

ЛАЗЕРНОЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОДВИЖНЫХ ФОКУСАТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

С.П. Мурзин¹, В.И. Трезуб¹, А.В. Меженин¹, Е.Л. Осетров¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация

Проведено исследование перераспределения плотности мощности лазерного излучения в фокальной плоскости подвижного дифракционного оптического элемента, применяемого для лазерного наноструктурирования металлических материалов. Проанализированы особенности формирования структур модельного сплава системы Cu–Zn при высокоинтенсивном энергетическом воздействии. Установлено, что в поверхностном слое образцов после лазерного воздействия снижается содержание цинка и образуются наноразмерные поры в виде каналов, сужающихся к основанию.

Ключевые слова: фокусатор излучения, перераспределение, плотность мощности, наноструктурирование, структура пористая.

Введение

Воздействие лазерного излучения предоставляет возможность направленно регулировать состав и структуру материалов. При этом кроме изменения размера зерен и микроструктуры металлов и сплавов в ряде случаев имеет место появление следующих наноструктурных эффектов: изменение угловых разориентировок субзерен в составе зерна, дробление блоков, появление упорядоченного распределения наноразмерных включений и пор (сверхрешеток), рост уровня микроискажений и увеличение плотности дислокаций, обуславливающих повышение физико-механических свойств, особенно существенное для тугоплавких металлов и многих сплавов [1, 2]. Существующие оптические системы с традиционными элементами: линзами, призмами, зеркалами - не могут обеспечить высокой надежности при концентрации энергии в зоне воздействия заданной формы с требуемым распределением интенсивности. Для повышения эффективности лазерного воздействия при наноструктурировании целесообразно применять фокусаторы излучения [3-5], позволяющие формировать требуемое распределение поля температур в металлических материалах.

В данной статье на основе исследований перераспределения плотности мощности лазерного излучения в фокальной плоскости подвижного дифракционного оптического элемента и анализа особенностей формирования структур модельного сплава системы Cu–Zn при высокоинтенсивном энергетическом воздействии предлагается метод наноструктурирования металлических материалов с применением фокусаторов излучения.

Перераспределение плотности мощности лазерного излучения в фокальной плоскости при изменении пространственного положения дифракционного оптического элемента

Проведено исследование перераспределения плотности мощности лазерного излучения в фокальной плоскости подвижного дифракционного оптического элемента с формой рабочей поверхности на основе гиперболоидического параболоида:

$$Z(U, V) = \text{mod}_{m\lambda/(2\cos\theta)} \left(-\frac{U^2 \cdot \cos\theta}{2q} + \frac{V^2}{2p \cdot \cos\theta} + C \right), \quad (1)$$

где $Z(U, V)$ – высота рельефа в точке (U, V) оптического элемента; U, V – координаты точки отражающего оптического элемента в системе координат с осью OU , направленной противоположно проекции падающего луча и имеющей начало в центре отражающей поверхности; $\text{mod}_{m\lambda/(2\cos\theta)}(h)$ – функция, равная наименьшему положительному остатку от деления h на $m\lambda/(2\cos\theta)$; m – целое число; λ – длина волны излучения; θ – угол между оптической осью излучения и нормалью к плоскости оптического элемента; p и q – параметры; C – высота микрорельефа в центральной точке фокусатора. Фокусатор излучения CO₂-лазера с длиной волны $\lambda = 10,6 \cdot 10^{-6}$ м, изготовленный на основе аналитической зависимости (1), имел следующие параметры: фокусное расстояние $f = 0,835$ м, максимальный радиус фокусируемого пучка $R_{\max} = 17,5 \cdot 10^{-3}$ м, угол между оптической осью излучения и нормалью к плоскости фокусатора $\theta = 45^\circ$.

При расчете распределения плотности мощности в фокальной плоскости фокусатора излучения проводилась дискретизация поверхности оптического элемента и расчетной области. Размер элементарной ячейки в фокальной плоскости составлял $0,25 \times 0,25$ мм. На рис. 1 представлено расчетное распределение плотности мощности в фокальной плоскости неподвижного фокусатора (1), формирующего лазерное излучение мощностью $Q = 1000$ Вт.

