

Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян, И.И. Климовский¹,
А.О. Кучерик, В.Г. Прокошев

Способ и результаты восстановления рельефа поверхности, эволюционирующей под действием лазерного излучения

¹ *Институт теплофизики экстремальных состояний, ОИВТ РАН, г. Москва
Владимирский государственный университет, г. Владимир*

Поступила в редакцию 9.12.2005 г.

Проведены исследования взаимодействия лазерного излучения с поверхностью металлов при воздействии импульсно-периодического лазерного излучения на поверхности веществ. Лазерная диагностика области воздействия осуществлялась при помощи лазерного монитора (проекционного микроскопа). Разработан и реализован метод восстановления трехмерных рельефов на основе двумерного изображения поверхности по зависимости яркости точки изображения от угла наклона микроплощадки. Определены коэффициенты корреляции восстановленных рельефов.

Введение

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, равномерно освещаемой удаленным локальным (точечным) источником света.

Лазерные мониторы (проекционные микроскопы) [3] позволяют восстановить рельеф наблюдаемой с их помощью поверхности по одному двумерному изображению. При этом для количественного (точного) восстановления рельефа необходимо знание усредненных по времени пространственно-угловых характеристик лазерного излучения, индикатрисы отражения исследуемой поверхности и пространственно-углового распределения коэффициента усиления в активной среде лазера. 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.

Экспериментальная установка

В качестве излучения накачки 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 CCD-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 производить обработку данных и распознавание образов как непосредственно в процессе измерений, так и после них. Подробности экспериментальной схемы приведены в [3].

Экспериментальные результаты. Обработка оптических изображений области лазерного воздействия

На рис. 1 показаны оптические изображения области лазерного воздействия на поверхности металла, полученные при помощи 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. 1,а) соответствует моменту образования волновых структур, на втором кадре (рис. 1,б) 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 формы, третий кадр (рис. 1,в) можно интерпретировать как расширение области турбулентного течения при движении расплава по инерции после прекращения кипения и исчезновения давления паров отдачи.

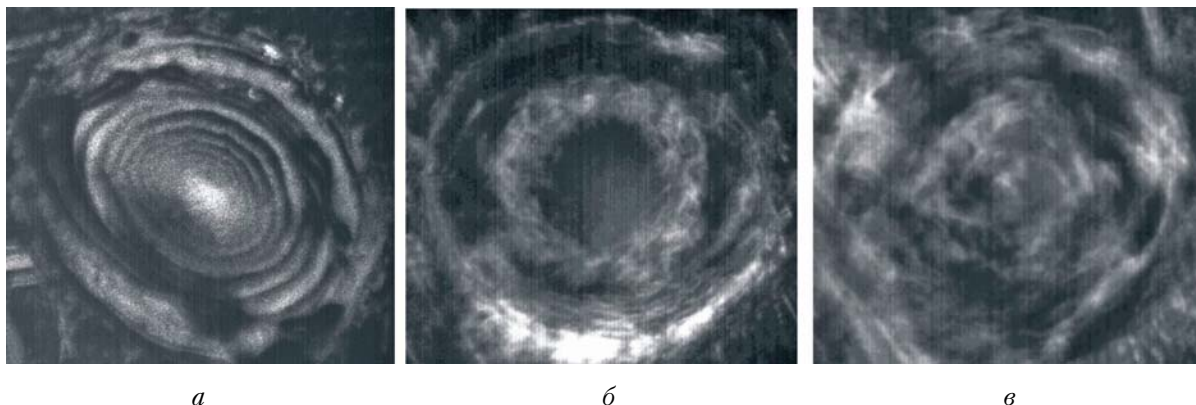


Рис. 1. Поверхность металла под действием лазерного излучения: *a* – волны на поверхности; *б* – турбулентный выплеск расплава; *в* – расширение турбулентной зоны

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 основан на 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 микроплощадке. В дальнейшем этот метод для определенности называется методом наклонов. В наиболее простом случае падения лазерного излучения на наблюдаемую поверхность (угол падения $\beta \cong 0$) 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. Считаем, что характерный размер площадки много больше длины волны излучения.

