

УДК 536

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© П.М. Кузнецов, В.А. Федоров

Ключевые слова: лазерное излучение; сплав; пространственное развитие неустойчивости; кратер.

Исследуется рельеф поверхности сплава Fe-Si и тугоплавких металлов (вольфрама и молибдена) после воздействия лазерного излучения. Показано, что на поверхности формируется волнообразный рельеф, связанный с появлением термокапиллярной неустойчивости. В тугоплавких металлах в центральной части кратера происходит формирование характерного конуса, что связано с объемными колебаниями ванны расплава.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование взаимодействия лазерного излучения с поверхностью различных материалов началось практически с момента создания лазерных генераторов. Наибольший интерес представляет промышленное применение лазерных технологий. Например, благодаря достижению практически дифракционного предела диаметра лазерного пучка, появилась возможность уменьшить обрабатываемую площадь двух свариваемых деталей. При нанесении различной информации на изготовленную деталь (лазерная маркировка) удалось избежать большой деформации поверхности. В этих и других многочисленных примерах применения лазерных технологий проявляются различные гидродинамические явления, исследование которых носит не только прикладное, но и фундаментальное значение.

Цель: исследовать общие закономерности формирования рельефа в зоне воздействия лазерного излучения в металлах с различной температурой плавления.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В работе использовали пластины ОЦК сплава Fe-Si (массовая доля Si $\approx 3,4\%$) с размерами $30 \times 15 \times 0,27$ мм, а также монокристаллы W и Mo (выращенные методом бестигельной зонной плавки) в виде цилиндрических пластин 20×1 мм. Облучали образцы на установке с активным элементом на основе иттрий-алюминиевого граната, легированного неодимом ($\lambda = 1,064$ мкм). Энергию воздействия лазерного импульса определяли измерителем энергии и мощности ИЭМ-4-1. Энергия импульса и время воздействия составляли $3 \pm 0,1$ Дж и 3 мс, соответственно. Облучение образцов проводили прямоугольной временной формой импульса лазерного излучения. Это позволило облучать мишени такой плотностью мощности, при которой оплавляется поверхность, но не происходит интенсивной абляции вещества. Все эксперименты производились при комнатной температуре при обдуве поверхности мишени смесью аргона и окружающего воздуха. Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе. Топологические измерения проводили на бес-

контактном профилометре Wyko NT 9080 (длина волны излучения $\lambda \sim 670$ нм).

3. ОСОБЕННОСТИ РЕЛЬЕФА В СПЛАВЕ Fe-Si

В первой серии экспериментов изучали топологические особенности кратера, образующегося после воздействия лазерного излучения на поверхность сплава Fe-Si. Результаты экспериментов представлены на рис. 1. При облучении поверхности с интенсивностью $1,07 \cdot 10^5$ Вт·см⁻² (рис. 1а) происходит незначительное оплавление. Эту плотность мощности лазерного излучения можно принять в качестве критической. Увеличение интенсивности лазерного излучения, наряду с оплавлением поверхности, приводит к формированию квазипериодического волнового рельефа. После воздействия лазерного излучения с интенсивностью $\sim 1,1 \cdot 10^5$ Вт·см⁻² (рис. 1б) на поверхности сплава Fe-Si еще отсутствует квазипериодический волновой рельеф. Указанная интенсивность является пороговой для образования волнового рельефа.

Высота поверхности застывшего расплава относительно необлученной поверхности при низких интенсивностях лазерного излучения не превышает 3–4 мкм (рис. 1а, 1б), тогда как при облучении поверхности сплава Fe-Si высокими интенсивностями лазерного излучения подъем поверхности достигает 8 мкм (рис. 1г). Одновременно с этим происходит изменение кривизны поверхности. При малых плотностях мощности лазерного излучения (рис. 1а) поверхность является гладкой с незначительным углублением ~ 1 мкм между центром кратера и его периферией. По мере увеличения интенсивности лазерного излучения поверхность застывшего расплава становится выпуклой (рис. 1б–1г), одновременно с этим на исследуемой поверхности появляется квазипериодический рельеф. Основываясь на результатах исследований поверхности расплава [1–2] в момент воздействия лазерного излучения, можно сделать вывод, что возмущение, появляющееся на поверхности расплава, движется по течению от центра к периферии. Учитывая это, можно сказать, что формирование рельефа связано с конвективной неустойчивостью распространения поверхностной термокапилляр-

