

09;15

Использование оптической диагностики для определения температурного поля расплава при послойном лазерном сплавлении металлического порошка

© Ю.Н. Завалов, А.В. Дубров, Ф.Х. Мирзаде,
Н.Г. Дубровин, Е.С. Макарова, В.Д. Дубров

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН —
филиал ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН, Шатура

E-mail: 09645@mail.ru; dubrov.av@mail.ru

Поступило в Редакцию 9 февраля 2017 г.

Представлены результаты применения оптической диагностики для оценки температурного поля на поверхности расплава при послойном лазерном сплавлении металлического порошка. Показано, что вогнутость поверхности, возникающая вследствие термокапиллярного эффекта при неоднородном нагреве, может существенно искажать данные пирометрии. Использование внешней подсветки позволяет оценить форму поверхности расплава. Полученная минимальная оценка температурного градиента в зоне воздействия лазерного излучения на металл составляет $2.8 \cdot 10^4$ K/cm.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.13.44814.16740

Развитие лазерных аддитивных технологий изготовления изделий из металлических порошков требует изучения динамики локальных неравновесных процессов воздействия лазерного излучения на дисперсный порошковый слой [1]. В [2,3] при проведении модельных экспериментов для исследования воздействия лазерного излучения на металлические образцы использовались методы оптической диагностики. Формирование наращиваемого слоя металла проходит в условиях проплавления локального участка поверхности сфокусированным лазерным пучком. При этом рельеф поверхности расплава, в общем случае, определяется совместным влиянием нескольких эффектов: поверхностным натяжением, в том числе термокапиллярными эффектами, обусловленными неравномерным распределением температуры; инерционным движени-

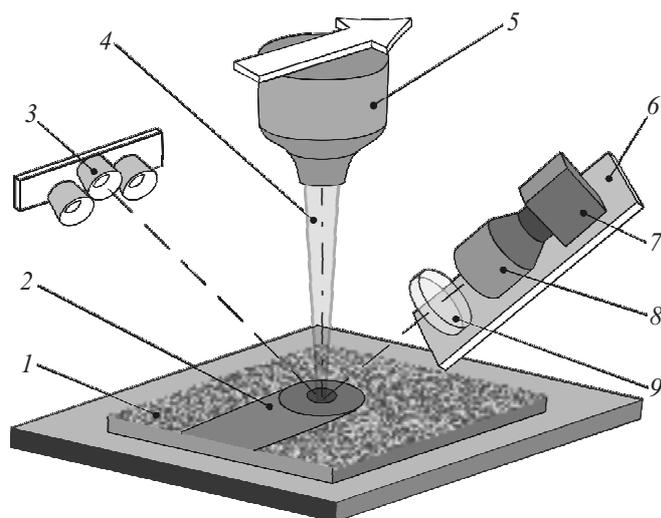


Рис. 1. Схема проведения измерений: 1 — слой порошка на подложке; 2 — дорожка плавления; 3 — подсветка; 4 — лазерное излучение; 5 — лазерная головка и сканирующая система; 6 — система позиционирования; 7 — высокоскоростная видеокамера; 8 — макрообъектив; 9 — оптический фильтр. Стрелка указывает направление движения лазерного луча.

ем областей расплава с учетом вязкости; силами отдачи паров металла, термохимическими процессами и т.д. Целью данной работы является исследование динамики поверхности расплава при послойном лазерном сплавлении порошкового компакта с использованием метода высокоскоростной видеосъемки. Приведены результаты определения температурного поля для порошков сплава на никелевой основе (INCONEL 718).

С этой целью на экспериментальной установке послойного лазерного сплавления была установлена видеокамера Vopito CL-400B/200 под углом $\sim 60^\circ$ к горизонту. Пространственное разрешение CMOS-матрицы $7\mu\text{m}$, разрешение по яркости до 256 градаций серого в видимом диапазоне света. Объектив с фокусным расстоянием 0.135m был использован для режима макросъемки 1:1. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Известно, что излучение нагретой поверхности металла состоит, в частности, из спектральных линий

