

Специфика поверхностной обработки металла сериями лазерных импульсов наносекундной длительности

С.Г.Горный, А.М.Григорьев, М.И.Патров, В.Д.Соловьев, Г.А.Туричин

Теоретически и экспериментально исследован процесс образования расплава в условиях воздействия на металл серии лазерных импульсов наносекундной длительности. Разработана методика определения параметров серии, при которых количество расплава минимально, а материал под действием лазерного излучения удаляется в парообразном состоянии.

Ключевые слова: лазерная обработка металлов, неодимовый лазер.

1. Введение

Поверхностная обработка металла лазерным проекционным методом предполагает одновременное получение всего графического изображения или его значительной части на поверхности изделия. Точность и качество изображения во многом определяются режимом обработки. Наиболее высокие качественные показатели и воспроизводимость результата достигаются при работе в режиме испарения [1]. В этом случае для облучения поверхности требуются мощные импульсы лазерного излучения наносекундной длительности. Для получения глубоких линий рисунка используют частотно-импульсный режим генерации. Все сказанное в полной мере можно отнести и к процессу формирования прецизионных отверстий лазерным проекционным методом.

Серию идентичных импульсов излучения малой длительности, следующих с постоянным временным интервалом, можно получить, используя Nd:YAG-лазер с модуляцией добротности резонатора пассивным затвором. Считается, что обработка поверхности материала серий таких импульсов обеспечивает высокую точность и воспроизводимость результатов [2].

Для получения качественных результатов необходимо реализовать такой режим генерации, чтобы каждый импульс испарял металл, а количество расплава было при этом минимальным. Временной интервал между импульсами должен превышать время остывания поверхности до температуры кристаллизации, а скважность должна удовлетворять условию $t_s/\tau \geq 3.2 \times 10^{-3} \times (L/\rho c T_m)$. Эти условия получены в предположении, что степень действия каждого импульса на металл никак не зависит от воздействия остальных импульсов серии [1]. Здесь τ и t_s – длительность импульса и временной меж-импульсный интервал; L и T_m – удельная теплота испарения и температура плавления материала; ρ и c – плотность и теплоёмкость металла.

Однако в последнее время появился ряд работ [3, 4], в которых экспериментально обнаружено, что при облуче-

нии металла сериями наносекундных импульсов, удовлетворяющими приведенным выше условиям, образуется значительное количество расплава, существенно влияющее на скорость обработки металла, в частности на скорость формирования отверстия [4].

В настоящей работе предпринята попытка экспериментально и теоретически выяснить механизм образования расплава при воздействии на металл серии лазерных импульсов.

2. Теория вопроса

При воздействии на металл импульсов лазерного излучения, длительность которых превышает 10^{-10} с, необходимо учитывать процесс распространения тепла из зоны поглощения излучения [5]. В этом случае часть световой энергии затрачивается на испарение металла, а часть – на его нагрев. Воздействие на поверхность металла периодически повторяющихся импульсов излучения может приводить к значительному разогреву облучаемой зоны и прилегающей области с образованием большого количества расплава.

Для понимания механизма образования расплава надо решить задачу о распространении тепла в глубь металла при нагревании его поверхности периодически повторяющимися импульсами излучения с учетом затрат энергии на испарение.

Задача решается в два этапа. Сначала определяется доля энергии лазерного импульса, которая поглощается металлом и нагревает его. Затем оценивается изменение температуры материала при воздействии на его поверхность импульсно-периодического источника тепла с энергией единичного импульса, равной энергии лазерного импульса, оставшейся в материале.

В режиме интенсивного испарения почти вся энергия лазерного импульса расходуется на удаление металла из облучаемой зоны. Температура поверхности в этом случае достигает $(2 - 3)T_b$ [9] (T_b – температура кипения материала при нормальных условиях). Оптимальную плотность мощности лазерного излучения Q , необходимую для реализации режима интенсивного испарения металла, можно рассчитать по формуле [5]

$$Q = [3\chi(L\rho)^2\tau]^{1/2}, \quad (1)$$

где $\chi = \lambda/c\rho$ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности.

