

## Параметрические характеристики нано- и микропор, влияющие на их залечивание при селективной лазерной обработке

Сафронов И. С. , Ушаков А. И. , Андрухова О. В. 

(Статья представлена членом редакционной коллегии А. В. Носковым)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,

Россия, 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр. 1

[Issafronov@yandex.ru](mailto:Issafronov@yandex.ru), [Ushakov\\_a\\_i@mail.ru](mailto:Ushakov_a_i@mail.ru), [Ova17@yandex.ru](mailto:Ova17@yandex.ru)

**Аннотация.** В работе теоретически рассмотрены закономерности прогрева материала в окрестности нано- и микроразмерных пор, расположенных вблизи поверхности металлического образца, подвергаемого лазерному нагреву лазерным импульсом длительностью 20 нс. Установлены зависимости нагрева материала над порой и под порой для различных расстояний от нагреваемой поверхности до поры. Показано, что в окрестности «идеальной поры» формируется специфическое распределение температуры с дополнительным нагревом материала над порой по сравнению с бездефектным материалом. Показано, что с точки зрения распределения теплового поля наиболее благоприятные условия для залечивания пор реализуются для пор малого диаметра, расположенных на расстоянии 0,5–2 мкм от поверхности, подвергаемой лазерному облучению. В условиях одновременного ударного сжатия это обеспечивает благоприятные условия для заполнения поры нагретым материалом и её полного или частичного залечивания.

**Ключевые слова:** нано- и микропоры, селективное лазерное воздействие, наносекундные лазерные импульсы

**Для цитирования:** Сафронов И. С., Ушаков А. И., Андрухова О. В. 2024. Параметрические характеристики нано- и микропор, влияющие на их залечивание при селективной лазерной обработке. *Прикладная математика & Физика*, 56(3): 226–233. DOI 10.52575/2687-0959-2024-56-3-226-233

Original Research

## Parametric Characteristics of Nano- and Micropores Affecting Their Healing During Selective Laser Treatment

Ivan S. Safronov , Alexander I. Ushakov , Olga V. Andrukova 

(Article submitted by a member of the editorial board A. V. Noskov)

National Research Technological University "MISIS",

4 building 1 Leninskiy Ave, Moscow, 119049, Russia

[Issafronov@yandex.ru](mailto:Issafronov@yandex.ru), [Ushakov\\_a\\_i@mail.ru](mailto:Ushakov_a_i@mail.ru), [Ova17@yandex.ru](mailto:Ova17@yandex.ru)

**Abstract.** The regularities of material heating in the vicinity of nano- and micro-sized pores located near the surface of a metal sample subjected to ultrafast laser heating are theoretically considered. The model used the properties of a titanium alloy VT18u exposed to a laser pulse with a duration of 20 ns. The dependences of the material heating above and below the pore for different distances from the heated surface to the pore are established. It is shown that in the vicinity of the «ideal pore» a specific temperature distribution is formed with additional heating of the material over the pore in comparison with the defect-free material. It is shown that the most favorable conditions for pore healing are realized for small-diameter pores located at distance of 0.5 - 2 micrometers from the irradiated surface. Under conditions of simultaneous shock compression, this provides favorable conditions for filling the pore with heated material and its complete or partial healing.

**Keywords:** nano- and micropores, selective laser treatment, nanosecond laser pulses

**For citation:** Safronov I. S., Ushakov A. I., Andrukova O. V. 2024. Parametric Characteristics of Nano- and Micropores Affecting Their Healing During Selective Laser Treatment. *Applied Mathematics & Physics*, 56(3): 226–233. (in Russian)  
DOI 10.52575/2687-0959-2024-56-3-226-233

**1. Введение.** Актуальной задачей физики конденсированного состояния является изучение физического механизма селективной лазерной обработки поверхности твердых непрозрачных материалов. В отличие от большинства «традиционных» методов лазерной и плазменной обработки, селективное лазерное воздействие позволяет одновременно повысить как пластичность поверхности, так и ее микро- и нанотвердость [1, 2, 3, 4, 5]. Например, для аморфных и нанокристаллических металлических сплавов (82КЗХСР, 5БДСР), титановых сплавов (ВТ9 и ВТ18у) при использовании метода селективного лазерного воздействия удается одновременно повысить нанотвердость (до четырех раз) и пластические характеристики (в частности – стойкость к растрескиванию при механических воздействиях) [3, 6, 7].

Возникающий эффект обусловлен существенными отличиями физического механизма селективной лазерной обработки от «традиционных» методов [3, 7]. В ряде случаев импульсный режим облучения поверхностного слоя металлического образца инициирует частичное или полное залечивание пор и трещин в приповерхностном слое материала за счет комплексного воздействия формирующейся ударной волны и кратковременного повышения температуры.

