

УДК 539

ТОПОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОЦК МЕТАЛЛОВ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© П.М. Кузнецов, В.А. Федоров, Ф.С. Яблоков

Ключевые слова: лазерное излучение; объемные колебания расплава; ОЦК металлы; топология поверхности; кратер.

Исследована топология кратеров на поверхности ОЦК металлов. Показано, что формирование конусообразного выступа в центре кратера связано с объемными колебаниями ванны расплава.

ВВЕДЕНИЕ

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

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовали пластины поликристаллического кремнистого железа толщиной 0,25 мм и средним размером зерен 10 мкм, приготовленные как металлографический шлиф. В основной состав стали входит кремний, содержание которого составляет ~3,4 % [1]. Использовали также монокристаллы молибдена и вольфрама, выращенные методом бестигельной зонной плавки, которые имели цилиндрическую геометрию, размеры составляли 15×1,5 мм. Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе. Топологические измерения проводили на бесконтактном профилометре Wyko NT 9080 (длина волны излучения $\lambda \sim 670$ нм). Облучение образцов производили прямоугольной временной формой лазерного импульса. Это позволило значительно увеличить значение плотности мощности пучка лазерного излучения [2]. Варьирование плотности мощности производили по методике, предложенной в [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из рис. 1, при малых интенсивностях (недостаточных для формирования объема расплава) на поверхности в центре кратеров образуется подъем, который достигает от 3 до 7 мкм в высоту (от дна кратера). Для тугоплавких металлов наблюдается анало-

гичная картина (рис. 2). Подобные явления возможно объяснить объемными колебаниями ванны 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, можно получить (например, [4]):

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

В работе [5] исследовались осцилляции расплава при дуговой сварке вольфрамовым электродом, в указанной работе граничные условия для частично расплавленной пластины задавались в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial\phi}{\partial z} = 0, \text{ при } z = h, \\ \rho_l g \frac{\partial\phi}{\partial z} + \rho_l \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} - \sigma \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial\phi}{\partial r} + \frac{\partial^2\phi}{\partial r^2} \right) = 0, \text{ при } z = 0, \end{cases} \quad (1')$$

где ρ_l – плотность расплава; σ – коэффициент поверхностного натяжения расплава.

Решение уравнения (1) в цилиндрических координатах с граничными условиями (1') ищется в виде [5, 6]:

$$\phi = A J_n(kr) (B_1 e^{kz} + B_2 e^{-kz}) \cos(\omega t + \omega_0), \quad (2)$$

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. Числа k и n определяют моду колебаний, k – число узловых окружностей, n – число узловых диаметров. Волновое число k определяется значением корней функции Бесселя и входит в дисперсионное соотношение для определения частоты волн:

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

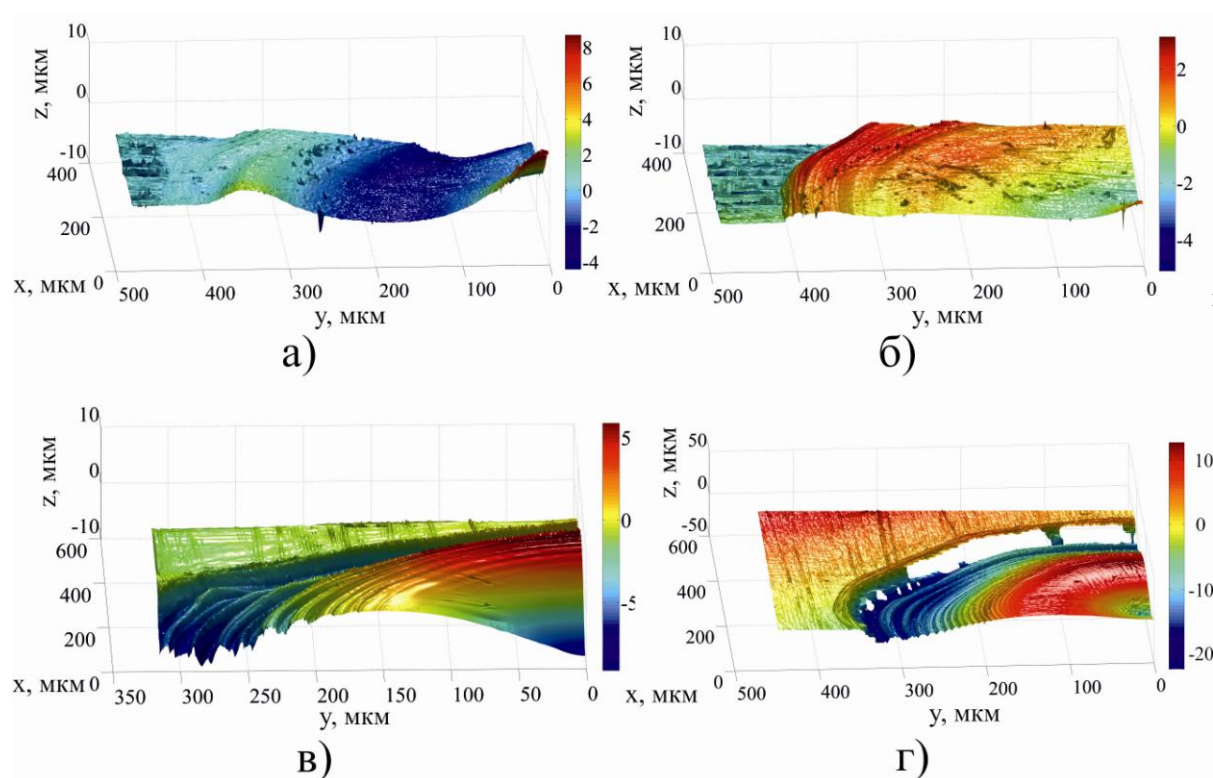


Рис. 1. Эволюция топологии кратера при изменении плотности мощности лазерного излучения: а) $1,07 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$; б) $1,10 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$; в) $2,64 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$; г) $3,13 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$

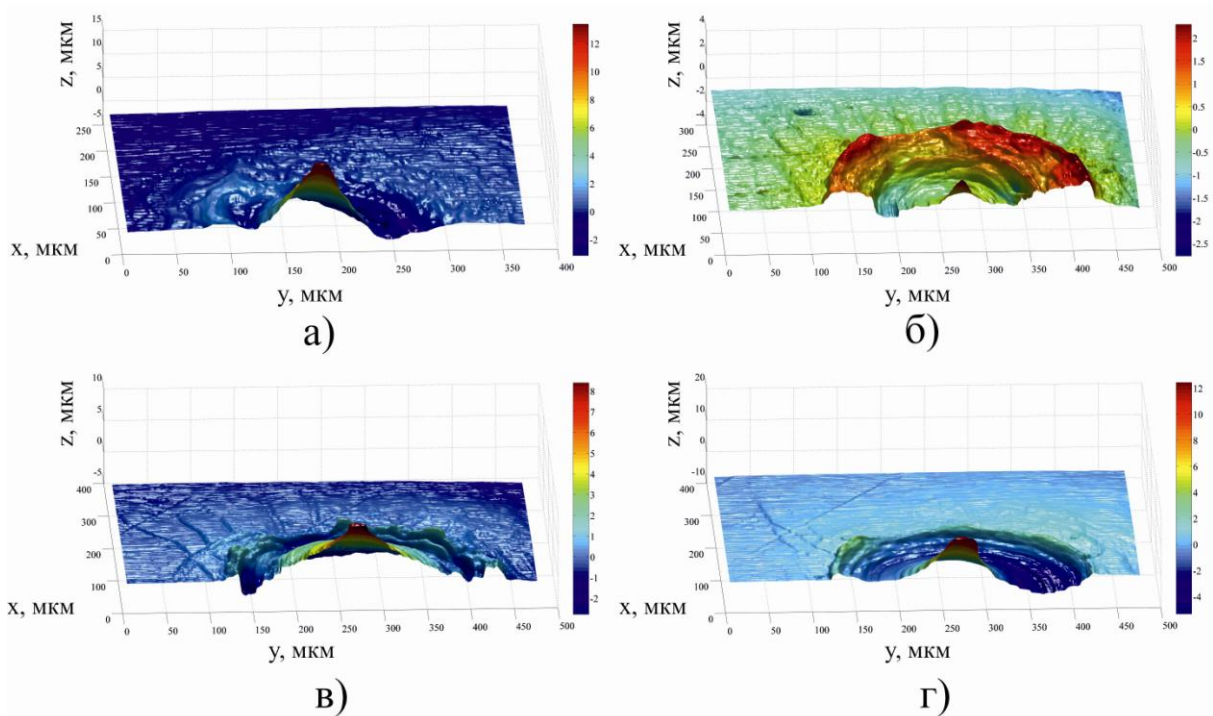


Рис. 2. Восстановленная топология поверхности молибдена при облучении лазерным излучением с различной плотностью мощности: а) $2,64 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$; б) $2,94 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$; в) $3,13 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$; г) $3,28 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$

