

## SIMULATION OF THERMAL FIELDS AND THERMAL CYCLE DURING PULSED LASER PROCESSING OF METALS AND ALLOYS

E. A. Tyapunova <sup>a</sup>, A. A. Vasilyev <sup>b</sup>, R. S. Esipov <sup>c</sup>, A. R. Khaitkulov <sup>d</sup>, K. N. Ramazanov <sup>e</sup>

*Ufa State Aviation Technical University (UGATU)*

<sup>a</sup> roza.smitt@mail.ru, <sup>b</sup> arsentiy.vasilev.00@mail.ru, <sup>c</sup> esromles@mail.ru,  
<sup>d</sup> alanfrutis4@gmail.com, <sup>e</sup> kamram@rambler.ru

*Submitted 2022, October 30*

**Abstract.** The article presents a two-dimensional computer model of thermal fields and thermal cycle during pulsed laser heating of the surface of metals and alloys in the COMSOL Multiphysics® software environment. In the calculation model, various heat-exchange boundary conditions and thermophysical properties of the material, which depend on temperature, were used for more accurate prediction of the temperature field and thermal cycle. The simulation was carried out by the finite element method. The developed model makes it possible to predict the heating temperature of the material at any point in space, as well as to select the modes of laser pulse processing.

**Keywords:** laser processing; laser nitriding; modeling; thermal field; laser treatment; laser nitriding; modeling; thermal field; thermal cycle.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ И ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Е. А. Тяпунова <sup>а</sup>, А. А. Васильев <sup>б</sup>, Р. С. Есипов <sup>в</sup>, А. Р. Хаиткулов <sup>г</sup>, К. Н. Рамазанов <sup>д</sup>

*ГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)*

<sup>а</sup> roza.smitt@mail.ru, <sup>б</sup> arsentiy.vasilev.00@mail.ru, <sup>в</sup> esromles@mail.ru,  
<sup>г</sup> alanfrutis4@gmail.com, <sup>д</sup> kamram@rambler.ru

*Поступила в редакцию 30.10.2022*

**Аннотация.** Представлена двумерная компьютерная модель тепловых полей и термического цикла при лазерном импульсном нагреве поверхности металлов и сплавов в программной среде COMSOL Multiphysics®. В расчетной модели использовались различные теплообменные граничные условия и теплофизические свойства материала, зависящие от температуры, для более точного прогнозирования температурного поля и термического цикла. Моделирование проводилось методом конечных элементов. Разработанная модель позволяет прогнозировать температуру нагрева материала в любой точке пространства, а также осуществлять подбор режимов лазерной импульсной обработки.

**Ключевые слова:** лазерная обработка; лазерное азотирование; моделирование; тепловое поле; лазерное лечение; лазерное азотирование; моделирование; тепловое поле; тепловой цикл.

## ВВЕДЕНИЕ

В современном производстве изготовление деталей машин и механизмов, работающих в условиях поверхностного износа и удовлетворяющих высоким требованиям надежности, долговечности и безопасности эксплуатации, невозможно без применения упрочняющих технологий. В настоящее время упрочнение поверхности металлов и сплавов осуществляется с помощью различных видов термической и химико-термической обработок (ХТО). Одним из развивающихся методов повышения физико-механических свойств является лазерная химико-термическая обработка (ЛХТО), позволяющая проводить локальную обработку поверхности деталей [1, 2]. Известно, что в термических упрочняющих методах определяющими технологическими параметрами являются: температура нагрева, длительность выдержки и охлаждения. При изменении во времени данных факторов возникает понятие о термическом цикле. Известно, что при импульсной ЛХТО формируется относительно малая объемная зона теплового воздействия ( $10^{-3}$  м<sup>3</sup>) при высоких температурах нагрева ( $>1500$  °С) и при малой длительности импульса ( $<0,5$  мс) [3]. В результате этого измерение, контроль и исследование термического цикла в режиме реального времени экспериментальными методами оказывается затруднительным.

Известно, для исследования относительно быстротекущих физических явлений и процессов применяется компьютерное моделирование.

Целью данной работы является моделирование тепловых полей при импульсной лазерной обработке методом конечных элементов.

## ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ

В работе рассматривалась двумерная задача по моделированию тепловых полей и термического цикла. Расчеты проводились с использованием программного комплекса *COMSOL Multiphysics*®. При лазерной обработке одиночным импульсом температура нагрева будет в значительной степени зависеть от параметров излучения (плотность мощности  $P_g$ , Дж/м<sup>2</sup>; диаметр пятна  $D$ , мм; длительность импульса  $\tau_u$ , мс) и свойств материала (плотность  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>; теплопроводность  $h$ , Вт/м·°С; удельная теплоемкость  $C_p$ , Дж/кг·°С). При многоимпульсной обработке большой интерес представляет термический цикл нагрева и охлаждения. В этом случае на температуру нагрева будет влиять еще и частота следования импульсов  $f$ , Гц. При этом температурное воздействие от каждого последующего импульса будет накладываться на предыдущее, т.е. средняя температура нагрева будет зависеть от суммы термических циклов одиночных импульсов.

Во время лазерного легирования материал претерпевает фазовый переход (из твердого в жидкое). Кроме того, теплота (скрытая теплота плавления), потребляемая или выделяемая при фазовом переходе, существенно влияет на величину нагрева поверхности. Поэтому зависящие от температуры свойства стали AISI 316, такие как плотность, теплопроводность и удельная теплоемкость, включены в вычислительную модель. Изменение плотности и теплопроводности в зависимости от температуры. Расчетное изменение плотности, коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры (в диапазоне от 273 до 2900 К) показано на рис. 1 [4, 5].

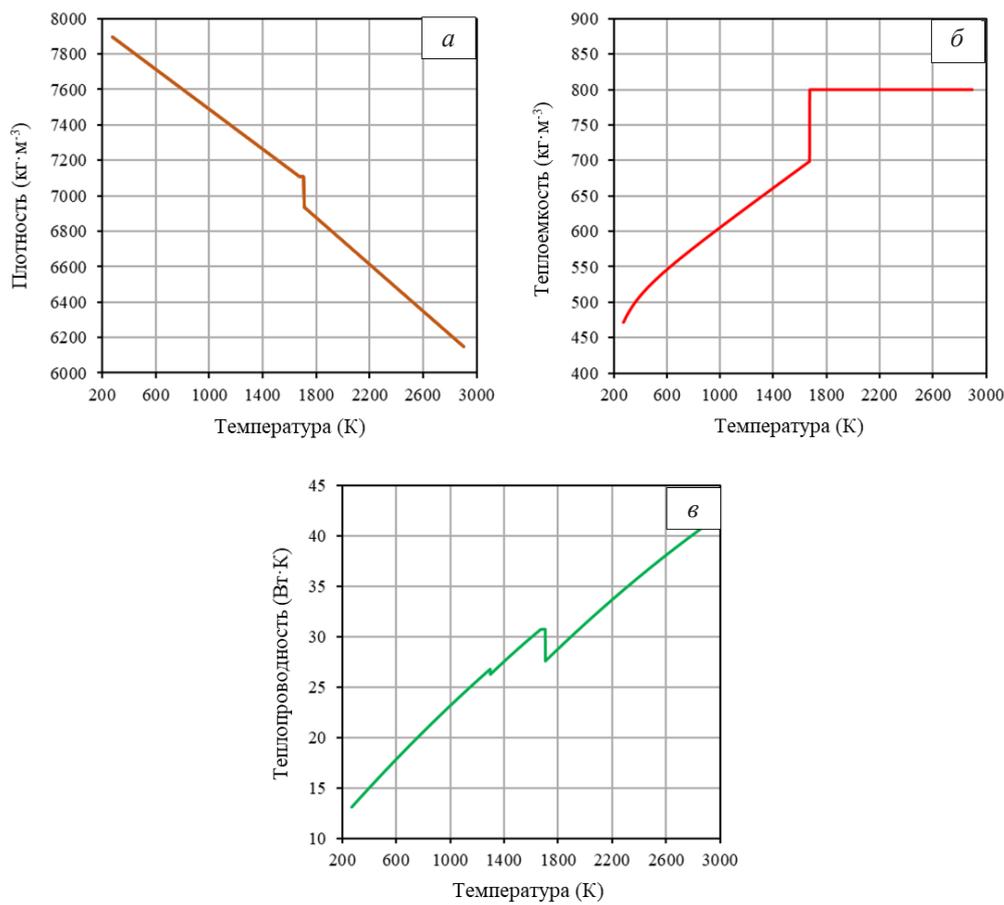


Рис. 1. Теплофизические свойства в зависимости от температуры (сталь AISI 316):  
*а – плотность; б – теплоемкость; в – теплопроводность*

