

ПОВЫШЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ ГЛУБИНЫ ЗОНЫ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОПОРИСТЫХ СТРУКТУР ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ФОКУСАТОРОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Мурзин С.П., Осетров Е.Л., Трегуб Н.В., Малов С.А.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева

Аннотация

Для повышения равномерности глубины зоны образования нанопористой структуры в приповерхностном слое металлических материалов при воздействии лазерного излучения с высокой частотой следования импульсов предлагается использовать оптическую систему на основе подвижного фокусатора излучения в отрезок. Это предоставляет возможность целенаправленно изменять распределение интенсивности излучения в области лазерного воздействия. Выравнивание температурно-скоростных режимов в зоне термического влияния позволяет обеспечить равномерную глубину зоны обработки металлических материалов.

Ключевые слова: структура нанопористая, материал металлический, воздействие лазерное, обработка, фокусатор излучения, распределение, интенсивность, мощность.

Введение

Нанопористые металлические материалы перспективны для применения при фильтрации газов и жидкостей, синтезе химических соединений с помощью катализаторов, утилизации углеводородных загрязнений [1]. Они, в отличие от наиболее широко распространенных в настоящее время полимерных и керамических, обладают улучшенными физико-механическими и технологическими свойствами: механической прочностью, термостойкостью, тепло- и электропроводностью; имеют длительный срок службы, повышенную химическую стойкость. Прогрессивным методом создания нанопористых металлических материалов является воздействие лазерного излучения с высокой частотой следования импульсов, позволяющее создать в приповерхностном слое структуру со средним размером нанопор 40...50 нм [2, 3]. Основным механизмом образования нанопористой структуры является сублимация компонента сплава с более высокой упругостью пара. В материале создается градиент концентраций, в дальнейшем данный компонент сублимирует в той мере, в какой обеспечивается его диффузия к поверхности. Условием для интенсификации массопереноса в твердой фазе металлических материалов является нестационарная локальная деформация, вызываемая высокоэнергетическим внешним воздействием [4, 5]. При подводе энергии лазерного излучения обеспечивается локальность физических процессов по глубине и площади при сохранении исходных свойств материала в остальном объеме, а применение специальных оптических систем позволяет избирательно проводить обработку областей необходимой геометрии. При создании нанопористых структур на поверхности материалов одним из требований является обеспечение равномерности толщины и однородности пористого слоя. Глубина зоны и скорость образования пор, кроме длительности лазерного воздействия и частоты следования импульсов, обуславливаются величиной и распределением интенсивности излучения в пятне нагрева. Применение фокусаторов излучения [6, 7] предоставляет возможность целенаправленно изменять

распределение интенсивности излучения в области лазерного воздействия. Для настройки требуемого режима фокусировки целесообразно осуществить движение фокусатора [8].

Целью данной работы является повышение равномерности глубины зоны образования нанопористых структур металлических материалов при воздействии лазерного излучения с высокой частотой следования импульсов за счет использования фокусатора в отрезок.

1. Применение фокусаторов излучения для перераспределения интенсивности лазерного излучения

Основной причиной неравномерной глубины зоны обработки материалов является неодинаковое тепловыделение в области лазерного воздействия, зависящее от распределения интенсивности излучения. Проведено исследование перераспределения интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости подвижного фокусатора в отрезок с формой рабочей поверхности, которая определяется уравнением, приведенным в работах [7, 8]. Фокусатор излучения в отрезок имел следующие параметры: фокусное расстояние $f = 1$ м, максимальный диаметр фокусируемого пучка $d = 50 \cdot 10^{-3}$ м, задаваемый при изготовлении фокусатора параметр гауссовского распределения интенсивности излучения $\sigma = 0,35d$, угол между оптической осью излучения и нормалью к плоскости фокусатора $\theta = 45^\circ$. Распределение интенсивности излучения в фокальной плоскости определялось при численном расчете интеграла Френеля-Кирхгофа. Осуществлялась дискретизация фазовой функции фокусатора с интервалом 10^{-4} м.

