ФИЗИКА

УДК 621.793

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПРИ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ

д-р техн. наук, проф. В.С. ИВАШКО, П.А. ДЕКЕВИЧ
(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск);
Г.Ф. ГРОМЫКО, Н.П. МАЦУКА
(Институт математики НАН Беларуси, Минск)

Предложена математическая модель тепловых процессов, а также численный метод ее решения, учитывающий технологические и физические особенности процесса микроплазменной обработки.

С помощью созданной модели предоставляется возможность разработать практические рекомендации по технологическому процессу нанесения упрочняющих покрытий закалки деталей, в частности, уточнять скорость движения плазменной струи, необходимую для прогрева детали в нужном месте до определенной температуры. Благодаря характерному для микроплазменной наплавки малому проплавлению основного металла требуемую твердость и заданный химический состав наплавленного металла обеспечивают уже на расстоянии 0,05…0,1 мм от поверхности сплавления, что позволяет ограничиться однослойной наплавкой.

Введение. Задача упрочнения деталей машин, например ножей сельскохозяйственной техники, в настоящее время является весьма актуальной, поскольку использование дорогих легирующих материалов, входящих в сплавы с высокими физико-механическими свойствами, существенно отражается на цене и, следовательно, на конкурентоспособности машин. Выходом из этого положения является использование очень тонких износостойких покрытий на рабочих поверхностях деталей и их закалка. Износостойкость таких деталей часто оказывается даже более высокой, чем изготовленных из дорогих сплавов. Производить поверхностную закалку стали, а также оплавлять износостойкие покрытия, предварительно нанесенные газотермическим напылением на деталь, позволяет применение высокотемпературных источников нагрева.

Локальная горячая обработка деталей сопровождается концентрированным поверхностным воздействием мощных источников энергии, вызывающих нагрев, плавление обрабатываемого материала с последующим достаточно быстрым охлаждением и кристаллизацией в малой зоне действия. Происходящие при этом структурные и фазовые превращения, а также возникающие остаточные напряжения определяют технологические свойства изделия (прочность, износостойкость). Вместе с тем важным является и то, что локализованный характер высокотемпературного воздействия не распространяется на всю деталь и не приводит к ее деформации после остывания.

Разработка новых технологий высокотемпературной обработки металлов как при закалке сталей, так и при нанесении износостойких покрытий предполагает создание более дешевых средств прогноза и оптимизации процессов, чем физические эксперименты. Поэтому математическое моделирование задач упрочнения деталей, основой которого являются тепловые процессы, весьма актуально.

Некоторые вопросы математического моделирования тепловых процессов достаточно широко изложены в литературе [1 – 3]. Однако в случае микроплазменного нагрева, в частности оплавления композиционных покрытий, отсутствует систематическое изложение всех математических аспектов.

Рассмотрим математическую модель тепловых процессов, а также численный метод ее решения, учитывающий технологические и физические особенности процесса микроплазменной обработки.

1. Математическая модель определения температурных полей при заданной скорости движения плазменной струи. Рассмотрим задачу о распределении температуры в образце (рис. 1), нагреваемом движущейся с постоянной скоростью V_{str} микроплазменной струей, представляющей мощный поверхностный источник с мощностью P_{str} в виде пятна радиуса R_{str}.

Поскольку упрочняющая обработка носит локальный характер, ограничимся моделированием только той части детали, которая испытывает температурные изменения. В качестве образца рассмотрим деталь в виде параллелепипеда (см. рис. 1). Систему координат x, y, z свяжем с формой образца.

Верхний слой детали подвергается воздействию микроплазменной струи, движущейся с постоянной скоростью V_{str} вдоль детали (ось y) и смещающейся после каждого прохода на некоторое заданное расстояние (вдоль оси *x*). Ось *z* направим вглубь детали. Множество точек пятна микроплазменной струи обозначим через D_0 и определим как

$$D_0 = \{(x, y) : (x - x_{str})^2 + (y - y_{str})^2 \le R_{str}^2\},$$

где (x_{str}, y_{str}) – координаты центра плазменной струи.

Исходя из заданного режима обработки, координаты центра движущегося пятна D_0 плазменной струи будут определять по следующему правилу:

$$x_{str} = (k_{str} - 1) l_{sm};$$

$$y_{str} = \begin{cases} V_{str} t, & k_{str} = 2k - 1; \\ L_y - V_{str} t, & k_{str} = 2k, \end{cases}$$

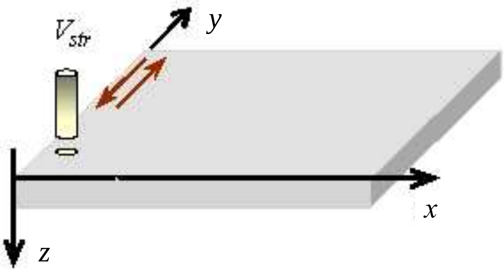

Рис. 1. Модель процесса плазменной обработки стальной детали

где k_{str} – номер прохода плазменной струи параллельно оси y ($k_{str} = 1, 2, \ldots, K_x$); переход на следующий проход k_{str} определяется пройденным струей расстоянием L_y; конечное K_x определяется условием $x_{str} \le L_x$; l_{sm} – смещение плазменной струи по направлению *x* после одного прохода.