Данные условия имитируют лазерное легирование стали газообразным азотом среднего атмосферного давления. В настоящем исследовании моделируется влияние нескольких лазерных импульсов, чтобы понять механизм лазерной обработки в различных условиях. Впоследствии это понимание может быть расширено для прогнозирования топографии поверхности во время процессов многомерной лазерной обработки. Данная компьютерная модель, позволяет получать и анализировать тепловые циклы и тепловые поля при нагреве поверхности импульсным лазерным лучом. Наша модель позволяет определить оптимальные параметры обработки (импульсная мощность, частота следования импульсов и т.д.) с точки глубины проплавления.

#### РАСЧЕТНАЯ СХЕМА

Одномерная лазерная обработка выполняется путем подачи одного лазерного импульса или нескольких, при этом заготовка и лазерный луч остаются неподвижными. Средняя плотность лазерной энергии (энергия на импульс/площадь лазерного луча) в каждом случае очень высока ( $\sim 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>), что приводит к плавлению/испарению материала. Точно так же, подавая большее количество импульсов, можно достичь более высоких скоростей съема материала. Чтобы получить более высокие скорости съема материала, лазеры с постоянными магнитами подают несколько лазерных импульсов (что предпочтительно для лазерной обработки конструкционной керамики).

На рис. 2 приведена расчетная схема с сеткой. Виртуальный образец имеет ширину  $W = 5$  мм и высоту  $H = 1,5$  мм. Поток тепла от лазерного луча имеет вид пятна диаметром  $D = 1$  мм, ось которого располагается перпендикулярно поверхности в геометрическом центре образца. Для повышения точности расчетов верхняя часть геометрии образца имеет более высокую плотность вычислительной сетки. Сетка имеет вид треугольников.

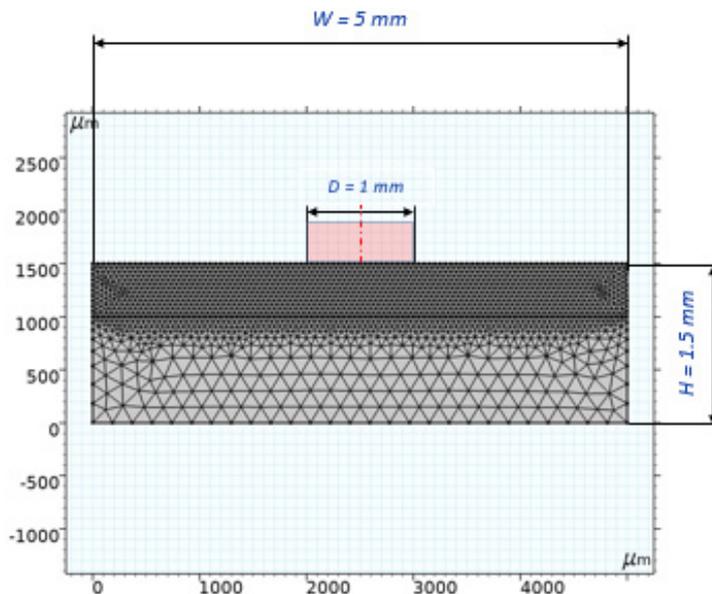


Рис. 2. Геометрия и вычислительная плотность сетки образца в COMSOL

Путем аппроксимации кривых (рис. 1) получены функции теплофизических свойств нержавеющей стали AISI 316, зависящих от температуры:  $\rho(T)$ ,  $h(T)$  и  $C_p(T)$ . Функции получены с учетом изменения агрегатного состояния материала. Температуры начала и конца фазового перехода из твердого в жидкое состояние для стали AISI 316 составляет  $T_s = 1675$  К и  $T_l = 1708$  К соответственно. Функции имеют следующий вид:

Плотность,  $\rho$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ )

$$- 273\text{K} < T < 1675\text{K} \quad \rho(T) = 8052 - 0,564 \cdot T$$

$$- 1675\text{K} < T < 1708\text{K} \quad \rho(T) = 7108,43$$

$$- 1708\text{K} < T < 2900\text{K} \quad \rho(T) = 8065 - 0,661 \cdot T$$

Теплопроводность,  $h$  ( $\text{В}/\text{м}\cdot\text{К}$ )

$$- 273\text{K} < T < 1675\text{K} \quad k(T) = 8,98 + 1,57 \cdot 10^{-2} \cdot T - 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$$

$$- 1675\text{K} < T < 1708\text{K} \quad k(T) = 6,38 + 1,9 \cdot 10^{-2} \cdot T - 2,45 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$$

$$- 1708\text{K} < T < 2900\text{K} \quad k(T) = 2,27 + 1,76 \cdot 10^{-2} \cdot T - 1,39 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$$

