

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ академика С.П. Королева»
(Самарский университет)

Основы воздействия лазерного излучения на металлы

Самара 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ академика С.П. Королева»
(Самарский университет)

Основы воздействия лазерного излучения на металлы
методические указания к практическим работам

Самара 2017

УДК 535

Составители: П.Е.Тимченко, Е.В.Тимченко

Рецензент: Ендуткина Е. А., к.т.н., ассистент кафедры высшей математики

Основы воздействия лазерного излучения на металлы: метод. указ. к практическим работам/ сост. П.Е. Тимченко, Е.В. Тимченко – Самара: Изд-во Самарский университет, 2017. – 20 с: ил.

В методических указаниях к практическим работам содержится информация о взаимодействии лазерного излучения с веществом, физической модели лазерной обработки, физических процессах при лазерном нагреве и обработки, а также задания для практических занятий.

Методические указания предназначены для студентов дневного отделения Самарского университета, обучающихся по специальности 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии» по дисциплине «Взаимодействие лазерного излучения с веществом»

© Самарский университет, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

1 Теоретические основы	5
1.1 Поглощение света и преобразование энергии света в тепло. Физическая модель лазерной обработки	5
1.2 Физические процессы, возникающие на поверхности твердых тел при лазерном нагреве	7
1.3 Теплофизика лазерного нагрева	8
1.4 Физические процессы лазерной обработки: Испарение – движение фронта раздела фаз – одномерная модель, (движение фронта испарения внутрь материала)	10
1.5 Практические данные	12
1.6 Двумерная ДВУХФАЗНАЯ (ДД) МОДЕЛЬ лазерной обработки	13
1.7 Давление отдачи при испарении. Уравнение Клаузиуса–Клапейрона	16
2 ЗАДАНИЕ	16
3 Вопросы для контроля	18
Список использованных источников	19

1 Теоретические основы

1.1 Поглощение света и преобразование энергии света в тепло. Физическая модель лазерной обработки

Большинство лазерных технологий основаны на тепловом действии излучения. Остановимся на нем подробнее.

Поглощение лазерного излучения по закону $q(x) = q_0(1 - R)e^{-\alpha x}$ (1.1) при глубине проникновения света $\delta = 1/\alpha \sim 10^{-5} - 10^{-6}$ см для металлов

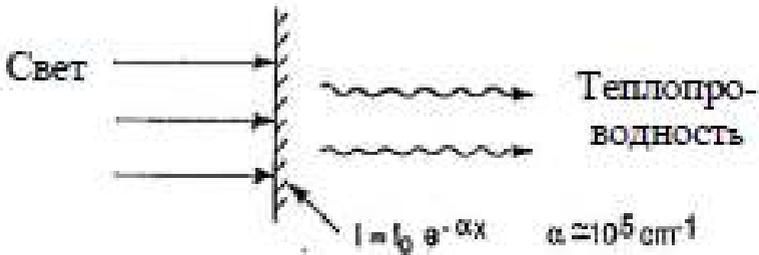


Рисунок 1 – Взаимодействия света с металлами

Нагрев материала до точки плавления $T_{пл}$

Плавление после поглощения удельной теплоты плавления $L_{пл}$

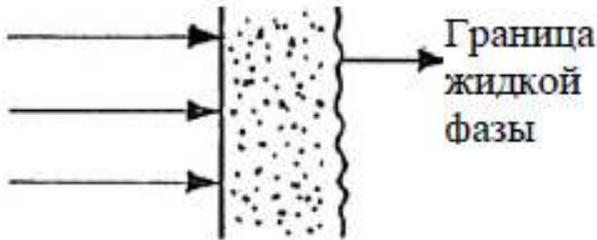


Рисунок 2 – Плавление металла под действием света

Дальнейший нагрев до точки испарения (кипения)

