

# Трансформация структуры титана в ходе его лазерной обработки

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

*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь;  
e-mail: ion\_ne@mail.ru*

Методом рентгеновской дифрактометрии обнаружено изменение кристаллической структуры титана в зоне воздействия на его поверхность лазерного излучения с плотностью потока  $10^4 - 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Показано, что при воздействии лазерного излучения на поверхность титановых образцов их кристаллическая структура меняется в облученной зоне с равновесной на искаженную. Сделано предположение о связи обнаруженного эффекта с возникновением значительных микронапряжений в зоне быстрого нагревания металла. Проведен расчет количества элементарных ячеек, подвергшихся пространственной трансформации в ходе лазерного воздействия. Получено хорошее согласие рассчитанных и полученных в ходе экспериментальных исследований результатов. Обнаруженный эффект может быть связан с анизотропностью теплового расширения металла. Эффект может усиливаться внутренним напряжением в облученной зоне в ходе формирования в металлическом образце акустических волн.

**Ключевые слова:** импульсное лазерное излучение, рентгеновская дифрактометрия, титан, изменение кристаллической структуры, микротвердость.

## Введение

На сегодняшний день лазерные технологии широко проникли в нашу жизнь, поскольку они являются эффективными, а главное, результативными методами. При этом наблюдается четко выраженное изменение ряда физических свойств материалов. Например, при лазерной обработке многих металлов их твердость может увеличиваться более чем на 30 %. Объяснения таких изменений следует искать в особенностях протекания процесса лазерной обработки вещества. Следует, однако, отметить, что механизмы указанного воздействия лазерного излучения на вещество еще недостаточно изучены. В связи с этим возникает необходимость в изучении процессов, протекающих при лазерной обработке твердого тела.

Целью данной работы является изучение изменения структуры образцов из титана, подвергшихся воздействию лазерного излучения (ЛИ) с плотностью потока  $10^4 - 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, а также объяснение обнаруженных структурных изменений.

## Методика исследований и экспериментальная установка

Схема использовавшейся в работе экспериментальной установки приведена на рис. 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/см<sup>2</sup>. Часть ( $\sim 4$  %) ЛИ направлялась передней гранью стеклянного клина 5 в 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 фотоэлемент ФЭК-14 8, сигнал с которого подавался на вход осциллографа С8-13, и использовался для регистрации временной формы лазерного импульса.

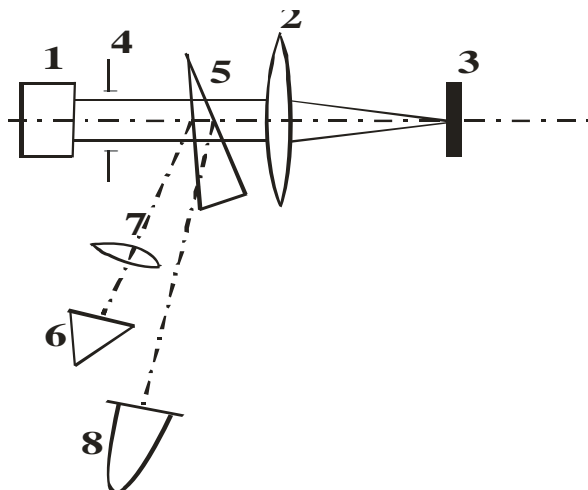


Рис. 1. – Схема экспериментальной установки.

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  $K_{\alpha}$  от трубки с медным антикатодом, фильтрованное никелевым стандартным фильтром на длине волны 154,050 нм.

### Обсуждение результатов.

Рассмотрим воздействие излучения лазера ГОР-100 М с плотностью потока  $q \sim 5 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> на титановый образец ( $\alpha$ -Ti). Известно, что, как правило, титан может существовать в двух кристаллических структурах:  $\alpha$ -Ti и  $\beta$ -Ti. Если титан кристаллизуется при низких температурах (комнатная температура), образуется гексагональная плотноупакованная (ГПУ) структура  $\alpha$ -Ti. Если же он кристаллизуется при высоких температурах, формируется объемно-центрированная кубическая (ОЦК) структура  $\beta$ -Ti. Полное преобразование кристаллической структуры из одной в другую происходит при температуре  $882 \pm 2$  °С. Поскольку до начала лазерного воздействия температура облучаемого образца была комнатной, будем рассматривать лазерную обработку мишени из  $\alpha$ -Ti.

На рис. 2 представлены рентгенограммы образца до и после его обработки, из которых видно, что после лазерной обработки наблюдается изменение интенсивности рефлексов, их положения и профилей. Например, практически исчез рефлекс 103.

Как известно, каждый максимум интенсивности на рентгенограмме – это результат отражения рентгеновского излучения  $n$ -го порядка от серии плоскостей (hkl) с межплоскостным расстоянием  $d_{hkl}$ , соответствующим углу скольжения  $\vartheta$ . Прежде всего определяем положение максимумов интенсивности сигнала на рентгенограмме и соответствующие им значения углов  $2\vartheta$ . Уравнение Вульфа-

Брэгга однозначно устанавливает связь между  $d_{hkl}$  и длиной волны характеристического излучения, в котором получена рентгенограмма.

$$2d \sin \vartheta = n\lambda, \text{ отсюда } \frac{d}{n} = d_{hkl} = \frac{\lambda}{\sin \vartheta} \quad (1)$$

По формуле (1) определяем  $d_{hkl}$ , затем рассчитываем относительную интенсивность и  $\sin^2 \vartheta$ .

