

УДК 538.9

**ФИЗИКА ЗАЛЕЧИВАНИЯ НАНОПОР В КОНДЕНСИРОВАННОМ
ВЕЩЕСТВЕ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ****И.В. Ушаков, И.С. Сафронов, А.Д. Ошоров***Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»*

В работе теоретически и экспериментально исследуется воздействие лазерного излучения и высокотемпературной плазмы на природу изменения физических свойств аморфно-нанокристаллических материалов, содержащих нанопоры в тонком поверхностном слое. В настоящее время экспериментально установлена возможность одновременного повышения твердости и стойкости к растрескиванию поверхности материала в результате селективного лазерного воздействия. Экспериментальные результаты могут быть объяснены на основе модели селективного воздействия лазерного излучения на отдельные нанопоры. В работе исследована физика лазерного избирательного инициирования процессов залечивания неоднородных/дефектных областей на наноуровне. С использованием предложенной физической модели выявлена специфика избирательного прогрева областей вблизи нанопор, а также влияние наноразмерных дефектов структуры на специфику распространения изотерм. Рассмотрен процесс залечивания нанопор находящихся в неоднородно прогретом поверхностном слое материала под действием ударной нагрузки. Теоретические результаты сопоставлены с экспериментальными данными. Показано, что в результате селективной лазерной обработки удастся повысить микротвердость в три-четыре раза, с одновременным ростом стойкости к растрескиванию в условиях локального нагружения пирамидкой Виккерса. Полученные результаты находят объяснение в рамках представлений об избирательном лазерном залечивании нано- и микроразмерных дефектов, расположенных в поверхностном слое материала. Таким образом в работе теоретически и экспериментально изучены физико-механические свойства поверхности конденсированных материалов, находящихся в экстремальном состоянии, вызванном сильным сжатием в условиях одновременного кратковременного нагрева до высоких температур.

Ключевые слова: физика конденсированного состояния, селективное лазерное воздействие, физика залечивания нанопор, микротвердость, физическая модель.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-7-18

Введение

В работе теоретически и экспериментально исследуется воздействие лазерного излучения и высокотемпературной лазерной плазмы на изменение физико-механических свойств аморфно-нанокристаллических материалов, характеризующихся высокой теплопроводностью. На механические свойства материала, особенно поверхности, существенно влияют дефектные области. В ряде случаев именно дефекты определяют интегральные механические свойства конденсированных материалов. Физика селективного взаимодействия короткоимпульсного лазерного излучения с неоднородными дефектными областями в наноматериалах является перспективным направлением исследований как в области физики конденсированного состояния, так и в области физического материаловедения наноструктурных материалов. Существуют материалы, интегральные физические свойства которых определяются состоянием отдельных областей, имеющих микро- и наноразмеры [1]. Выявление физического механизма селективного взаимодей-

ствия лазерного излучения с нано- и микродефектами позволяет создать технологии управления их состоянием без изменения структуры и свойств остального «бездефектного» материала.

Физические принципы селективного лазерного воздействия существенно зависят от оптических свойств твердого материала. Из истории исследований известно, что первые работы такого рода были проведены на оптически прозрачных материалах. Особенностью селективного лазерного воздействия на такие материалы является то, что при определенных условиях лазерное излучение может воздействовать преимущественно на дефектные области [2]. При этом лазерное излучение не влияет на остальной «бездефектный» материал, не меняет его структуру и свойства.

Воздействие мощных лазерных импульсов, как правило приводит к деградации свойств дефектных областей, и как следствие – материала в целом. Вместе с тем экспериментально определены параметры селективного воздействия лазерного излучения, когда возможен перевод дефектных областей в «неопасное» состояние. Механизм селективного лазерного воздействия (как на прозрачные, так и на непрозрачные материалы) связан с релаксацией механических напряжений, частичным/полным заживлением дефектов и пр. [3, 4].

Селективное лазерное воздействие на непрозрачные материалы (например, аморфно-нанокристаллические металлические сплавы) всегда лимитировано тонким поверхностным слоем. Изменения претерпевает, как правило, только поверхностный слой [5, 6], об этом свидетельствуют результаты экспериментальных исследований, посвященных изменению механических свойств поверхности наноструктурных металлических сплавов при воздействии короткоимпульсного лазерного излучения [7].

Для непрозрачных металлических сплавов были обнаружены эффекты одновременного увеличения твердости (на нано- и микроуровне), причем существенный рост твердости сопровождался увеличением пластических характеристик (например, стойкости к формированию трещин в условиях локального нагружения алмазной пирамидкой) [4]. Экспериментальные результаты были качественно описаны на основе представлений о возможности преимущественного воздействия импульсного прогрева и ударной волны на дефектные области.

