

ДИФФУЗИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

С.С. Ануфрик, В.Ч. Белаш, С.В. Васильев, А.Ю. Иванов, В.А. Лиопо
ГрГУ им. Я. Купалы, ул. Ожешко, 22, 230023 Гродно, Беларусь
e-mail: ion_ne@mail.ru

Излучение рубинового лазера ГОР-100М, работавшего в режиме свободной генерации, пройдя через фокусирующую систему, направлялось на облучаемый металлический образец. Плотность потока воздействующего излучения варьировалась от 10^4 до 5×10^5 Вт/см². Элементный состав мишени до и после облучения исследовался с использованием рентгеновского спектрометра ElvaX. Исследования показали, что содержание некоторых элементов в приповерхностном слое образца после неразрушающей лазерной обработки существенно изменяется. В частности, при воздействии на тонкий (несколько мкм) слой никеля, нанесенный на подложку из титана, после облучения концентрация титана в приповерхностном слое значительно (в 1,5 раза и более) увеличивалась. Содержание других примесей (кобальт, хром, железо и др.), имевшихся в незначительном количестве (десятые доли процента) в приповерхностном слое, практически не изменялось. Существенно, что концентрация титана монотонно увеличивалась при увеличении плотности потока воздействующего лазерного излучения в указанном интервале. Это свидетельствует об активной диффузии металла из подложки в покрытие в зоне импульсного нагрева образца лазерным излучением.

Введение

В настоящее время уже стало традиционным вопросом лазерной физики исследование воздействия когерентного излучения на вещество и образование приповерхностной лазерной плазмы. Силовое воздействие на металлы хорошо изучено и основано, в основном, на явлении теплопереноса. В то же время использование низкоэнергетичного лазерного излучения весьма перспективно для микро- и нанотехнологий [1–3]. Следует, однако, отметить, что механизмы указанного воздействия лазерного излучения еще недостаточно изучены. Раскрытие таких механизмов является актуальной задачей, поскольку позволит направленно модифицировать структуру и изменять физические свойства материалов. Поиск таких механизмов и является целью данной работы.

Экспериментальная установка и экспериментальные результаты

Схема экспериментальной установки, использовавшейся в работе, приведена на рисунке 1. Излучение рубинового лазера ГОР-100М 1, работавшего в режиме свободной генерации (длительность импульса $\tau = 1,2$ мс, $\lambda_1 = 0,694$ мкм), пройдя через фокусирующую систему 2, направлялось на исследуемый образец 3. Пятно фокусировки, создаваемое диафрагмой 4 и системой 2, имело диаметр 2 мм. Экспериментально определенный размер фокальной области (области каустики) системы 2 при использовании лазера 1 не превышал 2 мм. Часть лазерного излучения (~ 4 %) направлялась передней гранью стеклянного клина 5 в измеритель энергии ИМО-2Н 6, входной зрачок которого был расположен в фокальной плоскости линзы 7. Плотность потока воздействующего излучения варьировалась от 10^4 до 5×10^5 Вт/см². Отраженное задней гранью клина 5 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.