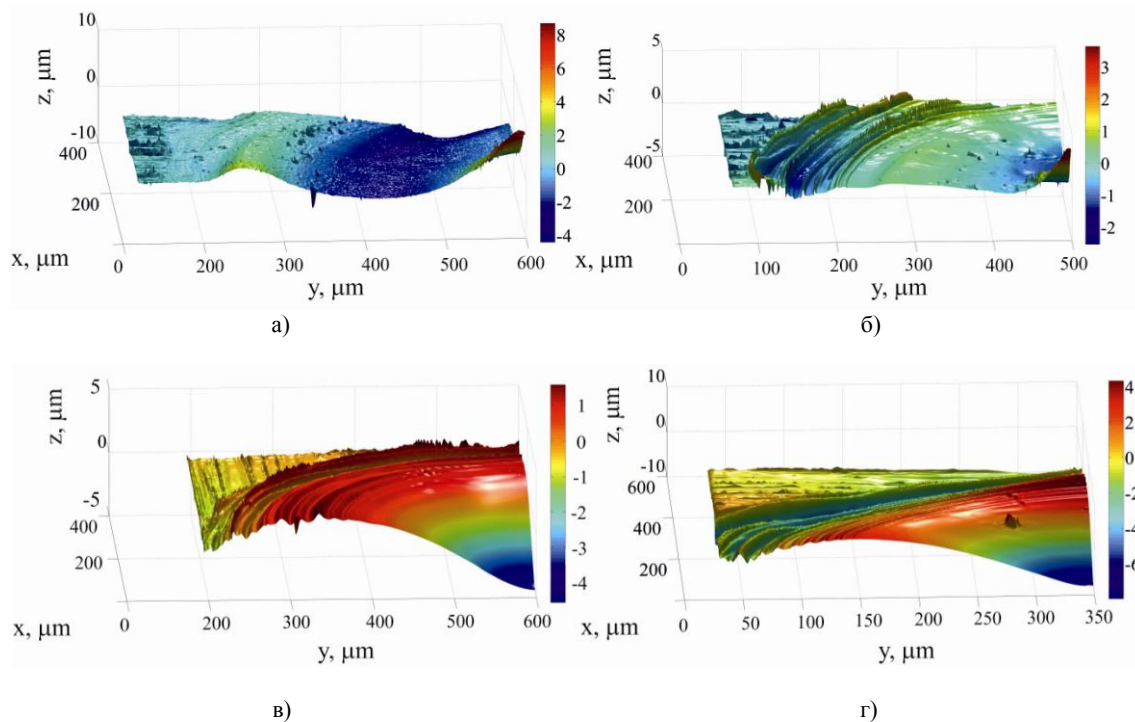


Рис. 1. Эволюция топологии кратера при изменении плотности мощности лазерного излучения: а) $1,07 \cdot 10^5$ Вт·см $^{-2}$; б) $1,16 \cdot 10^5$ Вт·см $^{-2}$; в) $1,53 \cdot 10^5$ Вт·см $^{-2}$; г) $1,7 \cdot 10^5$ Вт·см $^{-2}$