При микроплазменной обработке деталей вся мощность плазматрона Q_0 расходуется на нагрев газа (доля q_g), на разогрев ядра (q_k) и на мощность струи (q_{str}). Поскольку далее в представленной модели разогрев ядра фактически отсутствует, долей q_k будем пренебрегать.

Вся мощность микроплазменной струи мгновенно проходит через металл детали, поэтому можно считать, что при моделировании тепловых процессов в металлах имеем внутренний объемный источник, с мощностью $q_{str} Q_0$.

Выделим элементарную ячейку детали m : $\omega_{ijk}^m = [x_{i+1} - x_i] \times [y_{j+1} - y_j] \times [z_{k+1} - z_k]$ объема V, определяемую границами: x_i, x_{i+1} по оси *x*; y_j, y_{j+1} – по оси *y*; z_k, z_{k+1} – по оси *z*, предполагая, что она периодически повторяется в направлении *x*, *y*, *z*. Тогда деталь можно представить как объединение этих ячеек $\Omega = \bigcup \omega_{ijk}^m$, $i = \overline{0, N_x}$, $x_0 = 0$, $x_{N_x+1} = L_x$; $j = \overline{0, N_y}$, $y_0 = 0$, $y_{N_y+1} = L_y$; $k = \overline{0, N_z}$, $z_0 = 0$, $z_{N_z} = L_z$, где L_x, L_y, L_z – размеры рассматриваемой части детали по *x*, *y*, *z* соответственно.

В декартовой системе координат *x*, *y*, *z* для любой ячейки ω_{ijk}^m тепловой баланс имеет вид:

$$\rho c \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) + Q, \quad \omega_{ijk}^m \in \Omega, \; t > 0, \tag{1}$$

где $T = T(x, y, z, t)$ – температура стали в ячейке ω_{ijk}^m; ρ, c, λ – соответственно плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность; Q – внутренний объемный источник; $H(T)$ – энтальпия.

В первом приближении можно считать, что энтальпия определяется как

$$H(T) = \begin{cases} cT + 0{,}5L, \; T > T_m; \\ cT - 0{,}5L, \; T < T_m, \end{cases}$$

где L – скрытая теплота плавления; T_m – температура плавления стали.

В качестве условий сопряжения с соседними ячейками по *x*, *y*, *z* будем использовать равенство тепловых потоков через грани ячейки.

Задача (1) записана в форме обобщенной постановки задачи Стефана [4].

Наличие нагрева способно вызвать структурные и фазовые изменения материалов. Учет изменения тепловой энергии при плавлении-кристаллизации в математических моделях приводят к нелинейным задачам Стефана с неизвестной границей раздела фаз.

Поскольку целью микроплазменной обработки деталей является нагрев детали до нужной температуры (температуры плавления) на заданной глубине, то на алгоритмах с явным выделением фронта плавления мы останавливаться не будем.

Для задания мощности источника примем модель плоского источника, размазав эффект мощности дуги по площади пятна струи:

$$Q = \begin{cases} q_{str} Q_0, \ (x, y) \in D_0, \ z \in (0, L_z); \\ 0, \qquad (x, y) \notin D_0, \ z \in (0, L_z), \end{cases}$$

где $Q_0 = P_{str} / \pi R_{srt}^2$.

Граничное условие теплообмена на поверхностях образца описывается условиями с излучением по закону Стефана – Больцмана с учетом движущегося по границе источника (микроплазменная струя)

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_{\Gamma} = \alpha_T \left(T - T_g\right)\Big|_{\Gamma} + \beta \sigma_b \left(T^4 - T_g^4\right)\Big|_{\Gamma} + G, \tag{2}$$

где α_T – коэффициент теплопередачи; T_g – температура окружающей среды; β – степень черноты поверхности; σ_b – постоянная Стефана – Больцмана; $G = G(x, y)$ – интенсивность теплового источника на границе Γ; $\partial T / \partial n$ – производная по нормали в точках границы Γ к поверхности детали; $n = (n_x, n_y, n_z)$ – вектор внешней нормали к Γ.

