

В.М. Язовских, В.В. Каратыш, В.Я. Беленький

Пермский государственный технический университет

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ СВАРКИ В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

Подробно описано построение математической модели сварки в среде углекислого газа, основанной на тепловой модели и статистической обработке экспериментальных данных, приведенных в работах Н.М. Новожилова и А.Г. Потапьевского. Приведенная математическая модель позволяет определять параметры зоны проплавления при сварке, рассчитывать термические циклы сварки, определять мгновенную скорость охлаждения в любой точке сварного соединения. Приведены некоторые листинги решений в пакете Mathcad.

Влияние отдельных параметров режима сварки на форму и размеры швов изучалось многими исследователями. Нами использовались экспериментальные данные, приведенные в работах Н.М. Новожилова и А.Г. Потапьевского [1–3]. Швы, выполненные в углекислом газе, имеют при прочих равных условиях большее отношение глубины проплавления к ширине шва по сравнению со швами, выполненными автоматической сваркой под слоем флюса. Для определения зоны проплавления при сварке в CO_2 можно использовать комбинированную ММ, состоящую из нормально-распределенного точечного на поверхности и линейного по глубине источника [4].

$$\begin{aligned}
 T(x, y, z, \tau) = & \frac{k_1 q \eta}{4c\rho\sqrt{a\pi}} \int_0^\tau \frac{1}{\tau + t_0} \exp\left[-\frac{(x + V\tau)^2 + y^2}{4a(\tau + t_{0z})}\right] \times \\
 & \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\tau + t_{0z}}} \exp\left[-\frac{(z + 2nL)^2}{4a(\tau + t_{0z})}\right] d\tau + \frac{k_2 q \eta}{8\lambda h \pi} \int_0^\tau \frac{1}{\tau + t_0} \exp\left[-\frac{(x + V\tau)^2 + y^2}{4a(\tau + t_0)}\right] \times \\
 & \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{z + h + 2nL}{2\sqrt{a(\tau + t_{0z})}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z - h + 2nL}{2\sqrt{a(\tau + t_{0z})}}\right) \right] d\tau,
 \end{aligned} \quad (1)$$

где t_0 характеризует распределенность источника по диаметру пятна нагрева; t_{0z} характеризует распределенность источника по глубине; h характеризует условную величину внедрения сварочной дуги в свариваемый металл; k_1 и k_2 – коэффициенты распределения мощности дуги между точечным и линейным источниками соответственно ($k_2 = 1 - k_1$).

Таким образом, меняя четыре указанных параметра, можно добиться максимального приближения расчетных значений глубины проплавления и ширины шва к экспериментальным.

Известно также, что при оптимальном режиме сварки между напряжением и сварочным током, а также между КПД (η) и током выдерживаются определенные соотношения. Были приняты следующие зависимости:

$$\eta = 0,74 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot I_{св}, \quad U_{д} = 26 + 0,01 \cdot I_{св}. \quad (2)$$

В табл. 1 приведены экспериментальные данные, расчетные значения ширины шва и глубины проплавления, а также соответствующие им (подобранные с помощью моделирования) значения t_0 , t_{0z} , h , k_1 .

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные параметры шва

№ п/п	Сварочный ток, А	Глубина проплавления $H_э$, мм	Ширина шва $B_э$, мм	Глубина проплавления H_p , мм	Ширина шва B_p , мм	t_0 , с	k_1	h , мм
1	200	1,9	12,0	2,2	11,2	2,0	1,0	4,0
2	300	4,8	16,2	4,5	15,0	2,35	0,85	4,7
3	400	7,8	18,5	7,4	17,1	3,35	0,7	5,0
4	500	12,5	18,0	11,6	18,0	4,5	0,55	5,5

Примечание: диаметр сварочной проволоки 2,0 мм; t_{0z} во всех случаях 0,05 с.

В результате статистической обработки представленных в табл. 1 результатов были получены следующие зависимости t_0 , h , k_1 от сварочного тока (рис. 1):

$$t_0 = 2,275 - 5,5 \cdot 10^{-3} \cdot I_{св} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot I_{св}^2, \quad (3)$$

$$h = -7,7 + 3,7 \cdot 10^{-3} \cdot I_{св}, \quad k_1 = 1,3 - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot I_{св}.$$

Таким образом, решая совместно уравнения (1), (2) и (3), можно с достаточной высокой точностью оценить форму проплавления (глубину и ширину шва), распределение температурных полей в плоскостях $X-Y$, $X-Z$, $Y-Z$, термические циклы в любой заданной точке и др.

