

Ю.Л. Петров, А.А. Бородулин, И.А. Бородулин,

В.В. Каратыш, В.М. Язовских

U.L. Petrov, A.A. Borodulin, I.A. Borodulin,

V.V. Karatish, V.M. Yazovskih

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА НАПЛАВКИ ПОД ФЛЮСОМ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПЛАВЛЕННЫХ ВАЛИКОВ

THE INFLUENCE OF SURFACING PARAMETERS UPON GEOMETRICAL CHARACTERISTICS OF WELDED BEADS

Построены математические модели, описывающие влияние параметров режима наплавки на геометрические характеристики наплавленных валиков. Решена обратная задача, построена тепловая модель процесса наплавки под флюсом.

Ключевые слова: наплавка под слоем флюса, параметры режима наплавки, математическая модель, обратная задача, тепловая модель.

The mathematical model describing the effect of the profile, surfacing on the geometric characteristics of weld beads. We solve the inverse problem. Constructed model of thermal welding under flux.

Keywords: surfacing under the flux layer, surfacing mode parameters, mathematical model, inverse problem, thermal model.

Для изучения влияния основных параметров режима наплавки под слоем флюса (напряжение дуги, сварочный ток и скорость сварки) на геометрические характеристики наплавленных валиков были проведены работы, описанные в [1]. По результатам экспериментов построены уравнения регрессии, характеризующие взаимное влияние режимов наплавки на ширину наплавленного валика (1) и глубину проплавления (2):

$$B = 23,1 + 3,14 \cdot I + 1,61 \cdot U - 3,73 \cdot V + 1,21 \cdot IU - 0,81 \cdot IV - 1,2 \cdot I^2 + 0,75 \cdot V^2. \quad (1)$$

$$h = 5,87 + 1,23 \cdot I + 0,43 \cdot U - 0,48 \cdot V, \quad (2)$$

где B – ширина шва; h – глубина проплавления; I – ток сварки; U – напряжение дуги; V – скорость сварки.

Полученные математические зависимости показали хорошую сходимость с результатами экспериментов (таблица) [1].

Геометрические параметры наплавленных валиков

Номер режима (по матрице планирования эксперимента)	Ширина шва, мм			Глубина проплавления, мм		
	Расчетная	Опытная	Ошибка, %	Расчетная	Опытная	Ошибка, %
3	21,4	19,5	8,9	6,4	6,7	4,5
7	25,9	27,1	4,4	7,0	7,5	6,7
17	23,1	21,9	5,1	5,8	6,1	5,2

Полученные зависимости могут быть использованы для расчета размеров валика при наплавке под слоем флюса на листы из микролегированных сталей (исследования проводили на пластинах из стали 10Г2ФБЮ) толщиной (16 ± 1) мм.

Для практического использования приведенных выше выражений в математическом пакете Mathcad 14 решена обратная задача. С помощью встроенной функции Find по заданным значениям ширины шва, глубины проплавления и начальным приближениям решения системы уравнений рассчитываются основные параметры режима наплавки (ток, напряжение и скорость). Листинг приведен ниже.

На первом этапе из заранее созданных файлов «Коэффициенты_Ширина» и «Коэффициенты_Глубина» в массивы a и b считываются коэффициенты уравнения регрессии:

$a := \text{READPRN}(\text{"Коэффициенты_Ширина.txt"}) \quad a = (23.1 \ 3.1 \ 1.6 \ -3.7 \ -0.8 \ -1.2 \ 0.8)$

$b := \text{READPRN}(\text{"Коэффициенты_Глубина.txt"}) \quad b = (5.9 \ 1.3 \ 0.4 \ -0.5)$

Затем определяются константы уравнений регрессии: значения факторов на нулевом уровне ($I_n, A; U_n, B; V_n, m/ч$) и интервалы варьирования (ξ_I, ξ_U, ξ_V) по матрице планирования эксперимента [1] соответственно для тока, напряжения и скорости сварки:

$$I_n := 500 \quad \varepsilon_I := 100$$

$$U_n := 35 \quad \varepsilon_U := 5$$

$$V_H := 21 \quad \varepsilon_V := 6$$

Задается требуемая ширина валика B и глубина проплавления h , мм, и начальное приближение решения системы уравнений:

$$B := 23 \quad h := 5$$

$$I := 10 \quad U := 1 \quad V := 1$$

С помощью функции Given открывается блок уравнений:

Given

$$a_{0,0} + a_{0,1} \cdot \frac{I - I_H}{\varepsilon_I} + a_{0,2} \cdot \frac{U - U_H}{\varepsilon_U} + a_{0,3} \cdot \frac{V - V_H}{\varepsilon_V} + a_{0,4} \cdot \frac{I - I_H}{\varepsilon_I} \cdot \frac{U - U_H}{\varepsilon_U} +$$

$$+ a_{0,5} \cdot \frac{I - I_H}{\varepsilon_I} \cdot \frac{V - V_H}{\varepsilon_V} + a_{0,6} \cdot \left(\frac{I - I_H}{\varepsilon_I} \right)^2 + a_{0,7} \cdot \left(\frac{V - V_H}{\varepsilon_V} \right)^2 = B$$

$$b_{0,0} + b_{0,1} \cdot \frac{I - I_H}{\varepsilon_I} + b_{0,2} \cdot \frac{U - U_H}{\varepsilon_U} + b_{0,3} \cdot \frac{V - V_H}{\varepsilon_V} = h$$

$$I > 0 \quad U > 0 \quad V > 0$$

Для записи уравнений внутри блока решения уравнений используется знак логического равенства. Коэффициенты уравнения $a_{0,i}$ и $d_{0,j}$ соответствуют элементам массивов a и b .

Находится решение системы уравнений с помощью функции Find:

$$\begin{pmatrix} I_{\text{иск}} \\ U_{\text{иск}} \\ V_{\text{иск}} \end{pmatrix} := \text{Find}(I, U, V) = \begin{pmatrix} 446.5 \\ 15 \\ 14.1 \end{pmatrix}$$

Если система уравнений имеет несколько решений, то для нахождения других решений необходимо использовать новые начальные приближения.

Также для описания механизма распространения тепловой энергии в металле пластин построена тепловая модель процесса наплавки под слоем флюса.

Тепловой моделью является решение дифференциального уравнения теплопроводности. Для решения уравнения пользовались методом функций Грина. Решение уравнения принимает следующий вид:

$$T(x, y, z, t) = \int_0^L \int_0^B \int_0^\delta \int_0^t G(x, y, z, x', y', z', t - \tau) \cdot F(x', y', z', \tau) dx' dy' dz' d\tau,$$

где $G(x, y, z, x', y', z', t - \tau)$ – функция Грина; $F(x', y', z', \tau)$ – функция источника тепла.

Условия однозначности:

– геометрические условия:

$$0 \leq x \leq L,$$

$$0 \leq y \leq B,$$

$$0 \leq z \leq \delta.$$

Наплавка под флюсом проводилась на пластинах с размерами 300×250×16 мм, в качестве модели нагреваемого тела принимается ограниченная пластина с теми же габаритными размерами;

– физические условия:

- ρ – плотность материала (7710 кг/м³);
- c – массовая теплоемкость (504 Дж/(кг·К));
- λ – теплопроводность (41 Вт/(м·К));

– начальные условия:

$$T(x, y, z, 0) = 0.$$

Принимается, что температура в начальный момент времени равна 0;

– граничные условия: принимается что тепловой поток с поверхности пластины равен 0 в каждый момент времени:

$$\begin{aligned} & \bullet \left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, 0, t) = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, \delta, t) = 0 \end{aligned} \right\} \text{– для поверхности } x0y, \\ & \bullet \left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t}(y, z, 0, t) = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial t}(y, z, L, t) = 0 \end{aligned} \right\} \text{– для поверхности } y0z, \\ & \bullet \left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t}(x, z, 0, t) = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial t}(x, z, B, t) = 0 \end{aligned} \right\} \text{– для поверхности } x0z. \end{aligned}$$

Функция Грина для заданных краевых (граничных и начальных) условий примет вид [2]:

$$G(x, y, z, x', y', z', t) = \frac{1}{(2\sqrt{\pi at})^3} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \sum_{i=3}^{-3} \left(\exp \left(-\frac{(x-x'+2nL+Vt)^2}{4at} \right) + \exp \left(-\frac{(x+x'+2nL)^2}{4at} \right) \right) \times \\ & \times \sum_{i=3}^{-3} \left(\exp \left(-\frac{(y-y'+2nB)^2}{4at} \right) + \exp \left(-\frac{(y+y'+2nB)^2}{4at} \right) \right) \times \\ & \times \sum_{i=3}^{-3} \left(\exp \left(-\frac{(z-z'+2n\delta)^2}{4at} \right) + \exp \left(-\frac{(z+z'+2n\delta)^2}{4at} \right) \right). \end{aligned}$$

Функция подвижного непрерывно действующего плоского источника нагрева, расположенного на поверхности, принимает вид

$$F(x', y', z', \tau) = \frac{q}{c\rho 4h_x h_y} E(x) E(y) \delta(z) E(\tau),$$

где $E(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } -h_x \leq x \leq h_x, \\ 0 & \text{при } -x > h_x \text{ и } y < -h_y, \end{cases}$

$$E(y) = \begin{cases} 1 & \text{при } h_y \leq y \leq h_y, \\ 0 & \text{при } y > h_y \text{ и } y < -h_y, \end{cases}$$

$$E(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq \tau \leq t, \\ 0 & \text{при } \tau > t. \end{cases}$$

