

тому кристаллизацией. Такой материал обладает повышенными свойствами по сравнению с материалом, полученным в условиях твердофазного спекания. Взаимодействие концен-трированного светового излучения с материалами основано на поглощениях энергии излучения на дефектах структуры на границах зерен. Количество границ зависит от дисперсности материала. Чем мельче зерно, тем больше количество границ между ними.

Так, материал с мелкими зернами будет интенсивнее поглощать энергию светового излучения и нагреваться. Малый размер зерен обуславливает большую развитость и протяженность межзеренных границ [4–6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вышеописанные особенности солнечных технологий обуславливают экономический эффект от применения плавного на Большой Солнечной Печи материала в производстве ситалловых изделий. Расчеты показывают, что удельный расход электроэнергии традиционного стекловарения составляет порядка 1,6 кВт*час/кг. Для получения 100 кг стекла тратится 160 кВт *час электрической энергии. А удельный расход электроэнергии при работе солнечной печи составляет 12 кВт*час. За один солнечный день на можно плавить базальтовые отходы в количестве до 500 кг, при расходе электрической энергии 50 кВт*час. Разница в расходе электрической энергии традиционной и солнечной печей составляет в 15 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. R.Y.Akbarov, M.S.Paizullakhanov. Characteristic features of the energy modes of a large solar furnace with a capacity of 1000 kW// Applied Solar Energy 54 (2), 99-109.
2. Pasichny V.V. [et al.] // Study of the process of processing the pseudo-alloy W-Cu (5%) in a solar furnace. // Electrical contacts and electrodes. 2006. С. 272-277.
3. MS Paizullakhanov [et al.] // Synthesis features of barium titanate in the field of concentrated light energy //Applied Solar Energy 49 (4), 248-250.
4. IG Atabaev [et al.] // High-strength glass-ceramic materials synthesized in a large solar furnace// Applied Solar Energy 51 (3), 202-205.
5. TT Riskiev [et al.] // The effects of the solar radiant flux density on the properties of pyroceramic materials//Applied Solar Energy 50 (4), 260-264.
6. Nanostructure Materials for Solar Energy Conversion.// Edited by Tetsuo Soga. Amsterdam.: Elsevier B.V. 2006. -600p.

МОДИФИКАЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕДИ ПРИ ЕЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

С. В. Васильев, А. Ю. Иванов, А. Л. Ситкевич

*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, ул. Ожешко, 22,
230023 Гродно, Беларусь, e-mail: ion_ne@mail.ru*

Методом рентгеновской дифрактометрии обнаружено изменение кристаллической структуры меди в зоне воздействия на ее поверхность лазерного излучения с плотностью потока 10^4 – 10^5 Вт/см². Показано, что при действии лазерного излучения на поверхности металлических образцов их кристаллическая структура меняется в облученной зоне с кубической гранецентрированной на искаженную (имеющую

форму параллелепипеда, отличную от куба). При этом формировался приповерхностный слой с повышенной микротвердостью.

Ключевые слова: лазерное излучение; рентгеновская дифрактометрия; изменение кристаллической структуры; корреляционная функция.

CRISTALLINE SURFACE MODIFICATION IN COPPER DURING ITS LASER TREATING

S. V. Vasiliev, A. Yu. Ivanov, A. L. Sitkevich

*Grodno State University named after Yanka Kupala, Ozheshko str. 22 230023 Grodno, Belarus
Corresponding author: A. Yu. Ivanov (ion_ne@mail.ru)*

A change in the crystal structure of copper in the zone of exposure to laser radiation with a flux density of 10^4 – 10^5 W/cm² was detected by X-ray diffractometry. It is shown under the action of laser radiation on the surface of metal samples, their crystal structure changes in the irradiated zone from cubic face-centered to distorted (having a parallelepiped shape different from the cube). Increase of hardness as well as structure near-surface layer have been observed.

Key words: laser radiation; X-ray diffractometry; changes in the crystal structure; correlation function.

ВВЕДЕНИЕ

В наши дни технологиям лазерной обработки уделяется повышенное внимание, поскольку они являются эффективными, а главное, результативными методами. Сфера ее применения очень широка: поверхностное упрочнение металлов, микрообработка материалов, модификация свойств и поверхности, лазерная резка и сварка и т.д. При этом наблюдается четко выраженное изменение ряда физических свойств материалов. Объяснения таких изменений следует искать в особенностях протекания процесса лазерной обработки вещества. В связи с этим возникает необходимость в изучении процессов, протекающих при лазерной обработке твердого тела.

