

## РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ ДОПУСТИМОГО ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОПРОВОДЕ ПРИ СВАРОЧНЫХ РАБОТАХ

Инженеры ПЁТУХ П. П., СОРОХАН Ц. Д., ГЕРАСИМЧИК И. И.

*ПО «Белтрансгаз»*

Инж. КРАСНЕВСКИЙ С. М.

*Физико-технический институт НАН Беларуси*

При сварочных работах на действующих газопроводах (под давлением) с позиции рационального запаса остаточной прочности наиболее важной является область трубы, расположенная непосредственно под сварочной дугой (ванной). Зная из эксперимента или расчета область максимального нагрева (размеры сварочной ванны, в которой металл находится в расплавленном состоянии) и удельный тепловой поток сварочной дуги, можно рассчитать или экспериментально определить распределение температур под сварочной ванной. Зная же распределение температур под сварочной дугой, можно рассчитать температурное поле во всех прилегающих областях. Расчет времени прожога в зависимости от времени воздействия и мощности теплового источника определяется из решения тепловой задачи и приведен в [1].

Известен ряд работ [2–5], в которых при различных допущениях определяется минимальная толщина стенки или допустимое давление в газопроводе при приварке отводов или заварке дефектов (каверн).

В [3] допустимую по критерию разгерметизации толщину стенки трубопровода в зоне проведения сварочных работ представляют в виде суммы

$$h = Z(T) + Z(p), \quad (1)$$

где  $Z(T)$  – толщина стенки, зависящая от режимов сварки (представляет величину проплавления металла);  $Z(p)$  – то же, зависящая от внутреннего давления (представляет значение толщины металла, который выдерживает давление  $p_{\text{рем}}$ ).

Величину  $Z(p)$  определяют по формуле

$$Z(p) = \frac{pr}{2\sigma_v(T_{\text{max}})}, \quad (2)$$

где  $p$  – внутреннее давление;  $r$  – радиус нагреваемой зоны;  $\sigma_v(T_{\text{max}})$  – предел прочности металла при максимально допустимой температуре нагрева  $T_{\text{max}}$ .

В [4] допустимое давление в трубопроводе при сварке определяется

$$p_{\text{доп}} = \frac{2\sigma_t(h_0 - c)0,72}{D_{\text{вн}}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_T$  – минимальный предел текучести металла при 20 °С, МПа;  $D_{вн}$ ,  $h_0$  – внутренний диаметр и толщина стенки трубы соответственно, мм;  $c$  – поправочный коэффициент, отражающий потерю прочности металла при нагревании (принимается равным 2,9); 0,72 – коэффициент запаса прочности.

Формула (3) использована для трубопроводов, у которых критическая длина трещины при общем разрушении равна диаметру электрода. Необходимо отметить, что (3) не учитывает снижения предела текучести при нагреве металла.

Авторы работы [2] проводили расчет запаса прочности, учитывая сложноподобное состояние, возникающее в области сварки, которое представляли в виде

$$\sigma = \sigma_{кц} + \sigma_{из} \leq [\sigma],$$

где  $\sigma_{кц}$  – кольцевое напряжение от расчетного внутреннего давления в газопроводе;  $\sigma_{из}$  – максимальные напряжения изгиба, обусловленные изменением толщины стенки в трубопроводе в месте сварки;  $[\sigma]$  – допустимое напряжение.

В свою очередь в [5] приведен расчет напряженного состояния трубопровода в процессе сварки, при котором расчетная модель нагреваемой зоны выбрана в виде заземленной круглой пластины.

В качестве основной предпосылки мы принимаем, что сварочную ванну, в зоне которой предел текучести  $\sigma_{0,2}^{св.в.} = 0$ , можно представить поверхностной трещиной с размерами, соответствующими размерам ванны, где наибольший вклад в ослабление прочности вносит область стенки трубы непосредственно под сварочной дугой.