$$T_v = T_b \Big|_{P=P_{atm}}$$

Испарение после поглощения удельной теплоты парообразования $L_{исп}$

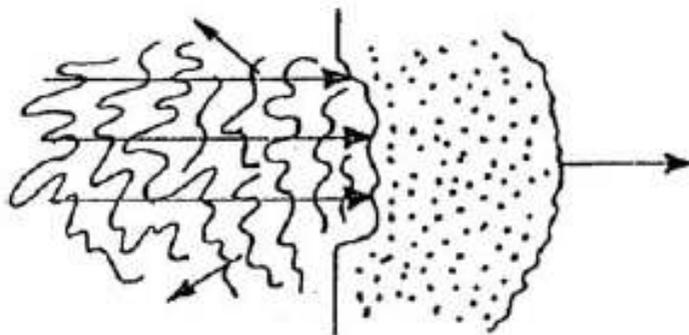


Рисунок 3 – Испарение металла под действием света

Движение испаряемой поверхности вглубь материала со скоростью V_0

Образование плазмы

Пары металла также могут взаимодействовать со светом, который осуществляет их разогрев, возбуждение молекул, образование ионов и плазмы

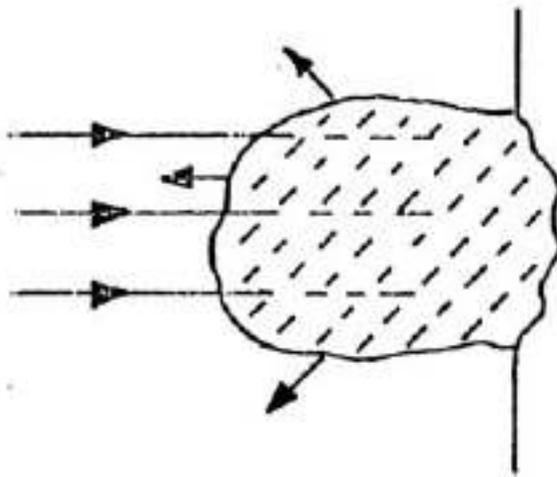


Рисунок 4 - Образование плазмы

1.2 Физические процессы, возникающие на поверхности твердых тел при лазерном нагреве

Эмиссионные процессы:

- десорбция газа,
- термоэлектронная эмиссия,
- термоионная эмиссия,
- эмиссия нейтральных атомов,
- тепловое излучение (пироэлектрические измерения).

Структурные процессы:

- рекристаллизация,
- структурные изменения в Fe–C сплавах (закалка сталей),
- размягчение стекла и, соответственно, структурные изменения,
- аморфизация и кристаллизация стеклокерамик,
- аморфизация тонких металлических пленок,
- взаимная диффузия нагретых слоев (микрометаллургия),
- отжиг дефектов (в полупроводниках).

Поверхностные химические реакции:

- локальное окисление металлов и полупроводников,

- восстановление окислов,
- термическое разложение металлоорганических соединений
- полимеризация (деструкция) полимеров.

Термомеханические эффекты:

- тепловое расширение (включая импульсное),
- появление термонапряжений,
- генерация ударных волн в твердом теле и в воздухе,
- генерация ультразвука (дефектоскопия),
- оптический пробой в прозрачных диэлектриках

Физические переходы:

- плавление,
- испарение,
- воспламенение и горение,
- детонация активных и взрыв пассивных сред.

1.3 Теплофизика лазерного нагрева

Температура поверхности T зависит от мощности P , поглощенной единицей площади S : $q = P/S$ (1.2), где q так называемая плотность мощности, $P = W/\tau$ (1.3) (W — энергия в импульсе, τ — длительность воздействия).

Соотношение между T и плотностью мощности q может быть определено из уравнений теплопроводности типа:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a\Delta T = \frac{Q(x, y, z, t)}{\rho c} \quad (1.4)$$

$$= \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

где Δ — оператор Лапласа $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$, Q — объемная плотность поглощенного светового потока, a - температуропроводность, ρ — плотность, c — теплоемкость.