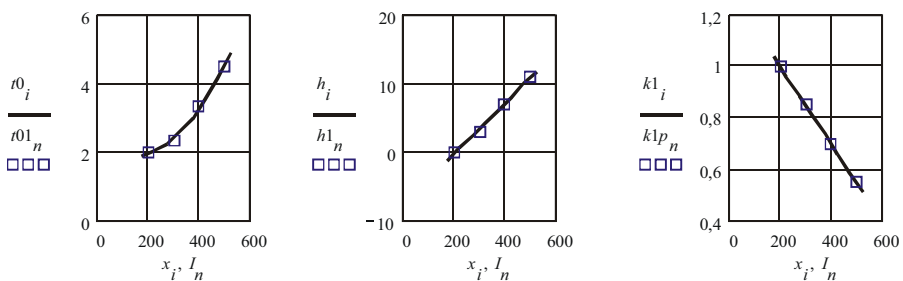


Рис. 1. Графики зависимостей t_0 , h , k_1 от сварочного тока: — — кривые, построенные по уравнениям (3); $\square\square\square$ — значения, подобранные при моделировании по уравнению (1)

На рис. 2–3 приведен полный листинг решения уравнения (1) с использованием зависимостей (2) и (3) и показан характер распределения температур в плоскости $X-Z$, $Y-Z$.

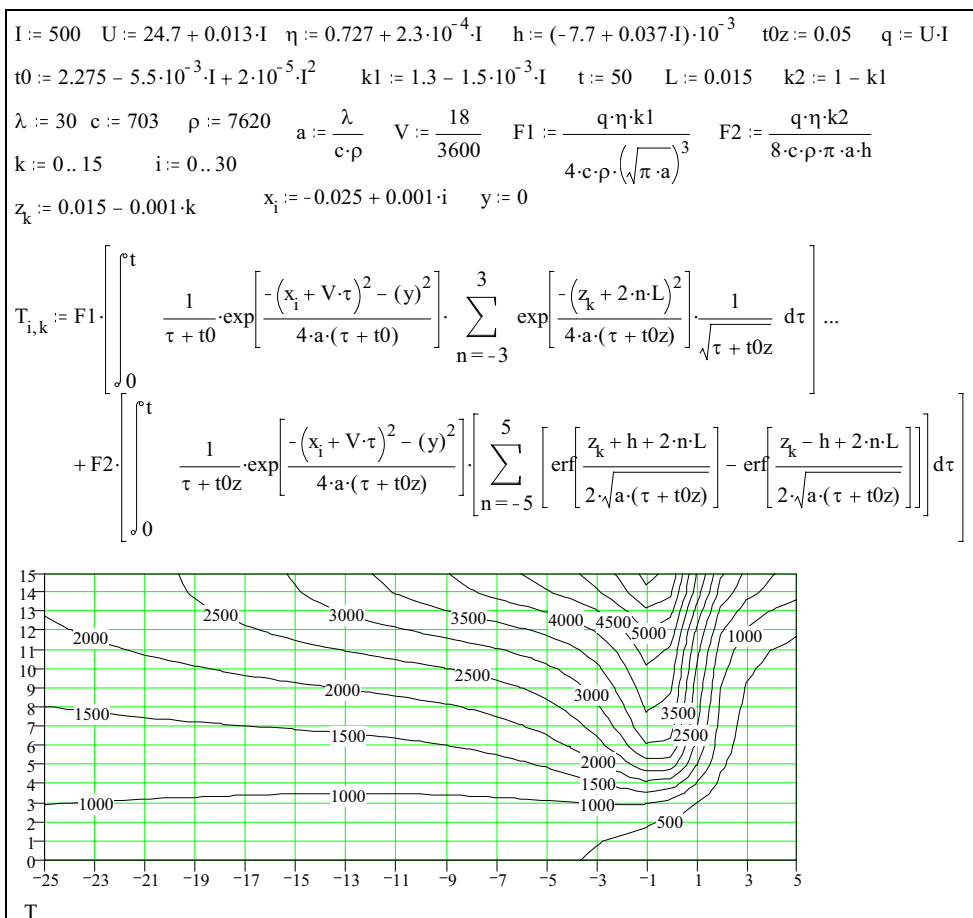


Рис. 2. Листинг решения по уравнению (1) и зависимостям (2) и (3); график показывает распределение температур в плоскости $X-Z$ при $y = 0$