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

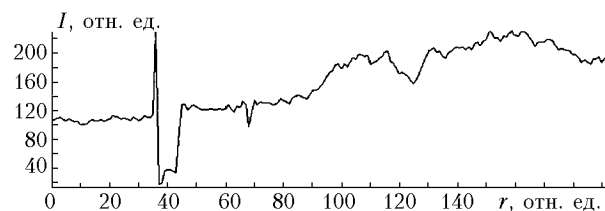
1. Точки наибольшей яркости на изображении соответствуют микроплощадкам на поверхности, ориентированным перпендикулярно падающему излучению и соответствующим верхним или нижним точкам рельефа (данные точки соответствуют локальным/глобальным максимумам/минимумам высот).
2. Точки с меньшей яркостью соответствуют микроплощадкам, расположенным под некоторым углом к падающему излучению, величина которого вместе с индикатрисой отражения определяет раз-

личие в яркостях наблюдаемой микроплощадки и микроплощадки, расположенной перпендикулярно падающему излучению.

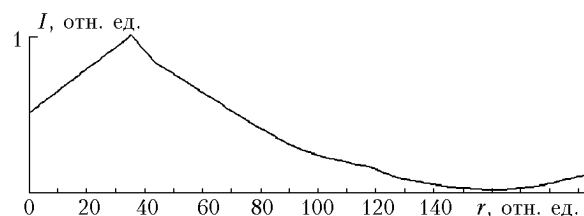
3. Каждая отдельная микроплощадка характеризуется положительным или отрицательным углом наклона α относительно плоскости, перпендикулярной падающему излучению.

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

Рассмотрим метод восстановления профиля поверхности на примере одномерной поверхности (прямой сканирования), изображение которой характеризуется определенным распределением яркости по ее длине. На рис. 2, *a* это распределение представлено в виде $I(r)$.



a



б

Рис. 2. Восстановление одномерного рельефа поверхности: *a* – зависимость яркости изображения одномерной поверхности от расстояния r вдоль выбранной линии; *б* – восстановленный рельеф одномерной поверхности

Точка изображения с порядковым номером 36, яркость которой максимальна ($I = I_{\max}$), определяется как точка, принадлежащая микроплощадке,

для которой угол наклона $\alpha = 0$. Кроме того, предполагается, что положение этой микроплощадки соответствует положению верхней точки рельефа. Такое предположение однозначно определяет знак угла наклона α для r больше и меньше 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 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. 2,б представлен рельеф одномерной поверхности, восстановленный из распределения яркости (см. рис. 1,а) для зависимости угла α от яркости I , определяемой соотношением

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

где I_{\max} — максимальная яркость изображения; c — константа аппроксимации. Было установлено, что высота выступов и глубина впадин восстановленных профилей поверхности зависят от вида модельной функции $\alpha = f(I)$. 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.

В рассмотренном случае одномерной поверхности углы наклона соседних микроплощадок определяются только ориентацией этих микроплощадок относительно микроплощадки с углом $\alpha = 0$, соответствующей точке (в рассмотренном случае 36-я точка) изображения с максимальной яркостью. В случае двумерной (расположенной в плоскости) поверхности ориентация микроплощадки зависит от ее положения относительно всех точек максимальной яркости изображения.

Для определения угла наклона микроплощадки, определяющего ее яркость на изображении двумерной поверхности, необходимо учесть ориентацию микроплощадки по всем радиальным направлениям, проходящим через ее центр. Однозначного алгоритма для решения такой задачи в настоящее время не разработано.

Алгоритмом, наиболее близким по способу реализации, можно считать метод трассировки лучей [1]. 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. Недостатком такого разбиения является появление разрывов на границах ячеек изображения, приводящих к неопределенности в ориентации микроплощадок в отдельных ячейках изображения относительно друг друга.

