

УДК 62-52:536.244

С.А. Балан, канд. техн. наук, доц.,

О.С. Савельева, канд. техн. наук,

Е.Г. Трофименко, инженер

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ

С.О. Балан, О.С. Савельева, О.Г. Трофименко.

Оптимізація поверхневої теплової обробки.

Пропонується використовувати модифікований градієнтний метод оптимізації при виборі траєкторії переміщення при тепловій обробці поверхні виробу. Цільовою функцією оптимізації в даній задачі є мінімізація енерговитрат на обробку.

S.A. Balan, I.S. Savelyeva, A.G. Trofimenko.

Optimization of surface heat treatment.

It is offered to use a modified gradient optimisation method in choosing the movement trajectory while the item undergoes heat treatment. The goal function in the given task was to minimize power inputs on treatment.

Во многих отраслях промышленности встречаются ситуации, когда необходимую по технологии поверхностную обработку невозможно осуществить одновременно для всей поверхности обрабатываемого изделия. В этом случае приходится прибегать к последовательной обработке различных участков поверхности подвижным источником тепла, например, газовой горелкой, паяльной лампой и т.д. При этом возникает проблема выбора параметров обработки (траектории и скорости перемещения источника тепла), которые обеспечили бы заданный прогрев изделия при минимальных расходах энергоносителя [1].

В общем случае для полного описания технологического процесса необходимо задать (выбрать) начальную точку нагрева, вычислить скорость перемещения источника из начальной точки как вектор-функцию времени $\vec{V}(t)$ и определить точку окончания обработки, исходя из заданного критерия ее полноты. В качестве метода оптимизации использовали модифицированный градиентный метод [2], применяемый в случаях, когда вычисление градиента функции требует значительных затрат машинного времени или вообще невозможно. Выбор метода связан с весьма сложным видом математической модели такого способа термообработки.

Температурное поле внутри обрабатываемого объекта, а значит, и в любом его фрагменте, отличается крайней неоднородностью и нестационарностью. Поэтому были приняты следующие допущения.

В первом допущении непрерывное движение источника заменили прерывистым — с позиции на позицию, с выдержкой времени τ_{ij} над каждой точкой O_{ij} , являющейся геометрическим центром соответствующей позиции, и мгновенным перемещением из этой точки в соседнюю ортогональную точку (рис. 1).

Во втором допущении движение источника разрешалось только вдоль ортогональных

направлений, параллельных сторонам обрабатываемого прямоугольника.

Третье допущение объявляло окончанием обработки неодновременный нагрев всех точек A_{ij} , находящихся на одной нормали к обрабатываемой поверхности на глубине z под точками O_{ij} ($O_{ij} — A_{ij} = z \forall i j$) до температуры $T_{обр}$.

Четвертое допущение — независимо от расположения и времени работы источников температурное поле имеет вид бесконечного множества эквitemпературных полусфер с центрами в точках обработки O_{ij} .

Пятое допущение непосредственно связано с четвертым. Если последнее имеет силу, то любое текущее состояние поля температур под любой точкой O_{ij} рассматривается как результат нагрева при прочих равных условиях тем же точечным источником тепла, постоянно находящимся над этой точкой.

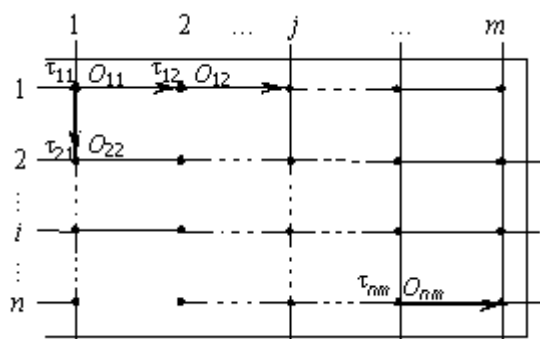


Рис. 1. Схема к выбору траектории перемещения источника тепла

Критерием выбора направления в предлагаемом методе является перемещение в соседнюю точку, температура которой на момент выбора максимальна, что позволяет эффективно использовать для термообработки этой позиции тепло, накопленное за счет внутреннего теплообмена теплопроводностью при обработке других позиций.