Для проведения исследований использовался технологический CO₂ слэб-лазер ROFIN DC 010 с диффузионным охлаждением и высокочастотной накачкой. Основные технические характеристики CO₂-лазера ROFIN DC 010: длина волны излучения 10,6 мкм; частота следования импульсов 2...5000 Гц; длительность одиночного импульса 0,026...125 мс; диапазон регулирования выходной

мощности 100...1000 Вт; диаметр выходного пятна $20 \cdot 10^{-3}$ м; расходимость не более 0,3 мрад; поляризация линейная, 45° относительно горизонтальной плоскости. Для увеличения диаметра исходного пучка с гауссовским распределением интенсивности до значения $d = 44 \cdot 10^{-3}$ м применялся коллиматор, содержащий систему двух плоско-выпуклых сферических линз из ZnSe с радиусами кривизны 0,08 м и 0,176 м. Измерение распределения интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости фокусатора проводилось измерителем мощности ИМО-2Н, перемещающимся в системе координат, перпендикулярной оси луча, и снабженным квадратной диафрагмой площадью 10^{-8} м². Снижение мощности лазерного излучения достигалось при увеличении скважности импульсов.

Перераспределение интенсивности излучения, формируемое периферийными зонами фокусатора к краям лазерного пятна путем повышения доли энергии, достигается увеличением диаметра фоку-

сируемого луча. Так, при увеличении d_ϕ от $d_\phi = 20 \cdot 10^{-3}$ м до $d_\phi = 44 \cdot 10^{-3}$ м, интенсивность излучения в центре фокального отрезка уменьшается в 1,6 раза, а на периферийных участках увеличивается в 1,3 раза по сравнению со значением в центре лазерного пятна, длина фокального отрезка увеличивается в 1,25 раза. При повороте фокусатора на угол $\phi = 10^\circ$ вокруг нормали, проходящей через его центр, происходит относительное выравнивание интенсивности излучения вдоль лазерного пятна, длина фокального отрезка увеличивается в 1,5 раза по сравнению с исходным положением. При повороте фокусатора, кроме перераспределения интенсивности вдоль фокального отрезка, происходит уменьшение ее средней величины. На рис. 1, 2 представлены результаты расчета, а также экспериментальных исследований по определению распределения интенсивности излучения в фокальной плоскости подвижного дифракционного оптического элемента.

