

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ КОНТАКТА ПЛАСТИН ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Я.-Д. Цюй

Колледж гражданского машиностроения и архитектуры Ляонинского технологического университета
121001 Цзиньчжоу, Ляонин, Китай, plxfeng2009@sohu.com

Представлена термодинамически-связанная математическая модель распределения температуры поперек контактной поверхности, базирующаяся на характеристиках теплообмена в процессе сварки взрывом. Исследован процесс теплообмена при сварке взрывом двух железных пластин. Определено соотношение между максимально достигаемой температурой и пространственной координатой. Результаты расчета хорошо согласуются с реальным процессом сварки взрывом. Представленная модель может дать теоретический базис для расчета распределения температуры при сварке взрывом и в какой-то степени для оптимизации параметров этого процесса.

Ключевые слова: сварка взрывом, распределение температуры, контактная поверхность, теплопроводность.

ВВЕДЕНИЕ

Сварка взрывом — одно из наиболее широко и часто используемых приложений в области обработки металлов взрывом. Исследования распределения температуры и процесса теплопереноса через контактную поверхность сварки взрывом важны для обеспечения качества сварки, так как эти характеристики сильно влияют на микроструктуру шва, распределение напряжений и деформаций в нем и т. д. [1]. Установлено, что при сварке взрывом теплообмен представляет собой весьма сложный процесс. Температурные эффекты носят локальный характер, а процесс сварки — кратковременный [2]. Распределение температуры при сварке взрывом исследовалось в ряде работ. Так, например, в [3] представлена модель распределения температуры при сварке взрывом многослойного пакета аморфных металлических лент. В работе [4] на основе закона Фурье и законов сохранения построена модель распределения температуры при сварке пластин из одного и того же металла.

В данной работе представлена модель распределения температуры при сварке взрывом разнородных металлических пластин, но для демонстрации ее достоверности расчет теплообмена проведен для случая двух железных пластин. Рассмотрена связь между максимальной температурой и пространственной координатой.

Модель может дать теоретические основы для расчета распределения температуры и оптимизации параметров сварки взрывом.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Теплообмен при сварке взрывом — это типичный нестационарный процесс. В [5] на основе уравнения теплопроводности получено выражение для расчета распределения температуры от движущегося источника тепла:

$$\rho c \dot{T} + q_{i,i} = \dot{Q}_{int} - \frac{E \alpha T}{1 - 2\mu} \dot{\varepsilon}_{ii}^e + \xi S_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^n. \quad (1)$$

Здесь T — температура, ρ — плотность, c — теплоемкость, q_i — тепловой поток через единицу площади, \dot{Q}_{int} — внутреннее тепло, созданное в единице объема, ε_{ii}^e — тензор упругих деформаций, S_{ij} — девиатор тензора напряжений, $\dot{\varepsilon}_{ij}^n$ — скорость неупругих деформаций, E — модуль упругости, α — коэффициент теплового расширения, μ — коэффициент Пуассона, $\xi \in [0, 1]$ — доля неупругой энергии, перешедшая в тепло. Запятая в нижнем индексе обозначает частную производную по пространственной координате, точка сверху — дифференцирование по времени t . Повторяющиеся нижние индексы обозначают сумму от 1 до 3, т. е. $q_{i,i} = q_{1,1} + q_{2,2} + q_{3,3}$.

Анализ термодинамически сопряженных задач показал, что перекрестные эффекты слабо влияют на распределение температуры. Следовательно,

Yan-Dong Qu.

College of Civil Engineering & Architecture of Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China.

$$\rho c \dot{T} + q_{i,i} = \dot{Q}_{int}. \quad (2)$$

С учетом закон Фурье

$$q_i = -\lambda T_{,i}. \quad (3)$$

Подставляя уравнение (3) в (2), получаем уравнение теплопереноса от движущегося источника тепла:

$$(\lambda T_{,i})_{,i} + \dot{Q}_{int} = \rho c \dot{T}. \quad (4)$$

Для расчета процесса сварки взрывом можно полагать, что мгновенный источник тепла распределен вдоль оси y (перпендикулярно плоскости пластины), вдоль оси z (направление движения струи) диффузия тепла отсутствует. Ось x обозначает поверхность сварки (рис. 1). Поэтому уравнение (4) можно записать следующим образом:

$$k \frac{\partial^2 T(y, t)}{\partial y^2} = \frac{\partial T(y, t)}{\partial t}, \quad (5)$$

где $k = \lambda / \rho c$ (λ — теплопроводность).

