

## СИНТЕЗ НАНОПОРИСТЫХ СТРУКТУР МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ЦИКЛИЧЕСКИМ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОКУСАТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Мурзин С.П.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

### Аннотация

Разработан метод синтеза нанопористых структур металлических материалов циклическим упруго-пластическим деформированием при лазерном воздействии. В результате проведённых исследований структуры сплава методом растровой электронной микроскопии установлено следующее. При различных режимах в зависимости от интенсивности импульсно-периодической лазерной обработки с термоциклированием медно-цинкового сплава Л62 в приповерхностном слое материала формируются микрополости различных форм: от глобулярной размером до 10 мкм с выступами и впадинами до вытянутой каплевидной и клинообразной шириной до 10 мкм и длиной более 50 мкм. В исследуемом диапазоне режимов воздействия в латуни Л62 образуются субмикроразмеры с характерным размером, не превышающим 1 мкм, а на более интенсивных режимах – шириной менее 1 мкм и длиной более 20 мкм. При исследовании тонкой структуры медно-цинкового сплава Л62 после импульсно-периодической лазерной обработки с термоциклированием установлено, что микрополости вытянутой каплевидной и клинообразной форм и субмикроразмеры сужаются у своих краёв с образованием протяжённых наноразмерных каналов шириной не более 100 нм и длиной более 10 мкм.

**Ключевые слова:** воздействие лазерное, материал металлический, наноструктура, деформирование циклическое упруго-пластическое, фокусатор излучения.

### Введение

Нанопористые материалы, выделяемые в отдельный класс наноматериалов, обладают рядом уникальных физических свойств, что определяет основные области их применения в отраслях водородной и углеводородной энергетики, переработке минерального и органического сырья, фармакологии, пищевой промышленности и биотехнологии. Такие материалы применяются при фильтрации газов и жидкостей, синтезе химических соединений с помощью катализаторов, а также в качестве топливных элементов на основе нанопористых структур [1–3]. Формирование нанопористых структур возможно осуществить методами плёночных технологий: химическим и физическим осаждением, электроосаждением [4, 5]. Основным недостатком таких методов – ограниченная толщина и площадь поверхности получаемого тонкоплёночного материала и, как следствие, затруднённая возможность получения объёмных пористых материалов. Процесс получения нанопористых структур методом компактирования нанопорошков характеризуется значительной энергоёмкостью, трудоёмкостью и сложностью реализации [6]. Как правило, поры не являются наноразмерными по всему объёму материала и имеют большой разброс геометрических параметров. Пористую структуру материалов также возможно создать методом выщелачивания. При формировании пористых металлических материалов в процессе избирательной коррозии пространственная форма макрообразца может сохраняться, однако его прочность значительно ниже прочности исходного. Электрохимические методы, как правило, применяются с целью создания нанопористой морфологии поверхности, в этом случае получаемые материалы обладают только

поверхностной пористостью [7, 8]. Формирование сквозных пор сопряжено со значительными трудностями. Так, неизменяемые твёрдые структуры с газонепроницаемой наноразмерной пористостью могут быть созданы селективным растворением одной из фаз монокристаллических жаропрочных сплавов на никелевой основе, но затраты на их изготовление в этом случае будут очень велики [9, 10]. Таким образом, существующие методы и технологии синтеза нанопористых металлических материалов имеют существенные технологические ограничения по стабильности размеров пор, а изготавливаемые изделия характеризуются относительно высокой стоимостью и пониженными механическими свойствами при ударе, изгибе и других деформациях и, вследствие этого, в настоящее время не получили достаточно широкого применения.

Область использования термоциклирования ограничивается изменением механических свойств поверхности поликристаллических металлов и сплавов, происходящим за счёт значительного уменьшения размера зерна, получения чередующихся отожжённых и закалённых зон [11, 12]. Разработка новых методов термоциклирования и регулирование процесса образования объёмных несовершенств (дефектов) структуры твёрдого тела предоставляет возможность формировать структуры металлов и сплавов с новыми свойствами, создавать новые нанопористые материалы. В этом плане перспективной представляется термоциклическая обработка с использованием лазерного воздействия. В работах [13–17] установлено, что в результате воздействия лазерного излучения в импульсно-периодическом режиме повышается плотность дефектов кристаллического строения двухфазных и много-

фазных металлических материалов, происходит формирование значительных внутренних микронапряжений в приповерхностных слоях материала. Показана возможность формирования путём многократного циклического импульсного лазерного воздействия наноразмерных полостей, образующихся по механизму перемещения дислокаций по двум пересекающимся плоскостям скольжений в месте их пересечения, а также при скоплении дислокаций около включений.