В настоящее время для металлов и их сплавов улучшение механических свойств поверхности установлено при облучении лазерными импульсами длительностью  $\tau$  в десятки наносекунд [6, 7, 8, 9, 10]. Характер действия лазерного излучения определяется не только временем экспозиции, но общей энергией лазерного импульса и его формой, плотностью мощности на полувысоте, а также средой, в которой находится образец. Когерентное излучение находит все более широкое применение и способно воздействовать на органические полимеры и композиты, упрочняя их или увеличивая срок старения материала [9, 10, 11, 12]. При достаточной энергии и плотности мощности импульса его воздействие на поверхность (в том числе в условиях приповерхностного оптического пробоя воздуха) сопровождается формированием газоплазменного факела/облака, время существования которого может в несколько раз превышать длительность лазерного импульса. Следовательно, в случае селективной лазерной обработки модификация свойств поверхности обусловлена также воздействием излучения и давления со стороны газоплазменного факела. Естественно предположить существование достаточно широкого диапазона длительностей лазерного импульса  $\tau$ , в котором наблюдается селективное лазерное воздействие на объемные нано- и микродефекты. Вероятно, время экспозиции ограничено сверху длительностью импульса  $\tau \sim 1$  мкс и  $\sim 10$  нс снизу. При больших значениях  $\tau$  существует опасность частичного расплавления приповерхностных слоев металла с последующей кристаллизацией/рекристаллизацией материала, вследствие чего нивелируется эффект селективного воздействия [7, 8, 9, 10]. В случае меньших длительностей импульса может реализоваться механизм абляции, при котором также не происходит избирательного воздействия на нано- и микродефекты.

Существование значительного числа параметров лазерных импульсов (длительность импульса, частота, плотность мощности лазерного излучения, последовательность обработки локальных участков и т.д.), а также существенные различия структуры приповерхностных слоев: пористость, микроструктура и др., определяющих характер воздействия лазерного излучения (ЛИ) на материал, делают экспериментальный подбор режимов селективной лазерной обработки металлов и сплавов нерациональным [3, 9, 10, 13, 14]. Эффективный выбор параметров возможен после выявления физических закономерностей процесса залечивания пор и трещин в результате импульсного лазерного облучения.

Так как залечивание дефектов внутри тонкого приповерхностного слоя металла/сплава под действием наносекундных лазерных импульсов происходит крайне быстро, экспериментальное изучение особенностей процесса с достаточной детализацией и необходимым разрешением затруднительно. Одним из возможных путей решения этой задачи является теоретическое исследование процесса селективного воздействия, в том числе компьютерное моделирование, с последующей экспериментальной верификацией модельных предсказаний при измерении локальных и интегральных механических свойств материалов, подвергнутых обработке при заданных условиях.

В работах [15, 16] рассмотрено селективное воздействие лазерного излучения на отдельные нанопоры и их системы. Однако остается неисследованным влияние размера пор и их расстояния от поверхности на специфику и эффективность процесса залечивания.

Таким образом, целью данной работы является исследование физических закономерностей селективного лазерного воздействия на поры в зависимости от их размера и расстояния от поверхности методами математического моделирования.

**2. Методика исследования.** При описанных выше условиях обработки поверхности ультракороткими лазерными импульсами рассматриваемые процессы не успевают выйти даже на квазистационарный режим. Возникающее тепловое поле имеет ряд особенностей. Образующийся газоплазменный факел поддерживает температуру поверхности образца практически неизменной в течение достаточно длительного времени ( $\Delta t > \tau$ ), а в приповерхностных слоях наблюдается высокий градиент температур. Как следствие тонкий поверхностный слой образца в области системы пор нагревается сильно неравномерно [15, 16, 17], что влияет на механические свойства металла/сплава в окрестности поры. Как следствие, распределение температуры вблизи поры может играть существенную роль в кинетике ее залечивания.

Конечная конфигурация поры после воздействия лазерного импульса и плазмы определяется рядом факторов: температурой, до которой нагрет материал, механическими напряжениями в рассматриваемой области и газовой средой в поре. На месте исходной поры в результате залечивания может сформироваться, во-первых, пора меньшего размера с неправильной геометрической формой. Во-вторых, система меньших по размеру пор. И, наконец, может произойти полное залечивание поры с формированием «шва».

В рамках подхода, предложенного ранее [15, 16], в данной работе предполагается, что особенности взаимодействия короткоимпульсного мощного лазерного излучения на поверхность материала позволяют сначала провести математическое моделирование процесса теплопереноса в образце, содержащем

пору и/или систему пор, залегающих на некоторой глубине от поверхности материала. В результате чего строится скалярное температурное поле в окрестности поры/системы пор, которое в дальнейшем используется для проведения численного моделирования процесса деформации разогретого образца с порой/системой пор.

Рассматривается 2D-модель металлического образца, геометрия которой показана на рисунке 1. На основании предварительных модельных экспериментов размеры образца были выбраны таким образом, чтобы температура у границ образца не успевала вырасти более чем на один градус за время процесса. Это соответствует реальному процессу, за исключением участков поверхности, находящихся вблизи облученной области.

Расчет проводился методом конечных элементов (МКЭ) с использованием дифференциального уравнения Фурье, причем не учитывается генерация тепла в результате пластической деформации:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T), \quad (1)$$

где  $T$  [К] – температура,  $t$  [с] – время,  $\lambda$  [Вт/(м·К)] – коэффициент теплопроводности,  $c$  [Дж/(кг·К)] – удельная теплоёмкость,  $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>] – плотность.

