

## ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЫБРОСА МЕТАЛЛА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ГРАВИРОВКЕ

М.И. Дзюбенко, С.Н. Колпаков, А.В. Нестеров, В.П. Пелипенко, А.А. Приёмко

*Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков  
Украина*

Поступила в редакцию 22.12.2005

Показано, что взаимодействие мощного лазерного излучения с металлами сопровождается выбросом материала из зоны взаимодействия. Рассмотрены отдельные вопросы физики этого процесса. Показано, что посредством управления формой лазерного импульса можно осуществить регулировку процесса выброса. Понимание процесса взаимодействия мощного лазерного излучения с металлами и существующая в настоящее время элементная база дают основание говорить о практической реализуемости автоматизированной системы лазерной обработки материалов.

### ВВЕДЕНИЕ

Со времени появления лазеров проведены обширные как теоретические, так и экспериментальные исследования, связанные с изучением физики взаимодействия лазерного излучения с металлами. Результатом этих работ стала разработка ряда теорий описывающих нагрев, плавление, испарение материала. Эти вопросы достаточно широко освещены в работах Рыкалина Н.Н, Анисимова С.И., Рэди Дж [1 – 3]. На основании проведенных экспериментальных исследований был разработан и выпущен целый ряд установок для нагрева и испарения материалов. Так в Советском Союзе выпускались технологические установки серий “Квант”, “Кристалл”, “Корунд” для лазерной сварки, резки, пробивки отверстий. Решение широкого круга задач, стоящих перед машиностроительными предприятиями, выпускающими однотипные изделия очень большими партиями, требует повышения точности и воспроизводимости лазерной размерной обработки. Однако, существующие в настоящее время системы не способны в полном объеме решить эти задачи. Основными их недостатками являются относительно низкое качество размерной обработки (не выше 3 класса точности), отсутствие автоматической системы слежения за параметрами выходного излучения и необходимость обслуживания персоналом достаточно высокой квалификации.

В результате проведенной нами экспериментальной работы были сформулированы ряд требований, выполнение которых, как мы

надеемся, приведет к созданию лазерного технологического оборудования, позволяющего приблизиться к теоретически возможным погрешностям размерной обработки материалов. Возможность практической реализуемости подобного оборудования основана на появлении в последнее время новых типов лазеров, систем накачки к ним и возможности программного управления параметрами выходного излучения. Например, использование полупроводниковой накачки активных элементов лазеров позволяет программно менять форму импульса для оптимального решения технологической задачи при заданных внешних условиях и технических особенностях используемого оборудования.

Рассмотрим, например, задачу лазерной маркировки подшипников. Маркировка заключается в нанесении на внешнюю цилиндрическую поверхность ряда символов, характеризующих марку изделия. Объем выпуска подобных изделий таков, что лазерная технологическая система должна быть максимально автоматизирована. Критериями качества маркировки являются: контрастность изображения, глубина гравировки и воспроизводимость линейных размеров с абсолютной погрешностью 5 мкм.

Контрастность определяется соотношением ширины и глубины линии гравировки. Поэтому, необходимо решить задачу получения линии с заданной пространственной конфигурацией. Параметрами конфигурации линии являются: глубинна, ширина, конус-



Рис. 1. Примеры выброса металла при лазерной гравировке (ширина линии гравировки 30 мкм).

ность, шероховатость дна, высота выброса металла на края. В некоторых случаях выброс металла становится определяющим фактором гравировки. Например, маркировка подшипников требует такого режима, при котором выбросов на края линии не должно быть. В то же время, как показывают эксперименты, эти выбросы могут быть значительными, что приводит к изменению посадочных размеров подшипника (рис. 1).

На первой фотографии рис. 1 высота выбросов равна 20 мкм, на второй – 4 мкм, на третьей выбросов нет.

Целью статьи является изучение особенностей выброса металла на края линии гравировки.

## ГЛАВНАЯ ЧАСТЬ

Теории взаимодействия мощного излучения с веществом, разработанные в 60-80-ых годах, носили, в основном исследовательский характер. Общим для них является то, что результат взаимодействия зависит от соотношения плотности мощности и плотности энергии излучения. Поэтому практическое использование результатов, разработанных теорий, как правило, заканчивается на оценке этих параметров при решения конкретной задачи. Это хорошо видно, например, из работ [4 – 6]. Основой изучения нами процесса выброса металла являются эмпирические данные. Для гравировки использовался лазер на алюмо-иттриевом гранате, работающий в режиме с модулированной добротностью. Длина волны излучения 1,06 мкм. Модуляция добротности резонатора осуществлялась с помощью акусто-оптического модулятора. Частота модуляции варьировалась от 100 до 4000 Гц. Средняя мощность излучения составляла 0,6 Вт, при длительности импульса 300 нс (рис. 2).

