

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ С ПРОДОЛЬНОЙ ОСЦИЛЛЯЦИЕЙ ЛУЧА

Исследование посвящено изучению процесса электронно-лучевой сварки с глубоким проплавлением с применением осцилляции пучка. Рассматривается влияние продольной осцилляции на форму канала проплавления, протекание процессов теплопереноса и параметры швов, для разработки методических рекомендаций. Представлена численная трёхмерная математическая модель электронно-лучевой сварки на основе уравнений теплопроводности и Навье-Стокса, с учётом фазовых переходов на границе раздела твёрдой жидкой фазы и термокапиллярной конвекции (эффект Марангони). Форма канала проплавления определяется на основе экспериментальных данных по параметрам вторичного сигнала, с помощью метода синхронного накопления. Расчёты тепловых и гидродинамических процессов производились на кластере с использованием пакета моделирования COMSOL Multiphysics.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, осцилляция пучка, математическая модель, метод синхронного накопления.

В настоящее время широко известны успехи, достигнутые в области численного моделирования электронно-лучевой и лазерной сварки [1; 2; 3]. Однако все результаты связаны с моделированием сварки статическим пучком. Законченные динамические модели сварки с осцилляциями пучка отсутствуют до сих пор. Комплексный характер, высокая скорость протекания процессов, высокие значения градиентов температур и многофакторность процессов делают непосредственное численное моделирование в условиях периодических воздействий крайне затруднительным даже с использованием современных вычислительных ресурсов [1]. Основная трудность при моделировании – определение формы канала проплавления.

Для решения этой проблемы, ранее была предложена методика экспериментального определения формы канала проплавления при электронно-лучевой сварке с осцилляцией пучка по параметрам вторичного сигнала [4]. Кроме формы канала проплавления, указанная методика дает дополнительную информацию о процессах в канале проплавления. В частности, данная методика позволяет определить распределение энергии пучка по стенкам канала проплавления [5]. Такой подход избавляет от необходимости учета всех сложных факторов, оказывающих воздействие на формирование канала проплавления.

Целью данного исследования является использование данных параметров в качестве входных для проведения математических расчётов, определение влияния различных осцилляций пучка и их параметров на форму канала проплавления, протекания процессов тепломассопереноса и параметры швов, для разработки методических рекомендаций.

Расчёты тепловых и гидродинамических процессов производились на кластере с использованием пакета моделирования COMSOL Multiphysics. В результате расчётов была получена геометрия сварного шва, поля температур и скоростей течения расплава.

Математическая модель

На рис. 1 показана схема модели. Параметры процесса и физические параметры стали представлены в табл. 1 и 2, соответственно. Следующие упрощения были сделаны при моделировании процесса сварки:

- ламинарное течение расплава;
- нормальное распределение энергии в пучке;
- линейный, вдоль оси X, источник тепла;
- моделирование фазового перехода с помощью скачка вязкости и введения скрытой теплоты фазового перехода;

– форма и размер канала проплавления были определены из экспериментальных данных. Канал аппроксимировали усечённым конусом со сферической вершиной.

