

## 08 Распределение дендритов, получаемых на поверхности стали в результате воздействия лазерного излучения

© Д.Н. Антонов,<sup>1</sup> А.А. Бурцев,<sup>1,2</sup> О.Я. Бутковский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 600000 Владимир, Россия

<sup>2</sup> Финансовый университет при Правительстве РФ (Владимирский филиал), 600037 Владимир, Россия  
e-mail: OYButkovskiy@fa.ru

(Поступило в Редакцию 28 апреля 2015 г.)

Показано, что на поверхности стали при воздействии лазерного излучения могут образовываться сложные фрактальные образования (классические дендриты). Показано, что распределением дендритов по поверхности зоны облучения можно управлять, изменяя профиль сечения лазерного луча. С помощью электронной микроскопии оценены распределение дендритов по размерам и плотность распределения по поверхности.

### Введение

В работе [1] авторами были представлены результаты экспериментальных исследований по окрашиванию поверхности стали при взаимодействии с лазерным излучением. В результате экспериментов был получен целый спектр цветов на поверхности стали [1]. При этом модификация самой поверхности была незначительной, и на образце было видно лишь „окрашивание“ в области пятна воздействующего излучения. Для более глубокой модификации поверхности дальнейшие эксперименты проводились с помощью импульсного лазера, предназначенного для точечной сварки. В экспериментах с изменяющимися параметрами лазерного излучения оказалось, что при плотности излучения выше некоторой величины на поверхности стальных образцов были обнаружены дендриты. Распределение дендритов вдоль направления от края зоны воздействия к ее центру оказалось крайне неоднородным. В работе представлены результаты экспериментального исследования характера поверхностного образования дендритов. В отличие от работы [2], где под воздействием лазерного излучения были получены простые игольчатые дендриты, в настоящей работе были получены сложные фрактальные кристаллы. Исследование воздействия лазерного излучения на поверхность металлов несет в себе перспективы проектирования новых материалов с заданными свойствами и в технологии литья деталей, к которым предъявляются повышенные требования в части механических характеристик.

### Эксперимент

Эксперименты проводились на установке с импульсным Nd:YAG-лазером (Pulse Nd:YAG laser) предназначенным для точечной сварки различных металлов и сплавов толщиной до 2 mm в ручном и автоматическом режимах (рис. 1).

Установка для работы в режиме ручной сварки укомплектована оптико-механической системой формирования пятна излучения переменного диаметра в зоне воздействия и контроля состояния поверхности с помощью микроскопа. Параметры лазерного излучения установки CLV-50: длина волны — 1.06  $\mu\text{m}$ , максимальная энергия излучения в импульсе длительностью 2 ms — > 20 J, абсолютная максимальная энергия излучения в импульсе — 50 J при длительности 20 ms, импульсная мощность излучения (при длительности 2 ms) — > 10 kW, частота повторения импульсов — от одиночных до 20 Hz, длительность импульса — от 0.5 до 40 ms, имеется возможность генерации пачек импульсов с регулируемой скважностью, регулировка диаметра пятна в фокусе — от 0.6 до 2.0 mm. Установка обладает интересной функциональной возможностью проводить построение произвольной формы импульса по нескольким точкам. Максимальное