В данной работе устранение этой неопределенности осуществляется следующим образом:

- восстановление рельефа поверхности начинается из середины одной из центральных ячеек изображения (ячейка 1 на рис. 3);

- восстановление рельефа поверхности в ячейках (ячейки 2 на рис. 3), имеющих границы с ячейкой 1, начинается с этих границ, и, таким образом, исключается возможность возникновения разрывов на границах, так как в этом случае граничные значения являются жестко заданными;

- после восстановления рельефа поверхности для ячеек изображения 2 процедура восстановления рельефа повторяется для ячеек 3, 4 и т.д.

3	2	3	4
2	1	2	3
3	2	3	4
4	3	4	5

Рис. 3. Схематичное представление этапов восстановления поверхности, номер ячейки соответствует номеру итерации алгоритма реконструкции

Методика восстановления рельефа поверхности по результатам измерения яркости оптического изображения, полученного при помощи лазерного монитора, проверялась на тестовых двумерных изображениях трехмерных объектов с известными свойствами. Восстановленные рельефы качественно хорошо согласуются с исходными объектами.

Оценка эволюции статистических характеристик рельефа поверхности графита под действием лазерного 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 шероховатостей поверхностей, а также для определения особенностей распределения высот волн на океанической поверхности [4–6]. Показатель Херста H рассчитывался по соотношению

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

где $R(\Delta r)$ – размах, т.е. разность между максимальной и минимальной высотами 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, эволюционирующей под действием лазерного излучения

На рис. 4 приведены восстановленные по изображениям, представленным на рис. 1, рельефы поверхности.

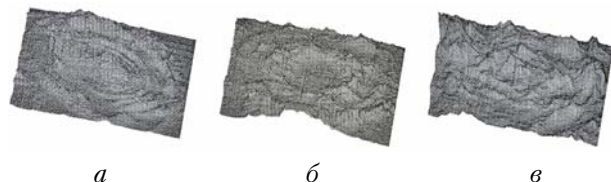


Рис. 4. Восстановленные рельефы поверхности металла под действием лазерного излучения: *a* – волны на поверхности; *b* – турбулентный выплеск расплава; *c* – расширение турбулентной зоны

Для восстановленных рельефов поверхности были рассчитаны коэффициенты корреляции, кото-

рые приведены в таблице. Полученные значения позволяют численно разделять состояние поверхности расплава в различные моменты времени.

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

Заключение

Таким образом, в данной работе проведены исследования взаимодействия лазерного излучения с поверхностью металлов. Разработан и реализован метод восстановления трехмерных рельефов на основе двумерного изображения поверхности. С использованием методов фрактальной геометрии определены коэффициенты корреляции восстановленных рельефов, значения которых позволяют количественно оценивать состояние поверхности.

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

1. *Principles of 3D Image Analysis and Synthesis* / Ed. by V. Girod, G. Greiner. Niemann: Kluwer Academic Publishers, 2002. 466 с.
2. Шикин Е.В., Боресков А.В. Компьютерная графика. Полигональные модели. М.: Диалог МИФИ, 2000. 451 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. РАН. Сер. физ. 1997. Т. 61. № 8. С. 1560–1564.
4. Мандельброт Б.Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Ин-т компьютерных исследований, 2002. 656 с.
5. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 260 с.
6. Потанов 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. 640 с.

D.V. Abramov, S.M. Arakelyan, I.I. Klimovskii, A.O. Kucherik, V.G. Prokoshev. The method and results of relief reconstruction of surface evolving in time under action of laser radiation.

The results of studying of interaction of laser radiation with surface of metals, affected by pulse-periodical laser radiation, are presented. Laser diagnostics of interaction area was carried out by means of laser monitor (project microscope). The method of reconstruction of 3d-reliefs using two dimensional images of surface based on dependence of pixel brightness on slope angle surface was developed and realized. The correlation coefficients of reconstructed reliefs were determined using methods of fractal geometry. These coefficients allow to quantitatively estimate the surface state.