

Моделирование распределения температуры в зоне контакта пучка лазерного излучения с поверхностью металла

И.А. Сакович, В.А. Фираго

Белорусский государственный университет, Минск

E-mail: firago@bsu.by

Существующие экспериментальные методы не позволяют непосредственно наблюдать за распределением температурного поля по глубине заготовки. Поэтому разработка алгоритма, позволяющего моделировать распределения температурного поля в образце при воздействии мощного лазерного излучения с учетом его параметров, является актуальной задачей.

Для обеспечения приемлемой точности моделирования высокоэнергетических процессов лазерной обработки металлов, программа должна поддерживать моделирование теплопроводности материала в твердой и жидкой фазе, истечения материала из плавильной ванны, аппроксимировать переход между этими фазами, а также моделировать ослабление передачи энергии лазера при образовании парогазового и плазменного факела.

Моделирование проводилось методом конечных разностей на равномерной сетке, конвективный теплоперенос в расплаве не учитывался, а теплофизические параметры полагались независимыми от температуры и одинаковыми в жидкой и твердой фазах.

Распределение температурного поля $T(x, y, z, t)$ в образце определяется уравнением:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p} \nabla^2 T, \quad (1)$$

где C_p – удельная изобарная теплоемкость, λ – теплопроводность.

Численное решение уравнения (1) производится на равномерной пространственной сетке с постоянным шагом по времени. Применялась конечно-разностная аппроксимация уравнения:

$$T_{ijk}^{n+1} - T_{ijk}^n = \frac{\lambda}{C_p} (T_{i-1,jk}^n + T_{i+1,jk}^n + T_{ij-1k}^n + T_{ij+1k}^n + T_{ijk-1}^n + T_{ijk+1}^n - 6T_{ijk}^n) \frac{\tau}{h^2}, \quad (2)$$

где τ – шаг интегрирования по времени, h – шаг пространственной сетки.

Сходимость решения конечно-разностной задачи к решению дифференциального уравнения обеспечивалось с помощью выполнения дополнительного условия устойчивости разностной схемы [1]:

$$2\tau < \frac{C_p}{\lambda} h^2. \quad (3)$$

Баланс температурных потоков в зоне воздействия лазерного луча на поверхность образца задавался в виде следующего уравнения:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{R(1-A)}{\lambda} \times E \times \exp\left(-4 \frac{l^2}{r^2}\right), \quad (4)$$

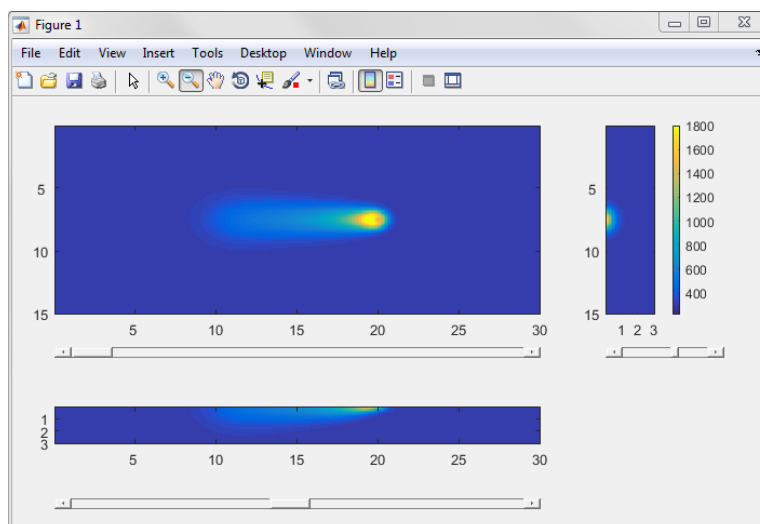
где R – коэффициент поглощения лазерного излучения поверхностью заготовки, A – коэффициент потерь энергии лазерного излучения в парогазовом и плазменном факелах, l – расстояние от оси лазерного луча до обрабатываемого узла пространственной сетке, r – радиус поперечного сечения лазерного луча.