Для получения более полного представления о специфике воздействия лазерного излучения и плазмы на пору была проведена серия модельных экспериментов, в которых использовали одинаковые свойства материала и другие параметры моделирования, но варьировали размеры поры и ее расстояние от поверхности. Размер поры изменяли в пределах от 50 нм до 3 мкм, а расстояние от поры до поверхности варьировали от 2 мкм до 5 мкм.

Определяли условия однозначности для процессов теплопроводности, которые включали в себя физические, временные, геометрические и граничные условия.

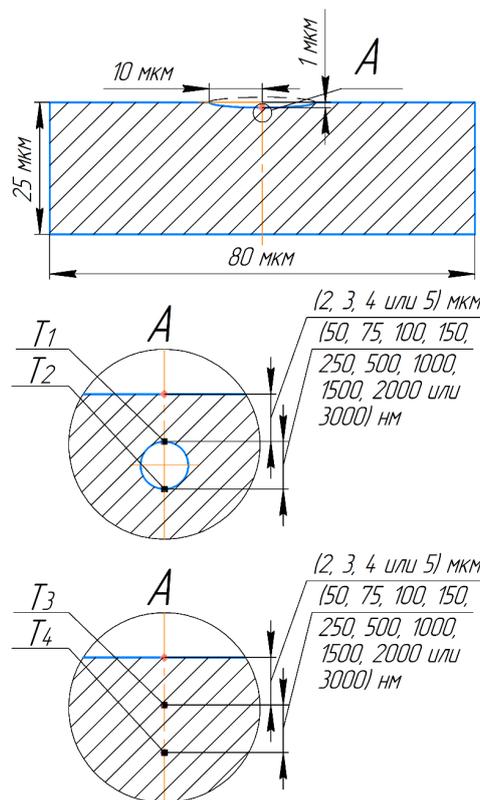


Рис. 1. Общий вид образца (а), где радиус области облучения 10 мкм, глубина лунки 1 мкм. Выносной элемент «А» показан с большим увеличением. В ходе моделирования контролировали температуру материала, прилегающего к поре сверху ( $T_1$ ), и температуру материала, прилегающего к поре снизу ( $T_2$ ). В бездефектном образце контролировали температуру ( $T_3$  и  $T_4$ ) в идентичных точках (идентичное расстояние от поверхности)

Fig. 1. General view of the sample (a), where the radius of the irradiation area is 10 micrometers, the depth of the small cavity is 1 micrometer. The remote element «A» is shown with a large magnification. During the simulation, the temperature of the material adjacent to the pore from above ( $T_1$ ) and the temperature of the material adjacent to the pore from below ( $T_2$ ) were controlled. In a defect-free sample, the temperature ( $T_3$  and  $T_4$ ) was controlled at identical points (identical distance from the surface)

Лазерная плазма взаимодействует с твердой частью образца, и температура в области контакта равна температуре плавления [18, 19, 20]. То есть граничными условиями для области контакта с лазерной плазмой являются граничные условия Дирихле. Во время процесса часть материала расплавляется/испаряется.

Это было учтено при выборе формы поверхности, на которую воздействует лазерная плазма, на рисунке 1 области облучения размером не более 10 мкм соответствует углубление в виде лунки.

На внешней поверхности образца (кроме поверхности области лазерного воздействия) происходит свободная конвекция, которая описывается формулой Ньютона – Рихмана:

$$q = \alpha(T_c - T_f), \quad (2)$$

где  $q$  [Вт/м<sup>2</sup>] – плотность теплового потока,  $T_c$  [K] – температура поверхности твёрдого тела,  $T_f$  [K] – температура окружающей среды,  $\alpha$  [Вт/(м<sup>2</sup>K)] – коэффициент теплоотдачи конвекцией. Так как по результатам предварительных модельных экспериментов избыточная температура не успевает распространиться до поверхности образца, то справедливо следующее:  $T_c = T_f$ , где  $T_c$  [K] – температура поверхности твёрдого тела,  $T_f$  [K] – температура окружающей среды. Следовательно, плотность теплового потока  $q = 0$ . Граничные условия третьего рода (условия Ньютона) вырождаются в граничные условия второго рода (условия Неймана), которые и были использованы.

**3. Результаты и обсуждение** Наличие дефектов вносит искажение в тепловое поле. Естественно характер искажений определяется геометрией дефекта: размерами и его формой, глубиной залегания в приповерхностном слое облучаемого материала. В данной работе рассматриваются искажения в распределении теплового поля, вносимого «идеальными порами» с околонулевой теплопроводностью. В случае, если материал перед порой нагреется до высоких температур (станет достаточно пластичным), то возможно эффективное залечивание поры.

На рисунке 2 проиллюстрировано распределение температуры в приповерхностном слое, прилегающем к области облучения в бездефектном образце (рис. 2 А) и образце, содержащем круглую пору (рис. 2 Б). Скалярное температурное поле в поверхностном слое образца характеризуется высоким температурным градиентом, перпендикулярным лунке, образованной в результате воздействия лазерной плазмы. При этом материал перед порой нагревается сильнее, чем материал на тех же глубинах в бездефектном образце.