На рис. 1 изображена схема распределения температуры по толщине стенки. Этому распределению соответствует зависимость предела текучести материала  $\sigma_{0,2}(T)$  (аналогично изменяется и предел прочности  $\sigma_b(T)$ ).

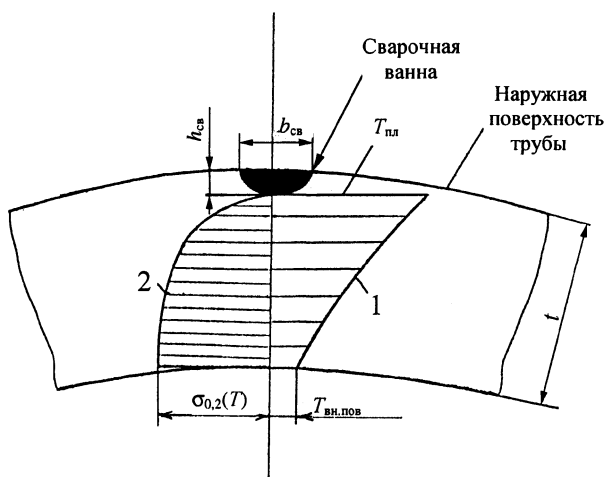


Рис. 1. Схема распределения температуры по толщине стенки трубы:  
1 – распределение температуры; 2 – изменение предела текучести

Необходимо отметить, что на границе сварочной ванны температура металла равна температуре плавления  $T_{\text{пл}} = 1470 \dots 1530 \text{ }^\circ\text{C}$  и, следовательно, предел текучести  $\sigma_{0,2}(T_{\text{пл}}) = 0$ .

В соответствии с рис. 1 формулой для расчета критического внутреннего давления может служить

$$\sigma_{\text{кр}} = \sigma_1 = \frac{p(D_e - t)}{2t}, \quad (4)$$

где  $D_e$ ,  $t$  – наружный диаметр и фактическая толщина стенки трубопровода соответственно;  $p$  – рабочее (допустимое) внутреннее давление газа.

Формула (4), согласно СНиП 2.05.06–85, является также основной при нахождении расчетной толщины стенки трубопровода или допустимого давления газа. По этому выражению определяется и номинальное напряжение в сечении под сварочной ванной, т. е. в наиболее ослабленном сечении стенки трубы.

Поскольку сварочная ванна действует как поверхностная трещина эллипсоидной формы, нужно учесть концентрацию напряжений.

На рис. 2 показана эпюра фактических кольцевых напряжений в зависимости от места расположения сварочной ванны относительно продольной оси магистрального трубопровода. Из этого рисунка следует, что наиболее опасным с точки зрения остаточной прочности является такое положение сварочной ванны, когда она вытянута вдоль продольной оси трубопровода, так как точки наибольшей концентрации напряжений находятся на концах большой оси эллиптической трещины (сварочной ванны).

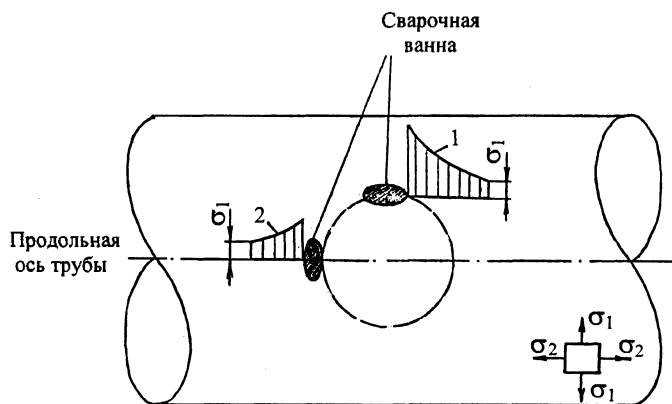


Рис. 2. Влияние расположения сварочной ванны при сварочных работах на эпюру распределения напряжений

