

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.3.04

УДК 621.7

Т.В. Ольшанская¹, Е.М. Федосеева¹, Е.Г. Колева²¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия² Химико-технологический и металлургический университет, София, Болгария

ПОСТРОЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ МЕТОДОМ ФУНКЦИЙ ГРИНА

Развитие новых систем управления электронным лучом и программирование режимов сварки позволило значительно расширить возможности совершенствования технологических приемов электронно-лучевой сварки, обеспечивающих почти неограниченное разнообразие режимов воздействия луча на поверхность обрабатываемой детали. Как следствие, возникает необходимость в разработке обобщенного системного подхода для решения тепловых задач при электронно-лучевой сварке. Представленное в работе дифференциальное уравнение теплопроводности является математической моделью целого класса явлений теплопроводности и имеет бесконечное множество решений. Для получения из множества решений одного частного, характеризующего конкретный процесс, необходимы дополнительные данные – условия однозначности, содержащие геометрию тела, граничные и начальные условия. Смоделированы тепловые процессы при электронно-лучевой сварке и получено выражение, которое является исходным для построения тепловых моделей, учитывающих различные виды динамического позиционирования электронного луча.

Представлена возможность применения метода функций Грина как одного из универсальных способов построения тепловых моделей при электронно-лучевой сварке с различным динамическим позиционированием луча.

На основе приведенного анализа физических процессов, происходящих при электронно-лучевой сварке, сделано заключение, что образование глубокого проплавления представляет собой ряд элементарных циклов, каждый из которых включает испарение слоя металла и последующее экранирование электронного луча.

Установлено, что при решении тепловой задачи форма источника тепла должна имитировать «экранированное» состояние парогазового канала, что позволит при расчетах более точно передать «кинжальную» форму проплавления.

По предложенной модели произведен расчет геометрии сварного шва в поперечном сечении для стали 38Х2НМЮА. Расчет показал, что предложенная модель источника тепла для электронно-лучевой сварки статическим лучом и полученное на ее основе решение тепловой задачи позволяют наиболее точно описывать геометрию сварного шва.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, тепловые задачи, форма сварного шва, тепловые процессы, осцилляция луча, физические процессы, канал проплавления, сварочная ванна, сварной шов, статический луч.

T.V. Olshanskaya¹, E.M. Fedoseeva¹, E.G. Koleva²

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² University of Chemical Technology and Metallurgy, Sofia, Bulgaria

CREATION OF THERMAL MODELS AT ELECTRON BEAM WELDING BY METHOD OF FUNCTIONS OF GREEN

Development of new control systems of an electronic beam and programming of the modes of welding has allowed to expand considerably possibilities of improvement of the processing methods of electron beam welding providing almost unlimited variety of the modes of impact of a beam on a surface of the processed detail. On the basis of it, there is a need for development of the generalized system approach for the solution of thermal tasks at electron beam welding. The differential equation of heat conductivity presented in work, is mathematical model of the whole class of the phenomena of heat conductivity and has an infinite set of decisions. For receiving from a set of decisions of one private, characterizing concrete process, the additional data of a condition of unambiguity containing body geometry, boundary and entry conditions are necessary. Thermal processes at electron beam welding are simulated and expression which is initial for creation of the thermal models considering different types of dynamic positioning of an electronic beam is received.

The possibility of application of a method of functions of Green as one of universal ways of creation of thermal models at electron beam welding with various dynamic positioning of a beam is presented.

On the basis of the provided analysis of the physical processes happening at electron beam welding the conclusion is made that formation of deep pro-melting represents a number of elementary cycles, each of which includes evaporation of a layer of metal and the subsequent shielding of an electronic beam.

It is established that at the solution of a thermal task the form of a source of heat has to imitate a "screened" condition of the steam-gas channel that will allow to transfer more precisely when calculating a "dagger" form of pro-melting

On the offered model calculation of geometry of a welded seam in cross section for steel 38H2NMYuA is made. Calculation has shown that the offered heat source model for electron beam welding by a static beam and the solution of a thermal task received on its basis, allow to describe geometry of a welded seam most precisely.

Keywords: electron beam welding, thermal tasks, form of a welded seam, thermal processes, beam oscillation, physical processes, channel of pro-melting, welding bathtub, welded seam, static beam.

Моделирование тепловых процессов позволяет решать практические вопросы, возникающие при разработке различных технологических процессов сварки. Большое значение имеет возможность прогнозирования таких важных параметров, как распределение температурных полей в свариваемом изделии, формы и размеры сварного шва и зоны термического влияния, температурно-временные параметры процесса сварки для различных участков сварного соединения, скорости нагрева и охлаждения и т.д.

Тепловые процессы при сварке чаще всего описываются с помощью дифференциального уравнения теплопроводности в подвижной системе координат с неподвижным источником теплоты:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + V \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{c\rho} F(x, y, x, \tau), \quad (1)$$

где $F(x, y, x, \tau)$ – функция источника теплоты.

Одним из методов решения задач теплопроводности является метод функций Грина (метод источников). Данный метод позволяет получать аналитические решения в зависимости от различных краевых задач и характера сварочного источника энергии, рассматривать закономерности изменения температурного поля в материале практически при любой продолжительности воздействия источника теплоты, свести многообразие способов нагрева материалов к некоторым схемам, охватывающим основные особенности процессов нагрева [1, 2].

Учитывая, что в последние годы, с развитием новых систем управления электронным лучом и программирования режимов сварки, значительно расширились возможности совершенствования технологических приемов электронно-лучевой сварки, обеспечивающих почти неограниченное разнообразие режимов воздействия луча на поверхность обрабатываемой детали (осцилляция луча, многофокусная и многолучевая сварка, комбинированные способы сварки и др.) [3], возникает необходимость в разработке обобщенного системного подхода для решения тепловых задач при электронно-лучевой сварке. В этом случае аналитический метод с помощью функций Грина является наиболее подходящим и универсальным.

Дифференциальное уравнение теплопроводности (1) является математической моделью целого класса явлений теплопроводности и имеет бесконечное множество решений. Чтобы получить из этого множества одно частное решение, характеризующее конкретный процесс, необходимо иметь дополнительные данные – условия однозначности, содержащие геометрию тела, граничные и начальные условия. Для моделирования тепловых процессов при электронно-лучевой сварке примем следующие условия однозначности:

– геометрия свариваемого тела – бесконечная пластина толщиной δ :

$$-\infty < x < \infty, \quad -\infty < y < \infty, \quad 0 < z < \delta;$$

– граничные условия смешанного типа: по осям x и y граничные условия первого рода равны 0, по оси z граничные условия второго рода равны 0:

$$\frac{\partial T}{\partial z}(x, y, 0, t) = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z}(x, y, \delta, t) = 0;$$

– начальные условия $T(x, y, z, 0) = 0$.

Интегральное решение задачи теплопроводности (1) методом источников представляет собой совокупность стандартизованной функции Грина для конкретных геометрических и граничных условий и функции источника тепла:

$$T(x, y, z, \tau) = \iiint \int G(x, y, z, x', y', z', \tau) \exp\left(-\frac{V(x-x')}{4a} - \frac{V^2\tau}{2a}\right) \times \\ \times F(x, y, z, \tau) dx' dy' dz' d\tau, \quad (2)$$

где $G(x, y, z, x', y', z', \tau)$ – стандартизованная функция Грина; $F(x, y, z, \tau)$ – математическое описание функции источника тепла с помощью дельта-функции Дирака; x', y', z' – координаты источника тепла.

