

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛНОВОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ

А.М. Петренко, Н.А. Босак, А.Н. Чумаков

Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68, 220072 Минск, Беларусь,
alhand@mail.ru

Abstract The generation conditions of ring surface structures during pulsed laser ablation of metals are established and the mechanism of their formation is proposed.

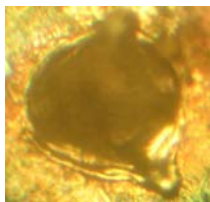
Установлению и анализу факторов, влияющих на образование поверхностных структур под действием импульсного лазерного излучения, посвящены работы ряда исследователей. Среди таких факторов рассматривались неустойчивости фазовых переходов первого рода, а именно плавления и испарения /1/, неустойчивость поверхности расплава, обусловленная зависимостью коэффициента поверхностного натяжения от температуры /2/, а также предложен механизм термоэлектрической неустойчивости /3/. При этом, как правило, учитывается экранирующее действие лазерной плазмы. Однако не принимается во внимание тот факт, что импульсная лазерная плазма является источником ударных волн и акустического импульсного излучения. Это, по-видимому, обусловлено тем, что согласно известным результатам численных расчетов взрыва с противодавлением после достаточного удаления головной ударной волны (УВ) от области взрыва в его центре образуется зона покоя. Ее граница расширяется со скоростью звука. В этой зоне массовая скорость равна нулю, а давление равно равновесному. Казалось бы, влияние динамики плазмы приповерхностного оптического пробоя на образование поверхностных структур можно не учитывать.

Однако выполненные нами эксперименты по исследованию ударных волн, генерируемых при оптическом пробое /4, 5/ выявили картину, качественно отличающуюся от результатов газодинамических расчетов. Выяснилось, что зона покоя практически отсутствует вследствие возбуждения долго не затухающих акустических колебаний, оказывающих влияние на всю область газодинамического течения. Это указывает на протекание сложных процессов трансформации ударно-волнового возмущения в широкодиапазонное акустическое излучение. При этом возможно образование вторичных расходящихся и сходящихся ударных волн (РУВ и СУВ) и переноса ими энергии и массы.

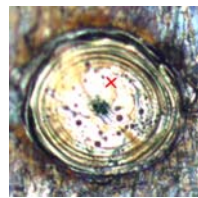
В настоящей работе выполнены экспериментальные исследования воздействия лазерного излучения на поверхность мишеней из

нержавеющей стали и титана с целью выявления влияния ударных волн и акустических возмущений на формирование волновой поверхностной структуры. В экспериментах использовалась установка на основе YAG:Nd³⁺-лазера ($\lambda = 1,064$ мкм, $\tau = 120$ мкс) в режимах квазинепрерывной генерации и модуляции добротности. Лазерное излучение (ЛИ) фокусировалось на горизонтальной поверхности мишени плосковыпуклой сферической линзой с фокусным расстоянием 60 мм в однородное пятно $d_n = 0,2$ мм. Энергия импульса ЛИ составляла $E = 290$ мДж. Благодаря использованию калиброванных нейтральных светофильтров НС-3 и НС-6 энергия и плотность мощности воздействующего на мишени ЛИ изменялась в широких пределах $1 \text{ МВт/см}^2 \leq q \leq 1000 \text{ МВт/см}^2$. Мишени изготавливались в виде прямоугольных пластинок размерами 10x10x1 мм. Их лицевая поверхность шлифовалась, но не полировалась. Эксперименты проводились в воздухе при нормальных условиях.

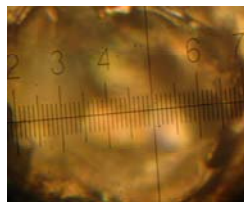
Поверхности облученных лазером мишеней исследовались методом оптической микроскопии и фотографировались цифровой фотокамерой. На рисунке 1 *а, б, в* приведены типичные фотоснимки облученных мишеней стали при плотности мощности воздействующего ЛИ $q_a = 1,1 \text{ МВт/см}^2$, $q_b = 1,8 \text{ МВт/см}^2$ и $q_v = 4,6 \text{ МВт/см}^2$. Для Ti получена сходная структура пятен облучения и потому не приводится.



а



б



в



Pb



In

Рисунок 1 – Сталь нержавеющая

Рисунок 2 – Следы абляции

При $q = q_b$ (рисунок 1 *б*) область эрозии представляет собой неглубокий кратер, поскольку хорошо просматривается при одном положении фокуса объектива микроскопа. Внутри кратера видна регулярная структура возмущений поверхности в виде концентрических колец. В средней части колец нет. В центре имеется темное углубление малого размера с границей неправильной формы. Из рисунков 1 *а, в* видно, что и при $q > q_b$, и при $q < q_b$, несмотря на действие капиллярных сил, регулярные кольцевые структуры, подобные приведенной на рисунке 1 *б*, не образуются. Из приведенной ниже таблицы 1 видно, что размер кратера D_k минимален при $q = q_b$. Это означает, что формирование кольцевой поверхностной структуры сопровождается эффективным переносом энергии из горячей области пробоя во внешнюю среду.