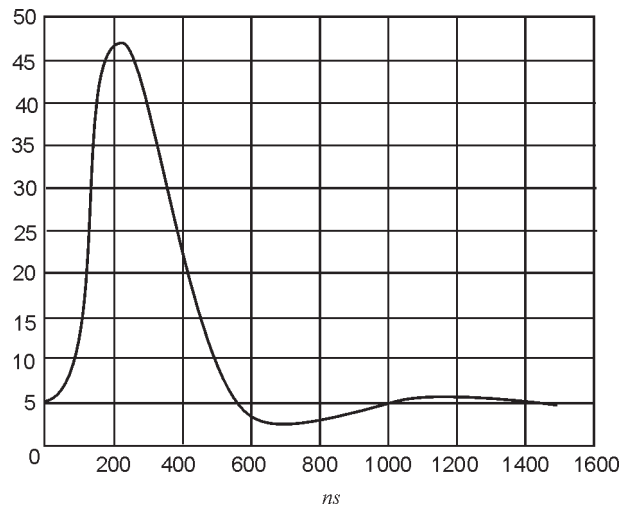


Рис. 2. Осциллограмма лазерного импульса.

Процесс взаимодействия лазерного излучения с поверхностью металла состоит из следующих этапов:

- нагревания объема взаимодействия до температуры плавления;
- нагревания объема взаимодействия до температуры кипения;
- испарение нагретого объема.

Выброс металла за пределы зоны взаимодействия происходит в процессе плавления и кипения материала из-за резкого изменения его объема и давления паров. Как показывают эксперименты, выбросы существенно зависят от материала. На рис. 3 приведены фотографии точечного воздействия лазерного излучения на различные металлы.

При воздействии лазерного импульса на металл над его поверхностью образуется облако из газообразного вещества, которое рассеивает и поглощает падающее излучение. Из-за поглощения и рассеяния на продуктах испарения, плотность мощности излучения, попадающего на материал, начинает уменьшаться. В связи с этим температура уменьшается, и объем жидкой фазы металла резко увеличивается. Дальнейшее воздействие

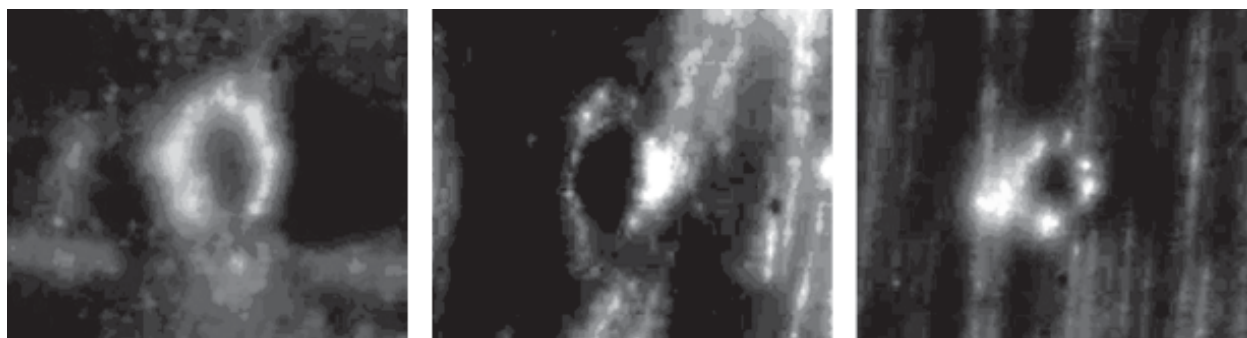


Рис. 3. Точечное воздействие лазерного излучения на латунь, серебро, медь.

излучения приводит к выбросу материала из зоны облучения. В случае, когда в одну точку попадает несколько импульсов, происходит углубление отверстия и рассеянное парами излучение поглощается стенками. Так как интенсивности рассеянного излучения не хватает на испарение, происходит плавление стенок и под давлением паров выброс материала.

