

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

С.П. Мурзин, А.И. Сафин, А.А. Шиманов, М.В. Блохин, С.А. Афанасьев

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

Выполнено определение спектров отклика образцов и регистрация форм их колебаний при внешнем вибровозбуждении, осуществляемом импульсно-периодическим воздействием CO<sub>2</sub>-лазера ROFIN DC 010. При анализе спектров отклика образцов установлено, что имеет место повышение виброскорости при частотах, кратных частоте исходного колебания, с уменьшением амплитуды при увеличении частоты. Исследовались температурно-скоростные режимы образования нанопористой структуры в отсутствие плавления металлического материала. Наибольшая температура при нагреве имела место в центре образца. С увеличением времени лазерного воздействия температура в центральной области увеличивалась, при этом возрастала интенсивность образования пор в образце. Поскольку коэффициент диффузии связан с температурой экспоненциальной зависимостью, то повышение температуры является действенным способом увеличения подвижности атомов. Однако для проявления обобщенной термодинамической движущей силы, обеспечивающей интенсификацию образования нанопористой структуры в металлическом материале, необходимым условием является нестационарная локальная упругая деформация, вызываемая высокоэнергетическим внешним воздействием.

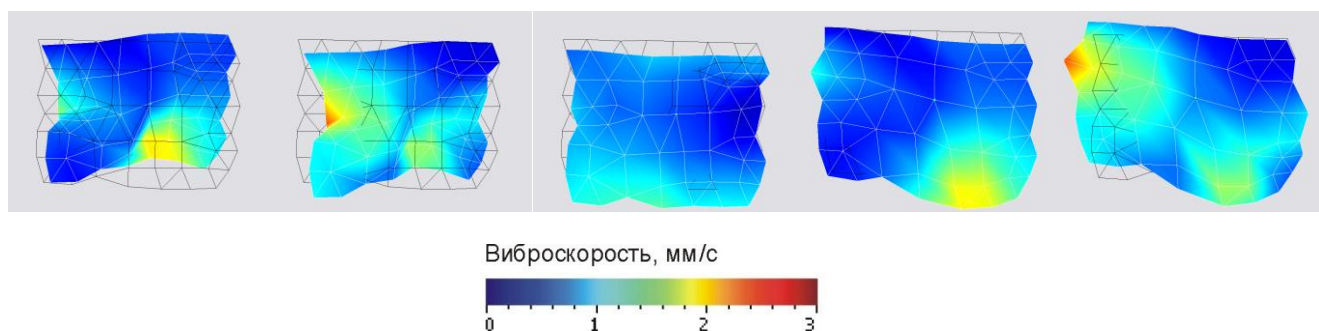
**Ключевые слова:** формирование, структура нанопористая, воздействие лазерное, материал металлический, частота, виброскорость, температура.

## Введение

Применение лазерного импульсно-периодического воздействия является прогрессивным направлением создания на поверхности металлических материалов нанопористых слоев. В работах [1-3] определены условия формирования лазерным воздействием нанопористых структур в металлическом материале – двухкомпонентном сплаве системы Cu-Zn латуни Л62. Установлено, что в результате лазерного воздействия в поверхностном и приповерхностном слоях материала происходит образование нанопор, как одиночных, так и образующих разветвленные каналы, достаточно равномерно распределенных по площади [4, 5]. Такая структура формируется за счет образования вакансий и их коагуляции в результате сублимации цинка с поверхности материала, создания градиента концентраций и диффузии к поверхности данного компонента с относительно высокой упругостью паров [6-8]. Условием для интенсификации массопереноса в твердой фазе металлических материалов является нестационарная локальная деформация, вызываемая высокоэнергетическим внешним воздействием [9-11]. При этом лазерное воздействие импульсно-периодическим излучением позволяет формировать устойчивое напряженное состояние на поверхности образцов [12, 13]. Для перераспределения плотности мощности в поперечном сечении лазерного пучка целесообразно использовать дифракционные оптические элементы – фокусаторы лазерного излучения [14–17]. Целью работы является определение условий формирования нанопористой структуры в металлическом материале лазерным импульсно-периодическим воздействием.

