

УДК 536.421.1

РЕКОНСТРУКЦИЯ РЕЛЬЕФА ОБЛАСТИ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО МОНИТОРА

© 2007 г. Д. В. Абрамов*, канд. физ.-мат. наук; С. М. Аракелян*, доктор физ.-мат. наук;
И. И. Климовский**, доктор физ.-мат. наук; А. О. Кучерик*, канд. физ.-мат. наук;
В. Г. Прокошев*, канд. физ.-мат. наук

* Владимирский государственный университет, г. Владимир

** Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

E-mail: laser@vpti.vladimir.ru

В работе проведены исследования взаимодействия импульсно-периодического лазерного излучения с поверхностью металлов. Лазерная диагностика области воздействия осуществлялась с помощью лазерного монитора (проекционного микроскопа). Разработан и реализован метод восстановления трехмерных рельефов на основе их двумерного изображения, яркость точек которого зависит от угла наклона микроплощадки поверхности. С использованием методов фрактальной геометрии определены коэффициенты корреляции восстановленных рельефов, значения которых позволяют количественно оценивать состояние поверхности.

Коды OCIS: 100.0100.

Поступила в редакцию 17.04.2006.

Введение

Современные лазерные 3D-сканеры позволяют получать трехмерные цифровые изображения объектов. Однако их использование для анализа динамических процессов затруднительно, поскольку известные в настоящее время методы восстановления трехмерного рельефа поверхности по ее двумерным изображениям (см., например, [1, 2]) основываются на компьютерном синтезе искомого рельефа из нескольких изображений поверхности, полученных под различными углами наблюдения или освещения.

Лазерные мониторы [3] в принципе позволяют восстановить рельеф наблюдаемой с их помощью поверхности по одному двумерному изображению. При этом для количественного восстановления рельефа необходимо знание усредненных по времени пространственно-угловых характеристик лазерного излучения и отражательных свойств исследуемой поверхности. Однако качественное восстановление рельефа поверхности при условии независимости индикатрисы отражения от угла падения лазерного излучения на поверхность может быть осуществлено на основе очевидной зависимости яркости точки изображения поверхности от угла наклона микроплощадки, на которой эта точка расположена. Применение таких методов получения трехмерных изображений области воздействия ла-

зерного излучения на поверхность вещества позволяет в дальнейшем повысить качество многих лазерных технологических процессов (сварка, резка, легирование и т. д.).

Экспериментальная установка

В работе для воздействия на поверхность металла использовалось излучение лазера на YAG:Nd³⁺ ($\lambda = 1,06$ мкм), работающего в импульсно-периодическом режиме (длительность импульса $\tau = 1,5$ – $2,5$ мс, частота следования $f = 150$ Гц); при этом обеспечивалась плотность мощности излучения на поверхности образца (металлы: сталь, свинец, титан и др.) до 10^6 Вт/см². В качестве монитора использовался лазерный усилитель на парах меди ($\lambda = 0,51$ мкм, $\tau = 20$ нс, $f = 16$ кГц), его отраженное от зоны воздействия на поверхности образца излучение выполняло роль зондирующего пучка. Регистрация возникающих гидродинамических режимов осуществлялась с помощью SMOS-камеры (с быстродействием порядка 0,2 мс) и соответствующей проекционной оптики (обеспечивающей пространственное разрешение динамических изображений не хуже 2 мкм) с выходом на персональный компьютер, позволяющий проводить обработку данных и распознавание образов как непосредственно в процессе измерений, так и после них. Подробности экспериментальной схемы приведены на рис. 1.