Для импульса излучения наносекундной длительности оценка дает $Q \approx 10^9$ Вт/см². Однако реализовать обработку материала излучением такой интенсивности затруднительно, т. к. над поверхностью возникает оптический пробой, плазма которого эффективно поглощает и рассеивает лазерное излучение [5]. Поэтому на практике приходится ограничиваться в несколько раз меньшей интенсивностью лазерного излучения (примерно равной $(1 - 6) \times 10^8$ Вт/см²). В этом случае температуру облучаемой поверхности можно оценить, воспользовавшись следующим соотношением [1]:

$$T = \frac{2(1 - R)Q(\chi\tau)^{1/2}}{\lambda\sqrt{\pi}}, \quad (2)$$

где R – коэффициент отражения излучения от поверхности металла.

При $\tau \approx 10^{-8}$ с температура облучаемой поверхности железа ($R \approx 0.7$, $\chi \approx 0.22$ см²/с и $\lambda \approx 0.75$ Вт·см⁻¹·град⁻¹) к моменту окончания импульса должна составлять ~ 6000 °С, что соответствует нижней границе режима интенсивного испарения. Это означает, что только к концу лазерного импульса процесс испарения становится интенсивным, и основная масса материала удаляется из облучаемой области уже после окончания импульса излучения. В этом случае можно считать, что испарение не влияет на процесс нагревания, и при теоретическом рассмотрении вопроса можно ограничиться решением только тепловой задачи и не рассматривать процесс продвижения фронта испарения в глубь материала.

При решении первой части задачи используем следующие стандартные ограничения и допущения [6].

1. Процесс теплопроводности считается одномерным, поскольку рассматривается поверхностная обработка металла проекционным методом, при которой глубина линий рисунка гораздо меньше размера облучаемой поверхности D и протяженности среды, т. е. выполняется условие $D \gg (\chi\tau)^{1/2}$ [5].

2. Испарение не влияет на процесс нагревания до тех пор, пока температура не превышает равновесной температуры испарения. Равновесная температура испарения в рассматриваемом случае составляет $(2 - 3)T_b$ [7, 9].

3. Зависимость теплофизических и оптических параметров материала от температуры незначительна.

4. Источник нагрева является плоскостным с равномерным распределением тепловыделения; это справедливо, поскольку излучение поглощается в поверхностном слое, толщина которого много меньше длины волны излучения.

При перечисленных условиях одномерное линейное уравнение теплопроводности, описывающее нагрев полубесконечной среды ($z > 0$), имеет следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t'} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial z'^2}. \quad (3)$$

Действие однородного поверхностного источника тепла учитывается граничным условием

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{z=0} = -\frac{Q}{\lambda}. \quad (4)$$

Начальное условие имеет следующий вид: $T(0, x) = T_1$ (где T_1 – температура среды до начала облучения).

Для решения поставленной задачи удобно использовать безразмерные величины времени и координаты: $t = t'/\tau$, $t' = \tau t$, $x = z/d$, где $d = (\chi\tau)^{1/2}$ – характерная глубина проникновения тепла в материал за время действия импульса.

В этом случае уравнение (3) примет следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\chi\tau}{d^2} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \equiv \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (5)$$

где

$$\alpha = \left(\frac{\chi\tau}{d^2} \right).$$

Решение уравнения (5) может быть найдено с применением операционного метода Лапласа [8]:

$$T(t, x) = T_1 + \frac{dQ}{\lambda} \left[2 \left(\frac{t}{\pi} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{x^2}{4t}\right) - x \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{t}}\right) \right]. \quad (6)$$

Если положить $T_1 = 0$, окончательно получим

$$T(t, x) = T_0 \left[\sqrt{t} \exp\left(-\frac{x^2}{4t}\right) - x \frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{t}}\right) \right]. \quad (7)$$

Здесь

$$T_0 = \frac{2dQ}{\lambda\sqrt{\pi}}$$

– температура поверхности к моменту окончания импульса.

Типичное распределение температуры в железной мишени к моменту окончания импульса излучения, рассчитанное по формуле (7), приведено на рис. 1.