Чтобы решить уравнение (1.4) необходимо задать одно начальное условие, 6 граничных и определить $Q(x, y, z, t)$.

$$T_{x,y,z,0} = T_{\text{н}}, T_{x=\infty,t} = T_{y=\infty,t} = T_{z=\infty,t} = T_{\text{н}}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_{0,t}} = \frac{\partial T}{\partial y_{0,t}} = \frac{\partial T}{\partial z_{0,t}} = 0, \quad Q = q_0(1-R)\alpha e^{-\alpha x} \quad (1.5),$$

После решения системы этих уравнений связь между T и q выражается в виде:

$$T = f \left[\begin{array}{l} q(1-R) - \text{поглощенная мощность} \\ \rho, c, a, R, \alpha - \text{теплофизические и оптические параметры} \\ x, y, z, t - \text{аргументы} \end{array} \right]$$

Так, например, для металлов решение уравнения (1.4) при условиях (1.5) для круглого источника тепла — лазерного пятна с радиусом r_0 и теплопроводности k , будет:

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + T_{\text{н}} \quad (1.6)$$

при $r_0 \gg \sqrt{a\tau}$ (импульсный нагрев)

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_{\text{н}} \quad (1.7)$$

При $r_0 \ll \sqrt{a\tau}$ (непрерывный нагрев)

$$T = \frac{q_0(1-R)r_0}{k} + T_{\text{н}} \quad (1.8)$$

Формулы (1.7) и (1.8) позволяют посчитать так называемую пороговую (критическую) плотность мощности $q_{\text{пор}}$, необходимую для нагревания поверхности до заданной температуры T :

$$q_{\text{нмп}}^{\text{пор}} = \frac{(T - T_{\text{н}})k\sqrt{\pi}}{2(1-R)\sqrt{a\tau}} \quad (1.9)$$

$$q_{\text{непр}}^{\text{пор}} = \frac{(T - T_{\text{н}})k}{(1 - R)r_0}$$

(1.10)

1.4 Физические процессы лазерной обработки: Испарение – движение фронта раздела фаз – одномерная модель, (движение фронта испарения внутрь материала)

Энергия W , требуемая для удаления объема вещества $\Omega = hS$ (пренебрегая теплопроводностью), равна:

$$E = \Omega \left[\rho c T_m + L_m + \rho c (T_v - T_m) + L_v \right] \quad (1.11)$$

Для плотности мощности $q = \frac{F}{St}$ (S — площадь светового пятна на поверхности материала, t — длительность воздействия) уравнение (1.11) преобразуется в:

$$q = \frac{h}{t} (\rho c T_{\text{н}} + L_{\text{пл}} + L_{\text{н}}) \quad (1.12)$$

где обычно $\rho c T_{\text{н}} \approx 10^3$ Дж/см³, $L_{\text{пл}} \leq 10^3$ Дж/см³, $L_{\text{н}} \geq 10^4$ Дж/см³

Скорость проникновения фронта испарения V_0 вглубь материала (в предположении, что поглощенная энергия потрачена только на испарение (пренебрегая $\rho c T_{\text{н}}$, $L_{\text{пл}} \ll L_{\text{н}}$) равна:

$$V_0 = \frac{q}{L_{\text{н}}} \quad (1.13)$$

С другой стороны, скорость V может быть выражена через температуру поверхности T_0 (согласно модели твердого тела)

формулой Френкеля:

$$V_0 \approx C_{\text{зв}} \exp\left(-\frac{T^*}{T_0}\right) \quad (1.14)$$

где $C_{\text{зв}}$ — скорость звука в твердых телах,

$T^* = L_u^* / k$, (k — постоянная Больцмана, T^* — температура испарения, L_u^* — это L_u , рассчитанная на атом).

h — глубина расположения фронта (отверстия) в одномерной модели испарения.