### Лазерное импульсно-периодическое воздействие на металлический материал

Исследовались образцы из латуни Л62 размером  $30 \times 25 \times 0,05$  мм. Выполнено определение спектров отклика образцов на внешнее вибровозбуждение, осуществляемое лазерным импульсно-периодическим воздействием, и регистрация форм их колебаний. Энергетическое воздействие осуществлялась с применением газового  $\text{CO}_2$ -лазера ROFIN DC 010 с выходной мощностью, регулируемой в диапазоне от 100 до 1000 Вт. Для измерения виброскорости использовался трехкомпонентный сканирующий лазерный виброметр Polytec® PSV-400-3D, содержащий три сканирующие головки, каждая из которых оснащена лазерным интерферометром и видеокамерой, а также персональный компьютер и три контроллера управления данными. Управление данными синхронизируются программой PSV 3D, графический интерфейс которой используется для визуализации динамических процессов, позволяя получать анимированную 3D картину колебаний во всем исследуемом диапазоне частот. Лазерное импульсно-периодическое воздействие на образцы осуществлялось с частотой 100, 500, 5000 Гц. При анализе спектров отклика образцов на такое внешнее вибровозбуждение установлено, что имеет место повышение виброскорости при частотах, кратных частоте исходного колебания, с уменьшением амплитуды при увеличении частоты. На рис. 1 представлены восстановленные в программе PSV Presentation изображения образца. Форма колебания соответствует частоте 500 Гц. Определено, что максимальная виброскорость имеет место на периферии образца, однако интенсивность образования пор здесь значительно ниже, чем в центре.



**Рис. 1.** Восстановленные в программе PSV Presentation изображения образца, соответствующие частоте 500 Гц; шаг по времени 0,2 с

Для исследования нагрева образцов лазерным воздействием использовался тепловизор Mikron M7604F. На рис. 2 представлено изображение температурного поля объекта при лазерном импульсно-периодическом воздействии. Наибольшая температура при нагреве имела место в центре образца. С увеличением времени лазерного воздействия температура в центральной области увеличивалась, при этом возрастала интенсивность образования пор в образце. Исследовались температурно-скоростные режимы образования нанопористой структуры в отсутствие плавления металлического материала. Поскольку коэффициент диффузии связан с температурой экспоненциальной зависимостью, то повышение температуры является действенным способом увеличения подвижности атомов. Однако для проявления обобщенной термодинамической движущей силы, обеспечивающей интенсификацию образования нанопористой структуры в металлическом материале, необходимым условием является нестационарная

локальная упругая деформация, вызываемая высокоэнергетическим внешним воздействием.

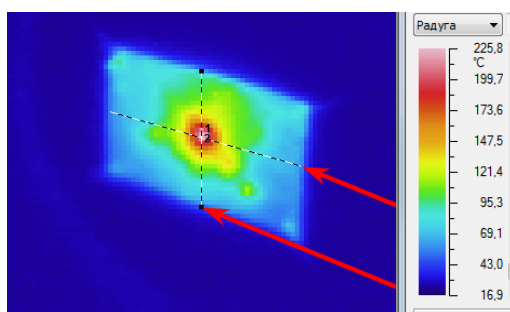


Рис. 2. Изображение температурного поля объекта при лазерном импульсно-периодическом воздействии

### Исследование тонкой структуры материала

Исследование тонкой структуры материала проводилось с использованием растрового электронного микроскопа VEGA\\ SB, Tescan. Установлено, что лазерная обработка создает в приповерхностном слое нанопористую структуру. Происходит преимущественное образование нанопор канального типа шириной  $\sim 100$  нм, формирующих нанопористую сеть. Равномерно распределенные по поверхности субзерен нанопоры имеют относительно стабильные размеры и форму. На рис. 3 представлено изображение характерных нанопор шириной до 100 нм, образующихся в металлическом материале при импульсно-периодическом лазерном воздействии. Основным механизмом образования нанопористой структуры является сублимация компонента сплава с более высокой упругостью паров (цинка). В материале создается градиент концентраций, и в дальнейшем данный компонент сублимирует в той мере, в какой обеспечивается его диффузионная доставка к поверхности. С течением времени толщина обедненного цинком слоя увеличивается, и диффузия становится лимитирующим фактором процесса сублимации. Условием для интенсификации массопереноса в твердой фазе металлических материалов является нестационарная локальная упругая деформация, вызываемая высокоэнергетическим внешним воздействием. Поскольку коэффициент диффузии связан с температурой экспоненциальной зависимостью, то повышение температуры является действенным способом интенсификации процесса.