Таким образом, работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию физики воздействия лазерного излучения и высокотемпературной плазмы на природу изменений физико-механических свойств аморфно-нанокристаллических материалов, характеризующихся высокой теплопроводностью и содержащих нанопоры в поверхностном слое.

1. Материалы и методы исследования

Исследование проводили на аморфно-нанокристаллическом металлическом сплаве $\text{Co}_{71.66}\text{V}_{4.73}\text{Fe}_{3.38}\text{Cr}_{3.14}\text{Si}_{17.09}$ [8]. Лазерная обработка осуществлялась с использованием лазерной установки LS-2134-E4 (ELS-03): частота следования импульсов $\nu = 1\text{--}100$ Гц, длина волны излучения $\lambda = 532$ нм, энергия одиночного импульса $E \approx 15\text{--}20$ мДж, длительность воздействия одиночного импульса $\tau \approx 15\text{--}20$ нс. Плотность мощности варьировали от $141 \cdot 10^{12}$ Вт/м² до $1273 \cdot 10^{12}$ Вт/м².

Существует несколько алгоритмов селективной лазерной обработки (методики описаны в [4, 8]). Все методики селективной лазерной обработки предусматривают возможность локального нагрева материала импульсами длительностью 15–20 нс. Скорости нагрева и охлаждения должны превышать $10^{-6}\text{--}10^{-7}$ К/с,

а энергия импульса должна обеспечивать формирование ударной волны. Отметим, что общая температура образца при селективной лазерной обработке повышалась не более чем на 10 К.

Поверхностный слой твердого материала всегда имеет более высокую плотность дефектов [9]. В случае аморфных металлов/сплавов это в первую очередь поры (плотность аморфных металлических сплавов всегда меньше за счет избыточного и структурно обусловленного свободного объема) [10]. Избыточную пористость могут иметь многие аморфно-нанокристаллические материалы, получаемые при контролируемом отжиге аморфных многокомпонентных металлических сплавов. В случае «традиционных» металлических сплавов поверхность также имеет повышенную плотность дефектов, состав которых существенно зависит от технологии изготовления образца и подготовки поверхности.

Идеальная нанопора, как физический объект, обладает рядом уникальных физико-механических свойств и с точки зрения физики селективного лазерного воздействия представляет особый интерес. В идеальной поре, имеющей форму шара, отсутствуют концентраторы механических напряжений. В рамках физической модели будем также считать, что нанопора обладает околонулевой теплопроводностью. Для нанопоры отсутствует теплообмен по механизму конвекции, а также фактически запрещен теплообмен за счет излучения. Это связано с тем, что при достаточно малых размерах нанопоры теплообмен может реализовываться только за счет высокоэнергетических фотонов.

Отметим также, что поры являются распространенными дефектами, встречающимися в аморфных и аморфно-нанокристаллических металлических сплавах, в материалах, изготовленных по лазерной аддитивной технологии, и пр. [11].

В модели использовали материал, непрозрачный на длине волны лазерного излучения. Воздействие лазерного импульса с указанными выше параметрами (см. подготовка и обработка образцов) 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, от которого прогревается объем 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 расчетной области) и физические параметры материала (коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость вещества), а также граничные условия.

Решение основано на использовании нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности [12] при отсутствии внутренних источников теплоты:

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

где $T(x, y, t)$ – температура тела, К, в точке $\{x, y\}$ в момент t ; ρ – плотность вещества, кг/м³; c – удельная теплоемкость вещества, Дж/(кг·К); k – коэффициент теплопроводности вещества, Вт/(м·К); G – расчетная область пространства, в пределах которой решается уравнение теплопроводности, отделенная от окружающей среды граничной поверхностью Γ . В уравнении (1) единственной зависимой переменной является температура T . Размерность пространства – $2D$.

Моделировали тепловое/лазерное воздействие на аморфно-нанокристаллический металлический сплав $\text{Co}_{71.66}\text{B}_{4.73}\text{Fe}_{3.38}\text{Cr}_{3.14}\text{Si}_{17.09}$. Скорость конвекции в направлении оси X и Y равна нулю. Тепловая мощность также равна нулю.

Начальные условия: температура в объеме тела и в области теплового воздействия 293.15 К и 1943 К соответственно. Использовали граничные условия первого рода, при которых температура поверхности совпадает с температурой материала, прилегающего к поверхности.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В данной работе анализировали распространение изотерм в «идеальном образце» без дефектов и распространение изотерм в образце с порами (рис. 1). Расстояние от поверхности до верхней поры 100 нм.