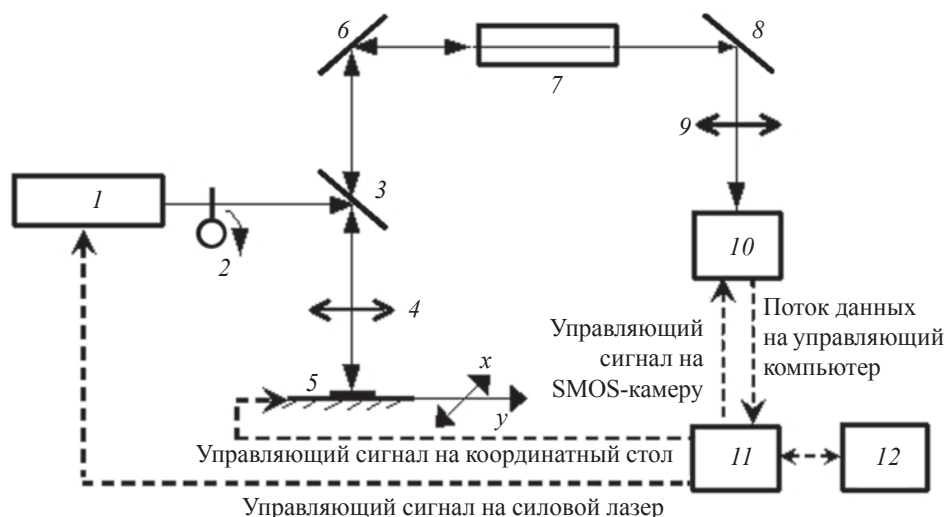


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – лазер (YAG:Nd), 2 – шторка, 3 – поворотное зеркало для излучения с $\lambda = 510,6$ нм, 4 – объектив, 5 – исследуемый образец на координатном столе, 6 – поворотное зеркало, 7 – лазер на парах меди, 8 – поворотное зеркало, 9 – корректирующая линза, 10 – SMOS-камера с жестким диском, 11 – управляющий компьютер, 12 – сервер.

Экспериментальные результаты. Обработка оптических изображений области лазерного воздействия

На рис. 2 показаны оптические изображения области лазерного воздействия на поверхности металла, полученные с помощью описанной выше экспериментальной установки. В процессе воздействия одного лазерного импульса длительностью $\tau = 1,5$ мс характер оптического изображения меняется от регулярного в начале воздействия до хаотического и волновых структур. Первый кадр (рис. 2а) соответствует моменту образования волновых структур, на втором кадре (рис. 2б) можно видеть характерное изображение поверхности в момент выплеска под действием давления паров отдачи при кипении жидкости. Отчетливо виден выплеск жидкости в виде турбулентного течения кольцевой фор-

мы. Третий кадр (рис. 2в) можно интерпретировать как расширение области турбулентного течения при движении расплава по инерции после прекращения кипения и исчезновения давления паров отдачи.

Представляет несомненный интерес возможность идентификации изображений области воздействия лазерного излучения на вещество в зависимости от состояния поверхности.

Метод восстановления профиля поверхности, эволюционирующей под действием лазерного излучения

Метод построен на основе зависимости яркости точки изображения поверхности от угла наклона α микроплощадки, на которой эта точка расположена. В данном случае под углом наклона подразумевается угол между нормальными к поверхности и мик-