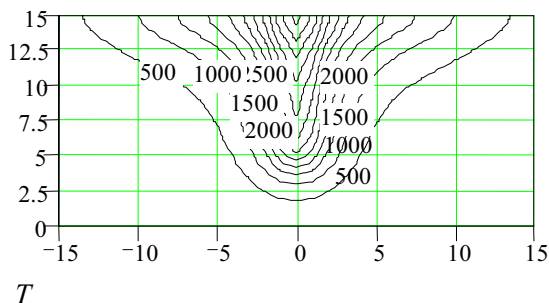


Рис. 3. Распределение температур в плоскости $Y-Z$

Наибольший практический интерес представляет сварка в углекислом газе проволокой диаметром 1,2 мм. В табл. 2 представлены экспериментальные данные, взятые из работ А.Г. Потапьевского, а также подобранные значения t_0 , h , k_1 . Для подбора применялось уравнение (1).

Таблица 2

Экспериментальные и теоретические параметры шва

№ п/п	Сварочный ток, А	Глубина проплавления H_p , мм	Ширина шва B_p , мм	Глубина проплавления H_p , мм	Ширина шва B_p , мм	t_0 , с	k_1	h , мм
1	120	2,1	7,0	2,3	6,8	0,3	1,0	0
2	145	2,8	7,6	2,8	7,5	0,6	0,8	1,0
3	170	3,5	8,1	3,6	8,1	0,85	0,6	2,0
4	200	4,6	9,0	4,6	9,0	0,92	0,4	3,0
5	230	5,8	10,2	5,8	9,9	0,99	0,35	4,5

Примечание: диаметр сварочной проволоки 1,2 мм; t_{0z} во всех случаях 0,025 с.

В результате статистической обработки приведенных в табл. 2 данных получены следующие зависимости t_0 , h , k_1 от величины сварочного тока:

$$t_0 = -2,067 + 0,027 \cdot I_{св} - 5,944 \cdot 10^{-5} \cdot I_{св}^2, \quad (4)$$

$$h = -4,827 \cdot 10^{-3} + 4,004 \cdot 10^{-5} \cdot I_{св},$$

$$k_1 = 2,804 - 0,02 \cdot I_{св} + 3,817 \cdot 10^{-5} \cdot I_{св}^2.$$

После статистической обработки экспериментальных данных, взятых из работ А.Г. Потапьевского и Н.М. Новожилова по оптимальным параметрам режима сварки, получены зависимости напряжения на дуге U_d и значений КПД (η) от величины сварочного тока:

$$U_d = 19,358 - 0,014 \cdot I_{св} + 1,397 \cdot 10^{-4} \cdot I_{св}^2, \quad (5)$$

$$\eta = 0,7 + 2,3 \cdot 10^{-4} \cdot I_{св}.$$

На рис. 4 показаны кривые зависимости t_0 , h , k_1 и U_d от сварочного тока, построенные по уравнениям (4) и (5).