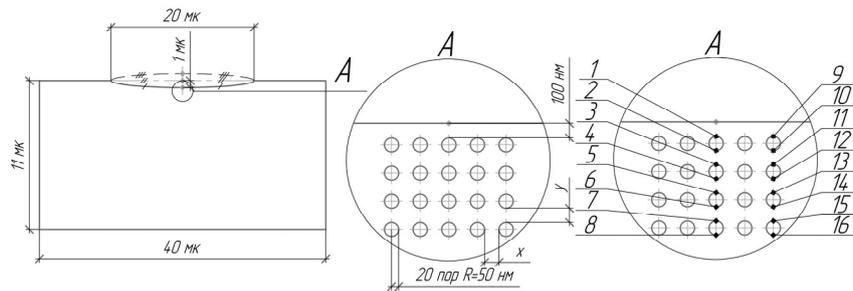


Рис. 1 – Модель образца с порами. Горизонтальные и вертикальные расстояния между границами пор 100 нм

Fig. 1 – Model of a sample with pores. Horizontal and vertical distances between pore boundaries are 100 nm

В результате компьютерного моделирования с использованием программного обеспечения (FEATool Multiphysics. (date of application 07.12.2022) <https://www.featool.com/>) установлено, что, прогрев материала перед вершиной верхней поры всегда происходит быстрее, чем в бездефектном материале. Одновременно прогрев материала под данной порой замедлен в сравнении с бездефектным материалом.

На рис. 2 показана специфика снижения температуры по мере увеличения расстояния S от поверхности образца (локальной области нагрева) вдоль четырех пор, расположенных по центру. Разрывами на графике зависимости обозначено местонахождение пор с околонулевой теплопроводностью. Разность температур у верхней и нижней границы поры может достигать 500 К на начальных этапах прогрева. По мере увеличения времени локального температурного воздействия свыше 100 нс разность температур составляет 300 К.

Искажается симметрия распределения изотерм по сравнению с бездефектным материалом (рис. 3).

Установлена зависимость разности температур в точках, расположенных над порами (точки 1, 3, 5, 7) и под порами (точки 2, 4, 6, 8), ориентированными вдоль линии, проведенной из вершины. Вычисляли температуру T_1 в материале, прилегающем к верхней точке поры (например, точка «1») и температуру в нижней точке поры (например, точка «2») для случая центрального расположения пор. Определяли разность температур $\Delta T_1 = T_1 - T_2$. Аналогично рассчитывали разность температур в данных точках для случая бездефектного материала $\Delta T_2 = T_1' - T_2'$. На основании данных расчетов определен дополнительный вклад пор в величину разницы температуры Δ между точками 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6, 7 и 8 (рис. 4). Разница температур Δ больше для материала с порами, чем для случая бездефектного материала (в данных условиях Δ всегда больше нуля).

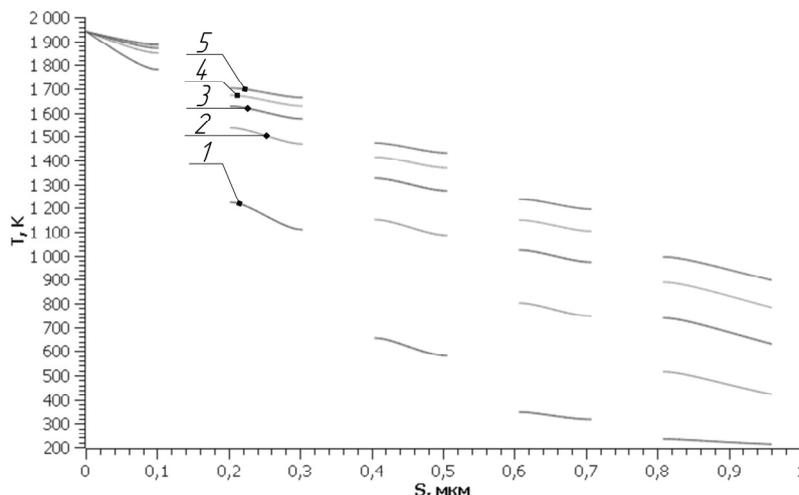


Рис. 2 – Изменения температуры на прямой вдоль четырех пор, расположенных по центру. S – расстояние до поверхности образца: кривая 1 – 10^{-8} с; 2 – $3 \cdot 10^{-8}$ с; 3 – $5 \cdot 10^{-8}$ с; 4 – $7 \cdot 10^{-8}$ с; 5 – $9 \cdot 10^{-8}$ с