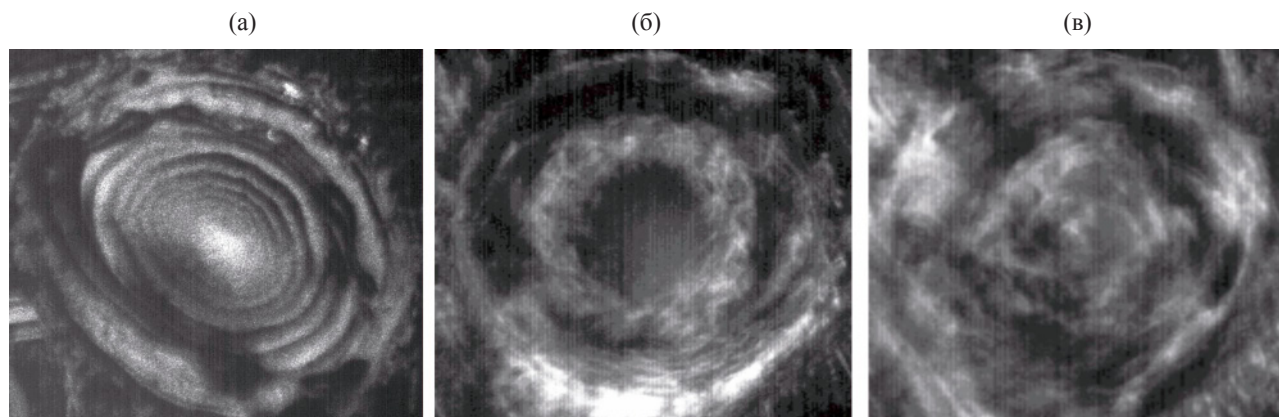


Рис. 2. Поверхность металла под действием лазерного излучения. а – волны на поверхности, б – турбулентный выплеск расплава, в – расширение турбулентной зоны.

роплощадке. В дальнейшем этот метод для определения называется “методом наклонов”. В наиболее простом случае плоскопараллельного падения лазерного излучения на наблюдаемую поверхность (угол падения $\beta \approx 0$) основные допущения, используемые в этом методе, формулируются следующим образом:

- отражательные свойства (индикатриса отражения) поверхности постоянны по всей области наблюдения,
- источник излучения и приемник расположены на одной оси,
- яркость в отдельных точках изображения, соответствующая определенной микроплощадке на наблюдаемой поверхности, является функцией угла наклона этой микроплощадки, характерный размер площадки много больше длины волны излучения.

На основе сделанных допущений для случая $\beta = 0$ можно сформулировать следующие правила восстановления рельефа поверхности.

1. Точки наибольшей яркости на изображении соответствуют микроплощадкам на поверхности, ориентированным перпендикулярно падающему излучению и соответствующим верхним или нижним точкам рельефа (данные точки соответствуют локальным/глобальным максимумам/минимумам высот).

2. Точки с меньшей яркостью соответствуют микроплощадкам, расположенным под некоторым углом к падающему излучению, величина которого вместе с индикатрисой отражения определяет различие в яркостях наблюдаемой микроплощадки и микроплощадки, расположенной перпендикулярно падающему излучению.

3. Каждая отдельная микроплощадка характеризуется положительным или отрицательным углом наклона α относительно плоскости, перпендикулярной падающему излучению.

4. Положение микроплощадки, соответствующей точке максимальной яркости на изображении, является знакопеременным, а ее угол поворота равен нулю.

Рассмотрим метод восстановления профиля поверхности на случае прямой сканирования (одномерный случай), изображение которой характеризуется определенным распределением яркости по ее длине $I(r)$. На рис. 3а это распределение представлено в виде зависимости $I(r)$, где r – порядковый номер точек наблюдения, равноудаленных друг от друга.

Точка изображения с порядковым номером 36, яркость которой $I = I_{\max}$, определяется как точка, принадлежащая микроплощадке, для которой угол наклона $\alpha = 0$. Кроме того, предполагается, что положение этой микроплощадки соответствует поло-

жению верхней точки рельефа. Такое предположение однозначно определяет знак угла наклона для $r < 36$ и $r > 36$.

При расчетах использовались экспериментальные значения зависимости яркости от угла. С целью качественной оценки влияния формы индикатрисы отражения на характеристики рельефа и для упрощения расчетов в данной работе также были использованы модельные зависимости угла наклона микроплощадки от яркости в точке наблюдения I , соответствующей этой микроплощадке, которые аппроксимируют реальную индикатрису отражения.

На рис. 3б представлен рельеф одномерной поверхности, восстановленный из распределения яркости, представленного на рис. 3а, для зависимости угла α от яркости I , определяемой соотношением

$$\alpha = \arctg \frac{I_{\max} - I}{I_{\max}} / c, \text{ где } I_{\max} - \text{максимальная}$$

яркость изображения, C – константа аппроксимации. Было установлено, что высота выступов и глубина впадин восстановленных профилей поверхности зависят от вида модельной зависимости $\alpha = f(I)$. Однако качественно (по расположению выступов и впадин) профили хорошо согласуются друг с другом.

