

ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

К.Ф. Ермалицкая

Белорусский государственный университет,

пр. Независимости, 4; 220030, Минск, тел. (017)-209-53-48, e-mail: ermalitskaia@gmail.com

В работе рассмотрены особенности взаимодействия излучения одиночных и сдвоенных, смещенных во времени, лазерных импульсов с поверхностью металлов. Определен механизм поступления вещества образца в эрозионную плазму в зависимости от параметров лазерного излучения и теплофизических свойств материала. Предложена физическая модель, позволяющая оценить толщину испаряемого одиночными и сдвоенными лазерными импульсами слоя металла. Сделаны выводы о возможности применения сдвоенных лазерных импульсов для сверления микроотверстий.

Введение

Лазерные импульсы, в том числе и сдвоенные, являются одним из наиболее распространенных источников возбуждения спектров при прямом количественном анализе промышленных изделий, предметов искусства и объектов археологических раскопок. При этом существенным является вопрос о степени деструкции поверхности и механизме поступления вещества образца в эрозионную плазму. Кроме того, до сих пор детально не изучен вопрос о возможности применения сдвоенных лазерных импульсов для сверления микроотверстий в металлах и сплавах.

Целью данной работы было исследование эрозии поверхности металлов излучением одиночных и сдвоенных лазерных импульсов, а также определение оптимальных параметров лазерного излучения для сверления микроотверстий.

Эксперимент

Исследования проводились на лазерном спектрометре LSS-1 производства совместного белорусско-японского предприятия «LOTIS-TII», (г. Минск). В качестве источника испарения вещества образца и возбуждения спектров атомов использовалось излучение двухимпульсного Nd:YAG-лазера с активной модуляцией добротности. Основные параметры лазерного излучения: длина волны 1064 нм, частота следования импульсов 10 Гц, длительность на полувысоте – 15 нс, энергия импульсов $E_{имп} = 10 \pm 60$ мДж, временной интервал между сдвоенными лазерными импульсами $\Delta t = 0 \div 100$ мкс (шаг 1 мкс). При фиксированных значениях энергии накачки и Δt энергия обоих импульсов одинакова. Нулевой межимпульсный интервал соответствует одновременному воздействию на поверхность двух лазерных импульсов, что можно рассматривать как одиночный импульс, мощность которого равна суммарной мощности сдвоенных импульсов. Все эксперименты проводились в воздухе при нормальном атмосферном давлении; в процессе лазерного воздействия образец оставался неподвижен.

Объектами исследования являлись образцы чистых металлов: алюминий, железо, медь, олово, свинец и цинк. Для контроля деструкции поверхности образцов излучением сдвоенных лазерных импульсов использовался микроинтерферометр Линника МИИ-4. Абсолютная погрешность измерения глубины кратера составляла ± 3 мкм; диаметра кратера ± 5 мкм.

Результаты и их обсуждение

Проведенные измерения деструкции поверхности показали, что переход от одноимпульсного к двухимпульсному воздействию при неизменной мощности излучения приводит к увеличению глубины кратера в 1,5-2,5 раза в зависимости от энергии импульсов (рис. 1). При дальнейшем увеличении Δt происходит монотонное снижение h .

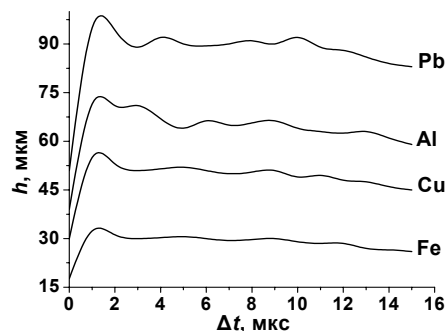


Рис. 1. Зависимость глубины кратера на поверхности металлов от временного сдвига между лазерными импульсами

Диаметр кратера d зависит лишь от энергии импульсов и остается неизменным при переходе от одиночных к сдвоенным импульсам. Зависимость глубины кратера h на поверхности от значения $E_{имп}$ для серии из 20 сдвоенных с $\Delta t = 10$ мкс лазерных импульсов приведена на рис. 2.

