

УДК 621.791.722

**Е.В. Терентьев, А.П. Слива**  
**E.V. Terentyev, A.P. Sliva**

Национальный исследовательский университет  
«Московский энергетический институт»  
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

## **ВЫБОР МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЙ СКОРОСТИ СВАРКИ ПРИ ЭЛС СО СКВОЗНЫМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ**

### **CHOICE OF MINIMUM ADMISSIBLE SPEED OF WELDING AT EBW WITH A THROUGH-PENETRATION**

Рассмотрены условия свободного формирования швов при ЭЛС в нижнем положении со сквозным проплавлением, а также динамическая модель вытекания жидкого металла сварочной ванны со стороны корня. Предложена расчетная методика, позволяющая определить минимально допустимую скорость сварки, при которой возможно формирование швов без занижений в вершине. Представлены номограммы, полученные расчетным путем, позволяющие определять минимальную скорость сварки в зависимости от свариваемой толщины и ширины шва для стали 12Х18Т10Т.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, свободное формирование, скорость сварки, динамическая модель, сварочная ванна.

The conditions for the free formation of electron-beam welding seams at the lower position with a through-penetration are discussed. The dynamic model of the liquid metal flowing from the root of the molten pool is considered. The calculation method, which allows to determine the minimum speed of welding, at which the seams may be formed without top understatement, is proposed. Nomograms obtained by calculation for defining the minimum welding speed, depending on the thickness and width of the welded seam for steel Cr18Ni10Ti are presented.

**Keywords:** electron-beam welding, free formation, speed of welding, dynamic model, molten pool.

В настоящее время электронно-лучевая сварка (ЭЛС) получила широкое распространение во многих отраслях промышленности при изготовлении ответственных сварных конструкций, особенно из материалов большой толщины. Одной из проблем при сварке стыков большой толщины со свободным формированием выступает вероятность занижения в вершине шва вследствие вытекания значительного объема жидкого металла из сварочной ванны с обратной стороны. Эти дефекты в большинстве случаев устраняются при двусторонней сварке или с помощью повторных проходов расфокусированным

лучом с присадочной проволокой. Однако при этом резко снижается производительность, увеличиваются затраты, возрастают сварочные напряжения или возникает опасность появления типичных для ЭЛС корневых дефектов в зоне перекрытия.

Известно [1, 2], что расширению возможностей процесса ЭЛС со свободным формированием швов способствует уменьшение тепловложения в свариваемый металл и повышение скорости сварки, т.е. уменьшение погонной энергии.

Применение высоких скоростей сварки (40–80 м/ч) позволяет получить качественные соединения со свободным формированием жаропрочных сплавов на никелевой основе ХН45МВТЮБР толщиной 8 и 12 мм [3] и повышает стабильность формирования швов при ЭЛС титановых сплавов толщиной 8–25 мм [4].

Несмотря на то что ЭЛС со свободным формированием используется не одно десятилетие и положительное влияние увеличения скорости сварки на стабильность формирования сварочной ванны подтверждено не одним автором, на сегодняшний день нет методики, позволяющей определить минимальную скорость сварки, при которой возможно удовлетворительное формирование сварных соединений металлов.

Целью данной работы является разработка методики определения минимально допустимой скорости сварки, при превышении которой сварные соединения, полученные при ЭЛС со сквозным проплавлением в нижнем положении, формируются без занижений в вершине.

При высоких скоростях сварки сварочная ванна имеет вытянутую форму и быстро сужается по мере кристаллизации жидкой фазы, поэтому рассматривали динамическую модель вытекания металла в корневой части шва. Поскольку невозможно аналитически учесть всю сложность процессов формирования ванны, то в расчетах приняли, что процесс ЭЛС квазистационарный. При этом размеры ванны по толщине постоянны, а стенки вертикальные (рис. 1). Кроме того, не учитывали конвективный теплоперенос и движение расплава в сварочной ванне в горизонтальном направлении. Также допустили, что скорость движения жидкого металла в вертикальном направлении в сечении с максимальной шириной ванны равна нулю.

Тогда при ЭЛС в нижнем положении в каждом элементарном сечении сварочной ванны силе тяжести противодействуют силы поверхностного натяжения в корне и силы вязкостного трения. Согласно работе [5] в данных условиях силы вязкостного трения намного меньше сил поверхностного натяжения, поэтому в дальнейшем их не учитывали.

В случае, если в сечении с максимальной шириной ванны силы поверхностного натяжения больше сил тяжести, то опасности вытекания металла

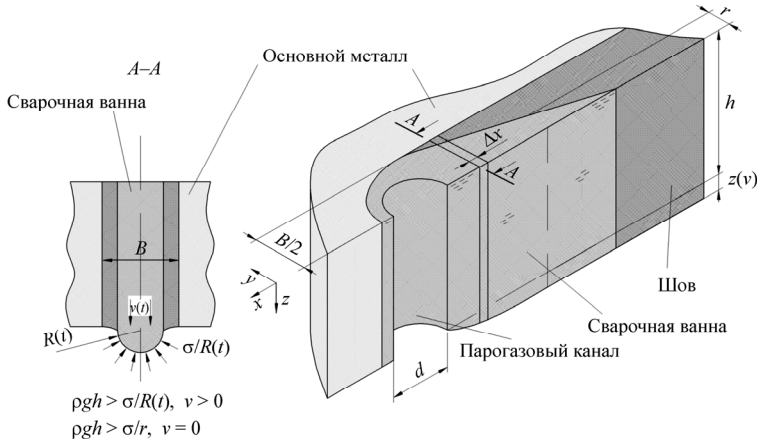


Рис. 1. Модель сварочной ванны

в корне шва не возникает. В противном случае жидкий металл начинает двигаться ускоренно вертикально вниз. Однако с учетом того, что температура и ширина ванны в каждом последующем сечении по мере отдаления источника тепла уменьшается, в определенный момент силы поверхностного натяжения, действующие на ванну шириной  $2r$ , сравняются с силой тяжести и жидкий металл прекратит вытекать. Допустим, радиус скругления корня в продольном направлении бесконечно большой, тогда условие равновесия в сварочной ванне запишем в виде

$$\rho_{\text{ж}}gh = \frac{\sigma}{r}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкого металла при температуре плавления;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – толщина свариваемого металла;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения.

Количество вытекшего металла будет зависеть от ширины шва, скорости кристаллизации, плотности жидкого металла, толщины металла и коэффициента поверхностного натяжения.

В элементарном сечении металл в расплавленном состоянии занимает в  $\rho_{\text{ж}}/\rho$  раз больший объем, чем в твердом состоянии при комнатной температуре. При этом лишний металл формирует усиление в вершине и (или) вытекает в корне, а частично испаряется. Тогда допустимый объем вытекшего металла из элементарного участка шва толщиной  $\Delta x$ , с учетом недопустимости образования занижения в вершине шва, определили по следующему выражению:

$$V = \left( \frac{\rho}{\rho_{\text{ж}}} - f - 1 \right) hB\Delta x, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность металла при 300 К;  $f$  – потери на испарение и разбрызгивание (в долях, при расчетах приняли значение 0,05);  $B$  – ширина шва.

Сравнивая длительность существования жидкой фазы и продолжительность заполнения жидким металлом цилиндрического канала в зависимости от радиуса канала, в работе [6] определили критический радиус, больше которого вероятность возникновения дефектов минимальна. Используя аналогичную методику, вычислили продолжительность вытекания жидкого металла из ванны и ее кристаллизации до такой ширины, чтобы металл мог удерживаться за счет сил поверхностного натяжения.

Рассмотрим элементарное сечение сварочной ванны толщиной  $\Delta x$ . Количество теплоты, которое необходимо отвести от элемента ванны толщиной  $\Delta x$ , чтобы получить его шириной  $2r$  в процессе кристаллизации, определили по формуле

$$Q_k = 2 \left( \frac{B}{2} - r \right) h \Delta x \rho_{\text{ж}} (L + c(T_{\text{в}} - T_{\text{пл}})), \quad (3)$$

где  $L$  – удельная теплота кристаллизации;  $c$  – удельная теплоемкость металла;  $T_{\text{в}}$  – температура поверхности ванны;  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления металла.

В данных условиях тепло будет отводиться в основном через боковую поверхность ванны, поэтому, преобразовав закон теплопроводности Фурье, можно найти  $Q_k$  из соотношения

$$Q_k = 2h\Delta x\lambda t_{\text{ж}} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $t_{\text{ж}}$  – продолжительность отвода тепла;  $\partial T/\partial r$  – градиент температуры в направлении теплоотвода.

Используя данные работы [7], для электронно-лучевой сварки можно записать

$$\frac{\partial T}{\partial r} \approx \left( \frac{1}{B} + \frac{v}{2a} \right) T_{\text{пл}}, \quad (5)$$

где  $v$  – скорость сварки;  $a$  – коэффициент температуропроводности.

Приравнивая правые части уравнений (3) и (4) с учетом (5) получим

$$t_{\text{ж}} \approx \frac{(B/2 - r)\rho_{\text{ж}}(L + c(T_{\text{в}} - T_{\text{пл}}))}{\lambda \left( \frac{1}{B} + \frac{v}{2a} \right) T_{\text{пл}}}.$$

По сути, это время, в течение которого жидкий металл будет вытекать под действием гидростатического давления, пока силы поверхностного на-

тяжения не сравниваются с силой тяжести. Как видно из выражения, длительность вытекания жидкого металла зависит от скорости сварки, причем увеличение скорости сварки уменьшает длительность вытекания жидкого металла.

Рассмотрим уравнение равновесия сил, действующих на жидкий металл:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = mg - \frac{\sigma \Delta x B}{R(t)}, \quad (6)$$

где  $d^2 z / dt^2$  – ускорение жидкого металла в вертикальном направлении;  $R(t)$  – зависящий от времени радиус скругления в корне сварочной ванны.

Допустим, кристаллизация идет с постоянной скоростью, тогда радиус скругления уменьшается линейно:

$$R(t) = B/2 \left( 1 - \frac{t}{t_k} \right), \quad (7)$$

где  $t_k$  – время, за которое жидкий металл в данном сечении полностью закристаллизуется. Тогда  $t_k$  можно определить аналогично  $t_{ж}$ :

$$t_k \approx \frac{B/2\rho_{ж} (L + c(T_b - T_{пл}))}{\lambda \left( \frac{1}{B} + \frac{v}{2a} \right) T_{пл}}. \quad (8)$$

Подставляя (7) и (8) в (6) и полагая, что  $m = \rho_{ж} h B \Delta x$ , получим

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = g - \frac{\sigma}{B/2\rho_{ж} h \left( 1 - \frac{t}{t_k} \right)}. \quad (9)$$

После интегрирования (9) на участке от 0 до  $t_{ж}$ , полагая, что  $z = 0$  и  $dz/dt = 0$ , при  $t = 0$  получим

$$z = g \frac{t_{ж}^2}{2} - \frac{\sigma t_{ж}^2 \left[ \left( 1 - \frac{t_{ж}}{t_k} \right) \left\{ \ln \left( 1 - \frac{t_{ж}}{t_k} \right) - 1 \right\} + 1 \right]}{B/2\rho_{ж} h},$$

где  $z$  – расстояние, на которое допустимо перемещение жидкого металла вертикально вниз (рис. 1).

Тогда объем металла, вытекающего в корне шва, можно определить по формуле

$$V = z B \Delta x. \quad (10)$$

Приравнивая выражения (2) и (10), можно получить формулу для определения минимально допустимой скорости сварки, при которой вершина шва будет на уровне лицевой поверхности шва, т.е. без усиления:

$$v = a \left[ \frac{2\rho_{\text{ж}} \{L + c(T_{\text{в}} - T_{\text{пл}})\}}{\lambda T_{\text{пл}}} \sqrt{\frac{g \left[ (B/2 - r)^2 - 2r \left\{ r \ln \left( \frac{2r}{Be} \right) + B/2 \right\} \right]}{2h \left( \frac{\rho}{\rho_{\text{ж}}} - f - 1 \right)}} - \frac{2}{B} \right],$$

где  $e$  – основание натурального логарифма, а  $r$  вычисляется по формуле (1).

Минимально допустимая скорость зависит от плотности металла, теплофизических свойств, коэффициента поверхностного натяжения, толщины свариваемого металла и ширины шва. На рис. 2 показаны зависимости минимально допустимой скорости сварки от ширины шва для стали 12X18Н10Т.

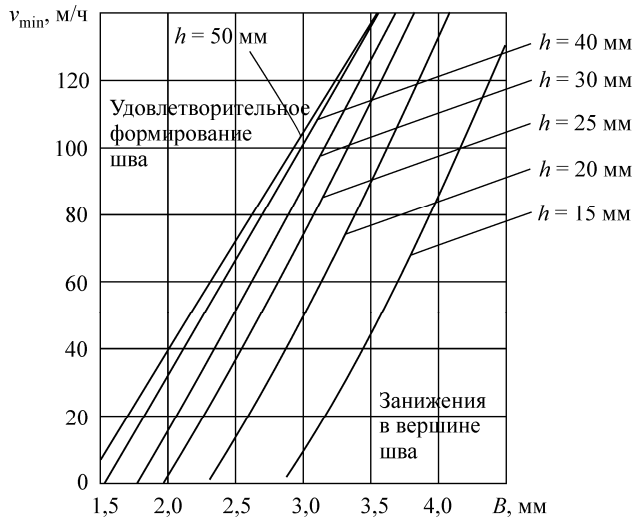


Рис. 2. Зависимость критической скорости сварки от ширины шва и свариваемой толщины для стали 12X18Н10Т

Стоит отметить, что в данной расчетной модели сделаны следующие допущения: все теплофизические и физические свойства материала взяты без учета их зависимости от температуры; коэффициент поверхностного натяжения по всей поверхности жидкой ванны одинаков и составляет 75 % от коэффициента поверхностного натяжения при температуре плавления.

Полученные при расчете допустимые скорости сварки занижены, так как в расчетной модели не учитывается перемещение жидкого металла вниз по передней стенке при свободном формировании и потери на испарение и разбрызгивание на различных режимах могут составлять до 10 % [8].

Сделаем следующие выводы:

1. Свободное формирование шва при сварке в нижнем положении можно обеспечить за счет увеличения скорости сварки, поскольку при этом кристаллизация идет с более высокой скоростью, и создаются условия, препятствующие вытеканию жидкого металла в корне шва.

2. Разработана методика определения минимально допустимой скорости сварки пластин со сквозным проплавлением. Получены номограммы, позволяющие определять минимальную скорость сварки в зависимости от свариваемой толщины и ширины шва для стали 12Х18Н10Т.

### Список литературы

1. О возможности свободного формирования сварного шва при сквозном проплавлении в условиях электронно-лучевой сварки / В.Р. Петренко, А.В. Башкатов, А.В. Медведев, В.П. Чумарный, В.М. Федоров // Сварка и родственные технологии в машиностроении и электронике. – 2001. – № 3. – С. 159–162.

2. Остаточные напряжения в сварочных элементах роторных конструкций газотурбинных двигателей, выполненных ЭЛС / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, Б.А. Задерий, С.Г. Андрущенко, В.Н. Павленко, Ю.Т. Руденов, И.М. Бирюков // Электронно-лучевая сварка: материалы конференции. – М., 1993. – Сб. 2. – С. 102–107.

3. Электронно-лучевая сварка со сквозным проплавлением жаропрочных сплавов на никелевой основе / Д.В. Клиновой, Б.А. Задерий, С.С. Котенко, М.В. Буньков, Ю.Д. Панфилов, С.Ф. Воловец // Электронно-лучевая сварка: материалы конференции. – М., 1993. – Сб. 2. – С. 110–115.

4. Нудельман Я.Б., Задерий Б.А. Формирование швов при ЭЛС сплавов титана толщиной до 25 мм // Автоматическая сварка. – 1988. – № 5. – С. 29–30.

5. Ланкин Ю.Н. Течение жидкого металла на передней стенке канала проплавления при ЭЛС // Автоматическая сварка. – 1984. – № 3. – С. 8–10.

6. Сукач К.А., Бондарев А.А., Третьяк Н.Г. Критический радиус закругления в донной части канала проплавления и образование корневых дефектов при ЭЛС // Автоматическая сварка. – 1987. – № 1. – С. 60–63.

7. Hashimoto T., Matsuda E. Effect of welding variables and materials upon bead shape in electron beam welding // Trans. Nat. Res. Inst. Met. – 1965. – Vol. 7, № 3. – P. 96–109.

8. Зуев И.В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – 162 с.

Получено 1.11.2013

**Терентьев Егор Валериевич** – аспирант, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, e-mail: terentyevyv@mpei.ru).

**Слива Андрей Петрович** – кандидат технических наук, ассистент, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, e-mail: slivaap@mpei.ru).

**Terentyev Egor Valerievich** – Graduate Student, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, e-mail: terentyevyv@mpei.ru).

**Sliva Andrey Petrovich** – Candidate of Technical Sciences, Assistant, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, e-mail: slivaap@mpei.ru).