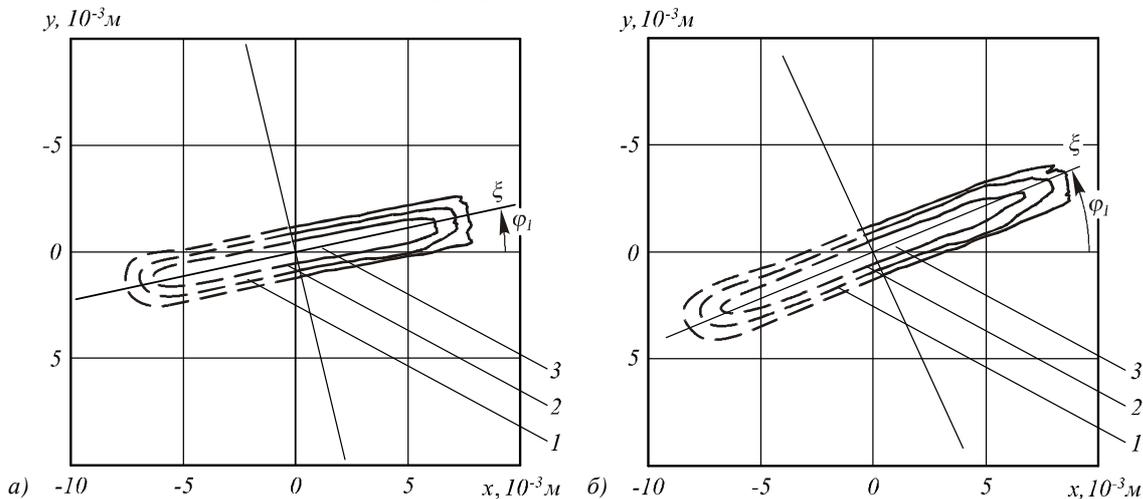


Рис. 1. Изофоты распределения интенсивности излучения в фокальной плоскости фокусатора излучения: угол поворота оптического элемента $\phi = 5^\circ$ (а); $\phi = 10^\circ$ (б). 1 – $q = 5 \cdot 10^4$ Вт/м²; 2 – $q = 5 \cdot 10^6$ Вт/м²; 3 – $q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м². Мощность излучения лазерной установки $Q = 10^3$ Вт. $d_\phi = 2\sigma_\phi = 44 \cdot 10^{-3}$ м.

--- результаты расчета; — эксперимент

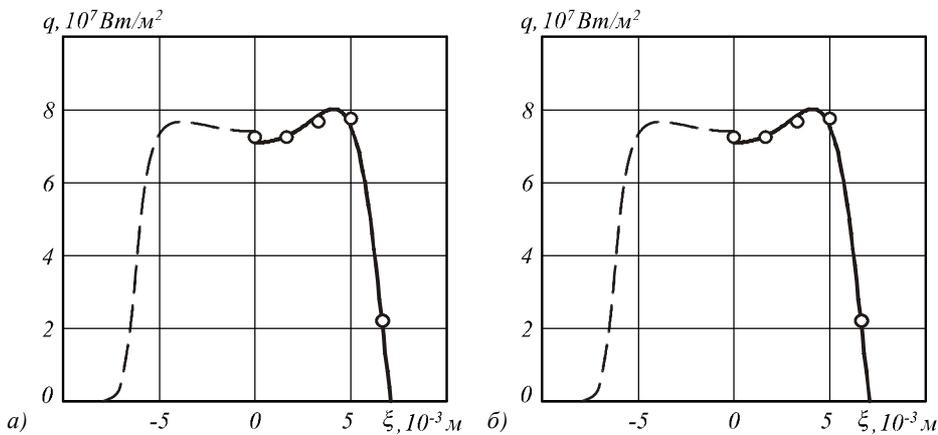


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения в сечении а - а неподвижного дифракционного оптического элемента: $\phi = 5^\circ$ (а); $\phi = 10^\circ$ (б).

--- результаты расчета; —○— эксперимент

При реализации схемы обработки с относительным перемещением лазерного луча и обрабатываемого материала увеличение интенсивности лазерного излучения по краям полосового энергетического источника компенсирует повышенный теплоотвод с периферийных участков. В этом случае перераспределение интенсивности излучения к краям лазерного пятна достигается увеличением радиуса фокусируемого луча путем повышения доли энергии, формируемой периферийными зонами фокусатора. При повороте фокусатора излучения происходит перераспределение интенсивности излучения вдоль фокального отрезка, уменьшение ее средней величины, увеличивается длина лазерного пятна.

Для выравнивания температурно-скоростных режимов по ширине зоны термического влияния при небольшой скорости относительного перемещения лазерного луча и обрабатываемого материала целесообразно осуществить поворот фокусатора излучения на угол $\phi = 5^\circ$. При обработке неподвижных образцов относительное выравнивание интенсивности излучения вдоль лазерного пятна достигается поворотом фокусатора на угол $\phi = 10^\circ$.