Эксперименты показали, что частота импульсов, попадающих в одну точку, практически не влияет на количество выбросов (рис. 4). Скорость удаления продуктов испарения из зоны воздействия имеет величину порядка  $10^{10}$  мкм/с [3]. При глубине кратера 5 мкм он станет “чистым” через 0,05 нс. Это объясняет тот факт, что количество выбросов существенно не зависит от частоты следования импульсов.

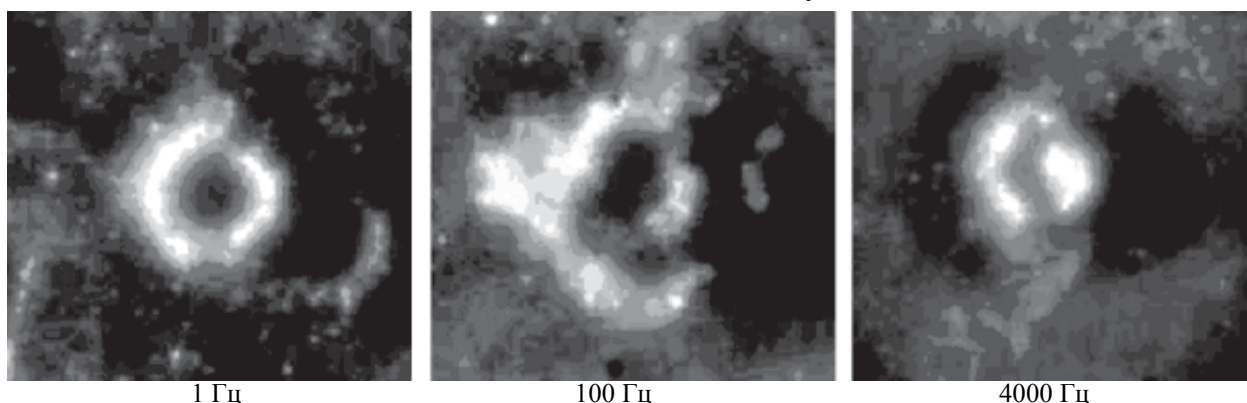


Рис. 4. Результат воздействия на латунь 100 импульсов с различными частотами (диаметр кратера с выбросами 70 мкм)

Примем допущение о том, что лазерный луч имеет гауссовское пространственное распределение интенсивности. Тогда температура как функция расстояния  $r$  от центра нагреваемого пятна, глубины  $z$  от поверхности, и времени  $t$  определяется формулой [3]:

$$T(r, z, t) = \frac{d^2 F}{K} \sqrt{\frac{\chi}{\pi}} \times \quad (1)$$

$$\times \int_0^t \frac{\exp(-z^2/[4\chi \cdot h]) \cdot \exp(-r^2/[4\chi \cdot h + d^2])}{(4\chi \cdot h + d^2) \sqrt{h}} dh,$$

где  $d$  – диаметр луча;  $K$  – коэффициент теплопроводности;  $F$  – плотность потока лазерного излучения;  $\chi$  – коэффициент температуропроводности ( $\chi = K/c\rho$ , где  $c$  – удельная теплоемкость);  $z$  – глубина;  $r$  – расстояние от центра нагреваемого пятна.

В формуле (1) плотность потока излучения  $F$  считается постоянной. Практически же, она является функцией времени и зависит от параметров импульса накачки активного элемента лазера. Одним из вариантов такой зависимости, полученной нами эмпирически, является следующая:

$$F(t) = 3 \cdot 10^{11} \sqrt{t}. \quad (2)$$

На рис. 5 представлены зависимости скорости нагрева меди и серебра на глубине 5 мкм, рассчитанные на основании (1) и (2). Точками отмечены температуры плавления, после которых коэффициент теплопроводности меняется, и процесс нагревания идет по другому закону.

