DOI: 10.17117/na.2016.10.03.099

<http://ucom.ru/doc/na.2016.10.03.099.pdf>

Поступила (Received): 02.10.2016

Горохова М.В.
Оценка влияния технологии изготовления
прямошовных и спиральношовных труб на уровень
концентрации напряжений в сварном шве

Gorokhova M.V.
Assessment of influence of manufacturing techniques
straight-line-seam and spiralno sutural pipes on the
level of concentration of tension in a welded seam

Рассмотрено, как влияет технология изготовления сварных труб на уровень концентрации напряжений в сварном шве при их статическом нагружении. Выполнен анализ влияния формы усиления сварного шва, смещения кромок и овальности труб на коэффициент концентрации напряжений

Ключевые слова: концентрация напряжений, сварной шов трубы

It is considered how the manufacturing techniques of welded pipes influence the level of concentration of tension in a welded seam at their static loading. The analysis of influence of a form of strengthening of a welded seam, shift of edges and ovality of pipes on coefficient of concentration of tension is made

Key words: concentration of tension, welded seam of a pipe

Горохова Марина Венидиктовна

Кандидат технических наук, доцент
Волжский государственный университет водного транспорта
г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

Gorokhova Marina Venidiktovna

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
Volga state university of water transport
Nizhni Novgorod, Nesterova st., 5

На трассах магистральных трубопроводов в настоящее время уложены как прямошовные, так и спиральношовные трубы. Хотя спиральношовных труб в общей длине нефтепроводов значительно меньше, но в одинаковых условиях эксплуатации они показывают меньшую дефектность, чем прямошовные трубы, что подтверждают объективные данные внутритрубной диагностики. При этом уровень дефектности, связанный с условиями строительства и эксплуатации трубопровода, для прямошовных и спиральношовных труб практически одинаков. В тоже время количество металлургических дефектов, («раскатанные загрязнения») в спиральношовных трубах значительно меньше. Это, очевидно, связано с условиями проката листа (ширина листа меньше, чем для изготовления прямошовных труб, и не зависит от диаметра изготавливаемых труб) и термообработкой труб, в ходе которой отбраковываются трубы, имеющие значительные включения. В этом плане интересным будет проведение сравнительного исследования статической прочности прямошовных и спиральношовных труб.

Большое влияние на статическую прочность труб оказывает концентрация напряжений в сварном стыке. Технические условия производства сварных труб предполагают равнопрочность сварного шва и основного металла трубы. Поэтому предполагается равновероятное разрушение трубы по сварному шву и основному металлу при статическом испытании труб внутренним давлением.

Практика испытаний сварных труб показывает, что действительно, при однократном нагружении разрушение труб происходит как по сварным швам, так и по основному металлу. При этом разрушение спиральношовных труб по сварным швам практически отсутствует, а по продольным швам случаи разрушения составляют около 40%. Разрушение трубы, содержащей зону конструктивной концентрации напряжений (сварной шов), происходит либо за счет исчерпания пластичности в зоне концентрации напряжений, либо в мембранной зоне с образованием утончения в месте разрыва.

Рассмотрим, как влияет технология изготовления сварных труб на уровень концентрации напряжений в сварном шве.

Одним из основных факторов, влияющим на величину концентрации напряжений в сварном шве, является форма усиления сварного шва. Данный вопрос подробно рассмотрен в работе [1], в которой приведена следующая формула для расчета коэффициента концентрации напряжений в сварном шве:

$$\alpha_{\sigma} = 1 + \frac{2}{\pi \cdot A} \cdot \left[R \cdot \ln \frac{b+r}{r} - R_0 + r_1 \cdot R_1 - r_1^2 \cdot R_2 + T \right] \quad (1)$$

где A , R , R_0 , R_1 , R_2 , T – коэффициенты, зависящие от соотношения размеров сварного стыкового соединения, вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} A &= \frac{a_1 \cdot (cha_1)}{k} + \frac{a_1^2}{2} \cdot r_1 \cdot sha_1; \quad R = a_1 + 0,167 \cdot a_1^3 + 0,008 \cdot a_1^5; \\ R_0 &= a_1 + 0,303 \cdot a_1^3 + 0,019 \cdot a_1^5; \quad R_1 = a_1 + 0,33 \cdot a_1^3 + 0,033 \cdot a_1^5; \\ R_2 &= a_1 + 0,167 \cdot a_1^3 + 0,038 \cdot a_1^5; \quad T = sha_1, \\ a_1 &= a \cdot b; \quad r_1 = \frac{r}{b}; \quad a = \sqrt{\frac{k \cdot (\delta + 2 \cdot c)}{c \cdot b \cdot \delta}}; \quad k = 0,9 \cdot \left[\frac{\delta}{(\delta + c)} \right]^2, \end{aligned}$$

b – толщина стенки трубы; δ – ширина сварного шва; c – высота выступа сварного шва; r – радиус перехода от наплавленного к основному металлу.

