

$$\begin{aligned} V_x &= V_x + a_x dt, \\ V_y &= V_y + a_y dt. \end{aligned} \quad (9)$$

Координаты центра масс:

$$\begin{aligned} R_x &= R_x + V_x dt, \\ R_y &= R_y + V_y dt. \end{aligned} \quad (10)$$

Проекции эксцентриситета на оси:

$$E_x = R_x - x, \quad E_y = R_y - y. \quad (11)$$

Этими уравнениями заканчивается цикл расчета. Далее для следующего промежутка времени $t = t + dt$ расчет начинается с уравнения (5). Для достаточно малых равенство $E_x^2 + E_y^2 = E^2$ выполняется с большой точностью, что является одним из способов проверки правильности расчетов.

Как видно, приведенные уравнения очень просты, в них нет тригонометрических функций. Они легко программируются и быстро вычисляются. Тем не менее, они полностью моделируют движение симметричного неуравновешенного ротора. Для достаточно малых dt устойчивому ротору соответствует устойчивые вычисления. Такой ротор остается устойчивым при наложении внешних возмущений, таких, например, как скачкообразное изменение угловой скорости. При одинаковой жесткости и демп-

фировании по осям X и Y , точки M и C движутся по окружностям, при различных – по эллипсам. Можно наблюдать самоцентрирование в резонансной области при упруго-демпферных опорах с линейной характеристикой, затягивание резонанса при нелинейных опорах и другие эффекты.

При известном законе изменения крутящего момента, приведенные уравнения позволяют рассчитать скорость разгона до заданных оборотов, возможность перехода через резонанс при ограниченном крутящем моменте и заданном эксцентриситете.

Аналогично могут быть составлены уравнения для роторов в магнитных, в газовых или жидкостных подшипниках скольжения. Для этого в уравнение (7) необходимо подставить выражение для силы в соответствующем подшипнике.

По этому же принципу можно составить уравнения для несимметричного жесткого ротора.

Выводы.

Предложены две простые модели жесткого симметричного ротора. Модели имеют хорошую наглядность, позволяют рассчитывать ам-

плитудно-частотную характеристику, разгон симметричного ротора на различных опорах с линейной так и нелинейной характеристикой.

Литература:

1. Вибрации в технике. Том 3. Колебания машин, конструкций и их элементов. М., "Машиностроение", 1980, 544 с.
2. Ландау Л. Д., Е. М. Лифшиц. Теоретическая физика. Т.1. Механика. М. "Наука", 1988, 216с.
3. Опоры скольжения с газовой смазкой. Под редакцией С.А. Шейнберга. М. "Машиностроение", 1979, 336с.
4. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М. "Наука", 1989, 304 с.
5. Шорр Б.Ф., Мельникова Г.В. Расчет конструкций методом прямого математического моделирования. М. "Машиностроение", 1988, 160 с.
6. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М. "Физматлит", 1994, 448 с.

УДК 622.692.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ ДОПУСТИМОГО ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОПРОВОДЕ ПРИ ПРИВАРКЕ ОТВОДА.

*Пётух П.П., Сорохан Ц.Д., Герасимчик И.И., предприятие "Белтрансгаз"
Красневский С.М., ГНУ "ФТИ НАН Б"*

При приварке отвода к магистральной трубе под действующим давлением возможны два вида исчерпания несущей способности конструкции:

образование сквозного отверстия (прожога) в стенке трубы без и/или с общим разрушением трубы; разрушение трубы вследствие ослабления прочности металла при тепловом воздействии источника сварочного нагрева, появления и распространения трещины вдоль образующей трубы от воздействия внутреннего рабочего давления в трубе.

При сварочных работах на действующих газопроводах с позиции рационального запаса остаточной прочности наиболее важной является область трубы непо-

средственно под сварочной дугой (ванной). Зная из эксперимента или из расчета область максимального нагрева (размеры сварочной ванны, в которой металл находится в расплавленном состоянии) и удельный тепловой поток сварочной дуги, можно рассчитать и/или экспериментально определить распределение температур под сварочной ванной. Зная 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 работе [6].