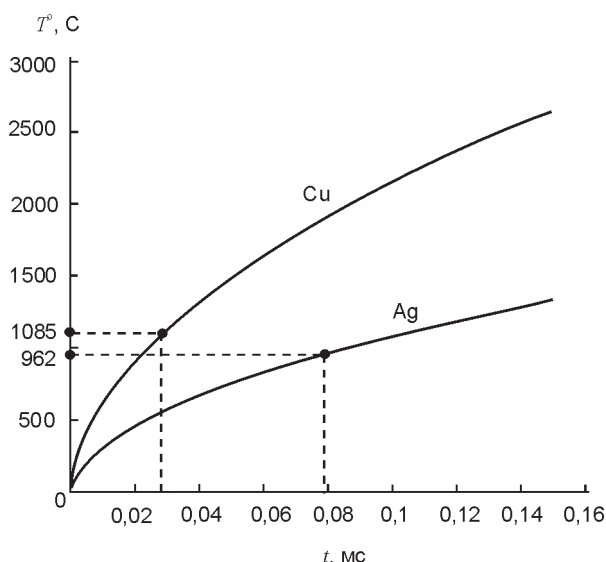


Рис. 5. Скорость нагрева материала на глубине 5мкм.

При достижении плотности излучения на материале  $10^{10} - 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup> теплопроводность “не успевает” отводить энергию от поглощающей свет поверхности и начинается испарение материала. Время нагрева материала до температуры испарения определяется выражением [3]:

$$t_{\text{исп}} = \frac{\pi \cdot Kc\rho}{4 \cdot F^2} (T_{\text{исп}} - T_{\text{пл}})^2, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность вещества;  $T_{\text{исп}}$  – температура испарения вещества;  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления вещества.

Так как испарение вещества начинается после его расплавления, коэффициент теплопроводности в этом случае необходимо брать для жидкой фазы металла. Графики зависимостей времени нагрева металла до температуры испарения  $t_{\text{исп}}$  от плотности мощности  $F$  лазерного излучения, построенные на основании (3) (рис. 6), показывают, что испарение металла очень сильно зависит от плотности мощности. После начала испарения оптическое излучение начинает поглощаться и рассеиваться. Таким образом, оптимальная длительность импульса лазерного излучения  $\phi$ , для реализации гравировки без выброса вещества, определяется из выражения:  $\tau = t_{\text{пл}} + t_{\text{исп}}$ .

Энергия излучения, попадающая на материал после этого времени, идет на плавление материала. Скорость нарастания плотности мощности в импульсе после  $t_{\text{кип}}$  должна быть максимальной, а после начала испарения воздействие на материал должно быть

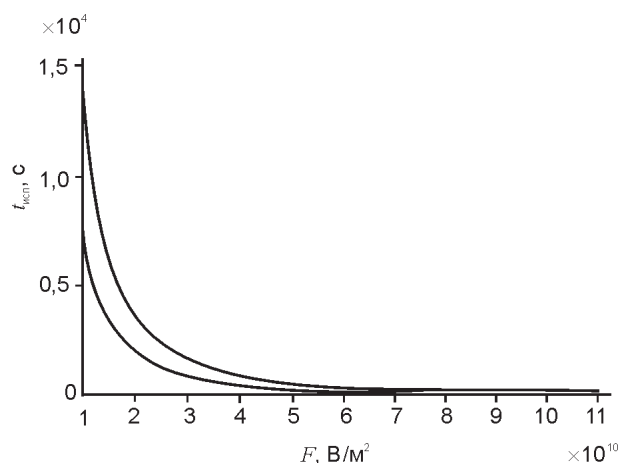


Рис. 6. Время нагрева материала от температуры плавления до испарения

прекращено. Теоретический анализ и эксперименты показали, что для реализации лазерной гравировки без выброса металла необходимо сформировать импульс лазерного излучения следующего вида (рис. 7). В зависимости от материала, на котором производится гравировка, будет изменяться и форма импульса  $F(t)$ . Это означает, что основной задачей управления лазерной системой является поддержание такой формы лазерного импульса  $F(t)$ , которая обеспечивает выполнение технических требований маркировки.

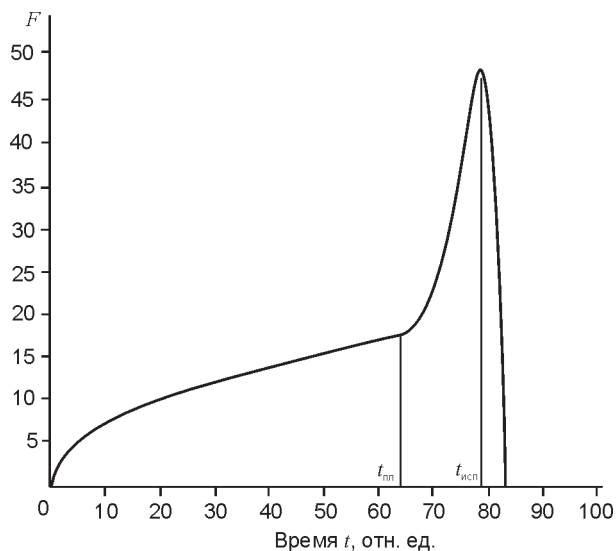


Рис. 7. Форма импульса.