Fig. 2 – Temperature changes in a straight line along four pores centered at the center. S – is distance to the surface of the sample: curve 1 – 10^{-8} s; 2 – $3 \cdot 10^{-8}$ s; 3 – $5 \cdot 10^{-8}$ s; 4 – $7 \cdot 10^{-8}$ s; 5 – $9 \cdot 10^{-8}$ s

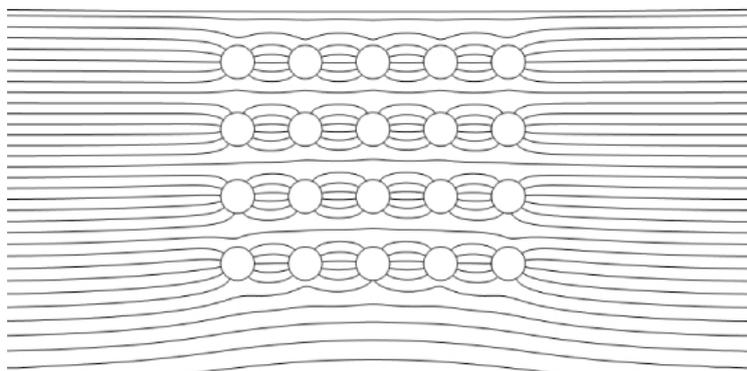


Рис. 3 – Результаты компьютерного моделирования распространения изотерм в образце

Fig. 3 – Results of computer modeling of isotherm propagation in the sample

Специфика распределения изотерм в окрестности пор существенно влияет на физику процесса частичного/полного залечивания таких дефектов при селективном лазерном воздействии. Перед верхней порой температура существенно выше, чем в бездефектном материале, а под порой ниже. В результате формируется специфическое распределение температуры, когда материал, расположенный над порой, нагрет до более высоких температур, чем материал под порой (рис. 2, 3).

Лазерное воздействие сопровождается формированием ударной волны с шокowym давлением 10^{10} Па. Это создает условие для движения нагретого материала в объем поры. Очевидно, что эффективность движения материала будет зависеть от длительности воздействия шокowego давления, характеристик нагретого материала (реологические параметры сплошной среды) и ряда других факторов.

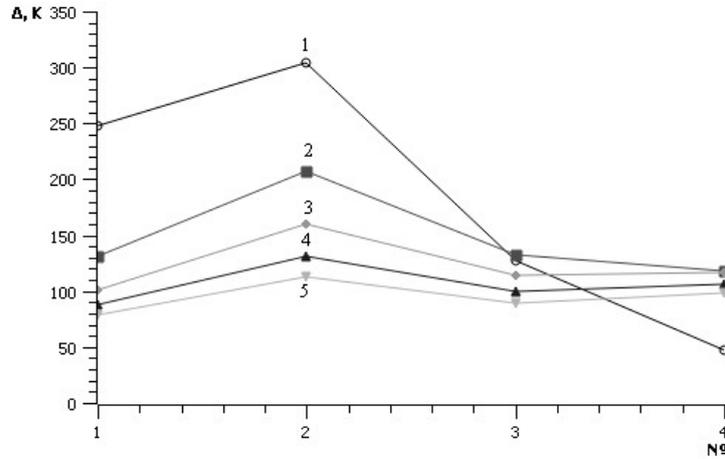


Рис. 4 – Относительная разница температур Δ для первой, второй, третьей и четвертой поры, $\Delta = \Delta T_1 - \Delta T_2$:

кривая 1 – 10^{-8} с; 2 – $3 \cdot 10^{-8}$ с; 3 – $5 \cdot 10^{-8}$ с; 4 – $7 \cdot 10^{-8}$ с; 5 – $9 \cdot 10^{-8}$ с

Fig. 4 – Relative temperature difference Δ for the first, second, third and fourth pore, $\Delta = \Delta T_1 - \Delta T_2$:

curve 1 – 10^{-8} s; 2 – $3 \cdot 10^{-8}$ s; 3 – $5 \cdot 10^{-8}$ s; 4 – $7 \cdot 10^{-8}$ s; 5 – $9 \cdot 10^{-8}$ s

Для всех пор, показанных на рис. 3, направление распространения импульса сжатия – вертикально вниз. Как следствие, можно ожидать движения пластичного нагретого материала в направлении поры. При этом с учетом разницы температур над и под порой может происходить ее заполнение нагретым материалом с последующей деформацией. С учетом предлагаемой модели (в поре отсутствуют газы) возможно ее полное схлопывание с заполнением всего пространства легкоподвижными компонентами металлического сплава.