Для схемы на рис. 2 коэффициент концентрации напряжений рассчитывается в соответствии с [6]:

$$\alpha_\sigma = 1 + \beta \sqrt{h_{\text{св}} / \rho}; \quad \beta = 0,5 \dots 2,0. \quad (5)$$

Здесь  $\alpha_\sigma = \sigma_{\text{л}} / \sigma_{\text{ном}}$  – коэффициент концентрации напряжений, по определению равный отношению максимального значения локального на-

пряжения в области особенности к номинальному напряжению для ослабленного сечения;  $h_{св}$ ,  $\rho$  – соответственно глубина и радиус кривизны сварочной ванны.

Коэффициент концентрации напряжений на поверхности трубы, зависящий от расположения сварочной ванны относительно продольной оси трубопровода, учитывался для положения 1 (рис. 2) как наиболее опасного.

С учетом сказанного, фактическое действующее напряжение в стенке трубопровода под сварочной ванной запишется

$$\sigma_{\text{факт}} = \sigma_1 K_1 K_2,$$

где  $K_1 = \alpha_\sigma$  – коэффициент, учитывающий влияние сварочной ванны на концентрацию напряжений в стенке трубы;  $K_2$  – то же, учитывающий влияние на прочность относительной глубины трещины (сварочной ванны)

$\frac{h_{св}}{t}$  и относительной длины трещины  $\frac{L_{св}}{D_e}$ .

Безопасное давление находится из условия, что действующие фактические напряжения не превосходят предела текучести материала для данных режимов сварки

$$\sigma_{\text{факт}} \leq \sigma_{0,2}^{св}(T). \quad (6)$$

Итак, для решения поставленной задачи необходимо иметь распределение температур по сечению под сварочной ванной, а также располагать кривой зависимости предела текучести данной трубной стали от температуры. Если такие данные отсутствуют, то их надо получить экспериментально.

Величина  $\sigma_{0,2}^{св}(T)$  определяется по экспериментальным данным  $\sigma_{0,2} = f(T)$  как средняя интегральная величина по формуле

$$\sigma_{0,2}^{св}(T) = \frac{1}{t - h_{св}} \int_0^{t-h_{св}} \sigma_{0,2}(T) dz, \quad (7)$$

где  $z$  – текущая толщина стенки трубопровода.

Подставляя (4), (5) и (7) в (6), окончательно записываем формулу для расчета критического давления при приварке отвода к магистральному газопроводу

$$p_{кр} \leq \sigma_{0,2}^{cb}(T) \frac{2(t - h_{cb})}{D_e - t} \frac{1}{1 + \beta \sqrt{h_{cb}} / \rho} \left[ 1 - \left( \frac{h_{cb}}{t} \right) \left( \frac{L_{cb}}{D_e} \right)^{0,3} \right] K_3. \quad (8)$$

Коэффициент  $K_3$  в (8) вводится для учета длительности эксплуатации материала газопровода.

Выполняем расчет максимального давления при приварке отвода.

Магистральный газопровод  $D_e = 1220$  мм;  $t = 12$  мм, материал стали 17Г1С ( $\sigma_{0,2} = 40 \dots 42$  кг/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_b = 56 \dots 61$  кг/мм<sup>2</sup> при  $T = 20$  °С), труба прямшовная; длительность эксплуатации газопровода 17 лет. Сварка производится без движения потока газа. Параметры сварки: сварочный ток 100 А; напряжение при сварке  $U = 20$  В; размеры сварочной ванны:  $h_{cb} = 2,0$  мм – глубина проплавки;  $b_{cb} = 10$  мм – ширина сварочной ванны;  $L_{cb} = 13$  мм – длина сварочной ванны.

По формуле (7) находим  $\sigma_{0,2}^{cb}(T) = 260$  МПа.