Рассмотрим тепловой баланс обработки. "Полезная" часть тепла, сообщенного нагреваемому телу, идет на термообработку зоны под источником. При этом остальная часть тепла рассеивается в соседние зоны и становится потерянной. Если же некоторую долю потерянной части успеть использовать в последующей обработке соседних зон до того, как она окончательно рассеялась, то она "возвращается" в полезную часть и становится "псевдопотерянной". Чем больше такого псевдопотерянного тепла удастся сохранить для общей обработки изделия, тем меньшими будут энергозатраты на весь процесс в целом.

Расчет температуры нагрева точки O_{ij} от источника осуществляли по формуле для точечного непрерывного источника тепла [4]

$$T = T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda z} \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0}}; \quad (1)$$

где T_0 — начальная температура окружающей среды;

q — тепловой поток к поверхности объекта;

λ — коэффициент теплопроводности материала обрабатываемого объекта;

z — заданная глубина прогрева, на которой находится контрольная точка;

$F_0 = \frac{\alpha \tau}{z^2}$ — безразмерное время Фурье, в течение которого источник находится над контрольной точкой;

α — коэффициент теплоотдачи.

Целевой функцией оптимизации является суммарное время, затраченное на обработку всех $K = m \times n$ точек поверхности.

Время обработки каждой точки O_{ij} определяется из выражения

$$\tau_{ij} = [\tau_{ij}(\tau_0 \rightarrow \tau_{обр}) - \tau_{ij}(\tau_0 \rightarrow \tau_k)],$$

где $\tau_{ij}(\tau_0 \rightarrow \tau_{обр})$ — время нагрева точки O_{ij} от начальной температуры T_0 до заданной температуры обработки $T_{обр}$;

$\tau_{ij}(\tau_0 \rightarrow \tau_k)$ — время нагрева точки O_{ij} от начальной температуры T_0 до температуры на конец k -й итерации T_k .

Время $\tau_{ij}(\tau_0 \rightarrow \tau_{обр})$ — величину общую для всех точек — определить относительно легко, т.к. температура $T_{обр}$ задана. Это время рассчитывали по неявной формуле (1) методом подбора.

Время $\tau_{ij}(\tau_0 \rightarrow \tau_k)$ определить гораздо труднее, т.к. для этого сначала необходимо рассчитать температуру T_k . Логика такого расчета строилась на следующих допущениях. До момента принятия решения о направлении перемещения выбранная контрольная точка подвергалась воздействию теплового потока от одного источника, который располагался в разных точках и работал там в разные периоды времени. В соответствии с принципом элементарной суперпозиции [3] такое воздействие заменяли суммарным воздействием двух разных по расположению неподвижных источников с учетом реального времени их работы. Множество N_k таких источников для каждой точки O_{ij} определяли из следующих соображений. Из общего множества K точек обработки отсеивали те, влиянием которых на температуру в зоне под точкой O_{ij} можно пренебречь. Оставшиеся точки попадают в окрестность, которая представляет собой квадрат с центром в O_{ij} и со стороной D , кратной целому числу расстояний между точками.

Далее из множества точек, принадлежащих к окрестности D , исключали точки, где обработка еще не производилась, в т.ч. и центральную точку O_{ij} . Оставшиеся точки составляют множество N_k .

После определения T_k можно, основываясь на пятом допущении, продолжить расчет необходимого времени догрева точки A_{ij} , лежащей на глубине z под точкой O_{ij} , от температуры T_k , которую она приобрела от действия источника на соседних позициях, до температуры $T_{обр}$.