2. Создание нанопористых структур металлических материалов

Проведены экспериментальные исследования воздействия лазерного излучения с высокой частотой следования импульсов на образцы из латуни Л62. Такой медно-цинковый сплав является металлическим материалом типа двухкомпонентный твердый раствор, один из компонентов которого имеет более высокую упругость паров. Исследовались образцы толщиной $2 \cdot 10^{-3}$ м. Для создания нанопористых структур на поверхности материала осуществлялось длительное (более 30 с) воздействие лазерным излучением с частотой следования импульсов $5 \cdot 10^3$ Гц. При этом наблюдалось изменение цвета (покраснение) как обращенной к излучению, так и обратной поверхности образцов. С увеличением времени воздействия интенсивность покраснения поверхности усиливалась. Для выявления микроструктуры приповерхностного слоя были изготовлены шлифы под углом около 5° к обработанной поверхности. Выбранная методика проведения металлографических исследований позволила установить закономерности формирования структуры в сплаве при воздействии лазерного излучения с высокой частотой следования импульсов. Исследование микроструктуры проводилось в поле зрения металлографического микроскопа Neophot-30 как на нетравленных шлифах, так и на подвергнутых травлению. На рисунках 3, 4 представлена структура приповерхностного слоя медно-цинкового сплава Л62 после воздействия лазерным излучением. Для выявления особенностей формирования микроструктуры материала использовали раствор следующего состава: хлористое железо – 10 г; соляная кислота – 25 мл; вода – 100 мл.

В результате исследования структуры установлено следующее. В поперечном сечении поры ориентированы от поверхности вглубь металлического материала. На поверхности плотность пор выше, они занимают практически всю площадь зерен, имеются поры канального типа. В приповерхностном слое формирование пор происходит преимущественно по границам зерен и блоков, в результате чего образуются новые границы и, как следствие, зерна измельчаются.



Рис. 3. Структура приповерхностного слоя медно-цинкового сплава Л62 после проведения лазерного воздействия: увелич. $\times 500$. Протравленный шлиф



Рис. 4. Структура приповерхностного слоя медно-цинкового сплава Л62 после проведения лазерного воздействия: увелич. $\times 500$. Протравленный и повторно полированный шлиф

Изменение цвета приповерхностного слоя является косвенным признаком изменения содержания цинка в сплаве.

По результатам проведенных исследований методом просвечивающей электронной микроскопии установлено, что образующиеся при лазерном воздействии нанопоры равномерно распределены внутри субзерна, имеют достаточно стабильные размеры и форму. На границе субзерен распределение формы и размеров нанопор более неодно-

родно. Такая структура формируется вследствие образования вакансий и их коагуляции в результате сублимации цинка с поверхности материала, создания градиента концентраций и диффузии компонента с относительно высокой упругостью паров к поверхности.

Поворот фокусатора излучения в отрезок на угол $\phi = 5^\circ$ обеспечивает выравнивание температурно-скоростных режимов по ширине зоны термического влияния при лазерной обработке движущегося со скоростью $v \leq 3 \cdot 10^{-3}$ м/с образца из медно-цинкового сплава толщиной $2 \cdot 10^{-3}$ м. Обработку неподвижных образцов целесообразно проводить лазерным излучением, формируемым при повороте фокусатора на угол $\phi = 10^\circ$. При применении оптических систем с указанными параметрами достигается равномерная глубина зоны обработки металлических материалов.

Заключение

При реализации схемы обработки с относительным перемещением лазерного луча и обрабатываемого материала увеличение интенсивности лазерного излучения по краям полосового энергетического источника компенсирует повышенный теплоотвод с периферийных участков. В этом случае перераспределение интенсивности излучения к краям лазерного пятна достигается увеличением радиуса фокусируемого луча путем повышения доли энергии, формируемой периферийными зонами фокусатора в отрезок. При повороте фокусатора происходит перераспределение интенсивности излучения вдоль фокального отрезка, уменьшение ее средней величины, увеличивается длина фокального отрезка.

