

УДК 535.434, 519.6

Численное моделирование в дифракционном приближении взаимодействия лазерного излучения с потоком микрочастиц *

П.А. Стаценко^{1,2}, М.Н. Хомяков^{1,2}

¹Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

²Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

E-mail: StatsenkoPA@laser.nsc.ru

При лазерной наплавке взаимодействие лазерного излучения с потоком порошка и подложкой играет ключевую роль. Нагрев поверхности зависит от распределения излучения на поверхности материала, которое определяется взаимодействием излучения с потоком микрочастиц порошка. Обычно в моделях для расчета ослабления лазерного пучка взаимодействие излучения с микрочастицами ограничивается простым геометрическим рассмотрением на основе соотношения площади сечения частиц к общей площади рассматриваемого сечения, без учета влияния дифракции. Распространение излучения также рассматривается в геометрическом приближении. Представленная модель позволяет учитывать явление дифракции на микрочастицах порошка. Проведено сравнение результатов, полученных при помощи модели с распространением излучения в геометрическом приближении, и предложенной авторами модели с распространением излучения в дифракционном приближении. Показано, что численная модель ослабления и распространения излучения в дифракционном приближении применима для комплексного анализа взаимодействия между лазерным пучком, потоком частиц и поверхностью. Модель позволяет оценить ослабление, испытываемое пучком из-за взаимодействия с потоком микрочастиц, и получить распределение интенсивности на поверхности подложки.

Ключевые слова: лазерная наплавка, поток частиц, ослабление энергии, моделирование, дифракционное приближение.

Введение

Лазерная наплавка является известной аддитивной технологией лазерной обработки и заключается в получении на поверхности детали покрытия путем сплавления основы и нового материала, который поставляется в зону расплава в порошкообразном виде [1, 2]. При лазерной наплавке взаимодействие лазерного излучения с потоком порошка и подложкой играет ключевую роль. Нагрев поверхности определяется поглощаемым лазерным излучением. Для детального моделирования процесса требуется точное знание распределения интенсивности излучения на поверхности заготовки после взаимодействия со струей порошка.

Существует ряд моделей и подходов к решению задачи взаимодействия частиц порошка с лазерным излучением, описывающих как распространение лазерного пучка,

* Работа выполнена за счет гранта РФФ (проект № 18-19-00430).

так и его взаимодействие с потоком частиц порошка. Одним из классических способов расчета распространения лазерного пучка можно считать оптику гауссовых пучков. В процессе лазерной наплавки лазерный пучок и поток частиц взаимодействуют между собой. Частицы поглощают часть мощности пучка и изменяют пространственное распределение интенсивности. Эти факторы существенно влияют на процесс, а также учитываются на уровне входных параметров для дальнейшего моделирования.

При моделировании процесса лазерной наплавки рассматриваются три основных задачи (рис. 1): перенос частиц с потоком газа, взаимодействие частиц с лазерным излучением, взаимодействие частиц и лазерного пучка с подложкой. В большинстве работ методы вычисления коэффициента ослабления лазерного пучка при взаимодействии с частицами порошка основываются на простом геометрическом подходе, как показано на рис. 2. Коэффициент ослабления интенсивности $I(z + \Delta z)/I(z)$ определяется из соотношения площади суммарного сечения частиц к их общей площади. Автором [3] была предложена аналитическая модель, рассматривающая распределение частиц, ослабление лазерного пучка и нагрев частиц. При этом считалось, что массовая концентрация потока частиц имела гауссово распределение. Дальнейшее развитие идей, заложенных в [3], было предложено в работе [4]. Здесь положение частиц задавалось с помощью численного моделирования движения частиц в потоке газа. Было проведено сравнение расчетного распределения (массовой концентрации) с измеренным, также был выполнен расчет нагрева частиц с учетом излучения, рассеянного на частицах. Ослабление излучения вычислялось согласно закону Ламберта–Бера. Авторы [5] использовали аналогичный подход. Их работа отличалась введением в формулу коэффициента ослабления поправочного множителя, значение которого определялось из экспериментальных данных измерения мощности прошедшего излучения. Работа [6] в большей степени была посвящена моделированию и измерению распределения концентрации потока частиц и распределения интенсивности прошедшего через поток частиц лазерного пучка. Отличие предложенного в исследовании [7] аналогичного метода состояло в использовании трассировки лучей для учета дополнительного нагрева частиц от рассеянного на них излучения. В работах [8] и [9] авторы применяли методики, аналогичные приведенным выше, которые отличались в основном параметрами потока частиц и лазерного пучка. Во всех этих методах частицы оказывают на лазерный пучок только одно воздействие — ослабление интенсивности. Но следует учитывать и другой фактор, а именно: влияние дифракции лазерного пучка на частицах.