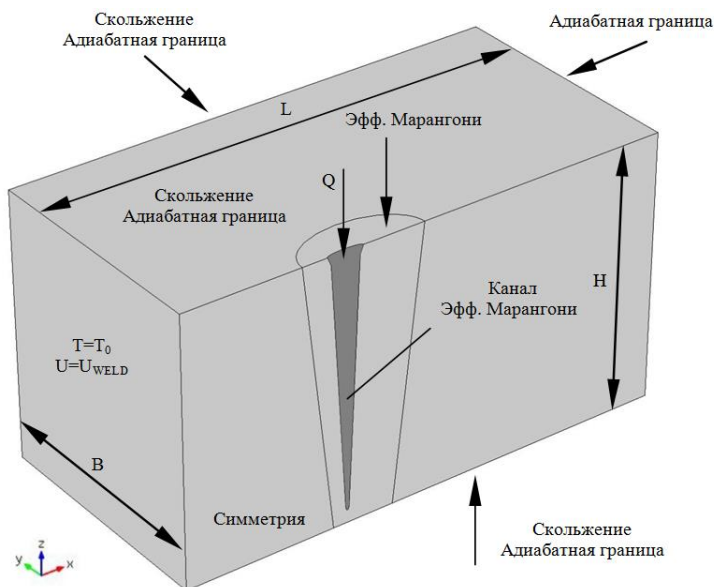


Рис. 1. Геометрия модели, начальные и граничные условия

Таблица 1

Параметры процесса

Тип осцилляции	Параметры пучка		Параметры осцилляции		Скорость сварки U_{WELD} , мм/с
	Мощность Q , кВт	Min радиус, мм	Амплитуда, мм	Частота, Гц	
Продольная	3	0,25	0,75	645	5

Реконструкция формы канала

Форма канала проплавления определяется методом синхронного накопления. Для дальнейших расчётов использовались данные по реконструкции формы канала проплавления при ЭЛС с колебаниями вдоль стыка [3; 4]. Они представлены на рис. 2.

Основные уравнения

Сохранение массы:

$$\rho \cdot \nabla u = 0, \quad (1)$$

Таблица 2

Физические характеристики стали 15X5M

Характеристика	Обозначение	Величина
Начальная температура	$T_0, \text{ К}$	293,15
Ликвидус	$T_L, \text{ К}$	1730
Солидус	$T_S, \text{ К}$	1700
Скрытая теплота плавления	$L_f, \text{ Дж} \cdot \text{ кг}^{-1}$	700
Динамическая вязкость	$\mu, \text{ Па} \cdot \text{ с}$	0,007
Плотность	$\rho, \text{ кг} \cdot \text{ м}^{-3}$	7750
Удельная теплоёмкость	$c, \text{ Дж} \cdot \text{ кг}^{-1} \cdot \text{ К}^{-1}$	483
Теплопроводность	$\lambda, \text{ Вт} \cdot \text{ м}^{-1} \cdot \text{ К}^{-1}$	37

Уравнение Навье-Стокса для несжимаемой жидкости:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + F, \quad (2)$$

Слагаемое силы:

$$F = \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) - C \left(\frac{1 - f_L}{f_L^3 + B} \right) u + \rho g \alpha (T - T_{ref}) + \rho U \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (3)$$

Жидкая составляющая:

$$f_L = \begin{cases} 1 & T > T_L \\ (T - T_S) / (T_L - T_S) & T_S \leq T \leq T_L \\ 0 & T < T_S \end{cases}, \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение переноса энергии:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + U \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{q}{c\rho}, \quad (5)$$

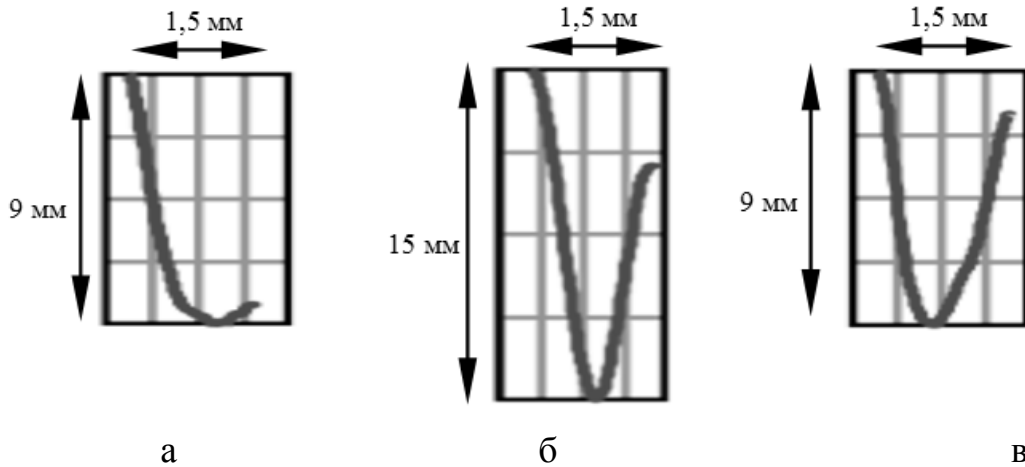


Рис. 2. Результаты реконструкции канала проплавления (продольная проекция) по параметрам вторичного сигнала при электронно-лучевой сварке с осцилляцией вдоль стыка для различных режимов фокусировки: а – перефокусированный; б – острый фокус; в – недофокусированный