Характерные особенности одномерной модели

— глубина отверстия h увеличивается линейно с длительностью импульса τ , со скоростью V_0 :

$$h = V_0 \tau = \frac{q}{L_u} \tau \quad (1.15)$$

— диаметр отверстия не увеличивается:

$$d = d_0 = \text{const}$$

— отсутствует жидкая фаза — только испарение

— высокая точность

— высокое качество

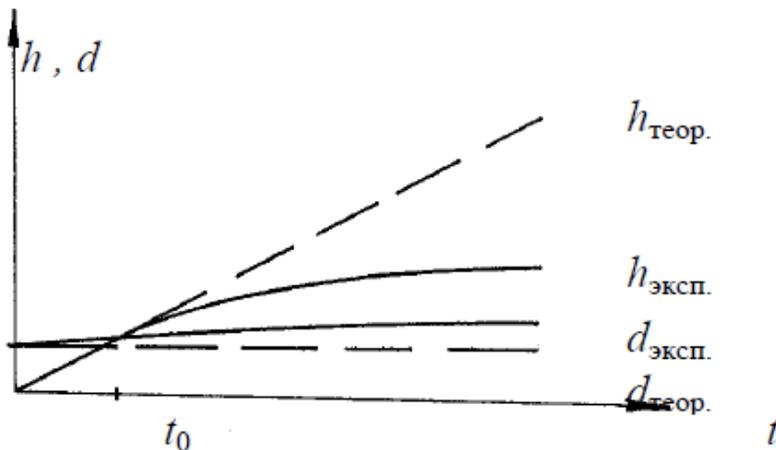


Рисунок 5 - Качественные характеристики одномерной модели микроформообразования.

Одномерная модель достаточно хорошо соответствует эксперименту при коротких импульсах (от нсек до пксек) но не работает после $t > t_0$, когда $h > d_0$. Почему?

1.5 Практические данные

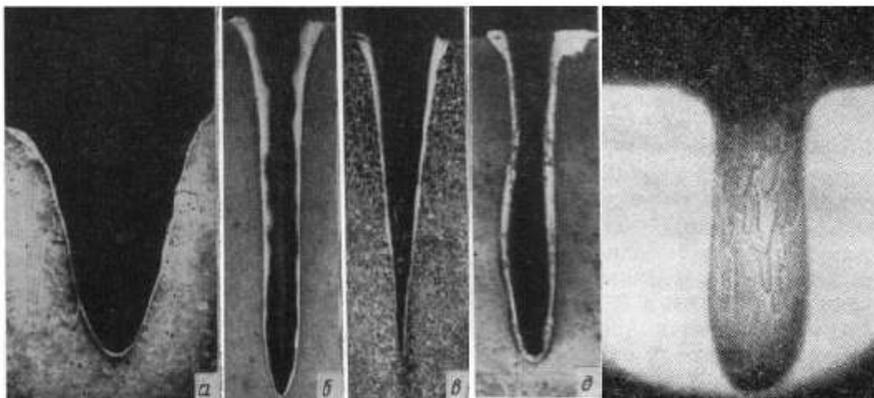
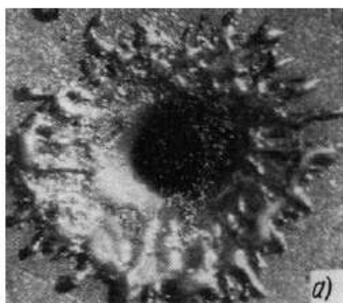
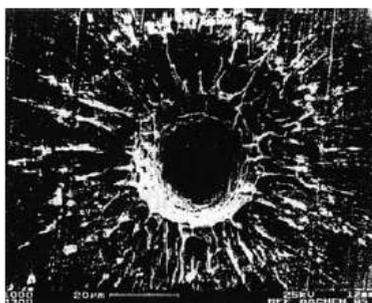


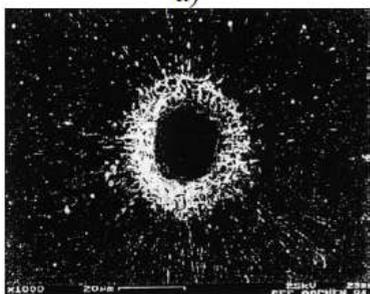
Рисунок 6 - Фотографии продольных шлифов «лазерных» лунок в стали, $h = 1$ мм



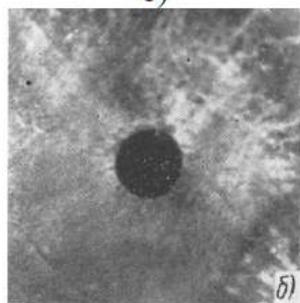
а)



