

# Влияние энергии лазерного излучения на морфологию поверхности и интенсивность спектральных линий Ti и Cu

С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, И. Г. Сергиенко, С. Н. Анучин

*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь,  
e-mail: anufrick@grsu.by*

В статье приведены результаты исследования влияния энергии лазерных импульсов Nd:YAG<sup>3+</sup>-лазера LS-2147 ( $\lambda = 1064$  нм) на морфологию поверхности образца металла (Ti) и сплава CuC(графит). Установлено, что при увеличении энергии лазерных импульсов от 308 мДж до 340 мДж происходит образование микроструктур на поверхности Ti, а при облучении сплава CuC на поверхности образуются зернистые структуры различной морфологии.

**Ключевые слова:** Nd:YAG<sup>3+</sup>-лазер, металлы, сплавы, микроструктура, абляция.

## Введение

После воздействия лазерного излучения определённой энергии на материал, на его поверхности образуется кратер. Формирование кратера (в металлах, полупроводниках) существенно зависит от параметров лазерного излучения: длины волны, длительности (непрерывный, импульсный), энергии, поляризации лазерного излучения. Исследования кратеров описаны во многих работах [1–6]. Механизм образования кратера (удаление материала в виде расплава под действием давления паров) описан в статье [3]. В работе [4] отмечается, что форма кратера зависит от освещённости в пятне фокусировки светового излучения и от характерных размеров неоднородностей на облучаемой поверхности. В статьях [5–6] говорится, что для того чтобы увеличить глубину расплава необходимо использовать растянутый во времени передний фронт и высокую мощность лазерного импульса. В работе [7] использовались повторяющиеся лазерные импульсы с частотой (5–50) кГц и длительностью  $\sim 0,1$  мкс, при этом формирование кратера происходит путем последовательного выплескивания расплава из облучаемой зоны мишени. Анализ литературных источников показывает, что в представленных работах приведены результаты изучения влияния параметров лазерного излучения на формирование структуры лазерных кратеров. Следует, однако, отметить, что в литературе ещё недостаточно исследовано воздействие лазерного излучения умеренной интенсивности на металлы и сплавы, при котором возможно образование поверхностных наноструктур [8].

## Объекты и методы исследования

Предметом исследования являлись образцы металла Ti и сплава CuC(графит). Данные образцы облучались излучением лазера Lotis LS-2147 ( $\lambda = 1064$  нм). Диаметр пятна составлял  $\sim 3$  мм, при фокусном расстоянии линзы 30 см. Образцы облучались одиночными лазерными импульсами с энергией: 257,5 мДж; 280 мДж; 308 мДж; 340 мДж; 352,5 мДж; 382 мДж. Погрешность указанных значений энергии составляла  $\pm 2,5$  мДж. Воздействие осуществлялось одним лазерным импульсом в одну точку по вертикально расположенным образцам.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

Аблированные образцы исследовались с помощью оптического микроскопа с системой цифровой регистрации при  $\times 25$  кратном увеличении. Микроскоп фокусировался на поверхности образцов. Микроскопические изображения поверхности исследуемого металла (Ti) и сплава CuC(графит), подвергнутых воздействию одиночными лазерными импульсами различной энергии, представлены на рис. 1, рис. 2.