Коэффициент теплоотдачи α_T определяется из критериального соотношения по формуле: $\alpha_T = \mathrm{Nu} \cdot \lambda_g / l_{xar}$, где l_{xar} – характерный размер, связанный с толщиной материала; λ_g – коэффициент теплопроводности плазмы; Nu – число Нуссельта.

В работе [5] приведены варианты различных формул вычисления числа Нуссельта, в частности, можно использовать упрощенный вариант: $\mathrm{Nu} = 2 + \mathrm{Re}^{0,5} \cdot \mathrm{Pr}^{0,4}$, где Pr и Re – критерии Прандля и Рейнольдса соответственно, вычисляемые исходя из теплопроводности (λ_g), плотности (ρ_g) и динамической вязкости газа (μ_g).

Для внешних сторон образца граничные условия теплообмена имеют вид (2), где $G = 0$.

На поверхности детали z = 0 имеем:

$$G = G_g + Q,$$

где G_g имеет форму распределения Гаусса:

$$G_g = q_g Q_0 \exp\left(-\frac{(x - x_{str})^2 + (y - y_{str})^2}{2R_{str}^2}\right), \ (x, y, 0) \in D_0; \ G_g = 0, \ (x, y, 0) \notin D_0.$$

Как видно из характера распределения, для каждого момента времени мощность потока охватывает пятно радиуса R_{str}. Траектория движения центра плазменной струи задается технологическим режимом процесса обработки детали.

С учетом начальной температуры T_0 задача (1), (2) полностью определена:

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \tag{3}$$

Для решения системы (1) – (3) будем использовать приближенный метод конечных разностей (МКР) [7]. Численный метод предполагает переход от области непрерывного изменения аргументов и функций к дискретной. Для этого в области решения введем временную сетку $\omega_t = \{t_n = n\tau, n = 0, \ldots\}$ с равномерным временным шагом τ. Поскольку размеры ячеек ω_{ijk}^m намного меньше размеров области, то их можно выбрать в качестве расчетной пространственной сетки. Вместо непрерывной функции $T(x, y, z, t)$ в ячейке ω_{ijk}^m будем искать дискретную $\hat{T}_{ijk} = T(x_i, y_j, z_k, t_{n+1})$.

Пользуясь интегроинтерполяционным методом и интегрируя законы сохранения (1) – (3) по контрольному элементарному объему, с учетом граничных условий в приграничных ячейках, строим неявные конечно-разностные схемы относительно $\hat{T}_{ijk}$, которые являются устойчивыми. Решение получаем с помощью итерационных процессов, которые в итоге сводят задачу к последовательному решению трех диагональных систем линейных алгебраических уравнений методом прогонки. Решение осуществляется по рекуррентным формулам и не требует обращения матриц, что очень важно для многомерных задач.

2. Определение скорости движения плазменной струи при постоянной мощности. Предлагаемая выше модель расчета температурных полей предполагает, что скорость движения плазменной струи известна.

Однако зачастую необходима простая и удобная модель, позволяющая прогнозировать скорость теплового источника. Эту проблему можно решить на базе предложенной тепловой задачи, не прибегая к решению обратных задач теплопроводности.

Определим максимально возможную скорость плазменной струи V_{str}, исходя из того, что наибольший прогрев достигается в центре пятна плазменной струи.

Рассмотрим плоскую ячейку регулярности с размерами сторон: $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$; $\Delta y_j = y_{j+1} - y_j$, на которую попадает центр плазменной струи заданной мощности.

Для решения поставленной задачи достаточно рассмотреть одномерную задачу о распространении тепла по направлению z в глубь детали, исходя из модели (1) – (3). Граничными условиями будут при $z = 0$ на поверхности порошка условие (2), в котором G_g определено максимальной величиной $(G_g = q_g Q_0)$, и условие теплообмена на нижней стороне детали при $z = L_z$, где $G_3 = 0$.

Решение проводится приближенным методом МКР. Вводим равномерный временной шаг τ, пространственный шаг по z выбирается исходя из разбивки области на регулярные ячейки $\Delta z_k = z_{k+1} - z_k$, $k = \overline{0, N_{Nz} - 1}$, где z_k – координата по z. Отметим, что если шаг Δz_k достаточно велик, то внутри блока проводится более мелкая разбивка по z. С помощью интегро-интерполяционного метода нетрудно построить неявную разностную схему:

$$\rho c T_t = (\lambda_{-0,5} \hat{T}_{\bar{z}})_z + Q,$$

где $\hat{T} = \hat{T}_k = T(z_k,\ t_n + \tau)$, – неизвестная температура на глубине z_k в момент времени $t_{n+1} = t_n + \tau$.

Для реализации полученной нелинейной системы уравнений строится итерационный процесс. В результате получаем линейную систему уравнений относительно неизвестных температур T_k, $k = \overline{1, N_z}$.