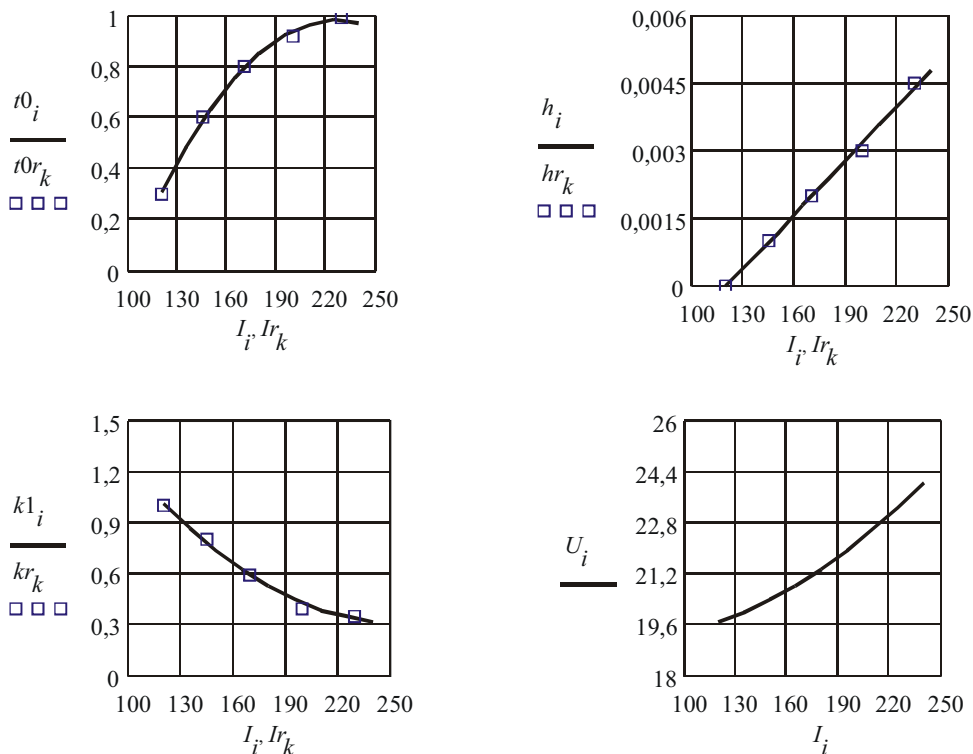


Рис. 4. Графики зависимостей t_0 , h , k_1 и U от сварочного тока:
 — кривые, построенные по уравнениям (4), (5); $\square\square$ — значения, подобранные при моделировании по уравнению (1)

По приведенным графикам можно сделать некоторые выводы, не расходящиеся с известными теоретическим и практическими представлениями о протекании процесса сварки в углекислом газе. Так, при увеличении сварочного тока наблюдается следующее: величина внедрения дуги в основной металл h увеличивается по линейному закону; чем больше величина внедрения h , тем большая часть мощности сварочной дуги идет на линейный источник по уравнению (1), коэффициент корреляции между t_0 и k_2 составляет 0,95; диаметр пятна нагрева увеличивается, что приводит к повышению значения t_0 и, соответственно, к уменьшению коэффициента сосредоточенности.

Таким образом, с помощью ММ (1) и уравнений (4), (5) можно решить самые разнообразные задачи, связанные с распространением тепла при сварке, в том числе оценить зону проплавления. На рис. 5 приведен пример расчета в пакете Mathcad.