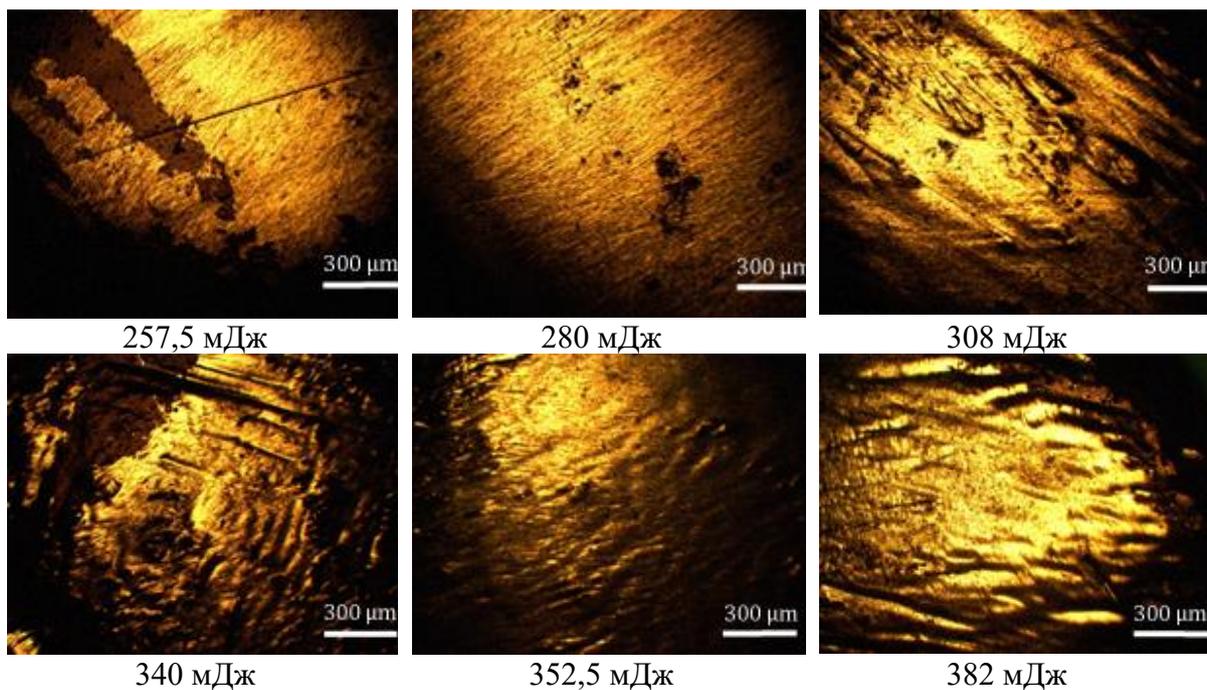


Рис. 1. – Микроскопические изображения поверхности титана при воздействии лазерными импульсами различной энергии.

Сравнительный анализ микроскопических изображений поверхности Ti, представленных на рис. 1, позволяет установить, что при энергии облучения до 280 мДж происходит удаление оксидной плёнки с поверхности металла и с формированием плазменного облака. При энергии 308 мДж на поверхности начинается образование структур, которые при повышении энергии до 340 мДж приобретают чёткие очертания в виде периодических микроструктур волнообразной формы и различной длины. Дальнейшее увеличение энергии абляции приводит к частичному оплавлению данных микроструктур и сглаживанию поверхности (382 мДж).

