

УДК 535.211

ФИЗИКА

В. Ф. БРЕХОВСКИХ, академик Н. Н. РЫКАЛИН, А. А. УГЛОВ

О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ СОДЕРЖАНИЯ ГАЗОВ В МЕТАЛЛАХ НА ЗОНУ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛУЧА ЛАЗЕРА

Воздействие луча лазера на металлические материалы приводит к их нагреву, плавлению или выносу части материала из зоны воздействия (выплеск жидкой фазы под действием паров отдачи ⁽¹⁾, поверхностное испарение ^(2, 3), механизм плавления — вымывания ⁽⁴⁾). Развитие указанных процессов удаления материала происходит при различных интенсивностях излучения q , однако необходимо, чтобы величина q превосходила некоторое критическое значение (для большинства металлов 10^5 — 10^6 Вт/см²).

При сварке металлов лучом лазера выплеск может препятствовать получению качественного сварного соединения. В то же время следует отметить, что при удалении части материала или его оттеснении к краям ванны расплавленного металла источник тепла «заглубляется», и в ряде случаев это способствует получению глубинного проплавления.

Наличие жидкой фазы и ее учет при анализе процессов нагрева лучом лазера может оказывать заметное влияние на кинетику развития зоны обработки. С момента образования зоны плавления лазерный импульс взаимодействует с металлической жидкостью, которая может быть перегрета до значительных температур вследствие повышения температуры кипения, обусловленного давлением отдачи при испарении. Значительный перегрев жидкого слоя может привести к вскипанию и последующему удалению жидкой фазы, которое может носить взрывообразный характер.

Явление вскипания газонасыщенной жидкости под действием импульса лазера длительностью 10^{-3} сек. отмечено, например, в работе ⁽⁵⁾. В работе ⁽³⁾ оценивалась роль объемного парообразования для случая металлов по сравнению с чисто поверхностным испарением. Эти оценки, относящиеся к идеальным материалам, показали, что объемное парообразование при достигаемых перегревах играет малую роль по сравнению с чисто поверхностным испарением.

Однако наличие в реальных металлах растворенных газов или примесей, которые могут играть роль «искусственных» (не спонтанных) зародышей для процесса кипения, является фактором, облегчающим вскипание жидкой фазы при относительно небольших перегревах по сравнению с идеальными металлами.

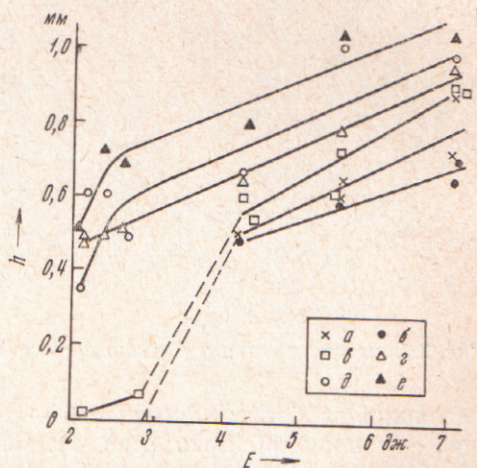


Рис. 1. Зависимость глубины лунки от энергии импульса для образцов меди различных марок. а — катодная, б — вакуумного передела, в — в состоянии поставки, г — анодная, д — черновая, е — пористая

Целью настоящей работы является исследование влияния некоторых из указанных выше факторов (степень чистоты материала, содержание газов, пористость) на характер и размеры зоны обработки материалов лучом лазера. Работа проводилась на лазерной установке ГОС-30 с неодимовым стеклом (режим свободной генерации, длительность импульса 1 мсек.). Исследовались образцы меди различных марок: катодная, анодная, черновая, вакуумного переплава, в состоянии поставки, а также пористая медь (пористость 28,4 и 36,8%). Режимы обработки (энергия в импульсе, условия фокусировки) подбирались такими, чтобы в одном случае происходило оплавление поверхности (без заметного испарения), а в другом образо-

