

ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ЛАЗЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ

Мурзин С.П., Трегуб В.И., Шокова Е.В., Трегуб Н.В.

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

Аннотация

Экспериментально определены режимы импульсно-периодического лазерного воздействия с термоциклированием для формирования в двухкомпонентном сплаве системы Cu-Zn латуни Л62 нанопористой структуры, состоящей из наноразмерных пор преимущественно канального типа. Преобразование лазерного излучения в световое пятно с равномерным распределением плотности мощности осуществлялось с помощью оптической системы, содержащей элемент дифракционной компьютерной оптики – фокусатор излучения. При реализации выбранных режимов обеспечивается локальность по глубине и площади физических процессов, протекающих в зоне термического влияния, при сохранении исходных свойств материала и отсутствии значительных деформаций в остальном объёме. Под влиянием термических напряжений в двухкомпонентной латуни происходит увеличение количества дефектов структуры – вакансий, дислокаций и их скоплений. В материале толщиной 0,05 мм формируются субмикроразмеры клинообразной формы, которые сужаются у своих краёв с образованием протяжённых наноразмерных каналов шириной не более 100 нм.

Ключевые слова: термоциклирование, воздействие лазерное, структура нанопористая, материал металлический.

Введение

Нанопористые материалы с высокой эффективностью применяются в таких развивающихся отраслях, как биотехнология, водородная и углеводородная энергетика, химическая, нефтехимическая, пищевая, фармацевтическая промышленность, а также при решении ряда важнейших вопросов, связанных с подготовкой и очисткой питьевой воды [1–3]. Улучшенные физико-механические и технологические свойства металлических нанопористых материалов определяют их преимущества перед используемыми в настоящее время полимерными и керамическими. Применяемые методы изготовления нанопористых металлических материалов, к которым относят электрохимическое селективное выщелачивание, анодное травление, компактирование порошков и пленочные технологии [4–7], имеют значительные технологические ограничения по стабильности размеров пор, а изготавливаемые изделия характеризуются пониженными механическими свойствами и относительно высокой стоимостью.

Прогрессивным направлением создания на поверхности металлических материалов нанопористых слоёв является применение лазерного воздействия с высокой частотой следования импульсов. Так, в работах [8–13] 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 слое материала происходит образование нанопор, как одиночных, так и образующих разветвлённые каналы, достаточно равномерно распределённых по площади. Такая структура формируется за счёт 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. Условием для интенсификации массопереноса в твёрдой фазе металлических материалов является нестационарная локальная деформация, вызываемая высокоэнергетическим внешним воздействием [14–17]. При этом лазерное воздействие импульсно-периодическим излучением с частотой следования импульсов до 5000 Гц позволяет формировать устойчивое напряжённое состояние на поверхности образцов. Для целенаправленного изменения распределения плотности мощности воздействующего лазерного излучения используются элементы дифракционной компьютерной оптики – фокусаторы излучения [18–22].

В работах [23, 24] предложен метод формирования нанопористых структур металлических материалов циклическим упруго-пластическим деформированием, реализуемый при лазерном воздействии с частотой импульсно-периодического излучения от единиц Гц. В этом случае причиной формирования наноразмерных полостей в сплавах является образование и коагуляция вакансий под действием внутренних напряжений, возникающих вследствие зонального высокоэнергетического воздействия, сопровождающегося значительным разогревом металла. Целью данной работы является экспериментальное определение режимов импульсно-периодического лазерного воздействия с термоциклированием для формирования нанопористой структуры в металлическом материале.

1. Исследуемый материал и экспериментальная установка

В качестве исследуемого материала выбран двухкомпонентный сплав системы Cu-Zn латуни Л62, содержащий 60,5...63,5 % меди. Данная латуни является однофазной, отличается высокой пластич-

ностью, достаточной прочностью и коррозионной стойкостью, пригодна для изготовления сварных и паяных изделий. Предварительно шлифованные образцы размерами $25 \times 15 \text{ мм}^2$ из латуни толщиной 0,05 мм размещались на подложке из металлического материала.