Целью данной работы является разработка метода синтеза нанопористых структур металлических материалов циклическим упруго-пластическим деформированием при лазерном воздействии с применением фокусаторов излучения.

### **1. Исследуемый материал и экспериментальная установка**

Синтез нанопористых структур металлических материалов циклическим упруго-пластическим деформированием осуществлялся с использованием лазерной установки ROFIN StarWeld Manual Performance, оснащённой Nd:ИАГ-лазером с длиной волны излучения 1,06 мкм. Основные технические характеристики установки ROFIN StarWeld: средняя мощность в импульсе – 50 Вт; максимальная энергия в импульсе – 100 Дж; длительность импульса – 0,5...50 мс; частота следования импульсов – 0,5...50 Гц. Применение дифракционных оптических элементов – фокусаторов излучения [18–27] при лазерной обработке материалов предоставляет возможность создать требуемый комплекс свойств конструкционных материалов в зоне термического влияния [28–35]. При отработке различных режимов воздействия энергия в импульсе составляла 20...50 Дж при длительности 0,5...20 мс, конфигурация импульсов экспериментальной установки на базе лазера ROFIN StarWeld: Manual Performance – «пичковая» с прямоугольным участком и плавно убывающим и возрастающим фронтами.

Выполнены экспериментальные исследования по выявлению особенностей образования полостей в латуни Л62 при различных режимах обработки. Микроструктура  $\alpha$ -латуни в литом состоянии представлена дендритами  $\alpha$ -фазы: после деформации и отжига такая латунь имеет полиэдрическую структуру с большим количеством двойников. Структура сплава Cu + 38 % Zn при комнатной температуре представлена  $\alpha$ -твёрдым раствором; при нагреве выше 500 °С в структуре сплава появляется  $\beta$ -фаза, а при 700 °С структура сплава уже представлена примерно равными количествами  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз. Выше 850 °С сплав Cu + 38 % Zn приобретает структуру  $\beta$ -твёрдого раствора.

### **2. Синтез нанопористых структур металлических материалов циклическим упруго-пластическим деформированием**

Для исследования структуры образцов использовались методы оптической и растровой электронной микроскопии. Выявление микроструктуры образцов

после термоциклирования проводили как на полированных нетравленных образцах, так и после травления. Травление необходимо для удаления наклёпанного слоя, образующегося в процессе механической обработки поверхности и последующей полировки. Характерное распределение микро- и субмикроразностей после лазерного импульсно-периодического воздействия с термоциклированием в образцах из медно-цинкового сплава, выявленное с использованием поляризационно-оптического микроскопа Neophot-30, представлено на рис. 1. Для выявления особенностей формирования микроструктуры материала использовали раствор следующего состава: хлористое железо – 10 г; соляная кислота – 25 мл; вода – 100 мл. Выбранная методика проведения металлографических исследований позволила установить закономерности формирования пористой структуры в сплаве.

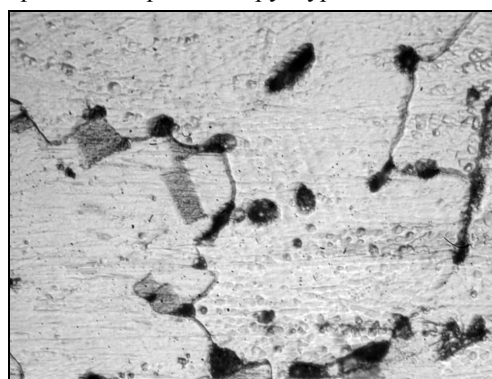


Рис. 1. Распределение микро- и субмикроразностей в медно-цинковом сплаве после термоциклирования лазерным импульсно-периодическим воздействием; увелич.  $\times 1000$

В результате исследования методом оптической микроскопии структуры медно-цинкового сплава латуни Л62 на шлифах с плоскостью, расположенной перпендикулярно к обработанной поверхности, установлено следующее. После лазерного воздействия с термоциклированием на поверхности образца формируется структура, содержащая достаточно равномерно распределённые по площади открытые микропоры различных форм: от овальной до неправильной. Образуются также разветвлённые микропоры, имеющие своеобразную дендритную структуру. Выявлены субмикроразности с характерным размером, не превышающим 1 мкм. В центре области лазерного импульсно-периодического воздействия плотность пор выше, чем на периферии. Поры имеют достаточно сложную форму и часто соединяются между собой через сужения. Микропоры формируются преимущественно по границам зёрен и блоков, в результате чего происходит создание новых границ и, как следствие, измельчение зерна. Происходит образование разветвлённых микропор, имеющих своеобразную дендритную структуру и ориентированных в поперечном направлении к поверхности. Внутри зерна наблюдаются закрытые поры преимущественно овальной формы с микронеровностями в виде выступов и впадин. Такие поры занимают значительно меньший объём, чем разветвлённые микропоры.