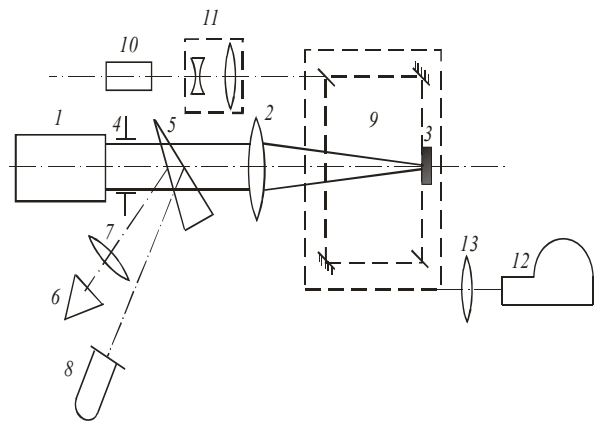


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для определения полей плотности газа, окружающего облучаемый образец, и контроля отсутствия плазмообразования (отсутствия области с отрицательной рефракцией) в ходе воздействия лазерного излучения упомянутый образец помещался в одно из плеч голографического интерферометра Маха-Цендера (9 на рисунке 1). Интерферометр освещался излучением рубинового лазера 10 ($\lambda_1 = 0,694$ мкм), работавшего в режиме свободной генерации. Зондирующее излучение направлялось в коллиматор 11, позволявший получать параллельный световой пучок диаметром от 2 мм до 3 см, превышающим толщину облучаемого образца, что позволило наблюдать за ростом кратера, изменением плотности и температуры вещества в облучаемой зоне, а также за формированием и распространением упругих волн в веществе мишени. Интерферометр был состыкован со скоростной фоторегистрирующей камерой СФР-1М 12, плоскость фотопленки в которой была сопряжена с меридиональным сечением воздействующего на образец лазерного луча при помощи объектива 13. Полученные кадры голограмм сфокусированного изображения имели пространственное разрешение по полю объекта примерно 200 мкм. Временное разрешение

составляло ~ 1 мкс. Относительная погрешность измерений показателя преломления и связанных с ним величин определялась точностью регистрации смещения полос на восстановленных интерференционных картинах и не превышала 10 %. Полученные на основании обработки интерферограмм данные показали, что плотность воздуха у поверхности облучаемого образца изменяется от $1,16 \cdot 10^3$ кг/м³ до $3 \cdot 10^3$ кг/м³.

Объектами исследования являлись титановые и медные образцы с никелевым покрытием. Элементный состав образцов до и после облучения исследовался с использованием рентгеновского спектрометра ElvaX. Исследования показали, что содержание некоторых элементов в приповерхностном слое образца после разрушающей лазерной обработки существенно изменяется.

В частности, при фронтальном воздействии на тонкий (несколько мкм) слой никеля, нанесенный на подложку из титана, после облучения концентрация титана в приповерхностном слое значительно (в 1,5 раза и более) увеличивалась (таблица 1). Содержание других примесей (кобальт, хром, железо и др.), имевшихся в незначительном количестве (десятые доли процента) в приповерхностном слое, практически не изменялось.

Таблица 1 — Зависимость содержания никеля и титана в поверхностном слое облучаемого образца от величины поглощенной энергии (определялась с учетом значения коэффициента отражения лазерного излучения от мишени $\rho_{от} = 0,8$ [4])

Поглощенная энергия (Дж)	0	5	10	15
Содержание никеля (%)	97,65	96,94	96,89	96,76
Содержание титана (%)	0,98	1,22	1,28	1,40

Схожая картина наблюдалась при воздействии лазерного излучения на тыльную сторону тонкой медной пластины с покрытием из никеля (таблица 2).

Таблица 2 — Зависимость содержания никеля и титана в поверхностном слое облучаемого образца от величины поглощенной энергии

Поглощенная энергия (Дж)	0	10	15
Содержание меди (%)	81,0	78,3	77,5
Содержание никеля (%)	10,8	11,8	12,8

Существенно, что концентрация титана (в первом случае) и никеля (во втором) монотонно увеличивалась при увеличении плотности потока воздействующего лазерного излучения в указанном интервале. Это свидетельствует об активной диффузии металла из подложки в покрытие в зоне импульсного нагревания образца лазерным излучением.

Обсуждение результатов

Для выяснения причин подобной зависимости содержания элементов в образцах, обработанных лазерным излучением, нами был проведен расчет изменения температуры металлического образца, облучаемого лазерными импульсами с использованными в эксперименте параметрами. Расчеты показывают, что в ходе импульсного воздействия лазерного излучения на металлический образец его температура на короткий промежуток времени существенно возрастает (до значения ≈ 375 K), что не может не приводить к активизации диффузии материала покрытия в подложку и материала подложки в покрытие. Этому также должно способствовать и существенное (не менее чем в 2,5 раза) кратковременное повышение давления воздуха у поверхности мишени, могущее приводить к динамическим процессам (распространению упруго-пластических волн) в облучаемой образце.