Известен ряд работ [1 – 4], в которых при различных допущениях определяется или минимальная толщина стенки, или допустимое давление в газопроводе при приварке отводов или при заварке дефектов (каверн).

В работе [2] допустимую по критерию разгерметизации толщину стенки трубопровода в зоне проведения сварочных работ представляли в виде суммы

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

где $Z(T)$ - толщина стенки, зависящая от режимов сварки (представляет величину проплавления металла); $Z(P)$ - толщина стенки, зависящая от внутреннего давления (представляет значение толщины металла, который выдерживает давление $P_{рем}$).

$Z(P)$ определяли по формуле:

$$Z(P) = \frac{P \cdot r}{2\sigma_v(T_{max})}, \quad (2)$$

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

В работе [3] допустимое давление в трубопроводе при сварке определяется по формуле:

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

где σ_t - минимальный предел текучести металла при 20°C, 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 мм); 0,72 - коэффициент запаса прочности.

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

Авторы работы [1] расчет запаса прочности проводили, учитывая сложное напряженное состояние, возникающее в области сварки, которое представили 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; $[\sigma]$ - допускаемое напряжение.

В работе [4] приведен расчет напряженного состояния трубопровода в процессе сварки, при котором расчетная модель нагреваемой зоны выбрана в виде заземленной круглой пластины.

Физически обоснованным необходимо считать подход, основанный на теории механики разрушения и материаловедения. В качестве основной предпосылки мы принимаем, что сварочную ванну, в зоне которой предел текучести $\sigma_{0,2}^{св.в.} = 0$, можно представить поверхностной трещиной, размеры которой соответствуют размерам ванны. Наибольший вклад в ослабле-

ние прочности внесет область стенки трубы непосредственно под сварочной дугой. На рис. 1 изображена схема распределения температуры по толщине стенки. Этому распределению температуры соответствует соответствующая зависимость предела текучести материала $\sigma_{0,2}(T)$ (аналогично изменяется и предел прочности $\sigma_b(T)$).

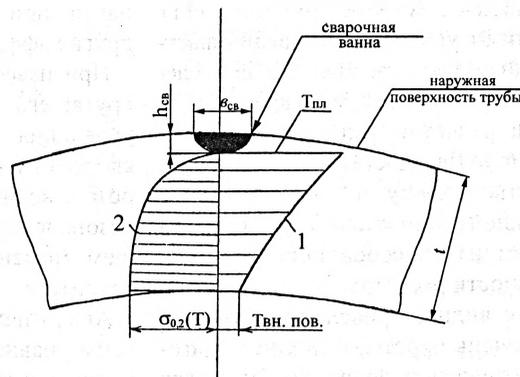


Рис. 1. Схема распределения по толщине стенки трубы t температуры нагрева металла (кривая 1) и изменения предела текучести (кривая 2) на оси под сварочной ванной.

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

Основной формулой для расчета на остаточную прочность (допустимое давление) примем величину критического напряжения $\sigma_{кр}$, которое равно кольцевому напряжению от расчетного внутреннего давления:

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

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 основной расчетной формулой при определении расчетной толщины стенки трубопровода или допускаемого давления газа.

По формуле (4) мы определим номинальное напряжение в сечении под сварочной ванной, т.е. в наиболее ослабленном сечении стенки трубы.

Учитывая, что сварочная ванна действует как поверхностная трещина эллипсовидной формы мы должны учесть концентрацию напряжений.

На рис. 2 показано, как изменяется эпюра фактических кольцевых напряжений в зависимости от места расположения сварочной ванны относительно продольной оси магистрального трубопровода. Из рис. 2 следует, что наиболее опасным с точки зрения остаточной прочности является 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).

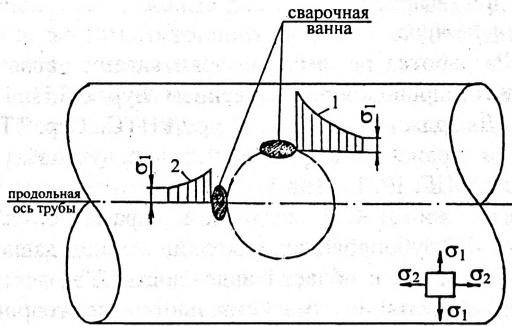


Рис. 2. Влияние расположения сварочной ванны относительно продольной оси трубы на эпюру распределения напряжений.

