

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОБРАЗЕЦ, НАХОДЯЩИЙСЯ В ЖИДКОСТИ

С.В. Васильев, А.Ю. Иванов, А.В. Копыцкий, А.Л. Ситкевич
Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
ул. Ожешко 22, 230023 Гродно, Беларусь, ion_ne@mail.ru

Экспериментально исследован процесс формирования парогазового образования у поверхности облучаемого металла. Исследованы особенности изменения формы и размеры парогазового «пузыря» на разных стадиях процесса, в т. ч. и после завершения лазерной обработки материала. Показано, что при использовании излучения лазера ГОР-100М, работающего в режиме свободной генерации (длительность импульса – 1.2 мс, плотность потока $\sim 10^6$ Вт/см²), форма поверхности кратера, формирующегося на поверхности облучаемого образца, расположенного в воде, принципиально отличается от топографии лунки, сформировавшейся в результате воздействия лазерного импульса с теми же параметрами на аналогичный образец, окруженный воздухом при нормальном давлении (10^5 Па).

Показано, что существенное отличие формы поверхности кратера, сформировавшегося в результате воздействия лазерного импульса с одинаковыми параметрами на одинаковые образцы, окруженные воздухом и водой, определяется принципиально различным характером течения плазмы и парогазовой смеси в указанных случаях.

Ключевые слова: импульсное лазерное излучение; скоростная голографическая киносъемка; кратер; парогазовое образование; продукты эрозии; различие течения парогазовой смеси.

INVESTIGATION OF THE LASER TREATING OF A SAMPLE BEING IN LIQUID

S.V. Vasiliev, A.Yu. Ivanov, A.V. Kopytski, A.L. Sitkevich
Yanka Kupala State University of Grodno, 22 Ozheshko Str., 230023 Grodno, Belarus, ion_ne@mail

The results of the experimental investigation of the pulse laser treating of a led target being in water are described. The process of steam and gas plume generation on the surface of the irradiated metal was investigated experimentally. The features of steam and gas plume form and dimensions evolution on different stages of the process (even after laser treating of the material completing) were investigated. It is shown that on using GOR-100M operating in free oscillating regime (pulse duration 1.2 ms, laser radiation flux density $\sim 10^6$ W cm⁻²) the form of a crater developed on being in water the irradiated target surface differs in essence from the topography of the crater developed on processing by laser pulse with the same parameters of the analogical target surrounded by air on normal pressure (10^5 Pa).

It is pointed in the conclusions that the substantial difference of the forms of crater surfaces developed as a result of processing of the identical targets by laser pulses with the identical parameters of the identical targets being in water or air determines by principally different character of plasma and steam and gas mixture flow in the mentioned cases.

Keywords: pulse laser radiation; fast holographic filming; crater; steam and gas plume; erosion products; different plasma and steam and gas mixture flow.

Введение

За четыре последних десятилетия лазерные и, в частности, лазерно-плазменные технологии нашли широкое применение прежде всего в резке, сварке, сверлении отверстий, упрочнении, распылении, термораскалывании; следует отметить также лазерные фотохимические процессы и разделение изотопов.

Однако реальная картина взаимодействия импульсного лазерного излучения с конденсированными средами оказалась чрезвычайно сложной, не сводящейся к развитым представлениям и моделям. Еще менее изучены процессы, инициируемые взаимодействием лазерного излучения умеренной интенсивности с веществом, находящимся в жидкости.

Целью данной работы является исследование процессов, протекающих вблизи мишени при воздействии излучения импульсного лазера с плотностью потока $\sim 10^6$ Вт/см² на металлический образец, расположенный в воде.

