

С. А. ЕРМАКОВ, канд. техн. наук, Н. А. СОСНИН, д-р техн. наук  
(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет),  
П. А. ТОПОЛЯНСКИЙ, канд. техн. наук  
(НПФ "Плазмацентр", Санкт-Петербург)  
E-mail: info@plasmacentre.ru

## Плазменная наплавка с поперечными колебаниями источника нагрева

Рассмотрено применение аналитической модели решения прямой и обратной тепловой задачи плазменной наплавки с поперечными колебаниями по синусоидальной и трапецидальной траекториям с учетом теплоты плавления наносимого материала для расчета режима наплавки и тепловой обстановки в неподвижной системе координат.

Analytical model application of direct and inverse heat problem solution of plasma-jet hard-facing with transverse sinusoidal and trapezoid oscillations is considered taking into account fusion heat of the filler to calculate surfacing conditions and thermal medium in the fixed coordinate system.

**Ключевые слова:** плазменная наплавка, модель, поперечные колебания, источник нагрева

**Key words:** plasma-jet hard-facing, model, transverse oscillation, heating source

Доминирующая в большинстве сварочных технологических процессов тепловая энергия определяет необходимость моделирования и расчета тепловой обстановки в зоне действия источника нагрева. Разработана теория тепловых процессов

при сварке [1]. Впоследствии аналитические модели сварочных процессов совершенствовались, повышалась их точность [2].

В автоматизированных процессах наплавки чаще всего применяют колебательные устройства, обеспечивающие синусоидальную или трапецидальную траекторию колебаний (рис. 1).

С учетом поперечных колебаний источника теплоты может быть получено уравнение для поверхностного источника теплоты. Пусть  $dT(x, y, z, t)$  — приращение температуры в точке  $P$  (см. рис. 1, а) в подвижной системе координат  $x, y, z$  в момент  $t$  от элементарного источника теплоты  $Q_3 dt'$ , действующего в течение времени  $dt'$  и находящегося на расстоянии  $vt'$  от неподвижной оси  $y_0$  и на расстоянии  $A \sin(\omega t')$  от оси  $x$ . Тогда суммирование приращений температуры от всех элементарных источников (за все время действия источника  $t$ ) для синусоидальной траектории колебаний:

$$T(x, y, z, t) = \frac{1}{4\pi\lambda s} \int_0^t \frac{Q_3}{\tau + t_0} \times \exp\left[-\frac{(x + v\tau)^2 + [y - A \sin \omega(t - \tau)]^2}{4a(\tau + t_0)}\right] \times \left[1 + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \cos \frac{\pi i z}{s} \exp\left(-\pi^2 i^2 \frac{a\tau}{s^2}\right)\right] d\tau, \quad (1)$$

где  $Q_3$  — эффективная мощность источника теплоты, Вт;  $t$  — время действия источника тепло-

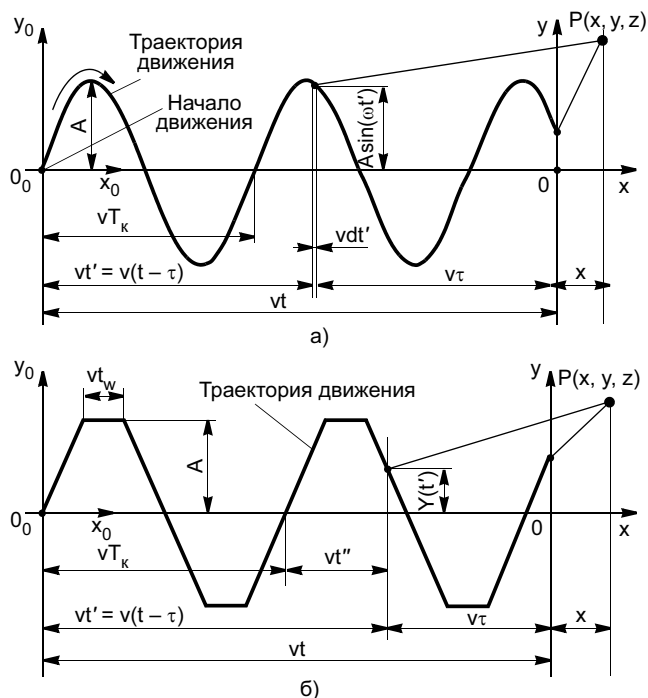


Рис. 1. Схема движения поверхностного источника теплоты с колебаниями по синусоидальной (а) и трапецидальной (б) траекториям ( $x_0, y_0, z_0$  — неподвижная система координат,  $x, y, z$  — подвижная)

ты, с;  $\lambda$  — теплопроводность основного металла, Вт/(м · К);  $s$  — толщина плоского слоя, м;  $t_0 = R_q^2/4a$  ( $a$  — температуропроводность основного металла, м<sup>2</sup>/с;  $R_q$  — эффективный радиус пятна нагрева, м);  $v$  — скорость движения центра источника теплоты по оси  $x$ , м/с;  $\omega$  — круговая частота, равная  $2\pi/T_k$  ( $T_k$  — период колебаний);  $A$  — амплитуда колебаний, м.