Целью данной работы является изучение изменения структуры ряда металлов, подвергшихся воздействию лазерного излучения (ЛИ) с плотностью потока 10^4 – 10^5 Вт/см², а также объяснение обнаруженных структурных изменений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Схема использовавшейся в работе экспериментальной установки приведена на рисунке 1. Цифрой «1» обозначен источник лазерного излучения (ЛИ) – рубиновый лазер ГОР–100 М (с длиной волны $\lambda = 0,694$ мкм) работающий в режиме свободной генерации (длительность импульса $\tau \sim 1,2$ мс). Цифрой «2» обозначена фокусирующая система, пройдя через которую, ЛИ направлялось на образец 3. В качестве фокусирующих использовались как однолинзовые, так и двухлинзовые системы, что позволяло строить изображение диафрагмы 4 на поверхности образца 3 в виде пятна с резкими краями (диаметр варьировался в ходе экспериментов от 1 до 2 мм), что, в свою очередь, обеспечивало изменение плотности потока излучения q от 10^4 до 10^6 Вт/см². Часть ($\sim 4\%$) ЛИ направлялась передней гранью стеклянного клина 5 в

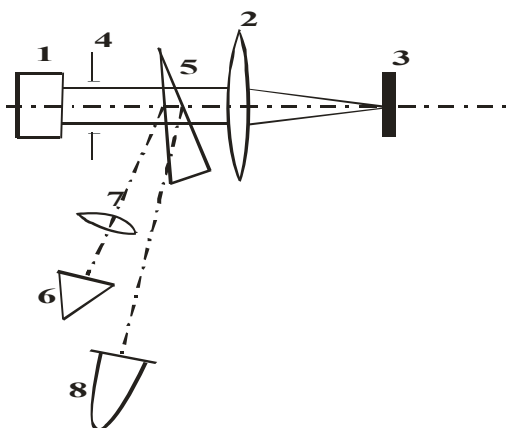


Рисунок 1. – Схема экспериментальной установки

измеритель энергии ИМО-2Н 6, входной зрачок которого был расположен в фокальной плоскости линзы 7. Энергия лазерных импульсов E_0 варьировалась в пределах от 5 до 60 Дж. Отраженное задней гранью клина излучение направлялось на коаксиальный фотоземлет ФЭК-14 8, сигнал с которого подавался на вход осциллографа С8-13, и использовался для регистрации временной формы лазерного импульса.

Для определения структурных изменений образцов из металла

(сплошные поликристаллические), в равновесном состоянии имеющих кубическую гранецентрированную кристаллическую решетку, до и после воздействия лазерного излучения, использовался рентгеновский дифрактометр ДРОН-2.0. В дифрактометре использовалось излучение линии K_{α} от трубки с медным антикатодом, фильтрованное никелевым стандартным фильтром на длине волны 154,050 пм.

При взаимодействии лазерного излучения с веществом может произойти целый ряд изменений в обрабатываемом образце: кристаллохимические превращения, способные привести к изменению химического свойства вещества; фазовые переходы; появление дефектов новых типов и увеличение концентрации уже существующих; изменение свойств межкуристаллических областей.

Рассмотрим действие лазерного излучения с указанными выше параметрами на медный образец (Cu). Поскольку медь относится к кубической сингонии и ее ячейка не имеет других фаз, кроме той, что описывается группой $Fm\bar{3}m$, можно сказать, что первые два механизма изменений в данном случае не способны привести к изменениям, которые можно было бы зарегистрировать методами рентгеновской дифрактометрии. Кроме того, в нашем случае энергии лазерного излучения недостаточно для ионизации остова, и, следовательно, ни межъядерные расстояния, ни энергия Ферми не изменяются. Значит, необходимо выяснить, влияет ли облучение на дефектность структуры кристалла меди.

В таблице приведены теоретические и экспериментальные значения межатомных расстояний (a), координационное число (K) и полуширины максимумов (Δ) на экспериментальных кривых корреляционных функций для медного образца.

Приведенные в таблице экспериментальные значения показывают, что лазерная обработка приводит к изменению интенсивности рефлексов, их положения и профилей. Причем эти изменения значительно превышают погрешности эксперимента. Кроме того, было зафиксировано, что при локальном кратковременном нагреве и быстром охлаждении в образце возникают механические напряжения, которые приводят к изменению кристаллической структуры металла в облученной области с кубической гранецентрированной на тетрагональную, что и объясняет значительное (до 30 %) увеличение микротвердости поверхности металла.

