

УДК 538.9

DOI: 10.18384/2949-5067-2023-3-43-56

ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КОРОТКОИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИКРОПОРЫ В НЕПРОЗРАЧНОМ МАТЕРИАЛЕ

Ушаков И. В., Сафронов И. С.

Университет науки и технологий МИСИС

119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1, Российская Федерация

Аннотация

Цель. Исследование физического механизма селективного воздействия лазерного излучения на систему микропор в поверхностном слое непрозрачного материала с высокой теплопроводностью.

Процедура и методы. Теоретическое исследование специфики прогрева поверхности материала с системой микропор, с использованием нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных элементов.

Результаты. Предложен физический механизм селективного воздействия короткоимпульсного лазерного излучения на микропоры в непрозрачном материале. Установлено, что в условиях импульсного прогрева материала специфика распространения изотерм существенно зависит от конфигурации системы микропор. Для верхней микропоры реализуется ускоренный прогрев материала над микропорой и запаздывание прогрева под микропорой. Специфическая картина прогрева материала, дополненная воздействием ударной волны, будет стимулировать движение материала в направлении микропоры и её частичное/полное залечивание.

Теоретическая и/или практическая значимость. Полученные результаты расширяют представления о физике селективного лазерного залечивания микропор.

Ключевые слова: физика селективного лазерного воздействия, микропоры, твёрдые материалы, физика конденсированного состояния, физический механизм залечивания

PHYSICAL MECHANISM OF SELECTIVE EXPOSURE OF SHORT-PULSE LASER RADIATION ON MICROPORES IN OPAQUE MATERIAL

I. Ushakov, I. Safronov

University of Science and Technology MISIS

Leninskiy Prospekt 4 build. 1, Moscow 119049, Russian Federation

Abstract

Aim. Investigation of the physical mechanism of the selective effect of laser radiation on the micropore system in the surface layer of an opaque material with high thermal conductivity.

Methodology. Theoretical study of the specifics of heating the surface for a material with a system of micropores using a nonlinear differential equation of thermal conductivity by the finite element method.

Results. A physical mechanism for the selective effect of short-pulse laser radiation on micropores in an opaque material is proposed. It is established that under conditions of impulsed laser heating of the material, the specificity of the propagation of isotherms significantly depends on the configuration of the micropore system. For the upper micropore is realized speeded heating of the material above the micropore and slowed heating under the micropore. The specific heating pattern of the material, supplemented by the impact of the shock wave, will stimulate the movement of the material in the direction of the micropore and its partial/complete healing.

Research implications. The results obtained expand the understanding of the physics of selective laser healing of micropores.

Keywords: physics of selective laser affecting, micropores, solid materials, physics of condensed matter, physical mechanism of healing

Введение

В физике конденсированного состояния известны эффекты избирательного воздействия короткоимпульсного (как правило, наносекундного) лазерного излучения на дефекты [1–5]. Короткоимпульсное лазерное излучение, при определённых условиях, может избирательно воздействовать на микро- и наномасштабные неоднородные области. В случае оптически прозрачных материалов эти области могут быть расположены как на поверхности, так и в объёме материала. Для оптически непрозрачных материалов лазерное излучение может оказывать селективное воздействие на дефектные области, расположенные в поверхностном слое материала. Данные явления были обнаружены экспериментально и достаточно подробно описаны в ряде работ [2; 6; 7]. Однако физический механизм, ответственный за селективное воздействие короткоимпульсного лазерного излучения на дефектные области, не исследован. Имеются лишь общие представления о физике избирательного воздействия лазерного излучения на дефекты в поверхностном слое непрозрачного вещества [6].

Известно [6; 7], что в результате селективного лазерного воздействия удаётся выборочно менять состояние отдельных макро-, микро- или наномасштабных областей. При этом лазерное излучение никак не меняет структуру и свойства остального материала. Избирательность воздействия лазерного импульса на оптически прозрачные и непрозрачные материалы на практике применяется в различных областях спектроскопии и микроскопии [8; 9]. Применение математического комплекса определения изменённых состояний различных участков расширяет применение световых волн различной плотности мощности.

В настоящее время есть лишь предположения и гипотезы, описывающие вероятные процессы, приводящие к возможности лазерных импульсов избирательно воздействовать на определённые нано- и микромасштабные области [2; 6]. Отсутствие полноценной физической теории, описывающей

механизм селективного лазерного воздействия на дефектные области, лимитирует возможности практического использования технологии селективной лазерной обработки.

Из всего многообразия дефектов, с точки зрения исследования физики селективного лазерного воздействия, наибольший интерес на данном этапе представляют поры. Это связано с тем, что из всех дефектов идеальная пора обладает околонулевой теплопроводностью. Процессы, происходящие в материале, могут быть достаточно точно описаны в модели, а часть теоретических результатов верифицирована прямым экспериментом. Отметим также, что поры являются распространёнными дефектами, формирующимися, например, при лазерном аддитивном производстве материалов [10–14].