Эффективный радиус  $R_q$  характеризует расстояние от оси нормально распределенного источника теплоты, на котором плотность мощности источника уменьшается в  $e \approx 2,72$  раз.

При  $t \rightarrow \infty$  температурное поле в подвижной системе координат не изменяется во времени, и такое поле является квазистационарным.

Решение уравнения (1) может быть выполнено численно, например с использованием метода парабол Симпсона. Такое решение реализовано в компьютерной программе PLASMET [3], предназначенной для решения различных задач сварочного производства, в том числе расчета режима наплавки и построения температурных полей при наплавке с колебаниями.

В отличие от синусоидальной при перемещении источника теплоты по трапецеидальной траектории значение скорости поперечного перемещения источника  $v_y$  остается неизменным.

В выражении (1) обозначим функцию  $A \sin \omega(t - \tau) = Y(t')$  (см. рис. 1, б). Тогда для трапецеидальной траектории при  $v_y > 0$  и  $t > 0$

$$Y(t') = \begin{cases} v_y t'' & \text{при } 0 \leq t'' \leq 0,25 T_k; \\ v_y (0,5 T_k - t'') & \text{при } 0,25 T_k < t'' \leq 0,75 T_k; \\ v_y (t'' - T_k) & \text{при } 0,75 T_k < t'' \leq T_k; \\ A & \text{при } Y(t') \geq A; \\ -A & \text{при } Y(t') \leq -A, \end{cases}$$

где  $T_k = 2t_w + 4A/v_y$ ;  $t'' = (t - \tau) - nT_k$ ;  $n = E(t - \tau)/T_k$ ;  $E$  — функция, приводящая аргумент к ближайшему меньшему целому;  $t_w$  — время выдержки источника в крайних точках колебания;  $v_y$  — скорость перемещения вдоль оси  $y$ .

При задании времени действия источника нагрева  $t$  больше периода теплонасыщения в подвижной системе координат устанавливается квазистационарное состояние температурного поля [2]. Достаточная величина  $t$  может быть определена по скорости приближения температуры в данной точке к своему предельному значению.

Чем ближе температура к предельному значению, тем  $dT/dt$  меньше (стремится к нулю).

Распределенность источника теплоты учтена в уравнении (1) добавлением времени  $t_0$  (зависящего от  $R_q$ ) ко времени после действия сосредоточенного источника теплоты.

Влияние ограниченности размеров тел при допущении, что границы адиабатические, можно учесть, используя метод отражения [2, 3].

При автоматизации расчета параметров режима наплавки, т. е. решая обратную тепловую задачу, целесообразно задавать характеристики источника теплоты — эффективную мощность  $Q_3$  и эффективный радиус  $R_q$  и далее методом итераций рассчитывать скорость движения  $v$ , обеспечивающую заданную температуру в расчетной точке подвижной системы координат.

Если не учитывать в уравнении (1) теплоту плавления, расчетная скорость наплавки оказывается несколько завышенной, особенно для алюминиевых сплавов.

Учет теплоты плавления расплавляемого материала  $\rho \Delta H_{пл}$  ( $\rho$  — плотность материала), поглощаемой в головной части ванны, производится методом итераций. На первом шаге скорость движения рассчитывают без учета теплового эффекта плавления. Затем определяют, какая тепловая мощность идет собственно на плавление металла с заданным сечением  $f$  при скорости  $v$ . Эта тепловая мощность вычитается из исходной  $Q_{3(исх)}$ . По полученной разности мощностей  $Q_{3(n+1)}$  опять рассчитывают скорость движения (которая должна обеспечить заданное расплавляемое сечение  $f$ ). Вновь определяют тепловую мощность, необходимую для плавления металла с заданным сечением  $f$  при скорости  $v$ . Расчеты показывают, что итерационный процесс, проводимый программой автоматически, обычно за пять-семь шагов сходится. Он задается формулой

$$Q_{3(n+1)} = Q_{3(исх)} - f v_{(n)} \rho \Delta H_{пл}$$

Теплофизические характеристики, используемые при расчете наплавки распространенных групп металлов и сплавов, приведены в работе [3].