По графику Хэлла для индирования рентгенограмм кристаллов с гексагональной компактной структурой находим значения  $hkl$ .

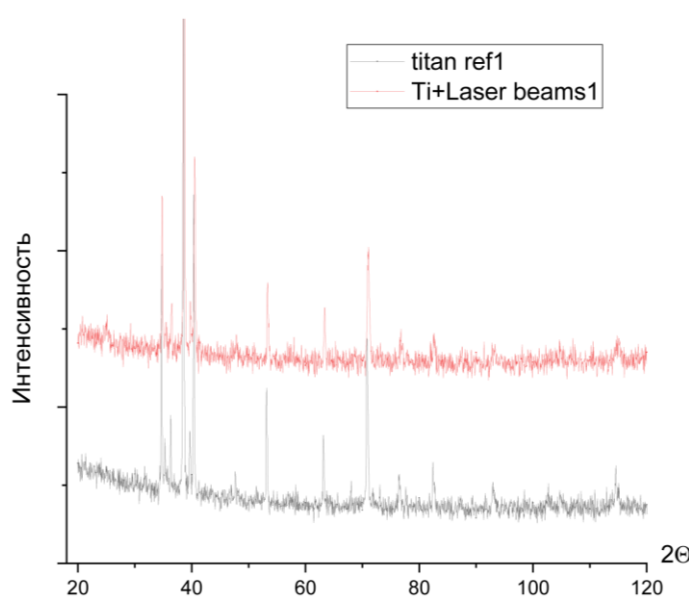


Рис. 2. – Рентгенограммы  $\alpha$ -Ti до (нижняя) и после (верхняя) лазерной обработки.

Табл. 1 – Параметры элементарной ячейки образца из  $\alpha$ -Ti до (1) и после (2) лазерного облучения: среднее, наименьшее (min) и наибольшее (max), теоретическое значения параметров ячейки, определенных по всем рефлексам (в Å),  $\sigma_{11}$  – среднеквадратичное отклонение параметров (в Å).

		Среднее	Min	Max	$\Delta$	$\sigma_{11}$	Теор
a	1	2,71	2,55	2,99	0,45	0,18	2,937
	2	2,52	2,36	2,58	0,21	0,09	
c	1	4,75	4,66	4,96	0,30	0,12	4,5823
	2	4,66	4,42	4,92	0,50	0,21	

Рассмотрим изменение кристаллической структуры титанового образца, подвергнувшегося обработке излучением лазера ГОР-100 М с плотностью потока  $q \sim 5 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>. С этой целью по имеющимся в литературе значениям параметров ячейки  $\alpha$ -Ti  $a = b = 0,2953$  нм,  $c = 0,4729$  нм методом подбора (hkl) определяем теоретические значения  $\sin^2 \vartheta$ . Затем определим рассчитанные по данным экспериментальных исследований параметры элементарной ячейки.

Из табл. 1 следует, что распределения параметров элементарных ячеек до и после лазерного облучения достаточно сильно отличаются друг от друга.

Для более детального изучения характера структурных изменений необходимо исследовать не только положения, но и интенсивности рентгеновских рефлексов, для чего была использован метод межатомной функции (метод Патерсона). Для этого необходимо определить  $P(\vec{u}) = \frac{1}{V_{11}} \int \rho(\vec{r}) \rho(\vec{r} - \vec{u}) d\vec{r}$  – самосвертку функции электронной плотности.

Результаты расчетов показывают, что при воздействии на титановый образец излучения рубинового лазера с  $q \sim 5 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> расщепления максимума  $P(\vec{u})$  не наблюдается, в то же время как ширины максимумов рентгеновских дифрактограмм, так и форма функции  $P(\vec{u})$  существенно меняется. Это свидетельствует о значительном изменении концентрации дефектов кристаллической решетки в обработанной лазерным излучением зоне. При этом микротвердость титана в облученной зоне существенно (на ~ 50 %) увеличивается.

Стоит также отметить, что при плотностях потока ЛИ, достаточных для плавления металла в зоне обработки ( $q > 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>) изменение дифрактограмм не наблюдалось, а микротвердость немного уменьшалась.

### **Заключение**

Проведенные исследования показали, что при действии лазерного излучения на поверхность образцов из титана их кристаллическая структура меняется в облученной зоне с равновесной на искаженную. Получено хорошее согласие рассчитанных и полученных в ходе экспериментальных исследований результатов. Обнаруженный эффект может быть связан с анизотропностью теплового расширения металла. Эффект может усиливаться внутренним напряжением в облученной зоне в ходе формирования в металлическом образце акустических волн.

## **Titanium structure transformation during its laser treating**

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

*Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus; e-mail: ion\_ne@mail.ru*

A change in the crystal structure of titanium in the zone of exposure to laser radiation with a flux density of  $10^4 - 10^5$  W/cm<sup>2</sup> 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 equilibrium to distorted (having a parallelepiped shape different from the cube). Proposition of the connection of the discovered effect with substantial micro-stresses appearance in the zone of fast heating of metal was made. Calculation of the number of elementary cell spatially transformed during laser treating was made. A good agreement between calculated and obtained during experimental investigations results was received. It is indicated that the discovered effect can be connected with the anisotropy of heat broadening of metal. This effect can be amplified by the internal stress in the irradiated zone during acoustic waves formation in the metal sample.

**Keywords:** pulse laser radiation, x-ray diffractometry, titanium, changes of crystalline structure, micro-hardness.