

УДК 535.66, 535.392

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕНДРИТНЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

А.А. Бурцев^{a,b}, Е.М. Притоцкий^{a,c}, А.П. Притоцкая^{a,c},
Н.А. Аганин^a, М.А. Шахов^a, О.Я. Бутковский^a

^aВладимирский Государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация

^bООО «Новые технологии лазерного термоупрочнения», Владимирская область, г. Радужный, 600910, Российская Федерация

^cФедеральное казенное предприятие "Государственный лазерный полигон «Радуга»", Владимирская область, г. Радужный, 600910, Российская Федерация

Адрес для переписки: pritotsky@bk.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 12.10.18, принята к печати 17.12.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-33-38

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Бурцев А.А., Притоцкий Е.М., Притоцкая А.П., Аганин Н.А., Шахов М.А., Бутковский О.Я. Экспериментальные исследования условий формирования дендритных кристаллов на поверхности металлов лазерным излучением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 33–38. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-33-38

Аннотация

Исследованы условия образования фрактальных кластеров (дендритов) на поверхности высокотемпературных материалов при воздействии импульсного лазерного излучения. Для анализа размеров зоны оплавления и выявления поверхностных фрактальных кристаллов методами оптической и электронной микроскопии выполнены комплексные исследования морфологии поверхности металлов после воздействия лазерных импульсов микросекундной длительности. По экспериментальным данным рассчитана возможная толщина слоя расплава при конкретных параметрах лазерного излучения. Определен диапазон расчетных значений толщины слоя расплава, при которых происходит устойчивый рост фрактальных кристаллов на поверхности нержавеющей стали. Использованы следующие параметры воздействующих импульсов лазера: энергия 10–15 Дж, длительность импульса 6–12 мкс, диаметр пятна 0,4–2 мм. Определены комбинации параметров образования и устойчивого роста фрактальных кластеров в виде дендритов. Достоверность полученных оценок проверена на нержавеющей стали другой марки с существенно отличными характеристиками. Результаты исследования позволяют определить параметры импульсного лазерного излучения воздействия для получения поверхностной морфологии с заданными свойствами.

Ключевые слова

модификация поверхности металлов, лазерное излучение, расплав, фрактал, дендрит

Благодарности

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания ВлГУ № 3.7530.2018/8.9 БЧ.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF DENDRITIC CRYSTALS FORMATION ON METAL SURFACE BY LASER RADIATION

А.А. Burtsev^{a,c}, Е.М. Pritotsky^{a,b}, А.Р. Pritotskaya^{a,b}, N.A. Aganin^a, M.A. Shakhov^a, O.Ya. Butkovskiy^a

^aVladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation

^bLLC New Technologies of Laser Thermal Hardening, Vladimir Region, Raduzhny, 600910, Russian Federation

^cState Laser Proving Ground "Raduga", Vladimir Region, Raduzhny, 600910, Russian Federation

Corresponding author: pritotsky@bk.ru

Article info

Received 12.10.18, accepted 17.12.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-33-38

Article in Russian

For citation: Burtsev A.A., Pritotsky E.M., Pritotskaya A.P., Aganin N.A., Shakhov M.A., Butkovsky O.Ya. Experimental research of dendritic crystals formation on metal surface by laser radiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 33–38 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-33-38

Abstract

Subject of research. We study conditions of fractal crystals growth on the high-temperature material surface under pulsed laser radiation impact. **Method.** Comprehensive studies were performed on the metal surface morphology after impact of

microsecond laser pulses by optical and electron microscopy for analysis of the size of the melting zone and the presence/absence of surface fractal crystals. The experimental data were used to calculate the possible thickness of the melt layer for specific parameters of laser radiation. According to the calculated data, the range of calculated values of the melting layer thickness was determined, at which the stable growth of fractal crystals on the surface of stainless steel occurred. The parametric variation of the laser pulses was carried out in the following ranges: energy in the range of 10–15 J, pulse duration in the range of 6–12 μ s, spot diameter in the range of 0.4–2 mm. **Main results.** Combinations of parameters for formation and stable growth of fractal clusters as the dendrites form were determined. The reliability of the estimates obtained were tested on another type of stainless steel with drastically different characteristics. **Practical relevance.** Research results are applicable for parameters determination of pulsed laser radiation exposure to obtain surface morphology with desired properties.