Для распределения плотности мощности лазерного луча по поверхности было принято гауссово распределение по сечению. При численном моделировании значение коэффициента R было принято постоянным и равным 0.8 [2], а значение коэффициента A , соответствующее потерям лазерного излучения в парогазовом и плазменном факеле, увеличивалось при увеличении плотности мощности E источника излучения, соответственно следующей зависимости [2]:

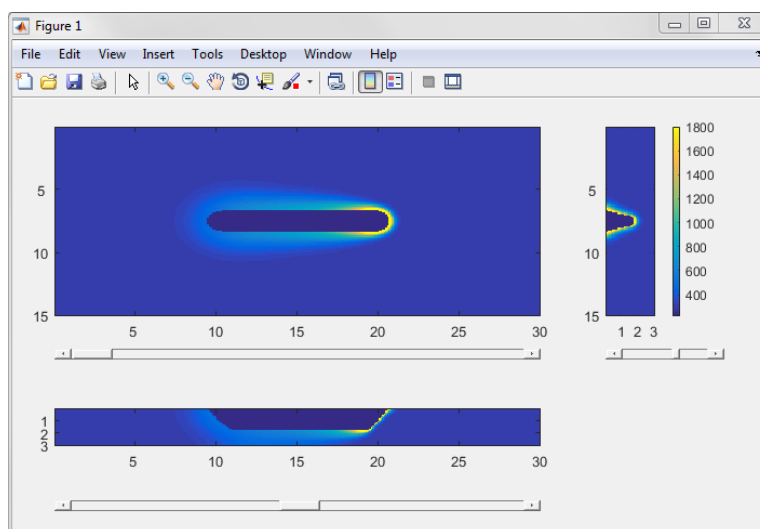
$$A(E) = 0.82 \left(1 - e^{-1.14 \cdot 10^{-9} E}\right). \quad (5)$$

На рис. 1 изображены окна созданной программы с результатами моделирования распространения температуры в заготовки из стали под воздействием движущегося лазерного луча радиусом 1 мм и скоростью 0.1 м/с. По осям нанесены линейные размеры области моделирования в миллиметрах, а цветом закодирована температура в градусах по шкале Кельвина. На рис. 1,а при моделировании задавалась освещенность E , равная 20 МВт/см², а на рис. 1,б – 200 МВт/см², что соответствует типичному СО₂ лазеру. Темная область соответствует полости, вырезанной лазером в стальной заготовке.

Разработанная программа позволяет наглядно рассмотреть распределение температуры в трех проекциях. Слайдерами под окнами каждой проекции можно изменять глубину сечения и определять значение температуры в любой точке с помощью маркера. Проведенное моделирование процессов лазерной обработки металлов при начальных условиях, соответствующих ряду экспериментов, показало, что результаты моделирования низкоэнергетических процессов обработки металлов примерно соответствуют экспериментальным данным, а при моделировании высокоэнергетических процессов ширина области образующегося канала близка к экспериментальным значениям, но глубина превышает результаты экспериментов в среднем в 5 раз.



a



б

Рис. 1. Результаты моделирования распространения температуры под воздействием лазерного луча с $E = 20$ МВт/см² (а) и $E = 200$ МВт/см² (б)

Для исправления несоответствия моделируемых значений глубины области испарения экспериментальным необходимо применять другое, более адекватное, чем (5), описание поглощения энергии лазерного излучения в парогазовом и плазменном факелах. Также необходима доработка модели, чтобы в качестве начальных условий можно было задавать абсолютную мощность лазерного излучения и оптические параметры фокусирующей системы. Это позволит правильно учесть эффект расфокусировки лазерного пучка при его проникновении в глубину обрабатываемой поверхности в процессе абляции материала.

1. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. // Разностные методы решения задач теплопроводности. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.

2. Галенко П.К., Харанжевский Е.В., Данилов Д.А. // Журнал технической физики. 2002. Т. 72, № 5. С. 48–55.