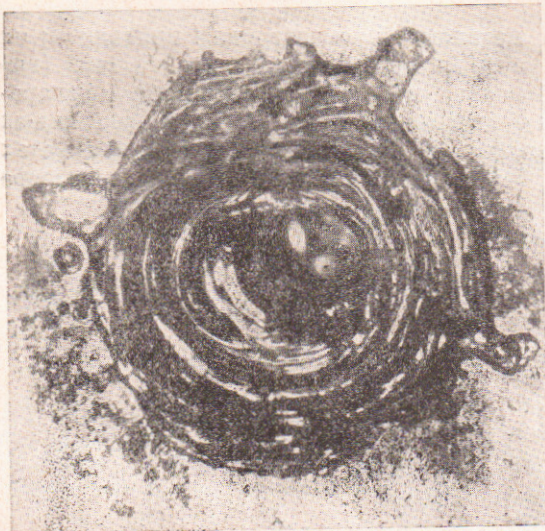


Рис. 2. Зона оплавления у образца пористой меди

вывалась лунка. В работе использовалась линза с $f = 25$ см. Образец располагался на расстоянии 23 см от линзы (режим оплавления) и в фокусе линзы. Энергия в импульсе, измеренная с помощью калориметра ИЭК-4, изменялась от 2 до 7 дж. (для получения энергии меньше 3 дж. использовался светофильтр УФС-1 с пропусканием 18,5%). При энергии импульса около 2 дж., что в наших условиях соответствует удельной мощности 10^6 Вт/см², на поверхности образцов катодной и вакуумной меди образуются оплавленные зоны с отдельными мелкими кратерами, обусловленными действием отдельных пиков импульса. Во всех остальных случаях образуются лунки различной глубины: наименьшей — у меди в состоянии поставки, наибольшей — у пористой меди (рис. 1). Следует отметить, что характер зоны обработки у образцов пористой меди заметно отличается от зоны обработки монолитных образцов при всех удельных мощностях. Так, при сохранении величины энергии импульса, но при меньшей удельной мощности, получаемой с помощью расфокусировки луча, заметного выноса расплавленного материала не наблюдалось во всех случаях. Однако диаметр зоны оплавления у пористой меди в полтора — два раза превышал диаметр зоны у образцов меди анодной, вакуумной и в состоянии поставки (0,89—0,93 мм и 0,42—0,60 мм соответственно). Кроме того, характерным для пористых образцов является образование в расплавленной зоне глубоких «колодцев» (рис. 2). Форма кратеров, получаемых на пористых образцах при увеличении удельной мощности, также заметно отличается от формы кратеров у монолитных образцов (рис. 3).

В области более высоких энергий импульса (свыше 4 дж.) разница в глубинах кратеров несколько уменьшается (например, для меди катодной и в состоянии поставки), однако основная закономерность сохраняется, т. е. глубины кратеров максимальны для пористой и черновой меди и минимальны для катодной и анодной меди. Из графика на рис. 1 видно, что характер изменения глубины кратера в зависимости от энергии импульса различен для разных марок меди. Наибольший разброс точек наблюдается у черновой меди, что можно, по-видимому, объяснить большой неоднородностью по образцам (в объеме материала имелись крупные поры, включения и т. д.).

Количественный спектральный анализ некоторых образцов меди показал, что по содержанию ряда примесей они мало отличаются друг от друга. Существенная разница наблюдается в содержании свинца (меньше 0,005% в катодной и анодной и порядка 1,0% в черновой), никеля (меньше 0,08% в катодной и анодной и 1,0% в черновой) и кислорода (0,005% в катодной, 0,05% в анодной и примерно 0,8% в черновой).

Для интерпретации полученных результатов проводились оценки возможной глубины лунок в меди с помощью соотношений для квазистационарного испарения ⁽²⁾ и одномерной газодинамической модели разрушения вещества ⁽³⁾:

$$v_{(1)} = q_0 / \rho_0 (L + cT^*), \quad (1)$$

где q_0 — удельная мощность, усредненная по длительности импульса, Вт/см²; L — удельная теплота испарения, Дж/г; ρ_0 — плотность конденсированного вещества, г/см³; c — удельная теплоемкость, Дж/г·град; T^* — температура поверхности материала для квазистационарного испарения;

$$v_{(2)} = 8q_0(\kappa - 1) / \rho_0 L(\kappa + 1), \quad (2)$$

где κ — показатель адиабаты, принимаемый в нашем случае равным ⁵/3. Подставляя в (1) и (2) значения $\rho_0 = 8,7$ г/см³, $L = 4,8 \cdot 10^3$ Дж/г, получим $v_{(1)} \approx v_{(2)} = 50$ см/сек. Отсюда максимальная глубина лунки может быть найдена с помощью соотношения

$$h = v(\tau - \tau_1 - \tau_2), \quad (3)$$

где τ_1 — время задержки, необходимое для нагрева материала до точки кипения при нормальном давлении, когда поверхностное испарение начинает играть существенную роль в кинетике разрушения металла; τ_2 — время достижения квазистационарного режима испарения.

