УДК 621.642.3:621.79.01: 004.942

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-10-245-60-66

*О. И. Филиппов¹, М. А. Шолохов², В. А. Ерофеев³, С. И. Полосков⁴***КОМПЬЮТЕРНЫЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХСТОРОННЕЙ
МНОГОДУГОВОЙ СВАРКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТЫКОВ
РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ**¹ ООО «Транснефтьстрой»² УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина³ Тульский государственный университет⁴ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

e-mail: Foirus@yandex.ru

Показаны возможности компьютерного инженерного анализа особенностей двухсторонней многодуговой сварки вертикальных стыков стальных толстостенных резервуаров. Анализ проведен на основе численной реализации оригинальной физико-математической модели формирования ванны расплава и шва двумя парами дуг с каждой стороны стыка с двухсторонней разделкой. Установлено, что при формировании шва при сварке «сверху-вниз» должна быть учтена возможность питания первой пары дуг импульсным током, а для второй – возможность поперечных колебаний дуг в разделке с задержками их на кромках. При заполнении разделки с перемещением дуг «снизу-вверх» их поперечные колебания и задержки на кромках должны осуществляться по апериодическому закону с целью минимизации последствий «магнитного дутья». При формировании корня шва рекомендуется использовать импульсную сварку, а при заполнении разделки – сварку на повышенном токе при малой скорости сварки. Результаты исследования могут быть использованы при формировании требований к процессу и оборудованию для двухсторонней многодуговой сварки вертикальных стыков резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов.

Ключевые слова: многодуговая сварка, физико-математическая модель, численное моделирование, компьютерный анализ, резервуар для хранения нефти и нефтепродуктов.

*O. I. Filippov¹, M. A. Sholokhov², V. A. Erofeev³, S. I. Poloskov⁴***COMPUTER ENGINEERING ANALYSIS OF DOUBLE-SIDED MULTI-ARC WELDING
OF VERTICAL JOINTS OF TANKS FOR STORING OIL AND OIL PRODUCTS**¹ Transneftstroy Co. Ltd, Moscow² Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg³ Tula State University, Tula⁴ Bauman Moscow State Technical University, Moscow

The possibilities of computer engineering analysis of special features of double-sided multi-arc welding of vertical joints of tanks with thick shells for storing oil and oil products are shown. The analysis was carried out on the basis of a numerical implementation of the unconventional physical and mathematical model of the formation of a melt pool and a weld seam with two pairs of arcs on each side of the joint with a double-sided bevel. It was established that during weld formation with the movement of the electrode down (vertical down), the possibility of supplying the first pair of arcs with pulsed current should be taken into account, and for the second pairs, the possibility of lateral oscillation of the arcs in the groove with delays at the edges. During groove filling with the movement of the electrodes up (vertical up), their lateral oscillations and delays at the edges should be carried out according to an aperiodic law in order to minimize the effects of “magnetic blow”. For root formation, it is recommended to use pulsed welding, and during groove filling - high current welding with low welding speed. The results of the study can be used in the formation of scientifically-based requirements for the welding process and equipment for double-sided multi-arc welding of the vertical joints of tanks for storing oil and oil products.

Keywords: multi-arc welding, physical and mathematical model, numerical simulation, computer analysis, tank for storing oil and oil products.

Современные технологии добычи, транспортировки и переработки нефти предопределяют необходимость временного хранения нефти и нефтепродуктов в резервуарах, которые чаще всего представляют собой вертикальные

цилиндрические сосуды [1]. Основным методом строительства резервуаров является полистовая сборка и сварка [2, 3]. Режимы сварки большинства способов сварки, применяемых при строительстве резервуаров, приведены

в работе [4]. Дальнейшее повышение производительности сварочных работ может быть достигнуто при замене односторонней сварки на автоматическую синхронную тандем-сварку с двух сторон стыка [5]. При формировании корня шва целесообразно использовать импульсную сварку [6, 7], а заполнение разделки – сварку с поперечными колебаниями электрода [8], с использованием роботов или специальных автоматов для перемещения сварочных горелок [9].

Критериями оптимизации технологии являются характеристики формирования шва: размеры поперечного сечения шва и ЗТВ, скорость охлаждения металла, устойчивость сварочных ванн к вытеканию. Необходимо оценить чувствительность процесса к неизбежным отклонениям параметров сварки от их номинальных значений, к качеству сборки стыка и несогласованному движению горелок с разных сторон стыка. Такие многоплановые задачи решаются только методами компьютерного инженерного анализа [10].

Цель работы – разработка физико-математической модели процесса двухсторонней многосторонней сварки вертикальных стыков резервуаров и проведение компьютерного инженерного анализа для его оптимизации.

Известны модели формирования сварочной ванны при сварке вертикальных стыков с колебаниями дуги в заууженной разделке [11], но они не учитывают особенности двусторонней сварки попарно действующими дугами.

Физико-математическая модель

Особенности процесса. Лучшее формирование корня шва обеспечивается при сварке «сверху-вниз», с выполнением корневого прохода парой дуг с разных сторон стыка, рис. 1, б.

Вторая пара дуг должна находиться на расстоянии x_f , рис. 1, б, исключая слияние сварочных ванн. Сварочные горелки размещаются под углом β к продольному сечению шва, что обеспечивает наибольшее электродинамическое давление сварочных дуг и способствует лучшему удержанию расплава ванны.

Строение пространства описано в декартовой системе x, y, z -координат функцией принадлежности точек различным зонам, свойства и процессы в каждой из которых различны. Первоначально строение пространства моделирования определяется геометрией разделки кромок (рис. 1 а, сечение Б, зона M_m). По мере заполнения разделки электродным металлом

Рис. 1. Строение пространства моделирования процесса сварки и система координат:
а – сечение разделки кромок и шва;
б – сечение в плоскости симметрии стыка

возникают зоны расплава сварочной ванны M_L , твердо-жидкого металла M_s , металла шва M_w . Эти зоны замещают зону газовой среды G . Принадлежность точки среды к одной из зон пространства определяется состоянием металла. Например, точки металла с температурой ниже температуры солидуса принадлежат к зоне M_m , а выше температуры ликвидуса – к зоне M_L . Межзональные поверхности являются пересечениями множеств точек, принадлежащих сопряженным зонам. Так, расположение точек $(x, y, z)_L$ поверхности сварочной ванны в металле описывается пересечением множеств M_L и M_s : $(x, y, z)_L \in M_L \cap M_s$.

Расположение поверхности сварочной ванны, отделяющей металл M от окружающей газовой среды G , определяется не температурой, а равновесием давлений на поверхности $Z(x, y)$ жидкого металла M_L , поэтому она дополнительно описывается функцией $Z(x, y) \in M_L \cap G$.

Термодинамическая модель. При моделировании рассматривается термодинамическое состояние металла в неподвижной декартовой системе координат с центральной плоскостью симметрии, в которой металл свариваемого стыка неподвижен, а дуги перемещаются со

скоростью сварки v_w по направлению координаты x . Координаты центров дуг, рис. 1, определяются как:

$$x_{a1} = x_0 + v_w t; x_{a1} = x_{a1} - x_a; y_{a1} = 0; y_{a2} = y(t), \quad (1)$$

где x_0 – точка возбуждения дуги, t – время с момента возбуждения, $y(t)$ – функция, описывающая колебания дуги поперек стыка.

Скорость изменения и распределение энтальпии в металле описывают [12] дифференциальным нелинейным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

где $H = H(x, y, z, t)$ – объемная энтальпия, Дж/см³; $\lambda = \lambda(T)$ – теплопроводность металла, зависящий от температуры, Вт/(см·°C).

Температура $T(x, y, z, t)$ связана с энтальпией

$$z = Z(x, y); \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{3P_{a1}(t)}{\pi R_{a1}^2} \exp \left(-\frac{3}{R_{a1}^2} \left((x - x_{a1})^2 + y^2 \right) \right) + \frac{3P_{a2}}{\pi R_{a2}^2} \exp \left(-\frac{3}{R_{a2}^2} \left((x - x_{a2})^2 + y(t)^2 \right) \right)^4, \quad (4)$$

где $P_{a1}(t)$ – функция, описывающая изменение мощности теплового потока первой дуги при сварке корневого прохода, R_{a1} – радиус катодного пятна первой дуги, P_{a2}, R_{a2} – мощность и радиус действия второй дуги, $y(t)$ – функция, описывающая поперечные колебания второй дуги при заполнении стыка, b – коэффициент излучения поверхности металла, Вт/(см²·°K⁴).

Уравнение равновесия поверхности сварочных ванн. При сварке двумя дугами в вертикальном положении процесс устойчиво протекает только при режимах, обеспечивающих формирование отдельных ванн при выполнении корневого и заполняющего проходов. Расположение поверхности сварочных ванн $Z(x, y)$, определено решением уравнений равновесия давлений на их поверхности: капиллярного p_σ , гравитационного p_g , электродинамического давления дуги p_a , внутреннего давления жидкого металла p_m .

$H(x, y, z, t)$ нелинейной функцией $T(H)$, учитывающей зависимость теплоемкости от температуры и теплоты фазовых и агрегатных превращений. В качестве начальных условий принимается, что в начальный момент времени геометрическая формы стыка соответствует разделке кромок, сварочная ванна отсутствует, температура во всех точках стыка одинакова и равна температуре окружающей среды.

Граничные условия уравнения теплопроводности учитывают тепловые потоки, создаваемые дугами и теплообмен с окружающей средой. Границы зоны моделирования пересекают сплошной металл кромок, поэтому:

$$y = \pm y_m; \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0; x = \pm x_m; \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0. \quad (3)$$

Через внутреннюю поверхность металла $Z(x, y)$ вводится тепловые потоки дуги и теплоотдачи, поэтому:

$$p_\sigma + p_a + p_g + p_m = 0. \quad (5)$$

Капиллярное давление определяется кривизной поверхности $Z(x, y)$ и при малых прогибах определяется:

$$p_\sigma = -\sigma \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} \right), \quad (6)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Гравитационное давление определяется высотой столба расплава над точкой поверхности каждой из сварочных ванн, поэтому оно равно:

$$p_g = g\rho(Z - z_{\max}), \quad (7)$$

где g – ускорение свободного падения, ρ, ρ_h – плотности металла, $z_{\max}$ – максимальная высота поверхности в каждой из сварочных ванн.

Электродинамическое давление каждой из сварочных дуг определяется токами I_{a1}, I_{a2} соответствующей дуги, поэтому:

$$p_a = \frac{3k_a I_{a1}^2}{\pi R_{a1}^2} \exp \left(-\frac{3}{R_{a1}^2} \left((x - x_{a1})^2 + y^2 \right) \right) + \frac{3k_a I_{a2}^2}{\pi R_{a2}^2} \exp \left(-\frac{3}{R_{a2}^2} \left((x - x_{a2})^2 + y(t)^2 \right) \right), \quad (8)$$

где k_a – электродинамический коэффициент, R_p – силовые радиусы дуг.

Внутреннее давление в расплаве p_m должно определяться отдельно для каждой из ванн из

равенства площади наплавленного металла корневого или заполняющего проходов количеству израсходованного металла электродных проволок при решении вариационных задач:

$$S_{M_m \cup M_{w_1}} - S_{M_m} \overline{p_{m1}} = \text{var} \pi \frac{d_1^2}{4} \frac{v_1}{v_w},$$

$$S_{M_m \cup M_{w_1} \cup M_{w_2}} - S_{M_m \cup M_{w_1}} \overline{p_{m2}} = \text{var} \pi \frac{d_2^2}{4} r^2 \frac{v_2}{v_w},$$

(9)

где $S_{M_m}, S_{M_m \cup M_{w_1}}, S_{M_m \cup M_{w_1} \cup M_{w_2}}$ – площади поперечного сечения металла исходного стыка, после сварки корня шва и после сварки заполняющего прохода.

Корректировка пространства моделирования. Начальная неизвестность геометрического строения зоны формирования сварочной ванны в процессе виртуальной сварки требует непрерывной корректировки расположения поверхности $Z(x, y) \in M_L \cap G$ в зависимости от результата решения уравнений равновесия сварочных ванн.

Решение системы уравнений модели (1...9) в виде распределений температуры $T(x, y, z, t)$ позволяет воспроизвести процесс от возбуждения

дуги до достижения установившихся размеров сварочной ванны.

Численное решение системы уравнений физико-математической модели. Использовали дискретное трехмерное пространство $M_{i,j,k}$, точки i, j, k которого расположены на равном расстоянии Δ друг от друга. Для решения уравнений теплопроводности и равновесия поверхности сварочной ванны использован метод конечных разностей на сопряженных сетках. При решении последовательно с малым шагом времени Δt определяли текущее распределение энтальпии $H_{i,j,k}$ и температуры $T_{i,j,k}$ в узлах сетки, по температуре определяли расположение сварочных ванн и для узлов, расположенных на их поверхности $Z_{i,j}$, решали уравнение равновесия давлений. По изменившемуся расположению поверхности $Z_{i,j}$ корректировали строение пространства $M_{i,j,k}$.

На рис. 2 представлен алгоритм численного моделирования многодугового процесса сварки вертикального шва.

Рис. 2. Алгоритм численного моделирования формирования шва при многодуговой сварке вертикальных стыков

Результаты моделирования. Выполнили компьютерное моделирование процесса сварки листов из стали 09Г2 толщиной 30 мм с двухсторонней симметричной Х-образной разделкой кромок. Защитный газ – двуокись углерода, электродная проволока Св-08Г2С. Диаметр электродной проволоки (1,2, 1,6 и 2,0 мм) изменяли в зависимости от допустимой температуры вылета не более 500 °С. Шов вертикальный, рассматривали вариант «сверху-вниз». Напряжение дуги 30 В выбрали для получения дуги длиной 3 мм. Приняты значения: 5,9 В – анодное напряжение, 6,7 – катодное, 5,2 В/мм – градиент потенциала в столбе дуги. Вылет проволоки принят 20 мм. Расстояние между дугами выбрано 30 мм. При моделировании подбирали скорость сварки, при которой корневой проход заполнял половину площади сечения разделки, а полное заполнение разделки обеспечивается второй дугой. Установлено, что при указанных ограничениях скорость сварки, при которой обеспечивается требуемое формирование шва, невелика и составляет 1,5 мм/с (5,4 м/час). При такой скорости сварки скорость подачи электродной проволоки для сварки корня шва составила 27 мм/с, ток непрерывного режима горения дуги определен 150 А.

Результат формирования корневого прохода показан на рис. 3.

Рис. 3. Результат моделирования распределения температур при сварке в вертикальном положении «сверху-вниз» корневого прохода при непрерывном горении двух дуг с разных сторон:

а – предельное распределение; б – на поверхности шва; в – в плоскости симметрии; г – на исходной поверхности кромок

Полученный результат показал, что сварочная ванна формируется длиной около 8 мм и хорошо удерживается благодаря относительно небольшой массе (6 г) сварочной ванны небольшой длины (8 мм) в узкой разделке (9 мм)

у корня шва. При диаметре проволоки 1,6 мм температура разогрева вылета не превышает 250 °С, что позволяет использовать проволоку диаметром 1,2 мм, вылет которой при подаче 75 мм/с нагревается до 420 °С. При непрерывном горении дуги полное проплавление обеспечивается при увеличенном сборочном зазоре (4 мм).

Более стабильное проплавление обеспечивает импульсный режим дуги. Длительность импульса принята 1 с, ток импульса 310 А, длительность паузы 1 с, ток паузы 30 А. Прочие параметры имели те же значения, что и в непрерывном режиме горения дуги. На рис. 4 представлен результат моделирования формирования корня шва при сварке импульсным током.

Рис. 4. Результат моделирования распределения температур в конце импульса и паузы при сварке корневого прохода двумя импульсными дугами (обозначения сечений – рис. 3)

При сварке импульсной дугой размеры сварочной ванны немного изменяются. Массы сварочной ванны к концу импульса возрастает до 12 г, к концу паузы уменьшается почти вдвое – до 7 г. В конце паузы сварочная ванна частично кристаллизуется и в корне шва возможен непровар (рис. 5, г). Но при малой скорости импульс тока обеспечивает сварочную ванну достаточной длины (минимальное значение 7 мм, что больше перемещения за период 2с при скорости 1,5 мм/с, равное 3 мм) для полного перекрытия провара. В данном случае перекрытие в центре стыка превышает 60 %. Импульсный режим увеличил минимальную ширину проплавления корня, рис. 5, а, до 7 мм (против 5 мм

в непрерывном режиме, рис. 5, а). Однако увеличение тока дуги в два раза вызывает сильное нагревание вылета электрода, что вынуждает использовать проволоку большего диаметра (1,6 мм). Кроме того, при импульсной дуге поверхность шва имеет углубления, рис. 5, в, что может ухудшить формирование последующих слоев. В данном случае глубина впадин на поверхности шва оценивается значением около 1,6 мм.

Так как разделка кромок имеет значительную ширину (14 мм), для ее заполнения сварку необходимо выполнять с поперечными колебаниями. Амплитуду колебаний задали ± 3 мм, период 4,2 с, задержка на кромках 0,2 с. При скорости 1,5 мм/с шаг колебаний в разделке составил 3 мм. С учетом того, что вылет электрода при диаметре проволоки 1,6 мм нагревался выше 500°C , целесообразно использовать проволоку диаметром 2 мм, при котором температура вылета не превышает 320°C , а ток дуги составляет 360 А. Скорость подачи электродной проволоки диаметром 2 мм, необходимая для заполнения оставшегося сечения разделки, рис. 5, а, определена значением 54 мм/с.

Результаты моделирования заполняющего прохода показаны на рис. 5.

Рис. 5. Результат моделирования сварки заполняющего прохода с поперечными колебаниями электрода: а – профиль сечения разделки после выполнения корневого прохода; б – предельное распределение температур; в – распределение температуры на поверхности шва; г – в плоскости симметрии; д – на исходной поверхности кромок

При указанных параметрах сварки формируется почти круглая сварочная ванна диаметром около 16 мм. Несмотря на значительный вес (12 г) она устойчива, так как практически полностью погружена в разделку и удерживается электродинамической силой дуги, значе-

ние которой оценивается в 0,15 Н. Тем не менее поверхность шва формируется с небольшой выпуклостью около 2 мм, в середине которой расположена впадина (мениск), глубина которой немного меньше 2 мм. Такая форма шва допускается требованиями отраслевыми НТД [13,14]. Полученные результаты показывают, что предложенный способ сварки вертикальных стыков имеет приемлемые параметры по производительности, обеспечивает требуемое формирование шва и может быть использован при монтаже резервуаров.

Выводы

1. Для выполнения компьютерного инженерного анализа сварки вертикальных стыков резервуаров хранения нефтепродуктов разработана физико-математическая модель формирования ванны и шва при двухсторонней сварке двумя парами дуг с каждой стороны стыка с симметричной разделкой.

2. Компьютерное моделирование показало, что при формировании шва при сварке «сверху-вниз», должна быть учтена возможность питания первой пары дуг импульсным током, а для второй – возможность поперечных колебаний дуг в разделке с задержками их на кромках. Импульсные технологии снижают чувствительность процесса к сборочному зазору при формировании корня шва.

3. При заполнении разделки с перемещением дуг «снизу-вверх» их поперечные колебания и задержки на кромках должны осуществляться по аperiodическому закону с целью минимизации последствий «магнитного дутья». Сварка должна осуществляться на повышенном токе при малой скорости сварки. Процесс требует использования проволоки достаточно большого диаметра.

4. Результаты исследования могут быть использованы при формировании научно-обоснованных требований к процессу и оборудованию для двухсторонней многодуговой сварки вертикальных стыков стальных резервуаров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конторович, А. Э. Глобальные проблемы нефти и газа и новая парадигма развития нефтегазового комплекса России / А. Э. Конторович // Наука из первых рук. – 2016. – Т. 67. – № 1. – С. 6–17.
2. Безбородов, Ю. Н. Резервуары для приема, хранения и отпуска нефтепродуктов : учеб. пособие для вузов / Ю. Н. Безбородов, В. Г. Шрам, Е. Г. Кравцова и др. – Красноярск : СФУ, 2015. – 108 с.
3. Гончаров, Н. Г. Исследования дефектов сварных швов резервуаров вертикальных стальных / Н. Г. Гончаров

ров, Г. В. Нестеров, А. А. Юшин // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 3. – С. 69–74.

4. *Goncharov N. G., Yushin A. A., Derkach D. V.* Study of how welding methods impact the stress build-up in storage tank walls // *Pipeline Science & Technology*. - 2018. - Vol. 2. - № 3. - P. 179-186.

5. *Филиппов, О. И.* Современные методы сварки вертикальных стыков стальных резервуаров / О. И. Филиппов // Сб. докл. V междунар. конф. «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (30-31.05.2020). – Казань: Конверт, 2020. Часть 1. – С. 215–217.

6. *Scotti A., Larson U., Norrish J.* Bead instability of mechanised P-MIG [pulsed MIG] welding in vertical-up position // *International Journal of the Joining of Materials*. - 1991. - Vol. 3. № 1. - P. 18-24.

7. *Фивейский, А. М.* Совершенствование высокопроизводительных процессов импульсной дуговой сварки в защитных газах / А. М. Фивейский, Д. С. Бузорина, А. Ю. Мельников, А. Е. Филяков // *Сварка и Диагностика*. – 2016. – № 6. – С. 53–55.

8. *Cho D. W., Na S. J., Cho M. H., Lee J. S.* A study on V-groove GMAW for various welding positions // *Journal of Materials Processing Technology*, - 2013. - Vol. 213. - № 9. - P.1640-1652.

9. *Gui Z., Deng Y., Sheng Z.* et al. Design and experi-

mental verification of an intelligent wall-climbing welding robot system // *Industrial Robot: An International Journal*. - 2014. - Vol. 41. - № 6. - P. 500-507.

10. *Гришин, А. М.* Итерационно-интерполяционный метод и его приложения / А. М. Гришин, В. И. Зинченко, К. Н. Ефимов [и др.]. – Томск : Изд-во ТГУ, 2004. – 318 с.

11. *Xu G., Lin L., Wang J.* et al. Study of weld formation in swing arc narrow gap vertical GMA welding by numerical modeling and experiment // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2018. - Vol. 96. - № 5-8. - P. 1905-1917.

12. *Судник, В. А.* Основы научных исследований и техника эксперимента. Компьютерные методы исследования процессов сварки / В. А. Судник, В. А. Ерофеев. – Тула : ТулПИ, 1988. – 94 с.

13. РД 25.160.10-КТН-015-15. Ч. 1. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Сварка при строительстве и ремонте стальных вертикальных резервуаров. Технологии сварочно-монтажных работ. – М. : Транснефть, 2016. – 223 с.

14. РД 25.160.10-КТН-015-15. Ч. 2. Технология ремонта магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов с давлением до 6,3 МПа. Сварка при строительстве и ремонте стальных вертикальных резервуаров. Методы контроля качества сварных соединений. – М. : Транснефть, 2016. – 88 с.