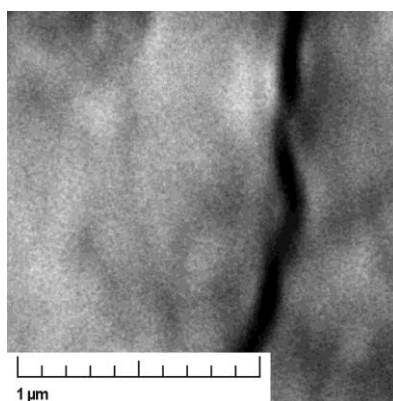


Рис. 3. Изображение нанопоры шириной  $\sim 100$  нм, формирующейся в результате лазерного воздействия на поверхности металлического материала

## Заключение

Таким образом, при анализе спектров отклика образцов на лазерное импульсно-периодическое воздействие установлено, что имеет место повышение виброскорости при частотах, кратных частоте исходного колебания, с уменьшением амплитуды при увеличении частоты. Наибольшая температура при нагреве имела место в центре образца. С увеличением времени лазерного воздействия температура в центральной области увеличивалась, при этом возрастала интенсивность образования пор в образце. Выявлено, что условием для интенсификации массопереноса в твердой фазе металлических материалов является нестационарная локальная упругая деформация, вызываемая высокоэнергетическим внешним воздействием. Поскольку коэффициент диффузии связан с температурой экспоненциальной зависимостью, то повышение температуры является действенным способом интенсификации процесса. При проведении дальнейших исследований предполагается определить резонансные (собственные) частоты и соответствующие им формы колебаний.

## 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 Laser Engineering. – 2011. – Vol. 49(11). – P. 1264-1267.
2. Murzin S.P. Exposure to laser radiation for creation of metal materials nanoporous structures. Optics & Laser Technology – 2013. – Vol. 48. – P. 509-512.
3. Мурзин С.П. Разработка способов интенсификации формирования нанопористых структур металлических материалов селективной лазерной сублимацией компонентов сплавов. Компьютерная оптика – 2011. – № 35(2). – С. 175-179.
4. Murzin S.P. Formation of nanoporous structures in metallic materials by pulse-periodic laser treatment. Optics & Laser Technology. – 2015. – Vol. 72. – P. 48-52.
5. Murzin S.P. Определение условий интенсификации лазерным воздействием процессов массопереноса в твердой фазе металлических материалов. Компьютерная оптика. – 2015. – № 39(3). – С. 392-396.
6. Murzin S.P. 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. – № 37(2). – С. 226-232.
7. Murzin S.P. Синтез нанопористых структур металлических материалов циклическим упруго-пластическим деформированием при лазерном воздействии с применением фокусаторов излучения. Компьютерная оптика. – 2014. – № 38(2). – С. 249-255.
8. Murzin S.P. Метод синтеза композиционных наноматериалов металл/оксид импульсно-периодическим лазерным воздействием. Компьютерная оптика. – 2014. – № 38(3). – С. 469-475.
9. 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, № 2. – P. 187-193.
10. 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, № 10. – P. 5766-5771.
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. -3-е изд., испр. – Киев: РИО ИМФ, 2001. - 443 с.

12. 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.
13. 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. 106. – P. 272-276.
14. Golovashkin D.L. Solving diffractive optics problems using graphics processing units. / D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2011. – Vol. 20(2). – P. 85-89.
15. Doskolovich L.L. A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas. / L.L. Doskolovich, N.L. Kazansky, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // *Journal of Modern Optics*. – 1996. – Vol. 43(7). – P. 1423-1433.
16. Kazanskiy, N.L. Research & education center of diffractive optics / N.L. Kazanskiy // *Proceedings of SPIE*. – 2012. – Vol. 8410. – Art. No. 84100R.
17. Kazanskiy N.L. Computer-aided design of diffractive optical elements. / N.L. Kazanskiy, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // *Optical Engineering*. – 1994. – Vol. 33 (10). – P. 3156-3166.