Проведены исследования методом растровой электронной микроскопии образцов из сплава системы Cu-Zn после лазерного импульсно-периодического воздействия с термоциклированием. Исследование образцов из латуни Л62 осуществлялось с использованием аналитического растрового электронного микроскопа VEGA\ SB, Tescan, оснащённого системой электронно-зондового энергодисперсионного микроанализа INCA Energy SEM Oxford Instruments. На рис. 2 приведено изображение области исследования элементного состава образца из двухкомпонентного металлического сплава типа твёрдый раствор системы Cu-Zn латуни Л62 после импульсно-периодической лазерной обработки с термоциклированием.

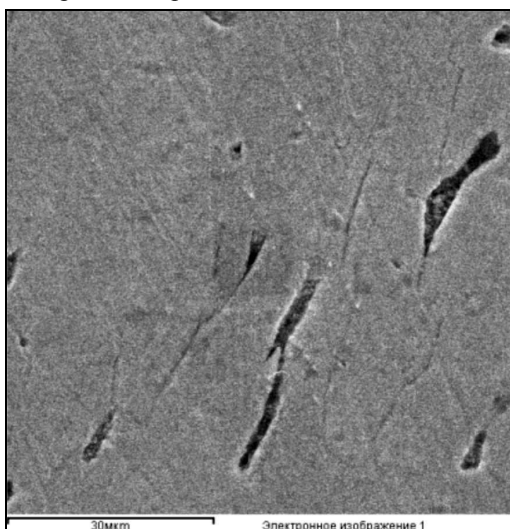


Рис. 2. Изображение области исследования элементного состава образца из латуни Л62 системой электронно-зондового энергодисперсионного микроанализа INCA Energy SEM, Oxford Instruments

Режим обработки при использовании аналитического растрового электронного микроскопа VEGA\ SB, Tescan и системы электронно-зондового энергодисперсионного микроанализа INCA Energy SEM, Oxford Instruments: все элементы (нормализованный); количество итераций – 3. При анализе рентгеновского спектра использовались эталоны: O ( $\text{SiO}_2$ ); Cu; Zn. Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с помощью методов математической статистики. Погрешность результата определялась в процессе измерения путём статистической обработки группы измерений, что необходимо для получения достоверных результатов и достижения требуемого качества выполнения работ. Анализ элементного состава поверхности образцов из латуни Л62 после импульсно-периодической лазерной обработки с термоциклированием показал незначительное увеличение относительного содержания меди до 65 % и снижение доли цинка до 34 %. Структура медно-цинкового сплава после импульсно-периодической лазерной обработки с термоциклированием, выявленная с использованием аналитического растрового электронного микроскопа VEGA\ SB, Tescan, представлена на рис. 3–6.

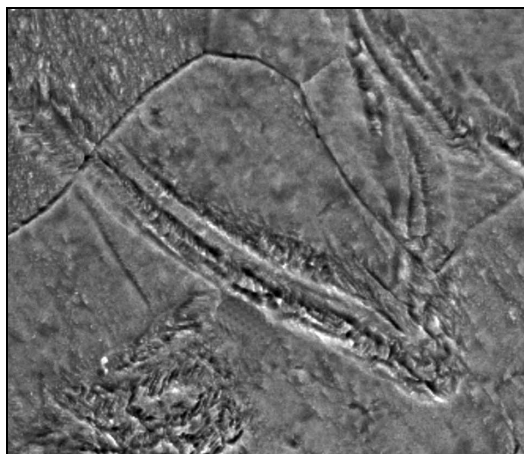


Рис. 3. Область формирования субмикроростов в структуре сплава Л62 при импульсно-периодической лазерной обработке с термоциклированием; увелич.  $\times 1600$

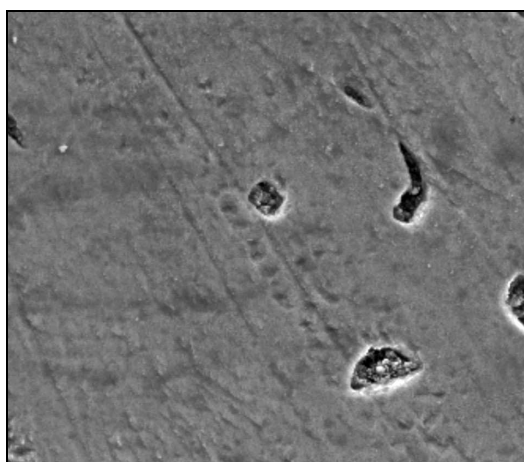


Рис. 4. Формирование микрополостей размером до 10 мкм глобулярной формы с выступами и впадинами, а также субмикроростов с характерным размером, не превышающим 1 мкм, в структуре медно-цинкового сплава Л62 после импульсно-периодической лазерной обработки с термоциклированием; увелич.  $\times 1600$

