

КОРОТКОЕ СООБЩЕНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ЛАЗЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА В ТВЁРДОЙ ФАЗЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

С.П. Мурзин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Аннотация

Проведено определение условий интенсификации лазерным воздействием процессов массопереноса в твёрдой фазе металлических материалов. Исследовались процессы взаимной диффузии железа и меди. Воздействие лазерным излучением проводили с равномерной плотностью мощности и с частотой следования импульсов 100; 1000; 5000 Гц. Лазерное излучение было преобразовано в световое пятно с равномерной плотностью мощности с помощью дифракционного оптического элемента, выполняющего необходимую его фокусировку. Определено, что для проявления обобщённой термодинамической движущей силы, обеспечивающей интенсификацию массопереноса в неравновесных условиях, необходимым условием является нестационарная локальная деформация, вызываемая лазерным воздействием.

Ключевые слова: воздействие лазерное, элемент дифракционный оптический, массоперенос, материал металлический, структура, образец, виброскорость.

Цитирование: Мурзин, С.П. Определение условий интенсификации лазерным воздействием процессов массопереноса в твёрдой фазе металлических материалов / С.П. Мурзин // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 392-396.

Введение

Применение лазерного воздействия с высокой частотой следования импульсов является прогрессивным направлением создания нанопористых металлических материалов. В работах [1–4] определены условия формирования лазерным воздействием нанопористых структур в металлическом материале – двухкомпонентном Cu-Zn сплаве. Для перераспределения плотности мощности в поперечном сечении лазерного пучка были применены дифракционные оптические элементы – фокусаторы лазерного излучения [5–10], что дало возможность избирательно проводить обработку областей необходимой геометрии. Установлено, что в результате лазерного воздействия при температуре, не превышающей температуру плавления, в материале происходит образование нанопор, которые достаточно равномерно распределены по площади; также образуются разветвлённые поры с характерной дендритной структурой. Такая структура формируется за счёт создания вакансий и их коагуляции в результате сублимации цинка с поверхности материала, что приводит к созданию градиента концентрации и диффузии к поверхности компонента с относительно высоким давлением паров. Условием для интенсификации массопереноса в твёрдой фазе металлических материалов является нестационарная локальная деформация, вызываемая высокоэнергетическим внешним воздействием [11–13].

Известно, что протекание таких процессов в металлических сплавах, как рекристаллизация, гомогенизация, релаксация и ряд других, определяет скорости и механизмы диффузии, которые имеют существенное значение для формирования их структур и свойств. Кроме изменения размера зёрен и микроструктуры металлов и сплавов, диффузионные процессы обуславливают появление наноструктурных

эффектов: изменение угловых разориентировок субзёрен в составе зерна, дробление блоков, формирование упорядоченного распределения наноразмерных включений и пор, изменение уровня микроискажений и плотности дислокаций, являющихся потенциалом для улучшения физико-механических свойств материалов. Повышение температуры является действенным способом увеличения подвижности атомов, поскольку коэффициент диффузии связан с температурой экспоненциальной зависимостью, однако в ряде случаев такой способ имеет существенные ограничения, например, вследствие роста зерна и охрупчивания материала.

Лазерное воздействие с высокой частотой следования импульсов позволяет формировать устойчивое напряжённое состояние на поверхности образцов, что является причиной существенной интенсификации массопереноса [14–16]. При этом целенаправленное влияние на массоперенос и сопутствующие ему релаксационные процессы предоставляет возможность повысить эффективность методов обработки металлов и сплавов. Целью работы является определение условий интенсификации лазерным воздействием процессов массопереноса в твёрдой фазе при взаимной диффузии металлических материалов.

1. Оборудование для проведения экспериментальных исследований

Энергетическое воздействие осуществлялось с помощью газового CO₂-лазера ROFIN DC 010 с выходной мощностью от 100 до 1000 Вт и диаметром выходного пучка ~20 мм. Формирование лазерного излучения осуществлялось с помощью оптической системы [17] на основе фокусатора излучения. Исходное излучение было преобразовано в световое пятно с равномерной плотностью мощности с помощью дифракци-

онного оптического элемента, выполняющего необходимую его фокусировку [18–20]. Контроль температуры в зоне нагрева осуществлялся с помощью бесконтактного пирометра «Кельвин-1300 ЛЦМ», имеющего диапазон измерения температур от 600 до 1600 К.