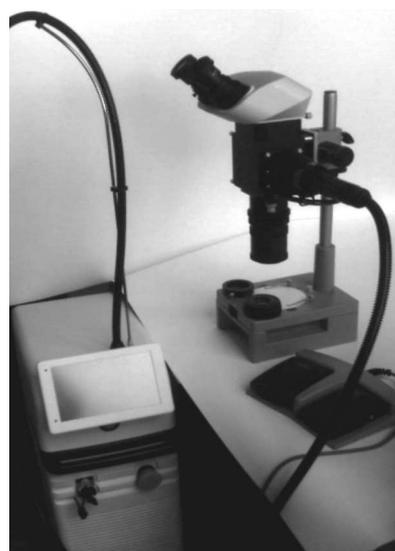
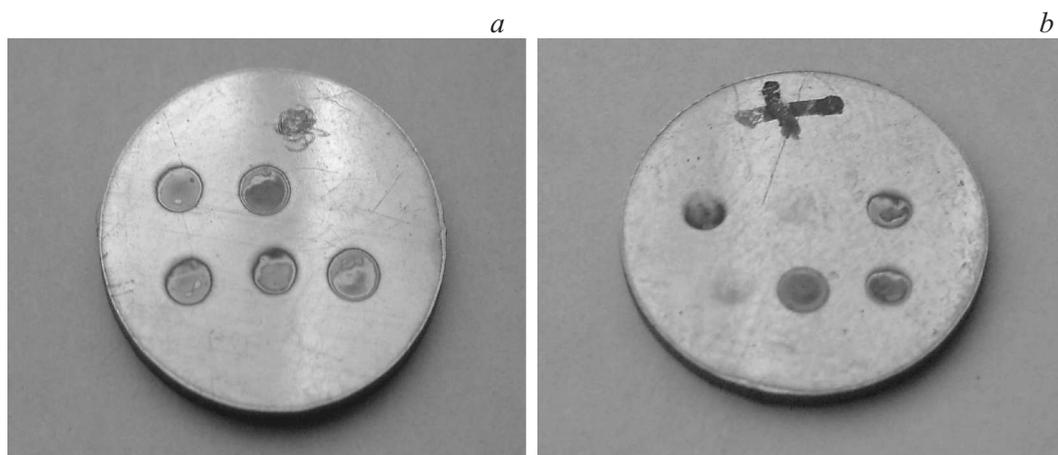
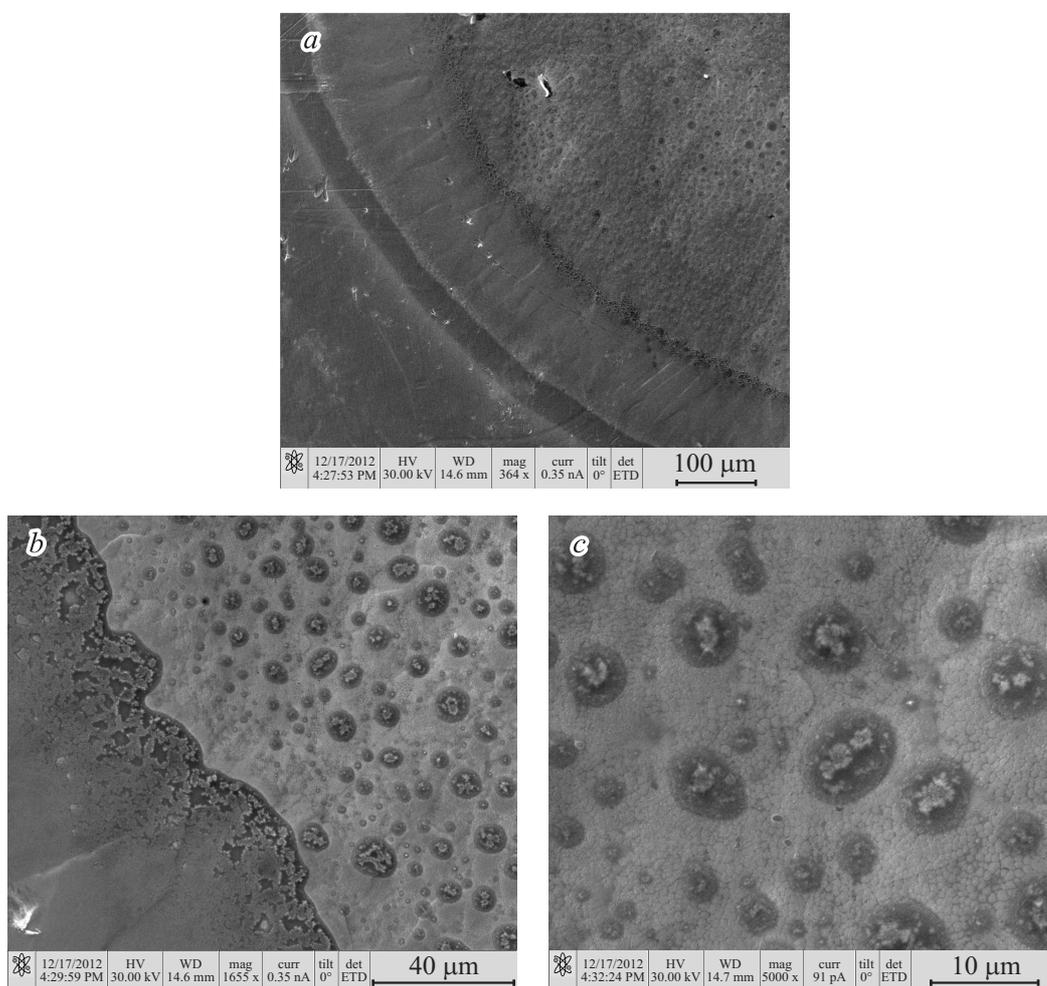


Рис. 1. Установка точечной сварки CLV-50.