**Параметры корреляционных функций медного образца
до и после лазерного облучения с $q \sim 5 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$**

№ п/п	Георетические значения		Необлученный образец			Облученный образец		
	a, Å	K	a, Å	Δ , Å	K	a, Å	Δ , Å	K
1	2,550	12	2,58	0,7	13	2,48 2,60	1,2	6 6
2	4,416	24	4,50	0,5	26	4,50	1,0	24
3	5,100	12	–	–	–	–	–	–
4	5,702	24	5,75	0,6	36	5,82	0,3	36
5	6,246	8	6,40	0,3	5	–	–	–
6	6,746	48	6,80	0,3	45	6,50	0,8	52

Как видно из рисунка 2, для облученных образцов меди при $q \sim 5 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ наблюдается не только размытие, но и расщепление первого максимума распределения $P(u)$ – самосвертки функции

электронной плотности

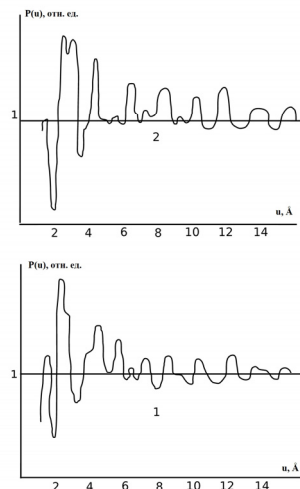
$$P(\vec{u}) = \frac{1}{V_{11}} \int \rho(\vec{r}) \rho(\vec{r} - \vec{u}) d\vec{r}.$$

Это свидетельствует о том, что после лазерной обработки кристаллическая структура действительно трансформируется, как говорилось выше. Стоит также отметить, что при плотностях потока ЛИ, достаточных для плавления металла в зоне обработки ($q > 10^6 \text{ Вт/см}^2$) изменение дифрактограмм не наблюдалось, а микротвердость немного уменьшалась.

Рассмотрение высоты и формы первого максимума корреляционных функций до и после облучения, приводит к выводу, что трансформации подвержено 83% ячеек. Как мы увидим далее, эти данные хорошо согласуются с результатами расчетов.

РАСЧЕТ ДОЛИ ЯЧЕЕК, ИЗМЕНИВШИХ СВОЮ ГЕОМЕТРИЮ

Для начала рассмотрим изменение кристаллической структуры медного образца при его обработке излучением лазера ГОР-100 М с плотностью потока $q \sim 5 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$. Прежде всего необходимо выяснить, какое количество элементарных ячеек находилось в зоне облучения в ходе эксперимента. Для этого надо знать объем образца и объем одной ячейки. Поскольку кристалл меди относится к пространственной группе $Fm\bar{3}m$ и обладает кубической гранецентрированной (ГЦК) элементарной ячейкой, т.е. описывается одним параметром $a = b = c$ ($\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$), то объем ячейки до обработки можно считать равным:



**Рисунок 2. – Корреляционные функции $P(u)$
для медных образцов (1) – до облучения,
(2) – после лазерного облучения**

$$V_{\text{cell}} = a^3 = (3,597 \cdot 10^{-10} \text{ м})^3 = 4,65 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3.$$

Для расчета объема образца необходимо принять во внимание следующие факты. Во-первых, используемое в ходе эксперимента лазерное излучение не может проникнуть вглубь медного образца на глубину, превышающую длину волны. Во-вторых, по ширине лазерное излучение не может выйти за границы пятна фокусировки. Поэтому в качестве подвергаемого обработке объекта будем рассматривать цилиндр с высотой, равной длине волны рубинового лазера ($h = \lambda = 0,694 \text{ мкм}$), и диаметром, равным диаметру пятна фокусировки ($d = 2 \text{ мм}$). В таком случае объем образца можно найти следующим образом:

$$V_{\text{Cu}} = \frac{\pi d^2}{4} \lambda = 2,17 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3.$$

Таким образом, можем определить число ячеек, приходящихся на исследуемый объем:

$$N_{\text{cell}} = \frac{V_{\text{Cu}}}{V_{\text{cell}}} = 4,65 \cdot 10^{16} \text{ ячеек}.$$

На втором этапе необходимо определить, сколько ячеек смогло бы трансформироваться в параллелепипеды, если бы вся энергия воздействующего пучка тратилась на разрушение ячейки.