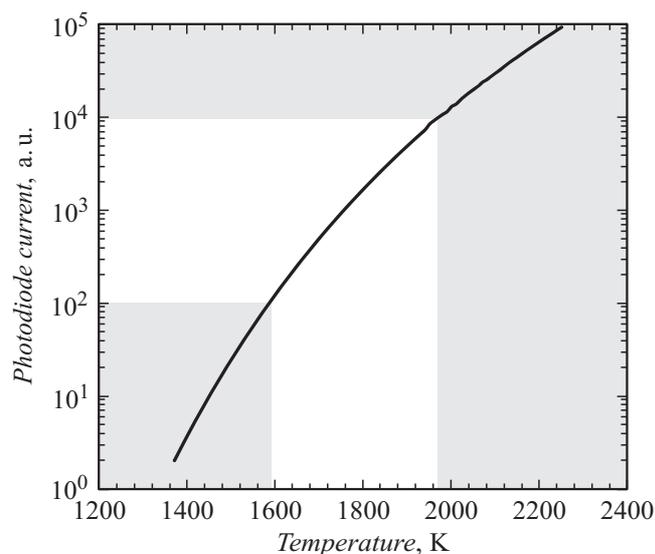


Рис. 2. Расчетная зависимость относительного уровня тока элемента матрицы видеокамеры от яркостной температуры при использовании оптического фильтра СЗС-22.

люминесцентного свечения примесей (соли, оксиды металлов). С целью ослабления люминесцентных линий, снижающих точность измерения температуры теплового излучения, был использован фильтр цветного стекла марки СЗС-22 толщиной 6 mm, закрепленный перед объективом видеокамеры. На рис. 2 приведена зависимость относительного уровня выходного сигнала элемента светочувствительной матрицы видеокамеры от яркостной температуры, рассчитанная по формуле Планка с учетом спектрального пропускания оптического фильтра. Незатемненная область на графике соответствует динамическому диапазону матрицы 40 dB: при соответствующем ослаблении теплового свечения данная видеокамера может быть использована в качестве яркостного пирометра для диапазона измерения температур 1600–1970 К. В случае пирометрии при помощи фоточувствительной матрицы тел с различными значениями излучательной способности необходимо проводить

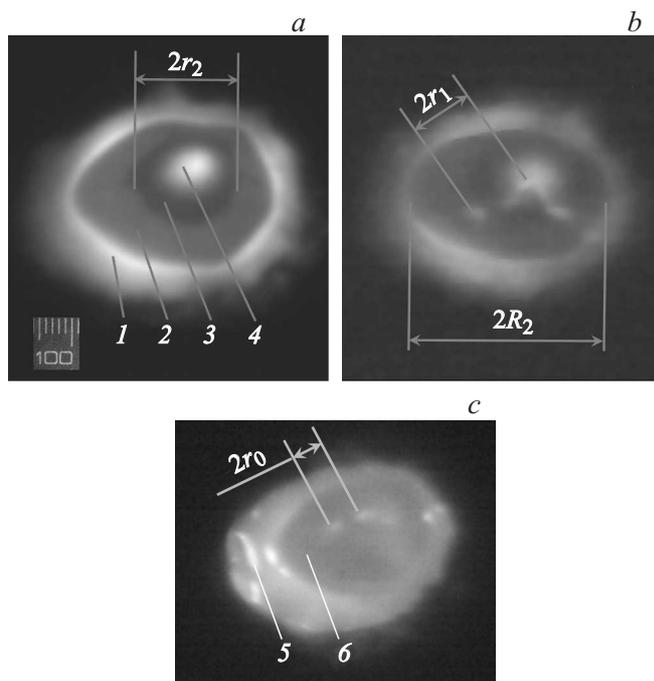


Рис. 3. Примеры теплового свечения расплава при формировании дорожки из предварительно насыпанного порошкового слоя толщиной 0.2 mm. Скорость сканирования 1.1 mm/s, цифрами обозначены области различной степени яркости и указан масштаб 100 μm . Параметры: *a* — время экспозиции $t_{\text{exp}} = 33 \mu\text{s}$ при внутреннем усилении видеокамеры $g = \times 2$ и частоте кадров $f = 2210 \text{ Hz}$; *b* — $t_{\text{exp}} = 15 \mu\text{s}$, $g = \times 4$, $f = 2210 \text{ Hz}$; *c* — $t_{\text{exp}} = 120 \mu\text{s}$, $g = \times 2$, $f = 750 \text{ Hz}$.

подстройку под необходимый диапазон измерения температуры путем, в частности, выбора времени экспозиции.