Целью данной работы является исследование физического механизма, обуславливающего избирательность воздействия лазерного излучения на поры и системы пор в поверхностном слое материала с высокой теплопроводностью.

Методика моделирования

На современном техническом уровне прямое экспериментальное исследование физики селективного воздействия лазерного излучения на нано- и микропоры невозможно. Поэтому исследования были проведены методом компьютерного моделирования. Полученные результаты и теоретические предсказания были верифицированы экспериментальными исследованиями.

В модели использовали материал, непрозрачный на длине волны лазерного излучения (1064 нм). Воздействие лазерного импульса с длительностью порядка 20 нс, плотностью мощности от 141×10^{12} Вт/м² до 1273×10^{12} Вт/м² и энергией импульса от 15 до 100 мДж приводит к быстрому нагреву поверхности, испарению материала и формированию облака лазерной плазмы. Дальнейший нагрев материала обусловлен воздействием лазерной плазмы. В этих условиях на поверхности материала существует достаточно тонкий расплавленный слой, который приводит к прогреву всего образца.

Для того чтобы корректно решить данную задачу на основе механизма теплопроводности, необходимо выполнить условие однозначности. В это условие входят геометрические условия, определяющие форму и размеры расчётной области, и физические параметры материала (коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоёмкость вещества), а также граничные условия.

Решение основано на использовании нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности [15] при отсутствии внутренних источников теплоты:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T), \{x, y, z\} \in G, \quad (1)$$

где $T(x, y, t)$ – температура тела, К, в точке $\{x, y\}$ в момент t ; ρ – плотность вещества, кг/м³; c – удельная теплоёмкость вещества, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности вещества, Вт/(м·К); G – расчётная область

пространства, в пределах которой решается уравнение теплопроводности, отделённая от окружающей среды граничной поверхностью Γ .

В уравнении (1) единственной зависимой переменной является температура. Размерность пространства – 2D. Математическая модель была реализована в программе FEATool_Multiphysics.

Моделировали тепловое/лазерное воздействие на титановый сплав BT9 ($\text{Ti}_{88,3}\text{Al}_{6,4}\text{Mo}_{3,3}\text{Zr}_{1,5}\text{Si}_{0,3}\text{Fe}_{0,2}$). Используемые при моделировании физические свойства указаны в табл. 1. Скорость конвекции в направлении оси X и Y равна нулю. Тепловая мощность также равна нулю.

Таблица 1 / Table 1

Основные свойства материала, которые были использованы при разработке модели / The main properties of the material that were used in the development of the model

Свойства	Значения / Температурная зависимость
Плотность	4510 кг/м ³
Коэффициент теплопроводности	0,013 T [Вт/(м ² ·К ²)] + 3,3 [Вт/(м ² ·К)]
Удельная теплоёмкость	0,209 T [Дж/(кг·К ²)] + 467 [Дж/(кг·К)]

Источник: по данным авторов

Начальные условия: температура в объёме тела и в области теплового воздействия 293,15 К и 1273,15 К соответственно. Максимальная температура выбрана так, чтобы не происходило плавления.

Использовали граничные условия первого рода, при которых температура поверхности совпадает с температурой прилегающего к поверхности материала (изолированная система).

Воздействие короткоимпульсного лазерного излучения создаёт на поверхности материала расплавленную область в виде окружности. На срезе проплавленная часть соответствует форме эллипса (полуэллипса). Рис. 1а демонстрирует срез образца размерами 50×100 мкм с зоной локального нагрева. Дуга полуэллипса расположена в центре большей стороны (100 мкм) образца на верхней кромке. В качестве источника теплоты выбрана граница дуги полуэллипса. Диаметр малой оси полуэллипса находится в центре одной из сторон прямоугольника. Большая ось эллипса параллельная верхней стороне прямоугольника и равна 12 мкм. Радиус малой оси принят равным 1 мкм. Представленный источник энергии по форме достаточно близок к реальной области воздействия лазерной плазмы при определённой глубине фокусировки.

В первой модели рассматривается бездефектный материал. В остальных моделях внутри квадрата на расстоянии 3,5 мкм от полуэллипса находится треугольник пор (2,5 мкм от соответствующей стороны квадрата). Эти поры имеют форму сферы. Диаметр пор 5 мкм. Расстояние между порами в горизонтальном направлении 5 мкм. В зависимости от эксперимента меняется угол при вершине треугольника от 45° до 90° с шагом 15°. В этом случае расстояние между порами в вертикальном направлении будет меняться.