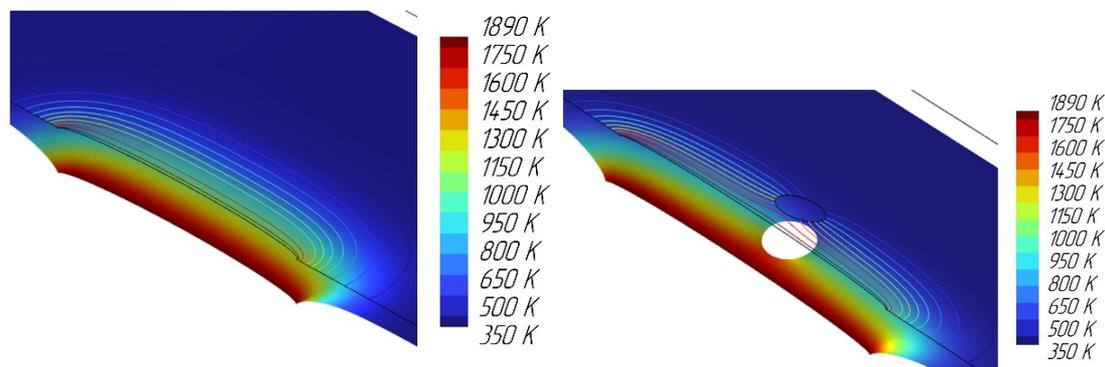


Рис. 2. Картины скалярного температурного поля, сформировавшегося в результате теплового действия лазерного излучения на материал: А) бездефектный металлический образец; Б) металлический образец с круглой порой в приповерхностном слое

Fig. 2. Pictures of the scalar temperature field in the sample. The temperature field was formed as a result of the thermal action of laser radiation: А) a defect-free metal sample; В) a metal sample with a round pore in the near-surface layer

При анализе процесса полного/частичного залечивания поры важно учитывать не только абсолютную температуру материала в окрестности поры, но и разность температур в верхней и нижней части поры  $\Delta T_1 = T_1 - T_2$ . Поэтому по результатам компьютерного моделирования были построены зависимости разности температур  $\Delta T_1$  от диаметра поры для разных расстояний от нагреваемой поверхности до поры (рисунок 3). С увеличением диаметра поры  $\Delta T_1$  растет, при этом характер поведения графиков одинаков для всего исследованного диапазона глубин залегания пор. При сравнительно малых размерах пор (диаметр  $d$  до 500 нм) зависимости можно считать линейными (рисунок 3 А).

При дальнейшем росте диаметра пор зависимости имеют нелинейный характер. Скорость роста  $\Delta T_1$  с увеличением диаметра пор снижается, причем тем быстрее, чем дальше удалена пора от нагреваемой поверхности (рис. 3).

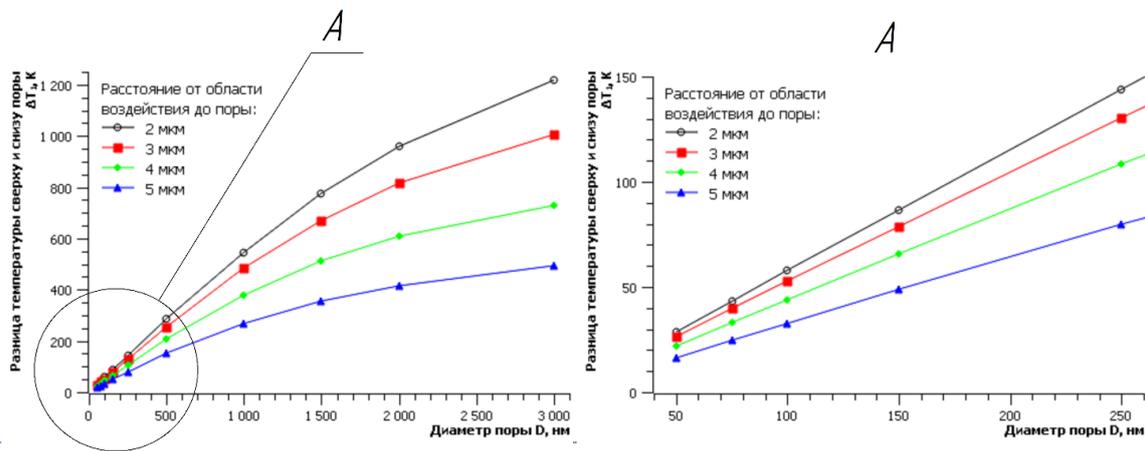


Рис. 3. Зависимости разности температур в верхней и нижней части поры  $\Delta T_1 = T_1 - T_2$  от диаметра поры. Зависимости построены для четырёх разных расстояний от нагреваемой поверхности до поры: 2 мкм, 3 мкм, 4 мкм, 5 мкм

Fig. 3. Dependences of the temperature difference in the upper and lower parts of the pore  $\Delta T_1 = T_1 - T_2$  on the pore diameter. The dependences are constructed for four different distances from the heated surface to the pore: 2 micrometers, 3 micrometers, 4 micrometers, 5 micrometers

Кроме того, по мере удаления поры от области воздействия газоплазменного облака разница температур между её верхней и нижней частями значительно снижается. Таким образом, селективная лазерная обработка оказывается эффективной только для тонкого приповерхностного слоя образца. Этот эффект был обнаружен экспериментально [3, 6, 7, 8, 9, 10, 14] и является подтверждением корректности описанных выше рассуждений.