Принцип суперпозиции использовали также для аппроксимации каждого из N_K источников двумя, имеющими противоположные знаки. В соответствии с этим принципом импульсный характер действия каждого источника моделировали, разбивая основную задачу на две элементарные подзадачи (рис. 2). При этом каждый из элементарных источников разбиения включается в определенный момент времени и далее работает непрерывно.

Для двух источников приращение температур суммируется с учетом начала действия каждого из них

$$\tau_n = \begin{cases} T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda z} \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{\alpha(\tau - \tau_{n-1})}}, & \text{при } \tau_{n-1} < \tau < \tau_n; \\ T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda z} \left(\operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{\alpha(\tau - \tau_{n-1})}} - \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{\alpha(\tau - \tau_n)}} \right), & \text{при } \tau > \tau_n, \end{cases}$$

где τ_{n-1} — время начала работы первого ("положительного") источника;

τ_n — время начала работы второго ("отрицательного") источника;

τ — текущее время ($\tau_{n-1} < \tau < \tau_n$).

Таким образом, при расчете предварительного нагрева каждой точки O_{ij} подвижный источник тепла заменяется N_K неподвижными, работающими в разное время и в разных местах, а каждый из N_K источников — двумя элементарными источниками, начинающими работу в разное время и продолжающими работу до бесконечности. Общее количество таких источников составляет $2N_K$.

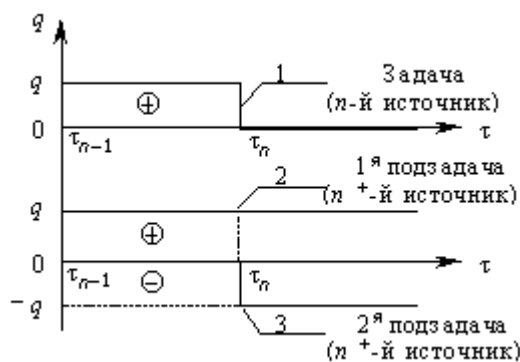


Рис. 2. Моделирование воздействия подвижного импульсного источника 1 суммарным воздействием неподвижных источников 2 и 3 с противоположными знаками

Для любых реальных случаев моделирования тепловой обработки количество перестановок из K по K равно $K!$. С учетом попарной связности элементов (перемещение осуществляется только на одну из двух или трех соседних точек) количество реально возможных перестановок-аргументов находится между нижней $p(K, K) = K \cdot 2^{K-2}$ и верхней $p(K, K) = K \cdot 3^{K-2}$ оценками. Это тоже очень большие числа. Например, для покрытия 10×10 точек нижняя оценка составляет приблизительно $3,2 \cdot 10^{31}$ вариантов реальных перестановок, что исключает полный их перебор.

Если же перемещение источника тепла осуществлять в соответствии с описанным алгоритмом, то в результате компьютерного эксперимента по моделированию поверхностной тепловой

обработки с покрытием $10 \times 10 = 100$ точек получим максимально возможное суммарное время нагрева $\tau_{\Sigma max} = 100 \cdot \tau_{ij}(\tau_0 \rightarrow \tau_k) = 100 \cdot 14,9 = 1490$ с, где 14,9 с — время нагрева одной точки до 300 К. Время обработки, полученное в результате применения предложенного метода оптимизации, $\tau_{\Sigma min} = 412$ с.

Выполненные в дальнейшем расчеты времени обработки, в которых направление перехода на очередную связанную позицию определялось случайным образом, дали значения времени, лежащие в пределах $\tau_{\Sigma max} > \tau > \tau_{\Sigma min}$, доказывающие, что предложенный алгоритм действительно является оптимальным.

Литература

1. Становский А.Л., Трофименко Е.Г. Проектирование параметров несимметричной тепловой обработки // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 1997. — Вып. 1. — С. 271 — 274.
2. Бейко И.В., Бублик Б.Н., Зинько П.Н. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации. — К.: Вища шк., 1983.
3. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. — Л.: Энергия, 1976.

Поступила в редакцию 6 марта 2001 г.