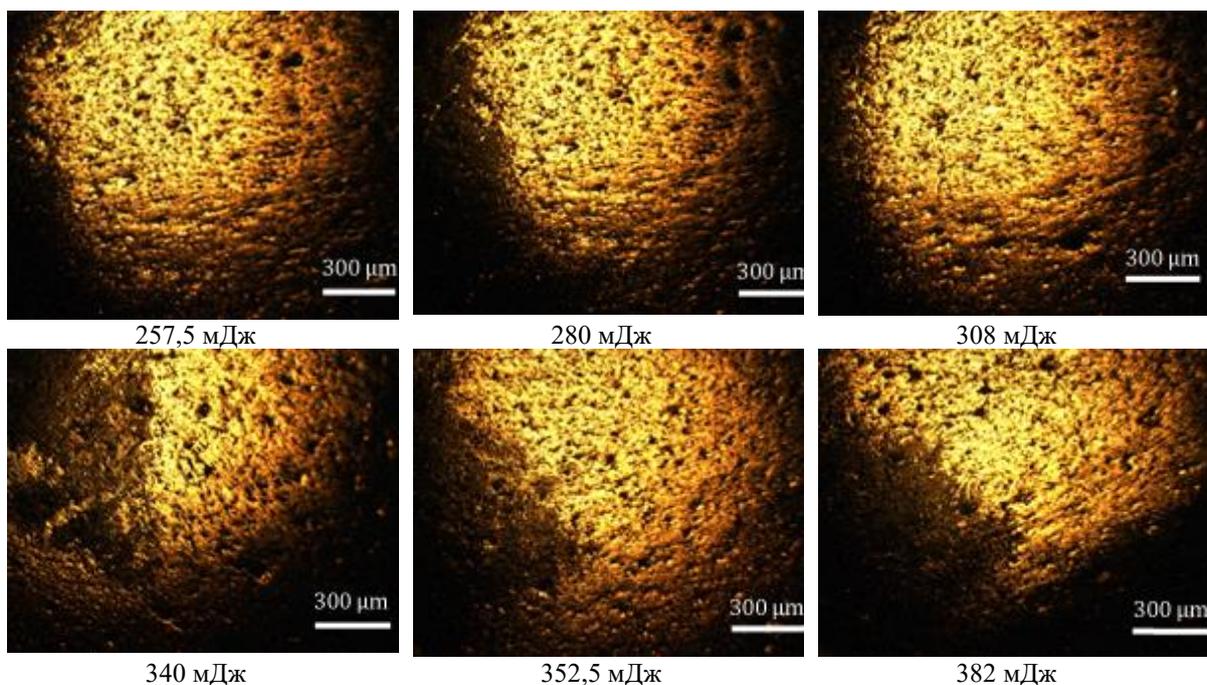


Рис. 2. – Микроскопические изображения поверхностей сплава CuC(графит), при воздействии лазерными импульсами различной энергии.

При анализе микроскопических изображений сплава CuC(графит) была установлено, что при облучении данного образца на поверхности образуются зернистые структуры, образованные кристаллами меди округлой формы (светлые зёрна) и чешуйчатыми зёрнами графита (тёмные пятна). По мере увеличения энергии лазерных импульсов (до 382 мДж), концентрация зерен графита на поверхности уменьшается. При этом происходит общее сглаживание морфология поверхности за счёт частичного оплавления, с сохранением зернистой структуры.

Далее проводилось исследование состава плазменного облака, наблюдаемого при воздействии на исследуемые образцы. Анализировалась интенсивность характерных спектральных линий Ti и Cu.

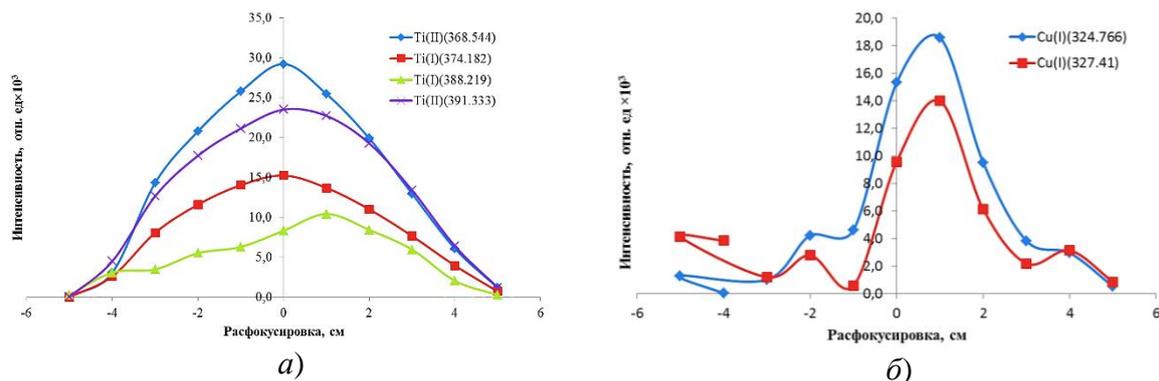


Рис.3. – Экспериментальные зависимости интенсивности спектральных линий эмиссионной плазмы Ti (a) и сплава CuC(графит) (б) от расфокусировки лазерного излучения на поверхности образцов.

На рис. 3 (a, б) представлены экспериментальные зависимости интенсивности спектральных линий: Ti II (368,544 нм), Ti I (374,182 нм), Ti I (388,219 нм), Ti II (391,333 нм); и Cu I (324,766 нм), Cu I (327,421 нм), от расфокусировки лазерного излучения, при энергии в импульсе 257,5 мДж.

Анализ экспериментальных зависимостей, представленных на рис. 3 (a, б) позволил установить, что для Ti максимальное значение интенсивности анализируемых спектральных линий наблюдается в фокусе, кроме спектральной линии Ti I (388,219 нм) и у которой максимум наблюдается при положительной расфокусировке ≈ 1 см. Для сплава CuC(графит) максимальное значение интенсивности анализируемых спектральных линий меди наблюдается при положительной расфокусировке ≈ 1 см [9].