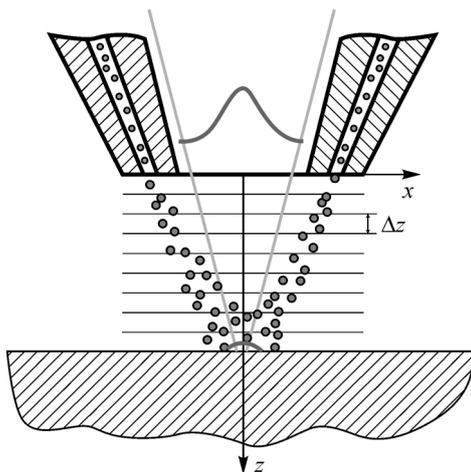


Рис. 1. Принципиальная схема для расчетов при наличии частиц в области фокуса.

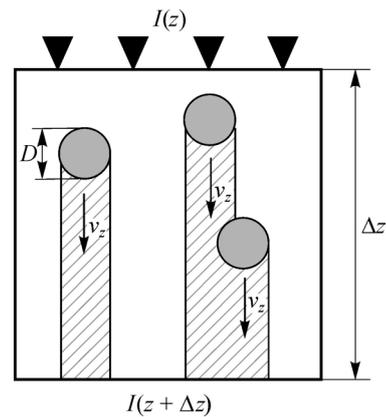


Рис. 2. Схема взаимодействия лазерного пучка с частицами порошка.
 v_z — скорость в направлении оси z .

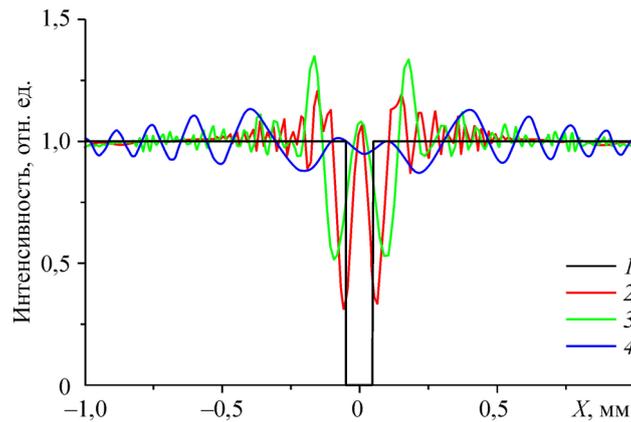


Рис. 3. Влияние одиночной частицы диаметром 100 мкм на распределение интенсивности в параллельном пучке с $\lambda = 10,6$ мкм.

В геометрическом приближении (1) и при учете дифракции на расстояниях от частицы: 1 (2), 2 (3), 10 (4) мм.

Актуальность учета дифракции можно видеть на примере рассмотрения влияния одиночной частицы на распределение интенсивности параллельного лазерного пучка. На рис. 3 показано распределение интенсивности излучения с длиной волны 10,6 мкм после взаимодействия с частицей диаметром 100 мкм. Кривая 1 получена в геометрическом приближении, а кривые 2–4 — при учете дифракции на различных расстояниях от частицы. Следует отметить, что даже одиночная частица оказывает существенное влияние на распределение интенсивности излучения. При дифракции на множестве частиц, расположенных случайным образом, распределение интенсивности будет еще более хаотичным. Коэффициент ослабления от частиц, находящихся ниже по лучу (рис. 1), будет зависеть от того, на максимум или минимум интенсивности попадет частица. Таким образом, целью настоящей работы является построение модели расчета взаимодействия лазерного пучка с потоком микрочастиц с учетом дифракции и сравнение результатов расчетов, полученных в дифракционном и геометрическом приближениях.