Keywords

metal surface modification, laser radiation, melting, fractal, dendrite

Acknowledgements

The work is performed within VLSU basic unit No. 3.7530.2018/8.9 GST.

Введение

Исследование модификации поверхности металлов лазерным излучением имеет важное прикладное значение [1, 2]. Формирование различных морфологических структур вследствие фазовых превращений обеспечивает получение материалов с новыми свойствами, которые можно задать с помощью параметров лазерного луча и подбора материала, так и в инженерных задачах контроля качества поверхности при лазерной обработке. В работах [3–5] рассмотрена модификация поверхности нержавеющей стали с помощью импульсного излучения двух лазерных установок. В работе [4] получены фрактальные кристаллы на поверхности (стохастические дендриты), характер их распределения связан с градиентами энергии в заданной форме импульса. Большое внимание уделяется в [6] экспериментальному получению фрактальных кристаллов вытянутой игольчатой формы (сферолиты) в металлах.

Зарождение устойчивых центров кристаллизации и рост дендритного кристалла подробно рассмотрены в работах [7, 8]. В частности, указано, что для роста дендрита необходимы высокие степени переохлаждения расплава. В работах [9, 10] описан процесс формирования поверхностной морфологии после разрушения оксидной пленки в результате термоокислительной абляции.

Основной целью настоящего исследования является оценка условий, необходимых для образования дендритных кристаллов на поверхности, изображения которых получены с помощью растровой электронной микроскопии (рис. 1). Параметры лазерного излучения подобраны эмпирическим путем.

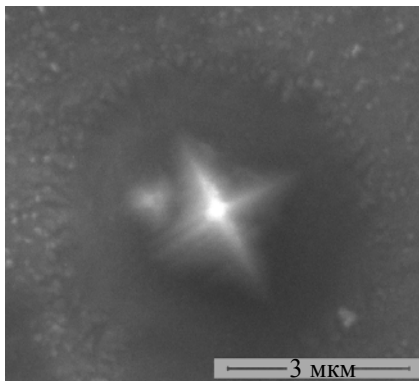


Рис. 1. Дендритный кристалл на поверхности нержавеющей стали

Экспериментальные исследования изменения динамики зоны оплавления и условия роста поверхностных дендритных структур

Серия экспериментов проводилась на установке с импульсным Nd:YAG-лазером (длина волны $\lambda=1,06$ мкм), предназначенным для точечной сварки различных металлов и сплавов толщиной до 2 мм в ручном и автоматическом режиме. Методика экспериментов аналогична описанной в статьях [3, 4]. На полированную поверхность нержавеющей стали марки AISI 304 толщиной 1 мм воздействовали одиночным импульсом с заданными параметрами (энергия импульса E , длительность импульса τ , диаметр пятна в фокусе d). Затем образцы исследовались на цифровом оптическом и растровом электронном микроскопах. В частности, определялись размер зоны плавления и наличие дендритных кристаллов для каждого импульса. Диаметр полученного пятна d отличался от заданного, поэтому измерялся отдельно с помощью цифрового микроскопа (рис. 2). Определялись размеры пятна по каждой оси, затем высчитывался усредненный диаметр, данное значение применялось в расчетах и анализе.

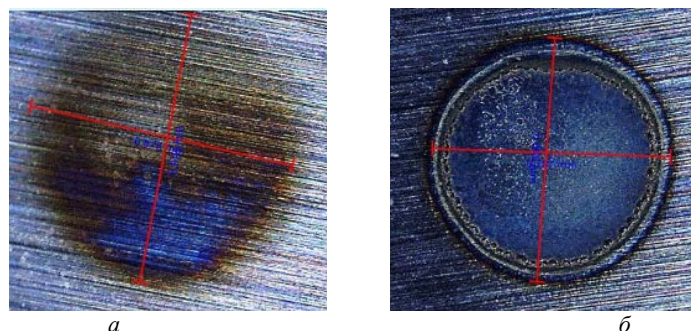


Рис. 2. Зоны лазерного воздействия 1×1 мм при различных параметрах импульса:
 $E = 10$ Дж, $\tau = 6$ мс, $d = 0,892$ мм (а); $E = 12$ Дж, $\tau = 12$ мс, $d = 0,7965$ мм (б)

В табл. 1 приведены результаты измерений размеров зоны плавления и определения наличия дендритных кристаллов (с помощью растрового электронного микроскопа).