Для выравнивания температурно-скоростных режимов по ширине зоны термического влияния при небольшой скорости относительного перемещения лазерного луча и обрабатываемого материала целесообразно осуществить поворот фокусатора излучения на угол $\phi = 5^\circ$. При обработке неподвижных образцов относительное выравнивание интенсивности излучения вдоль лазерного пятна достигается поворотом фокусатора на угол $\phi = 10^\circ$. Использование оптических систем на основе подвижных фокусаторов излучения позволяет обеспечить равномерную глубину зоны образования нанопористой структуры в приповерхностном слое металлических материалов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ и Федерального агентства по образованию РФ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (государственные контракты № 02.740.11.0453, П251).

Литература

1. Nanoporous materials: science and engineering / Ed. by G.Q. Lu, X.S. Zhao. – London: Imperial College Press Science, 2004. – 897 p.
2. 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 РАН. – 2008. – Т. 10, № 3. – С. 772-774.
3. Мурзин, С.П. Лазерное наноструктурирование металлических материалов с применением подвижных фокусаторов излучения / С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.В.Меженин, Е.Л. Осетров // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 4. – С. 353-356.
4. Герцрикен, Д.С. Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий / Д.С. Герцрикен, В.Ф. Мазанко, В.М. Тышкевич, В.М. Фальченко. – 3-е изд., испр. – Киев: РИО ИМФ, 2001. – 443 с.
5. Мазанко, В.Ф. Диффузионные процессы в металлах под действием магнитных полей и импульсных деформаций: в 2-х т. / В.Ф. Мазанко, А.В. Покоев, В.М. Миронов и др. – М.: Изд-во «Машиностроение – 1»; Самара: Изд-во «Самарский университет», 2006. – Т.1 – 346 с.; Т.2 – 320 с.
6. Golub, M.A. Infra-red radiation focusators / M.A. Golub, I.N. Sisakian, V.A. Soifer // Optics and lasers in engineering, 1991. – Vol. 15, № 5. – P. 297-309.
7. Методы компьютерной оптики / под ред. В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2000. – 688 с.
8. Мурзин, С.П. Исследования температурных полей в конструкционной стали при воздействии лазерных потоков, сформированных фокусаторами излучения / С.П. Мурзин, Е.Л. Осетров // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, № 3. – С. 59-62.

Reference

1. Lu, G.Q. Zhao, X.S. Nanoporous materials: science and engineering, Imperial College Press Science, 2004. 897 p.
2. Murzin, S.P. V.I. Tregub, A.V. Mezhenin, Nanoporous structures formation of firm crystal materials by action of laser radiation, Proceedings of Samara Science Center RAS, 10(3), 772-774 (2008) - [in Russian].
3. Murzin, S.P. Tregub, V.I. Mezhenin, A.V. Osetrov E.L., Laser nanostructuring of metal materials by application of moveable radiation focusators, Computer optics, . 32(4), 353-356 (2008) - [in Russian].
4. Gercricken, D.S. Mazanko, V.F. Tyshkevich, V.M. Fal'chenko, V.M. Mass transfer in external influence conditions, iss. 3, corr., RIO IMF, 2001. 443 p. - [in Russian].
5. Mazanko, V.F. Pokoev, A.V. Mironov, V.M. Diffussion processes under magnetic fields and pulse deformations, «Samara University, 2006. Vol.1: 346 p. Vol. 2: 320 p. – [in Russian].
6. Golub, M.A. Sisakian, I.N. Soifer, V.A. Infra-red radiation focusators, Optics and lasers in engineering, vol. 15. No. 5, 297-309 (1991).
7. Soifer, V.A. Methods of computer optics, Physmathlit, 2000. 688 p. - [in Russian].
8. Murzin, S.P. Osetrov, E.L. Researches of temperature fields in constructional steel under the laser streams generated by radiation focusators, Computer optics, 31(3), 59-62 (2007) - [in Russian].

