

УДК 539

ОСОБЕННОСТИ КОЛЕБАНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭРОЗИОННОГО ФАКЕЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

© П.М. Кузнецов, В.А. Федоров

Ключевые слова: эрозионный факел; фурье-спектр; лазерное излучение; механизмы горения.

Рассматриваются особенности развития эрозионного факела при воздействии лазерного излучения на металлическую поверхность. Получены сигналы фотоэда от излучения эрозионного факела, которые раскладывались в фурье-спектр и позволили предложить механизмы горения облучаемой области.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование эрозионного факела над поверхностью облучаемой мишени сопровождается появлением избыточного давления паров отдачи продуктов окисления [1]. Фиксируя развитие эрозионного факела, можно опосредованно проследить временное воздействие избыточного давления на поверхность расплава, которое влияет на прогиб поверхности расплава и, следовательно, геометрию обрабатываемой зоны.

Целью работы является выявление закономерностей формирования эрозионного факела при воздействии лазерного излучения различной интенсивности на металлическую поверхность, а также установление механизмов, ответственных за проявление этих закономерностей.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе использовались пластины сплава Fe-Si (массовая доля Si $\approx 3,4\%$) с размерами $30 \times 15 \times 0,27$ мм. Облучали образцы на установке ЛТА-4-1 с активным элементом на основе иттрий-алюминиевого граната, легированного неодимом, которая позволяет получать различные формы импульсов (на свободной накачке). Длина волны излучения 1,064 мкм с хаотической поляризацией. Энергию воздействия лазерного импульса определяли измерителем энергии и мощности ИЭМ-4-1. Все эксперименты производились при комнатной температуре при обдуве мишени смесью окружающего воздуха и аргона (скорость подачи 1 л/мин.).

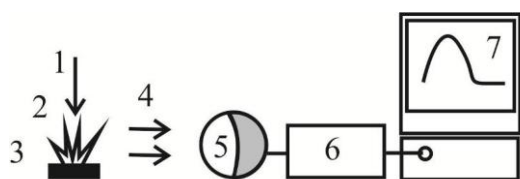


Рис. 1. Методика регистрации излучения эрозионного факела: 1 – лазерное излучение; 2 – эрозионный факел; 3 – образец; 4 – излучение факела; 5 – фотоэлемент (Ф-14); 6 – АЦП; 7 – персональный компьютер (ПК)

Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 1.

Излучение лазерной установки ЛТА-4-1, падающее на образец, вызывало образование эрозионного факела (вспышки). Видимое излучение от факела регистрировалось при помощи фотоэлемента Ф-14. Далее сигнал от фотоприемника поступал на 8-битный АЦП, подключенный к ПК. Обработка полученных сигналов производилась в программе Origin 8.5.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов представлены на рис. 2, где показаны зависимости сигналов фотоэда от времени при различной интенсивности падающего лазерного излучения.

Изменения интенсивности излучения носят информацию о процессах, происходящих в эрозионном факеле (интенсивность излучения зависит от скорости истечения материала образца и соответствующем избыточном давлении на поверхность кратера, скорости протекания химических реакции (горения металла)). На рис. 2 в верхней части графиков наблюдается появление колебаний фотоэда, а следовательно, и интенсивности излучения эрозионного факела. Можно предложить следующие механизмы таких колебаний: 1) развитые турбулентные потоки, появляющиеся в результате разлета продуктов горения [2]; 2) автоколебания эрозионного факела, связанные с наличием сильного поглощения лазерного излучения из-за наличия продуктов окисления, облучаемого материала [3]; 3) автоколебания плазмы [4]; 4) наличие над поверхностью кратера испаряющихся микрокапель расплава [5], выгорание которых приводит к изменению интенсивности излучения эрозионного факела.

Проверим первое предположение, для этого необходимо определить форму спектра в двойных логарифмических координатах. Это позволяет выделить основные области спектра, такие как область накачки (генерации), область каскада (инерционная область спектра), область диссипации. Инерционная область спектра содержит показатель Колмогорова. Эта величина, как известно из теории турбулентного течения [6], характеризует диссипацию энергии в среде. Для

определения показателя Колмогорова полученные данные разлагались в спектр Фурье при помощи быстрого фурье-преобразования. В качестве сигнала с выраженным колебательным характером и высокой амплитудой колебаний исследовался сигнал, полученный при облучении металлической мишени с плотностью мощности $3,28 \cdot 10^5 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$. Разложение в фурье-спектр сигнала рис. 3а представлено на рис. 3б.