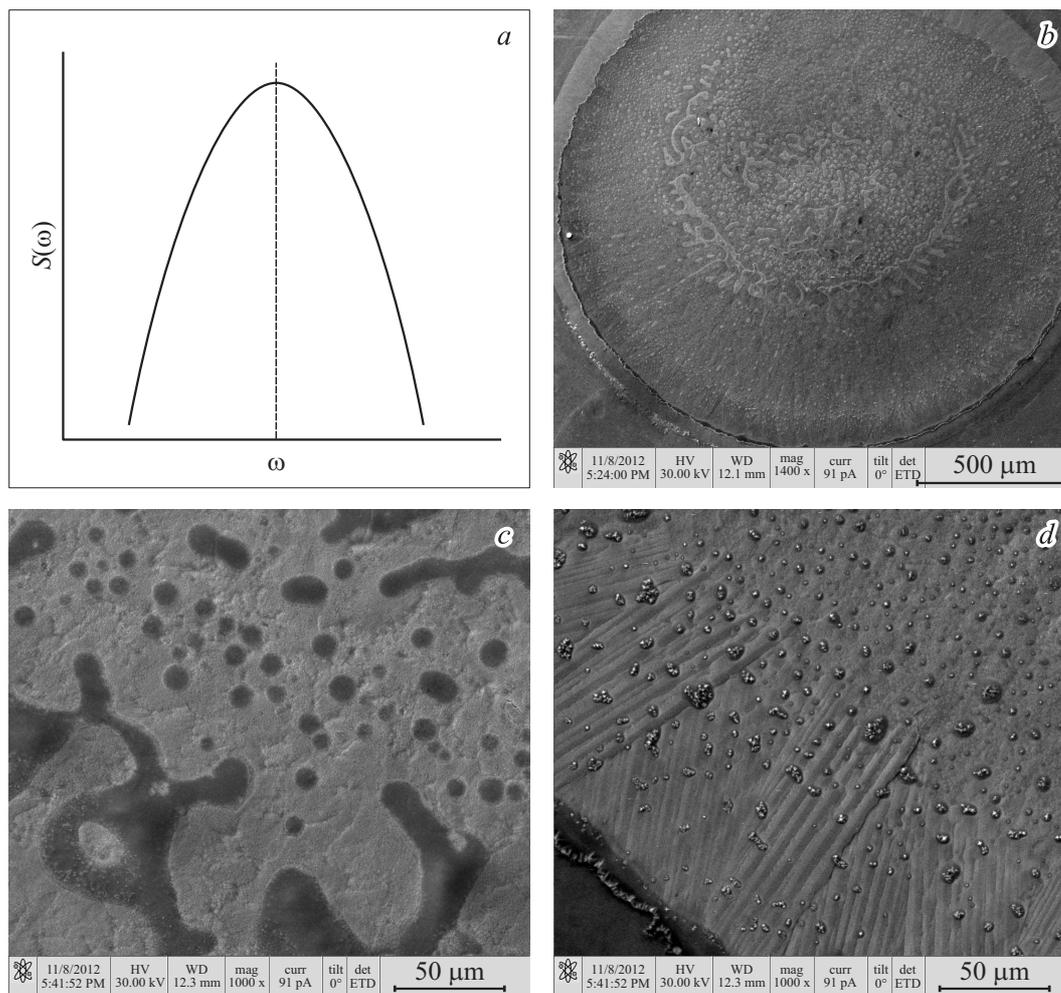
**Рис. 2.** Примеры образцов с зонами воздействия излучения на поверхность нержавеющей стали с диаметром пятна 2 (a) и 1.6 mm (b).