Очевидно, что для разных индикатрис отражения (для разных модельных зависимостей угла α от яркости I) профили поверхности, восстановленные по одному и тому же изображению, количественно будут отличаться друг от друга. Однако качественно (в смысле чередования выступов и впадин, образующих рельеф) эти профили будут соответствовать друг другу.

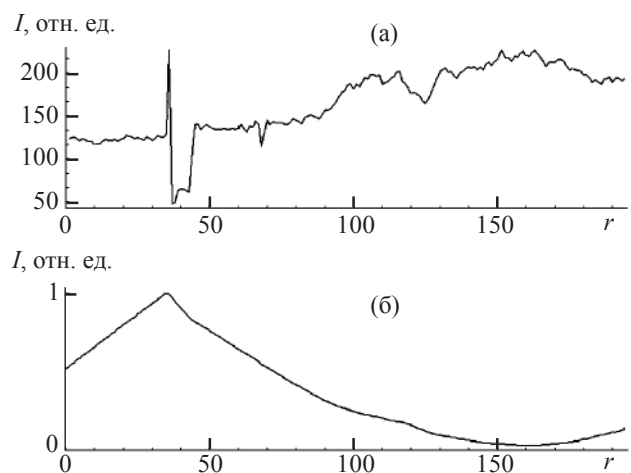


Рис. 3. Восстановление одномерного профиля поверхности. а – зависимость яркости изображения от расстояния r вдоль выбранной линии, б – восстановленный профиль поверхности.

В рассмотренном одномерном случае углы наклона соседних микроплощадок определяются только их ориентацией относительно микроплощадки с углом $\alpha = 0$, соответствующей точке (в данном случае точке $r = 36$) изображения с максимальной яркостью. В двумерном случае ориентация поверхности рассчитывается по изменению яркости относительно соседних точек изображения. В общем случае для расчета угла наклона поверхности необходимо учесть ориентацию микроплощадки по всем радиальным направлениям, проходящим через ее центр. В том случае, когда размер изображения составляет, например, 512×512 пикселей, проведение соответствующего расчета требует большого объема машинного времени и является задачей для “больших машин”. Однако для изображения размером 16×16 пикселей такая задача может быть решена на персональном компьютере. Таким образом, для восстановления профиля поверхности, размер изображения которой составляет $N \times N$ пикселей, это изображение достаточно разбить на ячейки изображения размером 16×16 пикселей. В данном алгоритме мы ограничимся направлениями на центры восьми соседних ячеек. Размер каждой ячейки 16×16 пикселей. Недостатком такого разбиения является появление разрывов на границах ячеек изображения, приводящих к неопределенности в ориентации микроплощадок в отдельных ячейках изображения относительно друг друга. Для устранения такой неопределенности использовался следующий подход. Во-первых, восстановление рельефа поверхности начиналось из середины одной из центральных ячеек изображения. Во-вторых, восстановление рельефа поверхности продолжалось в ячейках, имеющих общие границы с исходной, начиная с граничных точек. Это позволило исключить возможность возникновения разрывов. Далее процедура повторялась для ячеек, примыкающих к восстановленной области.

Оценка эволюции статистических характеристик рельефа поверхности графита под действием лазер-

ного излучения осуществлялась с использованием статистики Херста [4] для области изображения вблизи центра лазерного луча. Следует отметить, что статистика Херста достаточно широко используется при оценке сложных горных рельефов и шероховатости поверхностей, а также для определения особенностей распределения высот волн на океанической поверхности [4–6]. Показатель Херста H рассчитывался из соотношения

$$\frac{R(\Delta r)}{S(\Delta r)} \approx \Delta r^H, \quad (1)$$

где $R(\Delta r)$ – размах, т. е. разность между максимальной и минимальной высотой на удалении от центра Δr по всем радиальным направлениям, $S(\Delta r)$ – стандартное отклонение высот, Δr – безразмерное расстояние.