Используя правило разделения переменных, а также таблицу интегралов, окончательно получим уравнение:

$$\begin{aligned} T(x, y, z, t) = & \frac{q\eta}{16c\rho S\sqrt{\pi a}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\tau+t_0}} \sum_{n=-3}^3 \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x+h_x+2nL+V(\tau+t_0)}{2\sqrt{a(\tau+t_0)}} \right) - \right. \\ & \left. - \operatorname{erf} \left(\frac{x-h_x+2nL+V(\tau+t_0)}{2\sqrt{a(\tau+t_0)}} \right) \right] \times \\ & \times \sum_{n=-3}^3 \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y+h_y+2nB}{2\sqrt{a(\tau+t_0)}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y-h_y+2nB}{2\sqrt{a(\tau+t_0)}} \right) \right] \sum_{n=-3}^3 \exp \left(\frac{(z+2n\delta)^2}{4a(\tau+t_0)} \right) \partial\tau, \end{aligned}$$

где q – электрическая мощность, Вт; η – КПД, %; ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; c – массовая теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $a = \lambda/c\rho$ – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; $S = h_x h_y$ – площадь плоского источника, м^2 ; t_0 – время действия фиктивного источника, с; x, y, z – координатные значения, м; L – длина пластины, м; B – ширина пластины, м; δ – толщина пластины, м; V – скорость наплавки, м/ч; t – время действия источника нагрева, с.

На основании разработанной тепловой модели автоматической наплавки под слоем флюса в пакете Mathcad 14 были построены графики распределения температуры в различных плоскостях при $I = 400$ А, $U = 30$ В, $V = 27$ м/ч (рис. 1–3).

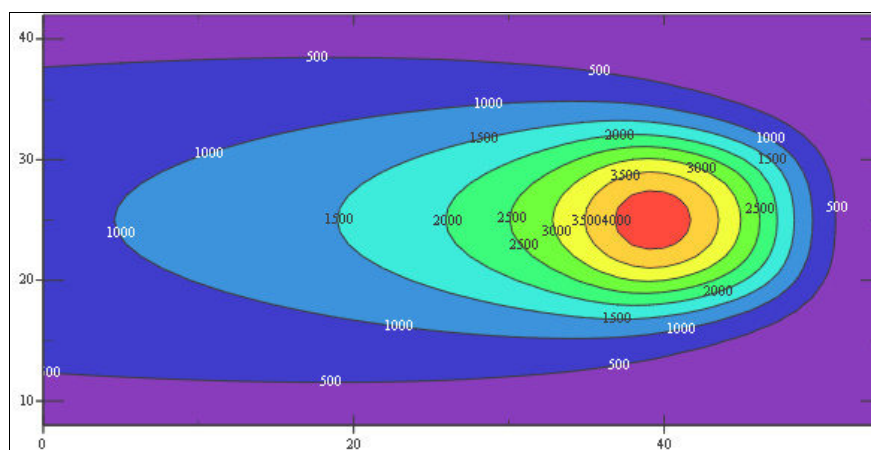


Рис. 1. Распределение температуры в плоскости x_0y (вид сверху)

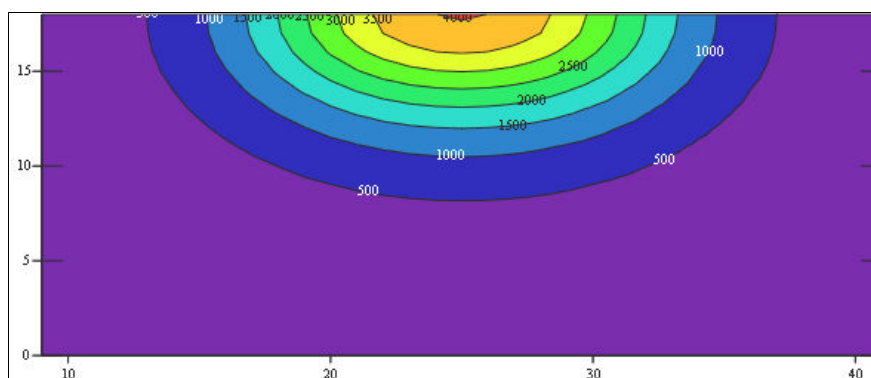


Рис. 2. Распределение температуры в плоскости y_0z (поперечный разрез)