б)



в)



г)

Рисунок 7 - Вид «сверху» на «лазерные» лунки в стали (длительность импульса: а) ~ мс, б) ~ мкс, в) ~ нс, г) ~ фс)

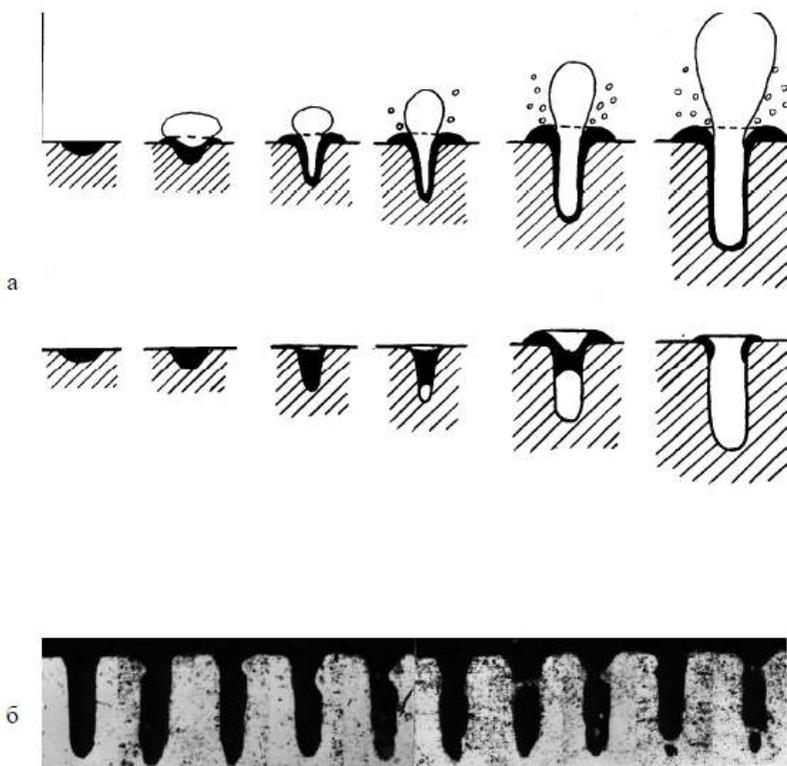


Рисунок 8 - Схема (вверху) и фотография (внизу), характеризующие поведение жидкой фазы в течение, а) и после, б) лазерной обработки, в) эксперимент

1.6 Двумерная ДВУХФАЗНАЯ (ДД) МОДЕЛЬ лазерной обработки

Одномерная модель не может применяться для описания кинетики формирования лунки с того момента, когда ее глубина h становится сопоставимой с размером светового пятна r_0 , т.к. более нельзя пренебрегать процессами, приводящими к росту ее диаметра.

Увеличение глубины h может быть описано, как прежде, моделью испарения, но определение диаметра отверстия d более сложно из-за взаимодействия многих факторов, влияющих на нагревание и разрушение стенок.

Прежде всего надо учитывать появление жидкой фазы из-за плавления материала между изотермами испарения поверхности $T_{и}$ и плавления $T_{пл}$ (под поверхностью).

Другие важные факторы, которые влияют на процесс формирования отверстия:

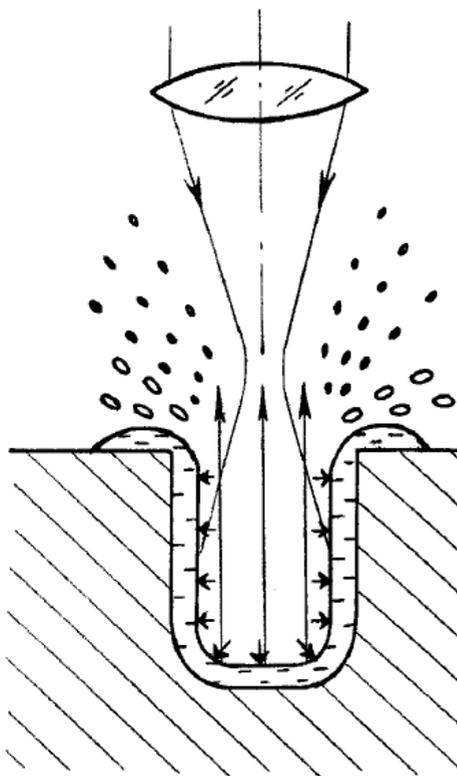
- конденсация пара,
- прямое поглощение света стенками из-за расфокусировки луча,
- рассеяние света паром,
- радиационный и конвективный теплообмен между струей пара и стенками,
- теплопроводность.