2. Определение условий обработки лазерным излучением, обеспечивающих интенсификацию процессов массопереноса в твёрдой фазе металлических материалов

Проведено определение условий интенсификации лазерным воздействием процессов массопереноса в твёрдой фазе металлических материалов. Исследовались процессы взаимной диффузии Fe и Cu. Изготовлены образцы из доэвтектоидной стали с содержанием углерода ~0,3 %, имеющей полиэдрическую структуру, состоящую из зёрен феррита и перлита. На поверхности образцов был наплавлен слой меди, после чего был проведён отжиг при температуре $750 \pm 50^\circ\text{C}$ в течение 30 минут, после которого образцы подвергались лазерной обработке с высокой частотой следования импульсов. Воздействие лазерного излучения проводилось с равномерной плотностью мощности, изменяемой в пределах $(3...4) \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, и с частотой следования импульсов 100; 1000; 5000 Гц.

Металлографические исследования структуры меди и прилегающего слоя выполнялись с использованием травителя следующего состава: FeCl_3 – 10 г; HCl – 25 мл; H_2O – 100 мл. Для выявления структуры Fe применялся 4 % раствор HNO_3 в этиловом спирте. Медь в железе имеет ограниченную растворимость, которая максимальна при температуре 800°C и составляет около 0,9 %. При температуре 850°C в системе Fe-Cu происходит эвтектоидное превращение, а структура состоит из фаз α - и ϵ -. Соотношение фаз пропорционально содержанию компонентов. Отмеченные свойства железисто-медных сплавов позволяют эффективно контролировать процесс взаимной диффузии Fe и Cu. На рис. 1 представлена микроструктура образца из доэвтектоидной стали с наплавленным слоем меди перед осуществлением воздействия лазерным излучением.



Рис. 1. Структура стального образца (содержание углерода ~0,3 %) с наплавленным слоем меди после проведения отжига при температуре $750 \pm 50^\circ\text{C}$ в течение 30 минут; увеличение $\times 500$: 1 – Cu; 2 – сплав Fe–C

Структура образцов после лазерного воздействия с высокой частотой следования импульсов представлена на рис. 2 и 3.

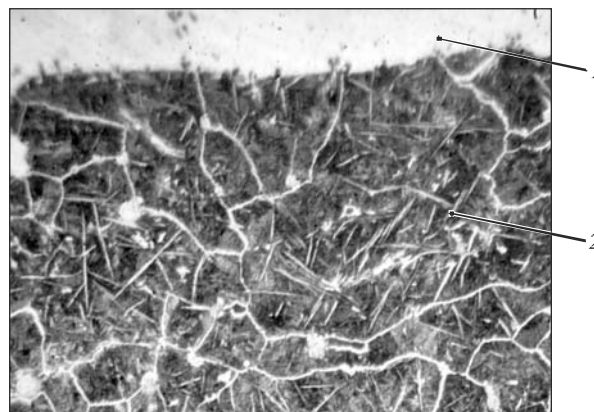


Рис. 2. Структура образца после лазерного воздействия с высокой частотой следования импульсов; увеличение $\times 500$: 1 – медь; 2 – зона взаимной диффузии



Рис. 3. Структура образца после лазерного воздействия с высокой частотой следования импульсов; увеличение $\times 500$: 1 – зона взаимной диффузии; 2 – сплав Fe–C

На основании анализа результатов металлографических исследований установлено, что реализованные режимы обработки импульсно-периодическим лазерным излучением с высокой частотой следования импульсов обеспечивают интенсификацию процессов массопереноса в твёрдой фазе металлических материалов при взаимной диффузии Fe и Cu.

Образуется переходная область, содержащая α - и β -фазу. Поскольку растворимость меди в железе низкая, то избыток Cu в стальной основе выделяется в виде α -фазы (твёрдого раствора Fe в Cu), формируя сетку по границам зёрен, а также образуя достаточно крупные включения, имеющие близкую к овальной форму. Количество выделений α -фазы уменьшается по мере удаления от границы раздела вглубь материала. После лазерного воздействия с высокой частотой следования импульсов в наплавленном слое также образуется переходная зона, основу структуры которой составляет α -фаза с выделением β -фазы (твёрдого раствора Cu в Fe).

С помощью цифрового виброметра PDV 100 выполнялись измерения виброскорости. Измеряемый частотный диапазон составлял 0,5...16000 Гц [21, 22].