Отметим, что величина  $\Delta T_1 = T_1 - T_2$  существенно влияет на характер залечивания. Если  $\Delta T_1 \rightarrow 0$ , то система поры (сплав, окружающий пору) обладает однородным сопротивлением деформации. При этом в области избыточного давления нет «слабого места» (округлая форма поры может выдерживать значительные механические нагрузки), и деформация практически не происходит, так как напряжение передаётся остальному материалу образца. Процесс залечивания поры во время селективной лазерной обработки поверхности наиболее вероятен при нагреве материала и наличии значительного температурного градиента в области поры [21, 22, 23, 24, 25]. В случае, если  $\Delta T_1 \rightarrow T_{melt}$ , процесс залечивания поры будет наиболее эффективным. Процесс деформации и залечивания поры в условиях селективной лазерной обработки может быть реализован за короткий промежуток времени существования лазерной плазмы (100 нс – 1 мкс).

Для анализа полученных результатов были проведены аналогичные расчеты для бездефектного металлического образца. На рисунке 4 сплошными линиями приведены зависимости разности температур на глубинах, соответствующих верхнему и нижнему краю поры в образце, содержащем объёмный дефект,  $\Delta T_2 = T_3 - T_4$  для четырёх разных расстояний от нагреваемой поверхности до верхней точки: 2 мкм, 3 мкм, 4 мкм, 5 мкм (см. рис. 1). Несмотря на то, что графики зависимости  $\Delta T_2(d)$  описываются теми же закономерностями, что и  $\Delta T_1(d)$ , очевидно, что  $\Delta T_2$  нарастает существенно быстрее, чем  $\Delta T_1$ . Поэтому для анализа процесса селективного залечивания поры важно знать, насколько внедрение поры повышает нагрев материала, расположенного перед ней, по сравнению с бездефектным образцом. Количественно это можно оценить, определив разность  $\Delta = \Delta T_1 - \Delta T_2$  как функцию линейного размера поры.

На рисунке 4 пунктирными линиями проиллюстрированы зависимости  $\Delta(d)$  при различных глубинах залегания поры. Из анализа зависимостей, приведенных на рисунках 2 и 3, следует, что зависимость  $\Delta = \Delta(d)$  практически выходит на насыщение при достижении пор некоторого критического размера  $d_{cr} \sim 2-2,5$  мкм. Таким образом, естественно предположить, что наиболее благоприятные условия для селективного залечивания будут наблюдаться для пор с диаметрами  $d \leq d_{cr}$ , расположенных близко к поверхности, нагреваемой ультракоротким лазерным импульсом.

С силовой и энергетической точки зрения эффективность залечивания идеальной поры определяется как тепловым полем, так и размером дефекта [15, 21, 22, 23, 24, 25]. С точки зрения тепловых процессов максимальная скорость роста  $\Delta T_1(d)$  по мере увеличения диаметров пор наблюдается для пор малого размера ( $d < 500$  нм). Поэтому для них процесс залечивания должен протекать эффективнее. Кроме того, с точки зрения механики для залечивания больших пор нужны большие энергии и плотности мощности лазерного импульса. Отметим также, что в реальной ситуации необходимо учитывать газовую среду внутри поры, которая должна затруднять полное её залечивание.

Полученные результаты хорошо коррелируют с экспериментальными данными. В частности, для титановых сплавов ВТ9 и ВТ18у максимальное увеличение микротвердости может достигать 30-40 %, в то время как нанотвердость увеличивается до четырех раз [6, 7].

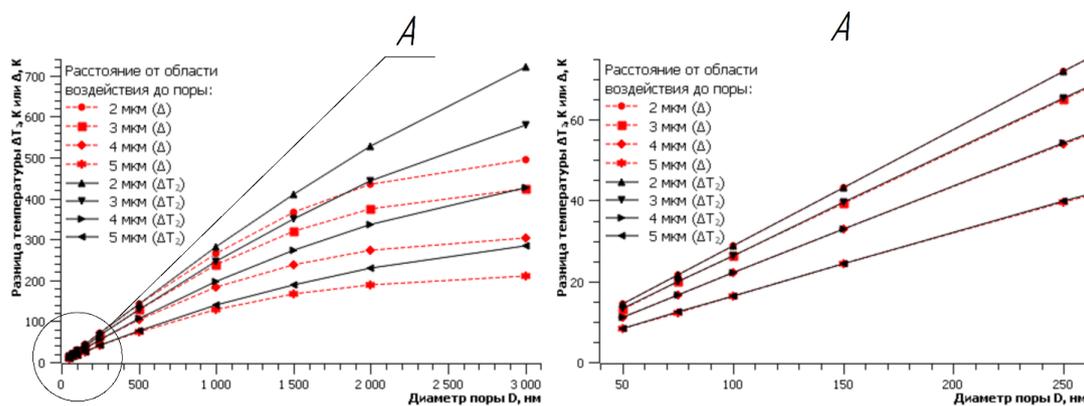


Рис. 4. Сплошными линиями показаны зависимости разности температур  $\Delta T_2 = T_3 - T_4$ . Зависимости построены для четырёх разных расстояний от нагреваемой поверхности до поры: 2 мкм, 3 мкм, 4 мкм, 5 мкм. Пунктирными линиями показаны зависимости  $\Delta = \Delta T_1 - \Delta T_2$