Используя в качестве критерия прекращения счета достижение необходимой температуры T_{contr} на заданной глубине z_{contr} по оси z (например, температуры плавления стали на глубине 0,1 мм), находим время действия струи t_{fin}. Таким образом, время t_{fin} – это то время, при котором для каждой точки (x_i, y_j) поверхности детали распределение температур по глубине детали одинаковые. Переходя к задаче с неизвестной скоростью, отметим, что для того, чтобы проплавить деталь на нужную глубину, необходимо, чтобы плазменная струя действовала на эту площадь в течение времени t_{fin}. Поскольку по технологии обработки струя движется по оси y с постоянной скоростью, то скорость струи определим выражением: $V_{str} = \Delta y_j / t_{fin}$. Полученная таким образом скорость движения струи является максимально возможной, при которой достигается проплавление в детали.

Более полную картину температур в детали можно получить методом МКР по модели, предложенной в предыдущем пункте с уже найденной скоростью V_{str}.

Эти две модели дополняют друг друга. Одна позволяет предсказать ориентировочную, усредненную скорость движения микроплазменной струи, необходимую для проплавления стали, другая дает возможность получить динамику распределения тепловых полей на любой момент времени в любой точке системы, и если необходимо, скорректировать величину скорости.

3. Результаты расчетов по модели. Для рассматриваемой детали (см. рис. 1) с геометрическими размерами 85×380×8 мм (оси x, y, z соответственно) необходимо было найти скорость микроплазменной струи мощностью 0,4 кВт и диаметром 2 мм для проплавления детали на глубину 0,05 мм. Начальная температура детали и окружающей среды (воздух) составляет 300 K.

На основе модели рассчитана рекомендуемая скорость движения плазменной струи для достижения необходимой температуры плавления стальной детали на заданную глубину.

Было рассчитано температурное поле в детали при найденной скорости движения струи, которая двигалась вдоль оси y. После каждого прохода смещение струи вдоль оси x составляло 25 % от диаметра струи. Из расчетов температуры в детали было видно, что полученной скорости достаточно для проплавления всей детали на заданной глубине.

По предложенной математической модели был создан комплекс программ, позволяющий изменять входные данные процесса. Описанные выше параметры могут быть изменены и служат входными данными для расчетов.

На рисунке 2 представлены графики распределения температуры на разной глубине детали в случае прогрева стали до температуры T = 1273,0 К на глубине z_6 = 0,95 мм. Расчетное время (t) составило 7,022 с. Необходимая для этого скорость микроплазменной струи (v), рассчитанная по предлагаемой модели, равнялась 6,63 см/мин.

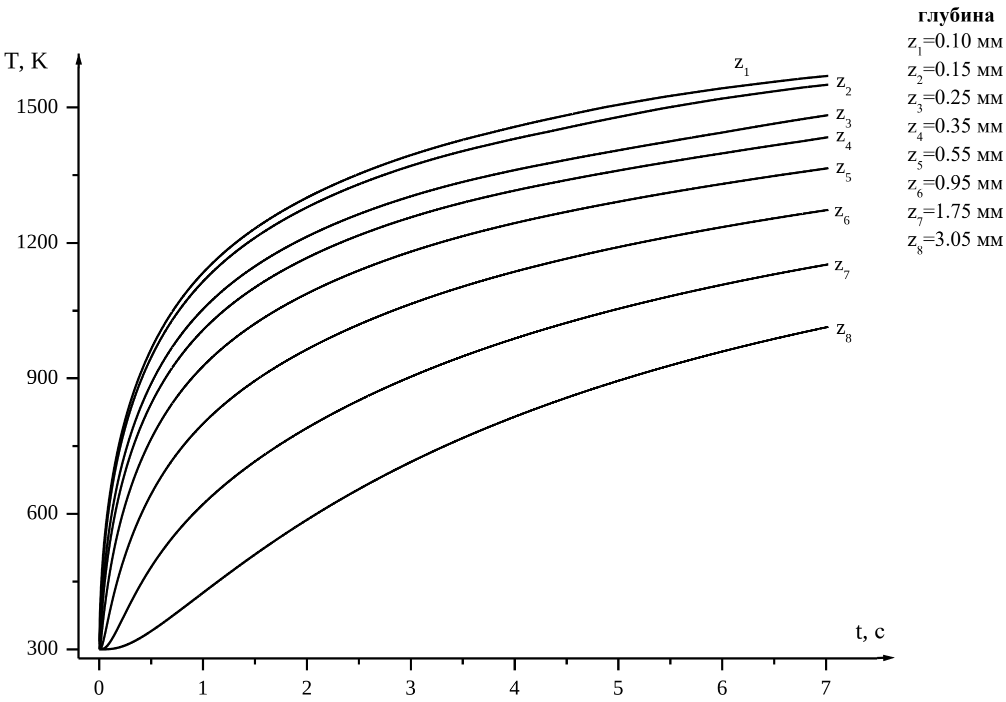

Рис. 2. Изменение температуры во времени на разной глубине

Динамика прогрева детали по глубине в расчетных узлах через разное время воздействия теплового источника представлена на рисунке 3.