При воздействии лазерного излучения с частотой 100; 1000; 5000 Гц исследовались вынужденные колебания образцов из доэвтектоидной стали с наплавленным слоем меди. Установлено, что вне зависимости от частоты внешнего лазерного воздействия максимальные значения виброскоростей имели место при практически одинаковых частотах, соответствующих частотам собственных колебаний. Установлено, что на частотах более 700 Гц значение виброскоростей не превышало 0,004 мм/с. При увеличении температуры нагрева наблюдался некоторый сдвиг частотного диапазона в сторону больших значений, что можно объяснить изменением модуля нормальной упругости. Установлено, что при описанных условиях происходит интенсификация процессов массопереноса в твёрдой фазе металлических материалов. Применение демфирующего устройства приводит к снижению значений виброскоростей на порядок. В этом случае интенсификация процессов массопереноса в металлических материалах не происходит. Таким образом, определено, что для проявления обобщённой термодинамической движущей силы, обеспечивающей интенсификацию массопереноса в неравновесных условиях, необходимым условием является нестационарная локальная деформация, вызываемая лазерным воздействием.

Заключение

Определены условия интенсификации лазерным воздействием массопереноса в твёрдой фазе при взаимной диффузии Fe и Cu. Впервые для реализации данного процесса в металлических материалах использовался нагрев импульсно-периодическим лазерным излучением. Лазерное воздействие с высокой частотой следования импульсов позволяет формировать устойчивое напряжённое состояние на поверхности образцов, что является причиной существенной интенсификации массопереноса. Для проявления обобщённой термодинамической движущей силы, обеспечивающей интенсификацию массопереноса в неравновесных условиях, необходимым условием является нестационарная локальная деформация, вызываемая лазерным воздействием.

Таким образом, определена возможность повышения эффективности методов лазерной обработки металлов и сплавов. В дальнейшем целесообразно проведение исследований других конструкционных, инструментальных и функциональных металлических материалов, в частности, при проведении их химико-термической обработки, поскольку скорости и механизмы диффузии имеют существенное значение для формирования их структур и свойств.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. **Kazanskiy, N.L.** Synthesis of nanoporous structures in metallic materials under laser action / N.L. Kazanskiy,

S.P. Murzin, Ye.L. Osetrov, V.I. Tregub // Optics and Lasers in Engineering. – 2011. – Vol. 49, Issue 11. – P. 1264-1267.

2. **Murzin, S.P.** Exposure to laser radiation for creation of metal materials nanoporous structures / S.P. Murzin // Optics & Laser Technology. – 2013. – Vol. 48. – P. 509-512.

3. **Murzin, S.P.** Formation of nanoporous structures in metallic materials by pulse-periodic laser treatment / S.P. Murzin // Optics & Laser Technology. – 2015. – Vol. 72. – P. 48-52.

4. **Мурзин, С.П.** Синтез нанопористых структур металлических материалов циклическим упруго-пластическим деформированием при лазерном воздействии с применением фокусаторов излучения / С.П. Мурзин // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 249-255. – ISSN 0134-2452.

5. **Volkov, A.V.** A method for the diffractive microrelief forming using the layered photoresist growth / A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, O.Ju. Moiseev, V.A. Soifer // Optics and Lasers in Engineering – 1998. – Vol. 29, Issue 4-5. – P. 281-288.

6. **Doskolovich, L.L.** Design of DOEs for wavelength division and focusing / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, P. Perlo, P. Repetto // Journal of Modern Optics. – 2005. – Vol. 52, Issue 6. – P. 917-926.

7. **Kazanskiy, N.L.** Research & education center of diffractive optics // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8410. – P. 84100R. – DOI: 10.1117/12.923233.

8. **Golovashkin, D.L.** Solving diffractive optics problem using graphics processing units / D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2011. – Vol. 20, Issue 2. – P. 85-89.

9. **Абульханов, С.Р.** Методы изготовления элементов дифракционной оптики резанием на станках с ЧПУ / С.Р. Абульханов, Н.Л. Казанский, Л.Л. Досколович, О.Ю. Казакова // СТИН. – 2011. – № 9. – С. 22-27.

10. **Abul'khanov, S.R.** Technologies of laser radiation focusators / S.R. Abul'khanov // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – Vol. 9, Issue 11. – P. 834-842.

11. **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. – Киев: РИО ИМФ, 1999. – 435 с.

12. **Gertsriken, D.S.** Determining the duration of mass transfer and the temperature of metal subjected to pulsed deformation / D.S. Gertsriken, A.I. Ignatenko, V.F. Mazanko, O.A. Mironova, Yu.V. Fal'chenko, G.K. Kharchenko // The Physics of Metals and Metallography. – 2005. – Vol. 99, Issue 2. – P. 187-193.