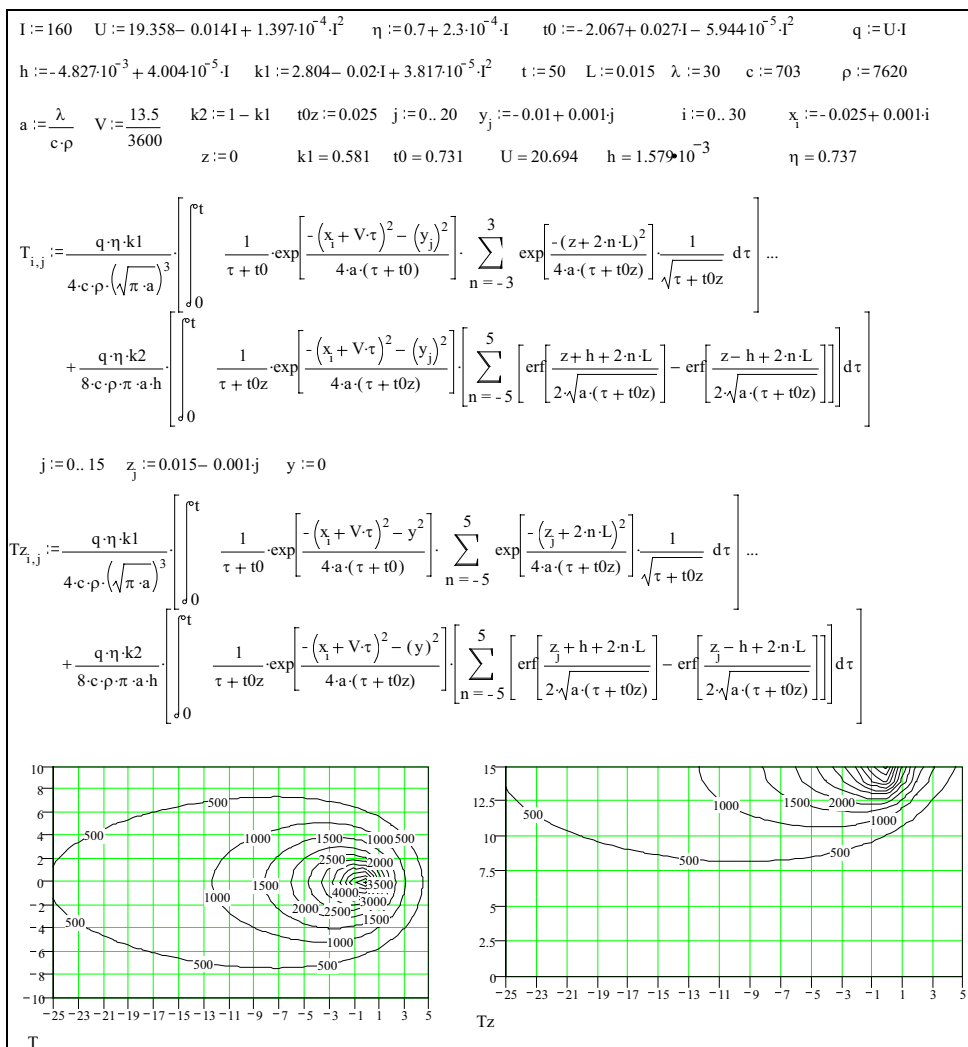


Рис. 5. Листинг расчета по уравнениям (1), (4) и (5) и изолинии в плоскостях X - Y (T), X - Z (T_z); изолиния 1500 °C показывает зону проплавления

Если принять, что изолиния 1500 °C ограничивает зону проплавления, то по распределению температуры в плоскости X - Y можно оценить ширину шва – она составляет примерно 8 мм, а по распределению температуры в плоскости X - Z можно оценить глубину проплавления – она составляет примерно $3,3$ мм.

Оценим термические циклы сварки при значениях тока 120 и 230 А. Полностью расчет представлен на рис. 6 (листинг и графики термических циклов).

