

Применение комплекса LS-Dyna для моделирования процессов модифицирования поверхности с использованием высокоэнергетических источников

Магистрант Поболь А.И.
Научный руководитель – Горанский Г.Г.
Белорусский национальный технический университет
г. Минск

С использованием комплекса LS-Dyna можно решать статические и динамические проблемы теплопереноса в двухмерных, цилиндрически симметричных (осесимметричных) плоскостях и трехмерном пространстве. Теплоперенос может быть совмещен с другими возможностями пакета для обеспечения возможностей моделирования термонапряженного состояния и пластических деформаций с выделением тепла.

Одним из высокоэнергетических источников является электронный луч, который представляет собой поток быстро движущихся электронов, эмитированных катодом. Электроны ускоряются в вакууме в высоковольтном электрическом поле между катодом и анодом, а затем формируются в аксиально-симметричный пучок, как правило, узкий (диаметром 0,01 – 1 мм). При электронной бомбардировке мишени с плоской поверхностью и перпендикулярно к ней эффективный КПД нагрева пучком электронов составляет 80 – 95 %.

Расфокусированный электронный луч может быть в первом приближении представлен как равномерный тепловой поток к поверхности детали, плотность мощности которого определяется площадью облучения и эффективной мощностью. Облучаемая деталь, находясь в вакууме, практически адиабатически изолирована, т.к. не подвержена конвекционному теплообмену с окружающей средой, а влиянием возможного отвода тепла теплопроводностью в оснастку и тепловым излучением по причине быстрого протекания процессов можно пренебречь. Следовательно, изменение термодинамического состояния детали будет происходить исходя из свойств плотности, теплоемкости и теплопроводности материалов детали путем выравнивания градиента температур между нагретой облучаемой поверхностью и холодной сердцевиной.

Практически каждая техническая характеристика электронно-лучевого источника (ускоряющее напряжение, удельная мощность, время воздействия, режим тепловыделения на поверхности) непосредственно влияет на температуру и скорость нагрева поверхности, характер теплового поля обрабатываемого изделия. Это, в свою очередь, определяет структурные и фазовые превращения в материалах и уровень их физико-механических свойств.

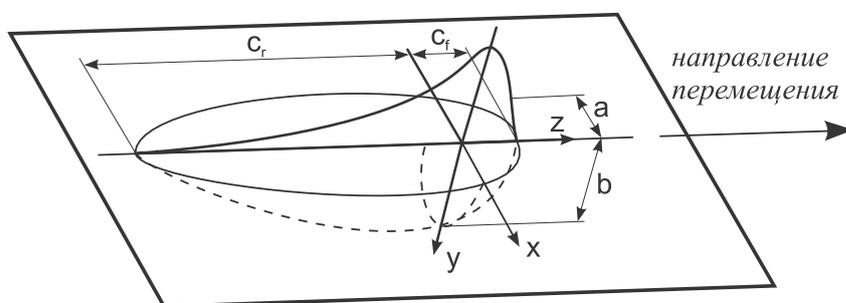
Процесс электронно-лучевого модифицирования (ЭЛМ) поверхностей осуществляется в двух основных режимах: без оплавления и с оплавлением. Выбор одного из этих режимов зависит от требуемой глубины модифицированного слоя материала и от области применения упрочненного изделия.

Для моделирования движущегося источника теплоты в LS-Dyna имеются следующие инструменты:

- команда *BOUNDARY_FLUX, описывающая тепловой поток. Команда определяет граничные условия теплового потока в тепловых или связанных тепловых и прочностных расчетах;

- команда *BOUNDARY_THERMAL_WELD. Её назначение: задавать движущийся источник тепла для моделирования процесса сварки или термообработки. Используется только для связанных тепловых и прочностных расчетов, в которых источник теплоты или изделие движутся.

Это граничное условие позволяет моделировать движущийся источник тепла в соответствии с работой Голдака (J. Goldak, 1984). Тепло выделяется в эллиптической области с центром в источнике нагрева и ослабевает по экспоненциальному закону в зависимости от расстояния. Источник теплоты Голдака основан на Гауссовом распределении плотности мощности в пространстве. Особенность модели в использовании профиля распределения энергии, описываемого двойным эллипсоидом, что позволяет адаптировать источник теплоты как под неглубокое проникновение, характерное для ЭЛМ, так и под глубокое «кинжальное» проплавление. Известны процессы закалки из жидкого состояния, реализованные путем глубокого проплавления (до 10 мм) электронным лучом или лазером. Модель описывается следующими уравнениями на рисунке 1.



$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f \pi^{3/2}} e^{(-3x^2/a^2)} e^{(-3y^2/b^2)} e^{(-3z^2/c_f^2)}$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi^{3/2}} e^{(-3x^2/a^2)} e^{(-3y^2/b^2)} e^{(-3z^2/c_r^2)}$$

Рисунок 1 – Уравнения, описывающие геометрию источника теплоты Голдака и их графическое представление

Определяющими параметрами являются плотность энергии Q (Вт/м²) и скорость перемещения по поверхности v. Остальные параметры регулируют геометрию источника теплоты. Примеры параметров, соответствующих распределению температуры с использованием поверхностных и направленных в глубь источниками, приведены на рисунке 2.

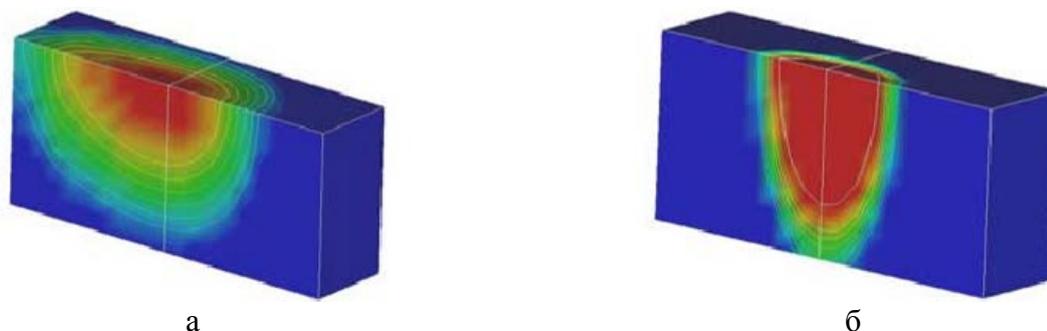


Рисунок 2 – Распределение температуры по объему материала в случае использования поверхностного источника (а – коэффициенты в уравнениях: a=1, b=2, c_f=1, c_r=4) и источника с высокой плотностью энергии (б – коэффициенты: a=1, b=5, c_f=1, c_r=1)

Применяя метод конечно-элементного моделирования, можно на основе оптимизированной для расчетов геометрической модели и известных свойств материала, а также задавая место, площадь, мощность и продолжительность воздействия, провести термодинамический расчет и получить температуру любой точки детали через определенный временной промежуток. Построение графика температура-время и совмещение его с термодинамической диаграммой превращения аустенита для исследуемой стали позволяет оценить структурные изменения, характерные для моделируемого режима ЭЛМ. Применение корректирующих коэффициентов, полученных путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными, позволит получить эффективную и недорогую методику предварительной оценки результатов ЭЛМ.

Применение на практике данной методики позволяет подбирать оптимальные режимы ЭЛ воздействия на детали и минимизировать расходы на дорогостоящие экспериментальные исследования.