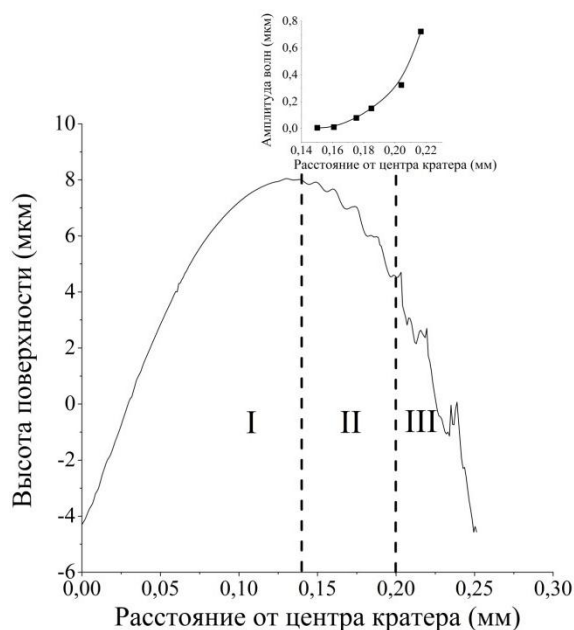


Рис. 2. Профилограмма кратера сплава Fe-Si при облучении поверхности с плотностью мощности $2,21 \cdot 10^5$ Вт·см $^{-2}$ (на вставке показана зависимость изменения амплитуды волн (разность соседних амплитуд) от расстояния до центра кратера)

ной волны. Период рельефа на периферии кратера возрастает в $\sim 1,5$ раза по отношению к центральной части.

Экспериментальные результаты сопровождаются простыми физическими рассуждениями: т. к. поверхностное натяжение зависит от градиента температуры,

то возникает сила Марангони [3], которая действует на возмущение и приводит к его перемещению в радиальном направлении от центральной части расплава к периферии. Это также приводит к росту амплитуды возмущения в зависимости от расстояния до центра кратера.

Таким образом, рельеф в кратере, образующийся в результате воздействия лазерного излучения, является результатом перемещения термокапиллярных волн на поверхности расплава и поэтому позволяет получить информацию об эволюции термокапиллярных волн в пространстве. С этой целью целесообразно исследовать закономерности формирования волнового рельефа, изучая профилограммы поверхности кратера.

Профилограмма, показывающая особенности формирования волнового рельефа, представлена на рис. 2. В качестве характерного примера волнового рельефа выбран кратер, полученный при облучении с плотностью мощности $2,21 \cdot 10^5$ Вт·см $^{-2}$.

Из рис. 2 можно выделить три области формирования рельефа кратера: I – область стабилизации поверхности, ($\sim 0-0,15$ мм); II – область экспоненциального роста волн, ($\sim 0,15-0,2$ мм); III – область нелинейного роста волн ($\sim 0,2-0,25$ мм).

В области экспоненциального роста волн (II) сформировавшиеся волны имеют пологий подъем и крутой фронт, что характерно для перемещения волн по течению [4].

В ряде случаев исследователи сталкиваются с большим числом областей развития волн. Так, в [5] произвели моделирование неустойчивости Кельвина–Гельмгольца при обдувании солнечным ветром ионосферы Земли. Авторы обнаружили четыре области развития волн – наряду с вышеперечисленными выявлена линейная стадия роста волн. В экспериментальных работах, в отличие от теоретических, особые затруд-

