

УДК 539.3

О НЕКОТОРЫХ МЕХАНИЗМАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕТАЛЛЫ

© П.М. Кузнецов, В.А. Федоров, С.В. Васильева, Г.А. Барышев

Ключевые слова: лазер; металлы; расплав; неустойчивость.

В обзоре рассматриваются механизмы образования периодических структур при взаимодействии лазерного излучения умеренной интенсивности с металлами (сталь). В качестве таких механизмов приняты: термокапиллярная и испарительно-капиллярная неустойчивости, а также неустойчивость Кельвина – Гельмгольца.

Появление оптических квантовых генераторов создало уникальную возможность получения новых материалов, а так же спровоцировало бурное развитие исследований в области импульсных энергетических воздействий. Благодаря особым свойствам лазерного излучения (когерентность, поляризация, высокие плотности энергии и т. д.) стало возможным управлять внутренними процессами в твердом теле, такими как: структурные и фазовые превращения [1], модификация механических свойств материалов [2–4], воздействие на химические реакции [5] (в частности фотоиницированная полимеризация [6]). Сфера практического применения оптических квантовых генераторов очень широка: лазерная резка и сварка [7, 8], диагностика и дефектоскопия [9], технологии быстрого прототипирования [10–12], стереолитография [13–15] и многое другое.

Особое место в этом списке занимает модификация механических свойств материалов, в частности металлов. При взаимодействии лазерного излучения с поверхностью, в широких диапазонах энергий и времен, могут образовываться упорядоченные структуры: сверхрешетки пор, радиально-периодические кольцевые структуры, решетки дислокаций [16] и т. д.

Так же наблюдаются различного рода неустойчивости, связанные с тепловым воздействием, при образовании жидкой фазы на поверхности материала: термокапиллярная (ТКН) и испарительно-капиллярная неустойчивости (ИКН) [16, 17], неустойчивость Кельвина – Гельмгольца [18]. При умеренных значениях интенсивности лазерного излучения 10^4 – 10^5 Вт·см⁻² может возникать ТКН, связанная с действием термокапиллярных сил вдоль свободной поверхности, а так же с наличием высокого стационарного градиента температуры в слое. При флуктуационном движении расплава вдоль свободной поверхности в силу его несжимаемости появляется движение жидкости в поперечном направлении, что приводит к образованию на поверхности расплава подъемов и впадин. Если в слое имеется постоянный отрицательный градиент температуры, то в областях подъемов температура поверхности повышается, а в областях впадин понижается. Возникающее таким образом неоднородное поле температуры создает силы, направленные от более горячих областей к холодным. При соответствующих внешних условиях ма-

лые тепловые и гидродинамические флуктуации формы свободной поверхности начинают неограниченно нарастать во времени, приводя к неустойчивости. Для описания различных видов неустойчивостей вводят понятие инкремента неустойчивости и волнового числа. Максимальное значение инкремента ТКН для желе-

за определяется [17]: $\gamma = 6 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \left(\frac{q}{T\lambda}\right)^{1,6} \nu^{-0,6} \chi^{0,8} \approx 3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, для волнового числа

$$k = 0,3 \cdot \left(\frac{q}{\nu\lambda T}\right)^{0,8} \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^{0,2} \chi^{-0,4} \approx 4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1} \quad (\text{при}$$

$q \approx 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1}$), где q – нормальная к поверхности компонента потока тепла, σ – коэффициент поверхностного натяжения, ν – вязкость, ρ – плотность материала, ω_0 – частота гравитационнокапиллярных волн, λ – теплопроводность, χ – коэффициент температуропроводности, T – температура поверхности расплава.

ИКН возникает в результате интерференции стоячих или бегущих капиллярных волн поверхности расплава при условии, что средняя температура поверхности слегка превышает температуру кипения. При этом происходят малые колебания температуры на горбах и во впадинах этих волн. Такие колебания возникают в результате флуктуаций расстояний, на которые должен уходить постоянный тепловой поток от поглощаемого излучения. Вследствие инерционности процесса теплопроводности фаза локальных колебаний температуры поверхности отстает от фазы колебаний уровня поверхности; в то же время находящаяся в фазе с колебаниями температуры колебательная компонента давления отдачи приводит к дополнительному локальному колебательному ускорению расплава, находящегося в фазе с локальной колебательной скоростью, и происходит резонансный рост амплитуд колебательной скорости и волнового смещения уровня расплава. Максимальное значение инкремента этой неустойчивости

$$[17]: \gamma = \left(\frac{E_{ev}}{m}\right)^{3/4} \left(\frac{q}{T\lambda}\right)^{3/4} \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^{-1/4} \approx 3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}, \text{ для}$$

волновых чисел $k = \sqrt{\left(\frac{q}{\lambda T}\right) \left(\frac{E_{ev}}{m}\right) \left(\frac{\rho}{\sigma}\right)} \approx 10^3 \text{ см}^{-1}$, (при

$q \approx 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1}$, $E_{ev} = 7 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$), где E_{ev} – энергия испарения, m – масса атома железа.

