

Исследование режима горения быстродвижущейся мишени под действием мощного лазерного излучения

В.В. Осипов, В.А. Шитов, В.В. Лисенков, А.В. Золотоноша*

Институт электрофизики УрО РАН
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

Поступила в редакцию 27.03.2008 г.

Исследуется испарение движущейся с высокой скоростью (~50 м/с) мишени под действием лазерного излучения. Установлены границы плотности мощности лазерного излучения I , при которых происходит переход к пульсирующему режиму испарения материала мишени: $I = 6 \div 12 \cdot 10^6$ Вт/см². Теоретически доказано, что появление прерывистого следа с плавно меняющейся периодичностью связано с нелинейным характером взаимодействия излучения с веществом вследствие влияния термохимических механизмов, в частности процесса горения металла.

Разработанная методика одновременной регистрации светимости плазменного факела в широком диапазоне интенсивности позволила преобразовать регистрируемый сигнал таким образом, чтобы отчетливо наблюдать микропульсации. Эти пульсации соответствуют по времени части отпечатка, где наблюдался прерывистый след с плавно меняющейся периодичностью.

Ключевые слова: СО₂-лазер, лазерное испарение, неустойчивое окисление, лазерный факел.

Введение

На сегодняшний день теме взаимодействия лазерного излучения с веществом посвящено достаточное число работ (см., например, монографию [1] и цитируемую там литературу), в которых рассмотрен обширный круг вопросов, связанных с исследованием явлений, возникающих при воздействии излучения лазера на различные среды. Большая часть этих работ посвящена процессам, наблюдающимся при взаимодействии лазерного излучения с непрозрачными конденсированными средами, главным образом с металлами. Причиной такового интереса является внедрение лазерных установок в такие отрасли промышленности, как металлургия, машиностроение, электроника и др.

Стремление повысить эффективность использования лазеров в технологии привело к глубокому исследованию факторов, влияющих на характер и результат лазерного воздействия. К таким факторам можно отнести: материал мишени, интенсивность излучения, длину волны и поляризацию светового пучка, режим генерации, состав и давление окружающей среды, состояние поверхности и др. Представление полной картины взаимодействия в этом случае является затруднительным и сводится к рассмотрению отдельных моделей, описывающих физико-химические механизмы воздействия излучения для каждой конкретной схемы.

В данной статье рассматривается взаимодействие лазерного излучения с мишенью, движущейся с высокой скоростью.

Экспериментальная часть

Схема использованной в экспериментах установки представлена на рис. 1.

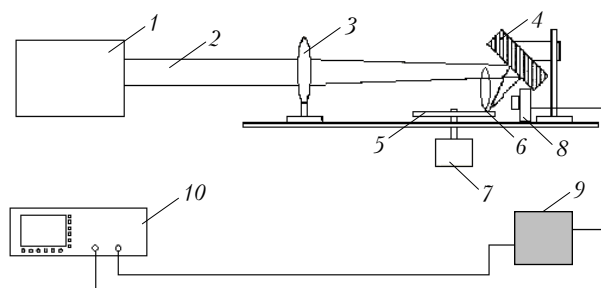


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - СО₂-лазер; 2 - лазерное излучение; 3 - фокусирующая КС1-линза; 4 - отражающее зеркало; 5 - вращающаяся мишень (стальной диск); 6 - плазменный факел; 7 - двигатель; 8 - ФЭК-29 СПУ-М; 9 - схема логарифмического усилителя; 10 - осциллограф

Излучение лазера 2 фокусировалось КС1-линзой 3 с помощью отражательного зеркала 4 на вращающийся диск 5, прикрепленный к двигателю 7. В результате воздействия лазерного излучения на мишень образовывался плазменный факел 6 перпендикулярно мишени, светимость которого регистрировалась с помощью фотоэлектронной камеры (ФЭК-29 СПУ-М). Сигнал с ФЭК визуализировался и записывался с помощью двухканального осциллографа 10.

* Владимир Васильевич Осипов (osipov@ier.uran.ru); Владислав Александрович Шитов (vlad@ier.uran.ru); Василий Викторович Лисенков (lisenkov@ier.uran.ru); Александр Владимирович Золотоноша (vlad@ier.uran.ru).

В качестве источника излучения был выбран электроионизационный CO₂-лазер «НЭИЛ-20» [2]. Выбор этого лазера обусловлен необходимостью работы в режиме одиночных импульсов с заданной амплитудой и длительностью. В качестве мишени использовался диск из нержавеющей стали диаметром 200 мм, вращаемый двигателем с частотой 10–400 об/с. Эксперименты проводились в воздухе при атмосферном давлении и при комнатной температуре. Цель проводимых исследований заключалась в выявлении режимов испарения в зависимости от интенсивности излучения на основании изучения пространственной развертки следа.

