

**Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО**, д-р техн. наук,  
**О.В. ШУМОВ**, канд. техн. наук (БНТУ)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДУГОВОГО НАГРЕВА**

Во многих технологических процессах требуется удаление слоя оксидов с поверхностей деталей, очистка деталей от органических и неорганических загрязнений. Например, такая необходимость возникает перед нанесением покрытий химическим или физическим осаждением, перед пайкой или микросваркой деталей, при покраске или склеивании поверхностей и т.д. Одним из эффективных методов удаления с поверхности деталей оксидов и загрязнений является очистка плазменной дугой или струей. В процессе очистки под воздействием струи активного газа, а также за счет химического взаимодействия с ионизированными газами происходит испарение и удаление с поверхности оксидов и частиц загрязнений [1].

При воздействии плазменной дуги или струи на поверхности детали протекают различные процессы. Во-первых, удаление углеродсодержащих загрязнений за счет химического воздействия на них кислорода или воздуха, преобразование их в более простые соединения, выдувание продуктов распада потоком газа под повышенным давлением. Во-вторых, восстановление оксидов за счет химического взаимодействия с технологическим газом, в качестве которого обычно используется смеси «водород-аргон», «водород-азот». Основными технологическими параметрами при таком воздействии являются скорость перемещения горелки относительно детали, расстояние от горелки до поверхности детали, количество проходов [2].

В представленной работе при вычислении температуры нагрева обрабатываемой поверхности детали была использована неосесимметричная трехмерная модель источника тепла, в которой распределение плотности теплового потока соответствовало закону Гаусса. С целью снижения погрешности расчетов при учете разницы градиентов температур различных областей движущейся дуги, а также для сокращения количества и времени вычислений, тепловой

поток от движущейся дуги был представлен в форме двойного эллипсоида [3].

Значения температур нагрева поверхности обрабатываемой детали были определены в результате решения дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных для движущегося источника тепла:

$$\rho \tilde{n}_d \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(T) \left[ \frac{\partial^2 \dot{Q}}{\partial \delta^2} + \frac{\partial^2 \dot{Q}}{\partial \delta'^2} + \frac{\partial^2 \dot{Q}}{\partial z^2} \right] + Q,$$

где  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C);  $T$  – температура, °C;  $\lambda(T)$  – теплопроводность, Вт/(м·°C);  $Q$  – входящий тепловой поток, Вт/м<sup>3</sup>.

Так как нагрев детали при воздействии дуги рассматривался как распределение внешнего теплового потока, а потери тепла с поверхности детали за счет конвекции и излучения как поглощающие тепло границы, то входящие тепловые потоки описывались следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} Q &= q_{\text{арс}} + q_{\text{кон}} \left( \int dV \right)^{-1} - q_{\text{изл}} \left( \int dV \right)^{-1}, \\ q_{\text{кон}} &= \int k_{\text{кон}} (T - T_{\text{ос}}) dA, \\ q_{\text{изл}} &= \int \varepsilon C (T^4 - T_{\text{ос}}^4) dA, \end{aligned}$$

где  $q_{\text{арс}}$  – тепловой поток от сварочной дуги, Вт/м<sup>3</sup>;  $q_{\text{кон}}$  – потери тепла с поверхности за счет конвекции, Вт;  $q_{\text{изл}}$  – потери тепла с поверхности за счет излучения, Вт;  $k_{\text{кон}}$  – коэффициент теплообмена с внешней средой, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\varepsilon$  – степень черноты ( $\varepsilon = 0,8$ );  $C$  – постоянная Стефана-Больцмана ( $C = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>));  $T_{\text{ос}}$  – температура окружающей среды ( $T_{\text{ос}} = 293$  К).