Воздействие на образцы из сплава системы Cu-Zn осуществляли с использованием газового CO₂-лазера ROFIN DC 010 с диффузионным охлаждением и высокочастотной накачкой. Выходная мощность лазера в импульсно-периодическом режиме генерации выбиралась в диапазоне 50...300 Вт при частоте следования импульсов 3...5 Гц, диаметр исходного пучка с гауссовским распределением интенсивности составлял 20 мм. Требуемые температурно-скоростные режимы лазерной обработки для реализации необходимого воздействия на ограниченный по площади и глубине объём материала с целью формирования нанопористых структур определялись при изменении мощности излучения, частоты следования импульсов и размеров светового пятна на поверхности образцов. Преобразование лазерного излучения в световое пятно с равномерным распределением плотности мощности осуществлялось с помощью оптической системы, содержащей элемент дифракционной компьютерной оптики – фокусатор излучения [18–22]. Фокусатор излучения, выполненный в виде отражающей пластины с микрорельефной структурой поверхности, осуществлял поворот и вращение пучка лазерного излучения, его пространственную фазовую модуляцию и перераспределение энергии по зоне обработки заданной формы. Применение таких оптических систем позволяет расширить класс операций, реализуемых лазерной обработкой, а также повысить коэффициент использования энергии лазерного излучения за счёт расширения возможности гибкого управления геометрическими характеристиками пучков лазерного излучения при обеспечении требуемого распределения плотности мощности. Уменьшение числа элементов оптической системы доставки лазерного излучения к обрабатываемому объекту приводит к повышению её надёжности, при этом обеспечивается также условие максимального использования энергии излучения.

2. Результаты экспериментальных исследований и обсуждение

Исследовалось воздействие импульсно-периодического лазерного излучения для формирования в латуни Л62 нанопористой структуры, состоящей из наноразмерных пор преимущественно канального типа. Экспериментально определены режимы импульсно-периодического лазерного воздействия с термоциклированием, при котором в центре зоны термического влияния в исследуемом материале образуется участок с гофрообразным рельефом, имеющий чёткую границу. При наклонном падении лазерного излучения мощностью 510 Вт под углом 45° и частоте сле-

дования импульсов 5 Гц гофрообразный рельеф, представленный на рис. 1, имеет форму эллипса. Образование складок является признаком увеличения объёма локального участка двухкомпонентной латуни в зоне наибольших перепадов температур.

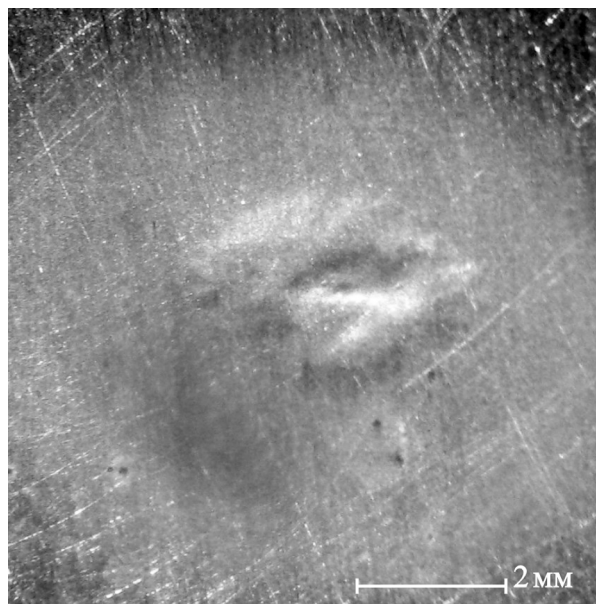


Рис. 1. Поверхность образца из сплава системы Cu-Zn толщиной 0,05 мм после лазерного воздействия с термоциклированием