В случае симметричного соударения пластин температуру верхней и нижней свободных поверхностей можно приближенно считать равной температуре окружающей среды T_0 , так как рост температуры здесь незначителен. Поэтому начальные и граничные условия могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} T(H_2, t) &= T_0, \\ T(-H_1, t) &= T_0, \\ T(y, 0) &= \varphi(y), \end{aligned} \quad (6)$$

где H_1, H_2 — толщины базовой и метаемой пластин соответственно, T_0 — начальная температура, $\varphi(y)$ — распределение температуры вдоль оси y при $t = 0$.

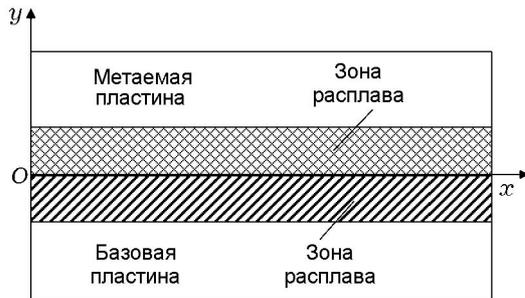


Рис. 1. Схема упрощенной модели для расчета распределения температуры на контактной границе при сварке взрывом

Решение уравнения (5) получим методом разделения переменных:

$$\begin{aligned} T(y, t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} e^{im(y-\xi)} e^{-km^2 t} dm d\xi = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(\xi) G(y, t, \xi) d\xi, \end{aligned} \quad (7)$$

где $G(y, t, \xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} e^{im(y-\xi)} e^{-km^2 t} dm = \frac{1}{2} (kt\pi)^{-1/2} e^{-\frac{(y-\xi)^2}{4kt}}$ — соответствующая функция Грина, физический смысл которой заключается в том, что мгновенный источник тепла существует в момент времени $t = 0$ в точке ξ . Тогда распределение температуры вдоль оси y в различные моменты времени можно получить согласно функции Грина $G(y, t, \xi)$. Диапазон значений ξ — это не $-\infty \leq \xi \leq +\infty$, а ограниченная область $-\delta_1 \leq \xi \leq \delta_2$.

Если принять, что Q — количество тепла в единице объема, то приближенно $\varphi(\xi) \approx \varphi(0) = Q / \rho c$, $\xi \approx 0$. Поэтому уравнение (7) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} T(y, t) \approx & \frac{Q}{\rho_1 c_1} \frac{\delta_1}{2\sqrt{k_1 \pi t}} e^{-\frac{y^2}{4k_1 t}} + \\ & + \frac{Q}{\rho_2 c_2} \frac{\delta_2}{2\sqrt{k_2 \pi t}} e^{-\frac{y^2}{4k_2 t}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где ρ_1, ρ_2 — плотности, c_1, c_2 — теплоемкости и δ_1, δ_2 — толщины расплавленного слоя базовой и метаемой пластин соответственно. Количество тепла в единице объема Q будем рассчитывать, исходя из T_{\max} :

$$Q = \rho c (T_{\max} - T_0). \quad (9)$$

При подстановке уравнения (9) в (8) получим

$$\begin{aligned} T(y, t) &= \frac{(T_{\max 1} - T_0) \delta_1}{2\sqrt{k_1 \pi t}} e^{-\frac{y^2}{4k_1 t}} + \\ &+ \frac{(T_{\max 2} - T_0) \delta_2}{2\sqrt{k_2 \pi t}} e^{-\frac{y^2}{4k_2 t}} + T_0, \end{aligned} \quad (10)$$

где $T_{\max 1}$ и $T_{\max 2}$ — максимальные достигаемые температуры расплавленного слоя базовой и метаемой пластин соответственно.

В случае, когда базовая и метаемая пластины выполнены из одного металла, уравнение (10) можно упростить:

$$T(y, t) = \frac{T_{\max} - T_0}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{k\pi t}} e^{-\frac{y^2}{4kt}} (\delta_1 + \delta_2) \right] + T_0. \quad (11)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из уравнения (11) находим, что максимальный прирост температуры $\Delta T = T(y, t) - T_0$ достигается в момент времени $t = t^* = y^2/2k$. Поэтому

$$\Delta T = \frac{(T_{\max} - T_0)(\delta_1 + \delta_2)}{\sqrt{2\pi}} \exp(-0.5) \frac{1}{|y|}. \quad (12)$$

Задав в уравнении (12) величины T_0 , T_{\max} и $\delta_1 + \delta_2$, получим соотношение между ΔT и y .

Для верификации представленной модели проведен расчет для случая сварки взрывом двух железных пластин. Параметры сварки взрывом и механические параметры железа представлены в таблице.

Известно, что температура плавления веществ при высоком давлении обычно выше, чем при низком, следовательно, если поверхность сварки взрывом достигла температуры плавления при высоком давлении, то больше возрасти она не может.

