

МЕТОД ТРАССИРОВКИ ГАУССОВА ПУЧКА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С НАСЫПНЫМ СЛОЕМ ПОРОШКА

О.Б. Ковалев, И.О. Ковалева, В.В. Беляев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, Россия

Лазерные аддитивные технологии являются в настоящее время одним из стратегических направлений технического перевооружения не только в России [1], но и во всем мире. Нужные нам детали машин теперь можно получать путем наращивания за счет добавления части материала в виде порошка, создавая полномасштабные изделия сложной геометрии. Оборудование указанных технологий непрерывно совершенствуется по причине постоянного расширения спектра используемых материалов и возрастания требований к качеству производимых изделий. Однако оптимизация параметров установок осуществляется, в основном, эмпирическим способом [1, 2], поскольку физика процессов ввиду их сложности изучена пока не достаточно полно. В связи с этим возрастает роль математического моделирования, чему и посвящена данная работа.

Физика лазерного взаимодействия со слоем частиц порошка такова, что поглощение лазерного излучения (ЛИ) поверхностью частиц сопровождается многократным переотражением, рассеиванием и ослаблением интенсивности в пучке [3, 4]. Взаимодействие ЛИ с порошком включает такие физические процессы, как поглощение, рассеяние, перенос тепла, консолидацию частиц и образование переплавленного следа. Характер протекания указанных процессов и свойства изделия существенно зависят от внутренней структуры слоя порошка, его физических свойств и характеристик ЛИ [2, 3]. Результаты ранее проведенных исследований структуры насыпных упаковок частиц металлического порошка [5, 6] использовались нами для построения алгоритма трассирования ЛИ, основанного на методе *дискретных световых элементов*, суть которого сводится к следующему.

В декартовой системе координат $Oxyz$ рассматривается TEM_{00} — мода ЛИ с распределением плотности мощности в виде:

$$I(x, y, z) = I_0 \exp\left(-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_z^2}\right), \quad I_0 = 2W/\pi\omega_0^2, \quad \omega_z^2 = \omega_0^2 + 4\theta^2(z - z_f)^2,$$

где W — средняя мощность; ω_0 — радиус пучка в перетяжке; z_f — положение перетяжки относительно выбранной системы координат; $\theta = 2\lambda/(\pi\omega_0)$ — угол расхождения пучка в дальней зоне в радианах; λ — длина волны. Рассматривается нормальное падение ЛИ на поверхностный слой порошка, упакованного на подложке. Исходное поперечное сечение пучка $\pi\omega_0^2$ разбивается на конечное число N_b элементарных площадок

($\pi\omega_0^2 = \sum_{k=1}^{N_b} \Delta S_k$). Через центр каждой площадки проходит один световой элемент (СЭ).

Каждый из СЭ имеет начальное положение с координатами x_k, y_k, z_k и начальную плот-

ность мощности $\Delta E_k = I(x_k, y_k, z_k)\Delta S_k$. Первоначально СЭ движутся по траекториям параллельным оси Oz . При взаимодействии с поверхностью частицы траектория СЭ изменяет свое направление по закону геометрической оптики (угол падения равен углу отражения). При этом величина плотности мощности ΔE_k после отражения уменьшается на величину энергии, поглощенной поверхностью частицы в точке падения. Численный алгоритм предусматривает суммирование лазерной мощности, поглощенной каждой частицей от всех СЭ. Просуммированная энергия усредняется по поверхности шара, и затем используется в тепловом балансе контактирующих между собой частиц [6]. На рис. 1 приведена картина расположения траекторий СЭ в насыпном слое стальных частиц сферической формы одинаковых радиусов 10 мкм.

Толщина слоя частиц составляет порядка 100–120 мкм. Верхняя часть слоя (на 2–3 диаметра) получилась неоднородной при построении упаковки за счет случайного бросания частиц. Хорошо просматриваются траектории многократно отраженных СЭ и проникающих в глубину. Видно, что падающий пучок не проходит через выбранную толщину слоя. На рис. 1 также показано распределение температуры по частицам, которое рассчитано по ранее предложенной модели дискретных тепловых элементов [6]. Заметим, что тепловой баланс в этом расчете учитывал только поглощенную энергию луча, контактной теплопроводностью пренебрегалось.