Наиболее существенное влияние на коэффициент концентрации напряжений α_{σ} оказывают радиус перехода наплавленного металла к основному, высота и ширина выступа сварного шва. Для реальных магистральных трубопроводов радиус сопряжения основного металла с наплавленным равен 0,25 – 0,5 мм, а среднее значение высоты выступа сварного шва и его ширины составляют соответственно 3 и 20 мм. При этом значение α_{σ} для продольного шва сварных труб оказывается равным 1,58 – 1,65 (для внутреннего шва) и 1,3 – 1,5 (для наружного шва). Все эти теоретические значения коэффициента концентрации напряжений сопоставимы с экспериментальными значениями данного коэффициента, которые для спиральношовных труб находятся в пределах 1,6. А так как процесс автоматической сварки, который используется на трубопрокатных заводах, обеспечивает большую стабильность геометрических параметров

усиления сварного шва, то и значения коэффициента концентрации напряжений, которые обусловлены формой шва, так же будут стабильными.

Рассмотрим местное повышение напряжений, вызываемое изгибными эффектами в зоне сварного шва. В общем случае изгибные напряжения равны

$$\sigma_{из} = \sigma_{см} + \sigma_{уг} + \sigma_{ов},$$

где $\sigma_{см}$ – изгибные напряжения от смещения кромок; $\sigma_{уг}$ – изгибные напряжения от угловатости сварного соединения; $\sigma_{ов}$ – изгибные напряжения от овальности сечения трубы.

Величину изгибных напряжений в случае смещения кромок можно вычислить по формуле:

$$\sigma_{см} = \pm \frac{3 \cdot \Delta}{1 + \left(\frac{b \cdot k}{2}\right)} \cdot \sigma_H, \quad k = \sqrt{\frac{6 \cdot P \cdot D_{вн}}{E \cdot \sigma^3}},$$

где σ_H – номинальное напряжение (безмоментная зона), $\Delta = \frac{h}{\delta}$ – относительное смещение, h – величина смещения кромок, $D_{вн}$ – внутренний диаметр трубы, E – модуль упругости материала трубы.

Для расчета изгибных напряжений из-за угловатости в районе продольного шва трубы можно использовать эмпирическую формулу, которая показывает наилучшую сходимость с экспериментальными данными:

$$\sigma_{уг} = \pm \frac{6 \cdot b}{\delta} \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sigma_H,$$

где β – угол между осью стенки трубы и осью сварного шва.

Влияние начальной овальности сечения на напряженное состояние труб можно оценить с помощью формулы, полученной с учетом изменения овальности от действия внутреннего давления P :

$$\sigma_{ов} = \frac{3 \cdot U \cdot \sigma_H}{\left(\frac{\delta}{R}\right) \cdot \left[1 + 4 \cdot (1 - \mu)^2 \cdot \left(\frac{P}{E}\right) \cdot \left(\frac{R}{\delta}\right)^3\right]}, \quad U = \frac{(D_{max} - D_{min})}{2 \cdot R}$$

где R – номинальный радиус трубы, U – овальность трубы.

Для рабочих давлений и начальной овальности допускаемой СНиП для магистральных нефтепроводов и равной 1%, для трубы диаметром 720 мм и толщиной стенки 11 мм $\sigma_{ов} = 0,15 \sigma_H$.