Fig. 4. Solid lines show the dependences of the temperature difference  $\Delta T_2 = T_3 - T_4$ . The dependences are constructed for four different distances from the heated surface to the pore: 2 micrometers, 3 micrometers, 4 micrometers, 5 micrometers.

The dotted lines show the dependencies  $\Delta = \Delta T_1 - \Delta T_2$

Отметим также, что селективное залечивание дефектов (пор, трещин и других концентраторов механических напряжений) сопровождается увеличением пластических характеристик и стойкости к растрескиванию при локальных нагружениях.

**4. Выводы.** 1. Теоретически рассмотрены специфика прогрева материала в окрестности пор разного диаметра, расположенных вблизи поверхности подвергаемой сверхбыстрому нагреву. Установлены зависимости нагрева материала над порой и под порой для различных расстояний от нагреваемой поверхности до поры.

2. В случае сверхбыстрого лазерного прогрева идеальная пора, расположенная вблизи поверхности, обеспечивает более быстрый прогрев материала сверху и более медленный прогрев материала, расположенного снизу. Это приводит к формированию избыточной разности температур  $\Delta$  по сравнению с бездефектным материалом. Абсолютная величина  $\Delta$  выходит на насыщение при расстоянии от лазерно-нагреваемой поверхности до поры в 2-3 мкм.

3. Показано, что с точки зрения распределения теплового поля наиболее благоприятные условия для залечивания пор реализуются для пор малого диаметра (<500 нм), расположенных вблизи поверхности подвергаемой лазерному облучению. В условиях одновременного ударного сжатия это обеспечивает благоприятные условия для заполнения поры нагретым материалом.

#### Список литературы

1. Майоров В.С. Лазерное упрочнение металлов. В кн.: Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко. М.: Физматлит; 2009. 664 с.
2. Костюк Г.И., Руденко Н.В. Лазерное упрочнение легированных сталей. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012;2(89):23–27.
3. Safronov I., Ushakov A. Effect of simultaneous improvement of plasticity and microhardness of an amorphous-nanocrystalline material based on Co, as a result of laser processing of nanosecond duration. *Elsevier Ltd.: Materials Today: Proceedings*. 2020;38:1516–1520.DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.141
4. Duradji V.N., Kaputkin D.E., Duradji A. Aluminum Treatment in the Electrolytic Plasma during the Anodic Process. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2017;10(3):81–84.DOI: 10.25103/jestr.103.11
5. Duradji V.N.; Kaputkin D.E. and Duradji A.Y. Electrolyte-Plasma Modification of Surface of Ti-Based Alloy during Electrohydrodynamic Mode of Anodic Process. *Journal of The Electrochemical Society*. 2017;164(9):226–232.doi:10.1149/2.0451709jes
6. Симонов Ю.В., Ушаков И.В. Механические свойства поверхностных структур титанового сплава ВТ9 после многократной локальной обработки наносекундными лазерными импульсами. *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика*. 2020;2:19–35.
7. Ushakov I., Simonov Y. Formation of surface properties of vt18u titanium alloy by laser pulse treatment. *Materials Today: Proceedings*. 2021;19:2051.DOI:10.1016/j.matpr.2019.07.072
8. Dunn A., Carstensen J.V., Wlodarczyk K., Hansen E.B. Nanosecond laser texturing for high friction applications. *Optics and Lasers in Engineering*. 2014;62:9–16.DOI:10.1016/j.optlaseng.2014.05.003
9. Netprasert O., Saetang V., Dumkum Ch. Surface Hardening of AISI 420 Stainless Steel by Using a Nanosecond Pulse Laser. *Materials Science Forum*. 2018;911:44–48.DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.911.44