Проведено моделирование процесса схлопывания пор под действием ударной нагрузки (FEATool Multiphysics (date of application 02.2023) <https://www.featool.com/>), с учетом распределения изотерм, показанного на рис. 3.

При моделировании пренебрегали упругой деформацией, поэтому использовали уравнения Леви–Мизеса. Так как задачу решали методом конечных элементов, использовали матричную форму записи:

$$\{\sigma'\} = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} [D] \{\dot{\epsilon}\}, \quad (2)$$

где $\{\sigma'\}$ – матрица-столбец (вектор) девиатора напряжений (3); $\bar{\sigma}$ – эффективное напряжение, $\bar{\epsilon}$ – эффективная скорость деформации (интенсивность скорости деформации); $[D]$ – матрица связи (4); $\{\dot{\epsilon}\}$ – матрица-столбец скоростей деформаций (5).

$$\{\sigma'\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} - \sigma_m \\ \sigma_{yy} - \sigma_m \\ \sigma_{zz} - \sigma_m \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где σ'_{ij} – девиатор напряжений; σ_m – средние напряжения,

$$[D] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\{\dot{\epsilon}\} = \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_{xx} \\ \dot{\epsilon}_{yy} \\ \dot{\epsilon}_{zz} \\ \dot{\epsilon}_{yz} \\ \dot{\epsilon}_{zx} \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

где $\dot{\epsilon}_{ij}$ – тензор скоростей деформаций.

Результат моделирования отдельных этапов заживления поры показан на рис. 5.



Рис. 5 – Основные стадии заживления исходной симметричной поры (верхняя центральная пора показанная на рис. 2) под действием сжимающей силы, инициированной лазерным импульсом/плазмой. Пора находится в поверхностном слое неравномерно нагретого материала (рис. 2–4)

Fig. 5 – Main stages of healing of the initial symmetrical pore (upper center pore, Fig. 2) under the action of a compressive force initiated by a laser pulse/plasma. The pore is located in the surface layer of the unevenly heated material (Fig. 2–4)

Разница температур ΔT_1 зависит от расстояния до поверхности образца. В общем случае распределение изотерм и величина ΔT_1 существенно зависят от места расположения пор. Очевидно, что в рамках предложенной модели чем больше температура материала и величина ΔT_1 , тем интенсивнее протекает процесс заживления поры. Кроме того, существенно, что для верхней поры совпадает направление распространения изотерм с направлением воздействия силы сжатия. Изотермы симметричны относительно данного направления.

Экспериментально установлено, что в результате селективной лазерной обработки наблюдается повышение микротвердости материала (рис. 6).

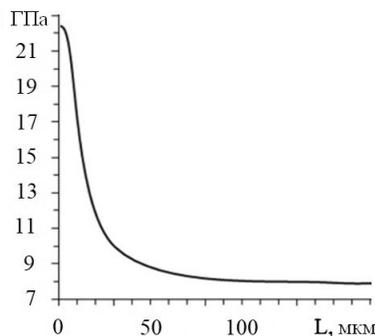


Рис. 6 – Зависимость микротвердости от расстояния L до границы лазерно обработанного участка нанокристаллического сплава $\text{Co}_{71.66}\text{B}_{4.73}\text{Fe}_{3.38}\text{Cr}_{3.14}\text{Si}_{17.09}$

Fig. 6 – Dependence of microhardness on the distance to the border of laser-treated area of nanocrystalline alloy $\text{Co}_{71.66}\text{B}_{4.73}\text{Fe}_{3.38}\text{Cr}_{3.14}\text{Si}_{17.09}$

Селективное воздействие лазерного импульса позволяет повышать прочностные характеристики аморфно-нанокристаллических металлических сплавов. Для аморфно-нанокристаллического сплава $\text{Co}_{71.66}\text{B}_{4.73}\text{Fe}_{3.38}\text{Cr}_{3.14}\text{Si}_{17.09}$ наблюдается рост микротвердости в 2–2,5 раза (рис. 6). Одновременно отмечено повышение пластических характеристик лазерно-обработанного участка. Подробно явление симультанного увеличения микротвердости и вязкости микроразрушения описано в работе [2].

