

ФИЗИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

Шнягин В.А. Email: Shnyagin628@scientifictext.ru

Шнягин Виталий Алексеевич – магистрант,
кафедра технологии машиностроения,
Московский государственный технологический университет «Станкин», г. Москва

Аннотация: целью данной работы является разработка физической и математической моделей процесса электронно-лучевой сварки тонкостенных герметичных оболочек, как одного из условий сохранности критически важной технологии и её дальнейшей адаптации к современному программно-управляемому оборудованию. В процессе работы проводились экспериментальные исследования электронно-лучевой сварки гермооболочек из материалов VT-20, 12X18N10T и Д20. В результате исследования были получены зависимости глубины проплавления от основных режимов сварки.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, физическая и математическая модели, гермооболочки, электроны, энергия, теплопроводность.

PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELS OF THE ELECTRON-BEAM WELDING PROCESS

Shnyagin V.A.

Shnyagin Vitaly Alexeyevich – undergraduate,
DEPARTMENT OF ENGINEERING TECHNOLOGY,
STANKIN MOSCOW STATE TECHNOLOGICAL UNIVERSITY, MOSCOW

Abstract: the purpose of this work is the development of physical and mathematical models of the process of electron beam welding of thin-walled hermetic shells as one of the conditions for the preservation of a critically important technology and its further adaptation to modern software-controlled equipment. In the course of the work, experimental investigations of electron beam welding of hermetic shells from materials VT-20, 12X18N10T and D20 were carried out. As a result of the study, the depths of penetration from the main welding regimes were obtained.

Keywords: electron-beam welding, physical and mathematical models, hermetic shells, electrons, energy, thermal conductivity.

УДК 621.791.72

Согласно [1] расчет максимальной глубины, на которой электроны полностью теряют свою энергию, можно провести по формуле:

$$\delta = 2,35 \cdot 10^{-12} \cdot U^2 / \rho, \quad (1)$$

где δ - глубина проникновения, см; U - ускоряющее напряжение, В; ρ - плотность обрабатываемого материала, г/см³.

Например, при ускоряющем напряжении 60кВ, для большинства конструкционных сталей максимальная глубина δ не будет оставаться в пределах 10-15 мкм. А значит, превращение энергии электронного луча в тепловую энергию произойдет в поверхностном слое материала. Из данных [2] следует, что воздействие электронного луча на поверхность обрабатываемого материала сопровождается рядом явлений, оказывающих значительное влияние на технологический процесс сварки. Так тепловое и рентгеновское излучения, а также отражённые вторичные и тепловые электроны снижают коэффициент полезного действия энергии электронного луча используемой для нагрева и плавления обрабатываемого металла.

Кроме того в [3] было установлено, что при сварке образуется парогазовый канал. Происходит интенсивное испарение материала. Давление отдачи паров, покидающих зону плавления, прогибает поверхность сварочной ванны и в расплаве формируется глубокий и узкий канал проплавления, жидкие стенки которого удерживаются давлением паров. Поэтому модели, построенные без учёта этих сложных явлений, могут использоваться только для предварительной оценки.

Модели, основанные на результатах статистической обработки данных, полученных при сварке деталей, пока имеют большее практическое применение. Но их применение ограничено набором материалов, размерами конструкций, геометрией стыка, диапазоном основных режимов сварки. В настоящей работе использовались численная и регрессионная модели. С помощью регрессионной модели определена функциональная зависимость глубины проплавления от тока сварки и тока фокусировки, а численная модель позволяет фундаментально проанализировать процессы протекающие при электро-лучевой сварке.

Перед началом моделирования заметим, что свариваемые гермооболочки представляют собой тонкостенные сферы, составленных из двух половин, соответственно сварной шов имеет форму кольца.

При численном моделировании электронно-лучевой сварки определяющим является процесс теплопроводности с учётом фазового перехода и других сопутствующих процессов. Ниже представлена физико-математическая модель переноса тепла, составленная по данным [4]. Уравнение теплопроводности в неподвижной среде представляет собой закон баланса удельной внутренней энергии

$$\text{в элементарном объёме: } \frac{\partial \rho E}{\partial t} = -\text{div}(\mathbf{q}) + \rho Q_T \quad (2)$$

где ρ — плотность, E — внутренняя удельная энергия вещества, \vec{q} — тепловой поток, Q_T — мощность внутренних источников теплоты.

Основное положение теории теплопроводности, известное как закон Фурье, состоит в предположении пропорциональности теплового потока градиенту температуры в однородной неподвижной среде:

$$\vec{q} = -\chi \text{grad } T, \quad (3)$$

где T — температура, а χ — коэффициент теплопроводности вещества.

Для однозначного определения температуры ставятся начальные и граничные условия. В начальный момент времени задается распределение температуры в области:

$$T(\vec{R}, 0) = T_0(\vec{R}), \quad \vec{R} \in \Omega. \quad (4)$$

На внешней поверхности кольца задаётся граничное условие излучения в открытое пространство:

$$-\left(\chi \frac{\partial T}{\partial n}\right) = \sigma(T^4 - T_\Sigma^4(\vec{R}, t)), \quad (\vec{R}, t) \in \Sigma, \quad (5)$$

где T_Σ — температура окружающей среды.

Воздействие потока электронов на материал кольца инициирует выделение тепла. Для его моделирования используется объёмный источник энерговыведения, заданный в форме конуса. Для решения задачи теплопроводности применяется комплекс программ ЛОГОС.

Ниже на рис.1 представлены общий вид свариваемых поверхностей и разностная сетка расчета, а на рис. 2 - поле температур на некоторые выбранные моменты времени.

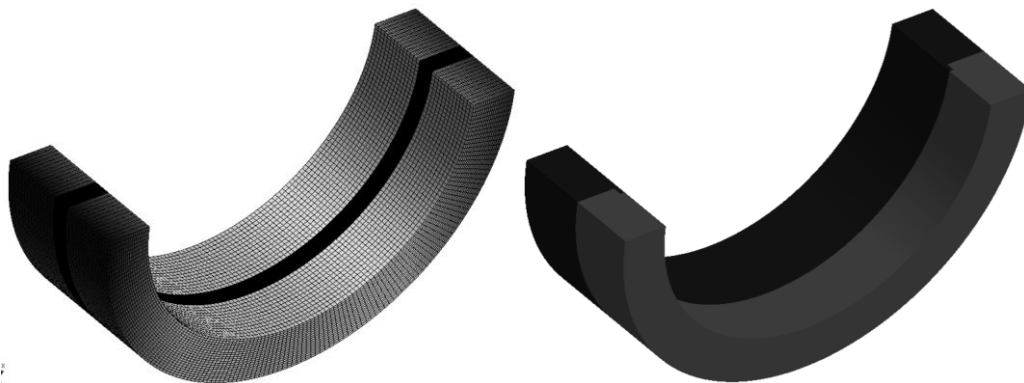


Рис. 1. Общий вид свариваемых поверхностей и разностная сетка расчета



Рис. 2. Поле температур в различные моменты времени

Для определения функциональной зависимости основных режимов сварки, от требуемой конструкторской документацией (КД) глубины проплавления (H) использовалась модель, основанная на результатах статистической обработки данных. При этом рассматривалось два случая:

1. Зависимость глубины проплавления одновременно от тока сварки ($I_{св.}$) и тока фокусировки ($I_{ф.}$);
2. Зависимость глубины проплавления (H) от тока сварки ($I_{св.}$) при заданном токе фокусировки.

Для определения основного режима сварки – тока сварки на практике в большинстве случаев достаточно использовать вторую зависимость (так как ток фокусировки определяет фокусное расстояние и задаётся габаритами свариваемой конструкции). Однако и первая зависимость может быть полезна, например, для уточнения режимов при сварке однотипных деталей. Коэффициенты регрессии определены в результате обработки экспериментальных данных (см. таблицу 1).

Таблица 1. Экспериментальные режимы сварки

BT-20			Д20			12X18H10T		
Н, мм	$I_{св.}$, мА	$I_{ф.}$, мА	Н, мм	$I_{св.}$, мА	$I_{ф.}$, мА	Н, мм	$I_{св.}$, мА	$I_{ф.}$, мА
0,7...0,9	7	580	0,6...0,9	5	615	0,3...0,6	5	625
1,1...1,3	8	590	1,0...1,2	8	610	0,6...0,8	7	615
1,3...1,4	9,5	585	1,2...1,5	11	600	1,0...1,2	9	620
1,4...1,5	10	560	1,6...1,8	14	600	1,2...1,4	10	595
1,5...1,6	11	595	2,0...2,2	15	605	1,6...1,8	11,5	585
1,7...1,8	12,5	610	2,2...2,5	18	595	2,0...2,4	12	610
1,8...2,4	13	600	2,5...2,6	20	585	2,6...2,9	14	610
2,5...2,8	15	585	2,7...2,9	22	570	6,3...7,0	30	600

Замечание: Н – глубина провара; $I_{св.}$ – ток сварки; $I_{ф.}$ – ток фокусировки.

Список литературы / References

1. Щербаков А.В. Разработка концепции построения систем управления и электрооборудования установок для прецизионной электронно-лучевой сварки. Дисс. ... д-ра техн. наук. Москва, 2012. 33 с.
2. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978. 235 с.
3. Кайдалов А.А. Электронно-лучевая сварка и смежные процессы. Киев: Инкорс, 1998. 150 с.

4. Судник В.А, Ерофеев В.А, Рихтер К.Г. Численная модель электронно-лучевой сварки с экспериментальной проверкой // Известия тульского государственного университета. 2008. № 2. С. 233-237.