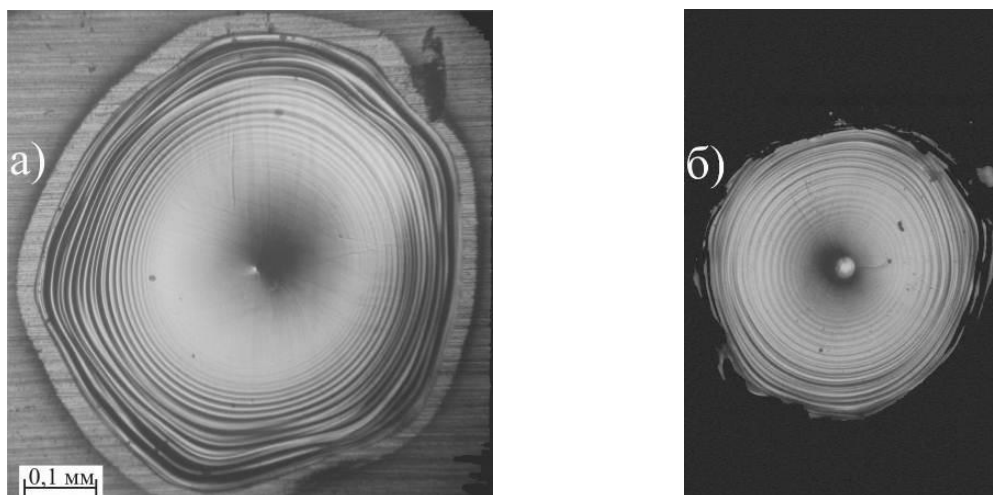


Рис. 3. Вид характерного разрушения поверхности железа, при воздействии лазерного излучения с интенсивностью $2,94 \cdot 10^5$ Вт·см $^{-2}$: а) лицевая, б) обратная сторона

нения возникают при определении областей развития волн. В нашем случае невозможно выявить линейную стадию роста волн, т. к. отсутствуют данные по временному развитию капиллярных волн.

В области нелинейного роста волн наблюдается раздвоение целой волны на две отдельные. Это может быть связано с появлением вторичных неустойчивостей при превышении амплитуды исходной волны критического значения [6]. Критическая амплитуда волны в нашем случае составляет 0,6 мкм.

Повышение плотности мощности излучения до $\sim 2,64 \cdot 10^5$ Вт·см $^{-2}$ приводит к формированию на противоположной стороне пластин зоны (рис. 3б), аналогичной зоне воздействия на лицевой стороне (рис. 3а). На обратной стороне формируется аналогичный рельеф.

Пары отдачи, существующие при горении и кипении поверхности расплава сплава Fe-Si, могут модифицировать поверхность образующегося кратера. Поэтому с целью исключить влияние кипения на формирование рельефа в исследуемом диапазоне интенсивности в следующей серии экспериментов исследовались тугоплавкие металлы – молибден и вольфрам. Порог плотности мощности лазерного излучения для тугоплавких металлов, при котором происходит процесс кипения, превышает диапазон плотностей мощности, используемых в данной работе.

Топологические особенности разрушения поверхности молибдена представлены на рис. 4а. Увеличение плотности мощности падающего лазерного излучения качественно не изменяет картину оплавления поверхности. На периферии образуется волновой рельеф с периодом ~ 10 мкм. В центре кратера формируется «выброс» вещества расплава. Формирование такого «выброса» происходит при облучении поверхности во всех исследуемых диапазонах интенсивностей лазерного излучения.

Как видно из представленной на рис. 4б профилограммы кратера, отличительной особенностью полученного рельефа является отсутствие области стабилизации. Развитие волнового рельефа начинается непосредственно на «выбросе» в центральной части кратера. Выделяются только две области развития волнового