Логично предположить, что слой материала, нагретый выше температуры кипения T_b , испарится. Толщина слоя расплава незначительна (~ 0.5 мкм) и не может быть удалена под действием давления паров [4]. Очевидно, что процесс удаления материала из облучаемой зоны идет в испарительном режиме, причем испарение в основном протекает уже после окончания импульса ла-

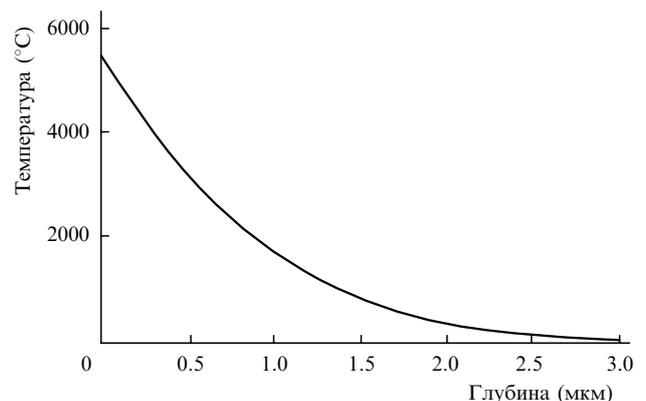


Рис. 1. Распределение температуры в мишени в момент окончания лазерного импульса.

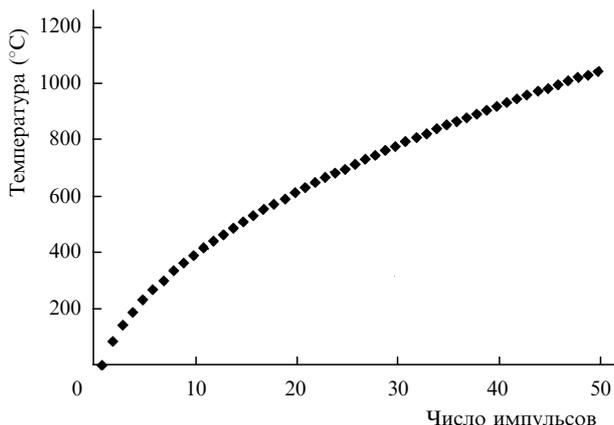


Рис.2. Зависимость температуры поверхности мишени от числа импульсов в серии.

зерного излучения, поскольку только к этому моменту температура поверхности достигает значения, при котором реализуется режим интенсивного испарения. Остальное тепло уходит в глубь материала. Воздействие на мишень периодически повторяющихся импульсов излучения приводит к постепенному разогреву материала, прилегающего к облучаемой области. В этом случае тепловое поле в мишени к моменту прихода n -го импульса определяется выражением [4]

$$T(z, t) = T_b t_b^{1/2} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{(nt_s)^{1/2}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\chi^2 nt_s}\right). \quad (8)$$

Здесь t_b – время, за которое поверхность мишени нагревается до температуры T_b ; t_s – временной интервал между импульсами серии.

После несложных преобразований выражение (8) можно представить в виде

$$T(z, t) = \frac{T_b^2 \lambda \sqrt{\pi}}{2Q\sqrt{\chi}} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{(nt_s)^{1/2}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\chi^2 nt_s}\right). \quad (9)$$

Формулой (9) можно пользоваться только в случае, если температура поверхности за время действия лазерного импульса превысит T_b .

Если температура в рассматриваемой области станет сопоставимой с температурой кристаллизации материала, следует ожидать образования расплава в количестве, достаточном для его удаления из облучаемой зоны под действием давления паров [4]. В этом случае процесс удаления материала перестает быть только испарительным.

Зависимость температуры поверхности мишени ($z = 0$) от числа импульсов в серии приведена на рис.2. Видно, что температура поверхности мишени растет по мере увеличения числа поглощенных лазерных импульсов. Для серии с числом импульсов более шестидесяти температура приповерхностной зоны превышает температуру кристаллизации железа. Очевидно, что в этом случае материал будет удаляться из облучаемой зоны в жидком виде и процесс разрушения железной мишени значительно ускорится. Применительно к поверхностной обработке металла это означает, что качество изображения, наносимого на поверхность изделия, ухудшится из-за значительных термических искажений.

На основе анализа изменения температуры облучаемой области можно определить те параметры серии ла-

зерных импульсов, при которых удаление материала из облучаемой зоны происходит в испарительном режиме.