В ходе исследований обнаружена любопытная картина взаимодействия лазерного излучения с мишенью, которая не укладывается ни в одну из существующих моделей (рис. 2, а).

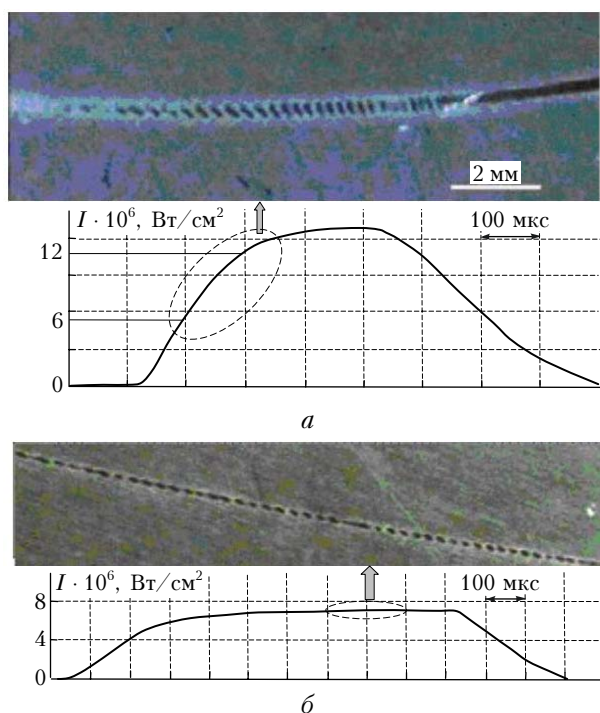


Рис. 2. Снимки различных частей следа излучения на мишени и соответствующие им осциллограммы импульсов излучения. Выделенные участки на осциллограммах соответствуют приведенным фотографиям следа

При росте интенсивности излучения в фокусном пятне от $0,8$ до $6,0 \cdot 10^6$ Вт/см² наблюдался сплошной след. Далее, вплоть до $1,2 \cdot 10^7$ Вт/см², появлялся прерывистый след, создавший впечатление прерывистого режима испарения, известного как «пульсирующий плазмотрон». Однако удивительным является то, что при дальнейшем росте интенсивности след становился вновь непрерывным.

Смена режимов испарения наблюдалась как на фронте, так и на спаде импульса излучения в указанном выше интервале интенсивностей ($6,0 \cdot 10^6$ – $1,2 \cdot 10^7$ Вт/см²). При использовании импульса излучения, амплитуда которого не превосходит $7 \cdot 10^6$ Вт/см², пульсирующий режим испарения на-

блюдался в течение времени, соответствующего прохождению плоской вершины импульса (рис. 2, б).

Если предварительно отжечь диск в печи, так чтобы на его поверхности образовалась окалина, то прерывистый режим не будет наблюдаться. Таким образом, основной причиной возникновения прерывистого следа является процесс горения материала мишени, который, как известно, при определенных условиях может быть неустойчивым.

Очевидно, что неустойчивость горения будет проявляться прежде всего тогда, когда тепловая энергия окисления становится сопоставимой с лазерной энергией. В этом случае начавшийся процесс горения приводит к обеднению кислородом соседних областей. Если обедненная область заносится в зону воздействия лазерного луча, то горение в ней не происходит из-за нехватки кислорода. Таким образом, за областью «вспышки» будет следовать область «релаксации», в которой начнет накапливаться кислород. Разумно предположить, что характерные размеры областей «вспышки» и «релаксации» будут сопоставимы с диаметром пятна фокусировки.

Если энергия лазерного излучения становится существенно больше энергии окисления, то процесс испарения мишени должен происходить устойчиво, поскольку он перестает зависеть от наличия кислорода в зоне воздействия лазерного луча.

Построение модели

Для математического описания лазерно-индуцированного горения нами была использована модель, включающая в себя уравнения для температуры, концентрации кислорода и толщины оксидной пленки:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{c_v} \left\{ P(t) + \frac{k_0(T)n_{O_2}QR}{x} - \frac{1 \cdot 10^5 \exp\left[\frac{-DH1}{8,3}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{kl}}\right)\right]}{kT} \times \right. \\ \left. \times v(T, ma1) \frac{DH1}{N_A} - \lambda \frac{(T - 300)}{5 \cdot 10^{-6}} \right\}, \quad (1)$$

$$\frac{dn_{O_2}}{dt} = -\frac{k_0(T)\rho_1 n_{O_2}}{ma1xr} + D(T) \frac{(9 \cdot 10^{24} - n_{O_2})}{r^2}, \quad (2)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k_0(T)n_{O_2}}{x} - \frac{1 \cdot 10^5 \exp\left[\frac{-DH1}{8,3}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{kl}}\right)\right]}{kT} \times \\ \times v(T, ma1) \frac{ma1}{\rho_1}, \quad (3)$$

где T – температура мишени; c_v – теплоемкость; $P(t)$ – плотность мощности излучения; $k_0(T)$ –

константа реакции; n_{O_2} — концентрация кислорода; QR — удельная теплота сгорания; DH_1 — удельная теплота испарения оксида; v — тепловая скорость молекул; λ — теплопроводность; ma_1 — масса атома оксида; ρ_1 — плотность оксида; x — толщина оксидной пленки; r — радиус фокального пятна; $D(T)$ — коэффициент диффузии; T_{k1} — температура испарения оксида.