Проведены экспериментальные исследования перераспределения плотности мощности технологического CO₂-лазера ROFIN DC 010 при изменении пространственного положения фокусатора излучения (1).

Мощность лазера составляла $Q = 1000$ Вт, радиус выходного пучка с гауссовским распределением интенсивности имел значение $R = 10^{-2}$ м, а расходимость – не более $0,15 \cdot 10^{-3}$ рад. Использовался метод параллельного анализа, т. е. проводилась визуализация распределения плотности мощности лазерного излучения одновременно по всему сечению пучка с последующей оцифровкой изображения. На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований по определению распределения плотности мощности в фокальной плоскости неподвижного дифракционного оптического элемента.

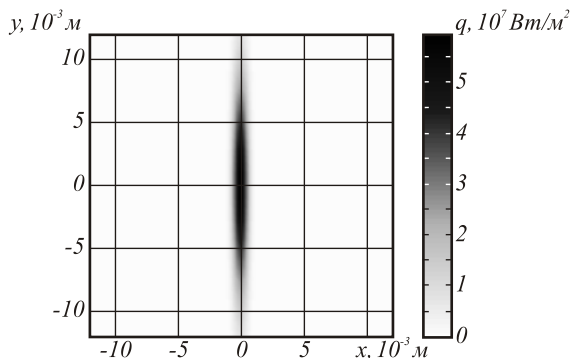


Рис. 1. Расчетное распределение плотности мощности в фокальной плоскости неподвижного дифракционного оптического элемента:

$$f = 0,835 \text{ м}, R = 10,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}, Q = 1000 \text{ Вт}$$

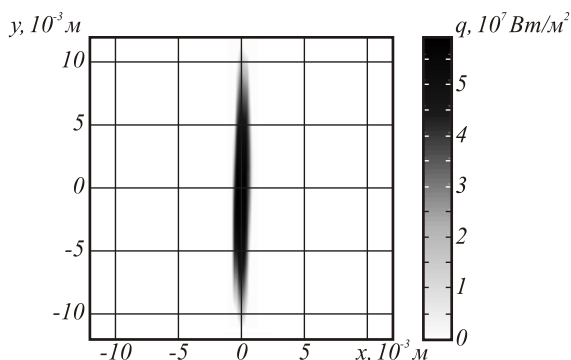


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований по определению распределения плотности мощности в фокальной плоскости неподвижного дифракционного оптического элемента:

$$f = 0,835 \text{ м}, R = 10^{-2} \text{ м}, Q = 1000 \text{ Вт}$$

Результаты экспериментальных исследований удовлетворительно коррелируют с расчетными данными. На рис. 3 представлены результаты визуализации распределения плотности мощности лазерного излучения в фокальной плоскости при повороте оптического элемента (1) на угол $\varphi = 30^\circ; 60^\circ; 90^\circ$ вокруг центральной нормали к его рабочей поверхности. При повороте фокусатора излучения изменяется его фокусное расстояние, которое для указанных углов поворота составило: $f = 0,655$ м; $0,47$ м; $0,418$ м соответственно.

Проведенные исследования позволили установить, что при повороте фокусатора излучения вокруг центральной нормали к его рабочей поверхно-

сти на угол от 0 до 90° происходит изменение угла поворота отрезка в фокальной плоскости, уменьшение его длины и фокусного расстояния. При этом максимальная плотность мощности в фокальном пятне также изменяется, превышая $q \geq 5 \cdot 10^7$ Вт/м².