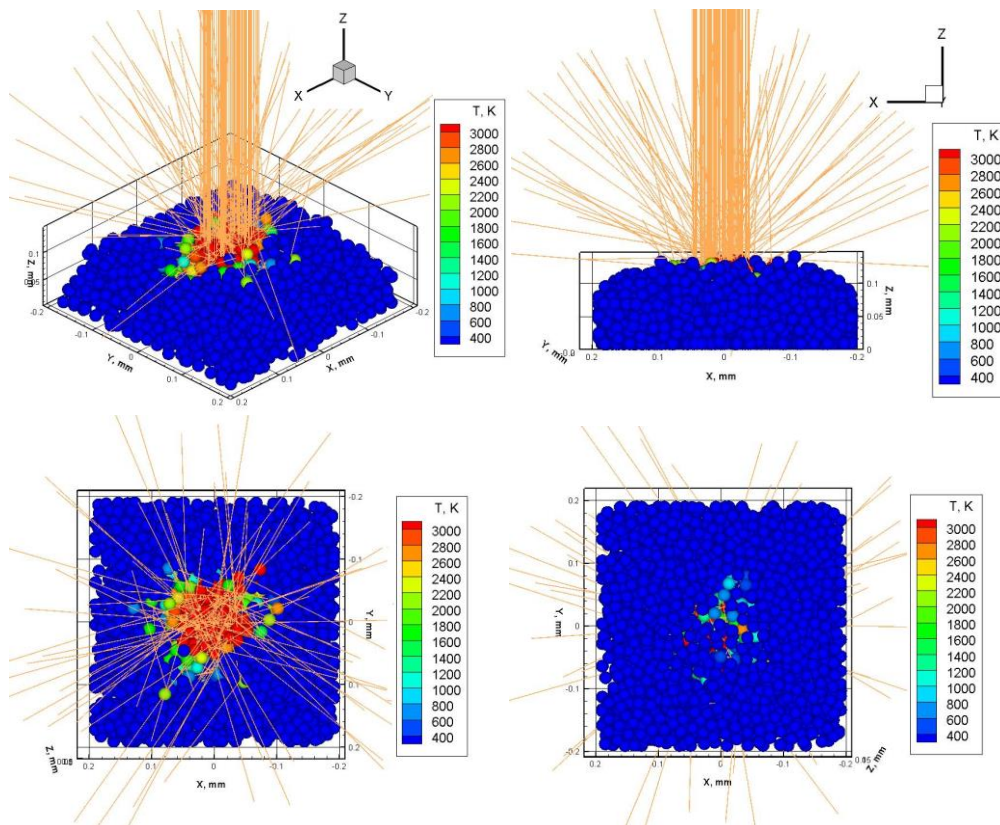


Рис. 1. Взаимодействие гауссова пучка со случайно упакованным слоем шаров диаметром 10 мкм в количестве 2000. Материал — сталь, излучение с длиной волны 1.07 мкм, $W=100$ Вт, $\omega_0 = 50$ мкм.

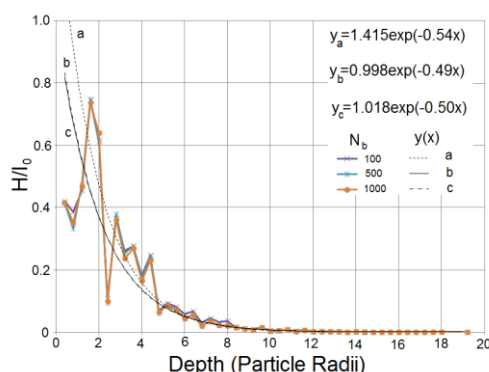


Рис. 2. Распределение поглощенной мощности H/I_0 по глубине слоя частиц при вариации N_b .

Для оценки эффективности поглощения ЛИ насыпным слоем порошка необходимо знать распределение поглощённой энергии по глубине. На рис. 2 показано распределение поглощенной мощности H/I_0 . По оси абсцисс отложена глубина слоя в радиусах частиц.

Расчеты проведены при вариации числа разбиений гауссова пучка на N_b лучевых треков (100, 500, 1000). Видно, что результаты расчетов слабо зависят от числа разбиений, начиная с $N_b = 500$. Безразмерная функция $\hat{H} = H/I_0$ аппроксимируется экспоненциальной зависимостью $y(x) = y_0 \exp(-\alpha x)$. Коэффициент затухания α близок к 0.5.

Показано, что падающий лазерный пучок через поровое пространство может проникать вглубь насыпного слоя порошка. За счет многократного поглощения и отражения от поверхности частиц лазерный пучок рассеивается и ослабевает. Предлагаемый метод заключается в подробном отслеживании хода СЭ с учётом их отражения и поглощения на границах раздела фаз. Моделирование методом трассировки лучей показало, что проникновение лазерного излучения в слой порошка особенно важно для хорошо поглощающих и отражающих металлических порошков. При правильном сочетании исходных физических параметров можно получить упаковку с благоприятными свойствами для проникания и поглощения лазерного излучения. Это позволит улучшить качество получаемых изделий, сделать спекание порошка более плотным с хорошими эксплуатационными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.
2. Yadroitsev, I. Selective Laser Melting: Direct Manufacturing of 3D-Objects by Selective Laser Melting of Metal Powders, Saarbrücken: Lap Lambert, 2009.
3. Ковалев О.Б. Моделирование процессов в технологиях лазерного аддитивного изготовления объемных металлоизделий // Известия РАН. Сер. Физическая. 2016. Т. 80, №4. С. 408–413.
4. Kovaleva I., Kovalev O., Smurov I. Model of heat and mass transfer in random packing layer of powder particles in selective laser melting // Physics Procedia. 2014. Vol. 56. P. 400–410.
5. Ковалев О.Б., Ковалева И.О. Моделирование случайной упаковки насыпного слоя полидисперсных сферических частиц // Прикладная механика и техническая физика, 2014. Т. 55, №4, С. 184–192.
6. Kovalev O.B., Gusarov A.V. Modeling of granular packed beds, their statistical analyses and evaluation of effective thermal conductivity // International Journal of Thermal Sciences. 2017. Vol. 114. P. 327-341.