Для численного решения дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных был использован метод конечных разностей [4]. Для этого участок пространства, в котором находилась деталь, описывался трехмерной сеткой, координатные оси которой  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  были разделены на  $N - 1$  равных промежутков каждая с шагом  $h_x$ ,  $h_y$ ,  $h_z$  соответственно. Координаты узлов сетки определялись следующими выражениями:  $x_i = (i - 1) \cdot h_x$ ,  $y_i =$

$= (i - 1) \cdot h_y, z_i = (i - 1) \cdot h_z, t_n = n \cdot \tau$ , где  $\tau$  – шаг по времени;  $i = 1, 2, \dots, N_x$ ;  $j = 1, 2, \dots, N_y$ ;  $k = 1, 2, \dots, N_z$ ;  $n = 0, 1, \dots, K$ .

Для замены производных в дифференциальном уравнении теплопроводности были использованы конечно-разностные аппроксимации по неявной схеме. Дискретизация дифференциального уравнения для получения одномерных уравнений в направлении одной из координатных осей на каждом временном слое производилась на основе локально одномерных схем, обеспечивающих абсолютную устойчивость вычислений [5]. Одномерное уравнение для одной из координатных осей имело следующий вид:

$$\begin{aligned} & \rho c (\dot{O}_{i,j,k}^{n+1} - \dot{O}_{i,j,k}^{n+1/2}) = \\ & = (\lambda_{i+1/2}^{n+1/2} \cdot T_{i+1,j,k}^{n+1} - 2\lambda_i^{n+1/2} \cdot T_{i,j,k}^{n+1} + \lambda_{i-1/2}^{n+1/2} \cdot T_{i-1,j,k}^{n+1}) \cdot h^{-2} + \\ & + k_{\text{эф}} (\dot{O}_{i,j,k}^{n+1} - \dot{O}_{\text{н}}) \cdot h^{-1} + \varepsilon C ((\dot{O}_{i,j,k}^{n+1})^4 - \dot{O}_{\text{н}}^4) \cdot h^{-1}. \end{aligned}$$

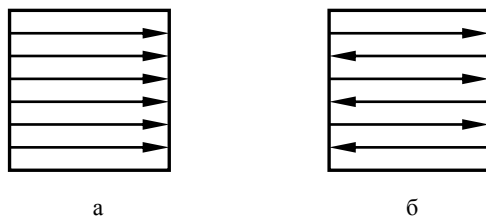
Решение системы из линейных алгебраических уравнений для всех координатных осей давало значение температуры обрабатываемой детали в данном узле трехмерного пространства на данном временном шаге.

Так как задача определения температуры обрабатываемой поверхности является нестационарной, то данная система алгебраических уравнений решалась для каждого шага по времени. Определение температуры на временном слое осуществлялось методом прогонки. Прогоночные коэффициенты  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N - 1$ ) рассчитывались последовательно, начиная с  $\alpha_1$  и  $\beta_1$ , которые были найдены из левого граничного условия дифференциального уравнения. Значения температур  $T_i$  ( $i = N - 1, N - 2, \dots, 2$ ) рассчитывались последовательно в обратном порядке, начиная с  $T_N$ , которое было найдено из правого граничного условия дифференциального уравнения.

Изменение положения источника тепла вдоль координатных осей для каждого временного шага задавалось за счет изменения номеров узлов пространственной сетки, соответствующего скорости перемещения плазменной дуги.

При моделировании были рассмотрены две схемы поверхностной обработки детали: а – с движением подачи плазменной дуги,

направленным в одну сторону, например, слева–направо (рисунок 1, а); б – с движением подачи плазменной дуги, направленным в обе стороны, то есть слева–направо и справа–налево (рисунок 1, б).



а – с односторонним движением подачи; б – с двусторонним движением подачи (стрелками указано направление подачи)

Рисунок 1 – Схемы поверхностной обработки детали

При моделировании принимались следующие основные параметры обработки плазменной дугой: ток – 80 А; напряжение – 25 В; скорость подачи – 40 мм/с; шаг поперечной подачи – 5 мм. Были определены значения температур поверхности детали при обработке по обеим схемам, т.е. как при односторонней подаче, так и с двухсторонним движением подачи. Например, значения температур точек поверхности детали, расположенных на линии перемещения источника тепла, в зависимости от времени обработки при одностороннем движении подачи приведены на рисунке 2.