Из рис. 3б видно, что характер частотной зависимости не имеет выраженного диссипативного интервала, но имеет только инерционный интервал [6–7]. Показатель степенной функции, огибающей максимумы амплитуд в высокочастотной части спектра (инерционная область), близок к единице ($-0,79$), что противоречит универсальному закону $-5/3$. Из вышесказанного можно заключить, что амплитудный спектр не имеет турбулентного характера.

Как правило, появление приповерхностной плазмы носит пороговый характер. Из литературных данных [4] известно, что значение пороговой плотности мощ-

ности лазерного излучения составляет порядка $10^6 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$. Для нашего случая интенсивность в $\sim 3\text{--}10$ раз меньше пороговой, поэтому появление приповерхностной плазмы не происходит.

Таким образом, остаются два варианта колебаний эрозионного факела – это 2) и 4). Из этих механизмов следует, что образование эрозионного факела связано с окислительными процессами на поверхности кратера и горением микрокапель расплава. Очевидно, что оба этих процесса играют роль в осцилляциях эрозионного факела. Необходимо выявить вклад каждого механизма, для этого производилось исследование изменения частотных характеристик сигнала при изменении плотности мощности, что позволяет предложить механизм горения материала при низких и высоких интенсивностях. В связи с этим производилось разложение фотоэда сигналов (рис. 2) в фурье-спектры (рис. 4).

На рис. 4 представлены частотно-амплитудные спектры для различных плотностей мощности.

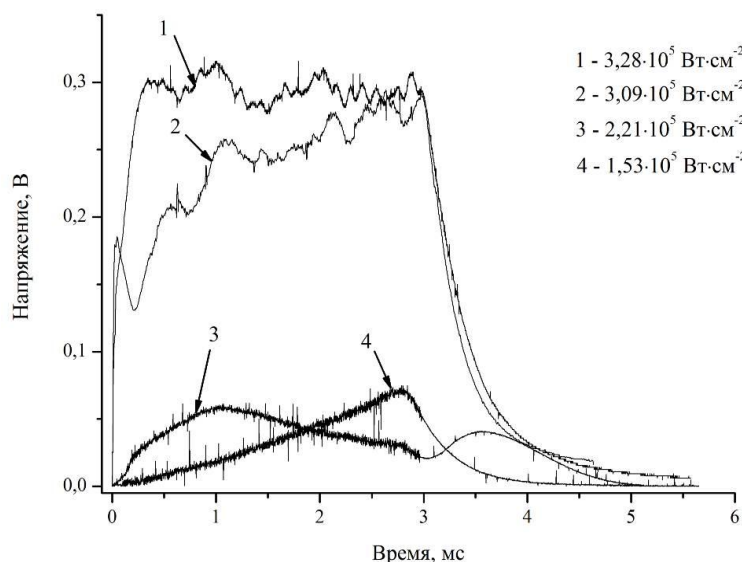


Рис. 2. Зависимости абсолютного значения фотоэда от времени при воздействии лазерного излучения на поверхность металлической пластины (для временной прямоугольной формы и различной плотности мощности)

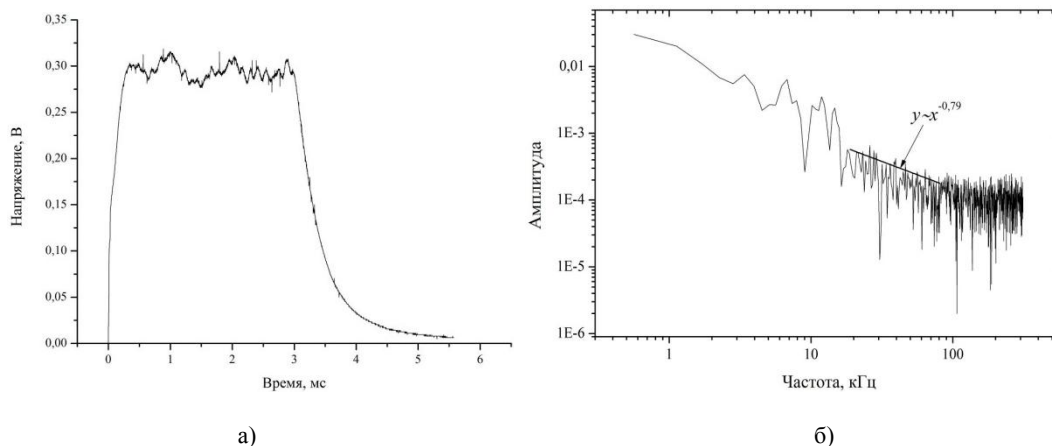


Рис. 3. Характерный вид сигнала фотоэда (энергия в импульсе прямоугольной формы 3 Дж) – а), б) фурье-спектр импульса

