

## Лекция № 17

### Поглощение лазерного излучения в непрозрачных материалах.

#### 1. Введение.

Физические явления происходящие при поглощении сфокусированного лазерного излучения большой плотности мощности очень сложны и пока еще в полной мере учеными не изучено. Поглощение лазерного излучения может привести к различным эффектам в зависимости от вида и свойств поглощающего материала, плотности и мощности поглощенного излучения и продолжительности воздействия лазерного пучка на материалы. Применение лазеров для обработки материалов и электронных технологий в приборостроении основывается главным образом на термических эффектах поглощения лазерного излучения (нагревание, плавление и испарение материала). Другие эффекты поглощения лазерного излучения, например. образование плазмы, нелинейные оптические явления самофокусировки и самолокализации пучка излучается в других разделах физики.

#### 2. Термодинамика нагрева материала.

Основное применение лазеров в обработке материалов и электронной технологии заключается в поглощении сфокусированного лазерного излучения различными непрозрачными материалами. Приведенные исследования и полученные в результате основ касались металлов и позволили физически интерпретировать явление и создать приближенное аналитическое описание, которое частично можно применить и к неметаллическим твердым телам.

Глубина проникновения излучения не превышает  $10^{-5}$  см. Начальная фаза поглощения заключается в воздействии лазерного излучения на свободные или связанные электроны, что вызывает увеличение их энергии. Воздействие этих электронов на кристаллическую решетку и другие электроны вызывает увеличение температуры материала. Время передачи энергии соударяющимися электронами составляет  $10^{-12} \div 10^{-14}$  см, а время передачи энергии электрону кристаллической решетки –  $10^{-11}$  сек. Приращение поглощаемой энергии лазерного излучения в тепловую энергию материала происходит почти мгновенно, поэтому температура поверхности материала в области воздействия быстро возрастает, примерно сохраняет распределение соответствующие распределению плотности мощности поперечного сечений

сфокусированного лазерного пучка. Одновременно происходит перенос тепла в глубь материала. Для гаусового распределения мощности излучения в фокусе распределение температуры в материале, получаемое в результате теплопроводности, описывается следующей зависимостью:

$$T(r, z, t) = \frac{2P}{\rho \cdot c \cdot (4\pi \cdot a)^{3/2}} \cdot \int_0^t \frac{1}{(\tau + t)\sqrt{t}} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{4a \cdot t} - \frac{r^2}{4a(\tau + t)}\right) dt \quad (17.1)$$

А температура поверхности материала в центре фокуса определяется:

$$T_0(0,0,t) = \frac{P_0}{\pi \cdot \rho \cdot c \cdot a \cdot (4\pi \cdot a\tau)^{1/2}} \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{t}{\tau}\right)^{1/2} \quad (17.2)$$

где  $\tau = r_0^2 / 4a$  - постоянная времени;  $P$  – полная мощность поглощающего излучения;  $P_0$  – мощность излучения в центре фокуса;  $r_0$  – радиус светового пятна на поверхности материала при котором мощность излучения уменьшается в  $P_0/e$ ;  $t$  – время;  $z$  – координата перпендикулярная поверхности;  $r$  – радиальная координата, перпендикулярная  $z$ ;  $c$  – удельная теплоемкость материала;  $\rho$  – плотность материала,  $a$  – коэффициент температуропроводности материала.

Не вся энергия пучка излучения расходуется на увеличение температуры материала. Значительная часть излучения отражается от поверхности материала.

Увеличение температуры поверхности материала во время воздействия лазерного пучка вызывает уменьшение коэффициента отражения. Это явление наблюдается как при малых (до  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>) так и при больших (до  $10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>) плотностях мощности излучения в фокусе. Небольшие, обычно не учитываемые, потери мощности излучения вызывает термоэлектронная эмиссия и реэмиссия излучения с нагретой абсорбирующей поверхности. Влияние фотоэлектронной эмиссии, учитывая поглощения 2-х квантов, принимается во внимание только при очень больших плотностях мощности падающего излучения.

### ***3. Плавление материалов пучком сфокусированного лазерного излучения.***

Определение оптимальных параметров плавления имеет большое значение, в частности, при использовании лазеров для импульсной или непрерывной сварке. Целью теоретического анализа является определение толщины расплавленного слоя и продолжительности плавления до момента начала бурного испарения на поверхности

материала. Модель материала принимается в виде полубесконечного пространства, а интенсивность лазерного излучения считается равномерно распределенной по всей абсорбирующей поверхности. Для металлов максимальная глубина расплавленного слоя  $h$  приближенно без учета потерь на теплопроводность определяется зависимостью:

$$h = \frac{0.16 \cdot (Q^2 t_p - Q^2 t_t)}{\rho \cdot C_t \cdot Q} \quad (17.3)$$

$$Q = q_0 \cdot (1 - R)$$

где  $Q$ —тепло, выделенное в материале в результате поглощения лазерного излучения интенсивностью  $q_0$ ,  $R$ —коэффициент отражения излучения от поглощающей поверхности;  $t$ —время от начала поглощения лазерного излучения до начала плавления поверхности материалов;  $t_p$ —время от начала поглощения лазерного излучения до начала бурного испарения поверхности материала;  $\rho$  — плотность материала;  $C_t$  — теплота плавления материала.