Полученные в данной работе результаты позволяют описать физический механизм залечивания дефектов и пор, а также необходимость нескольких последовательных воздействий лазерных импульсов. Так, действие первых лазерных импульсов реализует селективное залечивание пор, расположенных ближе всего к поверхности. Последующее воздействие импульсов приводит к залечиванию пор, расположенных глубже. Однако эффективность залечивания пор сильно снижается по мере удаления их от поверхности из-за снижения температуры, в том числе разницы температур в верхней и нижней точках поры. Отметим также, что результат продвижения изотерм зависит от относительного расположения остальных пор. Полученные в данной работе результаты позволяют непротиворечиво объяснить экспериментальные наработки, а также предложить физическую модель селективного лазерного воздействия на нанопоры в поверхностном слое металла, при котором возможно их полное или частичное залечивание.

Заключение

1. Теоретически и экспериментально исследована физика воздействия лазерного излучения и высокотемпературной лазерной плазмы на изменения механических свойств аморфно-нанокристаллических материалов, содержащих нанопоры в тонком поверхностном слое. Предложен физический механизм селективного воздействия лазерных импульсов длительностью порядка 20 нс и энергией 15–20 мДж на нанопоры, расположенные в поверхностном слое материала. Селективное воздействие обеспечивается дополнительным прогревом материала, расположенного над нанопорой, и ее «залечивания» за счет движения нагретого материала в объем поры под действием шокового давления.

2. Экспериментально установлены изменения механических свойств поверхности конденсированных материалов после кратковременного пребывания в экстремальном состоянии, вызванном воздействием сильного сжатия и высокой температуры. При этом рост нанотвердости лазерно обработанной поверхности сопровождается увеличением ее стойкости к растрескиванию при локальном нагружении пирамидкой Виккерса. На необработанной поверхности математическое ожидание вероятности формирования трещин при локальном нагружении

составляет 0,55 при нагрузке 0,49 Н, на лазерно обработанных участках трещин при нагрузке 0,49 Н не фиксировали.

3. Физика избирательного лазерного инициирования процессов деформирования и залечивания на наноуровне определяется спецификой распространения изотерм и ударным сжатием материала, на которые влияет конфигурация нанопор. Полученные теоретические результаты и предложенная физическая модель селективного залечивания нанопор позволяют непротиворечиво объяснить имеющиеся экспериментальные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Абросимова Г.Е., Аронин А.С.** Морфология поверхности деформированных аморфно-нанокристаллических материалов и образование нанокристаллов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2018. – № 5. – С. 91–97. – DOI: 10.7868/S0207352818050116.
2. **Ушаков И.В., Батомункуев А.Ю.** Моделирование комплекса процессов, протекающих в поверхностных слоях наноструктурного многокомпонентного металлического сплава под действием лазерных импульсов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21, № 1. – С. 165–170. – DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-1-165-170.
3. Физика воздействия высокотемпературного импульсного нагрева на дефекты в поверхностном слое металлического сплава / И.В. Ушаков, И.С. Сафронов, А.Д. Ошоров, Z. Wang, Д.Ю. Мупрмцев // *Металлург.* – 2023. – № 7. – С. 74–79.
4. **Ушаков И.В., Сафронов И.С.** Влияние лазерной обработки на микротвердость и особенности разрушения тонких лент аморфнонанокристаллического металлического сплава // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – № 2. – С. 11–15.
5. **Капуткин Д.Е., Дураджи В.Н., Капуткина Н.А.** Ускоренное диффузионное насыщение поверхности металлов при электро-химико-термической обработке // Физика и химия обработки материалов. – 2020. – № 2. – С. 48–57. – DOI: 10.30791/0015-3214-2020-2-48-57.
6. **Kaputkina L.M., Kaputkin D.E.** Structure and phase transformations under quenching and tempering during heat and thermomechanical treatment of steels // *Materials Science Forum.* – 2003. – Vol. 426–432. – P. 1119–1126. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.426-432.1119.
7. Crack-free Fe-based amorphous coating synthesized by laser cladding / Y. Lu, G. Huang, Y. Wang, H. Li, Z. Qin, X. Lu // *Materials Letters.* – 2018. – Vol. 210. – P. 46–50. – DOI: 10.1016/j.matlet.2017.08.125.
8. **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.
9. **Sohrabi N., Jhabvala J., Logé R.E.** Additive manufacturing of bulk metallic glasses – process, challenges and properties: a review // *Metals.* – 2021. – Vol. 11 (8). – P. 1279. – DOI: 10.3390/met11081279.
10. Влияние термобарического воздействия на нанопористость и свойства аморфных сплавов / В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, Т.В. Ларионова, М.В. Нарыкова // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2014. – № 10 (712). – С. 38–42.
11. Selective laser melting of aluminum and its alloys / Z. Wang, R. Ummethala, N. Singh, S. Tang, C. Suryanarayana, J. Eckert, K.G. Prashanth // *Materials.* – 2020. – Vol. 13 (20). – P. 4564. – DOI: 10.3390/ma13204564.
12. **Gladkov S.O., Bogdanova S.B.** On the theory of nonlinear thermal conductivity // *Technical Physics.* – 2016. – Vol. 61 (2). – P. 157–164. – DOI: 10.1134/S1063784216020110.