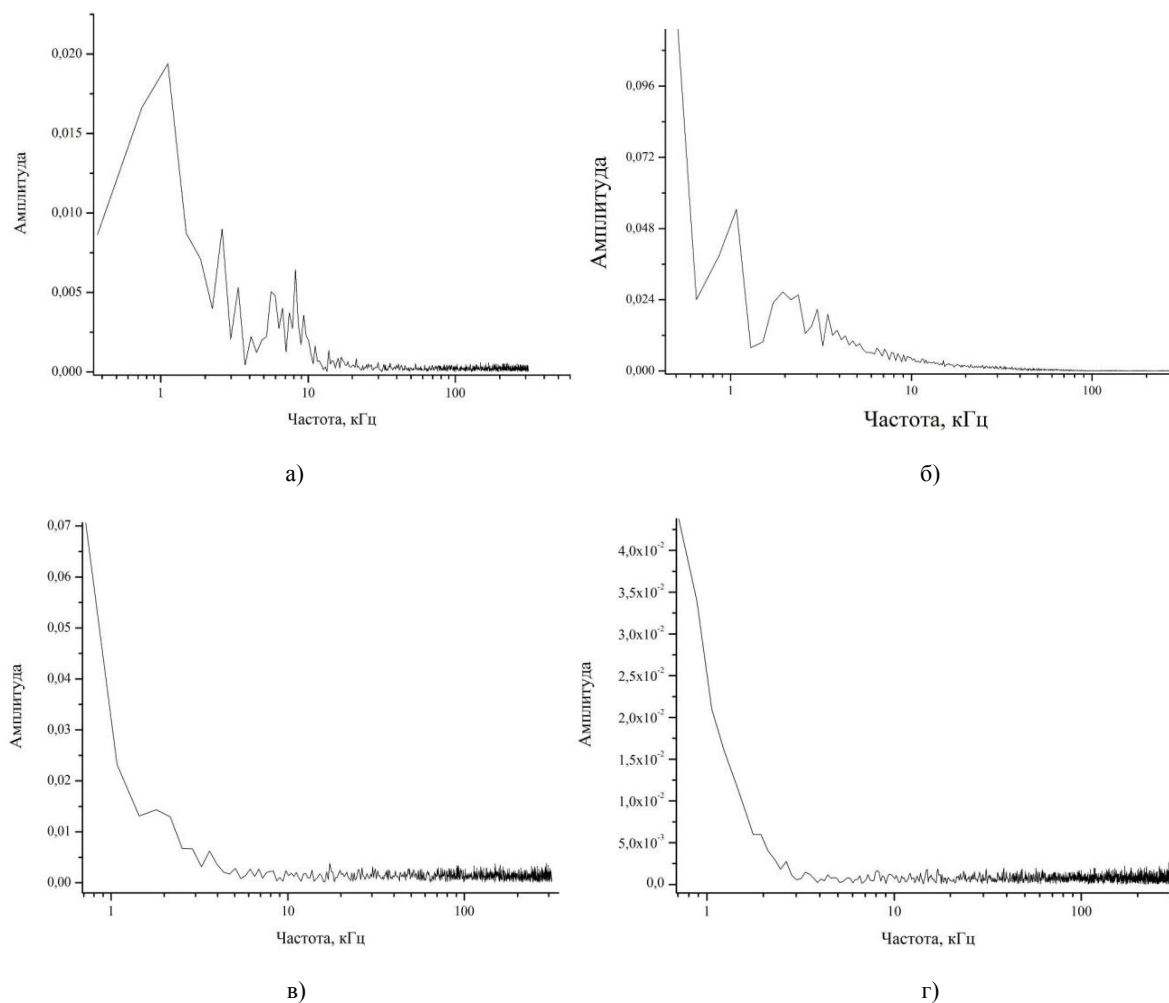


Рис. 4. Характерные фурье-спектры сигналов для плотностей мощности: а) $3,28 \cdot 10^5$ Вт·см⁻²; б) $3,09 \cdot 10^5$ Вт·см⁻²; в) $2,21 \cdot 10^5$ Вт·см⁻²; г) $1,53 \cdot 10^5$ Вт·см⁻²

