

Численное моделирование и верификация точечного лазерного нагрева нержавеющей стали AISI 316L

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

Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А.Н. Туполева (КНИТУ–КАИ), Казань, 420111, Россия

Рассмотрены процесс точечного лазерного нагрева образца из нержавеющей стали AISI 316L и его трехмерная математическая модель. Предложен вариант численного моделирования данного процесса посредством введения источника лазерного излучения, заданного в виде супергауссова распределения с уточненными и экспериментально подобранными безразмерными коэффициентами. Учтены граничные условия конвекционной и радиационной теплоотдач, а также конвекции Марангони на свободной поверхности ванны расплава. Реализован фазовый переход металла из твердого в жидкое агрегатное состояние в интервале температур солидуса и ликвидуса за счет эффективных функций теплоемкости и вязкости. Выполнено сравнение геометрических характеристик ванн расплава, полученных при проведении ряда практических экспериментов, с данными, определенными путем численного решения. Показано, что результаты в обоих вариантах количественно и качественно совпадают с незначительной погрешностью. Сделаны выводы о погрешности численного решения.

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

Введение. Лазерная обработка материалов все чаще вследствие своей точности и скорости применяется в тяжелой и легкой промышленности. Ее внедрение позволяет обрабатывать широкий диапазон марок сталей и сплавов. Для совершенствования технологии лазерной сварки, в том числе точечной, необходим верифицированный математический аппарат, который позволит анализировать мезомасштабные процессы в ванне расплава, в том числе конвекционные течения и их влияние на форму этой ванны, а также динамику фазового перехода при лазерном воздействии. Помимо математического описания этих процессов необходимо учитывать методы и подходы численного решения, которые не всегда дают адекватный результат, поэтому зачастую для каждого конкретного вида технологии лазерной обработки необходимо использовать соответствующий численный метод.

Во многих работах разных авторов в качестве граничного условия влияния лазерного излучения выбрана супергауссова функция с целочисленными коэффициентами, которая дает результат точнее, чем нормальное распределение, но все же имеет погрешность, так как для конкретных материалов следует подбирать множитель при функции в вещественном множестве чисел [1–3].

Представленная в данной статье трехмерная теплофизическая модель точечной лазерной сварки нержавеющей стали AISI 316L дополняет математическую модель, описанную в предыдущей работе авторов [4]. Кроме того, уточнены коэффициенты при функции супергаусса, полученные с помощью серии вычислительных экспериментов и сравнения их с экспериментальными данными.

Цель работы — подбор коэффициентов при функции, описывающей граничное условие воздействия лазерного излучения таким образом, чтобы добиться его наилучшей сходимости с экспериментальными данными, и применение на практике новой функции, описывающей изменение удельной теплоемкости от температуры с учетом скрытой теплоты плавления.

Методы решения и описание подхода моделирования. Исследовался процесс лазерного воздействия на нержавеющую сталь AISI 316L с последующим плавлением. При плавлении рассматривался фазовый переход первого рода из твердого состояния в жидкий. Граничное условие парообразования и абляция вещества не учитывались, так как моделировался процесс воздействия малой мощности, в связи с чем материал не достигал температуры кипения. Не рассматривалась деформация свободной поверхности ванны расплава AISI 316L. Моделирование осуществлялось в программном пакете ANSYS 2022R1 в модуле CFX методом конечных объемов.

Математическое описание задачи. Основной математический аппарат в виде управляющих уравнений и условий однозначности, заложенный в данной статье, и обоснования использования воздействия лазера через граничное условие, а не как объемный источник теплоты, представлены в работе [4].

Управляющие уравнения. Ниже приведены следующие управляющие уравнения:

– для учета тепломассопереноса — уравнение полной энергии

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S, \quad (1)$$

где ρ — плотность; H — энтальпия; k — коэффициент теплопроводности; ∇T — градиент температуры; \vec{v} — вектор скорости потока; S — объемный источник теплоты;

– для учета динамики жидкости используется классическое уравнение Навье — Стокса

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

где \vec{u} — вектор скорости потока; t — время; p — давление; μ — динамическая вязкость; \vec{f} — вектор массовых сил;

— для замыкания системы уравнений — уравнение неразрывности реальной жидкости

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

Граничные условия. В отличие от предыдущей работы авторов [4], здесь для описания граничного условия воздействия лазерного излучения было использовано супергауссово распределение

$$q_{las} = a \frac{P}{\pi r^2} (1 - R) e^{-b \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{r^2}}, \quad (4)$$

где a, b — коэффициенты, характеризующие увеличение значения пика функции и скорость возрастания и убывания соответственно; P — мощность лазерного излучения; r — радиус лазерного пятна; x_0, y_0 — координаты центра лазерного пятна, заданного в декартовой системе координат.

При моделировании процессов лазерной обработки материалов принято брать значения a и b равными 3, которые и характеризуют супергауссово распределение [5, 6]. Это связано с тем, что при использовании коэффициентов со значениями, равными 1, рассеяние энергии происходит у основания функции, как это показано на рис 1.

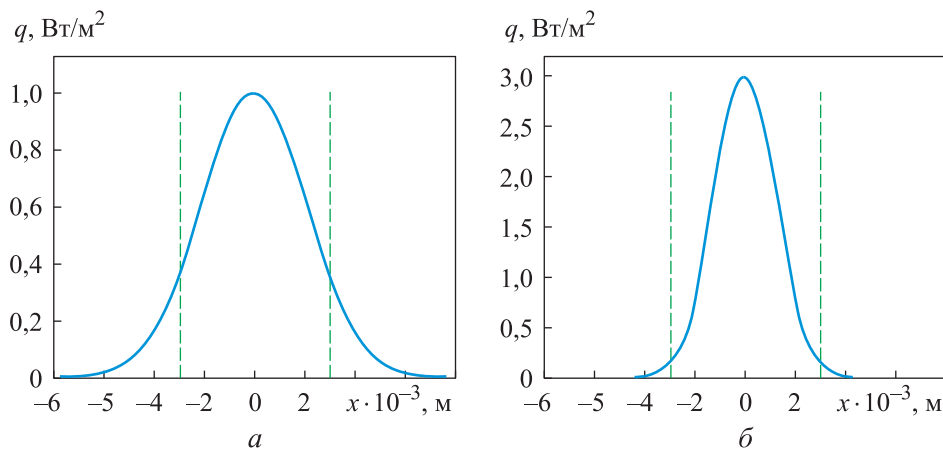


Рис. 1. Графики функций для классического распределения Гаусса при $a=1, b=1$ (а) и супергауссового распределения при $a=3, b=3$ (б)

Проинтегрировав функцию (4) со значениями коэффициентов a и b , равными 1 в интервале от $-\infty$ до $+\infty$, и сравнив значение той же функции с интегралом в пределах от -3 до $+3$, получим, что 15,74 % общего значения плотности мощности находятся вне радиуса воздействия лазерного пучка.