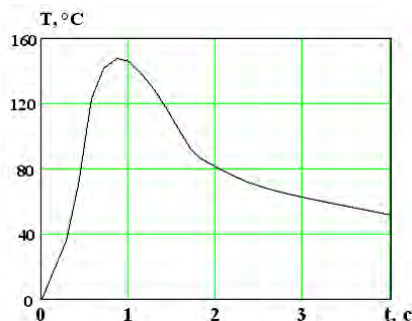


Рисунок 2 – Значения температур точек поверхности детали, расположенных на линии перемещения источника тепла, в зависимости от времени обработки

Полученные при моделировании данные позволили сделать следующие выводы:

1. Наименьшее время обработки и, следовательно, наибольшая производительность достигаются при схеме обработки с двусторонним движением подачи.

2. Наименьшие градиенты температур и более равномерный нагрев поверхности детали обеспечиваются при схеме обработки с односторонним движением подачи.

Таким образом, было проведено численное моделирование процесса нагрева поверхности плоской детали при помощи плазменной дуги. Для имитации действия плазменной дуги была использована неосесимметричная трехмерная модель движущегося источника тепла в форме двойного эллипсоида с распределением плотности теплового потока по закону Гаусса. Значения температур нагрева поверхности обрабатываемой детали были определены в результате численного решения методом конечных разностей дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных.

На основе полученных значений были определены функциональные зависимости температуры нагрева поверхности детали от времени обработки. В процессе моделирования было установлено, что использование схемы обработки поверхности с односторонним движением подачи приводит к меньшим значениям градиентов температур нагрева поверхности детали, что обеспечивает более равномерное распределение температур по поверхности детали по сравнению со схемой обработки поверхности с двусторонним направлением движения подачи.

## Литература

1. **Молодых, Н.В.** Восстановление деталей машин / Н.В. Молодых, А.С. Зенкин. – М.: Машиностроение, 1989. – 480 с.

2. **Куликов, В.П.** Технология сварки плавлением / В.П. Куликов. – Минск: Дизайн ПРО, 2001. – 256 с.

3. **Goldak, J.A.** Computational Welding Mechanics / J.A. Goldak, M. Akhlaghi. – Springer Link, 2005. – 321 p.

4. **Вержбицкий, В.М.** Основы численных методов / В.М. Вержбицкий. – М.: Высшая школа, 2002. – 840 с.

**5. Самарский, А.А.** Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 656 с.

УДК 621.789

**Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО**, д-р техн. наук (БНТУ),  
**В.М. АСТАШИНСКИЙ**, д-р техн. наук (ИТМО),  
**А.Ф. ПАНТЕЛЕЕНКО**,  
**М.В. СПЕЦИАН**,  
**Д.А. МАРУКОВИЧ** (БНТУ)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ УГЛЕРОДИСТОЙ И ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛЕЙ**

В развитых странах мира и крупных научно-технических центрах на постсоветском пространстве (г. С.-Петербург, г. Томск, г. Минск, г. Мариуполь и др.) в последние годы ведутся активные исследования в области обработки поверхностей материалов мощными высокоэнергетическими потоками.

Так, например, в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины разработана перспективная импульсно-плазменная технология трансформации свойств поверхностей сталей и твердых сплавов [1, 2], позволяющая в зависимости от количества импульсов и плотности мощности плазменного воздействия в 2–4 раза повысить износостойкость поверхности твердосплавных прокатных валков вследствие измельчения кристаллов, обогащения кобальтовой связки сложными карбидами и создания в слое сжимающих напряжений.

Авторами работы [3] установлено, что при плазменном нагреве без оплавления углеродистой инструментальной стали У10 формируется неравновесная структура измельченного мартенсита и остаточного метастабильного аустенита (до 70 %), установлена корреляция скорости движения плазмотрона с фазовым составом, его трансформацией, структурой, свойствами. В аналогичном направлении ведутся работы в С.-Петербургском НПФ «Плазмацентр» [4], Приазовском государственном техническом университете [5], ГНУ