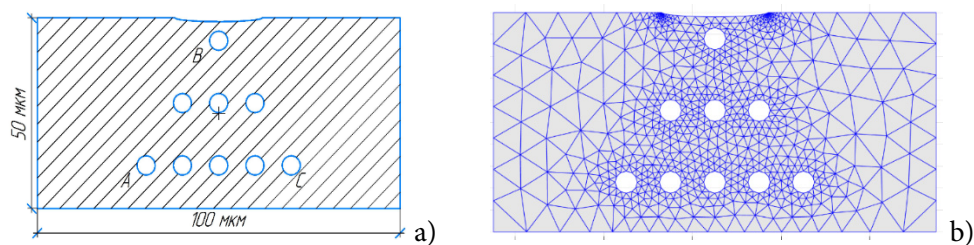


Рис. 1 / Fig. 1. а) модель образца с порами; б) сетка МКЭ на моделируемом образце с порами / a) model of the sample with pores; б) a grid of the finite element method on a sample with pores

Источник: по данным авторов

Результаты и обсуждение

Анализировали момент времени $t = 0,1\text{с}$ после начала нагрева. Этому моменту времени соответствовал наибольший градиент температур в образце. Самая холодная часть нагрета до $688,3\text{ К}$ (рис. 2а, ф). Установлено, что поры используемых конфигураций существенно влияют на распространении изотерм (рис. 2б-е).

В результате компьютерного моделирования установлено, что прогрев материала перед вершиной поры при вершине треугольника всегда происходит быстрее, чем в бездефектном материале. Одновременно прогрев материала под данной порой происходит медленнее, чем в бездефектном материале.

Установлена зависимость разности температур в точках, расположенных над порами X' и под порами Y' (рис. 3а). Рассмотрены поры, ориентированные вдоль стороны ВС треугольника ABC (стороны B_1C_1 треугольника $A_1B_1C_1$ и т. д. на рис. 2). Для сравнения определена температура в аналогичных точках в бездефектном образце (рис. 3б). Соответствующие результаты приведены в табл. 2 и 3.

В табл. 2 рассмотрен случай, когда T_1 – температура в материале, прилегающем к верхней точке поры (некоторая точка X'). T_2 – температура в точке X'' бездефектного материала. Разность температур $\Delta T = T_1 - T_2$.