Методика эксперимента

Излучение рубинового лазера ГОР-100М, работавшего в режиме свободной генерации

(длительность импульса $\tau \sim 1.2$ мс, длина волны $\lambda = 0.694$ мкм), пройдя через фокусирующую систему, направлялось на образец, располагавшийся в кювете с водой. В качестве фокусирующих применялись как однолинзовые, так и двухлинзовые системы, которые позволяли строить изображение диафрагмы на поверхности образца. Это позволяло получать на поверхности мишени однородное пятно фокусировки излучения с резкими границами. Диаметр D полученного таким образом пятна излучения с резкими краями варьировался в ходе экспериментов от 1 до 2 мм. Для изучения пространственной и временной эволюции лазерного факела в ходе воздействия ЛИ на образец использовался метод скоростной голографической киносъемки. Межэлектродный промежуток помещался в одно из плеч интерферометра Маха-Цендера. Интерферометр освещался излучением рубинового лазера ($\lambda = 0.694$ мкм), работавшего в режиме свободной генерации. Длительность импульса излучения зондирующего лазера составляла ~ 400 мкс. Селекция поперечных мод зондирующего лазера осуществлялась диафрагмой, помещенной внутри резонатора, а продольных – эталоном Фабри-Перо, использованным в качестве выходного зеркала.

Зондирующее излучение направлялось в коллиimator, позволявший получать параллельный световой пучок диаметром до 3 см, что позволило наблюдать за развитием пароплазменного облака. Интерферометр был состыкован со скоростной фоторегистрирующей камерой СФР-1М, плоскость фотопленки в которой была сопряжена с меридиональным сечением воздействующего на образец лазерного луча при помощи объектива. Скоростная камера работала в режиме лупы времени. Описанная схема позволяла регистрировать развернутые во времени голограммы сфокусированного изображения лазерного факела. Полученные отдельные кадры голограмм обеспечивали временное разрешение не хуже 0.8 мкс (время экспозиции одного кадра) и пространственное разрешение по полю объекта ≈ 50 мкм. Дифракционная эффективность голограмм позволяла в стационарных условиях восстанавливать и регистрировать интерференционные и теневые картины исследуемого процесса.

Экспериментальные результаты

Экспериментальные исследования показали, что топография кратера, полученного при воздействии лазерного излучения на свинцовый образец, погруженный в воду (рис. 1), существенно отличается от формы поверхности кратера, сформировавшегося в результате воздействия лазерного импульса с теми же параметрами на аналогичный образец, окруженный воздухом при нормальном давлении (10^5 Па). В первом случае поверхность кратера пемзообразная, вспененная, макроскопическая лунка практически отсутствует. Во втором случае внутренняя зона кратера (лунка) имеет ровную поверхность. При этом топография кратера определяется распределением энергии по пятну фокусировки лазерного излучения.

На рисунке 2 представлены теневые картины, восстановленные с голограмм, зарегистрированных описанным методом в различные моменты времени после начала воздействия излучения на вещество.

Видно, что у поверхности облучаемого образца формируется парогазовое образование (пузырь), форма которого первоначально близка к сферической. Образование быстро увеличивается в размерах, особенно на ранних стадиях процесса.

Приблизительно через 1 мс после начала воздействия форма пузыря начинает изменяться, на оси лазерного пучка формируется выпуклость. После прекращения воздействия (~ 1.2 мс) размеры парогазового образования стабилизируются, и только через ~ 1.5 мс начинается его медленный распад. Существенно, что при этом не только уменьшаются размеры пузыря, но и случайным (не повторяющимся от одного эксперимента к другому) образом изменяется его форма. Но даже через 3 мс после начала воздействия лазерного излучения на поверхность металла (то есть через ~ 1.8 мс после прекращения воздействия) пароплазменное образование не исчезает.