Отношение (1) определяет характерный масштаб шероховатости поверхности. Значение показателя Херста позволяет найти коэффициент корреляции из следующей формулы [5–7]:

$$C(\Delta r) = 2^{2H-1} - 1, \quad (2)$$

где H зависит от Δr в соответствии с (1), $C(\Delta r)$ аналогичен коэффициенту корреляции двумерного случайного изотропного распределения высот [7].

Согласно формуле (2) при $H = 0,5$ отсутствует корреляция, что соответствует гауссову распределению высот. Однако при $H \neq 0,5$ мы получаем $C(\Delta r) \neq 0$.

Результаты восстановления профиля поверхности металла, эволюционирующей под действием лазерного излучения

На рис. 4 приведены восстановленные по изображению, представленным на рис. 2, рельефы поверхности.

Для восстановленных рельефов поверхности (рис. 2) были рассчитаны коэффициенты корреляции, которые приведены в таблице. Полученные зна-

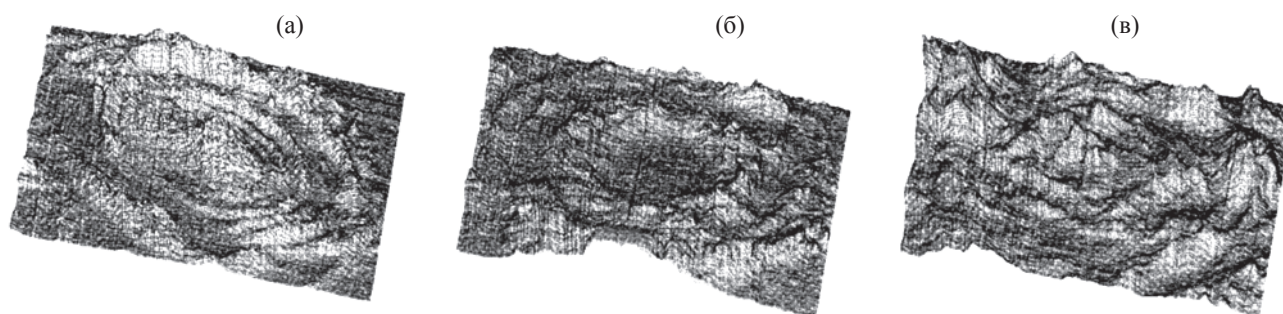


Рис. 4. Восстановленные рельефы поверхности металла под действием лазерного излучения. а – волны на поверхности, б – турбулентный выплеск расплава, в – расширение турбулентной зоны.

Коэффициенты корреляции восстановленных рельефов поверхности

Рельеф поверхности	Показатель Херста H	Коэффициент корреляции $C(\Delta r)$
Волны на поверхности	0,37	-0,165
Турбулентный выплеск расплава	0,72	0,357
Расширение турбулентной зоны	0,61	0,165

чения позволяют количественно разделять состояние поверхности расплава в различные моменты времени.

Заключение

С помощью лазерного усилителя яркости в реальном времени получены и классифицированы динамические оптические изображения области лазерного воздействия на вещество при различных режимах процессов, протекающих на поверхности под действием лазерного излучения (ламинарное течение, турбулентное течение, сублимация поверхности).

Разработан и реализован метод восстановления трехмерного рельефа на основе двумерного изображения поверхности. С использованием методов фрактальной геометрии определены коэффициенты корреляции восстановленных рельефов, значения которых позволяют количественно оценивать

состояние поверхности. На основе данного метода возможна оценка качества поверхности по двумерным оптическим изображениям, что представляет несомненный интерес для современных лазерных технологий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 05-08-33410-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Principles of 3D Image Analysis and Synthesis / Ed by B. Girod, G. Greiner. Niemann: Kluwer Academic Publishers, 2002.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
3. Прокошев В.Г., Климовский И.И., Галкин А.Ф., Абрамов Д.В., Аракелян С.М. Визуализация процессов обработки материалов при помощи усилителя яркости на основе лазера на парах меди // Изв. Академии наук. Сер. физич. 1997. Т. 61. № 8. С. 1560–1564.
4. Мандельброт Б.Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002.
5. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991.
6. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. М.: Университетская книга, 2005, 847 с.
7. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981.