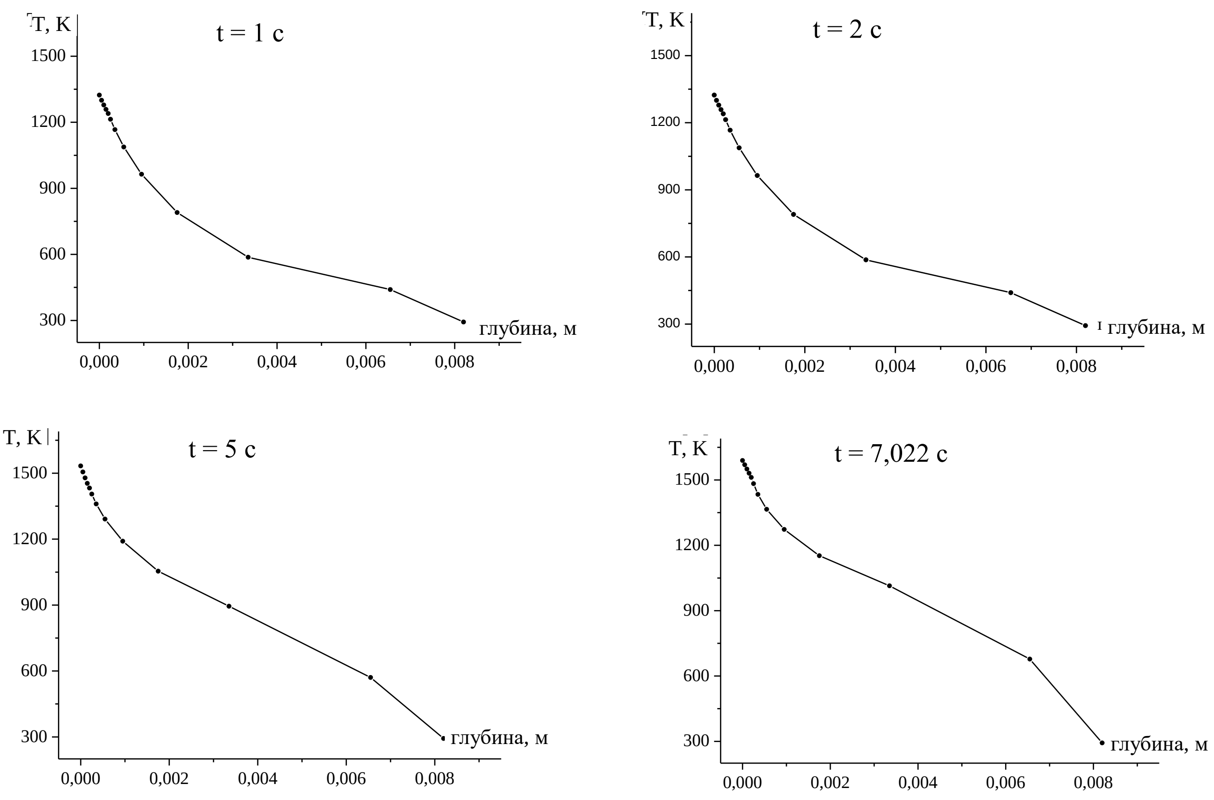

Рис. 3. Изменение температуры по глубине детали

4. Математическая модель определения температурных полей при нанесении на поверхность детали покрытий. Рассмотрим особенности тепловых режимов высокотемпературной обработки в случае оплавления нанесенного газотермическим способом на поверхность детали термонейтрального композиционного состава. Построение модели проиллюстрируем, например, на системе порошок – деталь, в которой в качестве упрочняющего порошка использованы карбид вольфрама WC и никель Ni.

Будем предполагать, что порошок состоит из двух компонент с заданным объемным содержанием (зерен карбида вольфрама WC и порошка никеля Ni), между которыми отсутствуют химические реакции. Теплопередача между ними осуществляется только за счет передачи тепла от горячего компонента к холодному.

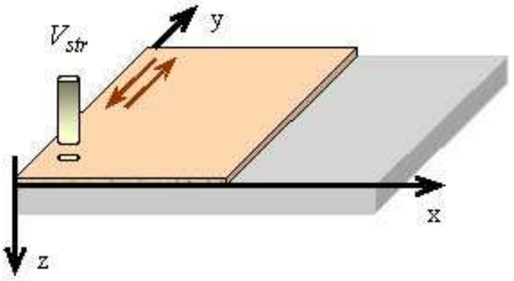

Рис. 4. Модель процесса плазменной обработки детали с покрытием

Теплосодержание системы «порошок» зависит прежде всего от состава входящих в него компонент.

