

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ОРБИТАЛЬНОЙ СВАРКИ  
НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ  
С ПРИСАДОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ  
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ПРОЦЕССА**

**И.В. Дикшев, В.А. Ерофеев, А.В. Масленников, М.С. Медведков (Москва)**

**Введение**

Титановые сплавы широко применяются в аэрокосмической, судостроительной, химической и медицинской отраслях благодаря сочетанию высокой удельной прочности, коррозионной стойкости и жаропрочности. Однако сварка этих материалов относится к числу наиболее сложных процессов из-за высокой химической активности титана при температурах выше 400 °С (поглощение кислорода, водорода, азота), низкой теплопроводности, фазовых превращений ( $\alpha$  (гексагональная решётка)  $\rightarrow$   $\beta$  (объёмно-центрированная решётка) при 882 °С, рост зерна) и склонности к образованию хрупких интерстициальных фаз (оксидов, нитридов, гидридов) [1].

Ряд элементов, в частности алюминий, олово, азот, кислород, повышают температуры полиморфного превращения, расширяют область  $\alpha$ -титана и называются  $\alpha$ -стабилизаторами. Такие элементы, как молибден, ванадий, марганец, хром, способствуют сохранению при нормальной температуре  $\beta$ -модификации титана и называются  $\beta$ -стабилизаторами. В зависимости от комбинаций легирующих элементов сплавы титана могут быть  $\alpha$ -, псевдо- $\alpha$ -, ( $\alpha + \beta$ )- и  $\beta$ -сплавами.

Низкая теплопроводность титана (15,1 Вт/(м·К) при 20 °С) и титановых сплавов способствует увеличению времени пребывания металла шва и околошовной зоны в интервале высоких температур, усугубляя этим рост зерна. По этой причине сварку плавлением  $\alpha$ -, псевдо- $\alpha$ -сплавов выполняют при минимально возможной погонной энергии. При сварке двухфазных ( $\alpha + \beta$ )-сплавов погонную энергию увеличивают [2].

Специфические физические свойства титана определяют ряд технологических особенностей сварки. Так, вследствие высокого коэффициента поверхностного натяжения титана (1,5-1,6 Н/м) при температуре плавления 1668 °С наряду с низкой вязкостью расплава (4–7 мПа·с) [3], чтобы избежать прожогов, необходима особо тщательная сборка деталей под сварку и контроль тепловложения в зависимости от пространственного положения сварки.

При сварке титановых сплавов используются аргодуговая (GTAW), лазерная, электронно-лучевая, реже плазменная и трением с перемешиванием. Однако наибольшее распространение получил GTAW-процесс с подачей присадочного материала в среде инертного газа.

На основе численного анализа сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов (GTAW-процесс) с подачей присадочного материала (использовался цифровой двойник на платформе CAE WeRTSim [4, 5]) определены параметры режима орбитальной сварки тонкостенной титановой трубки и колена для обеспечения требуемого провара и размеров профиля сварного шва. В статье отражены результаты НИР, выполненной в интересах одного из судостроительных предприятий, по оптимизации параметров режима сварки элементов титанового теплообменника.

**Постановка задачи**

Сварной шов (№1-55 Н1 ГОСТ 16037-80) соединяет трубку диаметром 10 мм и толщиной стенки 1,5 мм с коленом с внешним диаметром в зоне соединения 18 мм и толщиной стенки 3 мм (рис. 1). Материал трубки – псевдо- $\alpha$ - титановый сплав ПТ-7М УМЗ (ТУ 24.45.30-202-07516250-2018), колена – псевдо- $\alpha$ - титановый сплав ПТ-3В гр. I (ОСТ1-92062-90).

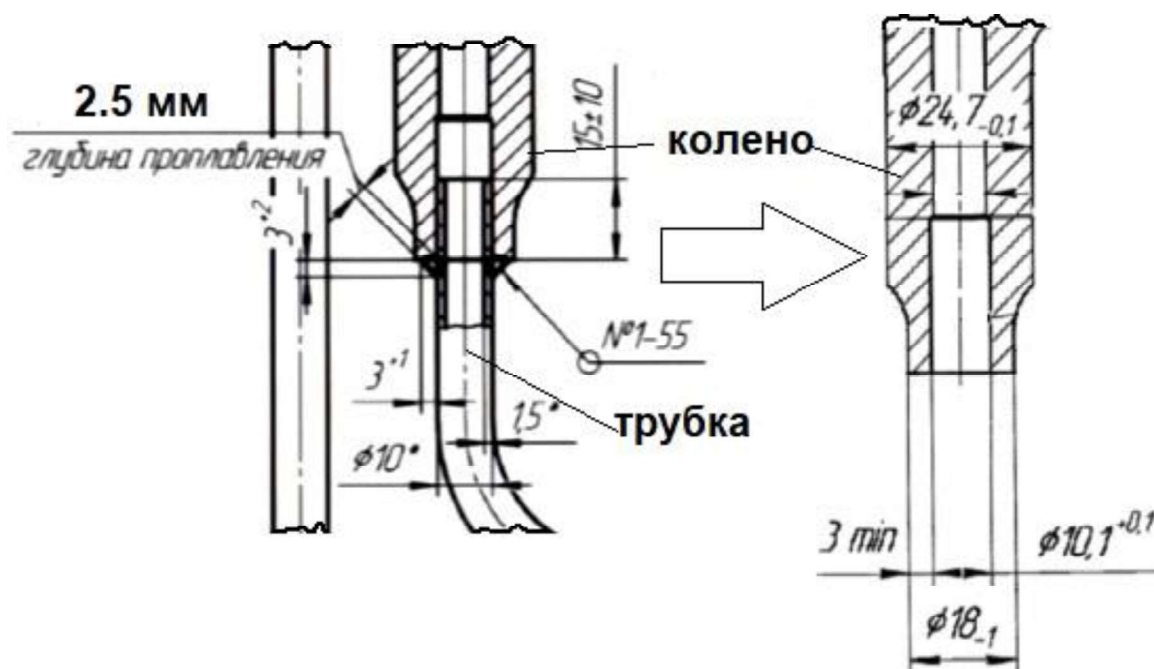


Рис. 1. Фрагмент эскиза объекта расчёта

Приварка трубки к колёну осуществляется с помощью нахлёсточного соединения Н1 по ГОСТ 16037-80 (рис. 2), круговым угловым швом в неповоротном исполнении за два полуоборота из позиции 6 ч. в позицию 12 ч. Требования к показателям качества: катет шва  $(2...3)^{+2}$  мм, глубина проплавления 2,4–2,5 мм.

Конструкционные элементы и размеры		Способ сварки	s	K +2
подготовленных кромок свариваемых деталей	сварного шва			
		Г	1,0	2
			1,5	
		ЗП; ЗН;	2,0	3
			2,5	
		Р; Г	3,0	4
			3,5	
4,0	5			
5,0		7		

Рис. 2. Фрагмент из ГОСТ 16037-80 для соединения Н1

В соответствии с технологией завода сварка осуществляется ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом с присадочным материалом не в импульсном режиме, с использованием следующих материалов:

- присадочная проволока ПТ-7Мсв, Ø1,6 ГОСТ 27265-87;
- защитный газ – аргон высшего сорта ГОСТ 10157;
- вольфрамовый электрод СВИ-1 Ø3,0 мм ТУ 48-19-221.

Требуется, соблюдая ограничения технологии завода, определить минимальное количество проходов и параметры режима процесса сварки элементов титанового теплообменника, удовлетворяя при этом требованиям ГОСТ 16037-80. Задача была решена с помощью цифрового двойника процесса GTAW, являющегося частью (самостоятельным ядром) платформы CAE WeRTSim, использующего для достижения результатов исследования настоящей работы базы данных материалов и вычислительные алгоритмы имитационного моделирования, описанные в [4, 5].

### Описание цифрового двойника процесса GTAW-сварки

Цифровой двойник процесса GTAW-сварки представляет собой сущность, которая на основе входных данных (параметров режима, свойств материалов), виртуальной модели сварочного процесса и алгоритмов управления вычислительными экспериментами над моделью создаёт цифровую копию реального технологического процесса. Ядром цифрового двойника процесса является имитационная модель (численное решение систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных) сварки неплавящимся электродом в инертном газе (100% Ar) с подачей присадочного материала. Имитационная модель основана на работах [6, 7], в которых были изложены основные дифференциальные уравнения численной модели GTAW-процесса в нестационарном режиме коррозионно-стойких сталей. В настоящей работе эти уравнения были адаптированы для трубок малого диаметра из титанового сплава с учётом новых граничных условий. Учитываются энергетические параметры сварочной дуги вольфрамового электрода, нагрев основного и присадочного материалов, их плавление, формирование многопроходного сварного шва в разных пространственных положениях.

Геометрия свариваемого кольцевого стыка и уравнения модели описаны в цилиндрической системе координат  $(r, \varphi, l)$  (рис. 3). Так как размеры свариваемых деталей много больше размеров шва, имитационное моделирование выполнено в ограниченной кольцевой области с поперечным сечением  $M$ . Кроме того, для более точного учёта воздействия источника теплоты использовали вспомогательную специальную систему координат  $(x, y, z)$ , центр которой совпадает с точкой сопряжения свариваемых деталей, повернутых относительно оси деталей на угол  $\pi/4$  (рис. 4).

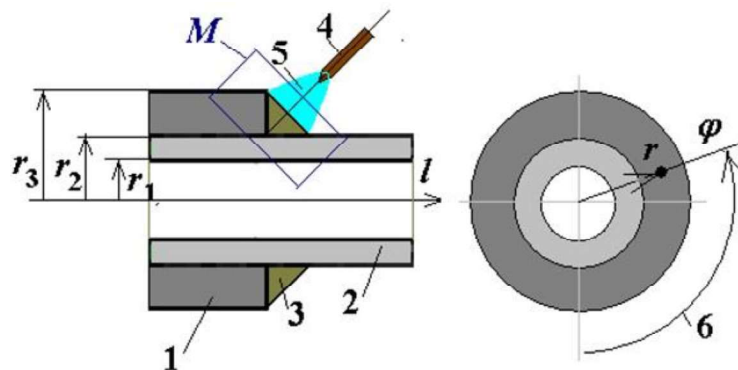


Рис. 3. Конструкция свариваемого стыка в положении выполнения сварки:  
 $l$  – колено, 2 – трубка, 3 – шов, 4 – электрод, 5 – дуга, 6 – направление сварки,  
 $M$  – поперечное сечение области моделирования формирования шва

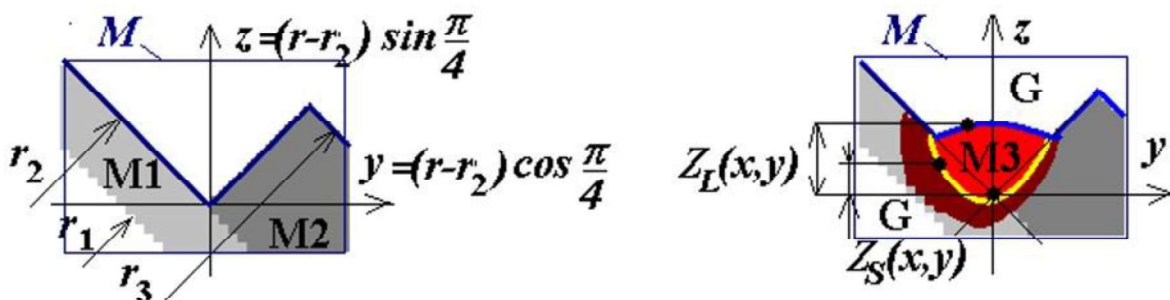


Рис. 4. Поперечное сечение и строение области моделирования  $M$ : вспомогательная система координат  $(x, y, z)$ , поверхности сварочной ванны  $Z_L$  и проплавления  $Z_S$ ,  
 $r_1, r_2, r_3$  – радиальные параметры трубки и колена

Физические процессы моделируются в гетерогенном пространстве, включающем металл свариваемых деталей ( $M1, M2$ ), металл формирующегося сварного шва  $M3$ , газовую среду –  $G$  (см. рис. 4). Причём, размеры зоны моделирования ограничены заданными размерами катета шва  $K$ :  $y_m = 4K, z_m = 3K, x_m = 2\pi r_3^2$ .

*Подмодель источников и стоков тепла.* Источником теплоты является сварочная дуга, создающая тепловой поток на поверхности металла  $Z_L(x, y)$ . Этот тепловой поток описан в виде нормального Гауссова распределения на поверхности  $Z_L(x, y)$  во вспомогательной системе координат следующим образом:

$$q(x, y) = \frac{3IU\eta}{\pi r_{arc}^2} \exp\left(-\frac{3}{r_{arc}^2}((x - x_{arc})^2 + (y - y_{arc})^2)\right), \quad (1)$$

где  $I$  – ток дуги,  $U$  – напряжение дуги,  $\eta$  – эффективный КПД,  $r_{arc}$  – эффективный радиус активного пятна нагрева дуги.

Во время сварки дуга перемещается со скоростью  $v_w$  из точки  $x = 0$  в точку  $x = x_m$ , соответственно её координата определяется как  $x_{arc} = v_w \cdot t$ .

На поверхностях металла, контактирующих с газовой средой, имеется конвективная и радиационная теплоотдача (см. рис. 4)

$x, y, z \in G \cap (M1 \cup M2 \cup M3)$ .  $q(x, y, z) = -b(T(x, y, z) - T_0) - k_T(T(x, y, z)^4 - T_0^4)$ , (2) где  $b$  – коэффициент конвективной теплоотдачи,  $k_T = 5,7 \cdot 10^{-8}$  Вт/(см<sup>2</sup>·°C<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана,  $T_0$  – температура газовой среды.

*Термодинамическая модель сварочной ванны (расплава).* Во всех точках пространства моделирования состояние вещества определяется решением нестационарного уравнения сохранения энергии в подвижной системе координат:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}[\lambda(T) \text{grad}T] + (\vec{v}, \text{grad}H) + Q_a, \quad (3)$$

где  $H$  – энтальпия вещества;  $\vec{v}$  – вектор конвективной скорости движения расплава;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности (зависящий от температуры);  $Q_a$  – интенсивность источников (стоков) теплоты в рассматриваемой точке пространства.

Область моделирования  $M$  ограничена по краям плоскостями, пересекающими сплошной металл. Температуры этих плоскостей определяются линейной экстраполяцией решения уравнения теплопроводности:

$$z = 0 \cup z = z_m, \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0; y = 0 \cup y = y_m, \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0. \quad (4)$$

*Модель формирования поверхностей расплава.* Координаты поверхности расплава  $Z_L(x, y)$  определяются из уравнения равновесия электродинамического давления  $p_I$  плазмы дуги, гравитационного  $p_g$  и внутреннего  $p_v$  давлений в расплаве, которые уравниваются капиллярным давлением  $p_\sigma$ , определяемым кривизной поверхности  $Z_L(x, y)$ :

$$p_I + p_g + p_v = p_\sigma. \quad (5)$$

Электродинамическое давление определяется магнитным потоком, который создаётся током дуги  $I$ . Распределение плотности тока в анодном пятне дуги определено как

$$p_I = \frac{3k_I I^2}{4\pi^2 R_{arc}^2} \exp\left(-\frac{3}{R_{arc}^2}((x - x_{arc})^2 + (y - y_{arc})^2)\right), \quad (6)$$

где  $R_{arc} \approx 0,71 r_{arc}$  – силовой радиус пятна нагрева;  $k_I = 12,56 \cdot 10^{-7}$  Н/(см<sup>2</sup>·A<sup>2</sup>) – электродинамическая постоянная.

Гравитационное давление определяется разностью между максимальной высотой поверхности  $Z_{max} = \max_{x, y=var} Z_L(x, y)$  и положением точки этой поверхности (рис. 5).

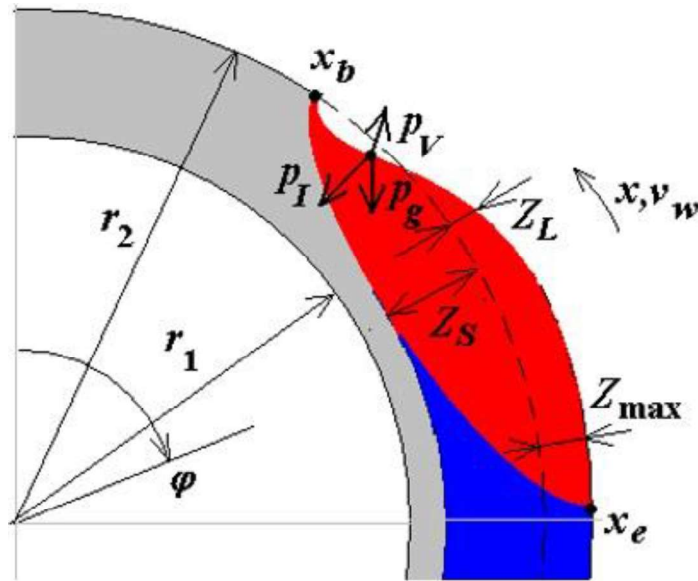


Рис. 5. Изменение пространственного положения при орбитальной сварке (сектор 3 ч-12 ч, точка  $x_b$  с наивысшей потенциальной энергией)

Причём при сварке кольцевого шва по траектории 6 ч  $\rightarrow$  12 ч пространственное положение изменяется от потолочного до нижнего:

$$p_g = \rho \cdot g \cdot (z_{max} \cos \varphi - (x_b - x_e) \sin \varphi - Z_L(x, y)), \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность расплава,  $g = 981 \text{ см/с}^2$  – ускорение свободного падения,  $x_b, x_e$  – координаты начала и конца сварочной ванны (объёма расплавленного металла).

Внутреннее давление  $p_v$  в жидком металле определяется балансом масс вещества, поступающего с присадочной проволокой и находящегося в сварочной ванне и в сварном шве. Так как внутреннее давление влияет на расположение поверхности расплава, то баланс достигается решением вариационной задачи:

$$\int_0^{y_m} \int_0^{x_m} Z_L(x, y) dx dy \xrightarrow[p_v \rightarrow var]{\frac{\pi d_{пр}^2}{4}} \int_0^t v_{пр} dt, \quad (8)$$

где  $d_{пр}, v_{пр}$  – диаметр и скорость подачи присадочной проволоки.

Капиллярное давление определяется кривизной поверхности расплава. При небольших прогибах поверхности  $Z_L(x, y)$ :

$$p_\sigma = \sigma \left( \frac{\partial^2 Z_L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z_L}{\partial y^2} \right), \quad (9)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения. Для расплава титана в целях моделирования  $\sigma = 0,016 \text{ Н/см}$  [2].

После подстановки слагаемых давления в уравнение равновесия получаем дифференциальное уравнение, решение которого выполняется для части поверхности  $Z_L(x, y)$ , температура которой превышает температуру плавления. Оставшаяся часть этой поверхности (твёрдый металл) является граничным условием для уравнения равновесия. Так как расположение сварочной ванны изменяется во времени, полученное решение фиксируется на фронте кристаллизации, что соответствует формированию наплавленного валика.

*Численное решение.* Полученная модель представляет собой систему основных уравнений (1–9), в состав которой входят дифференциальные уравнения в частных производных, решаемые методом конечных разностей на сопряжённых сетках (рис. 6).

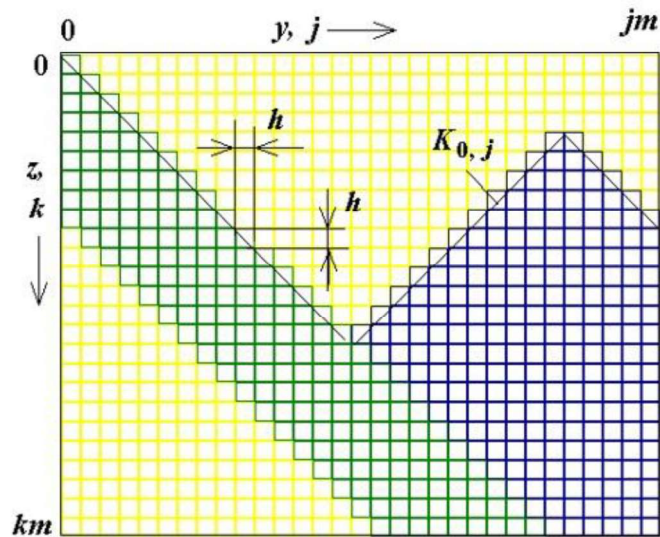


Рис. 6. Поперечное сечение сетки численного решения уравнений модели: зелёные – контрольные объёмы  $K_{ij}$  (трубка); синие – КО (колено); жёлтые – КО – газовая среда;  $h$  – шаг сетки по координатам

*Свойства материалов.* Теплофизические свойства материалов в зависимости от температуры (теплопроводность  $\lambda(T)$ , энтальпия  $H(T)$ ), используемые в модели, приведены на рис. 7.

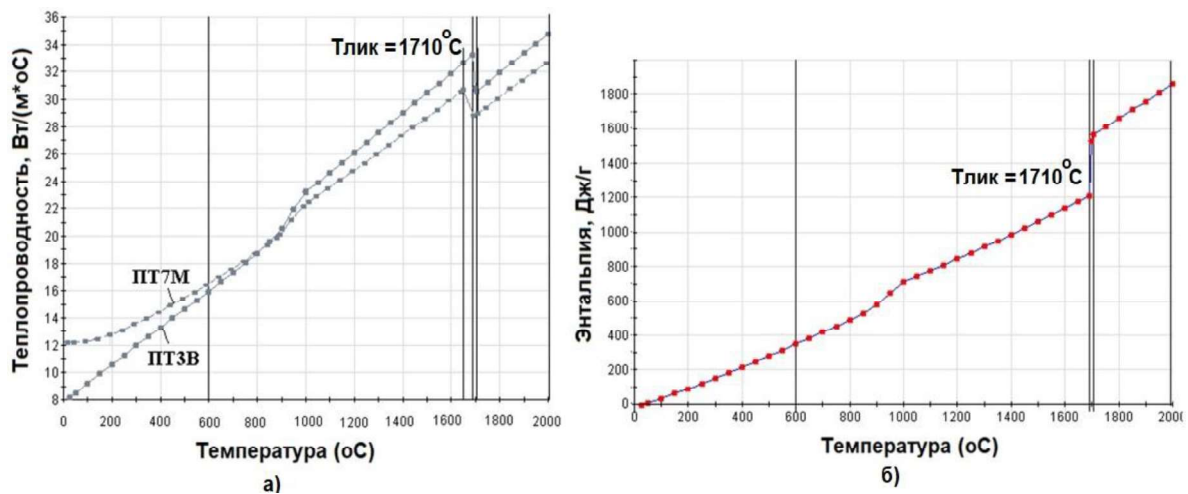


Рис. 7. Зависимость теплопроводности от температуры (а) и энтальпии от температуры (б) титановых сплавов ПТ7М и ПТ3В

### Определение параметров режима сварки

Особенностями сварки данного соединения являются малые размеры, чувствительность формы профиля шва к пространственному положению и скорости сварки, а также к поперечному смещению электрода от центра стыка  $\Delta$  [7].

Для определения параметров режима, позволяющих получить сварной шов с требуемыми геометрическими характеристиками (проваром и катетами), проводили многократное численное моделирование (параметрический анализ) орбитальной сварки при разных значениях ( $I, U, v_w, v_{пр}, \Delta$ ) на цифровом двойнике процесса GTAW-сварки вдоль периметра стыка, из потолочного положения 6 ч в нижнее положение 12 ч.

При этом выяснилось, что получить шов с заданным катетом шва и проваром (см. рис. 2) за один проход при ручной GTAW-сварке затруднительно. Для выполнения заданных требований к размеру шва необходимо произвести минимум 2 прохода.

Вначале при постоянных значениях сварочного тока и скорости сварки исследовали влияние поперечного смещения электрода от плоскости симметрии стыка и скорости сварки на форму профиля сечения первого прохода (рис. 8 и 9). Видно, что при расположении электрода по центру стыка (0 мм) стенка трубки проплавляется насквозь, что недопустимо. При смещении в сторону колена на 1,5 мм металл трубки не плавится вовсе. Совместное проплавление стенок трубки и колена при первом проходе обеспечивается только при смещении на 1,0 мм в сторону колена.

Форма профиля сварного шва непостоянна вследствие постепенного прогревания металла, окружающего стык. При этом, учитывая ограничения технологии сварки на предприятии и нестационарность теплового процесса, влияние пространственного положения можно ослабить только изменением скорости сварки, рис. 10. В данном случае наиболее стабильное формирование первого прохода обеспечено при прогреве металла в начале шва в потолочном положении (6 ч.) в течении 0,5 с и последующем повышении скорости сварки в течении 1 с от 3,5 до 6 мм/с (рис. 10, в).

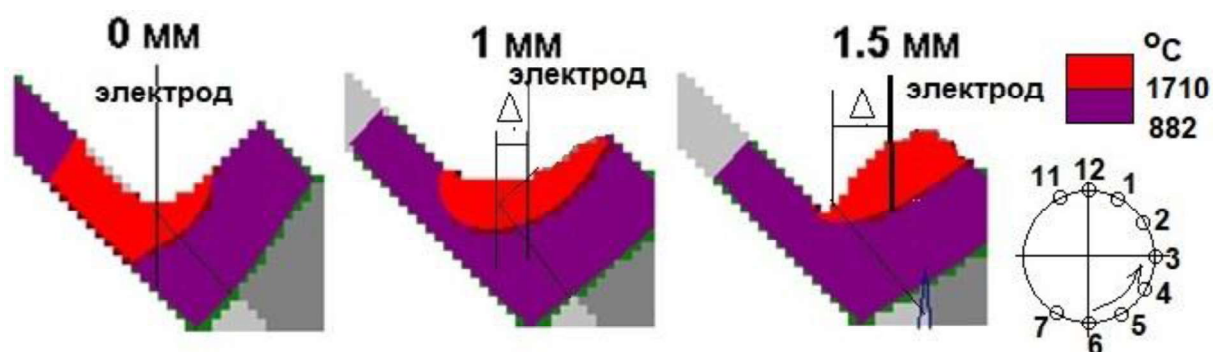


Рис. 8. Формирование профиля поперечного сечения первого прохода при разном смещении электрода от плоскости симметрии стыка:

$I = 70 \text{ A}$ ,  $v_w = 6 \text{ мм/с}$ , пол. 3 часа

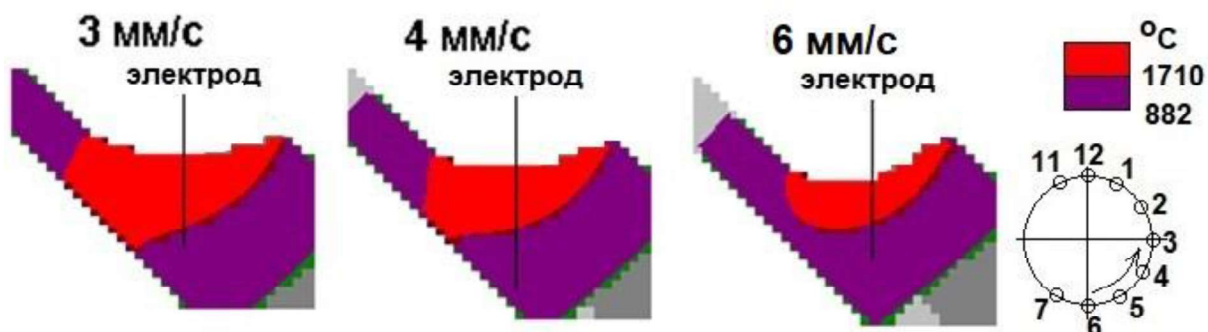


Рис. 9. Формирование профиля поперечного сечения первого прохода при разной скорости сварки:

$I = 70 \text{ A}$ ,  $\Delta = 0$ , пол. 3 часа

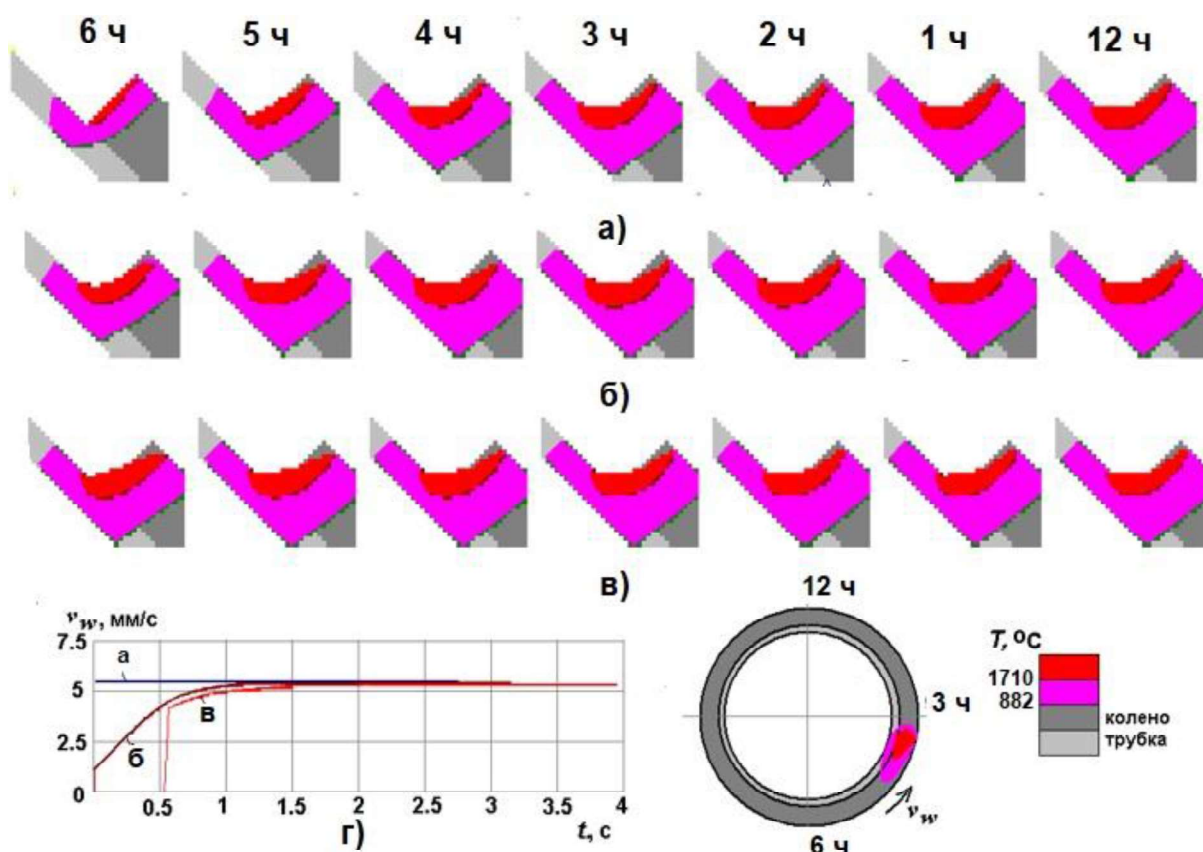


Рис. 10. Влияние характера изменения скорости сварки ( $v$ ) на формирование первого прохода (а,б,в) при сварке 6 ч  $\rightarrow$  12 ч

Учитывая программу изменения скорости сварки (рис. 10, в), форма профиля (размеры) шва первого прохода будет меняться при сварке следующим образом (рис. 11).

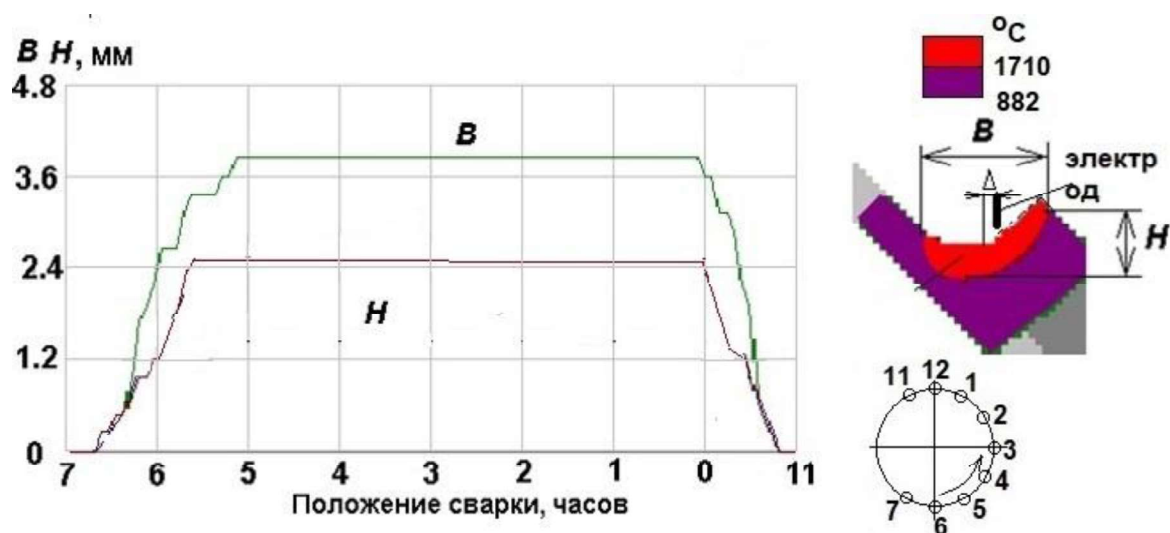


Рис. 11. Изменение размеров валика первого прохода при сварке из положения 7 ч в положение 11 ч (с учётом перекрытия при сварке второй половины):

$$I = 70 \text{ A}; v_w = 0 \rightarrow 3,5 \rightarrow 6,0 \text{ мм/с}; \Delta = + 1,0 \text{ мм}$$

Для одновременного обеспечения заданных значений катетов сварного шва и глубины провара стенки трубки, сварка второго прохода выполняется с подачей присадочной проволоки со скоростью 10 мм/с, что, в свою очередь, увеличивает массу сварочной ванны и усиливает влияние положения сварки (рис. 12). При этом необходимо учесть затраты тепла на плавление проволоки. Значение тока дуги в этих условиях было определено 80 А. Для формирования требуемых катетов шва второй проход должен быть выполнен со смещением электрода в направлении трубки  $\Delta = -0,8$  мм. Скорость сварки при этом должна изменяться так же, как и для первого прохода (рис. 10, в).

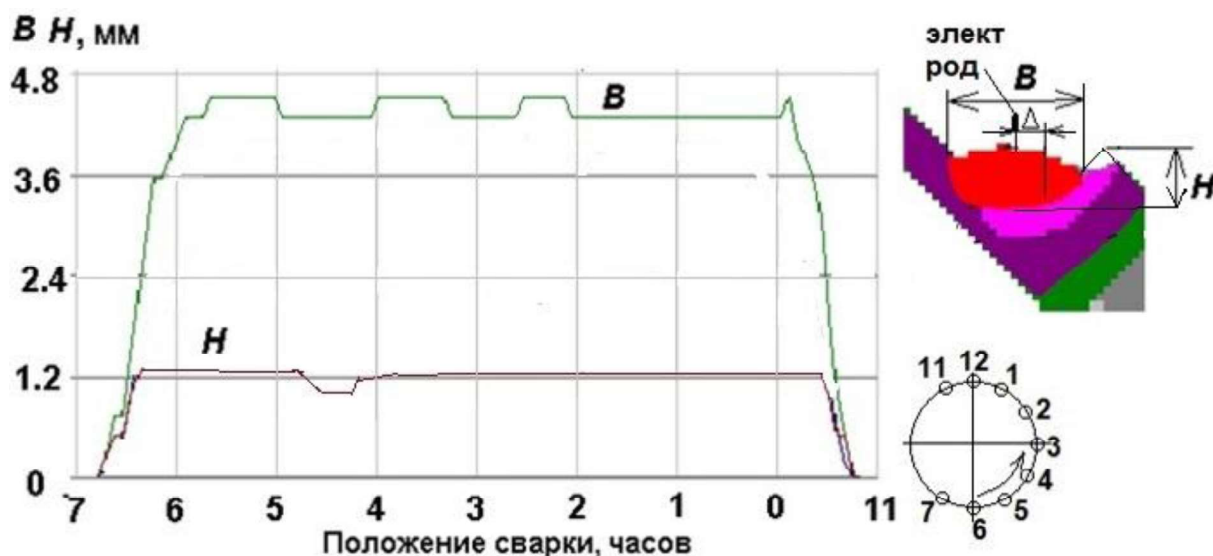


Рис. 12. Изменение размеров валика первого прохода при сварке из положения 7 ч в положение 11 ч (с учётом перекрытия при сварке второй половины):  
 $I = 80$  А;  $v_w = 0 \rightarrow 3,5 \rightarrow 6,0$  мм/с;  $\Delta = -0,8$  мм

Результирующий двухпроходный шов изображён на рис. 13.

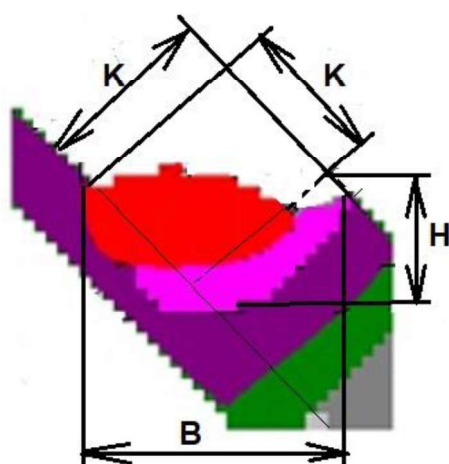


Рис. 13. Профиль результирующего сварного шва (схематично):  
 $B = 5,5$  мм;  $H = 2,5$  мм;  $K = 2,6; 3,2$  мм (средние значения для положений 6 ч  $\rightarrow$  12 ч)

Параметры режима по проходам представлены в таблице.

### Расчитанные параметры режима сварки<sup>1</sup>

Проход	$I$ , А	$U$ , В / $L$ , мм	$v_w$ , мм/с	$v_{пр}$ , мм/с	$\Delta$ , мм
1	70	13,3 / 3,0	0 → 3,5 → 6,0	0,0	+1,0 (на колено)
2	80	13,3 / 3,0	0 → 3,5 → 6,0	10,0	-0,8 (на трубку)

Помимо размеров профиля сварного шва важным показателем качества сварки титановых сплавов является время пребывания металла в диапазоне температур от плавления 1710 °С до рекристаллизации 882 °С (см. также Введение) (рис. 14).

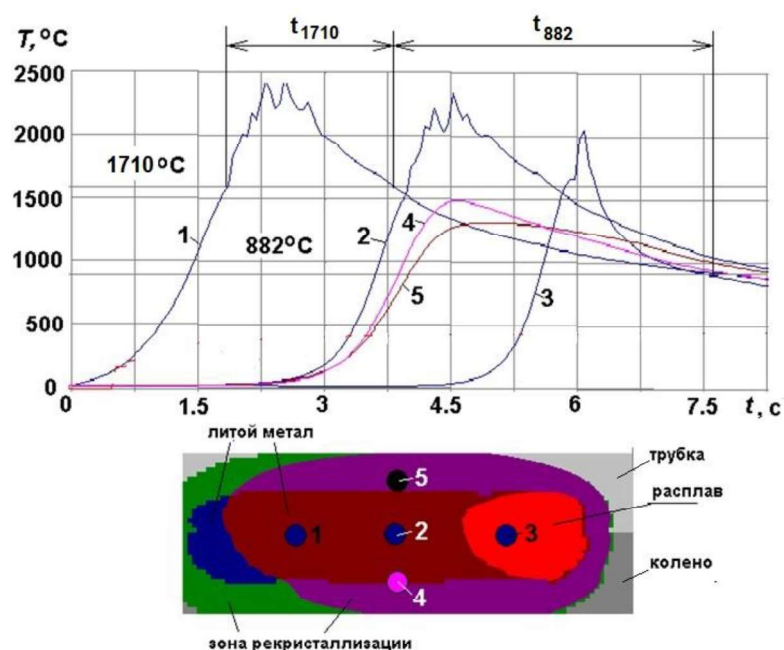


Рис. 14. Термические циклы при сварке второго прохода в некоторых точках (1...5) шва и определение длительности пребывания металла в диапазоне температур от плавления  $t_{1710}$  до рекристаллизации  $t_{882}$

### Выводы

На основе численного анализа процесса сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов с подачей присадочного материала с помощью цифрового двойника GTAW-процесса на платформе CAE WeRTSim определена одна из возможных комбинаций параметров режима орбитальной сварки (см. таблицу) тонкостенной титановой трубки и колена, с обеспечением требуемого провара и размеров профиля сварного шва в соответствии с ГОСТ 16037-80.

Результаты получены с применением алгоритма «Пакетная обработка», с учётом ограничений на геометрические размеры шва, что позволило свести к минимуму экспериментальную отработку (подбор) параметров режима и расход материалов. В дальнейшем планируется расширение функционального ядра цифрового двойника GTAW-процесса посредством разработки суррогатных моделей численного моделирования и нейронных сетей для ускорения времени расчётов и принятия технологических решений в режиме реального времени.

<sup>1</sup>  $I$  – ток дуги,  $U$  – напряжение дуги,  $v_w$  – скорость сварки,  $v_{пр}$  – скорость подачи присадочной проволоки,  $\Delta$  – поперечное смещение электрода от центра стыка.

## Литература

1. **Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П.** Технология и оборудование сварки плавлением. М., «Машиностроение», 1977. 432 с.
2. **Гуревич С.М.** Справочник по сварке цветных металлов. Киев: Наукова думка, 1981. 608 с.
3. **Ntonti, E., Sotiriadou, S., Assael, M.J. et al.** Reference Correlations for the Density and Thermal Conductivity, and Review of the Viscosity Measurements, of Liquid Titanium, Zirconium, Hafnium, Vanadium, Niobium, Tantalum, Chromium, Molybdenum, and Tungsten. *Int J Thermoph* 45, 18 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03305-z>.
4. Применение пакета имитационного моделирования WeRTSim для инженерного анализа технологий сварки / **А.В. Масленников, И.В. Дикшев, М.С. Медведков, В.А. Ерофеев.** // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2025): Сборник трудов 12 Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Санкт-Петербург, 15-17 октября 2025 года. С. 775-785.
5. **Дикшев И.В., Ерофеев В.А., Масленников А.В., Медведков М.С.** Применение системы имитационного моделирования для инженерного анализа сварки судовых корпусных конструкций // Новые технологии в судостроении НТС-2025: Сборник трудов отраслевой научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 20-21 ноября 2025. СПб.: АО «ЦТСС». С. 58-67.
6. **Судник В.А., Рыбаков А.С.** Программное обеспечение для проектирования процессов аргонодуговой сварки на базе модели формирования шва // САПР и экспертные системы в сварке: Изв. ТулГУ. Тула, 1995. С. 60-75.
7. **Полосков С.И., Ерофеев В.А., Масленников А.В.** Прогнозирование качества сварных соединений на основе физико-математической модели процесса орбитальной сварки // Сварочное производство. 2005. №2. С. 8-16.