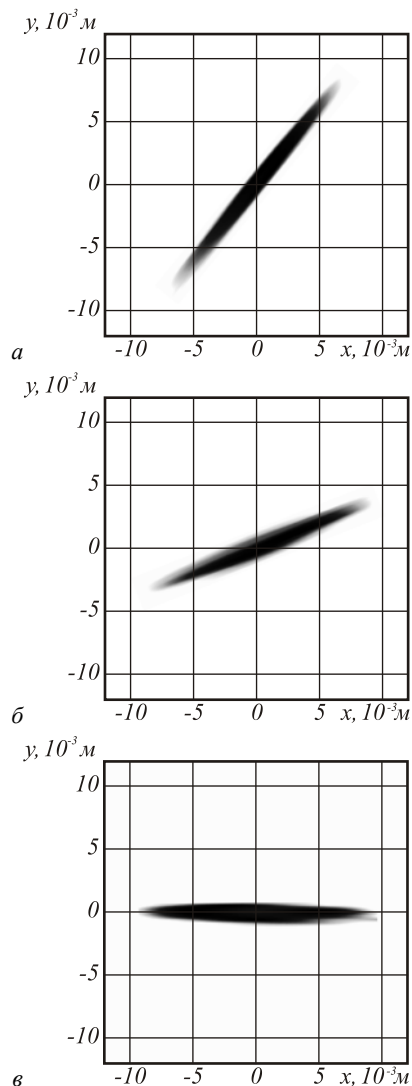


Рис. 3. Результаты визуализации распределения плотности мощности лазерного излучения в фокальной плоскости при повороте оптического элемента (1) вокруг центральной нормали к его рабочей поверхности на угол:

а) $\varphi=30^\circ$, $f = 0,655$ м; б) $\varphi=60^\circ$, $f = 0,47$ м;

в) $\varphi=90^\circ$, $f = 0,418$ м

Анализ особенностей формирования структур модельного сплава системы Cu–Zn при высокоинтенсивном энергетическом воздействии

Применение систем формирования высокоинтенсивных энергетических потоков на поверхности металлических материалов предоставляет возможность целенаправленно изменять их свойства [6, 7]. Проведены экспериментальные исследования по выявлению особенностей формирования структуры модельного материала типа двухкомпонентный твердый раствор, один из компонентов которого облада-

ет более высокой упругостью пара. В качестве модельного сплава системы Cu–Zn выбрана латунь Л62. Цветные сплавы, в частности, латуни, характеризуются зерненным строением с выделением отдельных фаз с различным химическим составом на локальных участках. Зерна состоят из более мелких структурных составляющих – отдельных фрагментов и блоков. Соседние зерна, фрагменты и блоки имеют неодинаковую пространственную ориентировку решеток и, как правило, разделены малоугловыми границами. Вследствие этого при одинаковых условиях высокоэнергетического воздействия на локальных участках поверхности теплофизические коэффициенты различны, формируются неодинаковые условия теплообмена. Поэтому в пределах зерна энергию, достаточную для сублимации, могут накапливать только отдельные участки. Условия теплообмена на поверхности также изменяются и в результате сублимации компонента сплава из малых объемов вещества. Вместе с испарившимся веществом за счет массопереноса уносится поглощенная им энергия, снижая энерговыклад в соседние участки поверхности.

Осуществлен выбор режимов лазерного воздействия, предоставляющих возможность изменения структур металлических материалов на наноразмерном уровне. Воздействие излучения CO₂-лазера ROFIN DC 010 осуществлялось при следующих параметрах: диапазон регулирования выходной мощности $Q=100\dots1000$ Вт, режим работы лазера – квазинепрерывный с частотой следования импульсов 5000 Гц. Исходное излучение с гауссовским распределением интенсивности преобразовалось подвижным фокусатором в отрезок, поверхность которого выполнена по аналитической зависимости (1). Контроль температурного поля в центре энергетического источника на поверхности образца осуществлялся с помощью инфракрасного термометра «Кельвин-1300 ЛЦМ» с диапазоном измерения температур 300...1300 °С. Регистрируемые данные через последовательный интерфейс RS-232 поступали в персональный компьютер.

Исследовались образцы размерами 70×20×2 мм, которые закреплялись в фиксаторах при минимальной площади контакта с установочным приспособлением. До проведения лазерной обработки с поверхности образцов был снят слой толщиной 0,2 мм. Осуществлялось длительное (более 200 с) воздействие квазинепрерывным лазерным излучением. При нагреве излучением наблюдалось изменение цвета обращенной к излучению поверхности образцов (покраснение). С увеличением времени воздействия интенсивность покраснения поверхности усиливалась. Исследования образцов из модельного сплава системы Cu–Zn проводились методом электронной микроскопии с помощью прибора Philips 525 при ускоряющем напряжении 25 кВ. Растровый электронный микроскоп Philips 525 предназначен для топографического и качественного фазового

анализа поверхностей металлических и полупроводниковых материалов и количественного элементного анализа; обладает достаточной глубиной резкости для изучения поверхности металлов, имеющих рельеф, а также пористых структур. Анализ элементного состава выполнялся в интегральном режиме, при котором глубина анализируемого металла превышает величину нескольких десятков микрон.