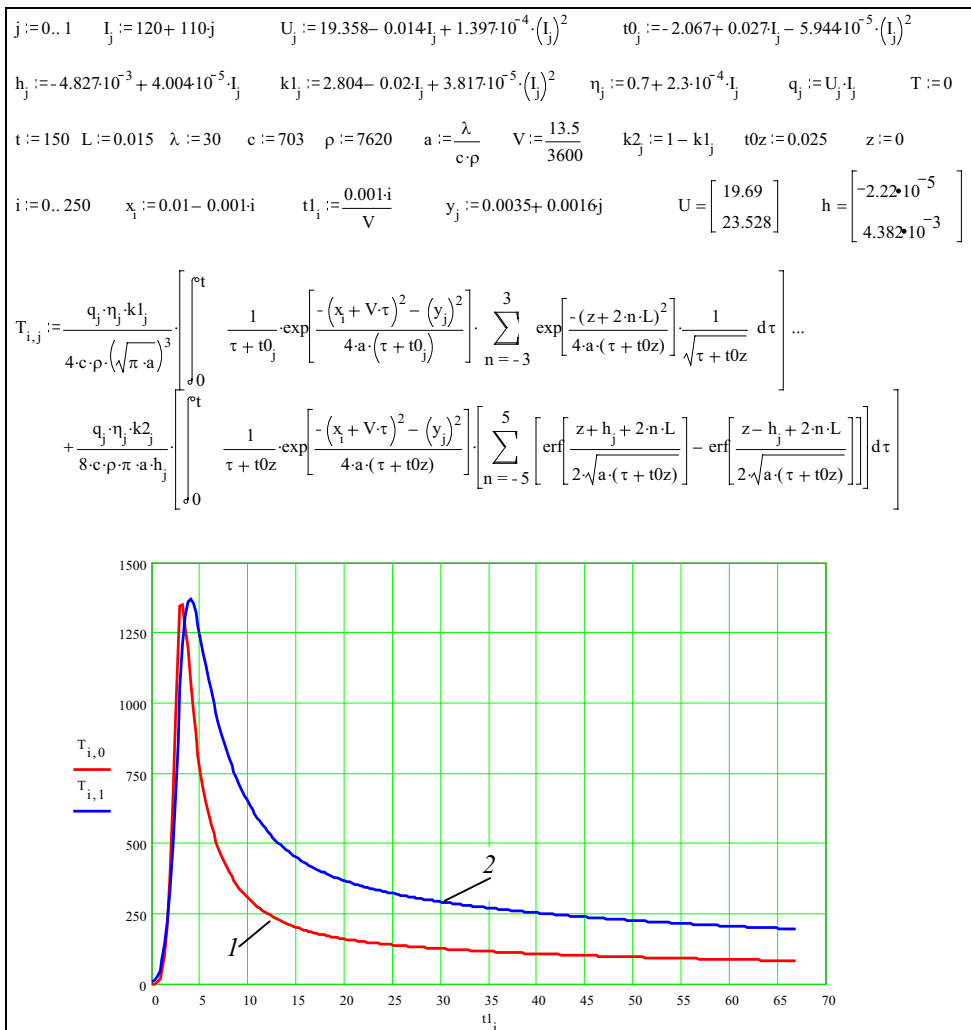


Рис. 6. Листинг термических циклов:
 1 – сварочный ток 120 А; 2 – сварочный ток 230 А

Анализ графиков показывает, что во время сварки при значении тока 230 А пребывание на уровне выше точки A_{c_3} увеличивается в два раза, в отличие от сварки при значении тока 120 А, при этом скорость охлаждения значительно снижается в интервале наименьшей устойчивости аустенита. По этим графикам можно определить и скорость охлаждения в любом интервале температур.

Практический интерес представляет определение мгновенной скорости охлаждения при заданной температуре. Для этого необходимо уравнение (1)

продифференцировать по x [5]. Ниже приведено уравнение для расчета мгновенной скорости охлаждения.