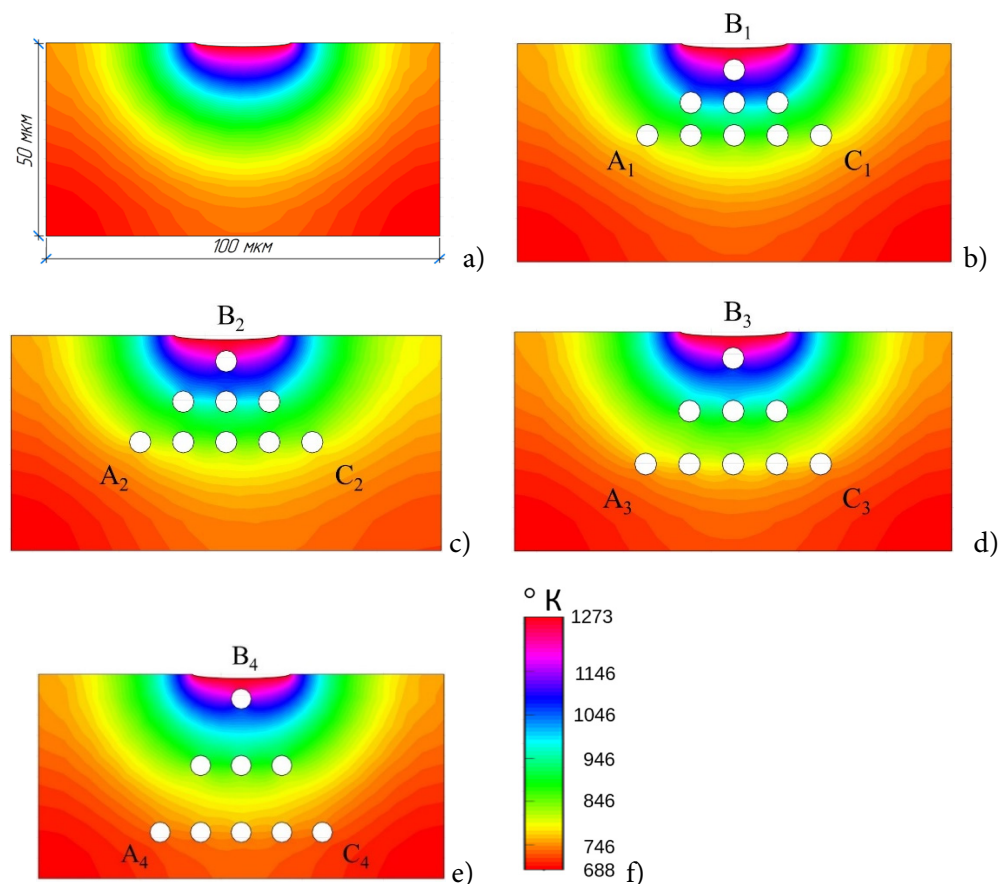


Рис. 2 / Fig. 2. Результаты компьютерного моделирования: а) образец без пор; б) образец с порами, угол при вершине B_1 треугольника пор $A_1B_1C_1$ равен 90° ; в) образец с порами, угол при вершине B_2 треугольника пор $A_2B_2C_2$ равен 75° ; г) образец с порами, угол при вершине B_3 треугольника пор $A_3B_3C_3$ равен 60° ; е) образец с порами, угол при вершине B_4 треугольника пор $A_4B_4C_4$ равен 45° ; ф) цветовая гамма температур / The results of computer simulation: а) a sample without pores; б) a sample with pores, the angle at the apex B_1 of the triangle of pores $A_1B_1C_1$ is 90° ; в) a sample with pores, the angle at the apex B_2 of the triangle of pores $A_2B_2C_2$ is 75° ; г) a sample with pores, the angle at the apex B_3 of the triangle of pores $A_3B_3C_3$ is 60° ; е) a sample with pores, the angle B_4 at the vertex of the pore triangle $A_4B_4C_4$ is 45° ; ф) color range of temperatures

Источник: по данным авторов

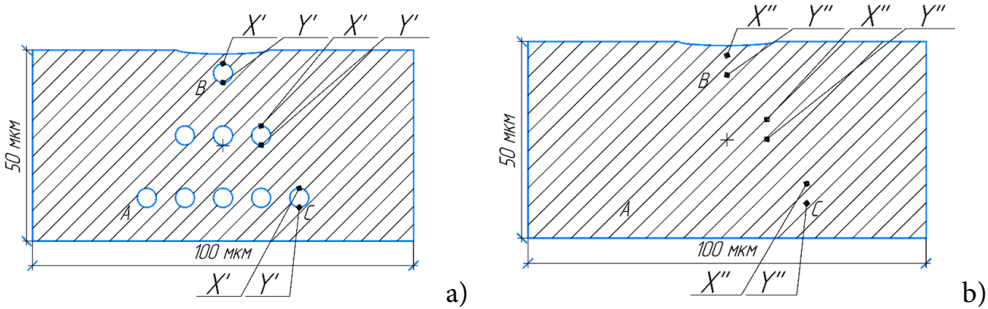


Рис. 3 / Fig. 3. Расположение точек, которые используются для анализа влияния пор на распределение температуры: а) образец с порами; б) образец без пор / Location of points that are used to analyze the effect of pores on temperature distribution: a) a sample with pores; b) a sample without pores

Источник: по данным авторов

Таблица 2 / Table 2

Температурная зависимость прогрева материала над порами / Temperature dependence of the heating of the material over the pores

№ поры	Угол при вершине треугольника пор											
	90°			75°			60°			45°		
	T ₁ , K	T ₂ , K	ΔT, K	T ₁ , K	T ₂ , K	ΔT, K	T ₁ , K	T ₂ , K	ΔT, K	T ₁ , K	T ₂ , K	ΔT, K
1	1223	1197	26	1223	1197	26	1218	1197	21	1218	1197	21
2	1047	1012	35	858	783	75	779	782	-3	751	742	9
3	858	850	8	1028	980	48	851	881	-31	910	885	25

Источник: по данным авторов

В табл. 3 рассмотрен случай, когда T_1 – температура в материале, прилегающем к нижней точке поры (некоторая точка Y'). T_2 – температура в точке Y'' бездефектного материала. Разность температур $\Delta T = T_1 - T_2$.

Таблица 3 / Table 3

Температурная зависимость прогрева материала под порами / Temperature dependence of the heating of the material under the pores

№ поры	Угол при вершине треугольника пор											
	90°			75°			60°			45°		
	T ₁ , K	T ₂ , K	ΔT, K	T ₁ , K	T ₂ , K	ΔT, K	T ₁ , K	T ₂ , K	ΔT, K	T ₁ , K	T ₂ , K	ΔT, K
1	1106	1114	-8	1109	1114	-5	1087	1114	-27	1086	1114	-28
2	914	933	-19	796	819	-23	728	754	-25	722	727	-5
3	778	803	-25	916	911	5	961	941	20	823	838	-15