13. **Pogorelov, A.E.** Mass transfer mechanism in real crystals by pulsed laser irradiation / A.E. Pogorelov, K.P. Ryaboshapka, A.F. Zhuravlyov // Journal of Applied Physics. – 2002. – Vol. 92, Issue 10. – P. 5766-5771.

14. **Мурзин, С.П.** Термоциклирование импульсно-периодическим лазерным воздействием для формирования нанопористой структуры в металлическом материале / С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, Е.В. Шокова, Н.В. Трегуб // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 1. – С. 99-104. – ISSN 0134-2452.

15. **Мурзин, С.П.** Применение фокусаторов излучения для создания металлических нанопористых материалов с высокой удельной площадью поверхности лазерным воздействием / С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.А. Мельников, Н.В. Трегуб // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 226-232. – ISSN 0134-2452.

16. **Мурзин, С.П.** Метод синтеза композиционных наноматериалов металл/оксид импульсно-периодическим лазерным воздействием / С.П. Мурзин // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 469-475. – ISSN 0134-2452.
 17. **Казанский, Н.Л.** Оптическая система для проведения селективной лазерной сублимации компонентов металлических сплавов / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, В.И. Трегуб // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 4. – С. 481-486. – ISSN 0134-2452.
 18. **Doskolovich, L.L.** Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, A.Ye. Tzaregorodtzev // Optik – International Journal for Light and Electron Optics. – 1995. – Vol. 101, Issue 2. – P. 37-41.
 19. **Kazanskiy, N.L.** Computer-aided design of diffractive optical elements / N.L. Kazanskiy, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // Optical Engineering. – 1994. – Vol. 33, Issue 10. – P. 3156-3166.
 20. **Pavelyev, V.S.** Formation of diffractive microrelief on diamond film surface / V.S. Pavelyev, S.A. Borodin, N.L. Kazanskiy, G.F. Kostyuk, A.V. Volkov // Optics & Laser Technology. – 2007. – Vol. 39, Issue 6. – P. 1234-1238.
 21. **Murzin, S.P.** A study of vibration characteristics and determination of the conditions of nanopores formation in metallic materials during laser action / S.P. Murzin, E.V. Shakhmatov, A.A. Igolkin, L.F. Musaakhunova // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 106. – P. 266-271.
 22. **Murzin, S.P.** Influence of conditions of the samples fixation on the intensity of the nanoporous structure formation in the metallic material by laser action with thermocycling / S.P. Murzin, A.N. Kryuchkov // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 106C. – P. 272-276.
- References**
- [1] Kazanskiy NL, Murzin SP, Osetrov YeL, Tregub VI. Synthesis of nanoporous structures in metallic materials under laser action. Optics and Lasers in Engineering 2011; 49(11): 1264-7.
 - [2] Murzin SP. Exposure to laser radiation for creation of metal materials nanoporous structures. Optics & Laser Technology 2013; 48: 509-12.
 - [3] Murzin SP. Formation of nanoporous structures in metallic materials by pulse-periodic laser treatment. Optics & Laser Technology 2015; 72: 48-52.
 - [4] Murzin SP. Synthesis of metal materials nanoporous structures with cyclic elasto-plastic deformation under laser treatment using radiation focusators // Computer Optics. – 2014. 38(2). P. 249-55. – ISSN 0134-2452.
 - [5] Volkov AV, Kazanskiy NL, Moiseev OJu, Soifer VA. A method for the diffractive microrelief forming using the layered photoresist growth. Optics and Lasers in Engineering. 1998. 29(4-5).281-88.
 - [6] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Soifer VA, Perlo P, Repetto P. Design of DOEs for wavelength division and focusing. Journal of Modern Optics 2005; 52(6): 917-26.
 - [7] Kazanskiy NL. Research & education center of diffractive optics. Proceedings of SPIE 2012; 8410: 84100R. DOI: 10.1117/12.923233.
 - [8] Golovashkin DL, Kazanskiy NL. Solving diffractive optics problem using graphics processing units. Optical Memory and Neural Networks (Information Optics) 2011; 20(2): 85-9.
 - [9] Abul'khanov SR, Kazanskiy NL, Doskolovich LL, Kazakova OY. Manufacture of diffractive optical elements by cutting on numerically controlled machine tools. Russian Engineering Research 2011; 31(12): 1268-72.
 - [10] Abul'khanov SR. Technologies of laser radiation focusators. Research Journal of Applied Sciences 2014; 9(11): 834-42.
 - [11] Gertsriken DS, Mazanko VF, Tyshkevich VM, Fal'chenko VM. Mass Transfer in Metals at Low Temperatures under External Stresses [In Russian]. Kiev: RIO IMF; 1999.
 - [12] Gertsriken DS, Ignatenko AI, Mazanko VF, Mironova OA, Fal'chenko YuV, Kharchenko GK. Determining the duration of mass transfer and the temperature of metal subjected to pulsed deformation. The Physics of Metals and Metallography 2005; 99(2): 187-93.
 - [13] Pogorelov AE, Ryaboshapka KP, Zhuravlyov AF. Mass transfer mechanism in real crystals by pulsed laser irradiation. Journal of Applied Physics 2002; 92(10): 5766-71.
 - [14] Murzin SP, Tregub VI, Shokova EV, Tregub NV. Thermocycling with pulse-periodic laser action for formation of nanoporous structure in metal material. Computer Optics 2013; 37(1): 99-104.
 - [15] Murzin SP, Tregub VI, Melnikov AA, Tregub NV. Application of radiation focusators for creation of nanoporous metal materials with high specific surface area by laser action. Computer Optics 2013; 37(2): 226-32.
 - [16] Murzin SP. Method of composite nanomaterials synthesis under metal/oxide pulse-periodic laser treatment. Computer Optics 2014; 38(3): 469-75.
 - [17] Kazanskiy NL, Murzin SP, Tregub VI. Optical system for realization selective laser sublimation of metal alloys components [In Russian]. Computer Optics 2010; 34(4): 481-6.
 - [18] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Soifer VA, Tzaregorodtzev AYe. Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment. Optik – International Journal for Light and Electron Optics 1995; 101(2): 37-41.
 - [19] Kazanskiy NL, Kotlyar VV, Soifer VA. Computer-aided design of diffractive optical elements. Optical Engineering 1994; 33(10): 3156-66.
 - [20] Pavelyev VS, Borodin SA, Kazanskiy NL, Kostyuk GF, Volkov AV. Formation of diffractive microrelief on diamond film surface. Optics & Laser Technology 2007; 39(6): 1234-8.
 - [21] Murzin SP, Shakhmatov EV, Igolkin AA, Musaakhunova LF. A study of vibration characteristics and determination of the conditions of nanopores formation in metallic materials during laser action. Procedia Engineering 2015; 106: 266-71.
 - [22] Murzin SP, Kryuchkov AN. Influence of conditions of the samples fixation on the intensity of the nanoporous structure formation in the metallic material by laser action with thermocycling. Procedia Engineering 2015; 106C: 272-6.