Влияние температурных градиентов поясняется следующим. При лазерном воздействии локальный участок на поверхности образца нагревается, в то время как остальной материал остаётся холодным. Это приводит к возникновению растягивающих напряжений в центре зоны термического влияния и сжимающих напряжений на её периферии. Поскольку при нагреве материала снижается величина его предела текучести, в центре зоны термического влияния происходит пластическая деформация. По мере выравнивания температуры с течением времени в материале возникают напряжения противоположного знака: сжимающие в центре зоны термического влияния и растягивающие на её периферии. Неравномерный нагрев и изменение объёма материала вследствие температурного расширения приводят к возникновению упругих и пластических деформаций. Пластические деформации в материале после его полного охлаждения являются причиной накопления остаточных напряжений. Если величина внутренних напряжений превышает предел текучести, то образуются локальные деформации. При превышении предела прочности зарождаются несплошности. В зоне термического влияния происходит чередование участков с преобладанием растягивающих и сжимающих напряжений, что приводит к образованию наноразмерных полостей. Энергия, подводимая к образцу, быстро отводится в прилегающие области за счёт теплопроводности. Импульсно-периодическое лазерное воздействие обеспечивает локальность по глубине и площади физи-

ческих процессов, протекающих в зоне термического влияния, при сохранении исходных свойств материала и отсутствии значительных деформаций в остальном объёме.

Исследования тонкой структуры материала проводились с использованием растрового электронного микроскопа VEGA\| SB, Tescan. Установлено, что термоциклирование приводит к существенным качественным изменениям в структуре материала. На первой стадии при нагреве частично устраняются дефекты, присутствующие в металлическом сплаве в исходном состоянии. Затем под влиянием термических напряжений происходит образование новых дефектов структуры – дислокаций и их скоплений, избыточных вакансий. В результате разупрочнения, имеющее место на первой стадии, сменяется упрочнением. В результате проведённых исследований структуры сплава Л62 на шлифах с плоскостью, расположенной перпендикулярно к обработанной поверхности, методом растровой электронной микроскопии установлено следующее. При импульсно-периодическом лазерном воздействии с термоциклированием медно-цинкового сплава в поверхностном слое материала формируются субмикроразности клинообразной формы, которые сужаются у своих краёв с образованием протяжённых наноразмерных каналов шириной не более 100 нм. Тонкая структура медно-цинкового сплава после термоциклирования представлена на рис. 2.

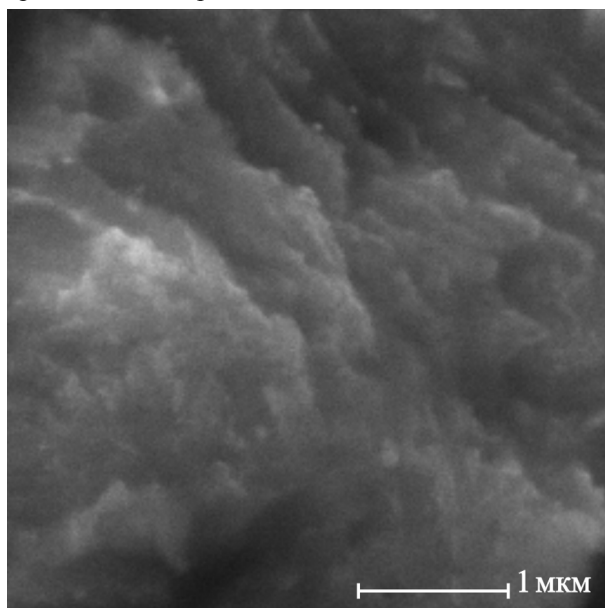


Рис. 2. Тонкая структура медно-цинкового сплава после термоциклирования, выявленная с использованием аналитического растрового электронного микроскопа VEGA\| SB, Tescan

Таким образом, воздействие лазерного импульсно-периодического излучения с частотой следования импульсов 3...5 Гц на сплав системы Cu-Zn – однофазную латунь толщиной 0,05 мм приводит к формированию наноразмерных полостей вследствие накопления внутренних напряжений при цикличе-

ском нагреве и охлаждении с высокими скоростями. Данная запатентованная технология [25] перспективна для производства катализаторов и ультрафильтрационных мембран.