3. Экспериментальное исследование механизма образования расплава

Схема экспериментальной установки представлена на рис.3. В качестве источника излучения применен импульсный неодимовый лазер 1 с ламповой накачкой и модуляцией добротности резонатора пассивным затвором. Лазер генерирует серии импульсов общей продолжительностью до 3 мс. Длительность и энергия отдельного импульса серии примерно равны 35 нс и 9 мДж. Период следования импульсов серии варьируется путем изменения амплитуды импульса тока накачки и применения активных элементов YAG:Cr⁴⁺ с различной оптической плотностью.

Пучок излучения проходит через диафрагму 2, отражается от поворотного зеркала 3 и попадает на линзу 6, которая строит уменьшенное изображение диафрагмы на поверхности мишени 7. Коэффициент отражения зеркала 3 на длине волны 1.06 мкм составляет 96%. Пршедшее через зеркало излучение направляется в измеритель энергии 5, с помощью которого осуществляется регистрация энергии серии импульсов. Часть света ответвляется оптическим клином 4 и направляется на фотодиод 8, сигнал с которого поступает на вход осциллографа 9.

На поверхности мишени линзой 6 формируется круглое пятно излучения диаметром 360 мкм с резким краем и относительно равномерным распределением интенсивности с плотностью мощности $Q \approx 2.0 \times 10^8$ Вт/см². В результате воздействия излучения на поверхность мишени образуется кратер, глубина которого зависит от параметров лазерных импульсов. В качестве мишеней применялись массивные пластины из железа и меди размером 50 × 40 × 10 мм. При облучении мишени серией импульсов на мишени последовательно возникают серии кратеров. Первый кратер формируется одним импульсом, второй – двумя, третий – тремя и так далее.

Эффективность и характер процесса удаления материала из облучаемой зоны определялись путем измерения геометрических характеристик образовавшегося кратера и оценки количества удаленного материала. На рис.4 приведены экспериментальные и расчетные зависимости роста массы удаленного материала от числа импульсов в серии для железа и меди. Расчетные значения определялись для испарительного режима удаления ма-

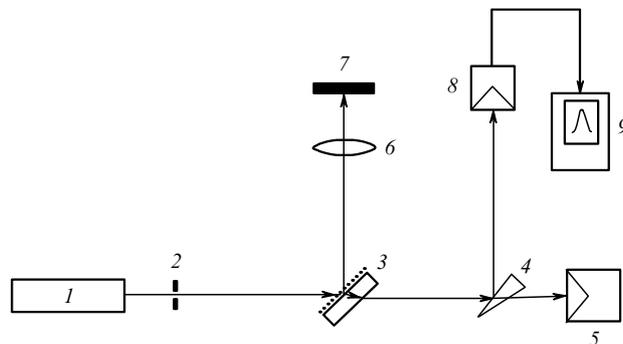


Рис.3. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер; 2 – диафрагма; 3 – поворотное зеркало; 4 – оптический клин; 5 – измеритель энергии AN/2; 6 – фокусирующая линза; 7 – мишень; 8 – фотодиод ЛФД-2; 9 – осциллограф.

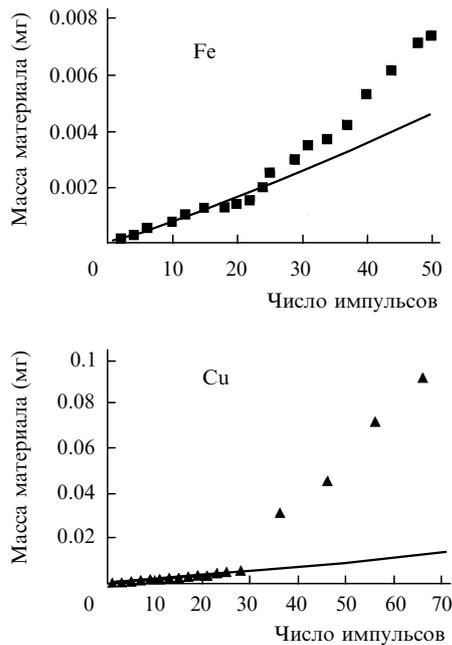


Рис.4. Экспериментальные (точки) и расчетные (кривые) зависимости массы удаленного материала от числа импульсов в случае железной и медной мишеней.