**PHYSICS OF NANOPORE HEALING IN CONDENSED MATTER
UNDER THE INFLUENCE OF LASER RADIATION AND HIGH-
TEMPERATURE PLASMA**

Ushakov I.V., Safronov I.S., Oshorov A.D.

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

The paper theoretically and experimentally investigates the influence of laser radiation and high-temperature plasma on changes in the physical properties of amorphous-nanocrystalline materials with nanopores in a thin surface layer. At present, the possibility of simultaneous increase of hardness and resistance to cracking of the material surface because of selective laser action has been experimentally established. Experimental results can be explained based on the model of selective impact of laser radiation on individual nanopores. The physics of laser selective initiation of healing processes of inhomogeneous/defective areas at the nanoscale has been investigated. Using the proposed physical model, the specificity of selective heating of areas near nanopores, as well as the influence of nanoscale defects in the structure on the specificity of isotherm propagation has also been revealed. The process of healing of nanopores located in the inhomogeneously heated surface layer of the material under the action of shock loading is considered. Theoretical results are compared with experimental data. It is shown that as a result of selective laser treatment it is possible to increase microhardness by three-four times, with simultaneous growth of resistance to cracking under conditions of local loading by the Vickers pyramid. The results obtained can be explained within the framework of ideas about selective laser healing of nano- and micro-sized defects located in the surface layer of the material. Thus, the physical and mechanical properties of the surface of condensed materials in an extreme state caused by strong compression under conditions of simultaneous short-term heating to high temperatures have been studied theoretically and experimentally.

Keywords: condensed state physics, selective laser impact, physics of nanopore healing, microhardness, physical model.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-7-18

REFERENCES

1. Abrosimova G. E., Aronin A. S. Morfologiya poverkhnosti deformirovannykh amorfno-nanokristallicheskikh materialov i obrazovanie nanokristallov Poverkhnost' [Surface morphology of deformed amorphous-nanocrystalline materials and formation of nanocrystals]. *Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniia = Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2018, no. 5, pp. 91–97. DOI: 10.7868/S0207352818050116.
2. Ushakov I.V., Batomunkuev A.Yu. Modelirovanie kompleksa protsessov, protekayushchikh v poverkhnostnykh sloyakh nanostrukturnogo mnogokomponentnogo metallichesкого сплава pod deistviem lazernykh impul'sov [Modelling of complex processes in surface layers of nanostructural many component metallic alloy irradiated by laser impulses]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2016, vol. 21, no. 1, pp. 165–170. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-1-165-170.
3. Ushakov I.V., Safronov I.S., Oshorov A.D., Wang Z., Muprmtsev D.Yu. Fizika vozdeistviya vysokotemperaturnogo impul'snogo nagreva na defekty v poverkhnostnom sloe metallichesкого сплава [Physics of the effect of high-temperature pulse heating on defects in the surface layer of a metal alloy] *Metallurg = Metallurgist*, 2023, no. 7, pp. 74–79. (In Russian).
4. Ushakov I.V., Safronov I.S. Vliyanie lazernoї obrabotki na mikrotverdost' i osobennosti razrusheniya tonkikh lent amorfnonanokristallicheskogo metallichesкого сплава [Effect of laser treatment on microhardness and fracture features of thin ribbons of amorphous-nanocrystalline metal alloys]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2013, no. 2, pp. 11–15.