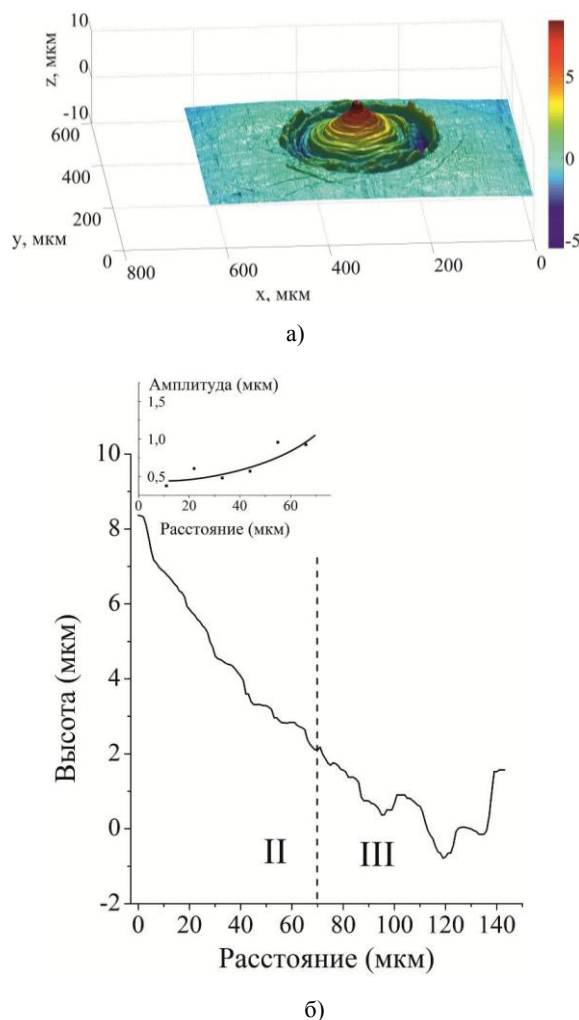


Рис. 4. а) Топология поверхности молибдена при облучении лазерным излучением с плотностью мощности $2,64 \cdot 10^5$ Вт·см $^{-2}$; б) профилограмма части поверхности кратера. На вставке представлена зависимость амплитуды от расстояния до центра кратера

рельефа – область экспоненциального и нелинейного роста. Отсутствие области стабилизации, по-видимому, связано с колебаниями вершины «выброса» и с отсутствием действия паров отдачи.

Качественно такие колебания можно объяснить следующим образом: после прекращения действия лазерного излучения поток тепла от расплава осуществляется через границу жидкость–твердое тело, по механизму теплопроводности; с другой стороны, теплоотвод с поверхности раздела газ–жидкость является затрудненным (из-за низкой теплопроводности окружающего газа основные теплопотери с поверхности расплава происходят по излучательному механизму), поэтому поверхность ванны расплава остается еще жидкой, когда объем ванны уже затвердел. Из-за наличия начального импульса, возникшего в момент воздействия лазерного излучения, а также в результате процесса реактивного выброса паров отдачи при кипении поверхность расплава колеблется и после прекращения воздействия лазерного излучения.

Наличие флуктуаций положения вершины – «выброса» – приводит к перераспределению еще жидкого вещества из-за действия сил поверхностного натяжения. Этот механизм обуславливает возникновение осцилляций.

Оплавление монокристаллов вольфрама происходит аналогично оплавлению монокристаллов молибдена. Минимальная интенсивность излучения, при которой происходит оплавление поверхности, составляет $2,64 \cdot 10^5$ Вт·см⁻². Материал эффективней расплавляется на дефектах поверхности. Образования кольцевого рельефа не происходит. Критической плотностью мощности для образования волнового рельефа является значение $2,9 \cdot 10^5$ Вт·см⁻². Усредненный период рельефа составляет 12 мкм.

Сформированные кратеры на поверхности вольфрама характеризуются топологией, подобной топологии поверхности молибдена. Также видно образование в центральной части кратера «выброса» расплава. Максимальная амплитуда такого «выброса» в наших экспериментах составляет порядка ~ 50 мкм.

На поверхности вольфрама также отсутствует область стабилизации. Размер областей экспоненциального и нелинейного роста составляет $\sim 0,7$ и $\sim 0,8$ мм соответственно.

Таким образом, отсутствие кипения на поверхности расплава в момент воздействия лазерного излучения на тугоплавкие металлы приводит к формированию «выброса» из центральной части кратера. Отсутствие области стабилизации при облучении тугоплавких металлов обусловлено общим механизмом – колебаниями вершины «выброса».

Следующая серия экспериментов была направлена на изучение характера перемешивания (массопереноса) двух металлов: железа и меди. Результаты этих экспериментов дают информацию о конвективных процессах в ванне расплава, происходящих в результате лазерного воздействия. Использовали следующую методику. В предварительно приготовленное отверстие запрессовывали медную проволочку. Затем поверхность облучалась когерентным излучением. Травлением поперечного среза кратера выявлено образование характерного вихревого перемешивания, формирующегося в центральной части зоны плавления (рис. 5а, указано стрелками). Медная проволочка и основной материал полностью расплавляются.