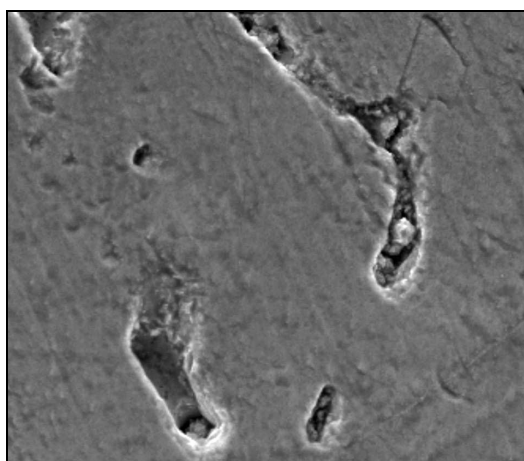


Рис. 5. Область формирования микрополостей шириной до 10 мкм и длиной до 50 мкм овальной и цилиндрической формы с выступами и впадинами, а также субмикроростов с характерным размером, не превышающим 1 мкм, в структуре сплава Л62 при термоциклировании; увелич.  $\times 1600$

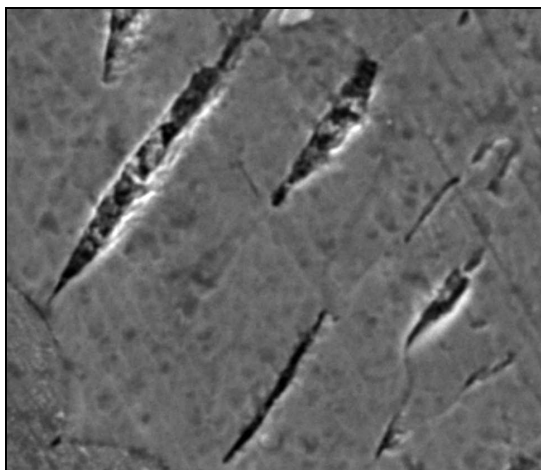


Рис. 6. Формирование микрополостей вытянутой каплевидной и клинообразной форм шириной до 10 мкм и длиной более 50 мкм, а также субмикрополостей шириной менее 1 мкм и длиной более 20 мкм в структуре медно-цинкового сплава при термоциклировании; увелич.  $\times 1600$

В результате проведённых исследований структуры сплава Л62 на шлифах с плоскостью, расположенной перпендикулярно к обработанной поверхности, методом растровой электронной микроскопии с увеличением до  $\times 1600$  установлено следующее. При импульсно-периодической лазерной обработке с термоциклированием медно-цинкового сплава Л62 в приповерхностном слое материала формируются микрополости различных форм: от глобулярной размером до 10 мкм с выступами и впадинами при реализации менее интенсивных режимов обработки до вытянутой каплевидной и клинообразной шириной до 10 мкм и длиной более 50 мкм – для более интенсивных режимов. В исследуемом диапазоне режимов воздействия в латуни Л62 образуются субмикропоры с характерным размером, не превышающим 1 мкм, а на более интенсивных режимах – шириной менее 1 мкм и длиной более 20 мкм. При исследовании тонкой структуры медно-цинкового сплава Л62 после импульсно-периодической лазерной обработки с термоциклированием с использованием аналитического растрового электронного микроскопа VEGA\| SB, Tescan установлено, что микрополости вытянутой каплевидной и клинообразной форм и субмикрополости сужаются у своих краёв с образованием протяжённых наноразмерных каналов шириной не более 100 нм и длиной более 10 мкм (рис. 7).

#### Заключение

Таким образом, разработан метод синтеза нанопористых структур металлических материалов циклическим упруго-пластическим деформированием при лазерном воздействии. В результате исследования методом оптической микроскопии структуры медно-цинкового сплава латуни Л62 установлено следующее. После лазерного воздействия с термоциклированием на поверхности образца формируется структура, содержащая достаточно равномерно распределённые по площади открытые микропоры различных форм: от овальной до неправильной.