Выполняем подстановку в (8)

$$p_{кр} \leq \sigma_{0,2}^{cb}(T) \frac{2(t - h_{cb})}{D_e - t} \frac{1}{1 + \beta \sqrt{h_{cb}} / \rho} \left[ 1 - \left( \frac{h_{cb}}{t} \right) \left( \frac{L_{cb}}{D_e} \right)^{0,3} \right] K_3 =$$

$$= 260 \frac{2(12 - 2)}{1220 - 12} \frac{1}{1,32} \left[ 1 - \left( \frac{2}{12} \right) \left( \frac{13}{1220} \right)^{0,3} \right] \frac{1}{1,1} = 2,82 \text{ МПа}.$$

Анализ формулы (8) показывает, что для расчета безопасного ремонтного давления при приварке отвода газопровода необходимо достоверно знать изменение механических свойств основного металла трубы как в зависимости от длительности эксплуатации, так и от температуры нагрева при сварке. Это объясняется тем, что  $\sigma_{0,2}^{cb}(T)$  оказывает подавляющее влияние на величину критического давления  $p_{кр}$ .

Второй по значимости влияния на  $p_{кр}$  является концентрация напряжений вокруг сварочной ванны, которая моделировалась поверхностным эллиптическим дефектом. Расчет коэффициентов концентрации напряжений для каждого конкретного случая производился методом конечных элементов.

Авторами выполнены расчеты допустимого критического давления для некоторых типоразмеров (по диаметру) магистральных газопроводов. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Приведен также расчет по (3) работы [4].

**Значения максимально допустимого критического давления газа  
при приварке отвода**

Параметры сварки	Сталь 17Г1С $D_e = 1220$ мм; $t_0 = 12$ мм; $K_3$ (17 лет)		Сталь 19Г $D_e = 720$ мм; $t_0 = 7$ мм; $K_3$ (25 лет)	
	$P_{кр}$ , атм		$P_{кр}$ , атм	
	Формула (3)	Формула (8)	Формула (3)	Формула (8)
$I = 100$ А $U = 20$ В $h_{св} = 2,0$ мм	43,8	28,2	33,4	17,7
$I = 150$ А $U = 22$ В $h_{св} = 2,5$ мм	43,8	24,5	33,4	16,6

ЛИТЕРАТУРА

1. Р а с ч е т температуры в теле трубы магистрального газопровода при приварке отвода / П. П. Пётух, С. М. Красневский, Ц. Д. Сорохан и др. // Безопасность и надёжность трубопроводного транспорта: Сб. науч. тр. – Новополюцк: ПГУ, 2002. – Вып. 2. – С. 45–55.
2. Р а з р а б о т к а режимов заварки каверн магистральных нефтепроводов под давлением / Я. Н. Бурак, В. Х. Гадюк, Л. С. Джарджиманов и др. // РНТС. Сер. «Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов». – М.: ВНИИОЭНГ, 1981. – Вып. 1. – С. 13–17.
3. С о б а ч к и н Л. С. Исследование параметров режима сварки на трубопроводах, находящихся под давлением // Исследования в области надёжности и эффективности эксплуатации магистральных нефтепроводов // Тр. ВНИИСПТнефть. – 1986. – С. 78–83.
4. R e c o m m e n d e d Pipeline Maintenance Welding Practices APL. – 1978. – RP1107, 2 nd Ed August. – 123 p.
5. Б е р е з и н В. Д., А з е в и ч С. П., Б о б р и ц к и й Н. В. Методика исследования температурных полей в металле труб при сварочных работах на действующих нефтепродуктопроводах // Проектирование, строительство и эксплуатация магистральных газонефтепроводов и нефтебаз. – Уфа: УНИ, 1969. – Вып. 1. – С. 60–65.
6. К о л л и н з Д. Дж. Повреждение материалов в конструкциях: Анализ. Предсказание. Предотвращение. – М.: Мир, 1984. – 624 с.

Поступила 22.04.2002