Заключение

Экспериментально определены режимы импульсно-периодического лазерного воздействия с термоциклированием для формирования в двухкомпонентном сплаве системы Cu-Zn латуни Л62 нанопористой структуры, состоящей из наноразмерных пор преимущественно канального типа. При этом неравномерный нагрев и изменение объёма материала вследствие температурного расширения приводят к накоплению остаточных напряжений. В зоне термического влияния происходит чередование участков с преобладанием растягивающих и сжимающих напряжений, что приводит к образованию наноразмерных полостей. Преобразование лазерного излучения в световое пятно с равномерным распределением плотности мощности осуществлялось с помощью оптической системы, содержащей элемент дифракционной компьютерной оптики – фокусатор излучения. При реализации выбранных режимов лазерного импульсно-периодического воздействия с термоциклированием обеспечивается локальность по глубине и площади физических процессов, протекающих в зоне термического влияния, при сохранении исходных свойств материала и отсутствии значительных деформаций в остальном объёме.

При исследовании тонкой структуры материала с использованием растрового электронного микроскопа установлено, что термоциклирование приводит к существенным качественным изменениям в структуре материала. Определено, что при лазерном импульсно-периодическом воздействии под влиянием термических напряжений в двухкомпонентной латуни происходит увеличение количества дефектов структуры – вакансий, дислокаций и их скоплений. В материале толщиной 0,05 мм формируются субмикроразности клинообразной формы, которые сужаются у своих краёв с образованием протяжённых наноразмерных каналов шириной не более 100 нм.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Литература

1. Nanoscale technology applied to biological systems / edited by R.S. Greco, R.L. Smith and F.B. Prinz. – Boca Raton, US: CRC Press, 2004. – 512 p.
2. Advances in nanoporous materials. Vol. 1 / edited by S. Ernst. – London, UK: Elsevier Science, 2009. – 336 p.
3. **Heo, K.** Characterisation of pore structures in nanoporous materials for advanced bionanotechnology / K. Heo, J. Yoon, K.S. Jin, S. Jin, M. Ree // IEE Proceedings – Nanobiotechnology. – 2006. – Vol. 153, N 4. – P. 121-128.

4. **Snyder, J.** Stabilized nanoporous metals by dealloying ternary alloy precursors / J. Snyder, P. Asanithi, A. Dalton, J. Erlebacher // *Advanced Materials*. – 2008. – Vol. 20, N 24. – P. 4883-4886.
5. **Weissmüller, J.** Nanoporous metals by alloy corrosion: formation and mechanical properties / J. Weissmüller, R.C. Newman, H.-J. Jin, A.M. Hodge, J.W. Kysa // *MRS Bulletin*. – 2009. – Vol. 34, N 8. – P. 577-586.
6. *Ordered porous solids: recent advances and prospects* / edited by V. Valtchev, S. Mintova and M. Tsapatsis. – London, UK: Elsevier Science, 2009. – 800 p.
7. **Hinze, B.** Characterization of open-pored metals using image processing / B. Hinze, J. Rösler. In the book “Characterization of Minerals, Metals and Materials” edited by J.-Y. Hwang, S.N. Monteiro, C.-G. Bai, J. Carpenter, M. Cai, D. Firrao and B.-G. Kim. – John Wiley & Sons, Inc., 2012. – P. 185-192.
8. **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.
9. **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.
10. **Мурзин, С.П.** Создание нанопористых металлических материалов с применением лазерного воздействия / С.П. Мурзин, Е.Л. Осетров, Н.В. Трегуб, А.М. Никифоров // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2009. – Т. 11, № 5. – С. 102-105.
11. **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.
12. **Мурзин, С.П.** Повышение равномерности глубины зоны образования нанопористых структур при формировании лазерного воздействия фокусатором излучения / С.П. Мурзин, Е.Л. Осетров, Н.В. Трегуб, С.А. Малов // *Компьютерная оптика*. – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 219-224.
13. **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.
14. **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, N 2. – P. 187-193.
15. **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, N 10. – P. 5766-5771.
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.
17. **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.
18. **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.
19. **Казанский, Н.Л.** Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики / Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика*. – 2006. – № 29. – С. 58-77.
20. **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.
21. **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.
22. **Kazanskiy, N.L.** Research & education center of diffractive optics / N.L. Kazanskiy // *Proceedings of SPIE*. – 2012. – Vol. 8410. – Art. No. 84100R.
23. **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.
24. **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. – С. 270-274.
25. Пат. 2379229 РФ. Способ наноструктурирования двухфазных и многофазных сплавов / С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.В. Меженин, Е.Л. Осетров, А.М. Никифоров, Н.В. Трегуб. Опубл. 20.01.2010, Бюл. № 2.