Местное повышение напряжений от изгибных эффектов, вызванных смещением кромок, угловатостью сварного соединения и овализацией сечения, приходится на зону концентрации напряжений сварного шва. При этом α_0 при растяжении и изгибе оказывается практически одинаковыми. Принимая это во внимание, максимальные напряжения в зоне сварного шва можно вычислить по формуле:

$$\sigma_{max} = \alpha_\sigma \cdot (\sigma_H + \sigma_{из}).$$

Проверка достоверности соотношения (1) для расчета суммарного эффекта местного повышения напряжений в сварных соединениях была проведена с использованием экспериментальных данных работы [2]. Результаты этой проверки приведены в табл.1. В табл.1 и в дальнейшем для характеристики местного возмущения напряженного (деформированного) состояния в зоне сварного соединения трубы со смещением кромок, угловатостью и овализацией

использовалось отношение в максимально напряженной зоне сварного шва к соответствующим величинам в безмоментной зоне (номинальные напряжения и деформации), условно обозначаемое как коэффициент концентрации:

$$\alpha^* = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_H} = \left(1 \pm \frac{3 \cdot \Delta}{1 + \frac{b \cdot k}{2}} \pm \frac{6 \cdot b}{\delta} \cdot \operatorname{tg} \beta \pm \frac{3 \cdot U}{\frac{\delta}{R} \left[1 + 4 \cdot (1 - \mu^2) \cdot \left(\frac{P}{E} \right) \cdot \left(\frac{R}{\delta} \right)^3 \right]} \right) \quad (2)$$

Таблица 1

№ трубы	Параметры сварного шва						Коэффициент концентрации			
	b , мм	r , мм	δ , мм	c , мм	h , мм	β , град	α_σ	$\frac{\sigma_{из}}{\sigma_H}$	α_p^*	α_ε^*
I	23	0,25	11	4,4	4,0	11,5	1,75	3,74	8,29	8,0
II	28	0,25	11	3,6	0,5	7	1,48	2,11	4,60	4,7
III	34	0,25	11	1,0	3,2	4,5	1,22	2,26	4,06	4,1
IV	25	0,25	9	1,2	1,2	0	1,29	0,40	1,81	2,0

В табл.1 приняты следующие обозначения: σ_p^* – расчетный коэффициент концентрации напряжений; σ_ε^* – коэффициент концентрации напряжений, полученный поляризационно-оптическим методом в эксперименте [2] на моделях сварного соединения из оптически чувствительного материала.

Из табл.1 видно, что расхождение между экспериментальными и расчетными значениями коэффициентов концентрации не превосходят 10%.

Расчет значений α_{max} проводится по формуле (2) с введением максимальных значений смещений кромок и угловатости и среднего значения ширины валика, равного примерно двум толщинам стенки.

На уровень концентрации напряжений в сварном шве трубы влияют также и условия формирования сварных швов труб. Если не учитывать мелкие подробности формирования труб при их изготовлении, то можно принять примерно равные условия формирования сварного шва в прямошовных трубах до экспандирования и спиральношовных трубах.

Таким образом форма усиления шва, смещения кромок и овальность труб при различных технологиях их изготовления различаются незначительно. Именно эти параметры нормируются в ТУ на изготовление труб. Подстановка предельно допустимых параметров сварного соединения ($\alpha_\phi = 1,6$; $\Delta = 30\%$; $U = 1\%$) в формулу (2) показывает, что уровень концентрации напряжений в сварном шве не должен превышать значения $\alpha = 3$. Это обеспечивает равнопрочность сварного шва основному металлу в не зависимости от его ориентации.

Вместе с тем, даже незначительные превышения требований ТУ на форму шва могут привести к инициированию разрушения по продольному сварному шву.

На стадии изготовления труб (окончательное формирование спиральношовных труб и формирование прямошовных труб до экспандирования) угловатость сварного шва незначительна и ее можно не учитывать при расчете.

Угловатость шва сварных труб окончательно формируется при правке труб в экспандере. Так, если предусмотрено гидравлическое экспандирование, то наружный валик шва упирается в экспандер и формируется «отрицательная» угловатость. Если правка труб осуществляется механическим экспандером, то в него упирается внутренний валик шва и угловатость формируется в виде «домика». Таким образом, нормирование угловатости в сварном шве можно проводить соответствующим нормированием формы усиления шва. При этом определение максимальной угловатости сварного шва проводится из условия взаимодействия валика сварного шва трубы с внутренним или внешним экспандером по полуэмпирической формуле:

$$\operatorname{tg} \beta = 2 \cdot \left(\frac{\sqrt{D^2 - [D - (\delta + c)]^2}}{D - (\delta + c)} \right),$$

где D – диаметр трубы, δ – толщина стенки трубы; c – высота усиления сварного шва.