Таблица 1 - Размеры кратеров в зависимости от плотности мощности ЛИ

Материал	q , МВт/см ²	1,1	1,8	4,6
Сталь	D_K , мм	$0,146 \times 0,13$	0,114	$0,324 \times 0,27$
Титан	D_K , мм	0,157	0,135	0,216

Такой перенос не могут обеспечить капиллярные возмущения, но могут ударные волны. Естественно предположить, что с УВ связано и образование поверхностных кольцевых волновых структур.

По-видимому, при $q = q_0$ устанавливается импульсно-периодический режим генерации плазмы с абляцией материала мишени, а также с генерацией РУВ. Это подтверждается приведенными на рисунке 2 концентрическими кольцевыми следами импульсно-периодической абляции, полученными на защитном стекле в том же режиме облучения мишеней из Рb и In. (Луч лазера проходит сквозь защитное стекло по нормали к его поверхности). Радиус этих следов уменьшается по мере углубления кратеров. При этом на их внутренней поверхности формируется волновая структура в виде опоясывающих концентрических колец, подобных показанным на рисунке 1 б, располагающихся на разной глубине. Косвенно это также подтверждается результатами работы [6], где обнаружены осцилляции температуры мишени на поздней стадии лазерного облучения в квазинепрерывном режиме.

В каждом акте пробоя формируется пароплазменное облако с плотностью, меньше равновесной. Вследствие этого пробой развивается подобно безмассовому взрыву. РУВ уносит в атмосферу часть энергии пробоя, формирует и транспортирует на периферию волну расплава (ударно-волновой тепло- и массоперенос). При воздействии длительных импульсов ЛИ приповерхностное образование плазмы носит периодический характер, прекращаясь вследствие плазменной экранировкой и возобновляясь под действием СУВ за счет повышения плотности и показателя преломления в центре. Этим обеспечивается дополнительная фокусировка, повышение плотности мощности ЛИ на дне кратера и инициирование следующего акта пробоя.

РУВ при достаточном удалении от центра из-за акустической дисперсии распадается на расходящуюся (РАВ) и сходящуюся (САВ) акустические волны. РАВ вносит вклад в акустическое излучение пробоя. САВ трансформируется в СУВ, снова инициирующую пробой. Представленная на рисунке 1 б концентрическая структура волн застывшего расплава обусловлена транспортными свойствами последовательности РУВ, генерированных последовательными актами пробоя при снижении их энергии на поздней стадии облучения.

При $q = q_a$ (рисунок 1 а) область эрозии - глубокий кратер с овальной границей. Вне его имеются натеки расплава. Внутри поверхность слабо и

нерегулярно возмущена, что указывает на доминирующую роль турбулентного теплопереноса в процессе формирования кратера. Механизм турбулизации здесь может быть обусловлен неравномерностью испарения материала мишени под действием ЛИ и зависимостью коэффициента преломления от плотности смеси воздуха и паров.

При $q = q_*$ (рисунок 1 в) область эрозии - глубокий кратер с четкой овальной границей. Внутри на разной глубине с помощью микроскопа просматриваются два кольца с сильно возмущенной поверхностью (из-за нечеткости изображений не приведены). В этом случае плотная пароплазменная область разлетается в относительно малоплотную среду и тормозится в ней. В силу этого развивается неустойчивость Релея-Тейлора границы горячей области, которая обуславливает ее турбулизацию [7]. Вызванный этим турбулентный теплоперенос обеспечивает быструю передачу энергии горячей области в материал мишени, ослабление генерации ударных волн и вклада ударно-волнового тепло- и массопереноса.

Таким образом, в работе выявлено, что импульсно-периодическая абляция металлов, облучаемых в квазинепрерывном режиме вблизи порога испарения, сопровождается формированием кольцевых волновых структур на их поверхности, что указывает на импульсно-периодическую динамику лазерной плазмы, как на ключевой фактор этого формирования. При этом генерация поверхностных кольцевых структур наиболее выражена при плотности мощности ЛИ $q \sim 2 \text{ МВт/см}^2$, затухает с повышением плотности мощности ЛИ свыше $\sim 5 \text{ МВт/см}^2$, и вовсе прекращается при уменьшении q ниже $1,1 \text{ МВт/см}^2$, что может быть обусловлено сменой преобладающего механизма тепло- и массопереноса с ударно-волнового на турбулентный.

Авторы благодарны сотруднику Института физики НАН Беларуси Горбачевой А.Н. за помощь в регистрации микрофотографий (рисунок 1 б) на ИК-микроскопе "Continuum" (Termo fisher Scientific, USA).

Литература

- 1 Самохин А.А. Труды ИОФАН **13**, (1988) 3–98.
- 2 Левченко Е.Б., Черняков А.Л. ЖЭТФ, **81** 1 (1981) 202–209.
- 3 Иоффе И.В., Эйдельман Е.Д. Письма в ЖТФ, **15** 2 (1989) 9–11.
- 4 Чумаков А.Н. [и др.] ИФЖ, **75** 3 (2002) 161–165.
- 5 Чумаков А.Н. [и др.] ИФЖ, **76** 4 (2003) 89–94.
- 6 Рыкалин Н.Н. [и др.] ДАН СССР, **283** 6 (1985) 1376–1378.
- 7 Анисимов С.И., Зельдович Я.Б. Письма в ЖТФ, **3** 20 (1977) 1081–1084.