Таблица 1. Зависимость размера зоны оплавления и формирования дендритов от параметров излучения

№ п/п	E , Дж	τ , мс	D , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	d_{cp} , мм	Дендриты
1	10	6	2	0,891	0,893	0,892	–
2	10	6	1,6	0,785	0,787	0,786	+
3	10	6	1,2	0,388	0,401	0,394	+
4	10	6	0,8	0,28	0,294	0,287	+
5	10	6	0,4	0,231	0,246	0,2385	–
6	10	8	2	0,875	0,875	0,875	–
7	10	8	1,6	0,79	0,788	0,789	–
8	10	8	1,2	0,39	0,385	0,3875	+
9	10	8	0,8	0,261	0,271	0,266	+
10	10	8	0,4	0,265	0,255	0,26	–
11	10	10	2	0,859	0,872	0,8655	–
12	10	10	1,6	0,781	0,765	0,773	+
13	10	10	1,2	0,616	0,621	0,6185	+
14	10	10	0,8	0,455	0,453	0,454	+
15	10	10	0,4	0,395	0,396	0,3955	–
16	10	12	2	0,844	0,933	0,8885	–
17	10	12	1,6	0,698	0,685	0,6915	+
18	10	12	1,2	0,622	0,648	0,635	+
19	10	12	0,8	0,424	0,445	0,4345	+
20	10	12	0,4	0,387	0,409	0,398	–
21	12	12	2	0,876	0,889	0,8825	–
22	12	12	1,6	0,787	0,806	0,7965	+
23	12	12	1,2	0,398	0,411	0,4045	+
24	12	12	0,8	0,286	0,284	0,285	–
25	12	12	0,4	0,227	0,228	0,2275	–
26	15	12	2	0,393	0,387	0,39	+
27	15	12	1,6	0,405	0,425	0,415	+
28	15	12	1,2	0,402	0,413	0,4075	+
29	15	12	0,8	0,53	0,532	0,531	–
30	15	12	0,4	0,55	0,557	0,5535	–

Оценка поверхностного слоя расплава при воздействии лазерного излучения

Основным механизмом удаления поверхностного слоя металла при воздействии лазерного излучения является его испарение и вытеснение расплава из зоны облучения под действием давления паров или внешних механических сил [11–13].

Начальная стадия процесса может быть описана моделью поверхностного испарения вещества. Пренебрегая затратами энергии на нагревание материала до температуры кипения $\rho c T_{кип}$, на расплавление $L_{пл}$, на теплопроводность, т.е. считая, что вся подводимая энергия тратится на испарение $L_{исп}$ (что можно допустить с некоторой погрешностью для малых времен воздействия, так как $L_{пл}, \rho c T_{кип} \sim 0,1 L_{исп}$), получим скорость роста V цилиндрического отверстия с диаметром, равным диаметру светового пятна, и глубиной h , выраженный через плотность мощности q :

$$V = \frac{q}{L_{исп}}, \quad (1)$$

где $V = \frac{h}{\tau}$.

При этом скорость движения границы испарения V связана с температурой поверхности T_0 выражением

$$V(T) = c_0 \exp\left(-\frac{L^M \mu}{R_s T}\right), \quad (2)$$

где L^M – энергия активации соответствующего процесса в пересчете на единицу массы, c_0 – скорость звука в твердом теле, R_s – универсальная газовая постоянная, μ – молярная (атомная) масса обрабатываемого материала.

Как видно из выражения (1), глубина отверстия h увеличивается линейно со временем, а диаметр d остается постоянным. Эксперимент удовлетворительно описывается этой моделью для начальной стадии процесса разрушения, когда $h(t) < d(t)$. После этого рост отверстия в глубину замедляется, а диаметр, наоборот, начинает увеличиваться. На этой стадии развития отверстия необходимо учитывать движение расплава и взаимное расположение поверхности материала и сфокусированного пучка излучения. Особенности лазерной размерной обработки с учетом этих факторов рассмотрим на примере лазерного сверления отверстий и резки материалов.