Эффект Марангони представлен в модели в качестве граничного условия на верхней поверхности сварочной ванны и на стенках канала проплавления. Для этих поверхностей в проекциях на оси X, Y и Z можно записать:

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} = f_L \frac{d\gamma}{dT} \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \mu \frac{\partial u}{\partial z} = f_L \frac{d\gamma}{dT} \frac{\partial T}{\partial y}; \quad \mu \frac{\partial u}{\partial z} = f_L \frac{d\gamma}{dT} \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (6)$$

Результаты

На рис. 3 представлены экспериментальные и расчётные сечения сварных швов при сварке с продольной осцилляцией для различных режимов фокусировки.

Экспериментальные и расчётные данные для острого фокуса и перефокусированного режима хорошо согласуются. Различия между расчётами и экспериментом для перефокусированного режима вызваны ошибками при определении глубины канала проплавления.

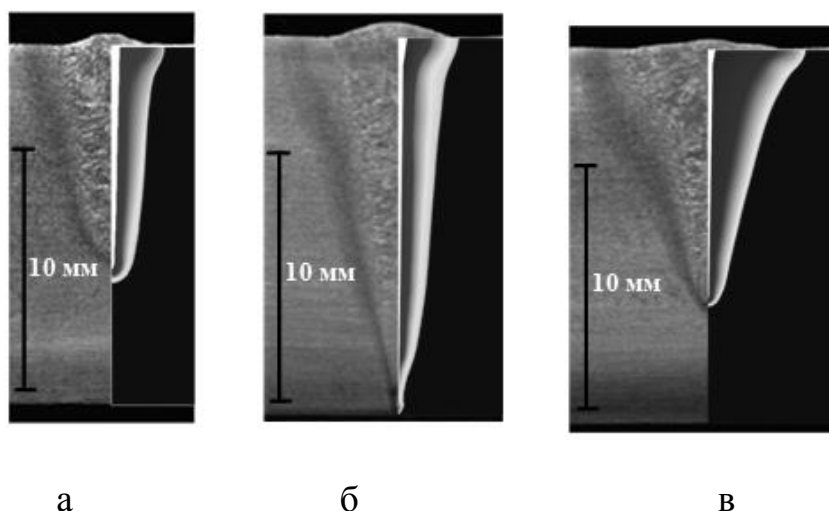


Рис. 3. Экспериментальные и рассчитанные поперечные сечения сварных швов для различных режимов фокусировки: а – перефокусированный; б – острый фокус; в – недофокусированный

Выводы

Можно проанализировать влияние параметров осцилляций через изучение влияния геометрии канала на тепломассоперенос в жидкой ванне.

Методика, предложенная в [4; 5], может быть использована для определения геометрии канала проплавления.

Работа выполнялась при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ №13-08-00397, 14-08-96008 и при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания (проект № 01201460538).

Литература

1. Heat transfer and fluid flow during electron beam welding of 304L stainless steel alloy / R. Rai, T. A. Palmer, J. W. Elmer, T. Debroy // *Welding Journal*. March, 2009. P. 54–61.
2. Sudniky W, Radajz D and Erofeew W. Computerized simulation of laser beam welding, modelling and verification // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1996. 29. P. 2811–2817.

3. Cho W. I., Na S. J., Thomy C. F. Vollertsen Numerical simulation of molten pool dynamics in high power disk laser welding // Journal of Materials Processing Technology. 2012. 212. P. 262–275.

4. Plasma charge current for control and monitoring at electron beam welding with the beam oscillation / D. Trushnikov, V. Belenkiy, V. Schavlev, A. Piskunov, A. Abdulin and G. Mladenov // Sensors. 2012. 12 (12). P. 17433–17445.

5. Trushnikov D. N., Belen'kii V. Ya. Investigation of the formation of the secondary current signal in plasma in electron beam welding with oscillations of the electron beam // Welding International. V. 27. Issue 11. 2013. P. 877–880.