Источник: по данным авторов

Специфика распределения изотерм в окрестности пор существенно влияет на физику процесса частичного/полного залечивания таких дефектов при селективном лазерном воздействии. Как следует из табл. 2 и 3, над первой порой, ближайшей к зоне нагрева, температура существенно выше, чем в бездефектном материале, а под порой – ниже. В результате формируется специфическое распределение изотерм (рис. 4а). Аналогичный градиент температур наблюдается для остальных пор. Материал, расположенный над порой, нагрет до более высоких температур, чем материал под порой (а также слева и справа от поры). Учитывая, что лазерное воздействие сопровождается формированием ударной волны (давление до 10^{10} Па и более [16; 17]), создаётся условие для движения нагретого материала в направлении действия сил сжатия. Сопротивление деформации любого металлического материала существенно зависит как от его температуры, так и от скорости деформации. Для скоростей деформации, создаваемых при стандартных технологиях обработки металлов давлением при $T=1123$ К, сопротивление деформации сплава ВТ9 от 100 до 500 МПа [18; 19]. Давление, инициируемое в поверхностном слое материала, при воздействии короткого лазерного импульса на два порядка выше. Следовательно, выполняются необходимые условия для заполнения пор нагретым материалом. Для определения достаточных условий необходимо отдельное исследование поведения материала в окрестности пор при сверхкоротком периодическом импульсном нагружении.

Эффективность движения материала будет зависеть от длительности воздействия шокового давления, характеристик нагретого материала (изменения его пластических характеристик) и ряда других факторов. Если область воздействия лазерной плазмы достаточно велика, то под центральной частью области воздействия сжимающая сила будет направлена вертикально вниз.

Можно ожидать движения расплавленного и нагретого материала в направлении поры и её заполнение (в данной модели предполагается, что в поре отсутствуют газы или находятся в ультравысоком разреженном состоянии).

Только для поры, находящейся в точке В (рис. 2b-e), распределение изотерм во всех исследованных треугольниках пор аналогично показанному на рис. 4а. На распределение изотерм в окрестности любой другой поры в значительной степени будут влиять другие поры (рис. 4b).

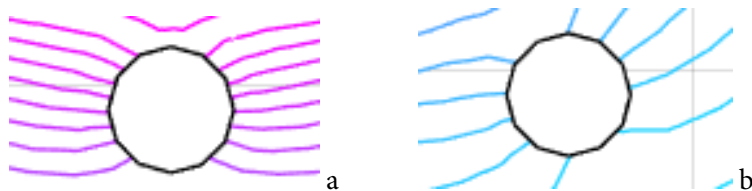


Рис. 4 / Fig. 4. Изотермы в окрестности микропор: а) микропора при вершине В треугольника ABC; б) микропора при вершине С треугольника ABC / Isotherms in the vicinity of micropores: a) micropore at the vertex B of triangle ABC; b) micropore at the vertex C of triangle ABC

Источник: по данным авторов

Специфика прогрева материала была определена из относительной разницы температур Δ между верхней и нижней точками пор, расположенных вдоль стороны ВС треугольника ABC (рис. 1а). Если данная разница больше, чем для бездефектного материала, то $\Delta > 0$. Результаты расчётов показаны на рис. 5. Из рисунка следует, что величина Δ существенно зависит от геометрии треугольника пор.

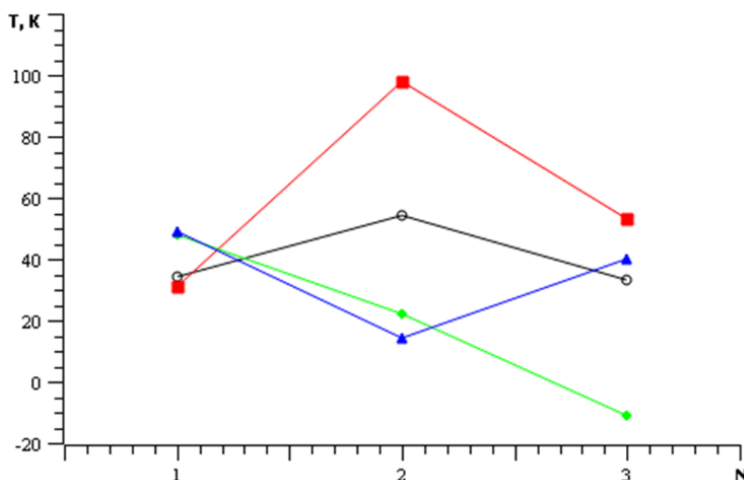


Рис. 5 / Fig. 5. Влияние поры на величину разницы температур ΔT между точкой, расположенной над порой и под порой. $\Delta = \Delta T_1 - \Delta T_2$, где ΔT_1 – приращение температур для точки, расположенной над порой, ΔT_2 – приращение температуры для точки, расположенной под порой. Угол при вершине треугольника пор: 0 – 90° ■ – 75°; ◆ – 60°; ▲ – 45° / The influence of the pore on the magnitude of the temperature difference Δ between the point located above the pore and below the pore. $\Delta = \Delta T_1 - \Delta T_2$, where ΔT_1 is the temperature increment for the point located above the pore, ΔT_2 is the temperature increment for the point located below the pore. The angle at the apex of the pore triangle: : 0 – 90° ■ – 75°; ◆ – 60°; ▲ – 45°

Источник: по данным авторов

Зависимости Δ от номера поры немонотонны для всех случаев. Геометрия треугольника пор оказывает минимальное влияние на распределение изотерм в окрестности верхней поры (рис. 4 и 5). Распределение изотерм и величина Δ для остальных пор существенно зависит от места их расположения.