THE INCREASING OF THE UNIFORMITY OF NANOPOROUS STRUCTURE CREATION ZONE DEPTH BY THE LASER ACTION SHAPED BY RADIATION FOCUSATOR

*S. P. Murzin, E. L. Osetrov, N. V. Tregub, S. A. Malov
S.P. Korolev Samara State Aerospace University*

Abstract

The application of optical system on a basis of moveable radiation focusator in a line is offered for increasing the uniformity of nanoporous structure formation zone depth in near-surface layer of metal materials by laser action with high pulse repetition frequency. It gives an opportunity to purposefully change power density in the laser action zone. Temperature-speed modes balancing in the heat-affected zone make it possible to secure depth uniformity of area of processing metal materials.

Key words: nanoporous structure, metal material, laser action, processing, radiation focusator, distribution, intensity, power.

Сведения об авторах



Мурзин Сергей Петрович, 1963 года рождения. В 1986 году окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева) по специальности «Двигатели летательных аппаратов». Доктор технических наук (2005 год), работает профессором кафедры автоматических систем энергетических установок СГАУ. Заместитель руководителя научно-образовательного центра лазерных систем и технологий СГАУ. Мурзин С.П. – специалист в области лазерных технологий и нанотехнологий, лазерной физики и оптики. В списке научных работ Мурзина С.П. более 50 статей, монография, 17 авторских свидетельств и патентов. E-mail: murzin@ssau.ru.

Serguei Petrovich Murzin (b. 1963) graduated (1986) from the S. P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (KuAI, presently, S. P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU)), majoring in Aircraft Engines. He received his Doctor in Technics (2005) degree from Samara State Aerospace University. He is holding a position of professor at SSAU's Power Plant Automatic Systems sub-department. He is the deputy manager of the Research & Education Center of Laser systems and Technologies of SSAU. He is a specialist in laser technology and nanotechnology, laser physics and optics. He is co-author of more than 50 scientific papers, 1 monograph, and 17 inventions and patents. E-mail: murzin@ssau.ru.



Осетров Евгений Леонидович, 1986 года рождения, в 2009 году с отличием окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (СГАУ) по специальности 200202 «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике». Работает инженером в НИИ-201 СГАУ, e-mail: murzin@ssau.ru.

Область научных интересов: лазерные системы и технологии, лазерная физика, нанотехнологии. В списке научных работ Осетрова Е.Л. 10 статей, 3 патента РФ.

Evgeniy Leonidovich Osetrov (b. 1986), with honours graduated (2009) from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) majoring in Laser Systems in Rocket technology and Aerospace industry. He works as the engineer at the SSAU's Research Institute № 201, e-mail: murzin@ssau.ru.

Research interests are laser systems and technologies, laser physics, nanotechnologies. He is co-author of 10 scientific papers, 3 patents.



Трегуб Николай Валерьевич, 1986 года рождения, в 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (СГАУ) по специальности 150106 «Обработка металлов давлением». Обучается в магистратуре СГАУ по направлению 150100 «Металлургия», e-mail: murzin@ssau.ru.

Область научных интересов: материаловедение, технологии обработки металлов. В списке научных работ Трегуба Н.В. 2 статьи, 1 патент РФ.

Nikolay Valeryevich Tregub (b. 1986) graduated (2009) from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) majoring in Metal Processing and Metal forming. He is an undergraduate majoring in Metallurgy, e-mail: murzin@ssau.ru.

His research interests are currently focused on science of materials, metal processing technologies. He is co-author of 2 scientific papers, 1 patent.



Малов Сергей Анатольевич, 1987 года рождения, в 2010 году с отличием окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (СГАУ) по специальности 200202 «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике». Работает инженером в НИИ-201 СГАУ, e-mail: *murzin@ssau.ru*.

Область научных интересов: лазерные системы и технологии. В списке научных работ Малова С.А. 2 статьи.

Serguey Anatolyevich Malov (b. 1987), with honours graduated (2010) from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) majoring in Laser Systems in Rocket technology and Aerospace industry. He works as the engineer at the SSAU's Research Institute № 201, e-mail: *murzin@ssau.ru*.

His research interests are currently focused on laser systems and technologies. He is co-author of 2 scientific papers.

Поступила в редакцию 01 марта 2010 г.