Уменьшение величины h с увеличением энергии как для одиночных, так и для сдвоенных лазерных импульсов обусловлено явлением экрановки излучения. Действительно, чем больше $E_{имп}$, тем выше температура и плотность плазмы, образованной передним фронтом импульса, и, соответственно, тем интенсивнее поглощается данное излучение на его более поздних стадиях. Это, в свою очередь, приводит к росту толщины расплава вещества на поверхности, который конденсируется на стенках кратера и формирует бруствер. Рост объема расплава при увеличении энергии и импульсов подтверждается и внешним видом кратеров, приведенных на рис. 3.

В рамках тепловой модели лазерной эрозии металлов предполагается, что толщина испаряемого слоя металла определяется теплотой испа-

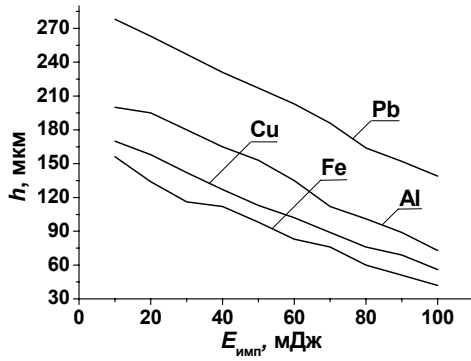


Рис. 2. Зависимость глубины кратера на поверхности металлов от энергии двойных лазерных импульсов с $\Delta t = 10$ мкс

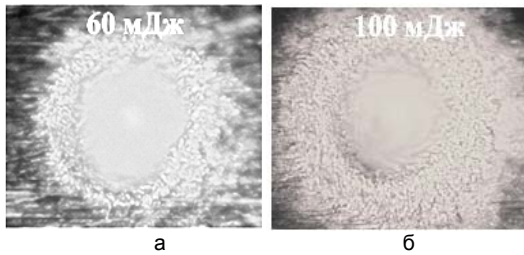


Рис. 3. Внешний вид кратеров на поверхности медного образца после воздействия серии из 20 двойных лазерных импульсов с энергиями 60 (а) и 100 мДж (б)

рения металла $L_{исп}$. Однако большое количество расплава позволяет предположить, что глубина кратера будет зависеть в большей степени от теплоты плавления $\lambda_{пл}$. Действительно, толщина испаренного слоя зависит от теплоты испарения вещества только для одиночных лазерных импульсов с малой энергией. Для двойных лазерных импульсов, а также одиночных импульсов с $E_{имп} > 30$ мДж, h обратно пропорциональна $\lambda_{пл}$ (рис. 4). Толщина расплавленного слоя $x_{пл}$ на поверхности образца после воздействия двойных лазерных импульсов с энергией $E_{имп} = 100$ мДж, длительностью $t = 15$ нс и плотностью потока излучения $q \approx 10^{10}$ Вт/см² может быть оценена по следующей формуле:

$$x_{пл} = \frac{k\lambda_{пл}}{q(1-R)C} \ln \frac{(1-\lambda_{пл}^*)\beta + 1}{(T_{пл}^* + \lambda_{пл}^*)\beta}, \quad (1)$$

где

$$\beta = \frac{k\alpha T_s}{q(1-R)}, \quad \lambda_{пл}^* = \frac{\lambda_{пл}}{cT}, \quad T_{пл}^* = T_{пл}/T_s, \quad (2)$$

α – коэффициент поглощения лазерного излучения, c – теплоемкость, T_s – температура поверхности, $T_{пл}$ – температура плавления, $\lambda_{пл}$ – теплота плавления.

Удаление вещества с поверхности образца под действием лазерных импульсов происходит в итоге не только в результате испарения, но и при вытеснении расплава давлением паров из зоны облучения.