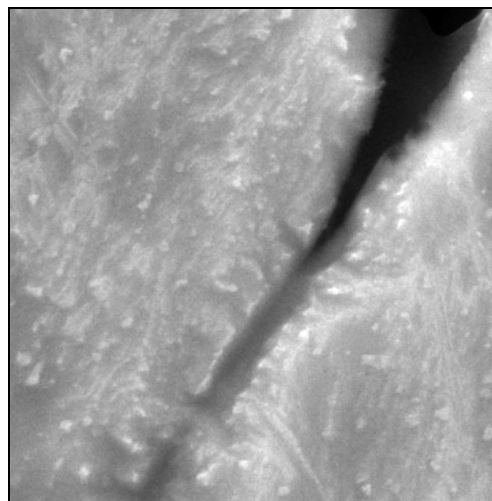


Рис. 7. Тонкая структура медно-цинкового сплава после термоциклирования, выявленная с использованием аналитического растрового электронного микроскопа VEGA\| SB, Tescan; увелич.  $\times 20000$

Образуются также разветвлённые микропоры, имеющие своеобразную дендритную структуру. В центре области лазерного импульсно-периодического воздействия плотность пор выше, чем на периферии. Поры имеют достаточно сложную форму и часто соединяются между собой через сужения. Микропоры формируются преимущественно по границам зёрен и блоков, в результате чего происходит создание новых границ и, как следствие, измельчение зерна. Происходит образование разветвлённых микропор, имеющих своеобразную дендритную структуру и ориентированных в поперечном направлении к поверхности. Внутри зерна наблюдаются закрытые поры преимущественно овальной формы с микронеровностями в виде выступов и впадин. Такие поры занимают значительно меньший объём, чем разветвлённые микропоры. Анализ элементного состава поверхности образца из латуни Л62 после импульсно-периодической лазерной обработки с термоциклированием, проведённый при использовании аналитического растрового электронного микроскопа VEGA\| SB, Tescan и системы электронно-зондового энергодисперсионного микроанализа INCA Energy SEM, Oxford Instrument, показал незначительное увеличение относительного содержания меди до 65 % и снижение доли цинка до 34 %.

В результате проведённых исследований структуры сплава на шлифах с плоскостью, расположенной перпендикулярно к обработанной поверхности, методом растровой электронной микроскопии установлено следующее. При различных режимах в зависимости от интенсивности импульсно-периодической лазерной обработки с термоциклированием медно-цинкового сплава Л62 в приповерхностном слое материала формируются микрополости различных форм: от глобулярной размером до 10 мкм с выступами и впадинами до вытянутой каплевидной и клинообразной шириной до 10 мкм и длиной более 50 мкм. В исследуемом диапазоне режимов воздейст-

вия (энергия в импульсе составляла 20...50 Дж при длительности 0,5...20 мс, конфигурации импульсов экспериментальной установки на базе лазера ROFIN StarWeld: Manual Performance – «пиковая» с прямоугольным участком и плавно убывающим и возрастающим фронтами) в латуни Л62 образуются субмикropоры с характерным размером, не превышающим 1 мкм, а на более интенсивных режимах – шириной менее 1 мкм и длиной более 20 мкм. При исследовании тонкой структуры медно-цинкового сплава Л62 после импульсно-периодической лазерной обработки с термоциклированием установлено, что микрополости вытянутой каплевидной и клинообразной форм и субмикropолости сужаются у своих краёв с образованием протяжённых наноразмерных каналов шириной не более 100 нм и длиной более 10 мкм.