Таблица 1

Характерные частоты колебаний при обучении сплава Fe-Si различной интенсивностью

Рис. 1а	Рис. 1б	Рис. 1в	Рис. 1г
Частота, кГц	Частота, кГц	Частота, кГц	Частота, кГц
$\nu_1 = 0,74493$	$\nu_1 = 1,07759$	$\nu_1 = 1,80115$	$\nu_1 = 1,94429$
$\nu_2 = 1,1174$	$\nu_2 = 1,72414$	$\nu_2 = 2,16138$	$\nu_2 = 2,6513$
	$\nu_3 = 2,37069$	$\nu_3 = 5,04323$	$\nu_3 = 3,35831$

Полученные фурье-спектры имеют сложный характер и почти все спектры имеют дискретный набор частот (рис. 4а–4в). Подобные дискретные спектры присущи суперпозиции квазипериодического сигнала и периодического сигнала, об этом говорят комбинации основных частот. Во всех указанных спектрах встречаются сигналы вида: $\nu_m = n_1\nu_1 \pm n_2\nu_2 \pm \dots \pm n_k\nu_k$ (для квазипериодического сигнала), а также $\nu_m = n\nu_k$ (для периодического сигнала), где n – действительное число; m, k – целое положительное число (0, 1, 2, ...).

Характерные частоты приведены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что при облучении образцов высокой интенсивности преобладают низкие частоты (рис. 4а–4в) с высокой амплитудой, при уменьшении интенсивности в спектре преобладают более высокие частоты (рис. 4г, 4д), но с меньшей амплитудой. Спектр фотоэда (рис. 4а–4в) при уменьшении интенсивности превращается из дискретного в непрерывный, при этом для рис. 4г отношение независимых частот является иррациональным числом, что также говорит об аperiodичности сигнала.

Переход спектра колебаний сигнала фотоэда от квазипериодического к аperiodическому свидетельствует о том, что при уменьшении интенсивности лазерного излучения ниже порога ($< 2,21 \cdot 10^5$ Вт·см⁻²) горения металла по всей поверхности приводит к горению металла на неоднородностях поверхности (царапины, инородные включения), где порог горения ниже, при этом в спектрах преобладают высокие частоты. При высоких интенсивностях ($> 2,21 \cdot 10^5$ Вт·см⁻²) лазерного излучения периодическому сигналу соответствует горение микрокапель расплава, которые вырываются с поверхности расплава, этому соответствует высокая амплитуда низких частот в спектрах.

ВЫВОДЫ

Регистацией фотоэдс установлены закономерности, показывающие, что интенсивность излучения эрозионного факела носит колебательный характер с характерным периодом 0,2–0,9 мс. На основе анализа фурье-спектра колебаний фотоэдс установлено, что доминирующими механизмами формирования колебаний эрозионного факела являются: при низких интенсивностях ($<2,21 \cdot 10^5$ Вт·см⁻²) лазерного излучения – горение на дефектах (неоднородностях) поверхности, а при высоких интенсивностях ($>2,21 \cdot 10^5$ Вт·см⁻²) лазерного излучения – горение микрокапель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ko S.H., Choi S.K., Yoo C.D. Effects of surface depression on pool convection and geometry in stationary GTAW // Welding research supplement. 2001. P. 39-45.
2. Медведев В.В. О яркостной температуре эрозионного факела при действии лазерного импульса миллисекундной длительности на баллистический порошок // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 1. С. 77-79.
3. Карлов Н.В., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С. Лазерная термохимия. М.: Наука, 1992. 296 с.
4. Реди Дж. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974. 468 с.
5. Dowden J.M. The Mathematics of Thermal Modeling: An Introduction to the Theory of Laser Material Processing. London; New York; Washington DC: Chapman & Hall/CRC Press, 2001. 291 p.
6. Фрик П.Г. Турбулентность: модели и подходы. Москва; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. 332 с.
7. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2012. 88 с.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-01-97519_p_a).

Поступила в редакцию 23 ноября 2012 г.

Kuznetsov P.M., Fedorov V.A. OSCILLATIONS INTENSITY FEATURES OF EROSION TORCH AT LASER IRRADIATION ON METAL SURFACE

The features of the erosion torch after laser irradiation on the metal surface are discussed. Signals of photo-emf received from the radiation plume erosion, which are arranged in the Fourier spectrum and allowed to propose mechanisms combustion irradiated area.

Key words: erosion torch; Fourier spectrum; laser; mechanisms of combustion.