1. Модель взаимодействия лазерного пучка с потоком частиц

Для построения модели примем предположение, что все частицы одинаковые и имеют идеальную сферическую форму. В случае однородной среды при расчете распространения излучения можно было бы воспользоваться дифракционным интегралом Френеля–Кирхгоффа [10, 11], однако при наличии микрочастиц среда уже не будет однородной. Для расчета пространственного распространения излучения в неоднородной среде необходимо использовать уравнение [11, 12]

$$2ik \frac{\partial U}{\partial z} + \Delta_{\perp} U = ik \cdot \hat{n} \cdot U, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновой вектор, \hat{n} — комплексный коэффициент преломления, оказывающий влияние как на фазу, так и на амплитуду поля U . Уравнение (1) выводится из волнового уравнения Максвелла в приближении медленно меняющихся амплитуд. Для решения этого уравнения применяется метод, основанный на разделении по физическим процессам распространения излучения (дифракции и преломления-поглощения). Этот метод основывается на алгоритме, описанном в работе [12], который используется для расчета распространения излучения в активной среде лазера или в атмосфере.

Предлагаемый авторами метод моделирования распространения излучения в неоднородной среде (с микрочастицами порошка) заключается в следующем. Задается начальное распределение поля $U(z_0)$ в плоскости среза сопла. Интервал от среза сопла до поверхности делится на ряд промежутков размера Δz , как показано на рис. 1. В каждом таком промежутке количество и положение частиц либо определяется согласно заданному закону концентрации $c(x, y, z)$ в плоскости промежутка, либо берутся из решения задачи по определению траектории частиц в потоке газа. Получившаяся маска затенения частицами накладывается на распределение поля в i -ой плоскости $U(z_i)$. Далее рассчитывается распределение поля в следующей плоскости $U(z_i + \Delta z)$. Затем процесс повторяется и распределение поля последовательно рассчитывается по всем последующим плоскостям.

2. Результаты и обсуждение

Для наглядности проведем сравнение коэффициентов ослабления излучения, вычисленных в работе [3] с использованием геометрического подхода, а также рассчитанных при помощи предлагаемого метода, учитывающего влияние дифракции лазерного пучка на частицах порошка. Будем использовать те же основные параметры потока частиц и лазерного пучка, что и в исследовании [3]: диаметр частиц равен 60 мкм, точка схождения потока частиц расположена на расстоянии 7,5 мм от среза сопла, начальный радиус потока частиц на срезе сопла составляет 3,1 мм от оси лазерного пучка, параллельный лазерный пучок на срезе сопла имеет гауссово распределение интенсивности $I(r) = I_0 \exp(-r^2/w_0^2)$ с радиусом $w_0 = 0,8$ мм, длина волны лазерного излучения $\lambda = 940$ нм.

Частицы порошка распределяются по объему расчетной области случайным образом, согласно заданной концентрации. Нормированное значение концентрации частиц, используемое при моделировании, вычисленное по формулам работы [3], показано на рис. 4. Соответствующее пространственное распределение частиц, используемое при дальнейшем моделировании прохождения излучения через поток частиц порошка, изображено на рис. 5.

Рассчитанные сечения распределения интенсивности лазерного пучка при прохождении через поток частиц на расстояниях 2, 4, 6 и 7,5 мм от среза сопла приведены на рис. 6. Здесь хорошо видно влияние дифракции на частицах на распространение

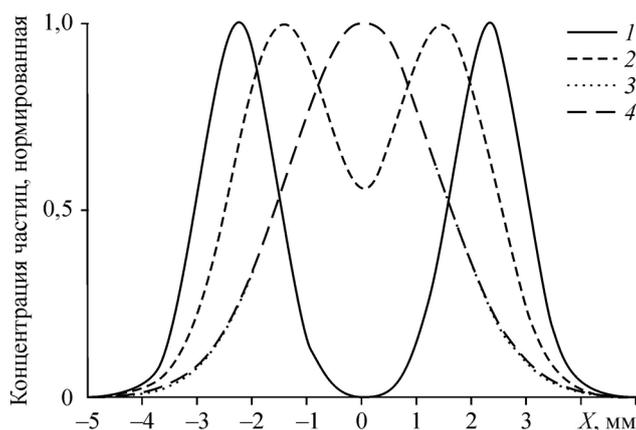


Рис. 4. Нормированное значение концентрации частиц в расчетной области для различных значений расстояния от среза сопла.