При воздействии источника энергии (плазменной струи) на эту сложную систему разные компоненты имеют разную температуру, определяемую индивидуальными свойствами каждого компонента, и кроме того, обмениваются между собой тепловой энергией. Разряд между металлом и высоковольтным электродом микроплазменной пушки зажигается только при наличии в порошке достаточной доли металла (например, 20 % Ni). Мощность плазматрона мгновенно проходит через никель в деталь подложки (сталь). При этом карбид вольфрама WC является диэлектриком и учитывает тепловое воздействие микроплазменной пушки через теплообмен с граничной поверхностью (с газом) $q_g Q_0$, а также теплообмен с никелем. Отсюда следует, что распределение зерен карбида и их вид в регулярном объеме порошка будет оказывать влияние на тепловые процессы в системе «порошок – деталь».

Разобьем порошок на ячейки описанным выше способом. Ячейка объема V содержит долю WC объема V_1 и долю Ni – объема V_2. Тогда область, занятую порошком, можно представить как объединение этих ячеек:

$$\Omega_p = \cup \omega_{ijk}^m,\ i = \overline{0, N_x},\ x_0 = 0,\ x_{N_x+1} = L_{x\_p};$$

$$j = \overline{0, N_y},\ y_0 = 0,\ y_{N_y+1} = L_{y\_p};$$

$$k = \overline{0, N_{zp}},\ z_0 = 0,\ z_{N_{zp}} = L_{z\_p},$$

где L_{x_p}, L_{y_p}, L_{z_p} – размеры насыпки порошка по x, y, z соответственно.

Математическая модель тепловых процессов для композиционных материалов представим как совокупность балансовых законов отдельных компонент, находящихся во взаимосвязи.

В декартовой системе координат x, y, z, связанной с формой образца, для любой ячейки $\omega_{ijk}^m \in \Omega_p$ тепловой баланс при $t > 0$ для каждого компонента имеет вид:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}\right) + \alpha_{12}(T_2 - T_1)\frac{S_{12}}{V_1}; \tag{4}$$

$$\rho_2 \frac{\partial H_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}\right) - \alpha_{12}(T_2 - T_1)\frac{S_{12}}{V_2} + Q_2 \frac{S_{S2}}{V_2}, \tag{5}$$

где $T_1 = T_1(x, y, z, t)$ – температура карбида вольфрама WC; $T_2 = T_2(x, y, z, t)$ температура Ni в ячейке ω_{ijk}^m; ρ_l, c_l, λ_l – соответственно плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность l-того компонента; $H_2(T_2)$ – энтальпия Ni; α_{12} – коэффициент теплообмена между компонентами в ячейке ω_{ijk}^m; S_{12} – площадь контакта между компонентами WC и Ni; S_{S2} – площадь, занятая никелем на грани $[x_{i+1} - x_i] \times [y_{j+1} - y_j]$; V_l – объем l-того компонента в регулярном объеме V порошка, т.е. $V = V_1 + V_2$, $l = 1, 2$.

Для удобства записи считаем, что деталь состоит из однородных ячеек такого же размера ω_{ijk}^{m}. Тогда область детали представим как объединение этих ячеек:

$$\Omega_{d} = \bigcup \omega_{ijk}^{m},\ i = \overline{0, N_x},\ x_0 = 0,\ \ x_{N_x+1} = L_{x\_p};$$

$$j = \overline{0, N_y},\ y_0 = 0,\ y_{N_y+1} = L_{y\_p};$$

$$k = \overline{N_{zp+1}, N_{z\_d}},\ z_{N_{z\_d}} = L_{z\_p} + L_{z\_d},$$

где L_{z_d} – толщина детали.

Тепловой баланс для ячейки стали $\omega_{ijk}^{m} \in \Omega_d$ при $t > 0$ имеет вид:

$$\rho_3 \frac{\partial H_3}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}\right) + Q_3 \frac{S_{S,2}}{V}, \tag{6}$$

где $T_3 = T_3(x,\ y,\ z,\ t)$ – температура стали в ячейке ω_{ijk}^{m}. Энтальпия никеля определяется аналогично энтальпии стали.

Задача (4) – (6) записана в форме обобщенной постановки двухфазной задачи Стефана.