Необходимо отметить, что рассмотренные концентраторы напряжений являются локальными, т.е. объем области, занятой материалом с повышенными напряжениями, существенно мал по сравнению с объемом нагруженного тела.

Для схемы на рис. 2 коэффициент концентрации напряжений рассчитывается по формуле [5]:

$$\alpha_\sigma = 1 + \beta \sqrt{h_{cb} / \rho}, \quad (\beta = 0,5 \div 2,0) \quad (5)$$

Здесь $\alpha_\sigma = \sigma_{л} / \sigma_{ном}$ - коэффициент концентрации напряжений, равный по определению отношению максимального значения локального напряжения в области особенности к номинальному напряжению для ослабленного сечения, найденному без учета концентрации из-за наличия геометрической особенности; h_{cb} , ρ - глубина и радиус кривизны сварочной ванны соответственно.

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

Тогда фактическое действующее напряжение в стенке трубопровода под сварочной ванной равно:

$$\sigma_{факт} = \sigma_1 \cdot K_1 \cdot K_2$$

где $K_1 = \alpha_\sigma$ - учет влияния сварочной ванны на концентрацию напряжений в стенке трубы; K_2 - коэффициент, учитывающий влияние на прочность относительной глубины трещины (сварной ванны) $\frac{h_{cb}}{t}$ и

носительной длины трещины $\frac{L_{cb}}{D_e}$.

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

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

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 готовые данные отсутствуют, их надо получить экспериментально.

Величина $\sigma_{0,2}^{cb}(T)$ в нашем случае определялась по

экспериментальным данным $\sigma_{0,2}(T)$ как среднее интегральная величина по формуле

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

где z - текущая толщина стенки трубопровода.

Подставляя (4), (5) и (7) в (6), найдем общую формулу для расчета максимального допустимого давления при приварке отвода к магистральному газопроводу:

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

Коэффициент K_3 вводится для учета длительности эксплуатации материала газопровода.

Проведем примерный расчет максимального давления при приварке отвода.

Магистральный газопровод $D_e = 1220$ мм, $t = 12$ мм, материал стали 17Г1С ($\sigma_{0,2} = 40 - 42$ кг/мм², $\sigma_B = 56 - 61$ кг/мм² при $T = 20^\circ\text{C}$), труба прямошовная длительность эксплуатации газопровода $\tau_3 = 17$ лет. Сварка производится без движения потока газа.

Параметры сварки: сварочный ток 100 А; напряжение при сварке $U = 20$ В;

Размеры сварочной ванны равны: $h_{cb} = 2,0$ мм - глубина проплавки; $b_{cb} = 10$ мм - ширина сварочной ванны; $L_{cb} = 13$ мм - длина сварочной ванны.

По формуле (7) и экспериментальным данным зависимости $\sigma_{0,2}(T)$ находим $\sigma_{0,2}^{cb}(T) = 260$ МПа. Подставляя значения в формулу (8), определим:

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

$$= 260 \cdot \frac{2 \cdot (12 - 2)}{1220 - 12} \cdot \frac{1}{1,32} \times \left[1 - \left(\frac{2}{12} \right) \cdot \left(\frac{13}{1220} \right)^{0,3} \right] \cdot \frac{1}{1,1} = 2,82 \text{ МПа} = 28,2 \text{ атм.}$$

Анализ формулы (8) показывает, что для расчета безопасного ремонтного давления газа 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 связано с тем, что величина $\sigma_{0,2}^{cb}(T)$ оказывает существенное влияние на величину допустимого давления $P_{кр}$.

Вторым по значимости влияния на допустимое давление $P_{кр}$ является концентрация напряжений вокруг сварочной ванны, которая моделировалась поверхностным эллиптическим дефектом. Расчет коэффициен-

тов концентрации напряжений для каждого конкретного случая производился численным расчетом методом конечных элементов.