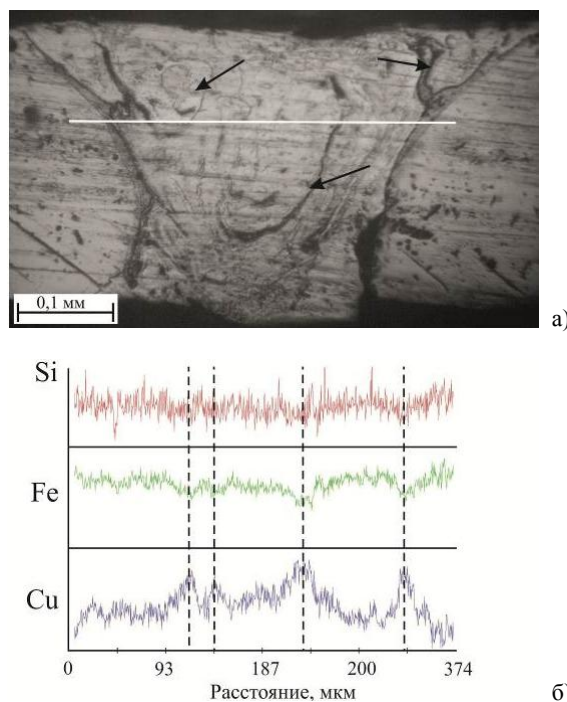
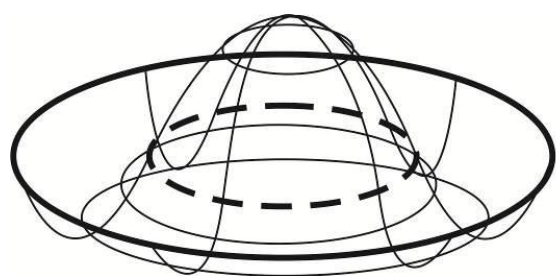


Рис. 5. Поперечное сечение зоны воздействия излучения: а) вид травления поперечного среза зоны воздействия в образце с медной проволочкой; б) относительное распределение Fe, Cu, Si вдоль белой линии

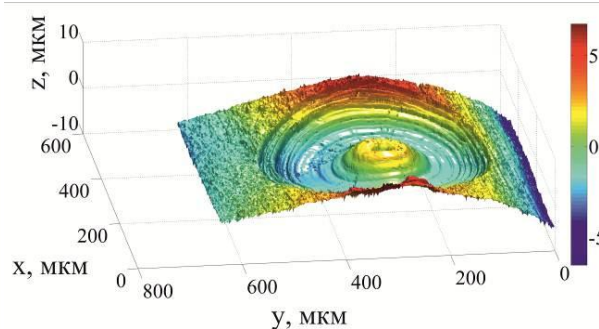
Для исследования распределения меди внутри кратера был проведен элементный анализ. Видно (рис. 5б, вертикальные пунктирные линии), что при локальном уменьшении концентрации железа происходит локальное увеличение концентрации меди. Это позволяет сделать вывод, что вихревая картина является следствием перемешивания расплава.

На рис. 5а можно выделить формирование замкнутых интенсивных вихрей: 1) тороидальный вихрь, образовавшийся около поверхности; 2) центральный вихрь, формирование которого происходит в центральной части ванны расплава.

Таким образом, легированием сплава Fe-Si медью выявлено существование замкнутых объемных и приповерхностных вихрей в ванне расплава. Это означает, что конвективные течения, возникающие в результате воздействия лазерного излучения на металлическую поверхность без легирующего вещества и с легирующим веществом, являются развитыми. Развитые конвекционные потоки формируют пространственные области развития термокапиллярной неустойчивости. Очевидно, что облучение поверхности сплава Fe-Si низкими плотностями мощности лазерного излучения не приводит к формированию развитых конвекционных потоков. При этом на поверхности сплава Fe-Si в центральной части кратера формируется застывший «выброс» вещества. Результатом воздействия лазерного излучения на тугоплавкие металлы в исследуемом интервале плотностей мощности является образование аналогичного «выброса», формирующегося в результате облучения сплава Fe-Si низкими плотностями мощности. Можно сделать вывод, что конвекционные потоки в расплаве тугоплавких металлов являются неразвитыми.