Необходимые для расчета физические величины и константы были взяты из работ [3, 4].

Для упрощения модели движущееся относительно диска постоянное пространственное распределение интенсивности лазерного излучения в фокусном пятне было заменено на эквивалентное ему неподвижное, но изменяющееся во времени $P(t)$.

Расчеты показывают, что режиму горения предшествует режим окисления, сопровождающийся ростом толщины оксидной пленки (рис. 3). Далее, при увеличении температуры и, как следствие, скорости испарения оксида толщина пленки падает до нуля, открывая поверхность металла и инициируя тем самым процесс горения.

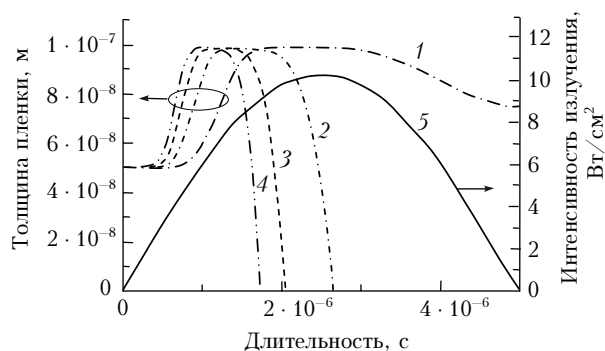


Рис. 3. Изменение толщины оксидной пленки в процессе движения мишени при различных интенсивностях лазерного излучения: 1 — $2,5 \cdot 10^6$ Вт/см²; 2 — $5 \cdot 10^6$ Вт/см²; 3 — $7,5 \cdot 10^6$ Вт/см²; 4 — 10^7 Вт/см². Жирной кривой (5) показана форма лазерного импульса $P(t)$

При малых интенсивностях лазерного излучения время полного испарения оксидной пленки больше времени воздействия лазерного излучения на участок мишени. В этом случае имеет место устойчивое окисление, что соответствует непрерывному участку в начале следа.

Области неустойчивого горения (при интенсивностях в диапазоне $6,0 \cdot 10^6 - 1,2 \cdot 10^7$ Вт/см²) соответствует ситуация, когда приблизительно к середине импульса (т.е. в зоне максимального воздействия лазерного луча на мишень) толщина оксидного слоя становится равной 0. В этих условиях система уравнений (1)–(3) будет иметь следующий вид:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{c_v} \times \left[P(t) + \frac{k_0(T)n_{O_2}(QR - DH_1)}{4 \cdot 10^{-10}} - \right.$$

$$\left. - \frac{1 \cdot 10^5 \exp \left[\frac{-DH}{8,3} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_k} \right) \right]}{kT} v(T, ma) \times \right. \\ \left. \times \frac{DH}{N_A} - \lambda \frac{(T - 300)}{5 \cdot 10^{-6}} \right],$$

$$\frac{dn_{O_2}}{dt} = - \frac{k_0(T)\rho_1 n_{O_2}}{ma_1 \cdot 4 \cdot 10^{-10} r} + D(T) \frac{(9 \cdot 10^{24} - n_{O_2})}{r^2},$$

где DH — удельная теплота испарения железа; ma — масса атома железа; ρ — плотность железа; T_k — температура испарения железа.

При этом полученные решения характеризуются наименьшей устойчивостью к изменению как начальных, так и граничных условий. Возникновение неустойчивых решений вполне соответствует качественной интерпретации как неустойчивый режим горения.

Если интенсивность излучения достаточно высока, то время полного испарения оксидной пленки много меньше времени воздействия лазерного импульса, т.е. имеет место устойчивое горение, также формирующее непрерывный след на мишени.

Регистрация свечения факела

На основе вышеизложенных результатов расчетов можно получить следующую картину свечения лазерного факела. В начале импульса, в режиме устойчивого окисления, свечение факела должно быть очень слабым или не наблюдаться вовсе. Далее режим свечения факела должен быть пульсирующим, что соответствует участку неустойчивого горения. Последующему участку устойчивого горения должно соответствовать непрерывное и достаточно интенсивное свечение факела.