DETERMINATION OF CONDITIONS FOR THE LASER-INDUCED INTENSIFICATION OF MASS TRANSFER PROCESSES IN THE SOLID PHASE OF METALLIC MATERIALS*S.P. Murzin**Samara State Aerospace University, Samara, Russia***Abstract**

The determination of conditions for laser-induced intensification of mass transfer processes in the solid phase of metallic materials was conducted. We studied the process of interdiffusion of Fe and Cu. A laser beam of uniform power density and a pulse frequency of 100, 1,000, and 5,000 Hz was used. The laser radiation was transformed into a uniform light spot with a diffractive optical element, which performed the required focusing. It was determined that for the generalized thermo-dynamic driving force to ensure the mass transfer intensification in non-equilibrium conditions, a necessary condition is the unsteady local deformation caused by laser action.

Keywords: laser action, diffractive optical element, mass transfer, metallic material, texture, sample, vibration rate.

Citation: Murzin SP. Determination of conditions for the laser-induced intensification of mass transfer processes in the solid phase of metallic materials. *Computer Optics* 2015; 39(3): 392-6.

Сведения об авторе

Мурзин Сергей Петрович, 1963 года рождения. В 1986 году окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ) по специальности «Авиационные двигатели». Доктор технических наук (2005 год), работает профессором кафедры автоматических систем энергетических установок СГАУ. Заместитель руководителя научно-образовательного центра лазерных систем и технологий СГАУ. С.П. Мурзин – специалист в области лазерных технологий и нанотехнологий, лазерной физики и оптики. В списке научных работ С.П. Мурзина более 70 статей, 2 монографии, 18 авторских свидетельств и патентов.

E-mail: murzin@ssau.ru.

Serguei Petrovich Murzin (b. 1963) graduated (1986) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (KuAI, presently, 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 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 70 scientific papers, 2 monograph, and 18 inventions and patents.

*Поступила в редакцию 31 мая 2015 г.
Окончательный вариант – 6 июня 2015 г.*