При наплавке поперечные колебания источника теплоты используют с целью получения равномерного слоя покрытия необходимой ширины. Дополнительные параметры режима (размах колебаний, частота колебаний, время выдержки в

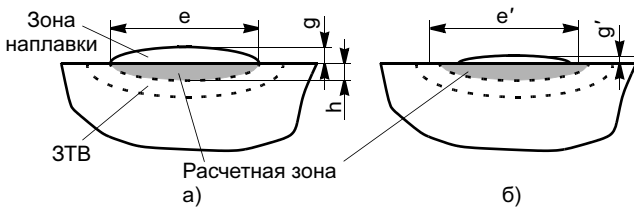


Рис. 2. Поперечное сечение зоны плазменной наплавки при  $\rho\Delta H_n = \rho\Delta H_o$  (а) и  $\rho\Delta H_n > \rho\Delta H_o$  (б)

крайних точках) усложняют выбор режима наплавки и анализ температурных полей, определяющих качество наплавленного металла.

Максимальная температура  $T_{\max}$  задается в некоторой реперной точке с координатами  $Y_{\max}$ ,  $Z_{\max}$ . Например, можно установить  $Y_{\max} = 0$ , а  $Z_{\max}$ , равную толщине наплавляемого слоя.

При расчете режимов плазменной наплавки можно в качестве расчетной зоны, ограниченной координатами температуры плавления основного металла  $T_{\text{пл-о}}$ , принять зеркально отраженную относительно наплавляемой поверхности зону наплавки (рис. 2, а) при условии: глубина  $h$  равна высоте  $g$ ; ширина  $e = \text{const}$ . Это условие выполняется только при равенстве теплосодержания единичного объема наплавляемого и основного металлов:  $\rho\Delta H_n = \rho\Delta H_o$ .

Если теплофизические свойства наплавляемого и основного металлов различаются (например  $\rho\Delta H_n > \rho\Delta H_o$ ), то сечение расчетной зоны

$$f_o = f_n \frac{\rho\Delta H_n}{\rho\Delta H_o}, \quad (2)$$

где  $f_n$  — сечение зоны наплавки высотой  $g'$  и шириной  $e'$ , равное приблизительно  $0,72e'g'$  (см. рис. 2, б).

Поле температур колеблющегося источника теплоты в подвижной системе координат нестационарное, поэтому в зависимости от решаемой задачи необходимо выбрать, какую температуру рассчитывать в каждой точке: мгновенную или наибольшую (за период или за несколько периодов). Для построения термического цикла необходимо задавать расчет в каждой точке мгновенной температуры, а для поиска режима, в том числе с учетом теплоты плавления наплавляемого материала, или, например, для построения темпера-

турных полей в неподвижной системе координат, в частности для оценки зоны проплавления основного металла, необходимо задавать расчет в каждой точке наибольшей температуры.

При поперечных колебаниях наибольшую температуру рассчитывают по формуле (1), прослеживая наибольшую возможную температуру в каждой точке в разные моменты периода колебаний источника, для чего автоматически варьируется задаваемая в расчете величина  $t$ , что изменяет фазу колебаний.

Наибольшие возможные температуры в неподвижной системе координат  $x_0, y_0, z_0$  рассчитывают по выражению (1) с использованием уравнения связи (см. рис. 1):

$$x_0 = x + vt.$$

Чтобы учесть возможное влияние тепловложения от последующих периодов колебаний на температуру в данной точке, в расчет закладывается  $k$  периодов колебаний. Из рассчитанных по  $k$  периодам температур выбирается наибольшая в данной точке.

Построенное по такой методике поле температур в координатах  $y-z$  для процесса с поперечными колебаниями можно сравнивать с поперечным шлифом выполненной наплавки.

Как показали результаты исследования, погрешность при расчете скорости наплавки и температурного поля в зоне наплавки с колебаниями, как правило, составляет не более  $\pm 10\%$ .

## ВЫВОД

Предлагаемая методика расчета режима наплавки с поперечными колебаниями и температурного поля в зоне наплавки в неподвижной системе координат может использоваться для решения конкретных производственных задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 296 с.
2. Кархин В. А. Тепловые основы сварки. Л.: ЛГТУ, 1990. 87 с.
3. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии // Руководство для инженеров. С.-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2008. 406 с.