

УДК 621.644.07

Д.О. Буклешев¹, e-mail: bjd@list.ru¹ ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (Самара, Россия).

ВЛИЯНИЕ НАЛИЧИЯ И ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЕ СВАРНЫХ СТЫКОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СРОК ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ

В статье рассматриваются вопросы надежности эксплуатации трубопроводов и влияния величины возникающих напряжений в околошовной зоне (ОШЗ). В процессе длительной эксплуатации магистральных трубопроводов наличие напряжений в ОШЗ негативно сказывается на прочностных характеристиках и сроке эксплуатации. Анализ причин отказов сооружений подтверждает, что зарождение трещин, приводящих к разрушению, преимущественно имеет место в зонах сварных соединений. В магистральных газопроводах более 50% отказов приходится на кольцевые швы с образованием сквозной трещины-свища. Поэтому актуальным вопросом является проведение анализа, как влияет наличие и величина напряжений в ОШЗ трубопровода на его прочностные характеристики и срок эксплуатации. В статье проведен анализ методики определения остаточного срока эксплуатации трубопровода. Выяснилось, что при возрастании напряжений в ОШЗ данная зона является наиболее уязвимой для хрупкого разрушения в силу снижения пластичности металла. Как показали измерения, величина остаточных напряжений значительно возрастает при приближении к сварному шву. Сделан вывод о том, что напряжения в ОШЗ металла трубы играют важнейшую роль при определении остаточного ресурса всего трубопровода и очень важным является точность их величины для всей конструкции.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, дефекты, напряжения в околошовной зоне, прочностные характеристики, срок эксплуатации.

В реальных условиях строительства и эксплуатации магистральных трубопроводов неизбежно претерпевают значительные изменения технического состояния, связанные с накоплением дефектов, вследствие чего происходит снижение их надежности.

Более половины аварий на трубопроводах определенным образом связаны с накоплением остаточных напряжений в околошовных зонах трубопроводов. При этом развитие нарушений (трещины) происходит

за счет образования, увеличения размера и слияния микротрещин в течение заметного времени эксплуатации трубопровода. Основными источниками развития поврежденных являются зоны концентрации напряжений. Именно в них структурно-механические свойства металла необходимо исследовать в первую очередь.

Для оценки технического состояния трубопроводов, находящихся в процессе эксплуатации, предварительно выявляют дефектные участ-

ки, дают оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) металла трубы и ОШЗ и степени опасности разрушения. Контроль НДС металла ОШЗ в трассовых условиях проводится техническими средствами, которые основаны на разных физических методах (акустические, электромагнитные, магнитные и т.д.).

Сварочный процесс оказывает интенсивные воздействия, которые способствуют появлению технологических и конструкционных кон-

центраторов напряжений (дефектов), выявить и устранить которые зачастую бывает невозможно [1]. Это обуславливает более интенсивное накопление напряжений в зоне сварного соединения, и, как следствие, более 50% разрушений сварных конструкций нефтегазопроводов происходит в околошовной зоне.

Как известно, помимо концентрации напряжений образование сварочных соединений приводит к структурным изменениям металла ОШЗ нефтегазопроводов, а также порождает дополнительные высокие сварочные остаточные напряжения. Вышеописанные факторы и их значимость (в особенности остаточные напряжения) в ряде случаев соизмеримы с концентрацией напряжений. В связи с этим рассмотрение вопросов сопротивления усталости сварных соединений целесообразно начать с выяснения роли концентрации напряжений, структурной неоднородности свойств сварного соединения и остаточных сварочных напряжений. Под концентрацией напряжений понимается местное повышение напряжений в зонах резкого изменения сечения деформируемого тела [2]. В ОШЗ такими концентра-



Рис. 1. Коррозионные каверны в околошовном участке кольцевого монтажного стыка МГ «Ухта – Торжок»

торами могут быть дефекты сварочного производства, отверстия, поры, включения, надрезы и прочие. Концентрация напряжений в сварных соединениях определяется общей структурой соединяемых элементов, геометрической формой свариваемого шва нефте-

проводами. Концентрация напряжений в сварных соединениях определяется общей структурой соединяемых элементов, геометрической формой свариваемого шва нефте-

Просто, быстро, надежно!

15 ЛЕТ

М ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
Промизоляция

(831)258-39-58, тел./факс (831)258-39-66, e-mail: promizolyaciya@ruiz.ru

www.ruiz.ru

Литкор

Литкор-НН

Литкор-НН-Арм

Литкор-ПТ

Пирма

Литэп

Комплект Литкор КМ



Защита от коррозии стальных подземных конструкций: трубопроводов, резервуаров различного назначения

Изоляция тройников, крестовин, отводов, мест врезок, сварных стыков и других элементов трубопроводов

Ремонт поврежденного изоляционного покрытия

СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ

Российская Федерация, 603058, г. Н. Новгород
ул. Новикова-Прибоя, д. 4

газопровода с основным металлом, а также способом передачи и силы энергии сварочного процесса. Для нефтегазопроводов такими концентраторами несомненно являются кольцевые стыковые соединения.