Кинетика роста лунки при лазерном сверлении отверстий зависит от многих факторов, связанных с особенностями движения пара и течения расплава по стенкам отверстия сложной формы и их взаимным влиянием. Поэтому точное решение задачи достаточно сложно, используются те или иные феноменологические модели. Согласно наиболее распространенной модели, основанной на результатах скоростной киносъемки, при фокусировке излучения ниже передней поверхности образца вблизи нее в материале образуется лунка, профиль которой близок к цилиндрическому. Изменение размеров лунки со временем происходит таким образом, что ее радиус $r(t)$ и глубина $h(t)$ связаны между собой уравнением светового конуса с углом раствора 2γ :

$$r(t) = r_0 + \operatorname{tg}\gamma h(t). \quad (3)$$

Предполагается, что материал со дна лунки только испаряется, а со стенок уносится в виде расплава, причем оба процесса являются квазистационарными. Тогда в пренебрежении температурной зависимостью теплоты испарения и экранировкой поверхности продуктами разрушения уравнение энергетического баланса в лунке может быть записано следующим образом:

$$P(t) dt = \rho L_{исп} \pi r^2(t) dh + \rho L_{пл} 2\pi(t) h(t) dr, \quad (4)$$

где $P(t)$ – текущее значение поглощенной мощности излучения, $L_{пл}$ – удельная теплота плавления материала (на единицу объема).

Решение системы (3), (4) для $P(t) = \text{const}$ и $L_{исп} \gg L_{пл}$ дает:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{r_0}{\operatorname{tg}\gamma}\right)^3 + \frac{3P(t)}{\pi \operatorname{tg}^2 \gamma \rho L_{исп}} - \frac{r_0}{\operatorname{tg}\gamma}}; \quad (5)$$

$$r = \sqrt[3]{r_0^3 + \frac{3P(t) \operatorname{tg}\gamma}{\pi \rho L_{исп}}}. \quad (6)$$

Проанализировав выражения (5) и (6), можно показать, что на начальной стадии процесса образования ($h \ll r_0$) глубина лунки увеличивается линейно во времени за счет испарения материала по площади светового пятна (как в одномерной модели квазистационарного испарения), а диаметр меняется слабо. С течением времени скорость роста лунки в глубину замедляется, в предельном случае ($t \rightarrow \infty$) ее глубина и радиус растут пропорционально $t^{\frac{1}{3}}$, т.е. форма лунки не меняется. Такой режим квазистационарного развития лунки устанавливается при $q = 10^7 - 10^8$ Вт/см² к концу лазерного импульса длительностью $\tau = 1$ мс. При заданных значениях h и r параметры режима обработки (преимущественно энергия излучения и фокусное расстояние оптической системы) определяются из баланса энергии и геометрических соотношений (в зависимости от отношения h/r).

Рассмотренная модель справедлива при фокусировке излучения вблизи начального расположения поверхности материала [14]. Однако условия фокусировки оказывают значительное влияние на профиль лунки. При обработке в сходящемся световом пучке характерна коническая форма лунки, в расходящемся – цилиндрическая. С увеличением расстояния между плоскостью фокусировки и поверхностью материала увеличивается радиус лунки и уменьшается ее глубина.

С использованием эмпирических данных (табл. 1) оценена глубина проплавления по формулам (5), (6) в тех образцах, где возникли поверхностные дендриты. Из выражения (5) определялся тангенс угла раствора $\text{tg}\gamma$, значение которого определяет геометрические характеристики полученной лунки, из (6) – толщина слоя h . В качестве времени воздействия использовалась длительность импульса, т.к. все воздействия обеспечивались одним импульсом. Тем самым подтверждены предположения, выдвинутые в статье [4], что дендриты формируются в очень узком интервале параметров лазерного импульса.