После извлечения облученного свинцового образца на его поверхности вблизи кратера (в зоне распространения основания парогазового образования) виден белый налет (порошок), который на

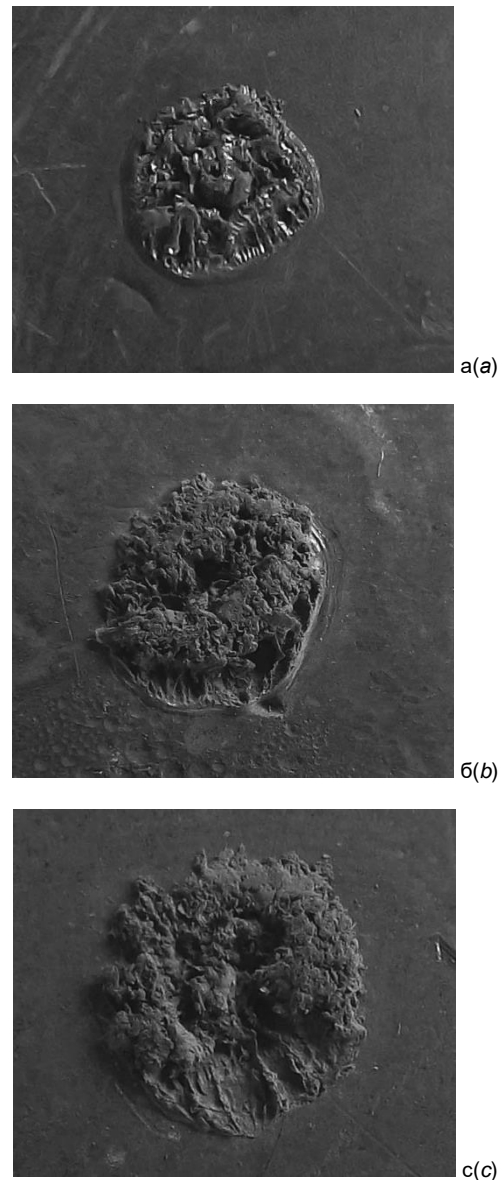
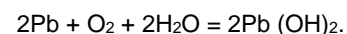


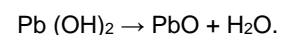
Рис. 1. Фотографии кратеров, полученных при воздействии на свинцовый образец, расположенный в воде, лазерных импульсов с энергией 10 Дж (а), 20 Дж (б), 40 Дж (в)

Fig. 1. Photographs of craters obtained after treating of led sample been in water by laser pulses with energy 10 J (a), 20 J (b), 40 J (c)

воздухе быстро меняет цвет – становится желтовато-бурым. При облучении свинца в воздушном окружении формирования подобных порошков не наблюдается. Очевидно, белый порошок – гидроксид свинца, образовавшаяся в ходе контакта разогретого металла с кислородом и водяным паром:



В дальнейшем $\text{Pb}(\text{OH})_2$ разлагается с образованием оксида свинца:



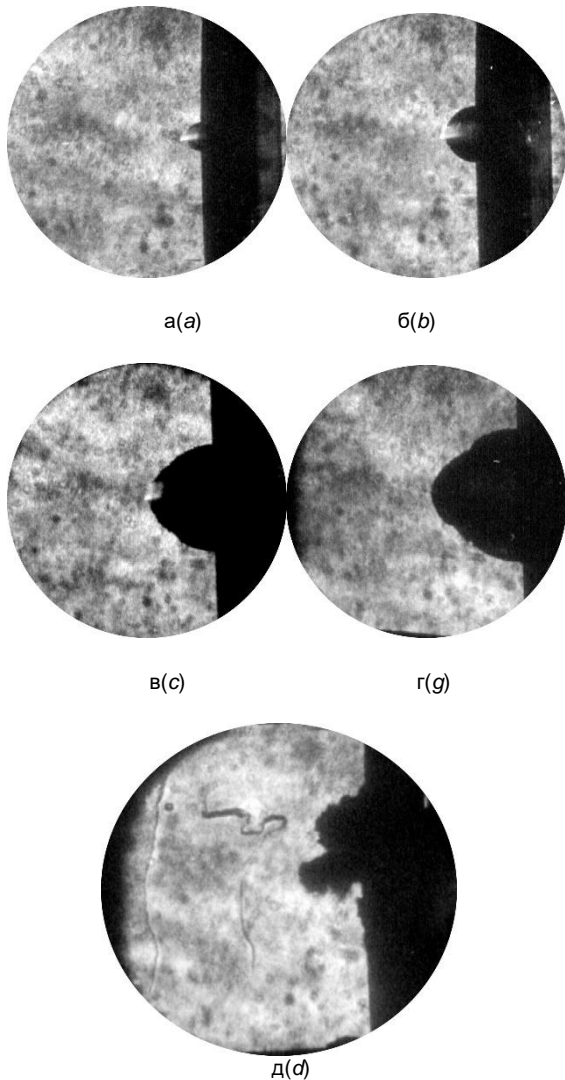


Рис. 2. Теневые картины парогазового образования, зарегистрированные через 10 (а), 50 (б), 500 (в), 1200 (г), 2000 (д) микросекунд после начала лазерного воздействия на свинцовый образец. Диаметр поля зрения 4 см

Fig. 2. Shadow pictures registered in 10 (a), 50 (b), 500 (c), 1200 (g), 2000 (d) microseconds after beginning of laser treating of the lead sample. Field of vision diameter is 4 cm

Обсуждение результатов

Известно, что при воздействии на образец лазерного излучения с параметрами, соответствующими описанному эксперименту, у поверхности мишени формируется пароплазменное образование (лазерный факел). При лазерном воздействии на металл, окруженный газом при давлении 10^5 Па, плазменное образование может достигать размеров нескольких сантиметров [1]. При воздействии на образец, окруженный водой, светящаяся область лазерного факела имеет значительно меньший размер – ~ 1 мм; температура на его границе ~ 7000 К [2]. Подобное различие связано с интенсивным нагреванием и испарением воды, что и приводит к образованию парогазового пузыря.

Содержимое пузыря состоит из двух компонент – продуктов эрозии облучаемого образца (в нашем случае – пары свинца) и водяного пара. Решая

уравнений движения этих компонент, получим следующий характер движения парогазовой смеси.

Поток горячих продуктов эрозии эмитируется небольшим плазменным образованием (поперечные размеры потока не превышают диаметра пятна фокусировки излучения) навстречу лазерному лучу.

На первой стадии ($t \leq 10 \mu\text{s}$) ввиду высоких плотности и температуры ($T|r=r_0 = 7000\text{K}$) продуктов эрозии разлет плазмы подобен наблюдаемому при воздействии лазерного излучения на образец, расположенный в воздухе. Движение продуктов эрозии сверхзвуковое и практически одномерное (вещество радиально разлетается от центра пятна фокусировки излучения). При этом поддухты эрозии охлаждаются, испаряя воду. Скорость перемещения границы пароплазменного «пузыря» \vec{U}_b также сверхзвуковая. Из зоны эрозии наблюдается интенсивный вылет капель свинца в конденсированном состоянии.

На второй стадии процесса ($10 \mu\text{s} \leq t \leq 50 \mu\text{s}$) движение продуктов эрозии по-прежнему сверхзвуковое. Однако на этой стадии масса водяного пара уже значительно превышает массу продуктов эрозии, содержащихся в пузыре. Скорость перемещения границы пароплазменного пузыря \vec{U}_b становится дозвуковой, скорость течения пара \vec{U} также дозвуковая и существенно меньше \vec{U}_b , но среднее значение $|\vec{U}|$ постепенно увеличивается. Движение содержимого пузыря по-прежнему практически одномерное. Часть испаренных продуктов эрозии выхоят за пределы пузыря и образует водяной гель.

На третьей стадии процесса ($50 \mu\text{s} \leq t \leq 500 \mu\text{s}$) скорости всех компонент, наполняющих пузырь, становятся дозвуковыми. Их перемещение по-прежнему практически одномерное. Существенно, что в конце рассматриваемой стадии процесса течение водяного пара становится сверхзвуковым, и, следовательно, линеаризация уравнений движения компонент системы становится недопустимой.