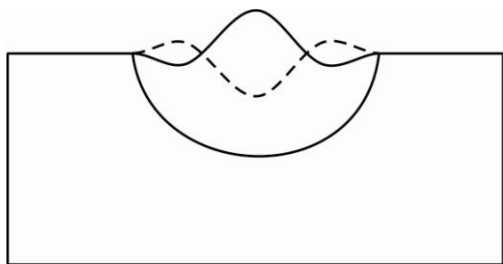


Рис. 3. Схема мгновенной формы ванны расплава в различные фазы колебаний

где g – ускорение свободного падения; γ – коэффициент поверхностного натяжения; ρ – плотность расплава; h – глубина расплава. Дисперсионное соотношение (3) совпадает с дисперсией гравитационно-капиллярных волн в ограниченном объеме [7]. В случае частично расплавленной пластины форма ванны расплава качественно будет соответствовать форме, указанной на рис. 3.

Мгновенная форма поверхности на рис. 3 качественно совпадает с формой объемных колебаний расплава сплава железа при низких плотностях мощности (рис. 1а, 1б). Частота колебаний, подсчитанных по формуле (3), равна $\sim 0,1$ МГц.

Таким образом, при низких интенсивностях ($< 1,3 \cdot 10^5$ Вт·см $^{-2}$) в сплаве Fe–Si подъем расплава в центральной части кратера обусловлен объемными колебаниями, увеличение плотности мощности приводит к кипению расплава и выносу материала из центра кратера. Для вольфрама и молибдена во всем исследуемом интервале интенсивностей существуют объемные колебания ванны расплава, по поверхности которых распространяются термокапиллярные волны [1].

ВЫВОДЫ

Показано, что формирование конусообразного выступа на поверхности различных металлов связано с

объемными колебаниями объема расплава с последующим его затвердеванием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров В.А., Кузнецов П.М., Яковлев А.В. Формирование рельефа на поверхности сплава Fe–Si в зоне воздействия лазерного излучения // Физика и химия обработки материалов. 2013. № 1. С. 24–28.
2. Реди Дж. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974. 468 с.
3. Кузнецов П.М., Федоров В.А., Жигачев А.О. Эволюция рельефа кратера при воздействии лазерного излучения на поверхность стали 40Х13 // Микромеханизмы пластичности разрушения и сопутствующих явлений: труды участников 7 Междунар. конф. (MPFP-2013), 18–21 июня 2013 г., г. Тамбов. Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2013. Т. 18. Вып. 4. С. 1776–1777.
4. Бетчелор Дж.К. Введение в динамику жидкости. Москва; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. 768 с.
5. Xiao Y.H. Weld pool oscillation during gas tungsten arc welding: Ph.D. thesis, 1992.
6. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 736 с.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов: в 10 т. Т. 6. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2006. 736 с.

БЛАГОДАРНОСТИ:

1. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 12-01-97519-р_центр_а.
2. Авторы выражают благодарность А.О. Жигачеву за помощь в экспериментах.

Поступила в редакцию 21 ноября 2013 г.

Kuznetsov P.M., Feodorov V.A., Yablokov F.S. SURFACE TOPOLOGY OF BCC METALS AFTER LASER RADIATION EXPOSURE

A topology crater on the surface of BCC metals is investigated. It is shown that the formation of the cone-shaped is connected with the volume oscillation of the molten bath.

Key words: laser radiation treatment; oscillation volumetric melt; BCC metals; surface topology.

Кузнецов Петр Михайлович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, магистрант по направлению подготовки «Физика» института математики, физики и информатики, e-mail: kuznetsov1985@list.ru

Kuznetsov Pyotr Mikhailovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate for Master's Degree of Direction of Preparation of "Physics" of Mathematics, Physics and Informatics Institute, e-mail: kuznetsov1985@list.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

Feodorov 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

Яблоков Федор Сергеевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, магистрант по направлению подготовки «Физика» института математики, физики и информатики, e-mail: ZANINAP@mail.ru

Yablokov Fedor Sergeyevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate for Master's Degree of Direction of Preparation of "Physics" of Mathematics, Physics and Informatics Institute, e-mail: ZANINAP@mail.ru