**Рис. 3.** РЭМ-изображения области воздействия. a — увеличение 100 μm, b — 40 μm, c — 10 μm.

количество точек, которое может быть использовано в графике построения формы импульса, 6 штук. Первоначально была выбрана самая популярная форма импульса — Гаусс, построенная по 4 точкам. В первых экспери-

ментах ограничились всего лишь одним импульсом, изменяя длительность в пределах от 2 до 20 ms и энергию излучения от 4 до 20 J при диаметре пятна 2.0 и 1.6 mm. В качестве образца была выбрана нержавеющая сталь



**Рис. 4.** Форма импульса излучения (*a*) и соответствующие РЭМ-изображения области воздействия. *b* — увеличение 500  $\mu\text{m}$ , *c* — 50  $\mu\text{m}$ , центральная область, *d* — 50  $\mu\text{m}$ , отмеченная краевая область.

AISI304 толщиной 1.0 mm. На образцах стали наносились фрагменты обработки с разной энергией излучения при диаметре пятна 2 mm (рис. 2, *a*, *b*), которые затем исследовались с помощью электронной микроскопии.

В результате экспериментов было получено следующее: при небольших энергиях излучения от 5 до 9.5 J на образцах наблюдалось появление цвета в области воздействия пятна, связанное с образованием тонких оксидных пленок на поверхности стали, а также с эффектом побежалости при нагреве поверхности до определенной температуры. Подобный эффект уже наблюдался и подробно описан в предыдущей работе по воздействию лазерного излучения наносекундной длительности с помощью маркировочного волоконного лазера с длиной волны 1.06  $\mu\text{m}$  [1].

Области воздействия на образцах исследовались на электронном микроскопе Quanta 200 3D. На снимках видно, что в области (вторая слева в верхнем ряду на рис. 2, *a*), где было приложено наибольшее по сравнению с другими областями количество энергии — 10 J, проис-

ходит модификация поверхности в облучаемой области (рис. 3). На рис. 3 представлены снимки с различным разрешением (рис. 3, *a*, *b*, *c*, *d*).

Как видно из рисунков, в результате воздействия лазерного излучения наблюдается возникновение наростов (средний размер — 2.4  $\mu\text{m}$ ). Темные области вокруг этих наростов, скорее всего, являются небольшими углублениями на поверхности стали, а сама область воздействия является зернистой структурой [3], находящейся в кольцевой зоне на краю.

Для увеличения плотности энергии воздействующего лазерного излучения на образец был уменьшен диаметр пятна с 2 до 1.6 mm. Примеры образцов при различных параметрах длительности импульса и энергии излучения в импульсе с размером пятна 1.6 mm представлены на рис. 2, *b*. Наибольший интерес представляют области с выпуклой наплавленной поверхностью (вторая слева в нижнем ряду на рис. 2, *b*). Характер поверхности этих областей на электронном микроскопе можно увидеть на рис. 4, *a*, *b*, *c*, *d*.

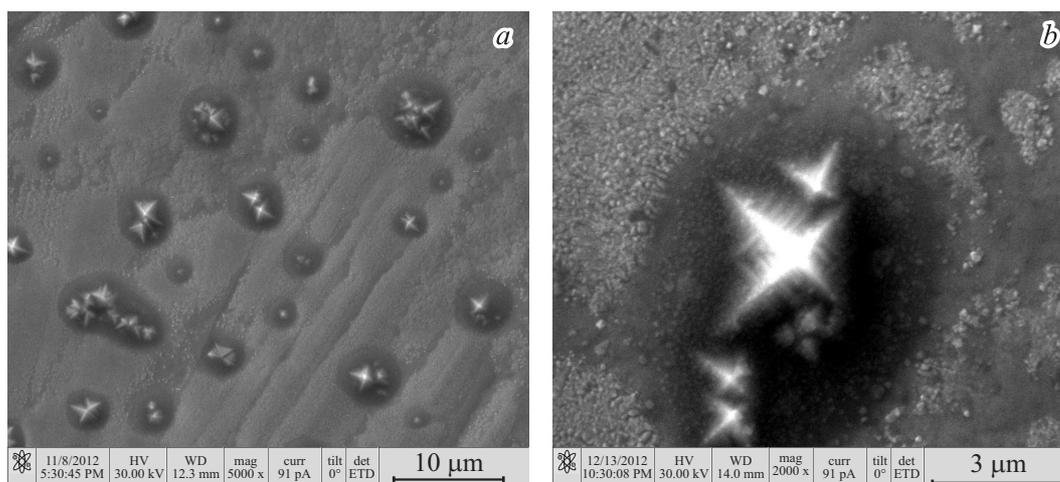


Рис. 5. Дендриты на поверхности нержавеющей стали. *a* — увеличение 10 μm, *b* — 3 μm.