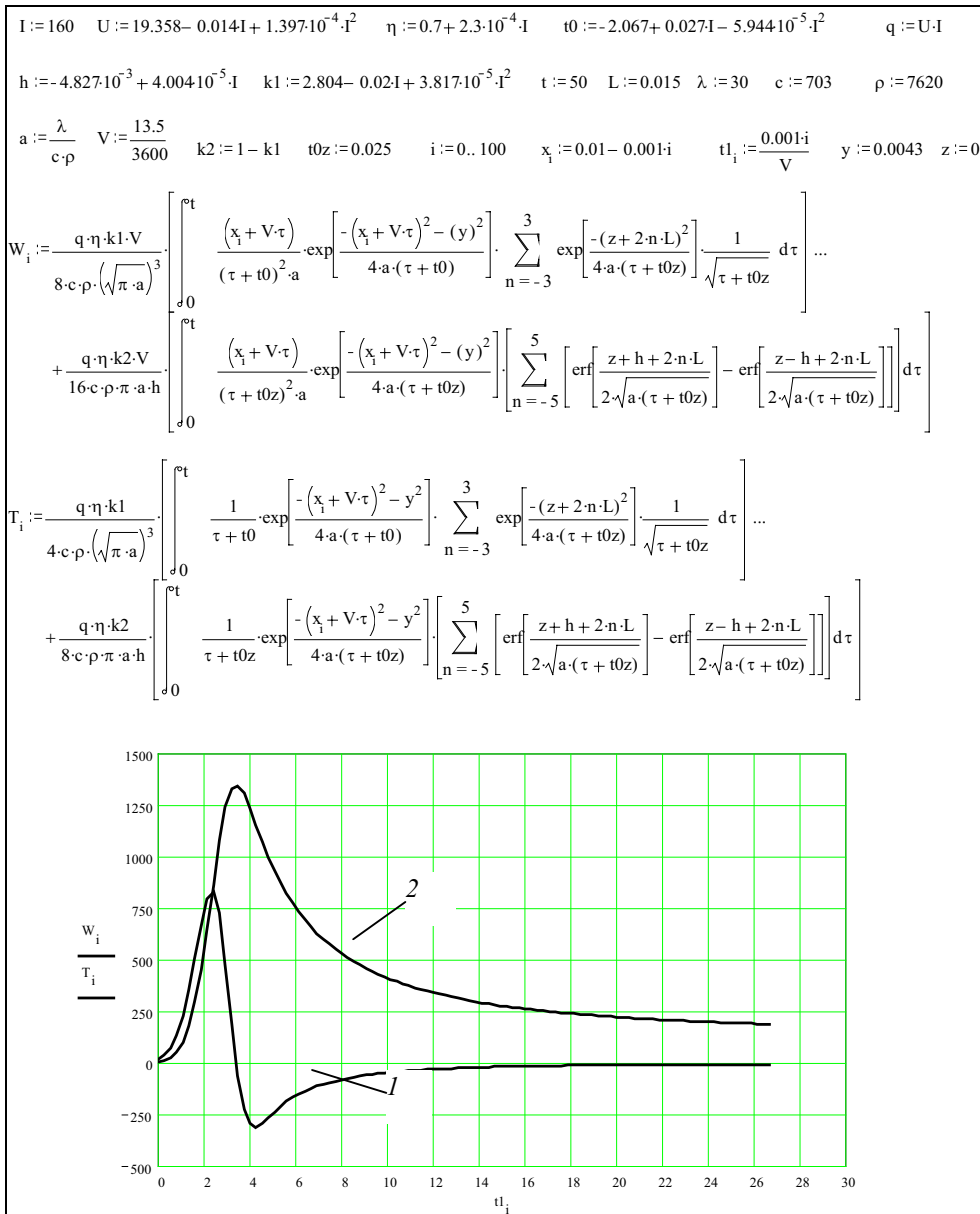


Рис. 7. Листинг решения и построения графиков термического цикла сварки (кривая 2) и мгновенной скорости охлаждения (кривая 1)

$$\begin{aligned}
W &= \frac{q\eta k_1 V}{8\epsilon\rho\sqrt{a\pi^3}} \int_0^t \frac{(x+V\tau)}{a(\tau+t_0)^2} \exp\left[-\frac{(x+V\tau)^2 - y^2}{4a(\tau+t_0)}\right] \frac{1}{\sqrt{\tau+t_{0z}}} \times \\
&\times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(z+2nL)^2}{4a(\tau+t_{0z})}\right] d\tau + \frac{q\eta k_2 V}{16\epsilon\rho\pi h} \int_0^t \frac{(x+V\tau)}{a(\tau+t_{0z})^2} \exp\left[-\frac{(x+V\tau)^2 + y^2}{4a(\tau+t_{0z})}\right] \times \\
&\times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{z+h+2nL}{2\sqrt{a(\tau+t_{0z})}}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{z-h+2nL}{2\sqrt{a(\tau+t_{0z})}}\right] \right\} d\tau.
\end{aligned}$$

На рис. 7 показаны построенные графики термического цикла и мгновенной скорости охлаждения. По этим графикам можно определить мгновенную скорость нагрева (со знаком плюс) и охлаждения (со знаком минус), так как каждой температуре T_i соответствует скорость нагрева (или охлаждения) W_i . По графикам трудно точно определить мгновенную скорость охлаждения, но в пакете Mathcad имеется программный блок, и с помощью специальной программы можно с высокой точностью определить мгновенную скорость охлаждения при заданной температуре. На рис. 8 показан пример составления такой программы.

$R(T, W, Tz, r) :=$	<pre> U ← 0 k ← 0 for i ∈ 15..100 i + 1 if T_i - Tz > r k ← i if T_i - Tz < r U ← W_i if T_i - Tz < r H ← T_k V₀ ← U V₁ ← H V₂ ← k V </pre>	$R(T, W, 550, 7) = \begin{bmatrix} -84.75 \\ 554.254 \\ 29 \end{bmatrix}$ $T_{29} = 554.254$ $W_{29} = -84.75$
---------------------	---	--

Рис. 8. Листинг расчета для определения мгновенной скорости охлаждения по ранее выполненным расчетам с использованием программного блока

Функция $R(T, W, Tz, r)$ в программном блоке формирует матрицу, состоящую из трех строчек: первая – скорость охлаждения; вторая – температура, при которой определена эта скорость; третья – номер цикла, соответствующего i -му значению температуры и скорости охлаждения.

На рис. 9 приведен пример расчета мгновенных скоростей охлаждения при разных температурах и построения графика зависимости скорости охлаждения от этих температур. Видно, что кривая зависимости носит практически линейный характер.