Цель эксперимента заключалась в следующем: необходимо было зарегистрировать изменения светимости плазменного факела на протяжении всего действия импульса излучения и затем сопоставить осциллограммы светимости факела со снимками следов, оставленных на поверхности мишени.

В проведенной серии экспериментов наблюдался плазменный факел, имеющий широкий диапазон интенсивности светимости, возникающий над поверхностью мишени вследствие воздействия излучения лазера.

В качестве регистрирующего прибора использовался ФЭК-29 СПУ-М. Уровень прямого сигнала с ФЭК смотрелся на входном резисторе, имеющем сопротивление $R_1 = 1$ кОм.

На рис. 4 представлены снимок части следа (а) и соответствующий ему участок осциллограммы (б), отчетливо демонстрирующий пульсирующий характер процесса горения металлической мишени.

Пульсации на осциллограмме сигнала, регистрируемого на выходе ФЭК, совпадают с прерывистым следом на мишени. Далее интенсивность свечения плазменного факела приобретает монотонный характер, соответствующий режиму устойчивого горения и непрерывному следу на мишени.

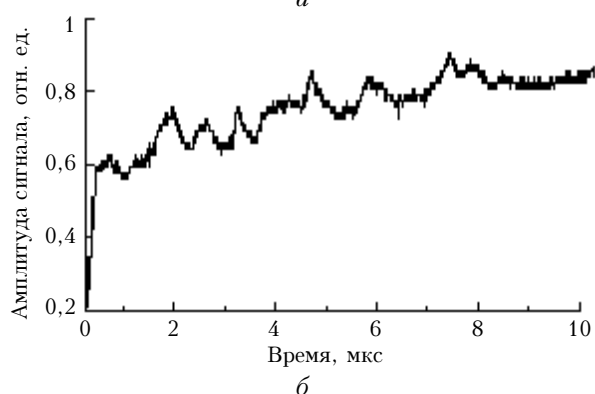
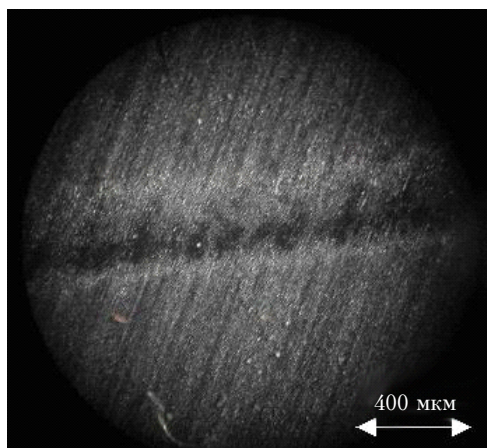


Рис. 4. Снимки участка следа на поверхности мишени (а) и соответствующая им осциллограмма сигнала с ФЭК, характеризующая свечение факела (б)

Видно, что при достижении определенной плотности мощности к возрастающей интенсивности светимости факела добавляется осциллирующая составляющая, отражающая влияние эффекта горения металлической мишени под действием лазерного излучения.

Заключение

Таким образом, экспериментально и теоретически показана связь пульсирующего режима испарения с процессом горения металлической мишени в окислительной среде под воздействием лазерного излучения. Однако следует заметить, что нами выполнено только предварительное теоретическое исследование возникновения неустойчивости процесса горения мишени с помощью оценочной модели. Более детальная теоретическая проработка данного вопроса является предметом дальнейших исследований.

1. Прохоров А.М., Конов В.И. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. М.: Наука, 1988. 537 с.
2. Осипов В.В., Лисенков В.В., Гаврилов Н.В., Бурев О.А., Шитов В.А., Малышкин А.А. Исследование характеристик излучения мощного CO_2 -лазера с управляемым импульсом накачки // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 2–3. С. 124–129.
3. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
4. Козан Я.Д., Колачев Б.А., Левинский Ю.В., Назимов О.П., Фишгойт А.В. Константы взаимодействия металлов с газами. М.: Металлургия, 1987. 368 с.

V. V. Osipov, V. A. Shitov, V. V. Lisenkov, A. V. Zolotonosha. Dynamics of evaporation of a fast-moving target under action of high power laser radiation.

Evaporation of moving with high speed (~ 50 m/s) targets under action of laser radiation have been investigated. The range of laser power density $I = 6 \div 12 \cdot 10^6$ W/cm² at which there is a pulse mode of evaporation of the material, were found. It is proved theoretically that the occurrence of an interrupted trace with regularly varying periodicity is the result of nonlinear character of radiation interaction with a substance under influence of thermochemical mechanisms, in particular, process of burning of metal.

The developed technique of simultaneous registration of luminosity of a plasma plume in a wide range of intensity allowed one to transform the registered signal to distinctly observed micropulsations. Observable pulsations correspond in time of the part of a trace, where the interrupted mode with varying periodicity was observed.