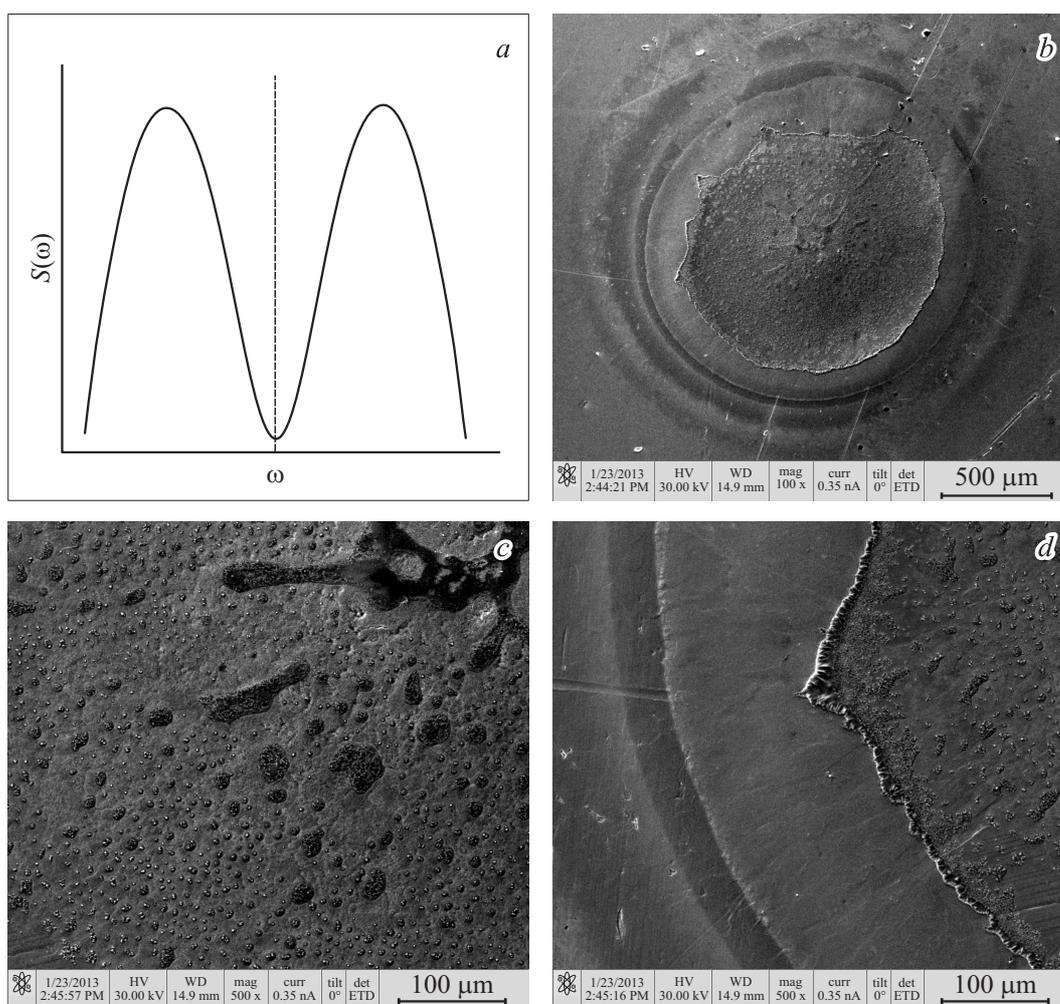
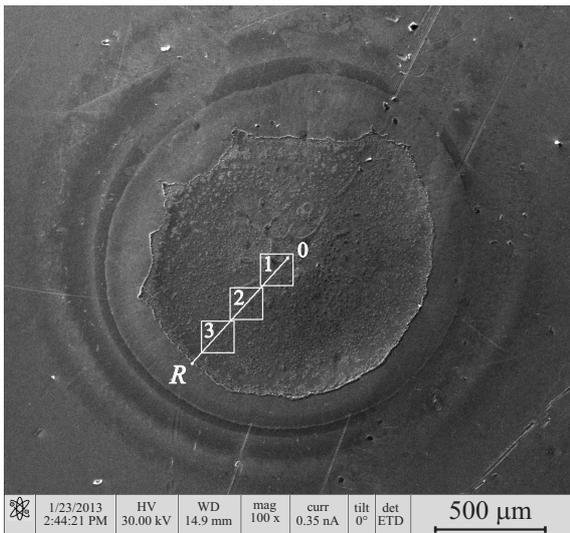


