

Письма в ЖЭТФ, том 17, вып. 7, стр. 348 – 351

5 апреля 1973 г.

**ВЫМЫВАНИЕ ЖИДКОЙ ФАЗЫ – НОВЫЙ МЕХАНИЗМ
ФОРМИРОВАНИЯ КРАТЕРА ПРИ ПЛОСКОМ РАЗВИТОМ ИСПАРЕНИИ
МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ**

В. А. Батаков, В. Б. Федоров

Обсуждается новый физический механизм развития кратера в металле при воздействии лазерного излучения, обусловленный выбросом жидкого металла из облучаемой области под действием градиента реактивного давления паров. Рассматриваемый механизм является определяющим при не очень большой интенсивности излучения. Полученные оценки согласуются с экспериментальными данными.

При развитом испарении металлов лазерным лучом вся энергия поглощаемого в поверхностном слое металла излучения тратится на работу испарения λ вещества из этого слоя. Наиболее простыми для интерпретации являются опыты, когда глубина кратера h , возникающе-

го в мишени при облучении, мала по сравнению с его диаметром d , определяемым размером зоны облучения на поверхности мишени. В этом случае можно пренебречь эффектами на краях мелкого кратера и приближенно считать картину испарения плоской и одномерной. Условия, в которых можно наблюдать такой процесс, даются неравенствами [1]

$$d > ut > \sqrt{\chi t} > 1/\alpha. \quad (1)$$

Здесь α — коэффициент поглощения металла, χ — температуропроводность, t — время воздействия лазерного луча, u — скорость фронта испарения, определяемая из энергетических соображений

$$l(1 - R) = \rho \lambda u. \quad (2)$$

В (2) ρ — плотность конденсированной фазы, R — коэффициент отражения, l — интенсивность луча. Согласно (1) и (2) глубина кратера $h = ut$ определяется массой вынесенного пара и линейно зависит от интенсивности $h \propto l \cdot t$

В работе [2] было показано, что механизмом разрушения металла является фазовый переход жидкость-пар в отличие от [1], где рассматривался переход твердое тело-пар. Это отличие является принципиальным и приводит к новым эффектам, один из которых обсуждается в данной работе.

Экспериментально обнаружен новый механизм формирования кратера, связанный с вымыванием жидкой фазы из мелкого плоского кратера под действием градиента давления паров, направленного вдоль поверхности металла. Опыт и расчеты показывают, что при не слишком высоких интенсивностях света этот процесс дает больший вклад в глубину кратера, чем выброс пара.

Если характерное время вымывания жидкости, определяемое выбросом ее вдоль поверхности мишени на расстояние $d/2$, есть $t_{\text{ж}}$, то скорость продвижения фронта разрушения будет $u_{\text{ж}} \approx \Delta l / t_{\text{ж}}$, где Δl — толщина жидкого слоя около границы раздела фаз (фронта высокой температуры) и обычно оценивается как $\Delta l \approx \chi / u$ [2]. Однако, если $u_{\text{ж}} > u$, то $\Delta l \approx \chi / u_{\text{ж}}$, и следовательно, $u_{\text{ж}} \approx \sqrt{\chi / t_{\text{ж}}}$. Время $t_{\text{ж}}$ можно оценить из соотношения $t_{\text{ж}} \approx \sqrt{d/\alpha}$, где α — ускорение вдоль поверхности кратера, приобретаемое жидкостью под действием градиента давления паров, равного в режиме развитого испарения $\nabla P \approx 2P/d = 2\pi \rho v_z (u/d)$ [2]. Здесь v_z — составляющая скорости пара в направлении, перпендикулярном поверхности металла (величину v_z в интервале l , соответствующем развитому испарению, можно считать примерно постоянной [2]). Ускорение α определяется уравнением $\rho \alpha = \nabla P$. В результате находим $t_{\text{ж}} \approx d / (2\pi v_z u)^{1/2}$, и соответственно, величины $u_{\text{ж}}$ и глубину кратера $h_{\text{ж}}$

$$h_{\text{ж}} = u_{\text{ж}} t \approx (\chi/d)^{1/2} (2\pi v_z u)^{1/4} t. \quad (3)$$

Условия наблюдения вымывания жидкости в случае плоского одномерного испарения по аналогии с (1) имеют вид:

$$d > u_{\text{ж}} t > ut > \sqrt{\chi t}. \quad (4)$$

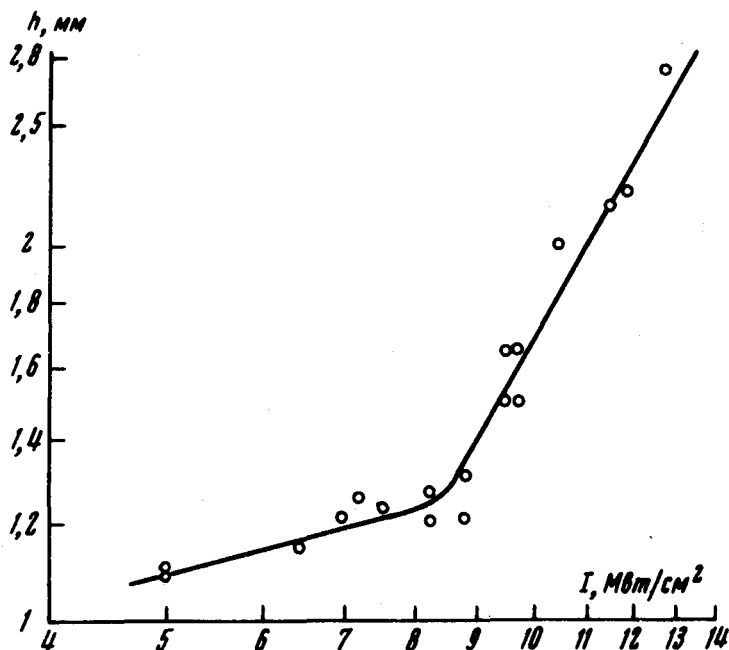
Согласно (2 – 4) в формировании кратера вымывание жидкости преобладает над выносом вещества в газовой фазе при не слишком больших интенсивностях $I < I^*$, где

$$I^* \approx [\lambda \rho / (1 - R)] (\chi / d)^{2/3} (2\pi v_z)^{1/3}. \quad (5)$$