Граничные условия теплообмена на поверхностях образца описываются аналогичными условиями с учетом физических свойств материалов:

$$\lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial n}\bigg|_{\Gamma} = \alpha_T \left(T_l - T_g\right)\Big|_{\Gamma} + \beta\sigma_b \left(T_l^4 - T_g^4\right)\Big|_{\Gamma} + G_l. \tag{7}$$

На поверхности порошкового слоя $z = 0$ имеем:

$$G_1 = G_g;\ \ G_2 = G_g + Q,$$

где G_g имеет форму распределения Гаусса.

На плоскости раздела двух сред (порошковый слой – деталь) $z = L_{z\_p}$ рассмотрим условия сопряжения: потоки и температуры соприкасающихся поверхностей одинаковы:

$$\left((1 - x_{v,2})\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} + x_{v,2}\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}\right)\bigg|_{z = L_{z\_p}^{+}} = \left(\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}\right)\bigg|_{z = L_{z\_p}^{-}}; \tag{8}$$

$$(1 - x_{v,2})T_1(x, y, L_{z\_p}, t) + x_{v,2}T_2(x, y, L_{z\_p}, t) = T_3(x, y, L_{z\_p}, t).$$

Начальное распределение температуры в порошке и детали:

$$T_l(x, y, z, 0) = T_{l,0};\ \ l = 1,\ 2,\ 3, \tag{9}$$

где $T_{l,0}$ – начальная температура компонент порошка и детали.

Отметим, что нагрев порошка свыше температуры 2400 K может вызвать необратимые структурные изменения в WC. Поэтому поставленную задачу будем решать до получения допустимых значений температур, при которых сохраняются известные свойства компоненты порошка.

5. Результаты расчетов по модели. Опыт исследований комбинированных защитных покрытий, получаемых с использованием плазменной струи (см. рис. 4), показывает, что свойства покрытий в значительной степени зависят от технологических параметров плазменной обработки (скорости перемещения струи, диаметра пятна струи, коэффициента перекрытия плазменных «дорожек» струи на поверхности обработки и др.).

Постановка задачи аналогична ранее рассмотренной.

По верхней стороне стальной детали произведена предварительная формовка покрытия газотермическим напылением композиционного порошка состава WC – Ni слоем 0,2 мм.

Содержание Ni в смеси полагается достаточным, чтобы зажегся разряд в плазменной струе.

На рисунке 5 приведены графики изменения температуры во времени на разной глубине порошка и в детали.