Решение конкретной тепловой задачи сводится к нахождению стандартизованной функции Грина с учетом граничных условий и определению математического описания функции для заданного источника тепла. Известно, что функция Грина допускает неполное разделение переменных (она разделяется по пространственным переменным x, y, z , но не разделяется по времени τ), т.е. может быть представлена в виде произведения одномерных функций Грина, выбираемых исходя из краевых условий:

$$G(x, y, z, x', y', z', \tau) = G_x(x, x', \tau) G_y(y, y', \tau) G_z(z, z', \tau). \quad (3)$$

Одномерные функции Грина подбираются исходя из решения более простых одномерных задач с однородными граничными условиями. Для заданных краевых условий стандартизованные одномерные функции будут иметь вид

$$G_x(x, x', \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a \tau}} \exp\left(-\frac{(x-x'+V\tau)^2}{4a\tau}\right), \quad (4)$$

$$G_y(y, y', \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a \tau}} \exp\left(-\frac{(y-y')^2}{4a\tau}\right), \quad (5)$$

$$G_z(z, z', \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a \tau}} \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\exp\left(-\frac{(z - z' + 2n\delta)^2}{4a\tau}\right) + \exp\left(-\frac{(z + z' + 2n\delta)^2}{4a\tau}\right) \right). \quad (6)$$

Таким образом, в общем виде интегральное решение задачи теплопроводности в подвижной системе координат (2) для бесконечной пластины будет следующим:

$$T(x, y, z, \tau) = \iiint \frac{1}{8(\sqrt{\pi a \tau})^3} \exp\left(-\frac{(x - x' + V\tau)^2}{4a\tau}\right) \exp\left(-\frac{(y - y')^2}{4a\tau}\right) \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\exp\left(-\frac{(z - z' + 2n\delta)^2}{4a\tau}\right) + \exp\left(-\frac{(z + z' + 2n\delta)^2}{4a\tau}\right) \right) \times F(x, y, z, \tau) dx' dy' dz' d\tau. \quad (7)$$

Полученное выражение (7) является исходным для построения тепловых моделей, учитывающих различные виды динамического позиционирования электронного луча. Задачей построения решения тепловых задач становится определение вида источника тепла для каждого конкретного случая и его математического выражения $F(x, y, z, \tau)$.

В работах Н.Н. Рыкалина предложено распределение температур при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением рассматривать как результат действия двух источников тепла: точечного на поверхности и линейного, ограниченного по глубине величиной пластины [1, 4]. При тепловой мощности луча Q мощность точечного источника принимается $q_1 = kQ$, линейного $q_2 = (1 - k)Q$, где k – коэффициент распределение энергии. Решение тепловой задачи аналитическим методом для электронно-лучевой сварки с применением комбинированного источника тепла нашло продолжение в работе [2]. Предложенная тепловая модель для бесконечной пластины строится методом функций Грина, источник тепла является нормально распределенным по поверхности и линейным по глубине (рис. 1).

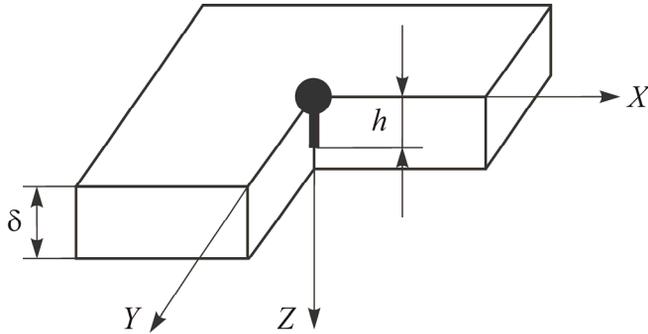


Рис. 1. Схема источника тепла при электронно-лучевой сварке [2]

Математическое описание функции источника тепла в данном случае имеет следующий вид:

$$F(x, y, z) = \frac{q\eta}{c\rho} \left(k_1 \delta(x') \delta(y') \delta(z') E(\tau) + \frac{k_2}{h} \delta(x') \delta(y') \delta(z') E(\tau) \right), \quad (8)$$

$$E(z') = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq z' \leq h, \\ 0 & \text{при } h < z' < 0, \end{cases} \quad E(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } t_0 \leq \tau \leq t, \\ 0 & \text{при } \tau > t, \end{cases} \quad t_0 = \frac{1}{4aK}, \quad K = \frac{12}{d^2},$$

где q – мощность электронного луча; η – коэффициент полезного действия; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность металла; k_1 и k_2 – коэффициенты, учитывающие распределение мощности луча между поверхностным источником и линейным; h – глубина линейного источника; $E(z')$ и $E(\tau)$ – единичные функции. Для имитации воздействия нормально-кругового источника рассчитывается время действия фиктивного источника t_0 через коэффициент сосредоточения K для заданного диаметра электронного луча d .

Интегральное решение задачи теплопроводности для электронно-лучевой сварки статическим лучом бесконечной пластины толщиной δ имеет вид [2]

$$T(x, y, z, \tau) = \frac{k_1 q \eta}{4c\rho (\sqrt{\pi a})^3} \int_{t_0}^t \frac{1}{(\sqrt{\tau})^3} \exp\left(-\frac{(x+V\tau)^2 + y^2}{4a\tau}\right) \times \\ \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(z+2n\delta)^2}{4a\tau}\right) d\tau + \frac{k_2 q \eta}{8h\pi\lambda} \int_{t_0}^t \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{(x+V\tau)^2 + y^2}{4a\tau}\right) \times$$

$$\times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{z+h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{z-h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right) d\tau. \quad (9)$$

Автором работы [2] установлено, что при мощности электронного луча от 5 до 10 кВт для легированных сталей среднее значение коэффициентов k_1 и k_2 составляет 0,3 и 0,7 соответственно, при коэффициенте полезного действия $\eta = 0,9$. Однако последующие многочисленные расчеты для легированных сталей и цветных металлов показали, что тепловая модель для электронно-лучевой сварки статическим лучом (9) не всегда дает удовлетворительные результаты при сравнении геометрии сварного шва, полученной расчетно, с экспериментальной.

Для повышения точности решения тепловой задачи при электронно-лучевой сварке статическим лучом в режиме глубокого проплавления необходимо пересмотреть вид формы источника тепла и его математическое описание. С этой целью проведем *краткий анализ физических процессов, происходящих при электронно-лучевой сварке*.

Глубокое проплавление при электронно-лучевой сварке сопровождается достаточно сложными тепловыми, гидро- и газодинамическими, плазменными и другими процессами [1, 4, 5]. При воздействии концентрированного потока энергии на поверхность тела с удельной мощностью выше критической 10^9-10^{10} Вт/м² часть потока энергии частично отражается от поверхности, а остальная часть поглощается в тонком поверхностном слое металла, вызывая его нагрев, последующие плавление и испарение. Все существующие гипотезы, объясняющие феномен «кинжального» проплавления, исходят из единого мнения, что глубокое проникновение электронов в металл вызвано образованием в жидком металле сварочной ванны узкого и глубокого канала проплавления (парогазового канала) [6].

Формирование парогазового канала сопровождается достаточно сложными процессами, такими как локальный перегрев металла, стохастическое перемещение зоны взаимодействия луча с металлом по глубине канала проплавления, периодическое смыкание канала в верхней части, образование волн на поверхности расплава и др. [7]. Теоретически и экспериментально установлено, что канал проплавления и окружающий его жидкий металл имеют переменную во времени форму, а процесс формирования глубокого проплавления при электронно-

лучевой сварке имеет автоколебательный характер [1, 8]. Было выдвинуто множество гипотез об автоколебательных процессах в канале проплавления. Многие из этих гипотез не получили однозначного подтверждения или опровержения до сих пор. Приведем лишь некоторые значимые из них.

В работах коллектива академика Н.Н. Рыкалина выдвигается гипотеза о взрывном характере взаимодействия электронного луча с металлом, обусловленном большими скоростями ввода энергии при электронно-лучевой сварке, превышающими скорость отвода тепла за счет теплопроводности [9–11]. Согласно этой теории процесс углубления канала проплавления в металле является прерывистым. В результате периодического взрывного вскипания металла давление пара над поверхностью и в канале возрастает. При некоторой критической плотности пара ρ_n^* электроны луча не могут достигать дна канала из-за неупругого взаимодействия с атомами пара. Это неизбежно приводит к рассеиванию электронного луча на стенки канала (с удельной мощностью на 1–2 порядка ниже первоначальной) и образованию жидкой фазы, после чего фокусировка электронного луча восстанавливается. Далее процесс повторяется. По мере углубления канала проплавления происходит увеличение времени рассеивания и уменьшение выходного сечения канала d_{\min} вследствие увеличения слоя жидкой фазы на стенке канала преимущественно в верхней части. При определенных условиях может произойти полное смыкание канала в верхней части (рис. 2). Таким образом, локальный перегрев металла, приводящий к взрывному вскипанию и сопровождающийся выбросами некоторого количества паров, приводит к последующему частичному или полному экранированию луча (рассеивание луча продуктами выброса из ванны). В результате устанавливается квазипериодический процесс, для которого характерны частоты порядка десятков килогерц [4].

Периодическое смыкание канала проплавления может происходить и в результате автоколебательных процессов в жидком металле сварочной ванны, связанных с кипением и конденсацией паров металла в канале [12–14], частота колебаний составляет порядка 1–100 Гц. Движение расплавленного металла по стенкам канала имеет периодический характер и осуществляется объемными волнами под действием силы гидростатического давления и поверхностного натяжения, противодействующих реакции отдачи паров. При этом скатывающаяся на

дно канала волна оголяет твердые слои металла на передней стенке, после чего процессы плавления и переноса повторяются [15, 16]. Зона интенсивного испарения сосредоточивается на дне канала, боковая поверхность которого выводится из зоны действия луча при заглублении в металл. Боковые стенки парогазового канала удерживаются за счет реакции отдачи паров. При этом стенки канала охлаждаются за счет теплоотвода в твердый металл, и поток пара конденсируется на поверхности стенок канала. В момент, когда в верхней части канала давление отдачи паров будет минимальным за счет конденсации и меньше суммы капиллярного и гравитационного давления жидкости, может происходить стягивание входного отверстия силами поверхностного натяжения (смыкание канала проплавления жидкостью) [12–14]. В момент смыкания канала жидкостью также наблюдается экранирование электронного луча.

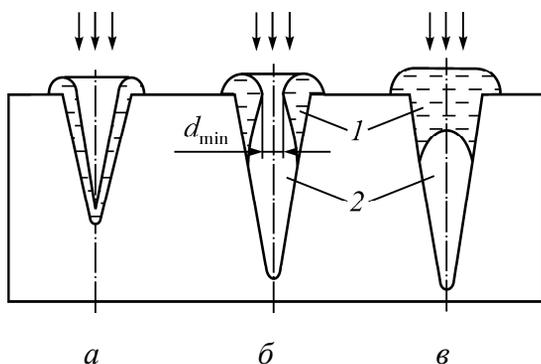


Рис. 2. Распределение жидкой фазы в канале по мере увеличения его глубины: $a - p > (p_G + p_\sigma)$; $б - p \geq (p_G + p_\sigma)$; $в - p < (p_G + p_\sigma)$; 1 – жидкая фаза; 2 – пар; p – давление пара в канале; p_G – гидростатическое давление жидкого металла; p_σ – давление поверхностного натяжения [4]

Какими бы причинами ни вызывалось периодическое, частичное или полное экранирование луча, оно приводит к рассеиванию электронного луча на стенки, которое может происходить близко у поверхности на какой-то глубине. Удельная мощность луча в момент его рассеяния на стенки падает на 1–2 порядка (пропорционально площади внутренней поверхности канала), поэтому обеспечивается практически только плавление кромок [4, 7], приводящее к формированию расширенной верхней части. Также определенное влияние на формирование

расширенной верхней части геометрии проплавления может оказывать эффект Марангони, как показано в работах [17, 18], где численным экспериментом продемонстрированы решения для обтекания стационарного канала проплавления при электронно-лучевой сварке потоком жидкости при различных режимах течения.

На основе приведенного анализа физических процессов, происходящих при электронно-лучевой сварке, можно сделать заключение, что глубокое проплавление представляет собой ряд элементарных циклов, каждый из которых включает испарение слоя металла и последующее экранирование электронного луча. Таким образом, при автоколебательных процессах проплавления парогазовый канал может находиться в двух квазипериодических состояниях: первое состояние соответствует открытому каналу, когда давление паров металла значительно превышает сумму гидростатического давления и поверхностного натяжения (рис. 2, *а*); второе соответствует экранированию электронного луча, сопровождающемуся уменьшением удельной мощности луча и рассеиванием его на стенки канала (рис. 2, *б*).

При решении тепловых задач электронно-лучевой сварки комбинированные источники тепла, предложенные в работах Н.Н. Рыкалина [1, 4] и работе В.М. Язовских [2] (см. рис. 1, формула (9)), имитируют первое – «открытое» состояние парогазового канала с учетом расширения его верхней части. Следует отметить, что в работах Н.Н. Рыкалина представлен расчет времени образования канала проплавления как суммарное время циклов «чистого испарения» и экранирования луча. Результаты расчетов показали, что в общем балансе времени образования канала на процесс «чистого испарения» уходит около 5–10 % времени, тогда как рассеивание занимает остальные 90–95 % времени. Исходя из этого при решении тепловой задачи форма источника тепла должна имитировать второе – «экранированное» состояние парогазового канала, что позволит при расчетах более точно передать «кинжальную» форму проплавления. Можно выделить два основных момента, позволяющих описать подобный источник тепла:

1. В момент экранирования электронного луча и его рассеивания на стенки канала происходит увеличение диаметра нагреваемой зоны, поэтому поверхностный источник тепла можно представить как круговой равномерно распределенный источник радиусом r .

2. Экранирование происходит не на самой поверхности, а на некоторой глубине от нее, и одновременно в канале проплавления продолжают происходить процессы, вызывающие нагрев основного металла (конденсация пара и теплоотвод в твердый металл). В связи с этим линейный по глубине источник тепла может быть представлен как действующий под поверхностью на каком-то расстоянии.

Таким образом, глубокое проплавление при электронно-лучевой сварке можно представить как результат действия комбинированного источника тепла, непрерывно действующего в течение определенного отрезка времени t (рис. 3) и состоящего:

- из нормально распределенного на поверхности кругового источника радиусом r , вводимого в начале координат;
- линейного по глубине источника (вдоль оси Z , длиной $2h$), действующего под поверхностью на расстоянии h_1 , вводимого в координате $(0, 0, S)$.

Оба источника можно представить как совокупность мгновенных точечных источников. Распределение мощности луча q между поверхностным и линейным по глубине источниками осуществляется за счет введения коэффициентов распределения энергии k_1 и k_2 соответственно.

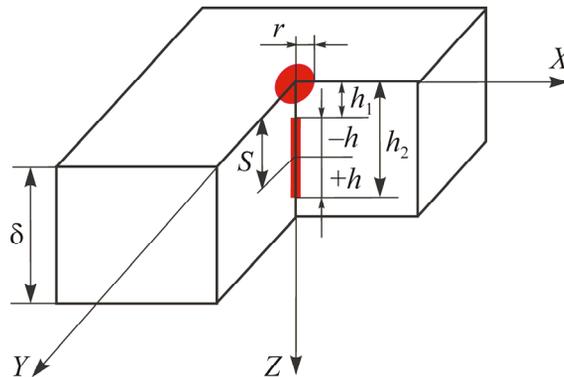


Рис. 3. Схема комбинированного источника тепла при электронно-лучевой сварке статическим лучом: r – радиус поверхностного источника тепла; h_1 и h_2 – глубина залегания и действия линейного источника тепла соответственно; S – точка ввода линейного источника тепла длиной $2h$, где $h = (h_2 - h_1)/2$,

$$S = h + h_1$$

Математическое описание функции источника тепла (см. рис. 3) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & F(x, y, z, \tau) = \\
 & = \frac{q\eta}{c\rho} \left(\frac{k_1}{4r^2} E(x') E(y') \delta(z') E(\tau) + \frac{k_2}{2h} \delta(x') \delta(y') E(z') E(\tau) \right), \quad (10) \\
 & E(x') = \begin{cases} 1 & \text{при } -r \leq x' \leq r, \\ 0 & \text{при } r < x' < -r, \end{cases} \quad E(y') = \begin{cases} 1 & \text{при } -r \leq y' \leq r, \\ 0 & \text{при } r < y' < -r, \end{cases} \\
 & E(z') = \begin{cases} 1 & \text{при } -h \leq z' \leq h, \\ 0 & \text{при } h < z' < -h, \end{cases} \quad E(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } t_0 \leq \tau \leq t, \\ 0 & \text{при } \tau > t, \end{cases} \quad t_0 = \frac{1}{4aK}, \quad K = \frac{12}{d^2}.
 \end{aligned}$$

Для получения интегрального решения тепловой задачи подставляем функцию источника (10) в уравнение (7), в котором уже учтены краевые условия для бесконечной пластины в подвижной системе координат. Интегральное решение тепловой задачи при электронно-лучевой сварке статическим лучом в аналитической форме имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 T(x, y, z, \tau) &= \frac{k_1 q \eta}{16r^2 c \rho \sqrt{\pi a}} \int_{t_0}^t \frac{1}{\sqrt{\tau}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x+r+V\tau}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x-r+V\tau}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \times \\
 &\times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y+r}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y-r}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp \left(-\frac{(z+2n\delta)^2}{4a\tau} \right) \partial\tau + \\
 &+ \frac{k_2 q \eta}{16h\pi\lambda} \int_{t_0}^t \frac{1}{\tau} \exp \left(-\frac{(x+V\tau)^2 + y^2}{4a\tau} \right) \times \\
 &\times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{z-S+h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{z+S+h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \right. \\
 &\left. - \operatorname{erf} \left(\frac{z-S-h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{z+S-h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \partial\tau. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Полученное выражение (11) может быть хорошо реализовано в математическом пакете MathCAD. Для этого необходимы следующие исходные данные: теплофизические свойства свариваемого материала, параметры режима сварки и параметры источника тепла (см. рис. 3): k_1 и k_2 – коэффициенты, учитывающие распределение мощности электронного луча между поверхностным источником и линейным; r – ра-

диус поверхностного источника тепла; $2h$ – длина линейного источника; S – координата ввода линейного источника. Из схематического изображения источника тепла видно, что для определения h и S необходимо знать расстояние от поверхности h_1 , на которое заглублен источник, действующий по оси Z , и глубину действия этого источника h_2 , представляющую собой глубину проплавления.

Судить о глубине линейного источника h_2 , действующего по оси Z , можно по расчетной глубине проплавления, которая связана с параметрами электронно-лучевой сварки критериальным уравнением. В настоящее время существует большое количество работ, посвященных определению глубины проплавления. Ниже приведены некоторые наиболее значимые математические модели для определения глубины проплавления при сварке статическим лучом:

$$H = \frac{a^{1-0,5k}}{(\lambda T_{\text{пл}})^k} (\eta_3 UI)^k v_{\text{св}}^{0,5k-1} (2r_{\text{л}})^{-0,5k}, \quad k = 0,68(\lambda T_{\text{пл}})^{0,15} \quad [19], \quad (12)$$

$$H = \frac{UI}{r_{\text{л}} v_{\text{св}}} \left(c\rho T_{\text{сп}} + \rho L_{\text{пл}} + \frac{5\lambda T_{\text{сп}}}{2a} + \frac{5\lambda T_{\text{сп}}}{2r_{\text{л}} v_{\text{св}}} \right)^{-1} \quad [6], \quad (13)$$

$$H = UI \lg \left(\frac{2,24\lambda}{c\rho v_{\text{св}} r} \right) \left(2\pi\lambda (T_{\text{сп}} - T_0) \right)^{-1} \quad [6], \quad (14)$$

$$H = \frac{\eta_3 UI - 4r^2 \varepsilon \sigma T_{\text{сп}}^4}{r_{\text{л}} v_{\text{св}} \left[c\rho T_{\text{пл}} + \rho L_{\text{пл}} + \xi \rho r + 5\lambda T_{\text{пл}} \left(\frac{1}{2a} + \frac{1}{2r_{\text{л}} v_{\text{св}}} \right) \right]} \quad [6], \quad (15)$$

$$H = \frac{UI}{2,1rv_{\text{св}}} \frac{T_{\text{пл}}}{\rho(cT_{\text{пл}} + L_{\text{пл}})} \frac{1}{1 + 2,5\lambda \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{r_{\text{л}} v_{\text{св}}} \right)} \quad [4], \quad (16)$$

где H – глубина проплавления, рассчитанная по соответствующим формулам, см; U – ускоряющее напряжение, В; I – ток луча, А; η_3 – эффективное КПД; $v_{\text{св}}$ – скорость сварки, см/с; $r_{\text{л}}$ – радиус электронного луча, см; c – теплоемкость, Дж/(г·°С); ρ – плотность, г/см³; λ – коэффициент теплопроводности, Дж/(см·с·К); a – коэффициент температуропроводности, см²/с; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления, К; $T_{\text{кип}}$ – темпера-

тура кипения, К; $T_{\text{ср}}$ – средняя температура сварочной ванны, К, $T_{\text{ср}} = 1,5T_{\text{пл}}$; T_0 – начальная температура, К; $L_{\text{пл}}$ – скрытая теплота плавления, Дж/см³; $L_{\text{кип}}$ – скрытая теплота парообразования, Дж/см³; ε – коэффициент черноты, $\varepsilon = 0,93$; ξ – доля металла, испаренного из сварочной ванны, $\xi = 0,01$; σ – постоянная Стефана–Больцмана, $\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$.

Формулы (12)–(16) могут быть использованы и для предварительного определения основных параметров режима сварки (тока луча, ускоряющего напряжения и скорости сварки) для заданной глубины проплавления.

Параметр h_1 – расстояние от поверхности, на которое заглублен источник, действующий по оси Z , в формуле (11) определяется следующим образом. Известно, что при воздействии электронного луча на материал распределение плотности мощности луча близко к нормальному закону Гаусса по поверхности и по объему, с максимумом под поверхностью нагреваемого тела (рис. 4).

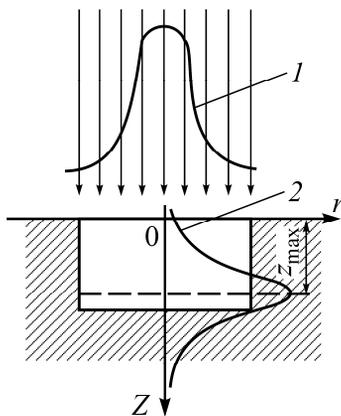


Рис. 4. Схема теплового источника при электронно-лучевом воздействии:
 1 – распределение плотности мощности луча по поверхности тела;
 2 – по объему [4]

Как предложено в работе [4], глубина максимального энерговыделения z_{max} принимается

$$z_{\text{max}} = 0,75\delta, \quad (17)$$

где δ – максимальная глубина проникновения электронов в материал, определяемая по формуле Шонланда:

$$\delta = 2,35 \cdot 10^{-12} \frac{U^2}{\rho}, \quad (18)$$

где U – ускоряющее напряжение, В; ρ – плотность материала, кг/м³.

В первом приближении параметр h_1 в формуле (11) может соответствовать глубине максимального энерговыделения z_{\max} и определяться из формул (17) и (18).

Радиус поверхностного источника тепла r в формуле (11) (см. рис. 3) определяется из условия экранирования электронного луча. Поскольку в момент рассеивания электронного луча на стенки канала удельная мощность электронного луча ($q_2 = UI/\pi r^2$) уменьшается в k раз (на 1–2 порядка), а вводимая мощность луча не изменяется ($q = UI$), то увеличение размера зоны в канале проплавления, на которую приходится рассеивание электронного луча, будет определяться как

$$r = \sqrt{k} r_{\text{л}}, \quad (19)$$

где r – радиус «рассеянного» луча, соответствующий радиусу поверхностного источника тепла в формуле (11); k изменяется в пределах 10–100 раз, конструктивно для сталей может быть взят в пределах 50–60; $r_{\text{л}}$ – радиус электронного луча.

На рис. 5 представлен результат расчета распределения температур по формуле (11) для стали 38Х2НМЮА, режим сварки: $U = 28$ кВ; $I_{\text{луча}} = 0,2$ А; $v_{\text{св}} = 16$ м/ч; свариваемая толщина 20 мм. Распределение температур приведено в трех координатных плоскостях, при этом в продольном сечении показаны отдельно графики для поверхностного (рис. 5, а) и линейного по глубине источников тепла (рис. 5, б) и итоговое распределение температур (рис. 5, в).

Для сравнения был произведен расчет геометрии сварного шва в поперечном сечении для стали 38Х2НМЮА по формуле (9), где источник тепла поверхностный нормально распределенный и линейный по глубине, и по формуле (11) с предложенным разделенным источником тепла (рис. 6). Геометрия сварного шва в поперечном сечении определялась по изотерме кристаллизации, точками показаны экспериментально измеренные значения ширины шва. Из рисунка видно, что предложенная модель источника тепла для электронно-лучевой сварки статическим лучом (3) и полученное на ее основе решение тепловой задачи (11) позволяют наиболее точно описывать геометрию сварного шва.

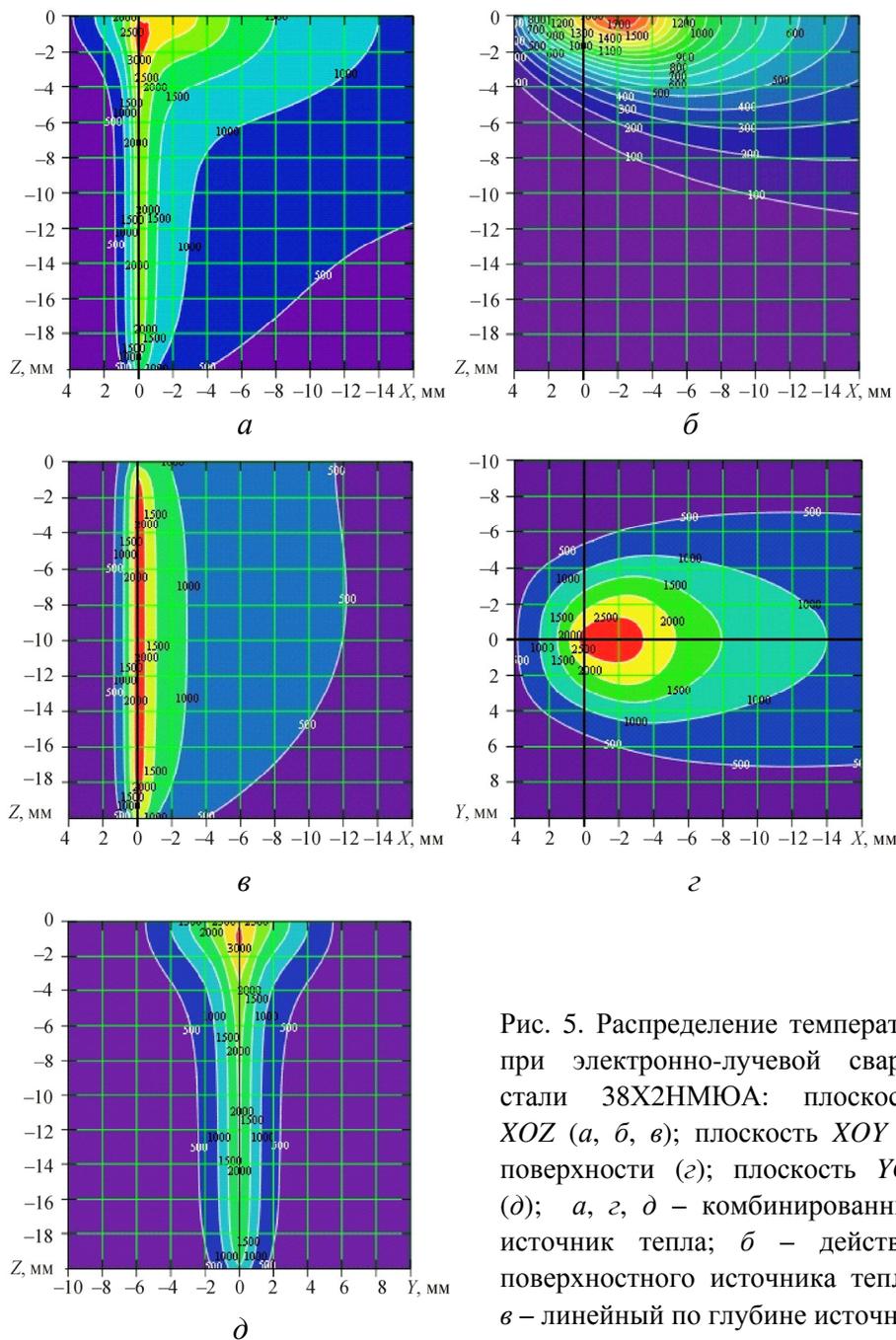


Рис. 5. Распределение температур при электронно-лучевой сварке стали 38X2NMЮА: плоскости XOZ (*a*, *б*, *в*); плоскость XOY на поверхности (*г*); плоскость YOZ (*д*); *a*, *г*, *д* – комбинированный источник тепла; *б* – действие поверхностного источника тепла; *в* – линейный по глубине источник

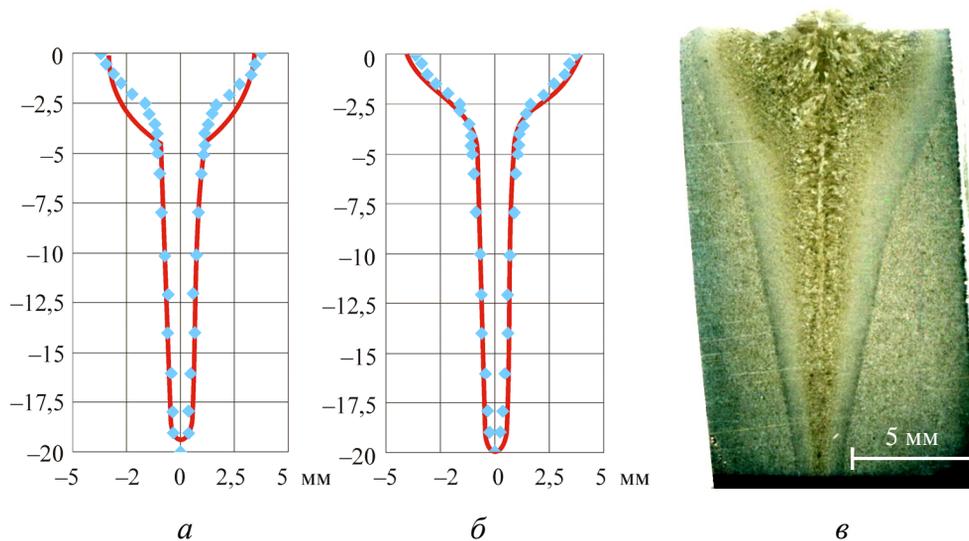


Рис. 6. Геометрия (а, б) и макроструктура (в) сварного шва стали 38Х2НМЮА, режим сварки: $U = 28$ кВ; $I_{\text{луча}} = 0,2$ А; $v_{\text{св}} = 16$ м/ч; а – расчет по формуле (9): $k_1 = 0,3$, $k_2 = 0,7$, $h = 20$ мм; б – расчет по формуле (11): $k_1 = 0,3$, $k_2 = 0,7$, $h_1 = 0,4$ мм, $h_2 = 20$ мм, $r = 3,7$ мм

При электронно-лучевой сварке осцилляция луча по траекториям различного вида в большинстве случаев применяется для устранения характерных дефектов, имеющих место при сварке статическим лучом. Наиболее широко используются следующие виды развертки луча: продольная и поперечная, х-образная, а также перемещения луча по эллипсу, дуге и окружности. Амплитуда осцилляции луча чаще всего лежит в пределах 1–3 мм, частота – от 50 Гц до 1 кГц и зависит от вида свариваемого материала. При достаточно малых значениях частоты и амплитуды осцилляции луча размеры парогазового канала практически не изменяются, при более высоких значениях происходит его расширение. Осцилляция электронного луча оказывает воздействие на паро- и гидродинамические процессы в канале проплавления, повышая его устойчивость, и, как следствие, приводит к изменению конфигурации сварочной ванны. Однако в форме поперечного сечения сварного шва сохраняется расширение в верхней части, т.е. можно предположить, что при данных режимах осцилляции луча процессы, связанные с экранированием электронного луча, сохраняются, хотя и происходят в меньшей степени.

Исходя из этого при построении моделей решения тепловых задач и выборе формы источника тепла для сварки с **осциллирующей электронной луча** также использовался комбинированный источник тепла, учитывающий расширение диаметра нагрева на поверхности и действие источника по глубине под поверхностью.

Обычно применяемая на практике частота осцилляции луча для различных видов развертки выбирается достаточно большой (от 400 Гц), поэтому источник тепла можно рассматривать как постоянно действующий какой-то определенной формы.

Для построения тепловых моделей выбраны продольная, поперечная и x -образная траектории осцилляции луча. При сварке с продольными и поперечными колебаниями электронного луча источник тепла состоит из поверхностного линейного, действующего вдоль соответствующих осей X и Y , и плоского, действующего по глубине вдоль оси Z по ширине вдоль соответствующих осей X и Y (рис. 7, а, б). Осцилляция луча по x -образной траектории представляет собой суперпозицию продольных и поперечных колебаний, поэтому источник имеет прямоугольную форму (рис. 7, в).

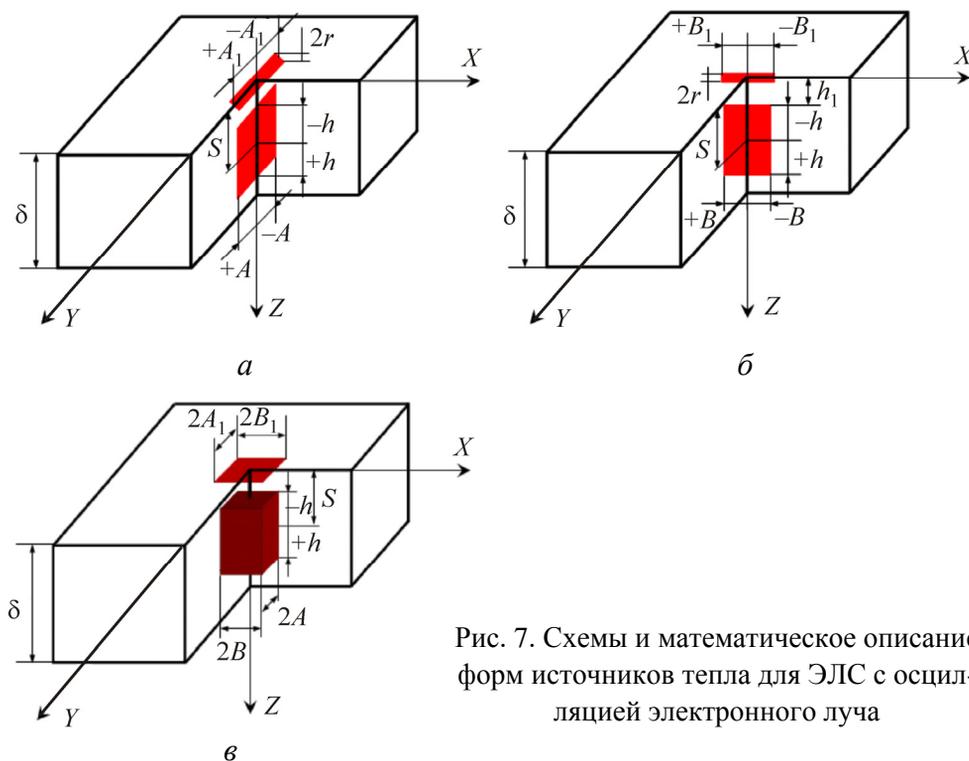


Рис. 7. Схемы и математическое описание форм источников тепла для ЭЛС с осциллирующей электронной луча

Математическое описание источника тепла:

– поперечные колебания луча (см. рис. 7, а)

$$F(x, y, z, \tau) = \frac{q\eta}{c\rho} \left(\frac{k_1}{4rA_1} E(x') E_1(y') \delta(z') E(\tau) + \frac{k_2}{4Ah} \delta(x') E(y') E(z') E(\tau) \right); \quad (20)$$

– продольные колебания луча (см. рис. 7, б)

$$F(x, y, z, \tau) = \frac{q\eta}{c\rho} \left(\frac{k_1}{4rB_1} E_1(x') E(y') \delta(z') E(\tau) + \frac{k_2}{4Bh} E(x') \delta(y') E(z') E(\tau) \right); \quad (21)$$

– x -образные колебания луча (см. рис. 7, в)

$$F(x, y, z, \tau) = \frac{q\eta}{c\rho} \left(\frac{k_1}{4A_1B_1} E_1(x') E_1(y'') \delta(z') E(\tau) + \frac{k_2}{8ABh} E(x') E(y') E(z') E(\tau) \right); \quad (22)$$

где $E_1(x') = \begin{cases} 1 & \text{при } -B_1 \leq x' \leq B_1, \\ 0 & \text{при } B_1 < x' < -B_1, \end{cases}$ $E_1(y') = \begin{cases} 1 & \text{при } -A_1 \leq y' \leq A_1, \\ 0 & \text{при } A_1 < y' < -A_1; \end{cases}$

$$E(x') = \begin{cases} 1 & \text{при } -B \leq x' \leq B, \\ 0 & \text{при } B < x' < -B, \end{cases} \quad E(y') = \begin{cases} 1 & \text{при } -A \leq y' \leq A, \\ 0 & \text{при } A < y' < -A; \end{cases}$$

$$E(z') = \begin{cases} 1 & \text{при } -h \leq z' \leq h, \\ 0 & \text{при } h < z' < -h, \end{cases} \quad E(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } t_0 \leq \tau \leq t, \\ 0 & \text{при } \tau > t, \end{cases}$$

где A, B – амплитуды колебаний источника вдоль осей Y и X , действующего на глубине; A_1, B_1 – амплитуды колебаний поверхностного источника ($B_1 = B + r$; $A_1 = A + r$); r – радиус поверхностного источника.

Круговые и эллиптические колебания луча могут быть представлены как вариация колебаний с x -образной траекторией. Для описания источника нагрева, у которого увеличивается диаметр, в работе [2]

предлагается использовать прямоугольную форму источника и вводить действие фиктивного источника со временем t_0 . Благодаря этому форма пятна нагрева становится близкой к круговой, а распределение мощности по пятну нагрева отличается значительно меньшей кривизной по сравнению с нормально-круговым источником тепла.

Подставив функции источников тепла (20)–(22) в уравнение общего вида интегрального решения задачи теплопроводности в подвижной системе координат для бесконечной пластины (7), получаем следующие выражения интегрального решения задач теплопроводности для электронно-лучевой сварки с осцилляцией луча:

– с продольными колебаниями электронного луча

$$\begin{aligned}
 T(x, y, z, \tau) = & \frac{k_1 q \eta}{16rB_1 c \rho \sqrt{\pi a}} \int_{t_0}^t \frac{1}{\sqrt{\tau}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x+B_1+V\tau}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x-B_1+V\tau}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \times \\
 & \times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y+r}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y-r}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp \left(-\frac{(z+2n\delta)^2}{4a\tau} \right) \partial\tau + \\
 & + \frac{k_2 q \eta}{32Bh c \rho \sqrt{\pi a}} \int_{t_0}^t \frac{1}{\sqrt{\tau}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x+B+V\tau}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x-B+V\tau}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \exp \left(-\frac{y^2}{4a\tau} \right) \times \\
 & \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{z-S+h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{z+S+h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \right. \\
 & \left. - \operatorname{erf} \left(\frac{z-S-h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{z+S-h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \partial\tau; \quad (23)
 \end{aligned}$$

– с поперечными колебаниями электронного луча

$$\begin{aligned}
 T(x, y, z, \tau) = & \frac{k_1 q \eta}{16rA_1 c \rho \sqrt{\pi a}} \int_{t_0}^t \frac{1}{\sqrt{\tau}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x+r+V\tau}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x-r+V\tau}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \times \\
 & \times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y+A_1}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y-A_1}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp \left(-\frac{(z+2n\delta)^2}{4a\tau} \right) \partial\tau + \\
 & + \frac{k_2 q \eta}{32Ah c \rho \sqrt{\pi a}} \int_{t_0}^t \frac{1}{\sqrt{\tau}} \exp \left(-\frac{(x+V\tau)^2}{4a\tau} \right) \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y+A}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y-A}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \times
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{z-S+h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{z+S+h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \right. \\ & \left. - \operatorname{erf} \left(\frac{z-S-h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{z+S-h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \partial\tau; \end{aligned} \quad (24)$$

– с x -образными колебаниями электронного луча

$$\begin{aligned} T(x, y, z, \tau) = & \frac{k_1 q \eta}{16rA_1 B_1 c \rho \sqrt{\pi a}} \int_{t_0}^t \frac{1}{\sqrt{\tau}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x+B_1+V\tau}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x-B_1+V\tau}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \times \\ & \times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y+A_1}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y-A_1}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp \left(-\frac{(z+2n\delta)^2}{4a\tau} \right) \partial\tau + \\ & + \frac{k_2 q \eta}{64ABhc\rho} \int_{t_0}^t \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x+B+V\tau}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x-B+V\tau}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y+A}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \right. \\ & \left. - \operatorname{erf} \left(\frac{y-A}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{z-S+h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{z+S+h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \right. \\ & \left. - \operatorname{erf} \left(\frac{z-S-h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{z+S-h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \partial\tau. \end{aligned} \quad (25)$$

Полученное решение для сварки с x -образной осцилляцией электронного луча может быть использовано в случае электронно-лучевой сварки с разверткой по круговой и эллиптической траекториям. На рис. 8 продемонстрировано применение формулы (25) для определения формы проплавления (сварного шва) и построения термических циклов при электронно-лучевой сварке с x -образной осцилляцией луча. Сварка проводилась на стали 35Х2НМ толщиной 20 мм при мощности электронного луча 5600 Вт, скорость сварки составляла 10 м/ч, ток фокусировки обеспечивал максимальную глубину проплавления, частота x -образных колебаний 400 Гц, амплитуда колебаний 1,8 мм. Термические циклы сварки представлены для зоны перегрева ($T_{\max} = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$) для различных участков по глубине сварного шва. Расчет производился в математическом пакете MathCAD.

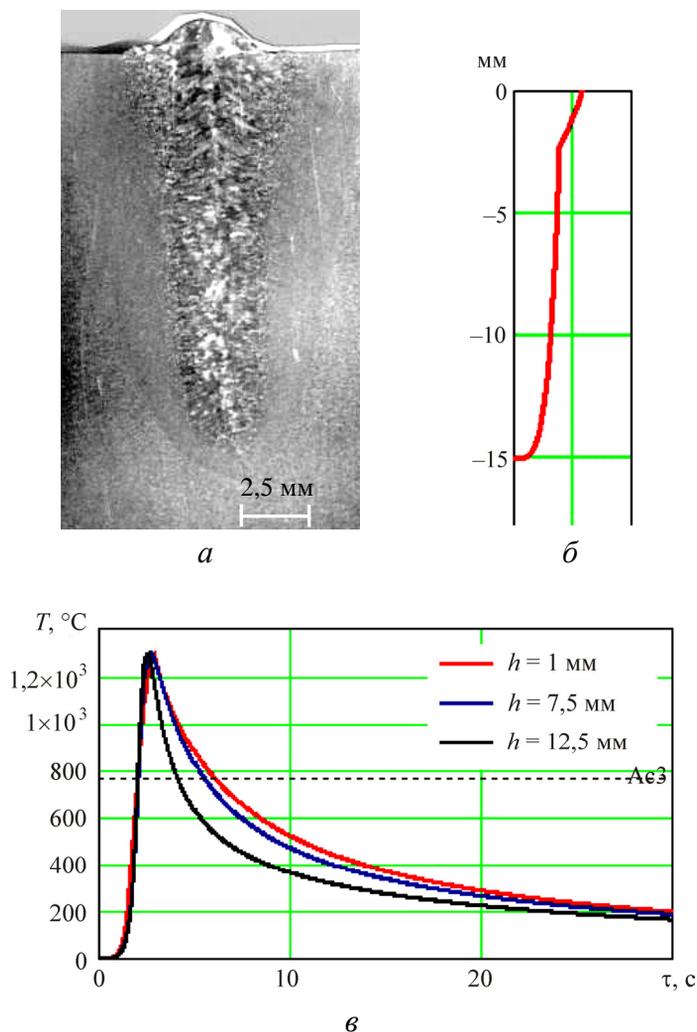


Рис. 8. Макроструктура сварного шва (а), расчетная форма сварного шва (б) и термические циклы сварки (в) для зоны перегрева различных участков по глубине сварного шва, сталь 35Х2НМ, электронно-лучевая сварка с х-образной осцилляцией луча

Таким образом, представлена возможность применения метода функций Грина как одного из универсальных способов построения тепловых моделей при электронно-лучевой сварке с различным динамическим позиционированием луча.

Список литературы

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Язовских В.М. Математическое моделирование и инженерные методы расчета в сварке: в 2 ч. Ч. 2. Тепловые процессы при сварке и моделирование в пакете MathCAD. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 119 с.
3. Ольшанская Т.В., Саломатова Е.С. Обзор современных способов управления электронным лучом при электронно-лучевой сварке // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 169–187.
4. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
5. Назаренко О.К., Кайдалов А.А. Электронно-лучевая сварка. – Киев: Наук. думка, 1987. – 256 с.
6. Кайдалов А.А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Экотехнология, 2004. – 260 с.
7. Kaplan A.F.H., Normanand P., Eriksson I. Analysis of the keyhole and weld pool dynamics by imaging valuation and photodiode monitoring // Proceedings of LAMP 2009 – the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing. – 2009. – P. 1–6.
8. Автоколебательный режим нагрева металла при ЭЛС / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, В.И. Скобельник, С.В. Селищев // Электронно-лучевая сварка. – М.: МДНТП, 1993. – С. 77–82.
9. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Оценка глубины проплавления при электронно-лучевой сварке // Физика и химия обработки материалов. – 1972. – № 1. – С. 9–14.
10. Зуев И.В., Рыкалин Н.Н., Углов А.А. О колебаниях глубины проплавления при электронно-лучевой сварке // Физика и химия обработки материалов. – 1975. – № 1. – С. 136–141.
11. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В. Механизм сварки и обработки электронным лучом // Сварка электронным лучом. – М.: МДНТП, 1974. – С. 13–19.
12. Формирование эквивалентного источника теплоты для расчетов деформаций конструкций на основе теоретического моделирования воздействия электронного луча на металл / В.А. Ерофеев, Р.В. Логвинов, В.М. Нестеренков, В.В. Плошихин // Известия Тул. гос. ун-та. Технические науки. – 2008. – Вып. 4. – С. 155–166.
13. Васильев А.А., Ерофеев В.А., Судник В.А. Возникновение колебаний глубины парогазового канала при лучевых способах сварки // Известия Тул. гос. ун-та. Технические науки. – 2014. – Вып. 7. – С. 130–140.
14. Ерофеев В.А. Моделирование особенностей формирования парогазового канала при электронно-лучевой сварке // Сварка и диагностика. – 2009. – № 4. – С. 12–18.
15. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Акопьянц К.С. Периодический перенос металла при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. – 1973. – № 8. – С. 75–76.

16. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Акопьянц К.С. О нестабильности глубины проплавления при электронно-лучевой сварке // Сварка электронным лучом. – М.: МДНТП, 1974. – С. 26–30.

17. Cho J.H., Na S.J. Three-dimensional analysis of molten pool in GMA-laser hybrid welding // *Welding Journal*. – 2009. – № 2. – P. 35–43.

18. 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*. – 2009. – № 3. – P. 54–61.

19. Ерохин А.А. К расчету глубины проплавления при электронно-лучевой сварке // Сварочное производство. – 1976. – № 4. – С. 4–6.

References

1. Rykalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V., Kokora A.N. Lazernaia i elektronno-luchevaia obrabotka materialov [Laser and electron beam processing of materials]: spravochnik. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 496 p.

2. Iazovskikh V.M. Matematicheskoe modelirovanie i inzhenernye metody rascheta v svarke [Mathematical modeling and engineering methods of calculation in welding]. V 2 chastiakh. Chast' 2. Teplovye protsessy pri svarke i modelirovanie v pakete MathCAD. Perm': Izdatel'stvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2008, 119 p.

3. Ol'shanskaia T.V., Salomatova E.S. Obzor sovremennykh sposobov upravleniia elektronnyim luchom pri elektronno-luchevoi svarke [The review of modern ways of management of an electronic beam at electron beam welding]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 169–187.

4. Rykalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V. Osnovy elektronno-luchevoi obrabotki materialov [Bases of electron beam processing of materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 239 p.

5. Nazarenko O.K., Kaidalov A.A. Elektronno-luchevaia svarka [Electron beam welding]. Kiev: Naukova dumka, 1987, 256 p.

6. Kaidalov A.A. Elektronno-luchevaia svarka i smezhnye tekhnologii [Electron beam welding and adjacent technologies]. 2-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe. Kiev: Ekotekhnologiya, 2004, 260 p.

7. Kaplan A.F.H., Normanand P., Eriksson I. Analysis of the keyhole and weld pool dynamics by imaging valuation and photodiode monitoring. *Proceedings of LAMP 2009 – the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing*, 2009, pp. 1–6.

8. Rykalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V., Skobel'nik V.I., Selishchev S.V. Avtokolebatel'nyi rezhim nagreva metalla pri ELS [The self-oscillatory mode of heating of metal at electron-beam weldings]. *Elektronno-luchevaia svarka*. Moscow: MDNTP, 1993, pp. 77–82.

9. Rykalin N.N., Zuev I.V., Uglov A.A. Otsenka glubiny proplavleniia pri elektronno-luchevoi svarke [Pro-melting depth assessment at electron beam welding]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov*, 1972, no. 1, pp. 9–14.

10. Zuev I.V., Rykalin N.N., Uglov A.A. O kolebaniakh glubiny proplavleniia pri elektronno-luchevoi svarke [About fluctuations of depth of pro-melting at electron beam welding]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov*, 1975, no. 1, pp. 136–141.

11. Rykalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V. Mekhanizm svarki i ob-rabotki elektronnym luchom [Mechanism of welding and processing by an electronic beam]. *Svarka elektronnym luchom*, Moscow: MDNTP, 1974, pp. 13–19.

12. Erofeev V.A., Logvinov R.V., Nesterenkov V.M., Ploshikhin V.V. Formirovanie ekvivalentnogo istochnika teploty dlia raschetov deformatsii konstruksii na osnove teoreticheskogo modelirovaniia vozdeistviia elektronnoho lucha na metall [Formation of an equivalent source of warmth for calculations of deformations of designs on the basis of theoretical modeling of impact of an electronic beam on metal]. *Izvestiia Tull'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2008, iss. 4, pp. 155–166.

13. Vasil'ev A.A., Erofeev V.A., Sudnik V.A. Vozniknovenie kolebanii glubiny parogazovogo kanala pri luchevykh sposobakh svarki [Emergence of fluctuations of depth of the steam-gas channel at beam ways of welding]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2014, iss. 7, pp. 130–140.

14. Erofeev V.A. Modelirovanie osobennosti formirovaniia parogazovogo kanala pri elektronno-luchevoi svarke [Modeling of features of formation of the steam-gas channel at electron beam welding]. *Svarka i diagnostika*, 2009, no. 4, pp. 12–18.

15. Nazarenko O.K., Kaidalov A.A., Akop'iants K.S. Periodiche-skii perenos metalla pri elektronno-luchevoi svarke [Periodic transfer of metal at electron beam welding]. *Avtomaticheskaiia svarka*, 1973, no. 8, pp. 75–76.

16. Nazarenko O.K., Kaidalov A.A., Akop'iants K.S. O nestabil'nosti glubiny proplavleniia pri elektronno-luchevoi svarke [About instability of depth of pro-melting at electron beam welding]. *Svarka elektronnym luchom*. Moscow: MDNTP, 1974, pp. 26–30.

17. Cho J.H., Na S.J. Three-dimensional analysis of molten pool in GMA-laser hybrid welding. *Welding Journal*, 2009, no. 2, pp. 35–43.

18. Rai R., Palmer T.A., Elmer W.J., Debroy T. Heat transfer and fluid flow during electron beam welding of 304L stainless steel alloy. *Welding Journal*, 2009, no. 3, pp. 54–61.

19. Erokhin A.A. K raschetu glubiny proplavleniia pri elektronno-luchevoi svarke [To calculation of depth of pro-melting at electron beam welding]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1976, no. 4, pp. 4–6.

Получено 05.06.2017

Об авторах

Ольшанская Татьяна Васильевна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: tvo66@rambler.ru.

Федосеева Елена Михайловна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов

Пермского национального исследовательского политехнического университета;
e-mail: fedoseeva.pstu@mail.ru.

Колева Елена Георгиевна (София, Болгария) – доктор наук, Химико-технологический и металлургический университет; e-mail: eligeorg@abv.bg.

About the authors

Tatyana V. Olshanskaya (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: tvo66@rambler.ru.

Elena M. Fedoseeva (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: fedoseeva.pstu@mail.ru.

Elena G. Koleva (Sofia, Bulgaria) – Doctor of Sciences, University of Chemical Technology and Metallurgy; e-mail: eligeorg@abv.bg.