References

1. *Nanoscale technology applied to biological systems* / edited by R.S. Greco, R.L. Smith and F.B. Prinz. – Boca Raton, US: CRC Press, 2004. – 512 p.
2. *Advances in nanoporous materials. Vol. 1* / edited by S. Ernst. – London, UK: Elsevier Science, 2009. – 336 p.
3. **Heo, K.** Characterisation of pore structures in nanoporous materials for advanced bionanotechnology / K. Heo, J. Yoon, K.S. Jin, S. Jin, M. Ree // *IEE Proceedings – Nanobiotechnology*. – 2006. – Vol. 153, N 4. – P. 121-128.
4. **Snyder, J.** Stabilized nanoporous metals by dealloying ternary alloy precursors / J. Snyder, P. Asanithi, A. Dalton, J. Erlebacher // *Advanced Materials*. – 2008. – Vol. 20, N 24. – P. 4883-4886.
5. **Weissmüller, J.** Nanoporous metals by alloy corrosion: formation and mechanical properties / J. Weissmüller, R.C. Newman, H.-J. Jin, A.M. Hodge, J.W. Kysa // *MRS Bulletin*. – 2009. – Vol. 34, N 8. – P. 577-586.
6. *Ordered porous solids: recent advances and prospects* / edited by V. Valtchev, S. Mintova and M. Tsapatsis. – London, UK: Elsevier Science, 2009. – 800 p.
7. **Hinze, B.** Characterization of open-pored metals using image processing / B. Hinze, J. Rösler. In the book “Characterization of Minerals, Metals and Materials” edited by J.-Y. Hwang, S.N. Monteiro, C.-G. Bai, J. Carpenter,

- M. Cai, D. Firrao and B.-G. Kim. – John Wiley & Sons, Inc., 2012. – P. 185-192.
8. **Kazansky, N.L.** Application of radiation focusators for nanoporous crystalline materials structure formation / N.L. Kazansky, S.P. Murzin, V.I. Tregub, A.V. Mezhenin // *Computer optics*. – 2007. – Vol. 31, N 4. – P. 48-51. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
 9. **Kazansky, N.L.** Formation of laser radiation for a creation of nanoporous materials / N.L. Kazansky, S.P. Murzin, A.V. Mezhenin, E.L. Osetrov // *Computer optics*. – 2008. – Vol. 32, N 3. – P. 246-248. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
 10. **Murzin, S.P.** Creation of nanoporous metal materials by application of laser radiation / S.P. Murzin, E.L. Osetrov, N.V. Tregub, A.M. Nikiforov // *Proceedings of Samara RAS Scientific Centre*. – 2009. – Vol. 11, N 5. – P. 102-105. – ISSN 1990-5378. – (In Russian).
 11. **Murzin, S.P.** Laser nanostructuring of metal materials by application of moveable radiation focusators / S.P. Murzin, V.I. Tregub, A.V. Mezhenin, E.L. Osetrov // *Computer optics*. – 2008. – Vol. 32, N 4. – P. 353-356. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
 12. **Murzin, S.P.** 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 // *Computer optics*. – 2010. – Vol. 34, N 2. – P. 219-224. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
 13. **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.
 14. **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, N 2. – P. 187-193.
 15. **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, N 10. – P. 5766-5771.
 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.** Exposure to laser radiation for creation of metal materials nanoporous structures / S.P. Murzin // *Optics & Laser Technology*. – 2013. – Vol. 48. – P. 509-512.
 18. **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.
 19. **Kazansky, 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).
 20. **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.
 21. **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.
 22. **Kazanskiy, N.L.** Research & education center of diffractive optics / N.L. Kazanskiy // *Proceedings of SPIE*. – 2012. – Vol. 8410. – Art. No. 84100R.
 23. **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).
 24. **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. – P. 270-274. – ISSN 1990-5378. – (In Russian).
 25. RU Patent 2379229. Method of nano structuring of two-phase and multi-phase alloys / S.P. Murzin, V.I. Tregub, A.V. Mezhenin, E.L. Osetrov, A.M. Nikiforov, N.V. Tregub. Date of Patents Jan. 20, 2010.