Очевидно, что в рамках предложенной модели, чем больше величина Δ , тем больше вероятность залечивания поры. Кроме того, для верхней поры направление распространения изотерм совпадает с направлением воздействия силы сжатия. Изотермы симметричны относительно данного направления.

Условие симметричности направления изотерм не всегда выполняются для определённых конфигураций пор (рис. 5). Важно отметить, что значение Δ

меньше нуля для третьей поры С треугольника пор ABC (рис. 1a и 2d) с углом при вершине 60° .

В работах [2; 14] экспериментально показана возможность существенного, в 3-4 раза, повышения нанотвёрдости титановых сплавов при селективной лазерной обработке. Одновременно отмечено увеличение микротвёрдости на 30–40%. Увеличение нанотвёрдости сопровождается исчезновением флуктуаций нанотвёрдости при механических испытаниях в различных точках. Отличительной особенностью селективной лазерной обработки является существенное повышение твёрдости с одновременным повышением пластических характеристик сплава. Это может быть связано с залечиванием дефектов, являющихся зародышами разрушения.

В работе [14] было экспериментально установлено, что для существенного повышения нано- и микротвёрдости необходимо несколько (до 10) последовательных воздействий. Необходимость серии лазерных воздействий теоретически ранее не была обоснована. Полученные в данной работе результаты позволяют описать физический механизм залечивания и необходимость нескольких воздействий лазерных импульсов. Воздействие единичного лазерного импульса приводит к селективному залечиванию пор, расположенных ближе всего к поверхности. Остальные поры оказываются в сложном температурном поле, так как распределение изотерм существенно зависит от относительного расположения пор. Последовательное многократное воздействие лазерным импульсом приводит к эффекту залечивания пор, расположенных на большей глубине.

Таким образом, полученные в работе теоретические результаты моделирования позволяют непротиворечиво объяснить экспериментальные результаты, а также предложить физическую модель селективного лазерного воздействия на микропоры в поверхностном слое непрозрачного материала.

Заключение

1. На основании теоретических и экспериментальных исследований предложен физический механизм селективного воздействия короткоимпульсного лазерного излучения на микропоры в непрозрачном материале, основанный на селективном прогреве материала перед микропорами и их заполнения/залечивания за счёт движения нагретого материала под действием ударной волны.

2. В условиях импульсного прогрева материала специфика распространения изотерм существенно зависит от конфигурации системы микропор. Только для верхней микропоры изотермы распространяются симметрично. Все микропоры, за исключением верхней, оказываются в сложном температурном поле. Направление движения изотерм существенно отклоняется от прямолинейного, а конфигурация прогрева не обеспечивает возможность залечивания микропор, находящихся во втором и третьем слое. Для залечивания второго и третьего слоя микропор требуется воздействие серии лазерных импульсов.

3. Полученные теоретические результаты и предложенная физическая модель избирательного залечивания микропор позволяют непротиворечиво объяснить имеющие экспериментальные результаты, связанные со спецификой изменения комплекса физических свойств поверхности после селективного лазерного воздействия.

Статья поступила в редакцию 26.05.2023 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gorbunov A. V. Dendritic melting in modulated laser beam // Europhysics Letters. 1993. Vol. 24. No. 9. P. 773–778. DOI: 10.1209/0295-5075/24/9/013.
2. 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. С. 19–35. DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-19-35.
3. Мирзоев Ф. Х., Панченко В. Я., Шелепин Л. А. Лазерное управление процессами в твердом теле // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 1. С. 3–23. DOI: 10.3367/ufnr.0166.199601a.0003.
4. Лазерная сварка новых аустенитных криогенных коррозионностойких сталей, легированных азотом / Капуткина Л. М., Смарикина И. В., Киндоп В. Э., Капуткин Д. Е. // Чёрные металлы. 2021. № 7. С. 56–62. DOI: 10.17580/chm.2021.07.05.
5. Шинкин В. Н. Предварительная правка стальной полосы // Чёрные металлы. 2018. № 5. С. 34–40.
6. Ushakov I. V., Safronov I. S. Directed changing properties of amorphous and nanostructured metal al-loys with help of nanosecond laser impulses // CIS Iron and Steel Review. 2021. Vol. 22. P. 77–81. DOI: 10.17580/cisirs.2021.02.14
7. Safronov I. S., Ushakov A. I. Targeted alternation in properties of solid amorphous-nanocrystalline material in exposing to nanosecond laser radiation // Defect and Diffusion Forum. 2021. Vol. 410. P. 469–474. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.469.
8. Идентификация и счет эритроцитов нативной донорской крови человека методом цифровой оптической микроскопии с использованием спектрально фильтрованного освещения / Дубровский В. А., Забенков И. В., Карпочева Е. П., Торбин С. О. // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129. № 3. С. 327–341. DOI: 10.21883/OS.2021.03.50660.208-20.
9. Spectroscopy in the gas phase with GaAs/AlGaAs quantum-cascade lasers / Hvozdar L., Gianordoli S., Strasser G., Schrenk W., Unterrainer K., Gornik E., Murthy C. S. S., Kraft M., Pustogow V., Mizaikoff B., Inberg A., Croitoru N. // Applied Optics. 2000. Vol. 39. Iss. 36. P. 6926–6930. DOI: 10.1364/AO.39.006926.
10. Selective Laser Melting of Aluminum and Its Alloys / Wang Z., Ummethala R., Singh N., Tang S., Suryanarayana C., Eckert J., Prashanth K. G. // Materials. 2020. Vol. 13. Iss. 20. P. 4564. DOI: 10.3390/ma13204564.
11. Densification, Microstructure, and Mechanical Properties of Additively Manufactured 2124 Al-Cu Alloy by Selective Laser Melting / Deng J., Chen C., Zhang W., Li Y., Li R., Zhou K. // Materials. 2020. Vol. 13. Iss. 19. P. 4423. DOI: 10.3390/ma13194423.