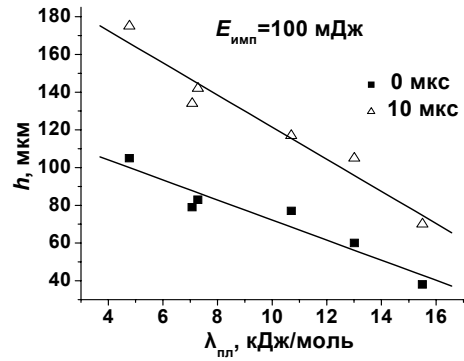


Рис. 4 – Зависимости глубины кратера h на поверхности металлических образцов от теплоты плавления $\lambda_{пл}$ вещества при $E_{имп} = 100$ мДж

Численная оценка толщины расплава на поверхности с помощью формулы (1) показала, что $x_{пл}$ для всех исследуемых металлов при $E_{имп} \leq 20$ мДж не превышает 0,1 толщины слоя h_0 , испаряемого одиночными импульсами. При увеличении энергии импульса вплоть до 100 мДж растет и количество перегретого металла в зоне воздействия лазерного излучения и величина $x_{пл}$ достигает 0,4 h_0 .

В случае абляции образца двойными лазерными импульсами часть энергии первого импульса поглощается веществом и идет на нагрев образца; в результате излучение второго импульса попадает на уже нагретую поверхность, температура T_s которой может быть определена по следующей формуле:

$$T_s = \frac{2q(1-R)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_n, \quad (3)$$

где R – коэффициент отражения поверхности, T_n – начальная температура (для первого импульса она равна комнатной), τ – длительность импульса, k – теплопроводность, a – температуропроводность вещества образца. Увеличение начальной температуры поверхности приводит к росту толщины расплава, значение которой может достигать 0,6 h_0 .

Диаметр кратера может быть рассчитан на основании формулы:

$$d = d_0 + Pt \frac{\text{tg} 2\gamma}{\pi(d_0 L)}, \quad (4)$$

где P – импульсная мощность, L – теплота испарения, 2γ – угол раствора светового конуса, d_0 – диаметр светового пятна на поверхности мишени, t – длительность воздействия лазерного излучения. Рассчитанные значения полностью согласуются с экспериментальными данными. Теоретическая оценка глубины кратера h была сделана из предположения существования энергетического баланса в кратере:

$$P(t)dt = \rho L \pi r^2(t) dh, \quad (5)$$

где $P(t)$ – текущее значение поглощенной мощности излучения, r – радиус кратера. Таким образом, предполагая, что вещество образца покида-

ет кратер преимущественно в результате поверхностного испарения, получаем следующую формулу для $h_{\text{теор}}$, испаряемого за 1 импульс:

$$h_{\text{теор}} = \frac{P\tau}{\pi r_0^2 L}, \quad (6)$$

Средние значения толщины слоя h , «снимаемого» с поверхности медного образца одиночными и сдвоенными лазерными импульсами, а также рассчитанные на основании модели поверхностного испарения составляют: $h_{\text{теор}} = 3,6$ мкм; $h_{\text{один}} = 4,6$ мкм и $h_{\text{сдвоен}} = 7,5$ мкм. Приведенные данные свидетельствуют о том, что модель поверхностного испарения дает заниженные значения толщины слоя и не может быть использована для оценки степени деструкции поверхности лазерными импульсами. Учитывая, что на поверхности образуется достаточно большой слой расплава, уравнение теплового баланса (5) должно быть записано в виде:

$$P(t)dt = \rho L \pi r^2(t) dh + \lambda_{\text{пл}} 2\pi r(t) h_{\text{теор}}(t) dr.$$