Теплоемкость,  $C_p$  ( $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ )

$$- 273\text{K} < T < 1675\text{K} \quad C_p(T) = 472 + 13,6 \cdot 10^{-2} \cdot T - 2,82 \cdot 10^{-6}/T^2$$

$$- 1675\text{K} < T < 2900\text{K} \quad C_p(T) = 800.$$

### ОПИСАНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ

На рис. 3 приведена схема, показывающая направление тепловых потоков, возникающих на виртуальном образце, имеющего размеры  $5 \times 1,5$  мм. Где  $Q_1$  – тепловой поток от импульсного лазерного источника и направлен на поверхность 2,  $Q_2$  – тепловые потери от конвективного теплообмена между окружающей средой и телом, направлены от поверхностей 1, 2 и 3,  $Q_3$  – тепловые потери от излучения, направлена от поверхностей 1, 2 и 3. Поверхность 4 принята как изолированной.

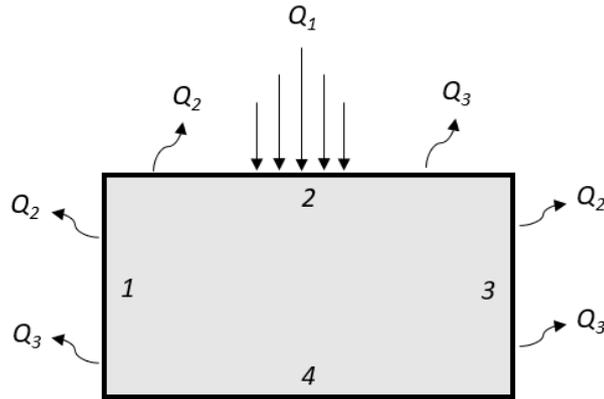


Рис. 3. Двухмерная расчетная схема тепловой модели

Данный интегрированный вычислительный подход включает различные физические явления для прогнозирования температуры нагрева материала во время многоимпульсной лазерной обработки. Таким образом можно составить следующее уравнение теплового баланса:

$$-\frac{\partial T}{\partial y} = Q_1 - Q_2 - Q_3. \quad (1)$$

Тепловой поток  $Q_1$  будет определяться средней плотностью мощности лазерного луча, падающего на поверхность. При этом плотность мощности будет подчиняться закону Гауссовскому нормальному распределению и формула примет вид:

$$Q_1 = P_g = A \left[ \frac{E_u}{\tau_u \left( \frac{\pi}{4} D^2 \right)} \right] e^{-\left[ \frac{(x-x_r)^2}{2\varphi^2} \right]}, \quad (2)$$

где  $P_g$  – средняя плотность мощность лазерного луча; Вт/м<sup>2</sup>,  $A$  – абсорбция энергии лазерного луча, 0,37;  $E_u$  – энергия одиночного импульса, Дж;  $\tau_u$  – длительность одиночного импульса, мс;  $D$  – диаметр пятна, мм;  $x_r$  – координата позиции лазерного луча, мм;  $\varphi$  – стандартное отклонение, мкм.

Тепловые потери от конвективного теплообмена между окружающей средой и нагреваемым телом будут определяться по формуле:

$$Q_2 = h(T_i - T_a), \quad (3)$$

где  $h$  – коэффициент теплопроводности стали, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $T_i$  – температура тела, К;  $T_a$  – температура окружающей среды, 296 К.

Тепловые потери от излучения будут рассчитываться по формуле:

$$Q_3 = \varepsilon \delta (T_i^4 - T_a^4), \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент теплового излучения телом, 0,65;  $\delta$  – постоянная Стефана – Больцмана,  $5,670367 \cdot 10^{-8}$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-4</sup>.

Таким образом уравнение теплового баланса в случае нагрева тела лазерным лучом будет определяться следующим выражением:

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \beta P_g - h(T - T_a) - \varepsilon \delta (T^4 - T_a^4). \quad (5)$$

На рис. 4 представлены термические циклы на различных глубинах от поверхности образца при энергиях импульса 32 и 64 Дж.