а)



б)

Рис. 6. а) Колебания идеально упругой мембраны при $n = 0, k = 2$; б) вид кратера молибдена после воздействия лазерного излучения с плотностью мощности $3,13 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$

Процессы, происходящие в ванне расплава, подробно исследованы для времен несколько секунд и десятков секунд. Такие исследования встречаются в работах по дуговой сварке вольфрамовым электродом, чему посвящено множество работ [7–9]. Такие «долго-протекающие» процессы сопровождаются установившимися течениями в ванне расплава, причем поверхность можно наблюдать *in situ*, используя простую методику [9]. В отличие от этого, короткие воздействия на поверхность обрабатываемой детали с помощью миллисекундного лазерного импульса еще не до конца изучены. Это связано прежде всего с трудностью наблюдения за поверхностью ванны расплава из-за засветки эрозионным факелом, а также с непрозрачностью расплава для наблюдения объема расплава. Поэтому открытой задачей остается определение характера течения в процессе импульсного лазерного воздействия по косвенным признакам.

Для тугоплавких металлов в центре кратеров наблюдается застывший «выброс» металла (рис. 4а) (аналогичная картина наблюдается при облучении малыми интенсивностями поверхности сплава Fe-Si (рис. 1а, 1б)). Подобные явления возможно объяснить колебаниями поверхности расплава.

Если предположить, что при установившихся колебаниях расплава движение жидкости является потенциальным (которое предполагает безвихревое движение, а также пренебрежение действием вязких сил в жидкости), то, вводя потенциал скорости ($\partial\phi/\partial x = v_x, \partial\phi/\partial y = v_y, \partial\phi/\partial z = v_z$) в уравнение непрерывности, получим (например [10]):

$$\Delta\phi = 0. \quad (1)$$

Уравнение (1) заменяет уравнения Навье–Стокса. С граничными условиями для частично проплавленной пластины [11–12]:

$$\begin{cases} \frac{\partial\phi}{\partial z} = 0, \text{ при } z = h, \\ \rho_l g \frac{\partial\phi}{\partial z} + \rho_l \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} - \sigma \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial\phi}{\partial r} + \frac{\partial^2\phi}{\partial r^2} \right) = 0, \text{ при } z = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где ρ_l – плотность расплава; σ – коэффициент поверхностного натяжения расплава. Решение уравнения (1) в

цилиндрических координатах, с граничными условиями (2) ищется в виде [10; 12]:

$$\phi = AJ_n(kr) (B_1 e^{kz} + B_2 e^{-kz}) \cos(\omega t + \omega_0), \quad (3)$$

где A, B_1, B_2, ω_0 – постоянные, определяемые из начальных и граничных условий; k – волновое число; $J_n(kr)$ – функция Бесселя n -го порядка; z – координата вертикального перемещения поверхности; ω – частота колебаний.

Волновое число k определяется значением корней функции Бесселя и входит в дисперсионное соотношение для определения частоты волн:

$$\omega^2 = \left(gk + \frac{\gamma}{\rho} k^3 \right) \tanh(2kh), \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения; γ – коэффициент поверхностного натяжения; ρ – плотность расплава; h – толщина расплава.

Числа k и n в (3) определяют моду колебаний: k – число узловых диаметров, n – число узловых линий. Моду колебаний расплава молибдена и вольфрама соответствует $n = 0, k = 2$. Форма поверхностей, соответствующих различным модам колебаний упругой мембраны, показана на рис. 6а. На рис. 6б показан вид кратера молибдена после воздействия лазерного излучения, где видна одна из фаз колебаний поверхности.

Частота таких колебаний, рассчитанных по формуле (4), равна $\omega \sim 10^5$ Гц. Из проведенных оценок за время кристаллизации расплава сплава Fe-Si совершит 4–5 полных периодов колебаний.