Расстояния от среза сопла: 2(1), 4 (2), 6 (3), 7,5 (4) мм.

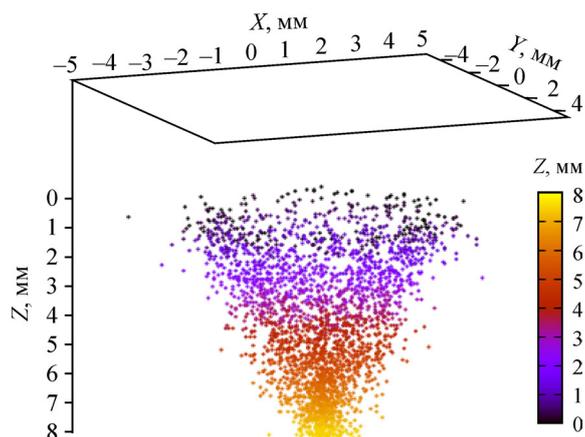


Рис. 5. Пространственное распределение частиц в расчетной области.

излучения и перераспределение интенсивности по сечению лазерного пучка. На расстоянии 2 мм от среза влияние частиц почти незаметно в основной части пучка. По мере увеличения этого расстояния частицы входят в область большей интенсивности и оказывают все большее влияние. На расстоянии 4 мм от среза сопла появляется локальный минимум в центре, хотя частиц в приосевой области еще практически нет. Дальнейшее увеличение провала (минимума) объясняется как влиянием дифракции на частицах, так и увеличением количества частиц в центральной области вследствие фокусировки потока порошка.

На рис. 7 показана зависимость мощности лазерного пучка от расстояния от среза сопла при наличии микрочастиц порошка. Для массового расхода порошка 0,5 г/с лазерный пучок ослабляется на 28 %, при расходе 1,0 г/с ослабление составляет 48 %. В исследовании [3] коэффициент ослабления вычислялся, исходя из концентрации частиц. В данном случае коэффициент ослабления рассчитывался через прямое соотношение интенсивностей: $k = \frac{I(x, y)}{I_0(x, y)}$, где $I_0(x, y)$ — распределение интенсивности без наличия микрочастиц порошка, $I(x, y)$ — распределение интенсивности с учетом ослабления

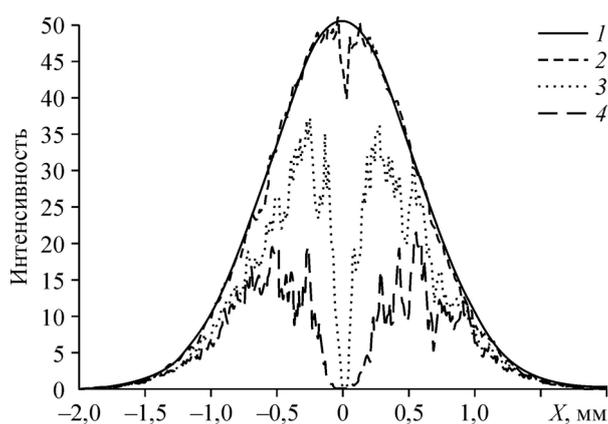


Рис. 6. Сечения распределения интенсивности на расстоянии 2 (1), 4 (2), 6 (3), 7,5 (4) мм от среза сопла. Параметры лазерного пучка и потока частиц выбраны как в работе [3]; массовый расход порошка — 1,0 г/с.