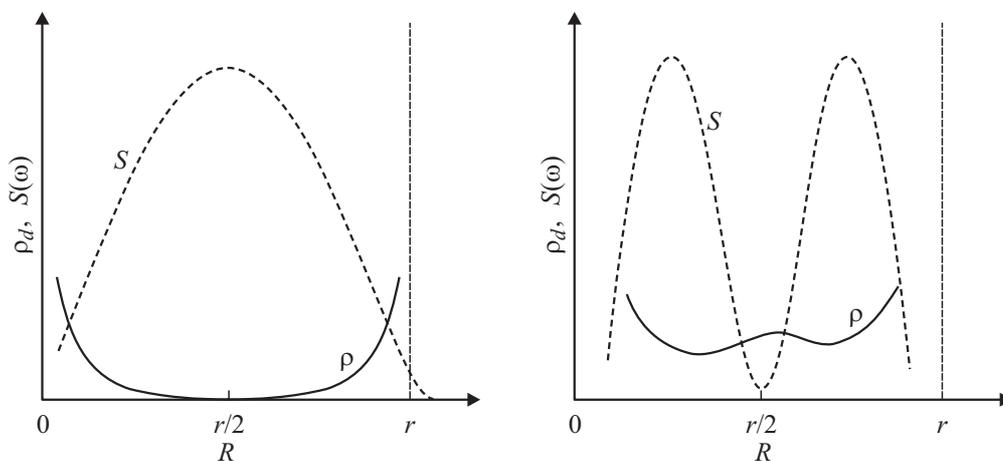
Рис. 6. Форма *M*-импульса излучения (*a*) и соответствующие РЭМ-изображения области воздействия. *b* — увеличение 500 μm, *c* и *d* — 100 μm.



**Рис. 7.** Область воздействия при  $M$ -импульсе, разделенная на 3 зоны.

Наряду с наростами на поверхности образца появляются образования в виде капель и сложных геометрических фигур, которые снова расположены в области кольцевой зоны по краю образца.

При дальнейшем небольшом увеличении энергии излучения в области воздействия наблюдается появление дендритов — сложнокристаллических фрактальных образований, имеющих древовидную ветвящуюся структуру [4]. Показанные на рис. 5 дендриты образуются не по всей области воздействия пятна, а занимают только лишь порядка  $1/2$  его поверхности. При этом наибольшая плотность дендритов наблюдается ближе к краям области воздействия, по направлению к центру распределение дендритов становится редким. В самом центре области воздействия они и вовсе пропадают.



**Рис. 8.** Схематические графики плотности распределения дендритов ( $\rho$ ) в направлении от центра к краям области воздействия излучения и график распределения энергии ( $S$ ) в гауссовом профиле и  $M$ -образном профиле лазерного луча, где  $r$  — радиус области воздействия.

Такая ситуация при модификации поверхности может иметь лишь экзотическое практическое применение. Более интересным с точки зрения практического применения модифицированных поверхностей с новыми свойствами является равномерное распределение дендритов по поверхности. Направление дальнейших исследований было основано на следующих предположениях и фактах.

1. Дендриты в случае гауссового распределения энергии по сечению луча лазерного излучения образуются в кольцевом слое с увеличением плотности к краю пучка, т.е. в области наибольших градиентов плотности энергии в пучке.

2. В работах по исследованию самоорганизации в сложных открытых системах [5,6] градиенты названы движущей силой кооперативного поведения и самоорганизации.