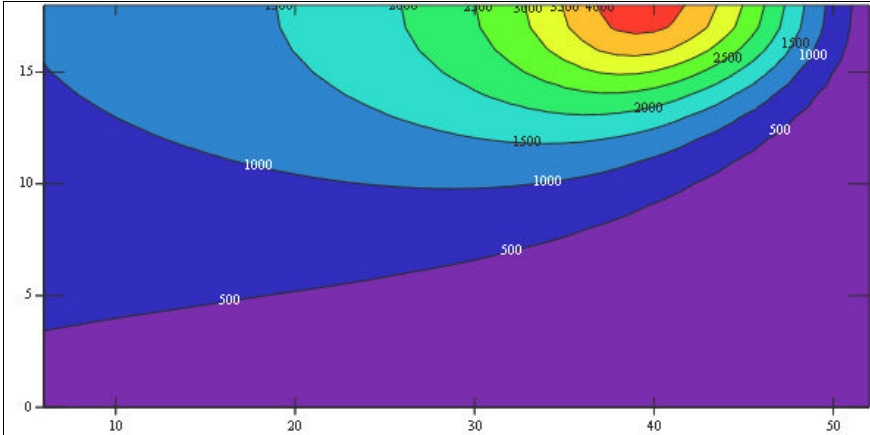


Рис. 3. Распределение температуры в плоскости xOz (продольный разрез)

Для оценки погрешности, с которой модель описывает распространение тепла при наплавке, в пакете Mathcad строились термические циклы сварки: один – на основе экспериментальных данных, второй – по тепловой модели процесса (рис. 4).

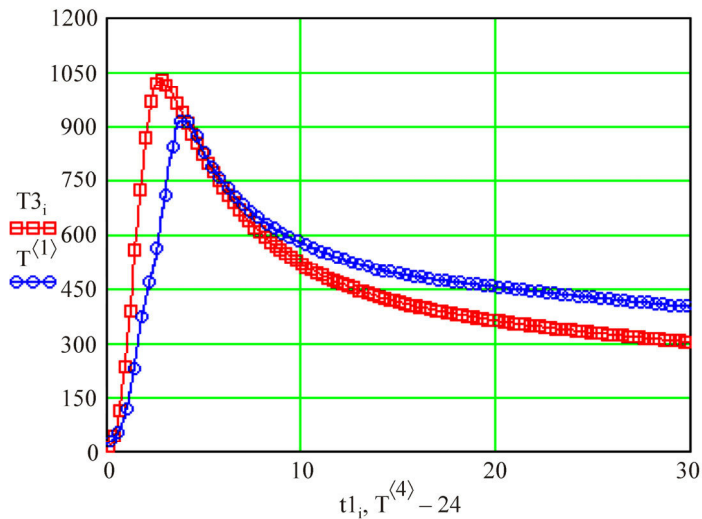


Рис. 4. Термический цикл наплавки под флюсом (расстояние от границы сплавления 1 мм): \square модельный ТЦС, \circ эмпирический ТЦС

Сделаем следующие выводы. Решение обратной задачи позволяет осуществлять поиск оптимальных параметров режима наплавки. Функция Find позволяет включить в блок кроме уравнений неравенства, с помощью кото-

рых можно ввести дополнительные условия, например диапазон регулирования скорости сварки или напряжения дуги для конкретного автомата и источника питания.

Границы литой зоны в поперечном сечении шва можно оценить по изотерме 1500 °С (см. рис. 2).

Сравнение термических циклов (см. рис. 4) позволяет сделать вывод о том, что тепловая модель описывает процесс распространения тепла при наплавке с достаточно хорошей точностью.

Список литературы

1. Исследование влияния параметров режима наплавки под флюсом на геометрические характеристики наплавленных валиков / А.А. Бородулин, Ю.Л. Петров, И.А. Бородулин, В.В. Каратыш, В.М. Язовских // *Master's Journal*. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – № 2. – С. 107–114.

2. Язовских В.М. Математическое моделирование и инженерные методы расчета в сварке: в 2 ч. Ч. 1. Тепловые процессы при сварке и моделирование в пакете Mathcad. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 119 с.

Получено 15.02.2013

Петров Юрий Леонидович – магистр, ПНИПУ, МТФ, ТСП-06м, e-mail: maestro@mail.ru.

Бородулин Андрей Алексеевич – магистрант, ПНИПУ, МТФ, ТСП-11м, e-mail: ka_ban-@mail.ru.

Бородулин Иван Алексеевич – студент, ПНИПУ, МТФ, ТСП-11-1, e-mail: borodylin_@mail.ru.

Каратыш Виктор Васильевич – кандидат технических наук, доцент, ПНИПУ, МТФ, e-mail: vkaratysh@mail.ru.