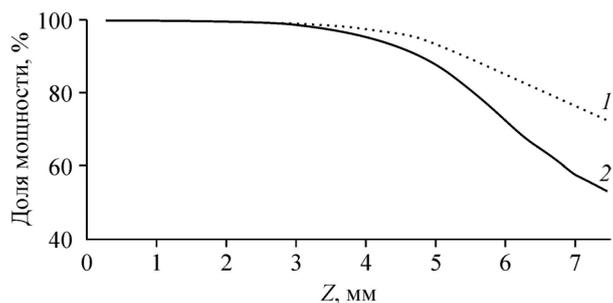


Рис. 7. Доля мощности лазерного пучка при прохождении через поток частиц в зависимости от расстояния от среза сопла.

Массовый расход порошка: 0,5 (1), 1,0 (2) г/с.

на частицах. Поскольку частицы распределяются случайным образом, то для сравнения с методом, предложенным в работе [3], проведем предварительно усреднение полученных распределений интенсивности по углу. Результаты сравнения представлены на рис. 8 и 9.

В отличие от данных работы [3] ослабление, полученное в настоящих расчетах, в центральной области начинается раньше и проявляется сильнее. Вероятно, это является следствием интерференции от многих частиц. Также в отличие от данных исследования [3] получено, что при радиусе лазерного пучка более $3,2 \div 3,5$ мм значение коэффициента ослабления превышает единицу. Ширина лазерного пучка увеличивается (происходит расплывание пучка) при дифракции на микрочастицах по сравнению с распространением излучения без влияния микрочастиц порошка. При радиусе, характерном для последнего случая, значение интенсивности близко к нулю, но даже малое его увеличение

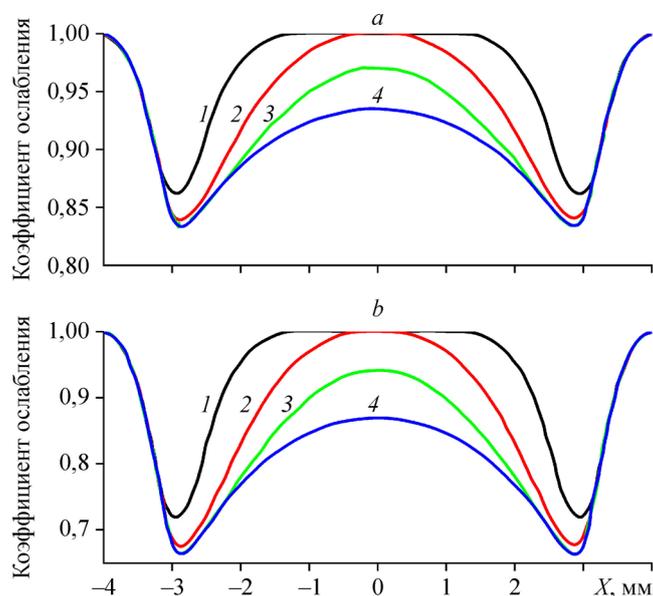


Рис. 8. Расчетный коэффициент ослабления лазерного пучка для нескольких расстояний от среза сопла при массовом расходе порошка 0,5 (a), 1 (b) г/с.

Результаты взяты из работы [3].

Расстояния от среза сопла: 2 (1), 4 (2), 6 (3) и 7,5 (4) мм.

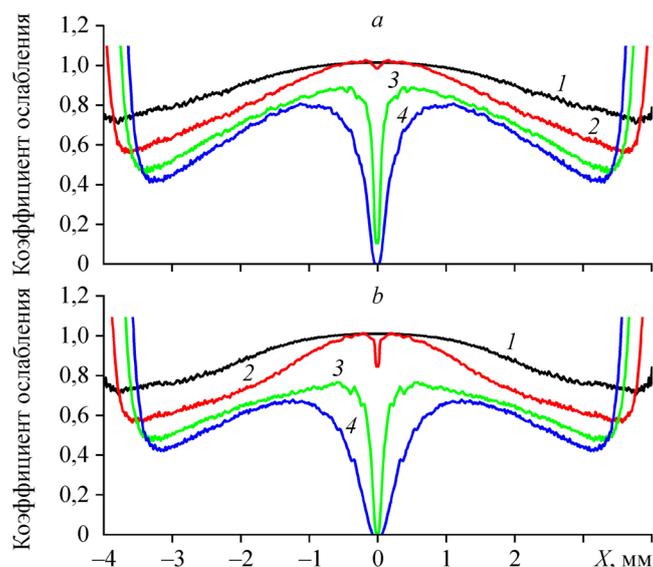


Рис. 9. Расчетный коэффициент ослабления лазерного пучка для нескольких расстояний от среза сопла при массовом расходе порошка 0,5 (а) и 1 (б) г/с. Метод расчета распространения излучения в дифракционном приближении; расстояния от среза сопла: 2 (1), 4 (2), 6 (3) и 7,5 (4) мм.