### Заключение

Установлены оптимальные энергии, при которых на поверхности Ti происходит образование микроструктур (от 308 мДж до 340 мДж). При дальнейшем увеличении энергии абляция исчезает структурирование и на поверхности образуется кратер. При облучении сплава CuC(графит) с энергиями от 257,5 мДж до 352,5 мДж на поверхности образца образуются зернистые структуры, сформированные из частиц меди и графита. Дальнейшее увеличение энергии приводит к уменьшению количества зёрен графита на поверхности и образованию кратера. Выявлено, что наибольшее значение интенсивности анализируемых спектральных линий Ti наблюдается в фокусе, а для сплава CuC(графит) при положительной расфокусировке ≈ 1 см. Полученные результаты могут быть применены для модификации поверхности лазерным излучением, либо в спектральном анализе при позиционировании исследуемого объекта относительно фокуса лазерного луча.

## Литература

1. Angelov, N. Analysis of the process of laser ablation of marble surfaces. *Contemporary Materials*. 2015. V. 1, № 6. P. 80–84.
2. Курьян, Н.Н., Ануфрик С.С., Сеницын М.А. Оптимизация метода LIBS для исследования латунных сплавов. Полупроводниковые лазеры и системы на их основе. *Semiconductor lasers and systems: 12-й Белорусско-Российский семинар, Минск, 27-31 мая 2019 г.* – Минск: Ковчег, 2019. С. 125–128.
3. Bardos, C., Fursikov A.V. *Instability in Models Connected with Fluid Flows*. Springer International Mathematical Series. 2008, V. 7, № 2. P. 350–364.
4. Босак, Н.А., Васильев С.В., Иванов А.Ю., Минько Л.Я., Недолугов В.И., Чумаков А.Н. Особенности формирования кратера на поверхности металла, облучаемого повторяющимися лазерными импульсами. *Квантовая электроника*. 1999. № 1, С. 69–72.
5. Васильев, С.В., Иванов А.Ю., Ляликов А.М. Топография кратера, возникающего при действии лазерного импульса на поверхность металла. *Квантовая электроника*. 1995. Т 23, № 8. С. 830–834.
6. Каюков С.В., Гусев А.А. Влияние параметров лазерного пучка на глубину и эффективность плавления металлов импульсным лазерным излучением. *Квантовая электроника*. 1996. Т. 23, № 8. С. 711–714.
7. Каюков, С.В., Гусев А.А. Динамические характеристики роста парогазового канала при плавлении металлов импульсным лазерным излучением миллисекундной длительности. *Квантовая электроника*. 1995. Т. 22, № 8. С. 811–149.
8. Лапшин, К.Е., Обидин А.З., Токарев В.Н., Хомич В.Ю., Шмаков В.А., Ямщиков В.А. Прямое лазерное наноструктурирование поверхности алмазных пленок и керамики нитрида кремния наносекундными импульсами излучения F<sub>2</sub>-лазера. *Российские нанотехнологии*, 2007. Т. 2. № 11–12. С. 50–57.
9. Курьян Н.Н., Ануфрик С.С. Модификация структуры поверхности латунных сплавов лазерным излучением. *Оптика и спектроскопия конденсированных сред: материалы XXV Междунар. науч. конф., Агой, 22-28 сентября, 2019 / оргкомитет: В. А. Исаев [и др.]*. – Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2019. С. 70–74.

## **Influence of laser radiation energy on surface morphology and intensity of Ti and Cu spectral lines**

S. S. Anufriuk, N. N. Kurian, I. G. Sergienko, K. F Znosko

*Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus;  
e-mail: anufriuk@grsu.by*

The article presents the results of a study of the influence of the energy of laser pulses of the Nd<sup>3+</sup>:YAG laser LS-2147 ( $\lambda = 1064$  nm) on the surface morphology of a metal (Ti) and alloy CuC (graphite) sample. It was found that with an increase in the energy of laser pulses from 308. mJ to 340 mJ, microstructures are formed on the Ti surface, and when the CuC alloy is irradiated, granular structures of various morphologies are formed on the surface.

**Keywords:** Nd<sup>3+</sup>:YAG laser, metals, alloys, microstructure, ablation.