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

S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)

Abstract

Conditions of pulse-periodic laser action with thermocycling for formation of a nanoporous structure consisting of principally channel-type nanosize pores in two-component Cu-Zn alloy "brass of 62%" are experimentally defined. The transformation of laser radiation into a light spot with uniform distribution of power density was carried out with the aid of an optical system containing an element of diffractive computer optics – radiation focusator. Depth and area locality of the physical processes in heat-affected zone with preservation of initial material properties and absence of significant deformation in the remaining volume is ensured in the implementation of the chosen conditions. The amount of structural defects – vacancies, dislocations and their clusters increases in two-component brass under the influence of thermal stress. Wedge-shaped submicrocavities that converge at their edges with formation of extensive nanosize channels with widths not more than 100 nm are formed in the material of 0.05 mm thickness.

Key words: thermocycling, laser action, nanoporous structure, metal material.

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. 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. Мурзин С.П. – специалист в области лазерных технологий и нанотехнологий, лазерной физики и оптики. В списке научных работ Мурзина С.П. более 60 статей, монография, 18 авторских свидетельств и патентов.

E-mail: murzin@ssau.ru.

Sergei 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 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 60 scientific papers, 1 monograph, and 18 inventions and patents.



Трегуб Валерий Иванович, 1956 года рождения, в 1979 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ) по специальности «Обработка металлов давлением». Кандидат технических наук (1993 год), работает доцентом кафедры технологии металлов и авиаматериаловедения СГАУ. Трегуб В.И. – специалист в области физики твёрдого тела и нанотехнологий. В списке научных работ Трегуба В.И. более 70 публикаций.

E-mail: tvi_v@rambler.ru.

Valery Ivanovich Tregub (b. 1956) with honours graduated (1979) from the S. P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (KuAI, presently, S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU)), majoring in Metal Processing and Metal forming. He received his Candidate in Technics (1993) degree from Samara State Aerospace University. He is holding a position of associate professor at SSAU's Technology of metals and Aircraft material science department. He is a specialist in solid-state physics and nanotechnology. He is co-author of more than 70 scientific papers.



Шокова Екатерина Викторовна, 1972 года рождения, в 1996 году с отличием окончила Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва по специальности «Обработка металлов давлением». Кандидат наук (2008 год), работает доцентом кафедры технологии и машин полиграфического производства СГАУ. Шокова Е.В. – специалист в области обработки металлов. В списке научных работ Шоковой Е.В. более 30 научных публикаций.

E-mail: kat_shokova@rambler.ru.

Ekaterina Viktorovna Shokova (b. 1972) with honours graduated (1996) from the S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU), majoring in Metal Processing and Metal forming. He received his Candidate in Technics (2008) degree from Samara State Aerospace University. He is holding a position of associate professor at SSAU's Department of technology and machines of printing. He is a specialist in metal processing. He is co-author of more than 30 scientific papers.



Трегуб Николай Валерьевич, 1986 года рождения, в 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности «Обработка металлов давлением». Обучается в аспирантуре СГАУ по специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики». Область научных интересов: материаловедение, лазерные технологии обработки металлов. В списке научных работ Трегуба Н.В. 7 статей, 3 патента РФ.

E-mail: nvtregub@yandex.ru.

Nikolay Valeryevich Tregub (b. 1986) graduated (2009) from the S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU), majoring in Metal Processing and Metal forming. Was a postgraduate student in SSAU majoring in 01.04.01 "Devices and methods of experimental physics". Area of scientific interest: materials science, laser technologies of metal processing. He is co-author of 7 scientific papers, 3 patent.

Поступила в редакцию 4 февраля 2012 г.