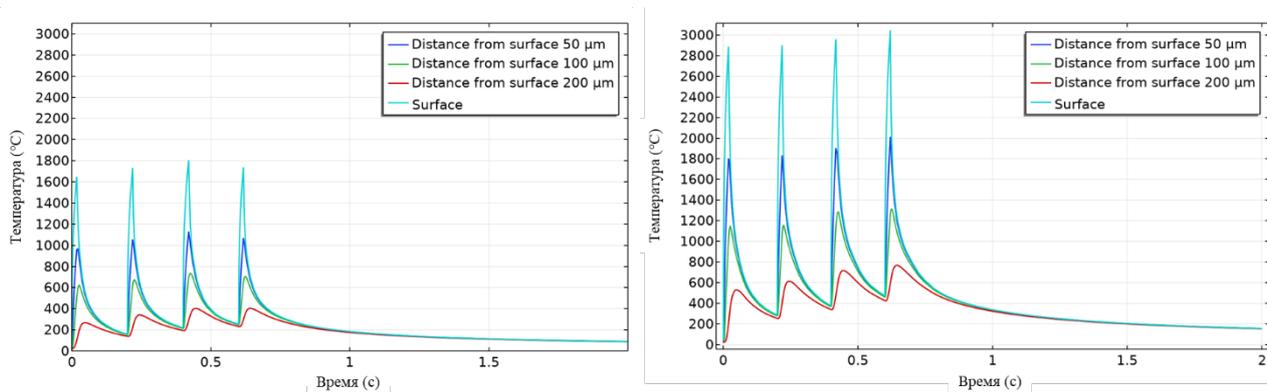


Рис. 4. Термоцикл на разном расстоянии от поверхности образца при энергии импульса 32 и 64 Дж и частоте импульсов 4 Гц

Результаты анализа моделирования термических циклов при импульсной лазерной обработке показывают, что с увеличением мощности импульса повышается глубина теплового воздействия. Также увеличиваются зоны термического влияния (закалка, отпуск). При этом происходит увеличение средней температуры нагрева и имеет место наложение термических циклов, что согласуется с теоретическими данными. Чем выше частота следования импульсов  $f$ , тем явно виден эффект суммирования термических циклов. Однако, как только объемный материал достигает состояния насыщения тепла, дальнейший рост температуры в последующих лазерных импульсах не так высок, как на начальном этапе, что вызывает постепенное падение скоростей нагрева/охлаждения вплоть до выключения лазера. Снижение температуры объясняется потерями тепла за счет внешнего естественного конвективного охлаждения и излучения. Во время одномерной многоимпульсной лазерной обработки температура повышается, когда лазер включен, в течение времени продолжительностью 0,5 мс ( $P_{\text{л}}$ ) для каждого лазерного импульса, после чего следует падение температуры во время выключения лазера.

С помощью данной модели возможно прогнозирование глубины проплавления при лазерном легировании, а также можно определить толщины зон термического влияния (закалка, отпуск).

На рис. 5 приведены результаты расчета теплового поля при 0,3 с после одиночного импульса.