С учетом указанных фактов были проведены эксперименты с увеличением числа градиентов энергии по сечению луча, изменяя форму импульса. Для более равномерного распределения дендритов в экспериментах использовались импульсы с  $M$ -образным профилем сечения (рис. 6, *a*). Таким образом были введены два дополнительных градиента в центре пятна. В ходе этих экспериментов диаметр пучка оставался неизменным и составлял 1.6 мм, энергия излучения была равна 10 Дж, длительность импульса составляла 15 мс. Результаты электронной микроскопии образца представлены на рис. 6, *b, c, d*.

Результаты эксперимента показали, что гипотеза подтвердилась. Действительно, при использовании  $M$ -образного профиля для облучения образца стали наблюдаться ярко выраженные фрактальные кристаллы, практически равномерно распределенные по облучаемой поверхности, т.е. в центральной части обрабатываемой области также можно наблюдать скопление дендритов. Используя полученные изображения, были оценены плотность распределения дендритов в разных областях зоны воздействия и их средние размеры.

## Результаты экспериментов

Распределение дендритов по поверхности зоны облучения и их средние размеры были изучены по изображениям, полученным с помощью снимков электронной микроскопии. На всех снимках область воздействия при *M*-образном импульсе была разделена на 3 сектора — центральная часть пятна и две части в направлении от центра к краям зоны воздействия (рис. 7).

В каждой зоне области воздействия была оценена плотность распределения кристаллов на поверхности ( $\rho_N$ ). В зоне 1 значение плотности  $\rho_N = 2.43 \cdot 10^{-4} [1/\mu\text{m}^2]$ , в зоне 2  $\rho_N = 4.80 \cdot 10^{-3} [1/\mu\text{m}^2]$ , в зоне 3  $\rho_N = 8.41 \cdot 10^{-3} [1/\mu\text{m}^2]$ . Следует заметить, что при *P*-образном импульсе образование дендритов наблюдается только в зоне 3 по краям области воздействия (рис. 8 слева), а при *M*-образном импульсе распределение дендритов практически равномерно по всей области воздействия излучения (рис. 8 справа).

Анализ распределения дендритов по размерам в разных зонах области воздействия излучения показал, что дендриты образуются по всему радиусу пятна и достаточно сильно отличаются друг от друга по размерам. Размер образовавшихся дендритов колеблется в диапазоне от 0.07 до 3.0  $\mu\text{m}$  со средним размером 1.19  $\mu\text{m}$ . В разных зонах области воздействия средний размер дендритов одинаковый.

## Заключение

В ходе работы были проведены эксперименты с использованием Nd:YAG-лазера, в результате чего при достижении энергии импульса порядка 10 J с диаметром пятна 1.6 mm были получены фрактальные дендриты на поверхности области облучения. Изменив форму сечения пучка на *M*-образный профиль распределения энергии, было получено практически равномерное распределение дендритов по поверхности пятна. Также была определена средняя плотность распределения дендритов по поверхности в трех зонах воздействия излучения и подсчитан средний размер формирующихся кристаллов.

В дальнейшем необходимо подробное исследование влияния параметров лазерного излучения на формирование отдельного кристалла. Следует рассмотреть влияние распределения энергии по поверхности материала на фрактальную геометрию получаемых структур [3] и механические свойства модифицированной поверхности.

Работа выполнена в рамках государственного задания ВлГУ 2014/15 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности.

## Список литературы

- [1] Антонов Д.Н., Бурцев А.А., Бутковский О.Я. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 10. С. 83–86.
- [2] Галенко П.К., Харанжевский Е.В., Данилов Д.А. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 5. С. 48–55.

- [3] Антонов Д.Н., Бурцев А.А., Бутковский О.Я. // Тез. докл. VIII Всероссийской конференции молодых ученых „Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика“. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2013. ISSN 2218–2985. С. 21–23.
- [4] Третьяков Ю.Д. // Соровский образовательный журнал. 1998. № 11.
- [5] Николис Г., Пригожин И. Познание сложного: Введение. Изд. 4-е. М.: УРСС: ЛЕНАНД, 2014. 355 с.
- [6] Хакен Г. Синергетика: Принципы и основы. Перспективы и приложения. Ч. 2. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. Изд. 2-е. М.: УРСС: ЛЕНАНД, 2015. 432 с.