### Литература

1. **Chakravarty, R.** Role of nanoporous materials in radiochemical separations for biomedical applications / R. Chakravarty, A. Dash // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2013. – Vol. 13 (4). – P. 2431-2450.
2. **Lu, S.** Nanoporous and nanostructured materials for catalysis, sensor, and gas separation applications / S. Lu // *Journal of Nanomaterials*. – 2006. – Vol. 2006 – Article ID 48548, 2 p.
3. **Dong, C.** Fabrication and functionalization of tunable nanoporous copper structures by hybrid laser deposition and chemical dealloying / C. Dong, M. Zhong, L. Li, T. Huang, M. Ma // *Science of Advanced Materials*. – 2012. – Vol. 4 (2). – P. 204-213.
4. **Jia, F.L.** Nanoporous metal (Cu, Ag, Au) films with high surface area: General fabrication and preliminary electrochemical performance / F.L. Jia, C.F. Yu, K.J. Deng, L.Z. Zhang // *Journal of Physical Chemistry C*. – 2007. – Vol. 111 (24). – P. 8424-8431.
5. **Shin, H.C.** Nanoporous structures prepared by an electrochemical deposition process / H.C. Shin, J. Dong, M. Liu // *Advanced Materials*. – 2003. – Vol. 15 (19). – P. 1610-1614.
6. **Viswanath, B.** Nanoporous Pt with high surface area by reaction-limited aggregation of nanoparticles / B. Viswanath, S. Patra, N. Munichandraiah, N. Ravishankar // *Langmuir*. – 2009. – Vol. 25 (5). – P. 3115-3121.
7. **Erlebacher, J.** Geometric characterization of nanoporous metals / J. Erlebacher, I. McCue // *Acta Materialia*. – 2012. – Vol. 60 (17). – P. 6164-6174.
8. **Erlebacher, J.** Dealloyed Nanoporous Metals for PEM Fuel Cell Catalysis / J. Erlebacher, J. Snyder // *ECS Transactions*. – 2009. – Vol. 25 (1). – P. 603-612.
9. **Hinze, B.** Production of nanoporous superalloy membranes by load-free coarsening of  $\gamma'$ -precipitates / B. Hinze, J. Rösler, F. Schmitz // *Acta Materialia*. – 2011. – Vol. 59 (8). – P. 3049-3060.
10. **Necker, M.** Development of Ni-Fe-Al-based alloys precipitating cubic  $\gamma'$  for fabrication of nanoporous membranes / M. Necker, J. Rösler, F. Stahl // *Journal of Materials Science*. – 2013. – Vol. 48(11). – P. 4008-4015.
11. **Petrenec, M.** Effect of cyclic heat treatment on cast structure of TiAl alloy / M. Petrenec, E. Vraspírová, K. Němec, M. Hezko // *Key Engineering Materials*. – 2014. – Vol. 586. – P. 222-225.
12. **Lv, Z.Q.** Effect of cyclic heat treatments on spheroidizing behavior of cementite in high carbon steel / Z.Q. Lv, B. Wang, Z.H. Wang, S.H. Sun, W.T. Fu // *Materials Science and Engineering A*. – 2013. – Vol. 574. – P. 143-148.
13. **Мурзин, С.П.** Исследование механизмов формирования нанопористой структуры в многокомпонентной латуни при термоциклировании лазерным воздействием / С.П. Мурзин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2012. – Т. 14, № 4-1. – С. 270-274. – ISSN 1990-5378.
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.** Разработка способов интенсификации формирования нанопористых структур металлических материалов селективной лазерной сублимацией компонентов сплавов / С.П. Мурзин // *Компьютерная оптика*. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 175-179. – ISSN 0134-2452.
17. **Мурзин, С.П.** Формирование нанопористых структур металлических материалов циклическим упруго-пластическим деформированием при лазерном воздействии / С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, Е.Л. Осетров, А.М. Никифоров // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2010. – Т. 12, № 4. – С. 182-185. – ISSN 1990-5378.
18. **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, N 4-5. – P. 281-288.
19. **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, N 6. – P. 1234-1238.
20. **Bezus, E.A.** Evanescent-wave interferometric nanoscale photolithography using guided-mode resonant gratings / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Microelectronic Engineering*. – 2011. – Vol. 88, N 2. – P. 170-174.
21. **Казанский, Н.Л.** Исследовательско-технологический центр дифракционной оптики // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2011. – Т. 13, № 4-1. – С. 54-62.
22. **Казанский, Н.Л.** Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики / Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика*. – 2006. – № 29. – С. 58-77. – ISSN 0134-2452.
23. **Doskolovich, L.L.** Focusators for laser-branding / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, G.V. Usplenjev // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1991. – Vol. 15, № 5. – P. 311-322.
24. **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.
25. **Doskolovich, L.L.** A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // *Journal of Modern Optics*. – 1996. – Vol. 43, № 7. – P. 1423-1433.
26. **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, № 2. – P. 85-89.
27. **Khonina, S.N.** Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system

- / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.G. Volotovskiy // *Journal of Modern Optics*. – 2011. – Vol. 58, № 9. – P. 748–760.
28. **Досколович, Л.Л.** Исследование оптических систем управления передачей высоких энергий / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.И. Мордасов, С.П. Мурзин, С.И. Харитонов // *Компьютерная оптика*. – 2002. – № 23. – С. 40–43. – ISSN 0134-2452.
  29. **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. – ISSN 0134-2452.
  30. **Murzin, S.P.** Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics / S.P. Murzin // *Journal of Advanced Materials*. – 2003. – Vol. 10, N 2. – P. 181–185. – ISSN 0969-6849.
  31. **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, N 11. – P. 1264–1267.
  32. **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.
  33. **Казанский, Н.Л.** Применение фокусаторов излучения при формировании нанопористых структур твердокристаллических материалов / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.В. Меженин // *Компьютерная оптика*. – 2007. – Т. 31, № 2. – С. 48–51.
  34. **Казанский, Н.Л.** Формирование лазерного излучения для создания наноразмерных пористых структур материалов / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, А.В. Меженин, Е.Л. Осетров // *Компьютерная оптика*. – 2008. – Т. 32, № 3. – С. 246–248.
  35. **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.
- ### References
1. **Chakravarty, R.** Role of nanoporous materials in radiochemical separations for biomedical applications / R. Chakravarty, A. Dash // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2013. – Vol. 13 (4). – P. 2431–2450.
  2. **Lu, S.** Nanoporous and nanostructured materials for catalysis, sensor, and gas separation applications / S. Lu // *Journal of Nanomaterials*. – 2006. – Vol. 2006 – Article ID 48548, 2 p.
  3. **Dong, C.** Fabrication and functionalization of tunable nanoporous copper structures by hybrid laser deposition and chemical dealloying / C. Dong, M. Zhong, L. Li, T. Huang, M. Ma // *Science of Advanced Materials*. – 2012. – Vol. 4 (2). – P. 204–213.
  4. **Jia, F.L.** Nanoporous metal (Cu, Ag, Au) films with high surface area: General fabrication and preliminary electrochemical performance / F.L. Jia, C.F. Yu, K.J. Deng, L.Z. Zhang // *Journal of Physical Chemistry C*. – 2007. – Vol. 111 (24). – P. 8424–8431.
  5. **Shin, H.C.** Nanoporous structures prepared by an electrochemical deposition process / H.C. Shin, J. Dong, M. Liu // *Advanced Materials*. – 2003. – Vol. 15 (19). – P. 1610–1614.
  6. **Viswanath, B.** Nanoporous Pt with high surface area by reaction-limited aggregation of nanoparticles / B. Viswanath, S. Patra, N. Munichandraiah, N. Ravishankar // *Langmuir*. – 2009. – Vol. 25 (5). – P. 3115–3121.
  7. **Erlebacher, J.** Geometric characterization of nanoporous metals / J. Erlebacher, I. McCue // *Acta Materialia*. – 2012. – Vol. 60 (17). – P. 6164–6174.
  8. **Erlebacher, J.** Dealloyed Nanoporous Metals for PEM Fuel Cell Catalysis / J. Erlebacher, J. Snyder // *ECS Transactions*. – 2009. – Vol. 25 (1). – P. 603–612.
  9. **Hinze, B.** Production of nanoporous superalloy membranes by load-free coarsening of  $\gamma'$ -precipitates / B. Hinze, J. Rösler, F. Schmitz // *Acta Materialia*. – 2011. – Vol. 59 (8). – P. 3049–3060.
  10. **Necker, M.** Development of Ni-Fe-Al-based alloys precipitating cubic  $\gamma'$  for fabrication of nanoporous membranes / M. Necker, J. Rösler, F. Stahl // *Journal of Materials Science*. – 2013. – Vol. 48(11). – P. 4008–4015.
  11. **Petrenec, M.** Effect of cyclic heat treatment on cast structure of TiAl alloy / M. Petrenec, E. Vraspírová, K. Němec, M. Heczko // *Key Engineering Materials*. – 2014. – Vol. 586. – P. 222–225.
  12. **Lv, Z.Q.** Effect of cyclic heat treatments on spheroidizing behavior of cementite in high carbon steel / Z.Q. Lv, B. Wang, Z.H. Wang, S.H. Sun, W.T. Fu // *Materials Science and Engineering A*. – 2013. – Vol. 574. – P. 143–148.
  13. **Murzin, S.P.** Research of nanoporous structure formation mechanisms in multicomponent brass at a thermocycling by laser influence / S.P. Murzin // *Proceedings of Samara RAS Scientific Centre*. – 2012. – Vol. 14, N 4-1. – P. 270–274. – ISSN 1990-5378. – (In Russian).
  14. **Murzin, S.P.** Thermocycling with pulse-periodic laser action for formation of nanoporous structure in metal material / S.P. Murzin, V.I. Tregub, E.V. Shokova, N.V. Tregub // *Computer Optics*. – 2013. – Vol. 37, N 1. – P. 99–104. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
  15. **Murzin, S.P.** Application of radiation focusators for creation of nanoporous metal materials with high specific surface area by laser action / S.P. Murzin, V.I. Tregub, A.A. Melnikov, N.V. Tregub // *Computer Optics*. – 2013. – Vol. 37, N 2. – P. 226–232. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
  16. **Murzin, S.P.** The research of intensification's expedients for nanoporous structures formation in metal materials by the selective laser sublimation of alloy's components / S.P. Murzin // *Computer Optics*. – 2011. – Vol. 35, N 2. – P. 175–179. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
  17. **Murzin, S.P.** Nanoporous structure formation in metal materials by cyclic elastoplastic deformation with laser action / S.P. Murzin, V.I. Tregub, E.L. Osetrov, A.M. Nikiforov // *Proceedings of Samara RAS Scientific Centre*. – 2010. – Vol. 12, N 4. – P. 182–185. – ISSN 1990-5378. – (In Russian).
  18. **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, N 4-5. – P. 281–288.
  19. **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, N 6. – P. 1234–1238.
  20. **Bezus, E.A.** Evanescent-wave interferometric nanoscale photolithography using guided-mode resonant gratings / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Microelectronic Engineering*. – 2011. – Vol. 88, N 2. – P. 170–174.
  21. **Kazanskiy, N.L.** Research & education center of diffractive optics // *Proceedings of SPIE*. – 2012. – V. 8410. – P. 84100R. – DOI: 10.1117/12.923233.
  22. **Kazanskiy, N.L.** A research complex for solving computer optics problems / N.L. Kazanskiy // *Computer Optics*. – 2006. – N 29. – P. 58–77. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
  23. **Doskolovich, L.L.** Focusators for laser-branding / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, G.V. Usplenjev // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1991. – Vol. 15, № 5. – P. 311–322.

