

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ

Конфигурация рабочих поверхностей деталей характеризуется наличием острых кромок и граней, на которых при лазерной закалке вследствие нарушения симметрии отвода тепла вглубь основной массы материала происходит значительный рост температуры. Ошибки в выборе режимов закалки приводят к перегреву и оплавлению последних. С целью предотвращения нежелательных эффектов на рабочих кромках деталей технологического инструмента разработана теоретическая модель процесса закалки, позволяющая производить расчет и оптимизацию режимов лазерной обработки для получения необходимых эксплуатационных свойств стали на основе предварительного расчета температурных полей.

Выберем систему координат так, чтобы ось OX проходила через геометрический центр лазерного пучка на поверхности $1/8$ пространства с адиабатическими границами, образованными полуплоскостями XOY , XOZ и YOZ (см. рис. 1). Координаты центра пучка $X=A$, $Y=B$ соответствуют расположению пучка на границах боковых поверхностей материала. Учитывая, что нагрев поверхности стали осуществляется достаточно длительное время (3...7 мс), т.е. разность электронной температуры и температуры кристаллической решетки материала становится минимальной, тепловые процессы можно характеризовать с позиции классической теории теплопроводности. Кроме того, размеры прогретой области в начальный момент времени определяются глубиной проникновения излучения в материал, сравнимой с длиной волны лазерного излучения. С течением времени глубина прогрева растет за счет теплопроводности. Следовательно, тепловой источник можно считать поверхностным. Так как глубина прогретого слоя, в котором происходят структурные изменения, много меньше размеров деталей, то образец можно считать бесконечно протяженным в положительных направлениях осей OX , OY и OZ .

Таким образом, наша задача сводится к определению трехмерного температурного поля в изотропном материале при нагреве его поверхности излучением ИК-диапазона. Решение уравнения теплопроводности с учетом высказанных выше предположений получим, используя метод функции Грина. Так как

распределение интенсивности по сечению лазерного пучка наиболее близко описывается функцией Гаусса, зададим поверхностный тепловой источник:

$$Q = P_0 \delta(z) \exp \left\{ - \frac{(x - A - \Delta_1)^2}{A^2} - \frac{(y - B - \Delta_2)^2}{B^2} \right\}, \quad (1)$$

где $P_0 = P/\pi AB$ – плотность мощности, $\delta(z)$ – дельта функция Дирака.

Поле температур, вызываемое лазерным пучком с распределением интенсивности (1) определим, производя интегрирование по пространственным координатам:

$$T(r, t) = \frac{P\sqrt{a}}{2\pi^{3/2}\lambda} \int_0^t dt \exp\{-z^2/4a\tau\} (J_+ + J_-) (G_+ + G_-), \quad (2)$$

где

$$J_{\pm} = \exp \left\{ - \frac{[x \pm (A + \Delta_1)]^2}{A^2 + 4a\tau} \right\} \operatorname{erfc} \left[\frac{\pm A^2 x - 4a\tau(A + \Delta_1)}{2A\sqrt{a\tau(A^2 + 4a\tau)}} \right],$$

$$G_{\pm} = \exp \left\{ - \frac{[y \pm (B + \Delta_2)]^2}{B^2 + 4a\tau} \right\} \operatorname{erfc} \left[\frac{\pm B^2 y - 4a\tau(B + \Delta_2)}{2B\sqrt{a\tau(B^2 + 4a\tau)}} \right].$$

Временной интервал интегрирования в (2) определяется длительностью τ импульса лазерного излучения, с помощью которой осуществляется управление скоростями нагрева, что в свою очередь оказывает влияние на глубину упрочненного слоя. В рамках данной модели осуществим выбор оптимального значения мощности при заданных параметрах энергии и размерах лазерного пучка. При условии, что геометрия детали не позволяет осуществлять отступление от кромок, расчет тепловых полей дает возможность оптимизировать режим лазерной обработки путем выбора мощности лазерного излучения. Для расчета были выбраны следующие значения параметров: $A = 0.7 \cdot 10^{-3}$ м, $B = 8 \cdot 10^{-3}$ м, $\tau = 6 \cdot 10^{-3}$ с, $a = 34$ Вт/мК⁰, $\lambda = 0.9 \cdot 10^{-5}$ м²/с. На рис.2. приведены результаты расчета распределения температуры по глубине стали У-8 в точке с координатами $X=0$, $Y=B$ для предложенной модели (кривая 1) и для полубесконечной среды (кривая 2). Анализ зависимостей показывает, что температура при реализации полубесконечной модели дает 600°С. Данная температура ниже температуры закалки, в то же время эксперимент показывает, что граница закаленная. Расчет на основании новой модели дает температуру в этой точке, равную 800°С, что отвечает условиям закалки и хорошо согласуется с экспериментом.

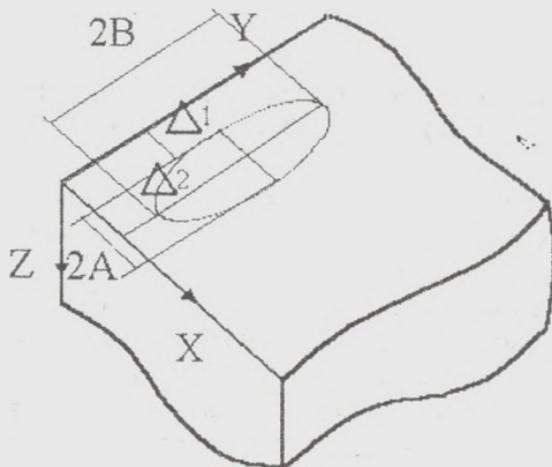


Рис.1. Схема моделирования лазерного нагрева поверхности.

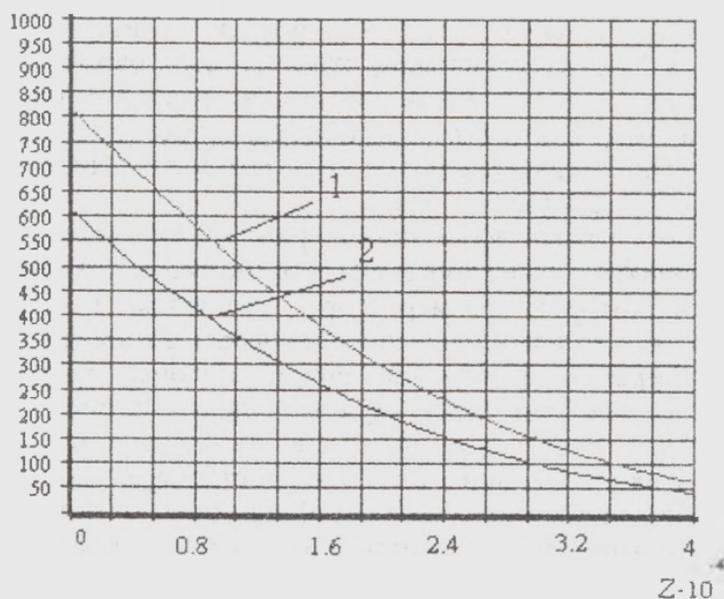


Рис.2. Распределение температуры по глубине стали с учетом $1/8$ пространства (1) и для полубесконечной среды (2)