledovaniye izmeneniya iznosostoykosti poverkhnosti nerzhavayushchey stali, poluchennoy lazernym impul'snym legirovaniyem v sloye obmazki. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 6, 61–65. (In Russ.).
- Stankus, S. V., Savchenko, I. V., Baginskiy, A. V., Verba, O. I., Prokop'yev, A. M. & Khayrulin, R. A. (2008). Koeffitsiyenty teploprovodnosti nerzhavayushchey stali 12KH18N10T v shirokom intervale temperatur. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 5(46), 795–797. (In Russ.).
- Stankus, S. V. et. al. (2013). Teplofizicheskiye svoystva grafita MPG-6.

*Teplofizika vysokikh temperatur*, 2(51), 205–209. (In Russ.).

20. Proskuryakov, V. I. & Rodionov, I. V. (2020). Lazernoye impul'snoye legirovaniye korrozionnostoykoy khromonikelevoy stali 12KH18N10T s ispol'zovaniyem grafitovoy pasty. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya*, 5(185), 224–228. (In Russ.).

21. Vologzhanina, S. A., Igolkin, A. F. & Petkova, A. P. (2019). Issledovaniye vliyaniya nizkikh temperatur i deformatsiy na svoystva auste-nitnoy stali 12KH18N10T. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki*, 4(25), 83–93. (In Russ.).

22. Proskuryakov, V. I. & Rodionov, I. V. (2022). Formirovaniye sostava i kharakteristik poverkhnosti khromonikelevoy stali 12KH18N10T pri lazernom modifitsirovani v sloye eksperimental'noy legiruyushchey obmazki. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1(92), 84–91. (In Russ.).

23. Proskuryakov, V. I. & Rodionov, I. V. (2021). Changes in the Surface Characteristics of 12Kh18N10T Steel after Laser Modification in a Graphite Paste Layer Containing Titanium Dioxide

Nanoparticles. *Technical Physics Letters*, 5(47), 527–531.

24. Proskuryakov, V., Rodionov, I. & Borodina, S. (2020). The effect of graphite coating on the composition, structure and microhardness of the surface of structural chromiumnickel steel during laser pulse processing. *Journal of Physics: Conference Series*, 1695, 012069.

#### **Information about the authors**

*V. I. Proskuryakov – Postgraduate Student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.*

*I. V. Rodionov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.*

*V. A. Koshuro – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.*

*I. V. Perinskaya – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.*

*L. E. Kuts – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, 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 30.03.2022; одобрена после рецензирования 07.04.2022; принята к публикации 14.04.2022.

The article was received by the editorial board on 30 Mar. 22; approved after reviewing on 07 Apr. 22; accepted for publication on 14 Apr. 22.