После лазерного воздействия на поверхности образца формируется пористая структура с наноразмерными порами, равномерно распределенными по площади, представленная на рис. 4. Темные участки 1 соответствуют образовавшимся порам, а светлые участки 2 – поверхности с исходной структурой.



Рис. 4. Структура поверхностного слоя после лазерного воздействия на образец

Установлено, что лазерное воздействие на твердокристаллический материал вызывает изменение рельефа поверхности. В зависимости от величины и распределения плотности мощности в пятне нагрева, а также длительности воздействия эти изменения проявляются как в развитии (образовании углублений с клинообразным поперечным сечением), так и в сглаживании рельефа.

На рис. 5, 6 представлены результаты анализа элементного состава сердцевин и поверхности образца после лазерного воздействия.

В результате анализа элементного состава сердцевин образца установлено, что он содержит 60,65 вес.% Cu; 38,52 вес.% Zn и 0,83 вес.% примесей, что допускается ГОСТ 2208 – 2007. Анализ элементного состава поверхности образца после лазерного воздействия в пересчете на компактный материал показал увеличение относительного содержания меди до 70,72 вес.%, снижение доли цинка до 28,49 вес.% и наличие 0,79 вес.% примесей.

В результате проведенного анализа элементного состава установлено, что после лазерного воздействия поверхность образца характеризуется более низким содержанием Zn, чем сердцевина, для которой сохраняется исходный элементный состав. Это подтверждает протекание процессов сублимации

цинка в результате лазерного воздействия при указанных параметрах.

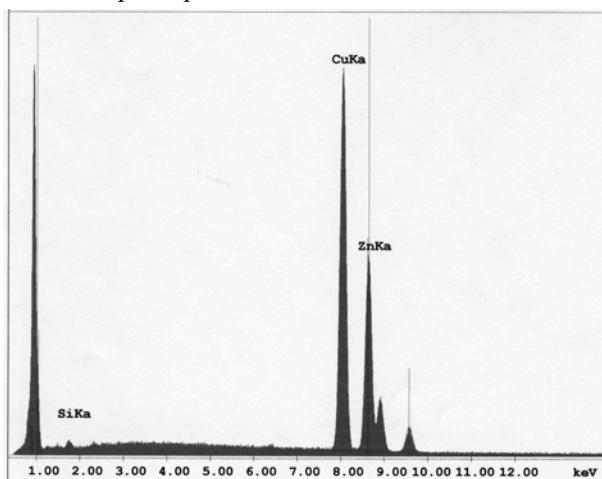


Рис. 5. Результаты анализа элементного состава сердцевины образца

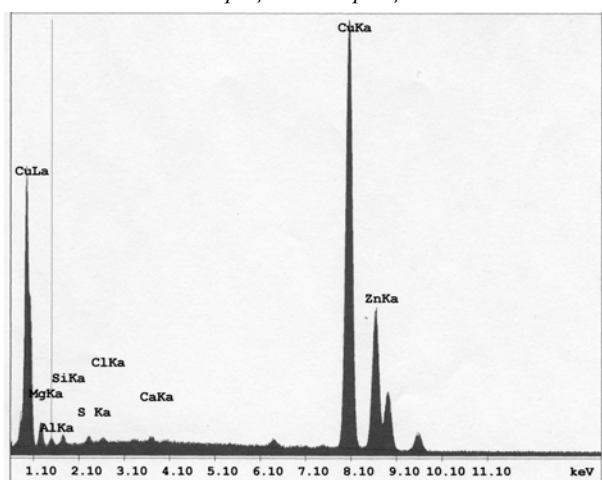


Рис. 6. Результаты анализа элементного состава поверхности образца после лазерного воздействия

Заключение

Исследования перераспределения мощности излучения фокусатором с формой рабочей поверхности на основе гиперболического параболоида позволили установить следующее. При повороте фокусатора излучения вокруг центральной нормали к его поверхности на угол от 0 до 90° происходит изменение угла поворота отрезка в фокальной плоскости, уменьшение его длины и фокусного расстояния.