К этим явлениям следует добавить:

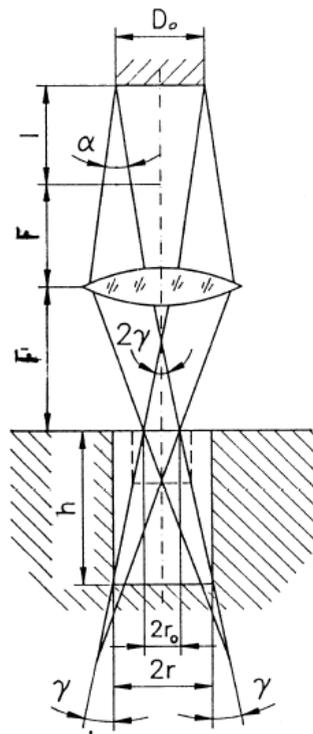
- реактивное давление отдачи паров, которое должно удалять расплавленный материал из отверстия,
- эффекты экранирования лазерного излучения продуктами испарения-плазмой.

Схематическая диаграмма двумерного микроформообразования,(а) и диаграмма временного изменения глубины отверстия h и диаметра $d=2r$,(б) при условии совпадения фокальной плоскости линзы с поверхностью. (γ — половина угла светового конуса,

$\text{tg } \gamma = (D_0 - \alpha l) / 2F$, D_0 — диаметр источника излучения, l — расстояние между лазером и передним фокусом линзы с фокусным расстоянием F , r_0 — начальный радиус отверстия (равен радиусу светового пятна), α — угол расходимости пучка).



а



б

Рисунок 9 - Схематическая диаграмма двумерного микроформообразования, (а) и диаграмма временного изменения глубины отверстия h и диаметра $d=2r$, (б)

1.7 Давление отдачи при испарении. Уравнение Клаузиуса–Клапейрона

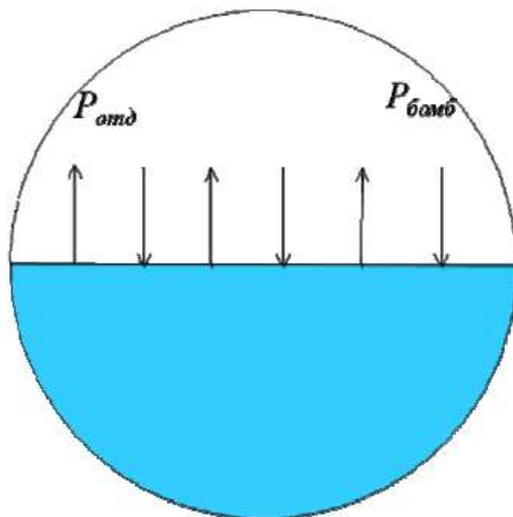


Рисунок 10 - Схема жидкости в равновесии с собственным паром

$$P_{\text{нп}} = P_{\text{отд}} + P_{\text{бомб}} \quad (1.16)$$

Схема «лазерного» расплава и пара.

$$P_{\text{отд}} = 0.5P_{\text{нп}}$$

Связь давления насыщенного пара с температурой дается формулой Клаузиуса–Клапейрона:

$$P_T = P_0 \frac{T}{T_0} \exp \left[\frac{L_v \mu}{\rho R T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \right] \quad (1.17)$$

2 ЗАДАНИЕ

Цель работы – изучить принципы обработки металлов под воздействием лазерного излучения.