вследствие дифракции на частицах приводит к тому, что значение коэффициента ослабления превышает единицу, что представляется как усиление интенсивности в данной области.

В некоторых работах, например, [5], было получено, что величина экспериментально измеренного коэффициента ослабления превышает величину коэффициента, полученного теоретически. Этот эффект хорошо объясняется дифракционной теорией, поскольку расходимость излучения на частице обратно пропорциональна размеру частицы $\theta \sim \lambda/D$. Чем больше расходимость, тем быстрее уменьшается область тени под частицей, соответственно влияние ослабления от ниже находящейся частицы будет больше.

Выводы

Представленная численная модель расчета ослабления и распространения излучения в дифракционном приближении применима для комплексного анализа взаимодействия между лазерным пучком, потоком частиц и поверхностью. Она позволяет оценить ослабление, испытываемое лазерным пучком при взаимодействии с потоком микрочастиц, и получить распределение интенсивности на поверхности подложки. При этом в качестве начального распределения интенсивности может использоваться как расчетное, так и экспериментально измеренное значение.

Таким образом, применение модели дифракционного приближения позволяет более полно учитывать эффекты воздействия микрочастиц порошка на распространение лазерного излучения. Полученное распределение интенсивности на подложке в дальнейшем может быть использовано для соответствующего расчета распределения температуры по подложке, а также вычисления температуры самих частиц при их движении через лазерный пучок.

Список литературы

1. Gebhardt A., Höfner J.-S. Additive manufacturing. 3D printing for prototyping and manufacturing. 2016. 591 p.
2. Brandt M. Laser additive manufacturing. materials, design, technologies, and applications. 2017. 498 p.
3. Pinkerton A.J. An analytical model of beam attenuation and powder heating during coaxial laser direct metal deposition // J. Phys. D: Appl. Phys. 40. 2007. P. 7323–7334.
4. Ibarra-Medina J., Pinkerton A.J. A CFD model of the laser, coaxial powder stream and substrate interaction in laser cladding // Physics Procedia. 2010. Vol. 5. P. 337–346.
5. Taberero I., Lamikiz A., Martínez S., Ukar E., López de Lacalle L.N. Modelling of energy attenuation due to powder flow-laser beam interaction during laser cladding process // J. Materials Processing Technology. 2012. Vol. 212. P. 516–522.
6. Wirth F., Freihse S., Eisenbarth D., Wegener K. Interaction of powder jet and laser beam in blown powder laser deposition processes: measurement and simulation methods // Lasers in Manufacturing Conference, Munich, Germany, 2017. P. 1–10.
7. Devesse W., De Baere D., Guillaume P. Modeling of laser beam and powder flow interaction in laser cladding using ray-tracing // J. Laser Applications. 2015. Vol. 27. P. 829208-1–829208-8.
8. Liu Ch.-Y., Lin J. Thermal processes of a powder particle in coaxial laser cladding // Optics and Laser Technology. 2003. Vol. 35. P. 81–86.
9. Huang Y.-L., Liang G.-Y., Su J.-Y. Interaction between laser beam and powder stream in the process of laser cladding with powder feeding // Modelling and Simulation in Materials Sci. and Engng. 2005. Vol. 13. P. 47–56.
10. Born M., Wolf E. Principles of optics. Oxford: Pergamon Press, 1964. 808 p.
11. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 4. Оптика. М., 1980. 752 с.
12. Елкин Н.Н., Напартович А.П. Прикладная оптика лазеров. Москва, 1988. 184 с.

*Статья поступила в редакцию 9 августа 2019 г.,
после доработки — 29 октября 2019 г.,
принята к публикации 6 ноября 2019 г.*