Согласно работе [6] зависимость температуры плавления железа от давления выражается следующим образом:

$$T_{\max} = 2494 + 10.02p + 0.00149p^2, \quad (13)$$

Параметры сварки взрывом и механические свойства железных пластин [6]

Параметр	Значение
ρ_0 , кг/м ³	7850
C_0 , км/с	3.955
λ , кал/(м·с·К)	1.58
γ_0	1.90
T_0 , К	298
c_V , Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹	452
$T_{\max,0}$, К	1809
$H_1 + H_2$, мм	20.0
B , рад	0.08727
$V_{f\infty}$, км/с	2.0

где T_{\max} — температура плавления железа, p — давление, ГПа. Давление при сварке взрывом обычно около 20 ГПа [7]. Рассчитанная при этом давлении по уравнению (13) температура плавления железа составляет $T_{\max} = 2695$ К. Полагая $\delta = \delta_1 + \delta_2 = 0.15$ мм, максимальную достигаемую температуру в зависимости от координаты — перпендикулярно плоскости пластины — можно получить из уравнения (12). Результаты расчета показаны на рис. 2.

Расчетное распределение температуры поперек поверхности сварки взрывом в различные моменты времени показано на рис. 3.

Из рис. 2 следует, что ближе к поверхности сварки взрывом температура растет быстрее. С ростом времени температура повышается на большем расстоянии от контактной поверхности, толщина расплавленной зоны на базовой пластине (или на метаемой) также увеличивается (см. рис. 3), в то время как скорость плавления в зоне сварки падает.

Температура плавления железа при нормальном давлении $T_{\max,0} = 1809$ К (см. таблицу). Соотношение между температурой плавления поверхности материала T_m и температурой плавления материала внутри (детали, объекта, изделия) $T_{\max,0}$ согласно [8] изменяется в диапазоне

$$0.75 < T_m/T_{\max,0} < 0.90.$$

Поэтому температура плавления поверхности железной пластины T_m больше 1357 К. Температура в зоне сварки достигает 1458 К (максимальный прирост температуры 1160 К + T_0) при толщине расплава 0.15 мм (см. рис. 2).