10. Casalino G., Moradi M., Moghadam M., Khorram A. Experimental and Numerical Study of AISI 4130 Steel Surface Hardening by Pulsed Nd:YAG Laser. *Materials*. 2019;12:31–36.DOI:10.3390/ma12193136
11. Andrukhova O.V., Ovechkin S.V., Andrukhova T.V., Zhukovskaya T.M., Kustov S.L., Nauman L.V. Study of the effect of coherent radiation on the properties of aramid fibers and fabrics. *Fundamental'nye Problemy Sovremennogo Materialovedeniya*. 2022;19(1):125–131.
12. Овечкин С.В., Ананьин С.В., Андрухова О.В., Попов И.А. Влияние когерентного излучения на прочность арамидных волокон и тканей. *Ползуновский вестник*. 2021;2:233–238.
13. Чаус А.С., Максименко А.В., Федюченко Н.Н., Чаплович Л., Мышковец В.Н. Формирование структуры быстрорежущей стали при лазерном оплавлении поверхности. *Физика металлов и металловедение*. 2019;120(3):291–300.
14. Maharjan N., Wu N., Zhou W. Hardening Efficiency and Microstructural Changes during Laser Surface Hardening of 50CrMo4 Steel. *Metals*. 2021;11:2015.https://doi.org/10.3390/met11122015
15. Ushakov I.V., Safronov I.S., Oshorov A.D., Zhiqiang W., Muromtsev D.Yu. Physics of the effect of high-temperature pulse heating on defects in the surface layer of a metal alloy. *Metallurgist*. 2023;7:74–79.DOI:10.1007/s11015-023-01588-z
16. Wang Z., Ushakov I.V., Safronov I.S., Zuo, J. Physical Mechanism of Selective Healing of Nanopores in Condensed Matter under the Influence of Laser Irradiation and Plasma. *Nanomaterials*. 2024;14(2):139–153.https://doi.org/10.3390/nano14020139
17. Kaputkin D.E. Application of Focused Optic Irradiation for Surface Treatment of Commercial Steels. *Materials Science Forum*. 2003;426–432:1285–1288.DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.426-432.1285
18. Liu B., Wang Ch. Numerical simulation for the evolution in surface morphology of titanium alloy by nanosecond pulsed laser ablation. *Materials Chemistry and Physics*. 2024;315:128997.DOI:10.1016/j.matchemphys.2024.128997
19. Yang X., Kuang X. Influence of Molten Pool Flow and Evaporation on the Surface Morphology During Laser Micro-Texture Processing. *Metals and Materials International*. 2024;30(6):1646–1658.DOI:10.1007/s12540-023-01588-3
20. Андрухова О.В., Сафронов И.С., Ушаков А.И. Физические процессы в поверхностном слое конденсированного материала при воздействии наносекундных лазерных импульсов. *Материалы Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии»*. 2024;104–106.
21. Qiao J., Ushakov I.V., Safronov I.S., Oshorov A.D., Wang Z., Andrukhova O.V., Rychkova O.V. Physical Mechanism of Nanocrystalline Composite Deformation Responsible for Fracture Plastic Nature at Cryogenic Temperatures. *Nanomaterials*. 2024;14(8):723.https://doi.org/10.3390/nano14080723
22. Kan Y., Liu H., Zhang S. H., Zhang L. W. and other authors Probabilistic pore healing model for prediction of relative density in heat treatment. *Materials Research Innovations*. 2014;18(S4):1026–1030.DOI:10.1179/1432891714Z.000000000819
23. Chen J., Chandrashekhara K., Mahimkar C., Simon Lekakh and other authors Study of void closure in hot radial forging process using 3D nonlinear finite element analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012;62:1001–1011.DOI:10.1007/s00170-011-3876-3
24. Zhang X.-X., Cui Z., Chen W., Li Y. A criterion for void closure in large ingots during hot forging. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(4):1950–1959.DOI:10.1016/j.jmatprotec.2008.04.051
25. Бокштейн Б., Епишин А., Светлов И., Есин В., Родин А., Линк Т. Рост и залечивание пор в монокристаллах жаропрочных сплавов на никелевой основе. *Журнал функциональных материалов*. 2006;1(5).

#### References

1. Majorov VS. Lazernoe uprochnenie metallov. V kn.: Lazernye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennyye problemy fundamental'nyh issledovaniy i prikladnyh razrabotok / pod red. V.Ya. Panchenko. M.: Fizmatlit; 2009. 664 c.
2. Kostyuk GI., Rudenko N.V. Laser hardening of alloy steels. *Aerospace engineering and technology*. 2012;2(89):23–27. (In Russian)
3. Safronov I., Ushakov A. Effect of simultaneous improvement of plasticity and microhardness of an amorphous-nanocrystalline material based on Co, as a result of laser processing of nanosecond duration. *Elsevier Ltd.: Materials Today: Proceedings*. 2020;38:1516–1520.DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.141
4. Duradji VN., Kaputkin DE., Duradji A. Aluminum Treatment in the Electrolytic Plasma during the Anodic Process. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2017;10(3):81–84.DOI: 10.25103/jestr.103.11
5. Duradji VN.; Kaputkin DE. and Duradji AY. Electrolyte-Plasma Modification of Surface of Ti-Based Alloy during Electrohydrodynamic Mode of Anodic Process. *Journal of The Electrochemical Society*. 2017;164(9):226–232.doi:10.1149/2.0451709jes
6. Simonov YuV., Ushakov IV. Mechanical properties of surface structures of titanium alloy vt9 after repeated local treatment with nanosecond laser pulses. *Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Physics-Mathematics*. 2020;2:19–35. (In Russian)
7. Ushakov I., Simonov Y. Formation of surface properties of vt18u titanium alloy by laser pulse treatment. *Materials Today: Proceedings*. 2021;19:2051.DOI:10.1016/j.matpr.2019.07.072
8. Dunn A., Carstensen JV., Wlodarczyk K., Hansen E.B. Nanosecond laser texturing for high friction applications. *Optics and Lasers in Engineering*. 2014;62:9–16.DOI:10.1016/j.optlaseng.2014.05.003