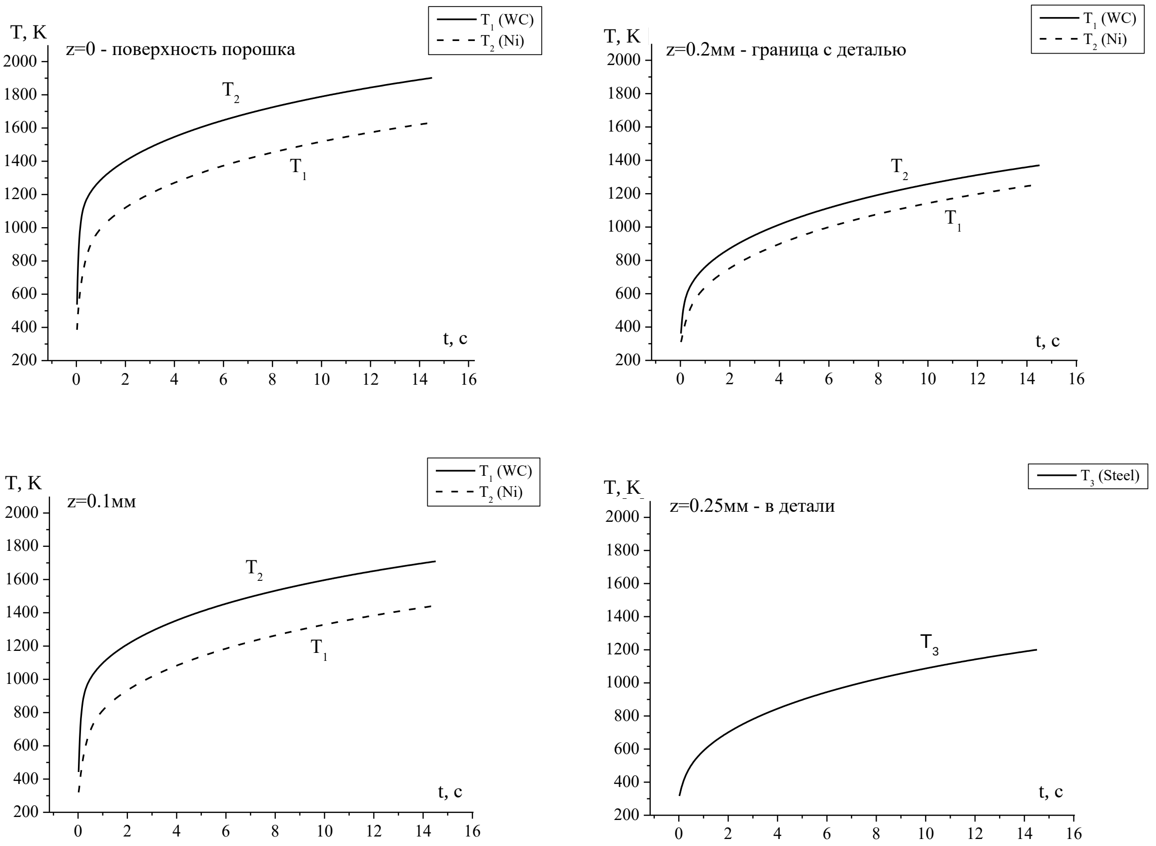

Рис. 5. Изменение температуры со временем на разной глубине по *z*

Были выполнены расчеты рекомендуемой скорости движения плазменной струи для достижения необходимой температуры плавления никеля и проплавки детали на заданную глубину.

Для порошка состава 30 % Ni + 70 % WC проведена серия расчетов определения зависимости скорости движения микроплазменной струи от заданной температуры T_{contr} , до которой осуществляется прогрев стали на глубине 0,05 мм в детали.

В таблице приводятся результаты моделирования при различной температуре T_{contr} и потерях различных долей мощности на нагрев газа.

Результаты моделирования при различной температуре T_{contr}
и различных потерях мощности на нагрев газа

T_{contr} , K	$q_{gaz} = 20$ %		$q_{gaz} = 30$ %	
	t_{fin} , c	v_{str} , см/мин	t_{fin} , c	v_{str} , см/мин
1000	7,33	6,34	21,64	2,13
1100	10,37	4,48	29,85	1,56
1200	14,37	3,21	40,22	1,17
1300	19,78	2,35	53,71	0,87
1400	27,44	1,70	72,42	0,65

На рисунке 6 показана зависимость скорости плазменной струи, при которой достигается температура T_{contr} .

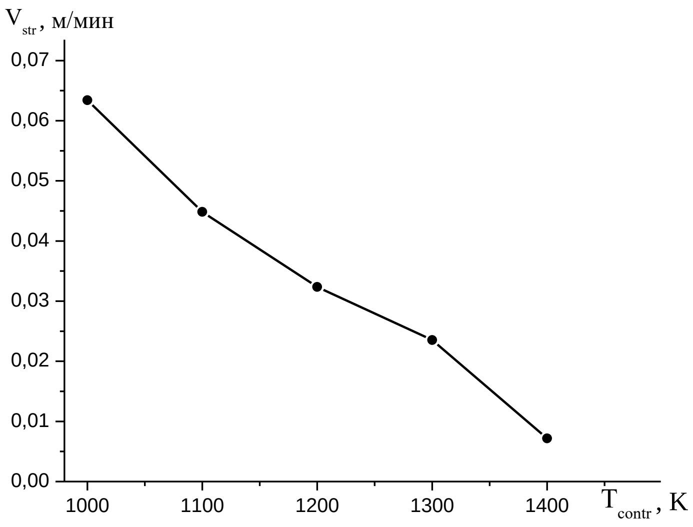

Рис. 6. Рекомендуемая скорость движения плазменной струи
в зависимости от рационального прогрева в детали

Прогрев до температуры 1200 K на глубине 0,05мм в детали возможен при скорости струи 3,21 см/мин (время t = 14,37 с). Очевидно, что чем больше необходимо прогреть подложку, тем медленнее должна двигаться плазменная струя.

Заключение. С помощью созданной модели предоставляется возможность разработать практические рекомендации по технологическому процессу нанесения упрочняющих покрытий закалки деталей, в частности, уточнять скорость движения плазменной струи, необходимую для прогрева детали в нужном месте до определенной температуры.

Благодаря характерному для микроплазменной наплавки малому проплавлению основного металла требуемую твердость и заданный химический состав наплавленного металла обеспечивают уже на расстоянии 0,05…0,1 мм от поверхности сплавления, что позволяет ограничиться однослойной наплавкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория и практика нанесения плазменных покрытий / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Белорусская наука, 1998. – 583 с.
2. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов [и др.]. – М.: Наука, 1990. – 406 с.
3. Компьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий / С.П. Кундас [и др.]. – Минск: Бестпринт, 1998. – 212 с.
4. Мейрманов, А.М. Задача Стефана / А.М. Мейрманов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 360 с.
5. Компьютерное моделирование процесса плазменного напыления / Ю.С. Борисов [и др.] // Автоматическая сварка. – 2000. – № 12. – С. 42 – 51.
6. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 616 с.

Поступила 26.04.2007