В экспериментах формировались дорожки плавления с использованием порошка Inconel 718, изготовитель SLMSolutions GmbH (Германия), с гранулометрическим составом 10–45 μm . С этой целью лазерный пучок мощностью 360 W в непрерывном режиме фокусировался на поверхность подложки из материала сталь 12X18H10T и сканировал слой порошка на подложке. Размер пучка лазера в

Некоторые физические свойства никелевого сплава Inconel 718

$T_{mel.}$, К [8]	σ , J/m ² при температуре 1780 К [9]	$\gamma = \partial\sigma/\partial T$, $10^{-3} \cdot \text{N}/(\text{K} \cdot \text{m})$ [8]	Температуро-проводность χ , mm ² /s (1400 К) [8]	Коэффициент излучательной способности [7]
1634	1.866	-0.17	5.233	0.385

перетяжке составлял около $2w_0 \approx 0.45 \text{ mm}$ на уровне 86% мощности пучка. Нагрев порошка сфокусированным пучком лазера приводит к плавлению и последующей коалесценции частиц порошка в общую ванну расплава. Пример видеокadra теплового свечения расплава при формировании дорожки со скоростью сканирования луча $V \approx 1.1 \text{ mm/s}$ из предварительно насыпанного порошкового слоя толщиной 0.2 mm приведен на рис. 3, *a*, где показано распределение яркости в виде колец 1, 2 и 3 и центрального яркого пятна 4. Видеокادر получен в условиях: время экспозиции $t_{\text{exp}} = 33 \mu\text{s}$ при внутреннем усилении видеокамеры $\times 2$ и частоте кадров $f = 2210 \text{ Hz}$.

Наблюдение на рис. 3, *a* темного кольца 3 в центральной части области расплава может объясняться различными причинами. В частности, можно предположить, что в центре расплава наблюдается локальное снижение температуры. Другая причина — это интенсивный вынос „холодной“ массы со дна ванны расплава.

Если температура в центральной области выше, чем на периферии, значит, использование стандартных методов пирометрии привело к расхождению с объективными данными из-за неучтенных дополнительных обстоятельств. Одним из возможных источников погрешности является различие локальных излучательных способностей поверхности. В таком случае может оказаться, что более темная область 2 имеет пониженное значение излучательной способности по сравнению с яркой областью 1. Такое возможно, например, когда область 2 имеет чистую поверхность, а область 1 оксидирована. Другой причиной погрешности может являться проявление термокапиллярного эффекта, когда в центре наблюдается прогиб поверхности расплава. Тогда области 3 и 4 — это вогнутая поверхность расплава, которая проявляет зеркальные свойства, а яркое пятно 4 в центре темного кольца — блик собственного излучения вогнутой поверхности.

С целью индикации формы поверхности было использовано боковое освещение площадки формирования дорожек плавления тремя светоизлучающими диодами (СИД) VL-HP15EPGC-10W, расположенными на расстоянии 55 mm от подложки под углом $\sim 55^\circ$. Расстояние между центрами соседних СИД составило 21 mm. На рис. 3, *b* приведен кадр видеосъемки формирования дорожки плавления с использованием внешней подсветки. Наряду с указанными на рис. 3, *a* областями 1–4 разной степени яркости на рис. 3, *b* наблюдаются также блики внешней подсветки. При неоднородном нагреве поверхность расплавленного участка с учетом зависимости величины поверхностного натяжения σ от температуры $\gamma = \partial\sigma/\partial T < 0$ может иметь прогиб вследствие термокапиллярного эффекта [4], как видно из рис. 3, *b*, где блики внешней подсветки расположены ниже отсвета теплового излучения. То есть темное кольцо 3 (рис. 3, *a, b*) объясняется локальной вогнутостью. Для разницы температур, определяющей вынос расплава к периферии и прогиб Δ поверхности в центральной части вследствие термокапиллярного эффекта, имеем [4]

$$T_{\max} - T_2 = \frac{2}{3} \Delta \frac{P}{|\gamma|} = \frac{2\pi^2}{3} \Delta \frac{\sigma}{|\gamma|} \frac{h}{R_2^2}, \quad (1)$$