териала из облучаемой зоны. Считалось, что в результате действия текущего импульса испаряется слой материала, нагретый выше $T_b = 3050^\circ\text{C}$ для железа и $T_b = 1050^\circ\text{C}$ для меди, причем учитывался эффект подогрева облучаемой зоны всеми предыдущими импульсами серии.

Из приведенных результатов видно, что в случае воздействия на мишень серии с числом импульсов менее 20 удаление материала происходит в режиме испарения. При увеличении числа импульсов сказывается эффект разогрева поверхности, что приводит к появлению слоя расплава, который может быть удален давлением паров [4]. В результате увеличивается скорость роста глубины кратера, поскольку происходит выплеск расплава, т.е. процесс удаления материала перестает быть только испарительным. Особенно интенсивный рост глубины кратера наблюдается для серий с числом импульсов более 50, т.к. температура дна кратера в промежутке между импульсами серии, согласно оценкам, приближается к температуре плавления.

На рис.5 приведены фотографии кратеров, образовавшихся при воздействии серий с различным числом импульсов на мишень из железа. Кратер на рис.5,а образован серией из шести импульсов. Нет термических искажений – края кратера резко очерчены. На рис.5,б изображен кратер, сформированный 34 импульсами излучения. В этом случае по периметру кратера отчетливо видны выплески расплава, что подтверждает его наличие. Аналогичные фотографии получены и в экспериментах с медной мишенью.

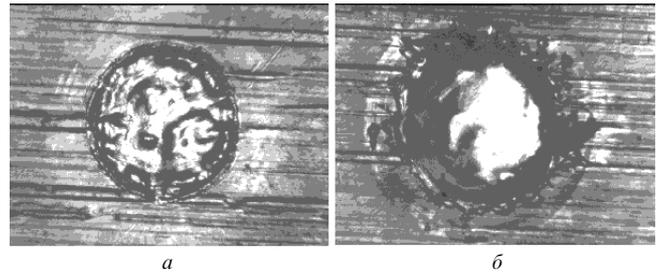


Рис.5. Фотографии характерных кратеров, образовавшихся при 6 (а) и 34 (б) импульсах в серии.

4. Выводы и рекомендации

В условиях взаимодействия с металлом больших серий лазерных импульсов наносекундной длительности происходит постепенный разогрев облучаемой зоны, причем температура в ней может превысить температуру плавления металла. В этом случае основная масса металла удаляется из облучаемой зоны в виде расплава под действием давления паров.

Процессы поверхностной обработки и формирования отверстий проекционным методом в металлических заготовках ведутся, как правило, с применением многоимпульсного способа воздействия при характерной интенсивности в облучаемой зоне порядка 10^8 Вт/см². В этом случае с целью обеспечения высокого качества и воспроизводимости результатов обработки необходимо ограничивать число импульсов излучения в серии двадцатью-тридцатью. Это ограничение позволит работать в чисто испарительном режиме.

Если требования к точности обработки не очень велики, можно увеличить число импульсов в серии до 50. В этом случае значительная часть металла будет удаляться из облучаемой зоны в виде расплава, что приведет к заметному (в 2–3 раза) увеличению производительности процесса.

Для приблизительной оценки допустимого числа импульсов в серии можно использовать выражения (7)–(9).

1. Вейко В.П., Либенсон М.Н. *Лазерная обработка* (Л.: Лениздат, 1973, гл.3).
2. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. *Лазерная обработка неметаллических материалов* (М.: Высшая школа, 1988, гл.1).
3. Босак Н.А., Васильев С.В., Иванов А.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **27**, 69 (1999).
4. Горный С.Г., Григорьев А.М., Лопота В.А., Туричин Г.А. *Физика и химия обработки материалов*, № 5, 23 (1998).
5. Делоне Н.Б. *Взаимодействие лазерного излучения с веществом* (М.: Наука, 1989, гл. 20).
6. Вейко В.П. *Лазерная обработка пленочных элементов* (Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986, с.12).
7. Вейко В.П., Имас Я.А., Кокора А.Н., Либенсон М.Н. *ЖТФ*, **37**, 1920 (1967).
8. Корн Г., Корн Е. *Справочник по математике* (М.: Наука, 1978, гл.10).
9. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. *Действие излучения большой мощности на металлы* (М.: Наука, 1970, гл.5).