Неустойчивость Кельвина – Гельмгольца («ветровая» или неустойчивость тангенциального разрыва скоростей) связана с взаимным «скользящим» движением слоев жидкости, при котором поверхность раздела между слоями является поверхностью разрыва скорости жидкости. В [18] показано, что малые возмущения (например, давление паров металла или обдувание вспомогательным газом при лазерной сварке или резке) такой системы приводят к неустойчивости. Максимальный инкремент [17]: $\gamma = 0,4 \frac{(\Delta p)^{3/2}}{\sigma \rho^{1/2}} \cong 10^5 \text{ с}^{-1}$

(при $\Delta p \approx 1$ бар) для волнового числа

$$k = 0,7 \frac{\Delta p}{\sigma} \cong 3 \cdot 10^2 \text{ см}^{-1}.$$

Это далеко не все неустойчивости, возникающие в результате лазерного воздействия, но играющие существенную роль в образовании рельефа поверхности, а также рельефа кратера, образованного лазерным воздействием на металлическую мишень.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чапманов А.М., Шибко А.Н., Фазовые превращения в системе титан-кремний при лазерной обработке в алканах // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 6. С. 63-66.
2. Альбиситов Г.А., Андрияхин В.М., Сафонов А.Н. Модификация механических свойств материалов лазерным излучением // Известия академии наук. Сер. Физ. 1983. Т. 47. № 8. С. 1468-1478.
3. Бахарев М.С., Миркин Л.И., Шестериков С.А., Юмашева М.А. Структура и прочность материалов при лазерных воздействиях. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 224 с.
4. Бойко В.И., Валяев А.Н., Погребняк А.Д. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц // УФН. 1999. Т. 169. № 11. С. 1243-1271.

5. Вункин Ф.В., Кириченко Н.А., Лукьянчук В.С. Термохимическое действие лазерного излучения // УФН. 1982. Т. 138. Вып. 1. С. 45-91.
6. Евсеев А.В., Марков М.А. Фотоиницированная излучением ХеСl-лазера полимеризация акриловых олигомеров // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 5. С. 491-494.
7. Гуреев Д.М., Кузнецов С.И., Петров А.Л. Лазерный раскрой углеродных композиционных материалов // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. № 2. С. 255-276.
8. Базылева И.О., Галушкин М.Г., Голубев В.С., Дубровина Е.А., Карасев В.А. Термические потери в процессе газолазерной резки металлов: сб. науч. тр. // Современные лазерно-информационные и лазерные технологии; под ред. чл.-кор. РАН В.Я. Панченко и проф. В.С. Голубева. М.: Интерконтакт Наука, 2005. С. 221-227.
9. Красюк И.К. Применение лазерных ударных волн для изучения теплофизических и механических свойств вещества // УФН. 1999. Т. 169. № 10. С. 1155-1157.
10. URL: <http://www.novomet.ru>.
11. URL: <http://www.kaiprototyping.com>.
12. URL: <http://www.sibai.ru>.
13. URL: <http://www.laser.ru>.
14. URL: <http://engicompany.ru>.
15. URL: <http://www.modelmix.su>.
16. Мирзоев Ф.Х., Панченко В.Я., Шелепин Л.А. Лазерное управление процессами в твердом теле // УФН. 1996. Т. 166. № 1. С. 3-32.
17. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. // под ред. В.Я. Панченко. М.: Физматлит, 2009. 664 с.
18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов: в 10 т. Т. 6. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2006. 736 с.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №09-01-97514 p_центр_a).

Поступила в редакцию 20 ноября 2009 г.

Kuznetsov P.M., Feodorov V.A., Vasilyeva S.V., Baryshev G.A. About some mechanisms of influence of laser radiation on metals.

In the review mechanisms of formation of periodic structures are considered at interaction of laser radiation of moderate intensity with metals (steel). As such mechanisms are accepted: thermo-capillary and evaporation-capillary instability, and also Calvin-Helmholtz instability.

Key words: laser; metals; melt; instability.

УДК 539.3

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ СПЛАВА Fe-Si

© П.М. Кузнецов, Г.В. Новиков, В.А. Федоров, А.В. Яковлев

Ключевые слова: лазер; металлы.

В статье рассматриваются сопутствующие явления, характерные для взаимодействия когерентного излучения с поверхностью поликристаллического кремнистого железа.

ВВЕДЕНИЕ

Появление оптических квантовых генераторов создало уникальную возможность получения новых материалов, а также спровоцировало бурное развитие исследований в области импульсных энергетических воздействий. Благодаря особым свойствам лазерного излучения (когерентность, поляризация, высокие плотно-

сти энергии и т. д.) стало возможным управлять внутренними процессами в твердом теле [1], а также производить модификацию поверхности материалов [2], в частности металлов. При взаимодействии лазерного излучения с поверхностью металлов возможно появление всякого рода эффектов, связанных с тепловыми воздействиями.