Для средних диаметров трубы (700-1000 мм) и толщин стенок (10мм) подстановка максимально допустимого значения высоты усиления сварного шва (3мм) получаем $\operatorname{tg} \beta = 0,3 \dots 0,4$, что приводит к увеличению максимальных коэффициентов концентрации до $\alpha = 5 \dots 7$. А это уже соответствует возможности реализации разрушений труб по сварному шву при статических испытаниях внутренним давлением.

Известно так же, что уровень максимальных напряжений в стыковом сварном шве зависит не только от концентрации напряжений, но и от ориентации шва относительно главных напряжений в трубе. С учетом этого при нагружении трубы внутренним давлением в наиболее неблагоприятных условиях находится продольный шов, а при возникновении продольных усилий в турбопроводе и изгиба – спиральный шов. Соответственно, ограничения на отклонения в геометрии сварного стыкового соединения должны быть различными для продольного и спирального швов.

Одним из различий в технологии изготовления прямошовных и спиральношовных сварных труб является процедура окончательного формирования прямошовных труб в экспандере.

В процессе правки трубы в экспандере происходит увеличение ее диаметра с общим удлинением периметра до 1% от номинального. Учитывая, что после статических испытаний труб до разрушения периметр увеличивается примерно на 5 – 10%, следует рассмотреть вопрос о снижении остаточного ресурса трубы из-за экспандирования.

Общий уровень нагружения труб при правке в экспандере таков, что металл стенки трубы находится в пластическом состоянии по всему периметру трубы, в том числе и в мембранной зоне. При этом, для пластичных трубных сталей, изменение механических характеристик (снижение предельной пластичности, увеличение предела текучести) в мембранной зоне незначительно и не сказывается на прочностном ресурсе трубы. В то же время в зонах концентрации (зона сварного соединения) возможно перераспределение напряжений и деформаций со значительным исчерпанием пластичности материала.

Проведем оценку возможности изменения остаточного прочностного ресурса трубы в процессе экспандирования. Известно, уровень пластических деформаций в зоне концентрации напряжений можно оценить по формуле:

$$e_{max} = \alpha^2 \cdot e_n ,$$

где α – теоретический коэффициент концентрации напряжений в сварном шве.

В первом приближении можно не учитывать процесс формоизменения в зоне шва при экспандировании, поэтому в качестве концентратора можно рассматривать только форму усиления шва и смещение кромок. Таким образом, в расчете можно принять максимальное значение коэффициента концентрации напряжений, равное 3.

Принимая $e_n = 0,01$, получаем, что уровень пластической деформации в зоне сварного шва не превышает 9%. В то же время предельная пластичность материала ($e_f = \ln \frac{1}{1-\psi_f}$) для трубных сталей составляет менее 60% ... 70%. Таким образом, уровень исчерпания пластичности в зоне сварного шва хотя и незначителен, но может привести к снижению усталостной долговечности сварного соединения при эксплуатации. Что касается рассматриваемой в данной статье статической прочности труб, то, поскольку уровень пластических деформаций при экспандировании далек от критического и не приводит к уменьшению временного сопротивления σ_b и истинного сопротивления разрыву S_k , процедура экспандирования не сказывается на уровне статической прочности труб.

Таким образом, рассматривая влияния технологии изготовления прямошовных и спиральношовных труб на уровень концентрации напряжений, установлено, что в процессе правки прямошовных труб в экспандере происходит формирование дополнительного дефекта формы шва – угловатости («домика»), что приводит к увеличению уровня концентрации напряжений в сварном шве и снижению прочностного и усталостного ресурса трубы. Однако, уровень исчерпания пластичности материала в зоне сварного шва при экспандировании недостаточен для снижения статической прочности труб, но может сказаться на усталостном ресурсе трубы.

Список используемых источников:

1. Навроцкий Д.И. Прочность сварных соединений с учетом концентрации напряжений. М.: Машиностроение, 1968. 170 с.
2. Гусенков А.П., Аистов А.С. Исследование малоциклового прочностного ресурса труб большого диаметра магистральных газо- и нефтепроводов // Машиноведение, 1975. №3 С.61-71.

© 2016, Горохова М.В.

Оценка влияния технологии изготовления прямошовных и спиральношовных труб на уровень концентрации напряжений в сварном шве

© 2016, Gorokhova M.V.

Assessment of influence of manufacturing techniques straight-line-seam and spiralno sutural pipes on the level of concentration of tension in a welded seam