12. Kaputkin D. E., Duradji V. N., Kaputkina N. A. Plasma electrolytic processing of bimetals at the anodic process // *Letters on Materials*. 2021. Vol. 11. P. 433–437. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-4-433-437.
13. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones / Khairallah S. A., Anderson A. T., Rubenchik A., King W. E. // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 108 (16). P. 36–45. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.02.014.
14. Prashanth K. G., Scudino S. Quasicrystalline composites by additive manufacturing // *Key Engineering Materials*. 2019. Vol. 818. P. 72–76. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.818.72.
15. Шинкин В. Н. Механика сплошных сред для металлургов. М.: МИСиС, 2014. 628 с.
16. Лазерная абляция: физические представления и приложения (обзор) / Иногамов Н. А., Петров Ю. В., Хохлов В. А., Жаховский В. В. // *Теплофизика высоких температур*. 2020. Т. 58. № 4. С. 689–706. DOI: 10.31857/S0040364420040043.
17. Генерация ударных волн и образование кратеров в твердом веществе при кратковременном воздействии лазерного импульса / Гуськов С.Ю., Бородзюк С., Калал М., Касперчик А., Краликова Б., Кроуски Е., Лимпоух И., Машек К., Писарчик Т., Писарчик П., Пфейфер М., Рохлена К., Скала Й., Улшмид Й. // *Квантовая электроника*. 2004. Т. 34. № 11. С. 989–1003. DOI: 10.1070/QE2004v034n11ABEH002695.
18. Simulation of Deformation Behavior and Microstructure Evolution during Hot Forging of TC11 Titanium Alloy / Alimov A., Zabelyan D., Burlakov I., Korotkov I., Gladkov Y. // *Defect and Diffusion Forum*. 2018. Vol. 385. P. 449–454. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.385.449.
19. Ильин А.А. Колачёв Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.: ВИЛС – МАТИ, 2009. 520 с.

REFERENCES

1. Gorbunov A. V. Dendritic melting in modulated laser beam. In: *Europhysics Letters*, 1993, vol. 24, no. 9, pp. 773–778. DOI: 10.1209/0295-5075/24/9/013.
2. Simonov Yu. V., Ushakov I. V. [Mechanical properties of surface structures of titanium alloy vt9 after repeated local processing with nanosecond laser pulses]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-Matematika* [Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2020, no. 2, pp. 19–35. DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-19-35.
3. Mirzoev F. Kh., Panchenko V. Ya., Shelepin L. A. [Laser control of processes in solids]. In: *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)], 1996, vol. 166, no. 1, pp. 3–23. DOI: 10.3367/ufnr.0166.199601a.0003.
4. Kaputkina L. M., Smarygina I. V., Kindop V. E., Kaputkin D. Ye. [Laser welding of new austenitic cryogenic corrosion-resistant steels alloyed with nitrogen]. In: *Chornyye metally* [Chernye Metally. Stahl und Eisen], 2021, no. 7, pp. 56–62. DOI: 10.17580/chm.2021.07.05.
5. Shinkin V. N. [Preliminary straightening of steel strip]. In: *Chornyye metally* [Chernye Metally. Stahl und Eisen], 2018, no. 5, pp. 34–40.
6. Ushakov I. V., Safronov I. S. Directed changing properties of amorphous and nanostructured metal al-loys with help of nanosecond laser impulses. In: *CIS Iron and Steel Review*, 2021, vol. 22, pp. 77–81. DOI: 10.17580/cislr.2021.02.14.
7. Safronov I. S., Ushakov A. I. Targeted alternation in properties of solid amorphous-nanocrystalline material in exposing to nanosecond laser radiation. In: *Defect and Diffusion Forum*, 2021, vol. 410, pp. 469–474. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.469.