24. **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.
25. **Doskolovich, L.L.** A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // *Journal of Modern Optics*. – 1996. – Vol. 43, № 7. – P. 1423-1433.
26. **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, № 2. – P. 85-89.
27. **Khonina, S.N.** Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.G. Volotovskiy // *Journal of Modern Optics*. – 2011. – Vol. 58, № 9. – P. 748-760.
28. **Doskolovich, L.L.** Investigation of optical systems control high energy transfer / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.I. Mordasov, S.P. Murzin, S.I. Kharitonov // *Computer Optics*. – 2002. – N 23. – P. 40-43. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
29. **Murzin, S.P.** Investigation of temperature fields in structural steel by laser beam formed focusators / S.P. Murzin, E.L. Osetrov // *Computer Optics*. – 2007. – Vol. 31, N 3. – P. 59-62. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
30. **Murzin, S.P.** Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics / S.P. Murzin // *Journal of Advanced Materials*. – 2003. – Vol. 10, N 2. – P. 181-185. – ISSN 0969-6849.
31. **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, N 11. – P. 1264-1267.
32. **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.
33. **Kazanskiy, N.L.** Application focusators radiation for formation of solid crystalline nanoporous materials structures / N.L. Kazanskiy, S.P. Murzin, V.I. Tregub, A.V. Mezhenin // *Computer Optics*. – 2007. – Vol. 31, N 2. – P. 48-51. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
34. **Kazanskiy, N.L.** Formation of the laser radiation to create nanoscale porous materials structures / N.L. Kazanskiy, S.P. Murzin, A.V. Mezhenin, E.L. Osetrov // *Computer Optics*. – 2008. – Vol. 32, N 3. – P. 246-248. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
35. **Kazanskiy, N.L.** Optical system for realization selective laser sublimation of metal alloys components / N.L. Kazanskiy, S.P. Murzin, V.I. Tregub // *Computer Optics*. – 2010. – Vol. 34, N 4. – P. 481-486. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).

## SYNTHESIS OF METAL MATERIALS NANOPOROUS STRUCTURES WITH CYCLIC ELASTO-PLASTIC DEFORMATION UNDER LASER TREATMENT USING RADIATION FOCUSATORS

S.P. Murzin

Samara State Aerospace University

### Abstract

The synthesis method of metal materials nanoporous structures formation with cyclic elasto-plastic deformation under laser treatment was developed. The studies of the alloy structure with scanning electron microscopy revealed the following. During various operating modes microcavities of different shapes were formed in the material surface layer depending on the pulse intensity of laser treatment with thermal cycling of copper-zinc L62 alloy: from globular up to 10 μm with peaks and cavities to elongated teardrop and wedge up to 10 μm and length of more than 50 μm. The submicropores were formed during investigated range of exposure modes in L62 brass with a characteristic size more than 1 μm, and during more intense modes - with a width less than 1 μm and a length of more than 20 μm. The study of the copper-zinc alloy L62 fine structure showed microcavities of elongated teardrop and wedge shapes and taper at their edges to form elongated nanoscale channel having width of not more than 100 nm and a length of 10 μm after laser processing with thermal cycling.

**Key words:** laser treatment, metal material, nanostructure, cyclic elasto-plastic deformation, radiation focusator.

### 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 «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. 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, 20 авторских свидетельств и патентов.

E-mail: [murzin@ssau.ru](mailto:murzin@ssau.ru).

**Serguei Petrovich Murzin** (b. 1963) graduated (1986) from 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 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 monographs, and 20 inventions and patents.

Поступила в редакцию 30 марта 2014 г.