Для $q_0 = 10^6$ Вт/см² $\tau_1 = 0,8 \cdot 10^{-4}$ сек., что мало по сравнению с использованной в опыте длительностью импульса $\tau = 10^{-3}$ сек. Необходимо также отметить, что величины $v_{(1)}$ и $v_{(2)}$, рассчитанные с помощью соотношений (1) и (2), достигаются практически лишь к концу действия импульса, так как время установления квазистационарного процесса испарения $\tau_2 = 8 a/v^2$ ⁽²⁾ порядка длительности импульса излучения. Подставляя в (3) значения $v = 50$ см/сек, $\tau_1 = 0,8 \cdot 10^{-4}$ сек., $\tau_2 = 0,8 \cdot 10^{-3}$ сек., получим значение $h = 0,1$ мм, что существенно меньше глубины лунки, достигаемой



Рис. 3. а — сечение лунки у образца анодной меди, б — сечение лунки у образца пористой меди (пористость 28,4%)

при соответствующих условиях в наших опытах с медью. Этот вывод еще более усиливается, если учесть, что при оценках по (1), (2) и (3) пренебрегалось влиянием отражения, которое в случае меди может достигать больших значений.

Оценим теперь максимальную глубину проплавления, достигаемую к концу действия импульса, с помощью соотношения

$$t = \frac{2q_0}{\lambda} \sqrt{a\tau} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}. \quad (4)$$

Подставляя значения коэффициентов для меди $\lambda = 0,935$ кал/см·сек·град, $a = 1,0$ см²/сек, получим глубину проплавления $h = 0,31$ мм, что много меньше наблюдаемых на опыте глубин лунок.

Полученные оценки показывают, что одномерные задачи испарения не могут описать динамику развития лунки в материале, содержащем примеси и газы. Необходимо также подчеркнуть, что предположение об изменении теплофизических коэффициентов из-за наличия примесей и как следствие — изменение размеров зоны обработки можно отбросить на том основании, что содержание примесей сказывается на этих свойствах лишь при низких температурах ⁽⁶⁾.

В свете сказанного становятся интересными эксперименты с материалами, содержащими большой объем газов, т. е. с материалами порошковой металлургии. Систематических исследований действия луча лазера на такие материалы не проводилось. В литературе есть только упоминание о таких экспериментах в работе ⁽⁷⁾. Как уже говорилось выше, в случае пористых образцов глубина лунки резко возрастает, а ее форма также существенно отличается от формы лунки в монолитных образцах. По-видимому, при рассмотрении механизма разрушения в этом случае нельзя не учитывать возможного переноса излучения внутрь пористых образцов (появление лучистой составляющей коэффициента теплопроводности), а также существенного снижения механической прочности.

Авторы выражают признательность Л. Г. Лаврову за предоставленные образцы и проведение спектрального анализа.

Институт металлургии им. А. А. Байкова
Академии наук СССР
Москва

Поступило
1 X 1969

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. Н. Марковский, Р. А. Таипов, Лазеры и технология изготовления интегральных тонкопленочных микросхем, 1968. ² С. И. Анисимов, А. М. Бонч-Бруевич и др., ЖТФ, 36, № 7, 1273 (1966). ³ Ю. В. Афанасьев, О. Н. Крохин, ЖЭТФ, 52, № 4, 966 (1967). ⁴ П. И. Уляков, ЖЭТФ, 52, № 3, 820 (1967). ⁵ Г. А. Аскаръян, А. М. Прохоров и др., ЖЭТФ, 44, № 6, 2180 (1963). ⁶ В. С. Чиркин, Теплофизические свойства материалов ядерной техники, 1968. ⁷ А. Н. Иерусалимская, В. И. Самойлов, П. И. Уляков, Физ. и хим. обработки материалов, № 4, 26 (1968).