8. Dubrovsky V. A., Zabenkov I. V., Karpocheva E. P., Torbin S. O. [Identification and counting of natural donor blood erythrocytes of human by digital optical microscopy method using spectrally filtered illumination]. In: *Optika i spektroskopiya* [Optics and Spectroscopy], 2021, vol. 129, no. 3, pp. 327–341. DOI: 10.21883/OS.2021.03.50660.208-20.
9. Hvozda L., Gianordoli S., Strasser G., Schrenk W., Unterrainer K., Gornik E., Murthy C. S. S., Kraft M., Pustogow V., Mizaikoff B., Inberg A., Croitoru N. Spectroscopy in the gas phase with GaAs/AlGaAs quantum-cascade lasers. In: *Applied Optics*, 2000, vol. 39, iss. 36, pp. 6926–6930. DOI: 10.1364/AO.39.006926.
10. Wang Z., Ummethala R., Singh N., Tang S., Suryanarayana C., Eckert J., Prashanth K. G. Selective Laser Melting of Aluminum and Its Alloys. In: *Materials*, 2020, vol. 13, iss. 20, pp. 4564. DOI: 10.3390/ma13204564.
11. Deng J., Chen C., Zhang W., Li Y., Li R., Zhou K. Densification, Microstructure, and Mechanical Properties of Additively Manufactured 2124 Al-Cu Alloy by Selective Laser Melting. In: *Materials*, 2020, vol. 13, iss. 19, pp. 4423. DOI: 10.3390/ma13194423.
12. Kaputkin D. E., Duradji V. N., Kaputkina N. A. Plasma electrolytic processing of bimetals at the anodic process. In: *Letters on Materials*, 2021, vol. 11, pp. 433–437. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-4-433-437.
13. Khairallah S. A., Anderson A. T., Rubenchik A., King W. E. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. In: *Acta Materialia*, 2016, vol. 108 (16), pp. 36–45. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.02.014.
14. Prashanth K. G., Scudino S. Quasicrystalline composites by additive manufacturing. In: *Key Engineering Materials*, 2019, vol. 818, pp. 72–76. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.818.72.
15. Shinkin V. N. *Mekhanika sploshnykh sred dlya metallurgov* [Mechanics of continuous media for metallurgists]. Moscow, MISiS Publ., 2014. 628 p.
16. Inogamov N. A., Petrov Yu. V., Khokhlov V. A., Zhakhovsky V. V. [Laser ablation: physical concepts and applications (review)]. In: *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature], 2020, vol. 58, no. 4, pp. 689–706. DOI: 10.31857/S0040364420040043.
17. Guskov S. Yu., Borodzyuk S., Kalal M., Kasperchik A., Kralikova B., Krousni E., Limpoukh I., Mashek K., Pisarczyk T., Pisarczyk P., Pfeiffer M., Rohlena K., Skala J., Ullschmid J. [Generation of shock waves and formation of craters in a solid material irradiated by a short laser pulse]. In: *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics], 2004, vol. 34, no 11, pp. 989–1003. DOI: 10.1070/QE2004v034n11ABEH002695.
18. Alimov A., Zabelyan D., Burlakov I., Korotkov I., Gladkov Y. Simulation of Deformation Behavior and Microstructure Evolution during Hot Forging of TC11 Titanium Alloy. In: *Defect and Diffusion Forum*, 2018, vol. 385, pp. 449–454. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.385.449.
19. Ilyin A. A., Kolachev B. A., Polkin I. S. *Titanovyye splavy. Sostav, struktura, svoystva. Spravochnik* [Titanium alloys. Composition, structure, properties. Directory]. Moscow, VILS – MATI Publ., 2009. 520 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ушаков Иван Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры физики Национального исследовательского технологического университета МИСиС;
e-mail: ushakoviv@mail.ru;

Сафронов Иван Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Национального исследовательского технологического университета МИСиС;
e-mail: issafronov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan V. Ushakov – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Department of Physics, National University of Science and Technology “MISiS”;
e-mail: ushakoviv@mail.ru;

Ivan S. Safronov – PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Physics, National University of Science and Technology “MISiS”;
e-mail: issafronov@yandex.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Ушаков И. В., Сафронов И. С. Физический механизм селективного лазерного воздействия короткоимпульсного лазерного излучения на микропоры в непрозрачном материале // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-Математика. 2023. № 3. С. 43–56.
DOI: 10.18384/2949-5067-2023-3-43-56

FOR CITATION

Ushakov I. V., Safronov I. S. Physical mechanism of selective exposure of short-pulse laser radiation on micropores in opaque material. In: *Bulletin of State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 2023, no. 3, pp. 43–56.
DOI: 10.18384/2949-5067-2023-3-43-56