Значения $h_{\text{теор}}$, рассчитанные на основании этой формулы, совпадают с экспериментальными данными глубины кратера для одиночных импульсов, но ниже, чем значения h для сдвоенных импульсов. Полученные различия в величинах глубины кратера для одиночных и сдвоенных импульсов обусловлены явлением экранировки лазерного излучения. За время межимпульсного интервала эрозионная плазма рассеивается, но над поверхностью остается взвесь из капель расплава и ассоциативных комплексов, образовавшихся при конденсации паров металла. Значительная часть излучения второго импульса поглощается внутри данной области и не доходит до поверхности образца. Температура взвеси при этом увеличивается, и составляющие ее части приобретают скорость по направлению к поверхности, вызывая дополнительную абляцию вещества образца в приповерхностную область, находящуюся при пониженном давлении после действия первого импульса.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что при воздействии сдвоенных лазерных импульсов вещество поступает в эрозионную плазму преимущественно в виде жидких капель за счет выталкивания расплава давлением отдачи паров $P_{\text{отд}}$ первичной плазмы и под воздействием второго импульса (рис. 5). Величина $P_{\text{отд}}$ может быть оценена по следующей эмпирической формуле:

$$P_{\text{отд}} = 20 \left[\frac{q}{10^{14}} \right]^{7/9} \lambda^{-2/9}, \quad (7)$$

где q – плотность потока излучения, λ – длина волны лазера [в микрометрах]. Для плотности потока излучения $q \approx 10^{10}$ Вт/см² ($E_{\text{имп}} = 100$ мДж) значение $P_{\text{отд}}$ оказывается равным $2,3 \cdot 10^4$ атм.

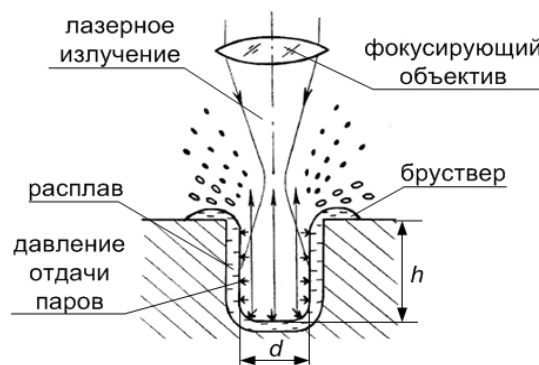


Рис. 5. Схема поступления вещества образца из кратера в эрозионную плазму под воздействием лазерного излучения

Выводы

На основании проведенных экспериментов и численных расчетов можно сделать вывод о том, что переход от одиночных к сдвоенным лазерным импульсам приводит к увеличению количества испаряемого вещества в 1,5-2,5 раза. Использование лазерных импульсов для сверления микроотверстий в металлах возможно только при энергии излучения $E_{\text{имп}} < 40$ мДж, так как при увеличении $E_{\text{имп}}$ возрастает количество расплава в зоне действия лазерного луча и увеличивается объем бруствера на поверхности.

Список литературы

1. Miziolek A.W., Pallechi V., Schechter I. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS): Fundamentals and Applications. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 620 p.
2. Ермалицкая, К.Ф. Молодежь в науке – 2009. Прил. к журн. Вести НАН Беларуси, в 5 ч. – 2010. – Ч. 5: Сер. физ.-тех. наук. – С. 132.
3. Вейко, В.П. // Изв. вузов. Приборостроение. – 2001. – 44. – С. 5.
4. Либенсон, М.Н. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть I. Механизмы поглощения и диссипации энергии в веществе. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 84 с.

THE EROSION OF METAL SURFACE UNDER IMPACT OF DOUBLE LASER PULSES

K.F. Ermalitskaia

Belarusian State University,

Nezavisimosti ave. 4; 220030, Minsk, phone (017)-209-53-48, ermalitskaia@gmail.com

The peculiarities of single and double, deposited in time, laser pulses with metal surfaces are considered in this work. The mechanism of substance arrival to the plasma depending on laser parameters and thermophysical properties of material is defined. The physical model allowing determining the thickness of evaporated by single and double laser pulses metal layer is suggested. The conclusions about the possibilities of double laser pulses for drilling microholes are made.