Время от начала поглощения лазерного излучения, до начала плавления или до начала бурного парообразования, и максимальная глубина расплавленного слоя изменяется в зависимости от фотохимических свойств материала и плотности мощности излучения. Плавление материала происходит также и в присутствии интенсивного парообразования. Проведенные экспериментальные исследования показали, что плавление материала (без интенсивного парообразования) имеет место только в коротком периоде времени  $t_p$ - $t_t$ . Максимальная глубина расплавленного слоя без испарения материала при использовании, например, импульсных рубиновых или неодимовых лазеров не превышает 0,5мм. Для получения большей глубины необходимо использовать лазеры непрерывного действия.

Однако в случае плавления металла при использовании лазера непрерывного действия (например, при сварке) воздействия лазерного пучка слишком продолжительны, чтобы не учитывать эффект передачи тепла за счет теплопроводности в глубь материала. При перемещении свариваемого металлического элемента необходимо учитывать скорость движения детали, либо сфокусированного пучка по ее поверхности.

Важно также и оценить коэффициент использования мощности непрерывного лазерного пучка (термический КПД  $E$ ); максимальная теоретическая величина термического КПД  $E$  составляет 0,484. Эта величина показывает, что максимум 48,4 % энергии лазерного пучка тратится на плавление материала, а остальная отводится из зоны

воздействия теплопроводностью. Получаемые на практике величины  $E$  – порядка нескольких процентов. Дополнительной трудностью анализа теплообмена при непрерывности действия лазерного пучка является явление тепловых химических реакций в расплавленном материале.

#### ***4. Испарение материалов сфокусированным пучком лазерного излучения.***

Интенсивное испарение поверхности металлов начинается при плотности мощности сфокусированного излучения порядка  $10^5 \div 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Этот процесс происходит во время получения отверстий и резании материалов. Его физическое описание довольно сложно, особенно при действии излучения с большой плотностью мощности ( $10^8 \div 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>). Особенно трудно определить долю рассеивания и поглощения лазерного излучения в облаке пара и частиц (брызг) отбрасываемого материала, учесть взрывные эффекты и определить взаимодействие жидкой и газообразной фаз обрабатываемого материала.

В упрощенном анализе интенсивного испарения при плотности мощности до  $10^8 \div 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> используется классическая теория теплопроводности. Модель материала принимается в виде полубусконечного пространства, а интенсивность лазерного излучения равномерный по всей поверхности. Предлагается, что удаление вещества из зоны обработки происходит путем поверхностного испарения. Процесс описывается с помощью уравнения теплопроводности для конденсированной фазы в системе координат связанной с подвижной границей, на которой происходит испарение. Исходя из этого предположения, испаряющаяся поверхность перемещается в глубину материала со скоростью  $v$ , близкой к средней скорости распространения волны нагрева в материале. Время начала интенсивного испарения (задержка относительно начала действия лазерного пучка) определяется зависимостью:

$$t_p = \frac{\pi k \rho C (T_p - T_o)^2}{4Q^2} \quad (17.4)$$

где  $Q$  – поглощаемое лазерное излучение (Вт/см<sup>2</sup>);  $k$  – теплопроводность;  $C$  – удельная теплоемкость;  $\rho$  – плотность материала;  $T_p$  – температура интенсивного испарения (кипения) материала;  $T_o$  – начальная температура материала.

Пороговая величина плотности мощности падающего излучения, необходимое для возникновения интенсивного испарения поверхности материала составляет:

$$Q_p = \frac{\rho \cdot C_p}{1-R} \cdot \sqrt{\frac{q}{t_p}} \quad (17.5)$$

где  $R$  – коэффициент отражения излучения от поверхности;  $a$  – коэффициент температуропроводности материала;  $C_p$  – удельная теплота испарения.

В условиях интенсивного испарения за короткое время (несколько секунд) устанавливается постоянная скорость перемещения испаряющейся поверхности в глубину материала описывается зависимостью:

$$v = \frac{Q}{\rho(C_t + C_p + C(T_p - T_o))} \quad (17.6)$$

где  $C_t$  и  $C_p$  - соответственно удельная теплота плавления и удельная теплота испарения материала. Скорость  $v$ , для металлов, составляет примерно 10 м/с при плотности мощности сфокусированного лазерного излучения около  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> и увеличивается до  $10^3$  м/с при плотности мощности порядка  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Перемещение испаряющейся поверхности вглубь материала связано с его удалением и образованием углубления (лунки или надрезы). Глубина лунки:

$$h=v(t-t_p) \quad (17.7)$$

Экспериментально установлено, что при получении отверстий с использованием неодимовых рубиновых лазеров, эта глубина нелинейно возрастает с увеличением мощности или энергии лазерных импульсов.