9. Netprasert O., Saetang V., Dumkum Ch. Surface Hardening of AISI 420 Stainless Steel by Using a Nanosecond Pulse Laser. *Materials Science Forum*. 2018;911:44–48. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.911.44
10. Casalino G., Moradi M., Moghadam M., Khorram A. Experimental and Numerical Study of AISI 4130 Steel Surface Hardening by Pulsed Nd:YAG Laser. *Materials*. 2019;12:31–36. DOI:10.3390/ma12193136
11. Andrukhoва О.В., Овечкин С.В., Андрухова Т.В., Жукловская Т.М., Кустов С.Л., Науман Л.В. Study of the effect of coherent radiation on the properties of aramid fibers and fabrics. *Fundamental'nye Problemy Sovremennogo Materialovedeniya*. 2022;19(1):125–131.
12. Овечкин С.В., Анан'ин С.В., Андрухова О.В., Попов И.А. Влияние когерентного излучения на прочность арамидных волокон и тканей. *Polzunovskij vestnik*. 2021;2:233–238.
13. Chaus AS., Maksimenko AV., Fedorenko NN., Chaplovich L., Myshkovets VN. Formation of the structure of high-speed steel during laser surface reflow. *Metal physics and metallurgy*. 2019;120(3):291–300. (In Russian)
14. Maharjan N., Wu N., Zhou, W. Hardening Efficiency and Microstructural Changes during Laser Surface Hardening of 50CrMo4 Steel. *Metals*. 2021;11:2015. <https://doi.org/10.3390/met11122015>
15. Ushakov IV., Safronov IS., Oshorov AD., Zhiqiang W., Muromtsev DYU. Physics of the effect of high-temperature pulse heating on defects in the surface layer of a metal alloy. *Metallurgist*. 2023;7:74–79. DOI:10.1007/s11015-023-01588-z
16. Wang Z., Ushakov IV., Safronov IS., Zuo, J. Physical Mechanism of Selective Healing of Nanopores in Condensed Matter under the Influence of Laser Irradiation and Plasma. *Nanomaterials*. 2024;14(2):139–153. <https://doi.org/10.3390/nano14020139>
17. Kaputkin DE. Application of Focused Optic Irradiation for Surface Treatment of Commercial Steels. *Materials Science Forum*. 2003;426-432:1285–1288. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.426-432.1285
18. Liu B., Wang Ch. Numerical simulation for the evolution in surface morphology of titanium alloy by nanosecond pulsed laser ablation. *Materials Chemistry and Physics*. 2024;315:128997. DOI:10.1016/j.matchemphys.2024.128997
19. Yang X., Kuang X. Influence of Molten Pool Flow and Evaporation on the Surface Morphology During Laser Micro-Texture Processing. *Metals and Materials International*. 2024;30(6):1646–1658. DOI:10.1007/s12540-023-01588-3
20. Andrukhoва О.В., Сафронов И.С., Ушаков А.И. Physical processes in the surface layer of condensed material under the influence of nanosecond laser pulses. *Materials of the International Scientific and Technical Conference "Materials, equipment and resource-saving technologies"*. 2024;104–106. (In Russian)
21. Qiao J., Ushakov IV., Safronov IS., Oshorov AD., Wang Z., Andrukhoва О.В., Rychkova О.В. Physical Mechanism of Nanocrystalline Composite Deformation Responsible for Fracture Plastic Nature at Cryogenic Temperatures. *Nanomaterials*. 2024;14(8):723. <https://doi.org/10.3390/nano14080723>
22. Kan Y., Liu H., Zhang SH., Zhang LW. and other authors Probabilistic pore healing model for prediction of relative density in heat treatment. *Materials Research Innovations*. 2014;18(S4):1026–1030. DOI:10.1179/1432891714Z.000000000819
23. Chen J., Chandrashekhara K., Mahimkar C., Simon Lekakh and other authors Study of void closure in hot radial forging process using 3D nonlinear finite element analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012;62:1001–1011. DOI:10.1007/s00170-011-3876-3
24. Zhang X.-X., Cui Z., Chen W., Li Y. A criterion for void closure in large ingots during hot forging. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(4):1950–1959. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2008.04.051
25. Bokshtejn B., Epishin A., Svetlov I., Esin V., Rodin A., Link T. Rost i zalechivanie por v monokristallax zharoprochny'x splavov na nikel'evoy osnove. *Zhurnal funkcional'ny'x materialov*. 2006;1(5).

**Конфликт интересов:** о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

**Conflict of interest:** no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 10.07.2024

Received July 10, 2024

Поступила после рецензирования 23.08.2024

Revised August 23, 2024

Принята к публикации 26.08.2024

Accepted August 26, 2024

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Сафронов Иван Сергеевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Россия

**Ушаков Александр Иванович** – магистрант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Россия

**Андрухова Ольга Витальевна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Россия

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ivan S. Safronov** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics, National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russia

**Alexander I. Ushakov** – Master's Student, National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russia

**Olga V. Andrukhoва** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics, National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russia

[К содержанию](#)