Произведены расчеты допустимого критического давления для некоторых типоразмеров магистральных газопроводов. Данные по расчетам сведены в таблицу.

Приведены расчеты для двух типоразмеров газопроводов. Для сравнения приведен расчет по формуле (3) работы [3].

Таблица

Значения максимально допустимого давления газа при приварке отвода.

Параметры сварки при приварке отвода	Сталь 17Г1С De = 1220 мм, t ₀ = 12 мм t _с = 17 лет		Сталь 19 Г De = 720 мм, t ₀ = 7 мм t _с = 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

Из таблицы следует, что формула (8) учитывает влияние параметров сварочного тока и дает более обоснованные значения критического давления газа. По формуле (8) разработаны режимы сварки и допустимые ремонтные давления в магистральном газопро-

воде при заварке каверн.

Литература.

1. Разработка режимов заварки каверн магистральных нефтепроводов под давлением /Бурак Я.Н., Гадюк В.Х., Джарджиманов Л.С. и др.//РНТС. Сер. "Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов". - М.: ВНИИОЭНГ. 1981.- Вып.1.- С. 13-17.

2. Собачкин Л. С. Исследование параметров режима сварки на трубопроводах, находящихся под давлением //Исследования в области надежности и эффективности эксплуатации магистральных нефтепроводов //Тр./ВНИИСПТнефть. - 1986. - С. 78-83.

3. Recommended Pipe line Maintenance Welding Practices APL.-1978.-RP1107, 2 nd E.d August.-123p.

4. Березин В.Д., Азевич С.П., Бобрицкий Н.В. Методика исследования температурных полей в металле труб или сварочных работах на действующих нефтепродуктопроводах //Проектирование, строительство и эксплуатация магистральных газонефтепроводов и нефтебаз. - Уфа: УНИ, 1969. - Вып.1. - С. 60-65.

5. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение. М.: Мир, 1984.- 624 стр.

6. Петух П.П., Красневский С.М., Сорохан Ц.Д., Герасимчик И.И., Алешин Н.Ф. Расчет температуры в теле трубы магистрального газопровода при приварке отвода. - В кн. Безопасность и надежность трубопроводного транспорта. Сборник научных трудов. Выпуск 2. - Новополюк: ПГУ, 2002. - с. 28 - 33.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

**БЕРЕЖНО РАСХОДОВАТЬ ГАЗ
ПОМОЖЕТ СЧЕТЧИК**

А.Ф. Дядичкин, ЗАО "ХЦ-Полиновотех"

В связи с высокими ценами на газообразное и жидкое топливо и нехваткой денежных средств на оплату за энергоресурсы, промышленные предприятия вынуждены строить собственные автономные котельные, отключать отопление бытовых и производственных помещений. Коммунально-бытовые предприятия по этим же причинам переводят свои котельные, работающие на привозном дефицитном топливе, на сжигание доступного местного – дров или древесных отходов. В зимний период бывают перебои в обеспечении горячим водоснабжением жилых домов горожан. Все это ухудшает условия

санитарной гигиены и охраны труда. Рабочие вынуждены в течение рабочей смены работать в неотапливаемых цехах не снимая теплой одежды или в телогрейках, что, безусловно, приводит к снижению производительности труда. Операторы котельных, где используются в качестве топлива дрова, вынуждены выполнять несвойственную им работу по разгрузке, транспортировке, а иногда и по заготовке древесины. Так, для котельной дома отдыха тракторного завода Логойский лесхоз выделил делянку леса для заготовки дров. Заготавливают дрова операторы в свободное от работы время, но от дежурства

по графику и необходимости соблюдения требований техники безопасности во время исполнения своих обязанностей их не освобождают.

Если капитальные затраты на строительство новых котельных и на переоборудование действующих на сжигание твердого топлива взамен газообразного, а также эксплуатационные затраты на содержание штата обслуживающего персонала вновь построенных котельных, которые вынуждены делать предприятия оправданы, хотя это еще требует глубокого анализа и технико-экономического обоснования, то веерное отключение подачи