На четвертой стадии процесса ($t \geq 500 \mu\text{s}$) течение водяного пара перестает быть одномерным. Достигнув границы пузыря, поток водяного пара идет по касательной парогазового образования к мишени, достигает ее, идет вдоль мишени к центру вплоть до плазменного образования, нагревается и направляется навстречу лучу лазера вместе с продуктами эрозии. Таким образом, поток водяного пара, идущий к центру кратера, не дает вытекать жидкому металлу из лунки и вспенивает его.

Следует отметить, что при действии на тот же образец одиночного импульса (пичка) лазера ГОР-100М (режим модулированной добротности) длительностью ~ 1 мкс с энергией ~ 1.5 Дж поверхность кратера оставалась гладкой (рис. 3). При этом в ходе развития парогазового образования наблюдалась только 1-я стадия. После завершения роста пузыря его размеры медленно уменьшались без существенного изменения формы.

Следовательно, вспененность поверхности кратера, наблюдавшаяся при воздействии на поверхность металлического образца излучения лазера ГОР-100М, работавшего в режиме свободной генерации (длительность импульса $\tau \sim 1.2$ мс),

появляется только после нарушения одномерности (радиальности) течения пара.

Кроме того, вероятно, на четвертой стадии процесса ($t \geq 500 \mu\text{s}$) в зоне соприкосновения прямого и обратного течений пара образуются вихри, которые заполняют почти весь объем пузыря. Этим объясняется случайный (не повторяющимся от одного эксперимента к другому) характер распада парогАЗОВОГО образования.

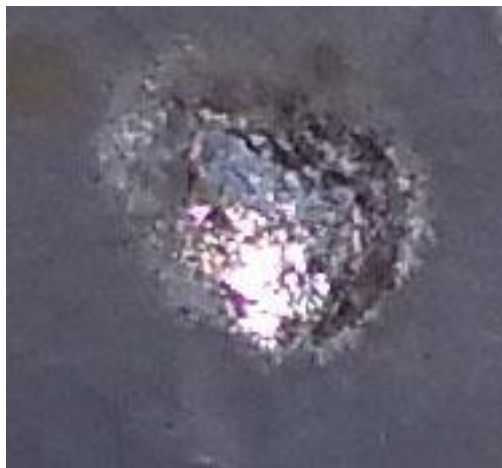


Рис. 3. Фотография кратера, полученного при воздействии на свинцовый образец, расположенный в воде, одиночного лазерного импульса с энергией 1 Дж.

Fig. 3. Photographs of craters obtained after treating of lead sample been in water by a single laser pulse with energy 1 J.

Заклучение

Таким образом, существенно отличие формы поверхности кратера, сформировавшегося в результате воздействия лазерного импульса с одинаковыми параметрами на одинаковые образцы, окруженные воздухом и водой, определяется принципиально различным характером течения плазмы и парогАЗОВОЙ смеси в указанных случаях.

Библиографические ссылки

1. Барихин Б.А., Иванов А.Ю., Недолугов В.И. Скоростная голографическая киносъемка лазерной плазмы. *Квантовая электроника* 1990; 17(11): 1477-1480.
2. Butsen A., Burakov V., Kiris V., Tarasenko N. Spectroscopic characterization of laser ablation in liquids. VII International conference "Plasma physics and plasma technology" (Minsk, Belarus, September 17 – 21, 2012). Contributed papers. In two volumes. Minsk, "Kovcheg". 2012; I: 220- 223.

References

1. Barihin B.A., Ivanov A.Yu., Nedolugov V.I. Skorostnaia golograficheskaia kinosiemka lazernoi plazmi [Fast holographic filming of laser plasma]. *Kvantovaya elektronika = Soviet Journal of Quantum Electronics* 1990; 17(11): 1477-1480. (In Russian).
2. Butsen A., Burakov V., Kiris V., Tarasenko N. Spectroscopic characterization of laser ablation in liquids. VII International conference "Plasma physics and plasma technology" (Minsk, Belarus, September 17 – 21, 2012). Contributed papers. In two volumes. Minsk, "Kovcheg". 2012; I: 220- 223.