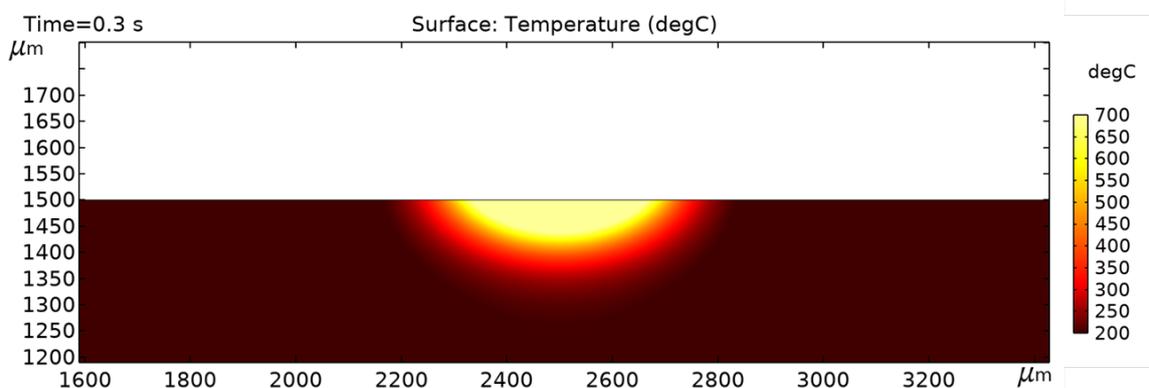


Рис. 5. Тепловое поле на образце после одиночного лазерного импульса

В настоящей работе распределение энергии лазерного луча является гауссовым, т. е. энергия лазера максимальна в центре луча и постепенно уменьшается по мере продвижения к краям лазерного луча. Поэтому температура поверхности в центре лазерного луча выше, чем на краю. Следовательно, проникновение тепла внутрь материала по нормали к верхней поверхности выше, чем в боковом направлении, что приводит к большей глубине проплавления.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлена двумерная компьютерная модель тепловых процессов при нагреве материала стационарным лазерным лучом в импульсном режиме, позволяющая прогнозировать и исследовать тепловые циклы при различных технологических параметрах обработки. Кроме того, разработанная модель позволяет рассчитывать термоциклы и поля на различной глубине образца. Полученные результаты расчета позволяют определить оптимальные технологические режимы, актуальные для химико-термической и термической обработки с плавлением поверхности металлов и сплавов.

Дальнейшая работа направлена на разработку модели с подвижным лазерным источником тепла.

### БЛАГОДАРНОСТИ

*Работа поддержана грантом Президента РФ МК-2024.2022.4.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Schaaf P.** Laser nitriding of metals // Progress in materials science. 2002. Vol. 47, No. 1. Pp. 1-161.
2. **Höche D., Kaspar J., Schaaf P.** Laser nitriding and carburization of materials // Laser Surface Engineering. Woodhead Publishing, 2015. Pp. 33-58.
3. **Comparative** study of laser surface hardening of 50CrMo4 steel using continuous-wave laser and pulsed lasers with ms, ns, ps and fs pulse duration / N. Maharjan, et al. // Surface and Coatings Technology. 2019. Vol. 366. Pp. 311-320.
4. **Deng D., Murakawa H.** Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements // Computational materials science. 2006. Vol. 37, Iss. 3. Pp. 269-277.
5. **Samant A. N., Dahotre N. B.** Differences in physical phenomena governing laser machining of structural ceramics // Ceramics International. 2009. Vol. 35, Iss. 5. Pp. 2093-2097.
6. **An improved** level set method for incompressible two-phase flows / M. Sussman, et al. // Computers & Fluids. 1998. Vol. 27, Iss. 5-6. Pp. 663-680.
7. **Characterization** of the drilling alumina ceramic using Nd: YAG pulsed laser / E. Kacar et al. // Journal of materials processing technology. 2009. Vol. 209, Iss. 4. Pp. 2008-2014.

### ОБ АВТОРАХ

**ТЯПУНОВА Елена Андреевна**, магистрант, Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, ИАТМ.

**ВАСИЛЬЕВ Арсентий Андреевич**, магистрант, Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, ИАТМ.

**ЕСИПОВ Роман Сергеевич**, инж. лаб. ЭЭО. Канд. техн. наук по металлосведению и термической обработке металлов и сплавов (МАИ (НИИ), 2019). Иссл. в обл. вакуумных ионно-плазм. технол.

**ХАЙТКУЛОВ Алан Рустемович**, бакалавр 4-го курса, Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, ИАТМ.

**РАМАЗАНОВ Камиль Нуруллаевич**, проф., зав. каф. ТМ. Д-р техн. наук. Иссл. в обл. вакуумных ионно-плазм. технол.

**TYAPUNOVA, Elena Andreevna**, undergraduate, Design and technological support of machine-building industries, IATM.

**VASILYEV, Arseny Andreevich**, undergraduate, Design and technological support of machine-building industries, IATM.

**ESIPOV, Roman Sergeevich**, eng. lab. EEO. Cand. of Tech. Sci. in metallurgy and heat treatment of metals and alloys (MAI (NRU), 2019). Research in the region vacuum ion plasmas. technol.

**KHAI TKULOV, Alan Rustemovich**, 4th year bachelor, Design and technological support of machine-building industries, IATM.

**RAMAZANOV, Kamil Nurullaevich**, prof., head. of Dept. of TM. Dr. of Tech. Sci. Research in the region vacuum ion plasmas. technol.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 4 (98), pp. 130-136, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).