Таким образом, при низких интенсивностях ($< 1,3 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$) в сплаве Fe-Si подъем расплава в центральной части кратера обусловлен объемными колебаниями. Для вольфрама и молибдена во всем исследуемом интервале интенсивностей существуют объемные колебания ванны расплава, вершины «выбросов» которых совершают колебательные движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Д.В., Араксян С.М., Галкин А.Ф., Квачева Л.Д., Климовский И.И., Кононов М.А., Михалицын Л.А., Кучерик А.О., Прокопьев В.Г., Савранский В.В. Плавление углерода, нагреваемого сконцентрированным лазерным излучением в воздухе при атмо-

- сферном давлении и температуре, не превышающей 4000 К // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84. Вып. 5. С. 315-319.
2. Jiang, L., Lin H.-J., Schultz W.W., Perlman M. Unsteady ripple generation on steep gravity-capillary waves // J. Fluid Mech. 1999. V. 386. P. 281-304.
 3. Путеводитель Прандтля по гидроаэродинамике / ред. Г. Эртель мл. Москва; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2007. 776 с.
 4. Li W.Y., Guo X.C., Wang C. Spatial distribution of Kelvin-Helmholtz instability at low-latitude boundary layer under different solar wind speed conditions // Journal of geophysical research. 2012. V. 117. A08230. P. 1-11.
 5. Alekseenko S.V., Aktershev S.P., Cherdantsev A.V., Kharlamov S.M., Markovich D.M. Primary instabilities of liquid film flow sheared by turbulent gas stream // International Journal of Multiphase Flow. 2009. V. 35. P. 617-627.
 6. Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Курс лекций: в 2 ч. СПб.: ГУ ИТМО, 2011. Ч. 2. 184 с.
 7. Zhao D.B., Chen S.B., Wu L., Dai M., Chen Q. Intelligent Control for the Shape of the Weld Pool in Pulsed GTAW with Filler Metal // Welding research supplement. 2001. V. 80. № 11. P. 253-260.
 8. Palmer T.A., Debroy T. Numerical Modeling of Enhanced Nitrogen Dissolution during Gas Tungsten Arc Welding // Metallurgical and materials transactions B. 2000. V. 31B. P. 1371-1385.
 9. Kou S., Limmaneevichitr C., Wei P.S. Oscillatory Marangoni Flow: A Fundamental Study by Conduction-Mode Laser Spot Welding // Welding Journal. 2011. V. 90. P. 229-241.
 10. Xiao Y.H., den. Ouden G. A study of GTA weld pool oscillation // Welding Journal. 1990. V. 69. P. 289-293.
 11. Ландау Л.Д., Lifshits E.M. Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов: в 10 т. М.: «Физматлит», 2006. Т. 6. Гидродинамика. 736 с.
 12. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Изд-во МГУ; Изд-во «Наука», 2004. 798 с.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-42-03206 и гос. задание (проект № 2476).

Поступила в редакцию 24 апреля 2015 г.

Kuznetsov P.M., Fedorov V.A. PECULIARITIES OF FORMING RELIEF AT THE SURFACE OF METALS IN THE ZONE OF IMPLEMENTING LASER RADIATION

Surface relief of Fe-Si alloy and of refractory metals (tungsten and molybdenum) after laser radiation are researched. It is shown that at the surface forms undulating relief, which is connected with appearance of thermo-capillary instability. In refractory metals in central part of crater is going forming of characterized cone which is connected with volume oscillations of fused bath

Key words: laser radiation; alloy; spatial development of instability; crater.

Кузнецов Петр Михайлович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, ассистент кафедры общей физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Kuznetsov Petr Mikhaylovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Assistant of General Physics Department, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Федоров Виктор Александрович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, зав. кафедрой общей физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Fedorov Viktor Aleksandrovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Honored Worker of Science of Russian Federation, Head of General Physics Department, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru