

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТЕЛЕ ТРУБЫ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА ПРИ ПРИВАРКЕ ОТВОДА

Инженеры ПЁТУХ П. П., КРАСНЕВСКИЙ С. М., СОРОХАН Ц. Д.,  
ГЕРАСИМЧИК И. И., АЛЕШИН Н. Ф.

*ПО «Белтрансгаз»*

При осуществлении врезок в действующий газопровод без прекращения перекачки газа основными проблемами являются обеспечение безопасности проведения работ вследствие возможного нарушения целостности трубопровода и получение требуемого качества сварных соединений. Наличие внутреннего давления в газопроводе при нерациональных режимах приварки способно вызвать аварийное разрушение трубопровода, а также оказывает охлаждающее действие газового потока на расплавленную зону и зону термического влияния (ЗТВ) при сварке. В результате этого при интенсивном охлаждении (высокие скорости течения газа в трубе) в шве и околошовной области могут образовываться хрупкие структуры, что может привести к нарушению прочностных свойств сварного соединения.

Задача обеспечения высокого качества шва при интенсивном охлаждении зоны сварки является относительно сложной. Ее решение требует, прежде всего, определения термических параметров сварки (максимальная температура, скорости охлаждения и нагрева, длительность выдержки в опасных интервалах температур и др.) и степени влияния на них изменения режимов сварки (скорость движения электрода, предварительный подогрев и др.). Остановимся на режимах, обеспечивающих требуемые термические параметры.

Для теоретического определения пространственно-временной картины температурного поля при приварке отвода в общем случае необходимо решить трехмерное нестационарное нелинейное уравнение теплопроводности. При этом полная задача разделяется на две: распространение теплоты по основному газопроводу и теплоперенос в теле патрубка. Для упрощения ее решения пренебрегаем потерями теплоты сварки через отводящую трубу патрубка и рассматриваем задачу о распространении теплоты и распределении температуры в магистральной трубе при движении по ее внешней поверхности теплового источника.

Данные по решению такой задачи свидетельствуют о достаточно серьезных вычислительных проблемах [1]. Трехмерная постановка задачи требует длительного времени расчета и использования мощных ЭВМ. В то же время градиент температуры в сечении, поперечном движению сварочного электрода, обычно значительно выше, чем в продольном направлении. Это позволяет при расчетах пренебречь переносом теплоты в данном направлении. Такая постановка дает возможность снизить вычислительное время

при внесении не очень больших погрешностей в конечные результаты и использовать для проведения расчетов персональную ЭВМ.

Исходя из сказанного выше, можно сформулировать следующее модельное представление тепловых процессов при сварке на трубопроводе.

Рассматривается плоская пластина толщиной  $\delta$ , по одной из поверхностей которой со скоростью  $v_{св}$  движется источник теплоты (по оси  $x$ ). В движущейся с электродом системе координат уравнение переноса теплоты имеет вид

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - v_{св} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right); \quad (1)$$

начальное условие

$$T(x, y, z, 0) = T_n, \quad (2)$$

где  $z$  – координата по толщине пластины;  $c$  – теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала трубы, причем  $\lambda$  является функцией температуры  $T$ , т. е. уравнение (1) нелинейное.

На внутренней поверхности пластины зададим граничное условие 3-го рода

$$\frac{\partial T(\delta, t)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{\lambda} [T(\delta, t) - T_r], \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $T(\delta, t)$ ,  $T_r$  – температуры стенки и газа соответственно.

Для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  примем согласно данным [2], что число Нуссельта  $Nu = \alpha D / \lambda_r = 3,66 (D - \text{внутренний диаметр трубы})$ .

Для задания граничного условия на внешней поверхности пластины необходимо знать параметры сварочной ванны. Общепринято [1] представление сварочной ванны в виде двойного эллипсоида (рис. 1) с нормальным распределением плотности теплового потока, задание которого и является вторым граничным условием.

Для определения геометрических параметров эллипсоида воспользуемся экспериментальными данными, характеризующими размеры сварочной ванны.

Из [3] следует, что при ручной дуговой сварке плавящимся электродом (РДСПЭ) в среднем ~20 % мощности, выделяемой на сварочной дуге  $P_{св}$ , рассеивается в окружающей среде и около 12 % идет на расплавление металла. Следовательно,  $(0,65 \dots 0,68)P_{св}$  идет на нагрев металла.

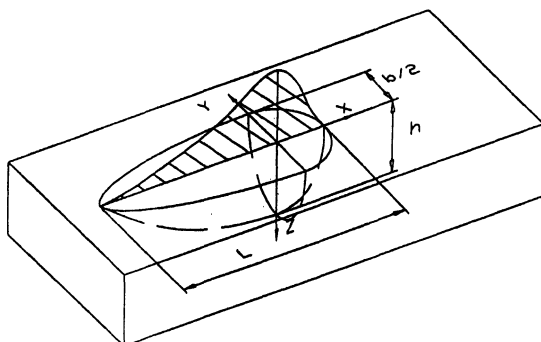


Рис. 1. Схема сварочной ванны и расположение координатных осей

Используем формулу для площади поперечного сечения расплавленной зоны  $F_{\text{пл}}$  [3]

$$F_{\text{пл}} = \frac{1}{\rho \Delta H_{\text{пл}}} \eta \frac{P_{\text{св}}}{v_{\text{св}}}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность твердого металла;  $\Delta H_{\text{пл}}$  – энтальпия металла при температуре плавления (с учетом теплоты плавления);  $\eta$  – полный тепловой КПД процесса расплавления металла;  $v_{\text{св}}$  – скорость сварки.

Для нахождения глубины  $h$  и ширины  $b$  плавления (рис. 1) воспользуемся опытными данными для величины отношений

$$\frac{F_{\text{пл}}}{hb} = \varphi, \quad \frac{h}{b} = \theta \quad (5)$$

и величины  $\eta$ .

Среднее значение  $\varphi$  при РДСПЭ равняется  $\cong 0,6$ , отношение  $\theta \cong 0,2$ , а  $\eta = 0,11$  [3].

Длина сварочной ванны определяется из выражения

$$L = g P_{\text{св}}. \quad (6)$$

Коэффициент  $g$  зависит от мощности дуги и уменьшается с увеличением диаметра электрода и скорости сварки. Экспериментально установлено, что при сварке покрытыми электродами значение  $g$  при токах 100...150 А составляет  $\cong 3,5 \cdot 10^{-6}$  м/Вт.

При скорости сварки 2 мм/с использование (4)–(6) и приведенных опытных данных дает для размеров сварочной ванны следующие значения:

$$\begin{aligned} I = 100 \text{ А}; h = 2,05 \text{ мм}; b = 10,2 \text{ мм}; L = 12,3 \text{ мм}; \\ I = 150 \text{ А}; h = 2,45 \text{ мм}; b = 12,2 \text{ мм}; L = 14,3 \text{ мм}. \end{aligned}$$

При больших скоростях сварки форма сварочной ванны становится более вытянутой.

В расчете сварочная ванна задавалась в виде эллипсоида с полуосями, равными  $b/2$ ,  $h/2$ ,  $L/2$ . В качестве граничного использовалось условие постоянства температуры поверхности сварочной ванны и равенства ее температуре плавления металла трубы

$$T(S, t) = T_{пл}. \quad (7)$$

Было выполнено численное решение (1) с краевыми условиями (2), (3), (7). Применялся метод конечных элементов с использованием стандартной программы. Теплофизические и термодинамические свойства и их температурные зависимости заимствовались из [4, 5]. Толщина пластины  $\delta$  равнялась 12 мм.

Расчеты проводились для двух режимов сварки:

1)  $v_{св} = 1,5$  мм/с;  $P_{св} = 2,2$  кВт;

2)  $v_{св} = 2$  мм/с;  $P_{св} = 3,1$  кВт.

Результаты в виде временной зависимости температуры для двух значений  $z$  и  $y$  (расстояние от оси шва) представлены на рис. 2, 3.

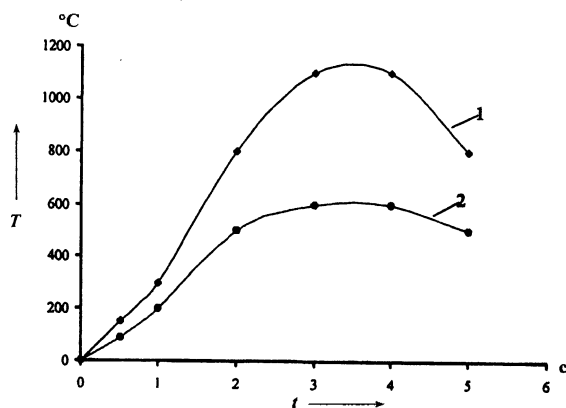


Рис. 2. Изменение температуры в точках пластины, лежащих на расстоянии  $y$  от оси шва:  $z = 4$  мм;  $v_{св} = 1,5$  мм/с;  $P_{св} = 2,2$  кВт; 1 –  $y = 2$  мм; 2 –  $y = 5$  мм

Анализ решения и результатов показал, что задание различного вида граничных условий на внешней поверхности пластины (форма сварочной ванны) в малой степени сказывается на расчете распределения максимальной температуры по толщине пластины под сварочной ванной уже на расстоянии  $z \cong 2$  мм от нее, т. е. в той зоне, которая в основном определяет прочность ослабленного сваркой участка трубы, поскольку здесь реализуются более низкие температуры. На уровень температур в этой зоне существенно влияют граничные условия на внутренней поверхности – условия теплообмена с газовой средой.

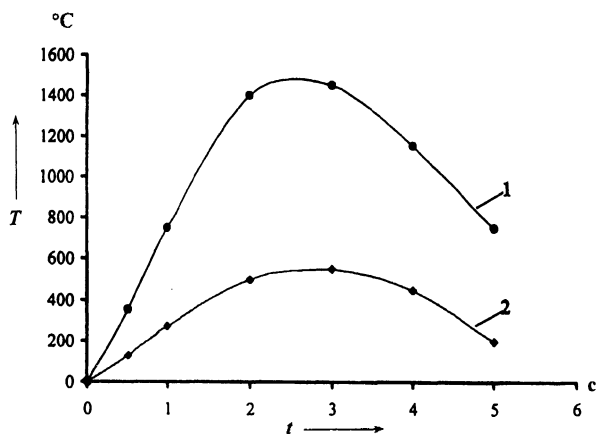


Рис. 3. Изменение температуры в точках пластины, лежащих на расстоянии  $z$  от оси шва:  $y = 0$ ;  $v_{св} = 2$  мм/с;  $P_{св} = 3,1$  кВт;  $1 - z = 4$  мм;  $2 - z = 8$  мм

Другой особенностью решения является слабое влияние скорости движения источника нагрева на поле температур при  $v_{св} = 2 \dots 6$  мм/с, характерной для ручной дуговой сварки.

Эти особенности решения системы (1)–(3), (7) и тот факт, что определяющее влияние на прочность ослабленной зоны оказывает распределение температуры только по толщине пластины, позволяют при расчете распределения температуры  $T(\delta, t)$  ограничиться одномерным приближением. Такой подход использовался также в [6].

В этом случае рассматривается лишь та часть стенки, которая располагается непосредственно под сварочной ванной. Для этой зоны перенос теплоты от дуги происходит преимущественно в одном направлении – к противоположной поверхности. Данное приближение не учитывает, естественно, теплопереноса в других направлениях. Однако учет этих потерь приведет к снижению нагрева и уровня температур в зоне под сварочной ванной, т. е. данное представление при расчете будет приводить к несколько завышенным значениям температуры по толщине стенки. Такая расчетная модель весьма удобна для определения времени прожога при сварочных работах на газопроводе.

В данном случае уравнение переноса теплоты будет иметь вид

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} \quad (t > 0, 0 < z < \delta_1) \quad (8)$$

с начальным условием

$$T(z, 0) = T_n. \quad (9)$$

Здесь толщина стенки  $\delta_1$  равняется разности между ее начальной толщиной и глубиной сварочной ванны. Полагается, что внешняя поверхность

пластины находится при температуре плавления, т. е. имеет место граничное условие 1-го рода

$$T(0, t) = T_{\text{пл}}. \quad (10)$$

На внутренней поверхности стенки зададимся граничным условием 3-го рода

$$\lambda \frac{\partial T(\delta, t)}{\partial z} = -a[T(\delta, t) - T_r], \quad (11)$$

где  $T_r$  – температура газа, причем  $T_r = T_n$ .

Решение системы (8)–(11) имеет вид [7]

$$\frac{T(z, t) - T_n}{T_{\text{пл}} - T_n} = \frac{\text{Bi} \frac{z}{\delta_1}}{\text{Bi} + 1} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin v_n \frac{z}{\delta_1} \exp(-v_n \text{Fo}), \quad (12)$$

где  $A_n = \frac{2\text{Bi}}{\sin v_n (v_n^2 + \text{Bi}^2 + \text{Bi})}$ ;  $\text{Bi} = \frac{\alpha \delta_1}{\lambda}$  – критерий Био;  $\text{Fo} = \frac{at}{\delta_1^2}$  – критерий

Фурье.

Значение коэффициента теплоотдачи определялось исходя из выражения для числа Нуссельта  $\text{Nu} = \alpha D / \lambda_r$ .

Результаты расчета распределения температуры для различных условий по толщине пластины под сварочной ванной по (12) приведены в табл. 1. Отмечается достаточно быстрый прогрев зоны под сварочной дугой (для случая неподвижного источника теплоты). Время достижения на внутренней поверхности трубы температуры ~1700 К можно принять за время прожога стенки. Как видно из таблицы, оно составит для тока 100 А ~11 с при  $\delta = 12$  мм и ~3 с для  $\delta = 7$  мм. Время прожога стенки несколько снижается при токе 150 А. Используемая расчетная модель приводит к заниженным значениям времени прожога, т. е. указанные данные являются нижним пределом. Однако и эти значения свидетельствуют о незначительной вероятности прожога для трубы толщиной 12 мм (для этого надо зафиксировать электрод на одном месте в течение > 11 с). Также маловероятен прожог и тонкостенных труб ( $\delta = 7$  мм). Соответствующее время составит > 3 с.

Основной сложностью при использовании приведенной выше расчетной методики на основе (1) для определения необходимого безопасного давления распределения температуры в зоне под сварочной ванной является нахождение коэффициента теплоотдачи, т. е. корректное задание граничных условий на внутренней поверхности трубы. Это обусловлено пре-

Расчетные данные по изменению температуры по толщине стенки трубы  
под сварочной ванной (потока газа нет)

T	$\frac{z}{\delta}$	F <sub>0</sub>	I = 100 А, δ = 12 мм		I = 100 А, δ = 7 мм	
			z	t	z	t
К			10 <sup>-3</sup> м	с	10 <sup>-3</sup> м	с
364	0	0,1	0	1,08	0	0,27
865	0	0,3	0	3,26	0	0,81
1078	0	0,4	0	4,34	0	1,08
1207	0	0,5	0	5,44	0	1,35
1360	0	0,6	0	6,53	0	1,61
1730	0	1,0	0	10,8	0	2,7
371	0,1	0,1	0,99	1,08	0,49	0,27
888	0,1	0,3	0,99	3,26	0,49	0,81
1093	0,1	0,4	0,99	4,34	0,49	1,08
1222	0,1	0,5	0,99	5,44	0,49	1,35
1363	0,1	0,6	0,99	6,53	0,49	1,61
462	0,3	0,1	2,98	1,08	1,48	0,27
976	0,3	0,3	2,98	3,26	1,48	0,81
1160	0,3	0,4	2,98	4,36	1,48	1,08
1405	0,3	0,6	2,98	6,53	1,48	1,63
682	0,5	0,1	4,97	1,08	2,47	0,27
1146	0,5	0,3	4,97	3,26	2,47	0,81
1291	0,5	0,4	4,97	4,34	2,47	1,08
1402	0,5	0,5	4,97	5,44	2,47	1,35
1487	0,5	0,6	4,97	6,53	2,47	1,61
1052	0,7	0,1	6,96	1,08	3,46	0,27
1384	0,7	0,3	6,96	3,26	3,46	0,81
1475	0,7	0,4	6,96	4,34	3,46	1,08
1542	0,7	0,5	6,96	5,44	3,46	1,35
1603	0,7	0,6	6,96	6,53	3,46	1,61
1526	0,9	0,1	8,95	1,08	4,45	0,27
1659	0,9	0,3	8,95	3,26	4,45	0,81
1686	0,9	0,4	8,95	4,34	4,45	1,08
1709	0,9	0,5	8,95	5,44	4,45	1,35
1733	0,9	0,6	8,95	6,53	4,45	1,61

имущественным их влиянием на распределение температуры в той области (низкотемпературной), которая, как правило, определяет прочность ослабленной сварной зоны.

Приведенные решения позволяют аналитическим путем получить поле распределения температур в стенке магистрального трубопровода, устанавливать зависимость прочность–температура, что в конечном итоге дает возможность осуществлять расчет безопасного давления в магистральном газопроводе при проведении в теле трубы сварочно-ремонтных работ, в том числе врезок газопроводов-отводов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. W a t t D. F. and etc. An algorithm for modeling microstructural development in weld heat-affected zones // Acta metallurgica, 1998. – V. 36, № 11. – P. 3029-3036.
2. К у т а т е л а д з е С. С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 415с.
3. Е р о х и н Л. Л. Основы сварки плавлением. – М.: Машиностроение, 1973. – 448 с.
4. В а р г а ф т и к Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Физматгиз, 1963. – 706 с.
5. З и н о в ь е в В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справ. – М.: Металлургия, 1989. – 382 с.
6. В о с с т а н о в л е н и е работоспособности нефтепроводов под давлением с применением сварки: Обзорная информация // Транспорт и хранение нефти. – Вып. 8 (23). – М., 1989. – 31 с.
7. П е х о в и ч А. И., Ж и д к и х В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. – Л.: Энергия, 1968. – 304 с.

Поступила 20.03.2002