5. Kaputkin D.E., Duradji V.N., Kaputkina N.A. Uskorennoe diffuzionnoe nasyshchenie poverkhnosti metallov pri elektro-khimiko-termicheskoi obrabotke [Accelerated diffusion saturation of metal surface during electrochemical heat treatment]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2020, no. 2, pp. 48–57. DOI: 10.30791/0015-3214-2020-2-48-57.
6. Kaputkina L.M., Kaputkin D.E. Structure and phase transformations under quenching and tempering during heat and thermomechanical treatment of steels. *Materials Science Forum*, 2003, vol. 426–432, pp. 1119–1126. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.426-432.1119.
7. Lu Y., Huang G., Wang Y., Li H., Qin Z., Lu X. Crack-free Fe-based amorphous coating synthesized by laser cladding. *Materials Letters*, 2018, vol. 210, pp. 46–50. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.08.125.
8. Simonov Yu.V., Ushakov I.V. . Mekhanicheskie svoystva poverkhnostnykh struktur titanovogo splava VT9 posle mnogokratnoi lokal'noi obrabotki nanosekundnymi lazernymi impul'sami [Mechanical properties of surface structures of titanium alloy BT9 after multiple local processing by nanosecond laser pulses]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika = Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2020, no. 2, pp. 19–35. DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-19-35.
9. Sohrabi N., Jhabvala J., Logé R.E. Additive manufacturing of bulk metallic glasses – process, challenges and properties: a review. *Metals*, 2021, vol. 11 (8), pp. 1279. DOI: 10.3390/met11081279.
10. Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Larionova T.V., Narykova M.V. Vliyanie termobaricheskogo vozdeistviya na nanoporistost' i svoystva amorfnykh splavov [Effect of thermobaric treatment on the nanoporosity and properties of amorphous alloys]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2014, no. 10 (712), pp. 38–42. (In Russian).
11. Wang Z., Ummethala R., Singh N., Tang S., Suryanarayana C., Eckert J., Prashanth K.G. Selective laser melting of aluminum and its alloys. *Materials*, 2020, vol. 13 (20), p. 4564. DOI: 10.3390/ma13204564.
12. Gladkov S.O., Bogdanova S.B. On the theory of nonlinear thermal conductivity. *Technical Physics*, 2016, vol. 61 (2), pp. 157–164. DOI: 10.1134/S1063784216020110.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Ушаков Иван Владимирович – родился в 1972 году, д-р техн. наук, профессор кафедры физики НИТУ МИСИС, действительный член Российской академии естественных наук. Область научных интересов: формирование свойств твердых материалов селективной лазерной обработкой неоднородных нано- и микромасштабных областей. Опубликовано 260 научных работ. (Адрес: 119049, Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1. E-mail: ushakoviv@mail.ru).

Ushakov Ivan Vladimirovich (b. 1972) – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the Physics Department NUST MISIS, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences. His research interests are currently focused on formation of properties of solid materials by selective laser treatment of inhomogeneous nano- and micro-scale regions. He is the author of 260 scientific papers. (Address: 4, Leninskiy Av., NUST MISIS, Moscow, 119049, Russia. E-mail: ushakoviv@mail.ru).



Сафронов Иван Сергеевич – родился в 1989 году, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики НИТУ МИСИС. Область научных интересов: формирование физико-механических свойств аморфных и нанокристаллических металлических сплавов селективной лазерной обработкой; физико-химические свойства поверхности твердых материалов на границе различных сред. Опубликовано более 40 научных работ. (Адрес 119049, Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1. E-mail: issafronov@yandex.ru).

Safronov Ivan Sergeevich (b. 1989) – Candidate of Sciences (Phys.&Math.), associate professor at the Physics Department, NUST MISIS. His research interests include formation of physical and mechanical properties of amorphous and nanocrystalline metal alloys by selective laser treatment; physical and mechanical properties of the surface of solid materials at the boundary of various media, as well as amorphous and nanostructured materials, including the study of new substances, the development of materials and nanomaterials with specified properties and functions. He is the author of 40 scientific papers. (Address: 4, Leninskiy Av., NUST MISIS, Moscow, 119049, Russia. E-mail: issafronov@yandex.ru).



Ошоров Аюр Дашеевич – родился в 1996 году, аспирант, ассистент кафедры физики, НИТУ МИСИС. Область научных интересов: металлические сплавы, механические свойства аморфных, аморфно-нанокристаллических металлов и композиционных материалов на их основе. Опубликовано 15 научных работ. (Адрес: 119049, Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1.. E-mail: oshorovayur@gmail.com).

Oshorov Ayur Dashevich (b. 1996) – Master of Science, assistant professor at the Physics Department, NUST MISIS. His research interests are currently focused on metal alloys, mechanical properties of amorphous, amorphous-nanocrystalline metals and composite materials on their basis. He is the author of 15 scientific papers. (Address: 4, Leninskiy Av., NUST MISIS, Moscow, 119049, Russia. E-mail: oshorovayur@gmail.com).

*Статья поступила 21 октября 2023 г.
Received October 21, 2023*

To Reference:

Ushakov I.V., Safronov I.S., Oshorov A.D. Fizika zalechivaniya nanopor v kondensirovannom veshchestve v usloviyakh voz-deistviya lazernogo izlucheniya i vysokotemperaturnoi plazmy [Physics of nanopore healing in condensed matter under the influence of laser radiation and high-temperature plasma]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 1 (62), pp. 7–18. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-7-18.