Задачи:

Изучение теоретических основ обработки металлов лазерным излучением

Рассчитать пороги испарения для импульсного и непрерывного режима работы лазеров

Рассчитать скорость проникновения фронта испарения вглубь материала

Рассчитать температуру поверхности и глубину отверстия

Ответить на контрольные вопросы.

Варианты	Материал	Тисп., К	K , Вт*к/м Теплопроводность	$A=1-R$ (для $l=1.06$)	$a*10^{(-3)}$, м ⁴ /с Температуро- проводность
1	Al	2916	450	0,098	0,13
2	Cu	5900	182	0,35	0,078
3	W	3245	90	0,47	0,044
4	Fe	2993	257	0,07	0,113
5	Al	2798	425	0,095	0,135
6	Cu	5893	164	0,30	0,060
7	W	3045	83	0,4	0,022
8	Fe	4773	200	0,079	0,13
9	Al	3800	330	0,058	0,09
10	Cu	4950	288	0,09	0,099
11	W	2793	237	0,07	0,103
12	Fe	2816	401	0,09	0,12
13	Al	5953	174	0,32	0,068
14	Cu	3145	80	0,37	0,024
15	W	2993	237	0,08	0,103
16	Fe	2716	389	0,07	0,15
17	Al	6000	178	0,36	0,078
18	Cu	3345	90	0,35	0,034
19	W	2893	247	0,07	0,203
20	Fe	3050	350	0,25	0,3

Параметры:

L_n , $\frac{Дж}{см^3}$ - энергия генерации

τ_3 , мс - длительность импульса

Необходимо подобрать таким образом, чтобы получить адекватное значение глубины отверстия.

3 Вопросы для контроля

1. Характерные глубины проникновения света для металлов?
2. Какие основные процессы возникают на поверхности металлов при лазерной резке?
3. Какие основные процессы возникают на поверхности металлов при лазерной закалке?
4. От чего зависит температура поверхности T при лазерной резке?
5. Поясните, почему на "графике качественные характеристики одномерной модели микроформобразования" $h_{эксп}$ отличается от $h_{теор}$?
6. Особенности одномерной модели.
7. Почему при уменьшении длительности импульса при пробитии отверстий лазерная лунка становится чище?
8. Если металл обладает большим отражением на данной длине волны, то, как в нём делать отверстия лазером?
9. После пробивки отверстия расплавленный металл затекает обратно в отверстие. Как этого можно избежать?
10. Что мешает формировать сверх глубокие отверстия, что экранирует излучение?
11. Почему в формуле расчёта плотности игнорируются процессы плавления и испарения?

Список использованных источников

1. Мурзин, С.П. Расчет и конструирование системы транспортировки и формирования излучения [Текст] / Мурзин С.П. // Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Оптика лазеров». – Самара: СГАУ, 2008. – 10 с.
2. Вейко, В.П. Сборник задач по лазерным технологиям [Текст] / Вейко В.П., Шахно Е.А. Изд. 3-е, испр. и дополн. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. - 67 с.
3. Приезжев, А.В. Лазерная диагностика в биологии и медицине. [Текст] / А.В. Приезжев, В.В. Тучин, Л.П. Шубочкин. – М.: «Наука», 1989. – 240 с.
4. Сущинский, М.М. Спектры комбинационного рассеяния молекул и кристаллов. [Текст] / М.М Сущинский. - М.: «Наука», 1969. – 576 с.
5. Буриков, С.А. Диагностика водно-этанольных растворов методами спектроскопии комбинационного рассеяния света. [Текст] / С.А. Буриков, Т.А. Доленко, С.В. Пацаева, В.И. Южаков // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22. - № 11. – С. 1 – 7

Учебное издание

Основы воздействия лазерного излучения на металлы

Методические указания к практическим работам

Составители: Тимченко Павел Евгеньевич

Тимченко Елена Владимировна

Самарский государственный национальный университет имени
академика С.П. Королева» (Самарский университет)
443086 Самара, Московское шоссе, 34

Издательство Самарский университет
443086 Самара, Московское шоссе, 34