Таблица 2. Оценка толщины слоя расплава для параметров из табл. 1

№ п/п	E , Дж	τ , мс	D , мм	$d_{\text{ср}}$, мм	P , Вт	$\text{tg}\gamma$	h , мкм	Дендриты
2	10	6	1,6	0,786	616,67	-7,1046	51,59	+
3	10	6	1,2	0,3945	616,67	-3,2796	116,67	+
4	10	6	0,8	0,287	616,67	-0,961	253,16	+
7	10	8	1,6	0,789	462,5	-7,0936	51,44	-
8	10	8	1,2	0,3875	462,5	-3,2859	117,60	+
9	10	8	0,8	0,266	462,5	-0,9705	262,37	+
12	10	10	1,6	0,773	370	-7,1512	52,24	+
13	10	10	1,2	0,6185	370	-2,9348	88,96	+
14	10	10	0,8	0,454	370	-0,8234	186,56	+
17	10	12	1,6	0,6915	308,33	-7,4095	56,41	+
18	10	12	1,2	0,635	308,33	-2,8965	87,07	+
19	10	12	0,8	0,4345	308,33	-0,8461	193,86	+
22	12	12	1,6	0,7965	370	-5,8882	61,41	+
23	12	12	1,2	0,4045	370	-2,7251	138,55	+
24	12	12	0,8	0,285	370	-0,8016	305,19	-
26	15	12	2	0,39	462,5	-10,4171	75,12	+
27	15	12	1,6	0,415	462,5	-5,2797	108,03	+
28	15	12	1,2	0,4075	462,5	-2,1781	172,83	+
29	15	12	0,8	0,531	462,5	-0,4753	239,55	-
30	15	12	0,4	0,5535	462,5	0,1385	0	-

Согласно данным табл. 2, условия для роста дендритного кристалла создаются при толщине слоя расплава 51,5–265 мкм на поверхности нержавеющей стали. Помимо этого, влияние могут оказывать и другие факторы: распределение плотности мощности в фокальном пятне и скорость остывания расплава. Большой интерес вызывают эксперименты № 7 и 29. В первом случае толщина слоя расплава довольно близка к значению, соответствующему образованию фрактальной морфологии, во втором значение тоже, но кристаллы не наблюдаются.

Заключение

Выполнены экспериментальные исследования морфологии поверхности нержавеющей стали при импульсном лазерном воздействии. Проанализированы параметры лазерного излучения и подобраны такие значения, при которых возникают поверхностные дендритные кристаллы с высокой воспроизводимостью. Приведены эмпирические значения размеров зоны плавления и сформированных кристаллов после воздействия импульса. Получены оценки глубины проплавления и условия образования поверхностных фрактальных кристаллов. Полученные результаты обеспечивают возможность управлять морфологией поверхности, меняя параметры воздействующего излучения, в частности, получать кристаллы с новыми свойствами (определяемыми фрактальностью).

Литература

1. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Курс лекций. М.: Наука, 1989. 280 с.
2. Звелто О. Принципы лазеров. 3-е изд. М.: Мир, 1990. 560 с.
3. Антонов Д.Н., Бурцев А.А., Бутковский О.Я. Окрашивание поверхности металлов под действием импульсного лазерного излучения // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 10. С. 83–86.
4. Антонов Д.Н., Бурцев А.А., Бутковский О.Я. Распределение дендритов, получаемых на поверхности стали в результате воздействия лазерного излучения // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. № 1. С. 110–115.
5. Бурцев А.А., Бутковский О.Я., Сагитова А.В., Мешков Г.Б., Яминский И.В. Исследование процесса образования фрактального кристалла // Доклады XII Всероссийской конференции «Нанoeлектроника, нанoфотоника и

References

1. Delone N.B. *Interaction of Laser Radiation with Matter. Lecture Course*. Moscow, Nauka Publ., 1989, 280 p. (in Russian)
2. Svelto O. *Principles of Lasers*. NY, Plenum Press, 1989.
3. Antonov D.N., Burtsev A.A., Butkovskii O.Y. Coloration of a metal surface under pulsed laser irradiation. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 59, no. 10, pp. 1503–1505. doi: 10.1134/S1063784214100077
4. Antonov D.N., Burtsev A.A., Butkovskii O.Y. Distribution of laser-induced dendrites on a steel surface. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2016, vol. 61, no. 1, pp. 108–113. doi: 10.1134/S1063784216010059
5. Burtsev A.A., Butkovskii O.Ya., Sagitova A.V., Meshkov G.B., Yaminskii I.V. Investigation of the formation of a fractal crystal. *Proc. 12th All-Russian Conf. on Nanoelectronics, Nanophotonics and Nonlinear Physics*. Saratov, Russia, 2017, pp. 22–24. (in Russian)