### ВЫВОДЫ

На основании проведенного анализа взаимодействия лазерного излучения с рядом металлов установлено, что основными факторами, влияющими на выброс металла за пределы зоны взаимодействия, являются:

- теплофизические свойства металла;

– форма импульса воздействия, особенно крутизна его заднего фронта.

Поэтому, автоматическое регулирование выброса материала из зоны гравировки заключается в формировании оптимальной формы лазерного импульса и поддержании ее в процессе работы. Алгоритм регулирования может быть следующий:

- в систему управления вводятся параметры, характеризующие теплофизические свойства материала (коэффициент теплопроводности, теплоемкость, плотность, температуры плавления и кипения);
- на основании формул (1) и (3) рассчитываются ориентировочные времена нагрева материала до температур плавления и кипения для заданной глубины и длительность импульса.
- на основании реальных технических характеристик источника накачки формируется квазиоптимальная форма импульса;
- производится экспериментальная гравировка;
- с помощью датчиков обратной связи, анализируется качество гравировки по заданным критериям. В качестве датчиков могут использоваться видеокамеры с последующим анализом изображения, фотометры, измеряющие параметры рассеянного излучения, акустические датчики и т.п.;
- при несоответствии качества гравировки необходимым критериям производится корректировка формы импульса. Процесс корректировки может быть как непре-

рывным, так и дискретным в зависимости от выбранного алгоритма и технических характеристик системы накачки.

Разработанные и выпускаемые технологические установки, экспериментальные и теоретические результаты, полученные к настоящему времени, дают основание говорить о практической реализуемости автоматизированной системы лазерной обработки материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рыкалин Н.Н, Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1975, 296 с.
2. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. – Изд-во “Наука”, 1970.
3. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. – М.: Мир, 1974. – 470 с.
4. Горный С.Г., Григорьев А.М., Лопота В.А., Туригин Г.А. Особенности получения отверстий в металлических материалах модулированным лазерным излучением // Физика и химия обработки материалов. – 1998. – № 5. – С. 23-26.
5. Углов А.А. Особенности импульсного воздействия лазерного излучения на металлы // Физика и химия обработки материалов. – 1998. – № 4. – С. 20-22.
6. Углов А.А., Смуров И.Ю., Гуськов А.Г., Аксенов Л.В. Плавление и термокапиллярная конвекция при воздействии импульсного лазерного излучения с немонотонным пространственным распределением // Квантовая электроника. – 1990. – Том 17, № 8. – С.1058-1062.

#### ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИКИДУ МЕТАЛА ПІД ЧАС ЛАЗЕРНОГО ГРАВІРУВАННЯ

М.І. Дзюбенко, С.М. Колпаков,  
О.В. Нестеров, В.П. Пелипенко,  
О.О. Приёмко

Показано, що взаємодія потужного лазерного випромінювання з металами супроводжується викидом матеріалу із зони взаємодії. Розглянуто окремі питання фізики цього процесу. Показано, що через керування формою лазерного імпульсу можна здійснити регулювання процесу викиду. Розуміння процесу взаємодії потужного лазерного випромінювання з металами та існуюча на сьогоднішній день елементарна база складають підґрунтя щодо практичної реалізації автоматичної системи лазерної обробки матеріалів.

#### STUDY OF FEATURES OF LET OF METAL BY ACTIVITY ENGRAVING LASER

Dzyubenko M., Kolpakov S., Nesterov A.,  
Pelipenko V., Priyomko A.

The summary. It is shown, that the interaction of high-power laser radiation with metals is accompanied by let of a material from a zone of interaction. The separate problems of physics of this process are considered. It is shown, that by means of control the form of a laser impulse it is possible to execute adjustment of process of let. Understanding of process of interaction of high-power laser radiation with metals and existing now element base give the basis to speak about practical marketability of an automated system of laser processing of materials.