где T_{\max} , T_2 — соответственно температуры в центре расплава и на границе области 2 с вогнутой областью (3–4), h — глубина ванны расплава, $R_2 \approx 0.28$ mm — внешний радиус области 2, P — разница лапласовых давлений в центре и на границе области 2. Теплофизические параметры порошка, включая температуру плавления материала $T_{mel.}$, приведены в таблице. Для оценки глубины ванны расплава воспользуемся результатами работы [5]. При используемых технологических параметрах и температуропроводности материала χ скорость сканирования $V \ll \chi/w_0$. Тогда получаем для глубины ванны расплава

$$h \approx 1.9w_0 \ln \left(\frac{T_{\max}}{T_{mel.}} \right). \quad (2)$$

На кадре рис. 3, *c* запечатлен момент остывания материала после выключения лазера. На внутренней области 6 блики подсветки ослабли, т.е. в этой части уже утрачена зеркальность, характерная для фазы расплава. Это означает, что температура материала в данный момент близка к $T_{mel.}$. Тогда, исходя из сравнения яркости областей 2,

(рис. 3, *a, b*) и *б* (рис. 3, *с*), соотношения времен экспозиции, с учетом температуры плавления сплава (см. таблицу), а также зависимости (рис. 2), получаем результатом яркостной пирометрии, что температура T_2 изменяется в пределах 1730–1800 К. Учитывалось, что излучательная способность расплава изменяется слабо как при повышении температуры до 2100 К [6], так и при изменении угла между нормалью к поверхности расплава и оптической осью объектива вплоть до угла Брюстера, который в случае никелевых сплавов не ниже 70° [7].

Оценим прогиб поверхности в центральной части расплава. Отношение расстояния между соседними бликами внешней подсветки r_0 и радиусом кривизны R_0 области *б* (рис. 3, *с*) равно отношению расстояния между соседними бликами r_1 и радиусом кривизны R_1 области 2 (рис. 3, *б*). Радиус R_0 затвердевшей области *б* был измерен постфактум профилометром Mitutoyo SJ-301 и составил 0.9 mm. Тогда $R_1 \approx 1.8$ mm с учетом $r_1/r_0 \approx 2$. На рис. 3, *a* также указан внутренний радиус области 2: $r_2 \approx 0.11$ mm. Найдем минимальное значение прогиба, возникающего вследствие термокапиллярного эффекта. Это значение Δ эквивалентно расстоянию, отсекаемому хордой длины $2r_2$ от окружности радиусом R_1 : $\Delta = R_1 - \sqrt{R_1^2 - r_2^2}$ или ~ 3.3 μm . В этом случае, комбинируя (1) и (2), можно получить оценку $(T_{\text{max}} - T_2) \approx 300$ К. Тогда минимальное значение локального градиента температуры составляет $(T_{\text{max}} - T_2)/r_2 \approx 2.8 \cdot 10^4$ К/см.

Таким образом, использование оптической диагностики позволяет наблюдать динамику поверхности расплава в процессе формирования дорожки плавления. Показано, что при обработке данных пирометрии важно учитывать форму поверхности расплава; вогнутая поверхность может приводить к существенной погрешности определения температуры методами яркостной пирометрии. По мере получения новых данных о качестве формируемого слоя и связи наблюдаемых процессов с параметрами сплошности и однородности материала, станет возможным использование оптической диагностики для контроля оптимальных параметров консолидации расплава и когезии с подложкой в ходе технологического процесса. Использование внешней подсветки позволило определить форму поверхности расплава. Полученная оценка минимального температурного градиента, возникающего при лазерном воздействии на металл, составляет $2.8 \cdot 10^4$ К/см.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 16-29-11743 офи_м).

Список литературы

- [1] Каблов Е.Н. // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 1. С. 7–17.
- [2] Furumoto T, Alkahari M.R., Ueda T. et al. // Phys. Procedia. 2012. V. 39. P. 760–766.
- [3] Дубров А.В., Завалов Ю.Н., Дубров В.Д. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 11. С. 87–94.
- [4] Майоров В.С. // Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В.Я. Панченко. М.: Физматлит, 2009. С. 310–330.
- [5] Anthony T.R., Cline H.E. // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. P. 3888.
- [6] Cagran C., Reschab H., Tanzer R. et al. // Int. J. Thermophys. 2009. V. 30. P. 1300–1309.
- [7] Maldague X. Theory and Practice of Infrared Technology and Nondestructive Testing. NY: Wiley & Sons, 2001. 682 p.
- [8] Kovalenko D.V., Pavlyak D.A., Sudnik V.A., Kovalenko I.V. // The Paton Welding J. 2010. N 10. P. 2–5.
- [9] Stefanescu D.M. // ASM Handbook: V. 15: Casting. / OH:ASM Materials Park. 2008. P. 468–481.