Для начала определим энергию кристаллической решетки в основном состоянии. Квантовый расчет энергии связи частиц металла представляет одну из наиболее трудных задач теории твердого тела. В настоящее время неизвестно строгое решение этой задачи ни в классической, ни в квантовой механике даже в случае трех тел. Однако существуют приближенные методы расчета (метод Габера, метод Вингера и Зейтца и др.) [1], при чем расчеты энергии хорошо согласуются между собой. Учитывая, что в кристаллах меди реализуется металлический тип химической связи, можно сказать, что кристалл меди состоит из решетки положительных ионов, которые погружены в электронную жидкость (газ). В таком случае энергию сцепления можно рассчитать с помощью методов, используемых при расчете сцепления ионных кристаллов. Как известно, энергия кристаллической решетки характеризует количество энергии, которое необходимо затратить для разрушения кристаллической решетки на составные части и удаления их друг от друга на бесконечно большое расстояние, то есть на преодоление сил притяжения. Таким образом получим:

$$E_{\text{cell}} = \frac{3}{5} E_F = \frac{3}{5} \frac{\hbar^2}{2m_e} \left(\frac{3\pi^2 \rho N_A}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} = 4,14 \text{ эВ}.$$

где E_F – энергия Ферми, \hbar – постоянная Планка, m_e – масса электрона, ρ – плотность меди, N_A – постоянная Авагадро, μ – молярная масса меди.

Определим число ячеек, способных изменить кристаллическую структуру в облученной области с кубической гранецентрированной на тетрагональную:

$$N_{\text{trans}} = \frac{E_{\text{abs}}}{E_{\text{cell}}} = \frac{3,12 \cdot 10^{19}}{4,14} = 7,53 \cdot 10^{18} \text{ ячеек},$$

где E_{abs} – поглощенная энергия (5 Дж).

Однако следует учесть, что не вся энергия лазерного пучка поглощается. Часть отражается, преломляется и рассеивается, и лишь оставшаяся энергия (~0,5 %) проникает внутрь образца, поглощается и переходит в тепло. Таким образом, реальное число ячеек, способных изменить кристаллическую структуру будет порядка $3,77 \cdot 10^{16}$ ячеек, что составляет 81% от общего числа ячеек. Данный результат хорошо согласуется с полученным при анализе корреляционных функций (рисунок 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что при действии лазерного излучения на поверхность медного образца кристаллическая структура меди меняется в облученной зоне с равновесной на искаженную (имеющую форму параллелепипеда, отличную от куба). Получено хорошее согласие рассчитанных и полученных в ходе экспериментальных исследований результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Жданов, Г. С. Лекции по физике твердого тела: Принципы строения, реальная структура, фазовые превращения / Г. С. Жданов, А. Г. Хунджуа. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 231 с.

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ДВУХ ОЧАГОВ ЛАЗЕРНОГО РАЗРУШЕНИЯ В ПРОЗРАЧНОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ

С. В. Васильев, А. Ю. Иванов, Е. О. Семенчук, А. Л. Ситкевич

*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, ул. Ожешко,
22, 230023 Гродно, Беларусь, e-mail: ion_ne@mail.ru*

Описана модель нагруженной области, излучающей волны в упругую среду, которая удовлетворительно описывает генерацию акустических волн при лазерном пробое, произошедшем в уединенной зоне (каверне) в объеме прозрачного диэлектрика. Проведен расчет параметров акустической эмиссии каверны при условии существования второй эмитирующей упругие волны каверны. Показано, что каверны генерируют упругие колебания подобно 2-м связанным осцилляторам. Поэтому в ходе акустической эмиссии двух каверн возможно наблюдение всех эффектов, характерных для связанных осцилляторов.

Ключевые слова: импульсное лазерное излучение; лазерный пробой; зона лазерного разрушения; каверна; продольные упругие волны; биения.

ACOUSTIC EMISSION OF TWO LASER DESTRUCTION CENTERS IN TRANSPARENT DIELECTRIC

S. V. Vasiliev, A. Yu. Ivanov, E. O. Semenchuk, A. L. Sitkevich

*Grodno State University named after Yanka Kupala, Ozheshko str. 22 230023 Grodno, Belarus
Corresponding author: A. Yu. Ivanov (ion_ne@mail.ru)*

A model of a loaded region emitting waves into an elastic medium, which satisfactorily describes the generation of acoustic waves during laser breakdown that occurred in a se-