- нелинейная физика». Саратов, 2017. С. 22–24.
6. Galenko P.K., Kharanzhevskii E.V., Danilov D.A. High-speed crystallization of constructional steel during laser processing of the surface. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2002, vol. 47, no. 5, pp. 561–568. doi: 10.1134/1.1479983
 7. Kharanzhevskii E.V., Krivilev M.D. *Laser Physics, Laser Technologies and Methods for Mathematical Modeling of Laser Effects on Matter*. Izhevsk, Udmurtskii State University, 2011. 187 p. (in Russian)
 8. Galenko P., Jou D. Diffuse-interface model for rapid phase transformations in nonequilibrium systems // *Physical Review E*. 2005. V. 71. N 4. doi: 10.1103/physreve.71.046125
 9. Volkov A.V., Kazanskiy N.L., Moiseev O.Y., Poletayev S.D. Thermal oxidative degradation of molybdenum films under laser ablation. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 60, no. 2, pp. 265–269. doi: 10.1134/S1063784215020255
 10. Kazanskiy N.L., Poletayev S.D. Numerical simulation of the ablation of thin molybdenum films under laser irradiation. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2016, vol. 61, no. 9, pp. 1279–1285. doi: 10.1134/S1063784216090127
 11. Veiko V.P., Shakhno E.A. *Tasks Collection in Laser Technologies*. 3rd ed. St. Petersburg, SPbSU ITMO Publ., 2007, 67 p. (in Russian)
 12. Zavestovskaya I.N. *Theoretical Modeling of the Processes of Materials Surface Treatment by Laser Pulses*. Dis. ... Dr. Phi. Math. Sci. Moscow, 2012, 221 p. (in Russian)
 13. Belokon V.M., Pomorceva M.O. The accounting of depth flux at welding in carbon dioxide of angular seams. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo Universiteta*, 2006, no. 1, pp. 14–17. (in Russian)
 14. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Abulkasimov M.M. Technologies of materials treatment by concentrated energy flow. *Reliability and Quality of Complex Systems*, 2015, no. 3, pp. 69–79. (in Russian)

Авторы

Бурцев Антон Андреевич – аспирант, Владимирский Государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация; инженер, ООО «Новые технологии лазерного термоупрочнения», Владимирская область, г. Радужный, 600910, Российская Федерация, Scopus ID: 56412548600, ORCID ID: 0000-0001-9009-9005, murrkiss2009@yandex.ru

Притоцкий Егор Михайлович – аспирант, Владимирский Государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация; инженер, Федеральное казенное предприятие «Государственный лазерный полигон «Радуга», Владимирская область, г. Радужный, 600910, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-7769-5205, pritotsky@bk.ru

Притоцкая Анастасия Павловна – аспирант, Владимирский Государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация; инженер, Федеральное казенное предприятие «Государственный лазерный полигон «Радуга», Владимирская область, г. Радужный, 600910, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-1706-5586, pritotskaya@bk.ru

Аганин Никита Алексеевич – студент, Владимирский Государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-2678-4742, nekit.aganin@yandex.ru

Шахов Максим Алексеевич – студент, Владимирский Государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-5444-4801, maxmirao@mail.ru

Бутковский Олег Ярославович – доктор физико-математических наук, профессор, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация, Scopus ID: 6602964757, ORCID ID: 0000-0001-6052-666X, OYButkovskiy@fa.ru

Authors

Anton A. Burtsev – postgraduate, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation; engineer, LLC New Technologies of Laser Thermal Hardening, Vladimir Region, Raduzhny, 600910, Russian Federation, Scopus ID: 56412548600, ORCID ID: 0000-0001-9009-9005, murrkiss2009@yandex.ru

Egor M. Pritotskiy – postgraduate, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation; engineer, State Laser Proving Ground "Raduga", Vladimir Region, Raduzhny, 600910, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-7769-5205, pritotsky@bk.ru

Anastasiya P. Pritotskaya – postgraduate, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation; engineer, State Laser Proving Ground "Raduga", Vladimir Region, Raduzhny, 600910, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-1706-5586, pritotskaya@bk.ru

Nikita A. Aganin – student, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-2678-4742, nekit.aganin@yandex.ru

Maxim A. Shakhov – student, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-5444-4801, maxmirao@mail.ru

Oleg Ya. Butkovskiy – D.Sc., Full Professor, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation, Scopus ID: 6602964757, ORCID ID: 0000-0001-6052-666X, OYButkovskiy@fa.ru