При этом максимальная плотность мощности в фокальном отрезке также изменяется, превышая $5 \cdot 10^7 \text{Вт/м}^2$, что позволяет использовать фокусатор для создания наноразмерных структур в поверхностных слоях металлических материалов.

Осуществлен выбор режимов лазерного воздействия, предоставляющих возможность изменения структур материалов на наноразмерном уровне. Методами растровой электронной микроскопии установлено, что поверхностный слой образцов из модельного сплава системы Cu–Zn после лазерного воздействия характеризуется наличием наноразмерных пор в виде каналов, сужающихся к основанию. В результате анализа элементного состава установлено, что поверхность образцов после обработки представляет собой слой с пониженным содержанием цинка. Основным механизмом изменения содержания компонентов в поверхностном слое является сублимация компонента сплава с более высокой упругостью пара (цинка).

Литература

1. Перспективные материалы. Т. 1. Структура и методы исследования / под редакцией Д.Л. Мерсона. – ТГУ, МИСиС, 2006. – 536 с.
2. Перспективные материалы. Т. 2. Конструкционные материалы и методы управления их качеством / под редакцией Д.Л. Мерсона. – ТГУ, МИСиС, 2007. – 468 с.
3. Методы компьютерной оптики / под редакцией В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2000. – 688 с.
4. Golub, M.A. Infra-red radiation focusators / M.A. Golub, I.N. Sisakian, V.A. Soifer // Optics and lasers in engineering, 1991. – Vol. 15. N 5. – P. 297-309.
5. Дифракционная компьютерная оптика / под редакцией В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2007. – 778 с.
6. Мурзин, С.П. Формирование наноразмерных пористых структур твердокристаллических материалов при воздействии лазерного излучения / С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.В. Меженин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2008. – Т.10, №3 – С. 772-774.
7. Формирование лазерного излучения для создания наноразмерных пористых структур материалов / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, А.В. Меженин, Е.А. Осетров // Компьютерная оптика, 2008. – Т. 32, № 3. – С. 246-248.

LASER NANOSTRUCTURIZING OF METAL MATERIALS BY APPLICATION OF MOVEABLE RADIATION FOCUSATORS

*S.P. Murzin¹, V.I. Tregub¹, A.V. Mezhenin¹, E.L. Osetrov¹
¹S.P. Korolev Samara State Aerospace University, Samara, Russia*

Abstract

Researching redistribution of laser radiation's power density in the movable diffractive optical element's focal plane applied for laser nanostructuring for metal materials is carried out. Formation features of a modeling alloy system Cu-Zn structures at high-intensity power influence are analysed. It is established, that zinc's concentration in the superficial layer of samples after laser influence is decreased and nanodimension pores in the form of the channels narrowed to the basis are formed.

Key words: focusator of radiation, redistribution, power density, nanostructuring, porous structure.

Citation: Murzin SP, Tregub VI, Mezhenin AV, Osetrov EL. Laser nanostructuring of metal materials by application of moveable radiation focusators. Computer Optics 2008; 32(4): 353-6.

References

- [1] Merson DL, ed. Promising Materials. Book 1. Structure and Methods of Studies [In Russian]. TGU, MISiS 2006; 536 p.
- [2] Merson DL, ed. Promising Materials. Book. 2. Construction Materials and Quality Control Methods [In Russian]. TGU, MISiS 2006; 468 p.
- [3] Soifer VA, ed. Methods of Computer Optics [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher 2000; 688 p.
- [4] Golub MA, Sisakian IN, Soifer VA. Infra-red radiation focusators. Optics and lasers in engineering 1991; 15(5): 297-309.
- [5] Soifer VA, ed. Diffractive Computer Optics [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher 2007; 778 p.
- [6] Murzin SP, Tregub VI, Mezhenin AV. Nanodimensional porous structures formation of solid-crystal materials by the laser radiation influence [In Russian]. Proceedings of Samara Scientific Centre of the RAS 2008; 10(3): 772-774.
- [7] Kazanskiy NL, Murzin SP, Mezhenin AV, Osetrov EL. Laser radiation formation for creation of nanodimensional porous structures of materials [In Russian]. Computer Optics 2008; 32(3): 246-248.