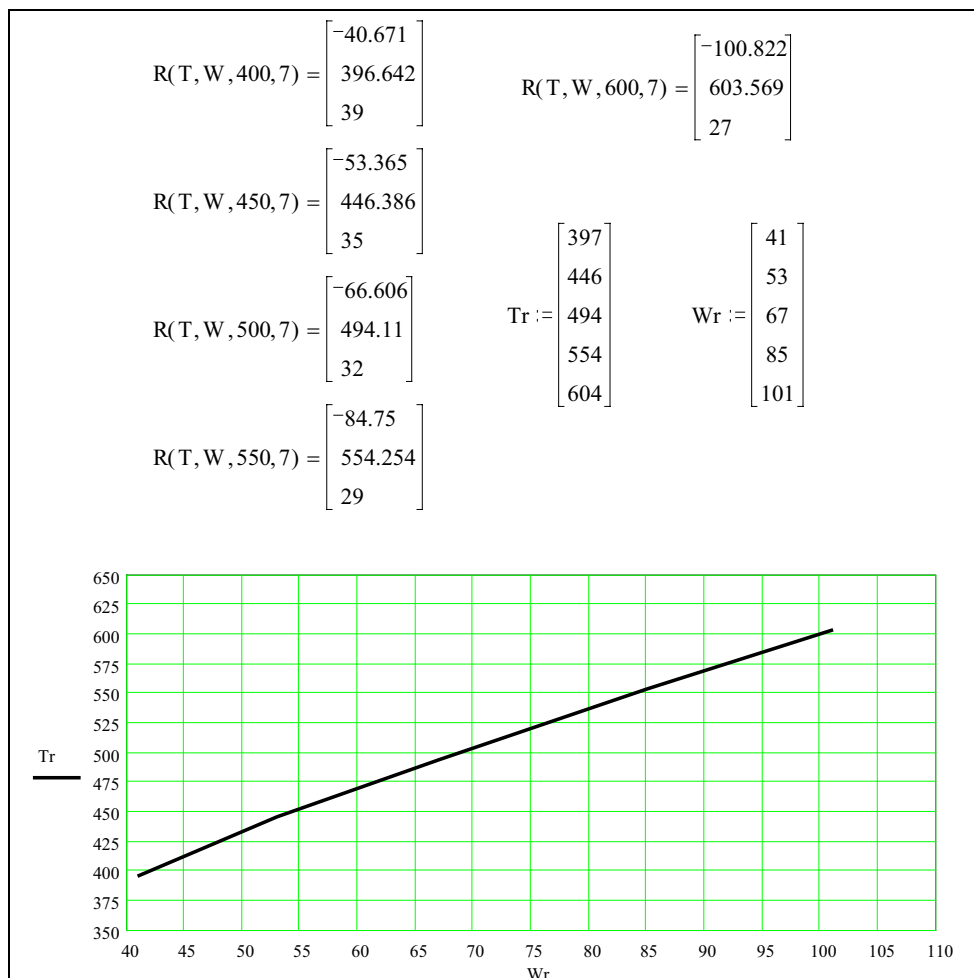


Рис. 9. Расчет мгновенных скоростей охлаждения и построение графика зависимости их от температуры при охлаждении высокотемпературного участка скорости охлаждения от температуры

Таким образом, в работе показано, что при определенной корректировке тепловую модель можно использовать для оценки параметров зоны проплавления при сварке, расчета термических циклов сварки, определения мгновенной скорости охлаждения в любой точке сварного соединения. Корректировка тепловой модели производится с помощью параметров t_0 , h , k_1 .

Для расчета этих параметров даны уравнения регрессии, построенные на основе экспериментальных данных.

Список литературы

1. Новожилов Н.М. Основы металлургии дуговой сварки в активных защитных газах. – М.: Машиностроение, 1972. – 167 с.
2. Потапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. – М.: Машиностроение, 1974. – 240 с.
3. Новожилов Н.М. Основы металлургии дуговой сварки в газах. – М.: Машиностроение, 1979. – 231 с.
4. Язовских В.М. Построение тепловых моделей при сварке методом функций Грина // Вестник ПГТУ. Сварка. – Пермь, 2002. – С. 25–48.
5. Язовских В.М. Методика расчета мгновенных скоростей охлаждения при сварке // Вестник ПГТУ. Механика и технология материалов и конструкций. – Пермь, 2003. – С. 172–176.

Получено 10.06.2010