При $I > I^*$ кратер образуется, главным образом, за счет выноса пара. Значение I^* должно превышать порог развитого испарения, так как только в этом случае возникает реактивное давление паров на жидкий слой, приводящее к вымыванию. Соответственно из формул (4) и (5) получаем ограничение на экспериментальные условия существования обсуждаемого эффекта вымывания:

$$t (4\pi^2 v_z^2 \chi / d^4)^{1/3} > 1. \quad (6)$$

Таким образом, эффект возможен при достаточно продолжительных временах воздействия t и не при слишком больших размерах зоны облучения d .



Зависимость средней по сечению глубины кратера h в алюминии от интенсивности I падающего лазерного излучения

В приведенном рассмотрении мы пренебрегали затратами энергии на плавление, нагрев металла и на вымывание жидкости по сравнению с затратами на испарение. Поскольку эти расходы энергии в расчете на один атом не менее, чем на порядок ниже теплоты испарения, то полученные соотношения верны для оценок в случае, когда масса вынесенной жидкости даже на порядок превышает массу выброшенного пара, что достаточно для обсуждения приводимых ниже результатов экспериментов.

В опытах измерялась глубина кратера в мишенях из алюминия, облучаемых лазерными импульсами миллисекундной длительности. Результаты измерений даны на рисунке. Согласно расчетам [2] температура поверхности алюминия в интервале $I = (0,5 - 1,3) \cdot 10^7 \text{ вт/см}^2$ меняется от 3600 до 4000 °К (критическая температура алюминия $T_{\text{кр}} \approx 4700^\circ\text{К}$). Соответственно $\chi = (0,36 \text{ см}^2/\text{сек})$ [3], $v_z = 4,6 \cdot 10^4 \text{ см/сек}$. Значения величин t и d в опытах были $t = 0,8 \text{ мсек}$, $d = 0,8 \text{ см}$. При этом $t(4\pi^2 v_z^2 \chi / d^4)^{1/3} = 4,1$ так что условия опытов неравенству (6) удовлетворяют.

Качественный характер наблюдаемой зависимости $h(I)$ соответствует приведенному теоретическому описанию. Из рисунка видно, что при $I < 0,9 \cdot 10^7 \text{ вт/см}^2$ глубина кратера медленно растет с интенсивностью $h \propto I^{1/4}$, что совпадает с теоретической зависимостью (3), описывающей формирование кратера за счет вымывания жидкости. При $I > 0,9 \cdot 10^7 \text{ вт/см}^2$ зависимость $h(I)$ более сильная — $h \propto I^{1,5}$. Эта часть кривой соответствует формированию кратера вследствие выброса пара¹⁾. Отличие от теоретической зависимости $h \propto I$ (2) может быть вызвано некоторым снижением коэффициента отражения R в данном интервале интенсивностей.

Имеется также удовлетворительное количественное совпадение приведенных выше расчетов с опытом. Согласно (5) значение I^* (при $\lambda = 1,15 \cdot 10^4 \text{ Дж/г}$, $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$, $R = 0,74$) с учетом экранировки мишени плазменным факелом (оптическая толщина которого близка к единице [2]) составляет $I^* \approx 1,3 \cdot 10^7 \text{ вт/см}^2$, в то время как на опыте $I^* \approx 0,9 \cdot 10^7 \text{ вт/см}^2$. Рассчитанная глубина кратера в этой точке равна $h^* \approx (\chi/d)^{2/3} (2\pi v_z)^{1/3} t \approx 1,4 \text{ мм}$, что мало отличается от экспериментального значения $h^* \approx 1,3 \text{ мм}$.

Рассмотренный в настоящей работе механизм вымывания жидкости имеет место в условиях плоского развитого испарения и принципиально отличается от механизма краевого эффекта выброса жидкости со стенок глубокого кратера $h \gg d$ [1], наблюдавшегося в условиях острой фокусировки света на мишень. Авторы благодарны А.М. Прохорову и Ф.В. Бункину за полезное обсуждение.

Физический институт
им. П.Н. Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
21 февраля 1973 г.

Литература

- [1] С.И. Анисимов, Я.А. Имас, Г.С. Романов, Ю.В. Ходыко. Действие излучения большой мощности на металлы М., изд. Наука, 1970.
[2] В.А. Батанов, Ф.В. Бункин, А.М. Прохоров, В.Б. Федоров. ЖЭТФ, 63, 586, 1972.
[3] Физический энциклопедический словарь, "Советская Энциклопедия", 1966.

¹⁾ Характер зависимости рисунка качественно подтверждается также данными фотографирования процесса испарения. В начале интервала интенсивностей, соответствующего развитому испарению, наряду со свечением плазменного факела наблюдается большое количество ярких треков от капель жидкого металла. При увеличении I треки исчезают и видно только свечение факела.