Для определения структурных изменений металлических образцов после воздействия лазерного излучения использовался рентгеновский дифрактометр ДРОН-2.0. В дифрактометре использовалось излучение K_{α} линии от трубки с медным антикатодом, фильтрованное никелевым стандартным фильтром на длине волны 154,050 пм. Для выявления наличия и характера структурных изменений была использована методика, описанная в работе [5]. Показано, что для облученных образцов наблюдается не только размытие функции радиального распределения, обусловленное их поликристаллической структурой, но и расщепление распределения. Полученные результаты свидетельствуют, что после воздействия лазерного излучения на металлы в зоне облучения кристаллическая структура характеризуется искажением кубической гранцентрированной решетки, т.е. элементарная ячейка принимает форму параллелепипеда, отличного от куба. Механизм подобной трансформации может быть следующим. Как уже указывалось, каждый пик лазерного излучения вызывает увеличение в течение ~ 1 мкс температуры на поверхности пятна фокусировки лазерного излучения на несколько десятков K. Поскольку основная масса металлического образца не нагрета, тепловое расширение облученной зоны происходит в основном в направлении лазерного луча. Остывание нагретой зоны также происходит достаточно быстро (\sim за 1 мкс для меди), т.е. до начала действия на образец следующего пика лазерного излучения. За это время искаженная форма деформированной зоны облучения не успевает восстановиться, т.е. форма облученной зоны «замораживается». Эффект может усиливаться внутренним напряжением в облученной зоне в ходе формирования в металлическом образце акустических и упруго-пластических волн [6].

Заключение

Проведенные исследования показали, что содержание некоторых элементов в приповерхностном слое образца после неразрушающей лазерной обработки существенно изменяется. В частности, при воздействии на тонкий (несколько мкм) слой никеля, нанесенный на подложку из титана, после облучения концентрация титана в приповерхностном слое значительно (в 1,5 раза и более) увеличивалась. Содержание других примесей (кобальт, хром, железо и др.), имевшихся в незначительном количестве (десять доли процента) в приповерхностном слое, практически не изменялось. Существенно, что концентрация титана монотонно увеличивалась при увеличении плотности потока воздействующего лазерного излучения в указанном интервале. Аналогичные явления наблюдаются и при воздействии лазерного излучения на тыльную сторону тонкой медной пластины с покрытием из никеля. Это свидетельствует об активной диффузии металла

из подложки в покрытие в зоне импульсного нагревания образца лазерным излучением.

Список литературы

1. Мирзоев Ф.Х., Панченко В.Я., Шелепин Л.А. Лазерное управление процессами в твердом теле // УФН. – 1996. – Т. 166, № 1. – С. 3 – 32.
2. Paustovsky, A.V., Shelud'ko V.E. Use of laser technology for modification of material properties (a review) // Functional Materials. – 1999. – Vol. 6, No 5. – P. 964 –976.
3. Васильев С.В., Иванов А.Ю., Лиопо В.А. Изменения кристаллической структуры металлов под воздействием лазерного излучения // ИФЖ. – 2007. – Т.80, № 5. – С.12 – 18.
4. Физические величины: Справочник / А.П.Бабичев [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1231 с.
5. Лиопо В.А., Война В.В. Рентгеновская дифрактометрия. – Гродно: Изд.ГрГУ, 2003. – 171 с.
6. Лямшев Л.М. Оптико-акустические источники звука // УФН. - 1981. - Т. 135, № 4. - С. 637–669.

METALS DIFFUSION ON NON-DESTRUCTIVE PULSE LASER OPERATING

S.S. Anufrik, V.Ch. Belash, A.Yu. Ivanov, V.F. Liopo, S.V. Vasiliev

Grodno State University, Ozheshko 22, 230023 Grodno, Belarus. e-mail: ion_ne@mail.ru

The radiation of the GOR-100M ruby laser operating in the free oscillation regime passed through the focusing system and was directed onto the irradiated metal sample. The radiation flux density was varied from 10^4 to 5×10^5 W cm⁻². The elementary composition of the target before and after irradiation was investigated by means of ElvaX X-ray spectrometer. The investigations showed that the concentration of several elements in the surface stratum of the sample after non-destructive laser treating was considerably changed. Specifically on operating of the thin (several μ m) nickel layer covering titanium sample concentration of titanium in the surface stratum considerably (more than in 1.5 times) increased. Concentration of other admixtures (cobalt, chromium, iron and others) presented in the surface stratum negligible amounts (several parts of per cent) did not change considerably. It is important that the titanium concentration on the increasing of the flux density of the operating irradiation increased monotonous in the mentioned space. The analogous phenomena on the laser irradiation operating of the back side of the thin copper plate covered with nickel were observed. This testifies to the active metal diffusion from the target into the surface stratum in the zone of pulse heating of the sample by means of laser radiation.