

Исследование формы ванны расплава при лазерном воздействии на сталь AISI 316L с учетом конвекции Марангони

© С.А. Никифоров, И.В. Шварц, А.Х. Гильмутдинов, А.И. Горунов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, 420111, Россия

На основе известных представлений о моделировании термокапиллярной конвекции рассмотрены двухфазная физико-математическая модель плавления нержавеющей стали AISI 316L и численная реализация модели методом конечных объемов в программном комплексе ANSYS CFX. Предложены аппроксимирующие функции для учета эффективных удельной теплоемкости и динамической вязкости в переходном процессе от твердого к жидкому состоянию для минимизации численной ошибки вблизи точек температур ликвидуса и солидуса. Приведено описание процесса формирования ванны расплава при воздействии лазерным излучением с гауссовым профилем интенсивности с учетом граничных условий конвекции Марангони, конвективной теплоотдачи и радиационной теплоотдачи. Показано влияние термокапиллярной конвекции на форму смоченной поверхности ванны расплава. Предложен подход к контролю течений на свободной поверхности ванны расплава с помощью изменения профиля интенсивности лазера.

Ключевые слова: лазерный нагрев, конвекция Марангони, ванна расплава, вычислительная гидродинамика, метод конечных объемов

Введение. При изучении таких технологических процессов, как сварка и наплавка, возникают сложности экспериментального исследования процессов, протекающих в жидкой ванне расплава. На основе существующей теоретической базы можно полностью описать, как изменяются физико-механические характеристики расплава при воздействии на него лазерным излучением.

Применение математического моделирования позволяет в полной мере описать теплофизические процессы, протекающие в исследуемой детали, и, следовательно, предсказать необходимую с практической точки зрения форму ванны расплава, существенно зависящую от конвективных течений на свободной поверхности. В работе [1] представлено моделирование процесса плавления без привязки к конкретному материалу и без учета эффективных теплофизических свойств, показана важность введения термокапиллярной конвекции. В работе [2] рассмотрено влияние градиента коэффициента поверхностного натяжения на глубину и ширину ванны расплава в процессе селективного лазерного плавления в порошковом слое. При этом термофизические характеристики заданы таблично, что приводит к некоторым погрешностям при моделировании в интервале температур солидуса — ликвидуса.

Цель данной работы заключается в том, чтобы математически описать процесс воздействия лазерного излучения на нержавеющую сталь с учетом конвекции Марангони и в последующем численно смоделировать эту задачу; показать, что без учета указанного явления невозможно в полной мере описать процессы лазерной сварки и лазерной наплавки, так как поверхностные течения напрямую влияют на глубину и ширину ванны расплава; по итогам проведенных численных исследований предложить способы контроля течений в ванне расплава.

Методы решения и описание подхода моделирования. Был исследован процесс нагрева и образования ванны расплава нержавеющей стали AISI 316L, а также рассмотрен фазовый переход первого рода из твердого состояния в жидкое. При этом не учитывалась теплоотдача при кипении материала, так как предполагалось, что температура парообразования не будет достигнута. Деформация свободной поверхности не рассматривалась. Моделирование проводилось методом конечных объемов в программном модуле ANSYS CFX.

Математическое описание задачи. В общем виде уравнение для переноса теплоты можно представить следующим образом:

$$\rho(T)C_p(T)\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T\right) = \nabla k(T)\nabla T + Q, \quad (1)$$

где ρ — плотность материала, зависящая от температуры; T — скалярное поле температуры; C_p — удельная теплоемкость вещества в зависимости от температуры; \vec{u} — векторное поле скорости; ∇ — оператор Набла; k — коэффициент теплопроводности; Q — объемный источник теплоты.

В уравнении (1) слагаемые слева направо представляют собой изменение температуры по времени, поток теплоты, диффузионный поток теплоты и объемный источник теплоты.

Для задачи лазерного нагрева единственный возможный объемный источник теплоты — лазерное излучение. Глубину поглощения лазерного излучения $q(z)$ можно аналитически оценить по закону Бугера — Ламберта — Бера [3]:

$$q(z) = q_0(1 - R)e^{-z/\delta}, \quad (2)$$

где q_0 — мощность лазерного излучения на поверхности материала; R — коэффициент отражения поверхности; δ — глубина проникновения света.

Для сталей глубина проникновения лазерного излучения равна примерно 10^{-8} м (скин-слой), что при решении задачи позволяет рассматривать не объемный источник теплоты, а граничное условие.

Течение на свободной поверхности ванны расплава происходит за счет ненулевого градиента поверхностного натяжения и изменения плотности в ванне расплава. Следовательно, для учета поля течения в систему уравнений совместно с (1) должны быть включены уравнения сохранения

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0, \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + (\vec{u} \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}, \quad (4)$$

где p — давление; μ — динамическая вязкость; \vec{f} — массовые силы.

Граничные условия. На верхней части материала задается граничное условие теплового потока, являющегося суммой тепловых потоков лазерного излучения, заданного гауссовым распределением, конвективной и радиационной теплоотдачи:

$$\vec{q} = -k \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = \vec{q}_{las} + \vec{q}_{conv} + \vec{q}_{rad}, \quad (5)$$

$$q_{las} = \frac{P}{\pi r^2} (1-R) e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{r^2}}, \quad (6)$$

$$q_{conv} = -h_c (T - T_0), \quad (7)$$

$$q_{rad} = -\varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4), \quad (8)$$

где \vec{n} — вектор нормали к поверхности; \vec{q}_{las} — тепловой поток лазерного излучения; \vec{q}_{conv} — конвективная теплоотдача; \vec{q}_{rad} — радиационная теплоотдача; P — мощность лазерного излучения; x_0, y_0 — координаты центра лазерного пятна, заданного в декартовой системе координат; r — радиус лазерного пятна; h_c — коэффициент конвекции; T_0 — температура внешней среды; ε — коэффициент излучения поверхности; σ — постоянная Больцмана.

На остальных гранях материала задано граничное условие нулевого теплового потока

$$\vec{q} = -k \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = 0. \quad (9)$$

При формировании ванны расплава на свободной поверхности образуются конвективные течения (эффект Марангони), которые направлены к оси OZ или от нее [4]. Направление течения зависит от