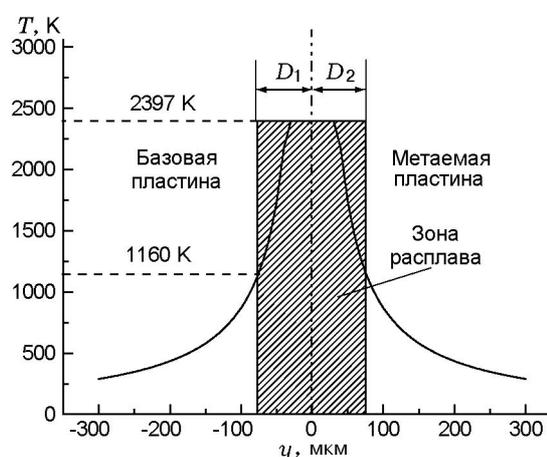


Рис. 2. Максимальные температуры на контактной границе

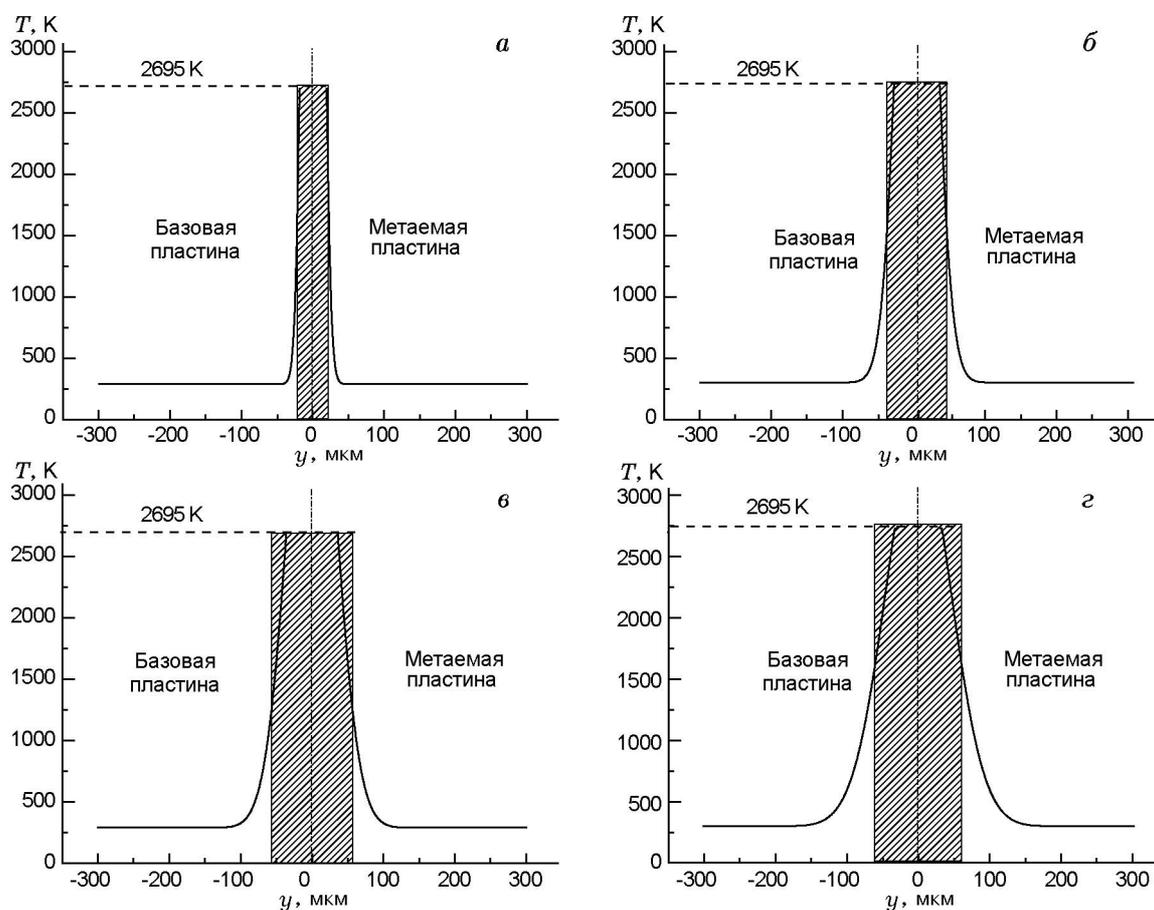


Рис. 3. Распределение температуры на контактной границе в моменты времени 0.1 (а), 0.5 (б), 1 (в), 2 мкс (г)

Видно, что результат расчета согласуется с предположением, что толщина расплавленной зоны 0.15 мм.

В проведенном расчете учитывалось влияние давления на температуру плавления железа. Другие факторы, такие как ударное сжатие, энергия деформирования, высокие локальные температуры, генерируемые в области контакта, влияние тепловых свойств (теплопроводность, коэффициенты теплопереноса) на изменение температуры, не принимались во внимание. И хотя это упрощает проблему, но расходится с реальным процессом сварки взрывом. Вопросы, отмеченные выше, требуют дальнейшего изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлена термодинамически-связанная математическая модель распределения температуры поперек контакт-

ной поверхности, базирующаяся на характеристиках теплообмена в процессе сварки взрывом. Исследован процесс теплообмена при сварке взрывом двух железных пластин. Рассмотрено соотношение между максимальной достигнутой температурой и пространственной координатой. Результаты расчета показали, что толщина расплавленной контактной зоны растет со временем, а скорость плавления падает. Этот вывод хорошо согласуется с реальным процессом сварки взрывом. Представленная модель может служить теоретическим базисом для расчета распределения температуры при сварке взрывом и в какой-то степени для оптимизации параметров этого процесса.

Работа поддержана докторским фондом научных исследований Ляонинского технологического университета Китая.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shao B. H., Zhang K. Theories of explosive

- welding and their engineering applications. — Dalian University of Technology Press, 1987. — P. 291–293.
2. **Yan H. H., Li X. J.** Theoretical explanation for amorphous phase emerging across the interface during explosive welding // *Rare Metal Mater. and Eng.* — 2003. — V. 23, N 3. — P. 176–178.
 3. **Янь Х.-Х., Цюй Я.-Д., Ли С.-Цз.** Сварка взрывом многослойного блока аморфных лент // *Физика горения и взрыва*. — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 130–136.
 4. **Yang Y., Li Z. H., Lv P. C., et al.** A temperature distribution model of explosive cladding interface and its application // *Rare Metal Mater. and Eng.* — 2000. — V. 29, N 3. — P. 161–163.
 5. **Sun M. R.** FE-analysis of temperature field in automatic butt-welding // *J. Anhui Industry College.* — 1994. — V. 13, N 3. — P. 11–16.
 6. **Li X. J., Gong Z. Z., Liu F. S., et al.** A problem in measurements of high pressure melting curve of iron: influence of melting of mechanism on the melting temperature // *Chin. J. of High Pressure Phys.* — 2001. — V. 15, N 3. — P. 221–225.
 7. **Yan H. H.** Research of explosive welding for amorphous alloys ribbons. — Dalian University of Technology, 2003. — P. 131.
 8. **Lowen H.** Melting, freezing and colloidal suspension // *Phys. Rep.* — 1994. — V. 237, N 5. — P. 237–249.

*Поступила в редакцию 3/XII 2009 г.,
в окончательном варианте — 15/V 2010 г.*