Наличие дефектов (несплошности), а также конструктивных концентраторов напряжений, связанных с резкими переходами от основного металла к металлу шва или от одного элемента к другому, может способствовать снижению надежности сварного соединения. Их отрицательное влияние иногда проявляется даже в случае статического приложения нагрузок при неблагоприятном сочетании с собственными напряжениями при действии низких температур или агрессивных сред.

Наиболее сильное влияние наличия несплошностей имеет место при работе конструкции под усталостной нагрузкой. В этом случае даже небольшой дефект или концентратор может стать источником зарождения трещины, что впоследствии приводит к разрушению всей конструкции.

Процесс сварки, обусловленный местным сплавлением соединяемых частей изделия, сопровождается изменением структуры и свойств в зоне соединения. В сварном шве выделяют три основные зоны: металл шва (МШ), зону термического

влияния (ЗТВ) и основной металл (ОМ). Свойства МШ предопределяются исходными характеристиками применяемых сварочных материалов и их изменением в процессе термического цикла сварки [6].

Таким образом, на сопротивление усталостному разрушению сварных соединений существенное влияние оказывает концентрация напряжений, связываемая с изменением форм (геометрии) шва и внутренних дефектов (пор, включений и т.д.), также образование в процессе сварки крупнозернистой структуры металла околошовной зоны.

Помимо сварочных остаточных напряжений в процессе эксплуатации происходят неоднократные продольные и поперечные перемещения трубопровода, вследствие вспучивание грунтов, что приводит к образованию напряжений. Кроме этого, возникают различного рода очаги коррозионного растрескивания и прочие дефекты (рис. 1).

Характерным для остаточных напряжений является и то, что они существуют и уравниваются внутри материала трубы без приложения к нему внешних усилий. Согласно отраслевому стандарту [3], расчет остаточного ресурса по характеристикам статической трещиностойкости при наличии усталостных диагностикой острых трещиноподобных дефектов определяют по показателям, которые

учитывают возникающие остаточные напряжения.

Расчет остаточного ресурса выполняется по характеристикам при статическом нагружении, определяемым в соответствии с [4, 5] и материалам ГУП «ИПТЭР» [7–9].

К ХАРАКТЕРИСТИКАМ СТАТИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ОТНОСЯТ:

1) разрушающее напряжение по максимальной разрушающей силе P_c ;

2) степень снижения разрушающих напряжений от наличия трещин в образце при относительной глубине трещины;

3) предел трещиностойкости для относительной глубины, равной 0,5;

4) разрушающие кольцевые напряжения для бездефектной трубы с учетом характеристик циклической трещиностойкости.

Вышеуказанные характеристики определяют по циклическим испытаниям согласно [4].

Для определения остаточного ресурса необходимо произвести расчет допустимой глубины трещины по максимальному усредненному давлению по формуле:

$$K_1 = \frac{I_c}{m_1}, \quad (1)$$

где K_1 – коэффициент интенсивности напряжений при максимальном усредненном давлении, МПа·√м; I_c – предел трещиностойкости для допустимой глубины трещины, МПа·√м;

m_1 – коэффициент запаса по пределу трещиностойкости, определяемый по формуле:

$$m_1 = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_p} \left[\frac{1 - (\sigma_p / \sigma_{BP})^2}{1 - (\sigma_{0,2} / \sigma_{BP})^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где σ_p – уровень рабочих напряжений, в данном случае равен кольцевым напряжениям при максимальном давлении.

Уровень напряжений при этом учитывает максимально допустимое давление в трубопроводе, его диаметр и толщину стенки по формуле (3):



$$\sigma_p = \frac{P_{\max} \cdot D_{\text{вн}}}{2t_H}, \quad (3)$$

где $D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы, м;

t_H – толщина стенки, м.

Коэффициент интенсивности напряжений определяется по формуле:

$$K_I = \sigma_p \sqrt{h} \cdot Y(\eta), \quad (4)$$

где $Y(\eta)$ – полином, зависящий от текущего значения относительной глубины трещины η . Его значение определяют по [4].

Предел трещиностойкости определяется по формуле:

$$I_c = 0,4 \cdot I_c^{(0,5)} \cdot \frac{\sigma_{\text{мр}}}{\sigma_{\text{мр}}^{(0,5)}} (1-\eta) Y(\eta), \quad (5)$$

где $\sigma_{\text{мр}}$ – степень разрушающих напряжений при текущем значении. Из совместного решения уравнений (4) и (5) в соответствии с равенством (1) получается допускаемая относительная глубина

трещины $\eta_{\text{кр}}$. В свою очередь, критическая глубина трещины определяется для среднего рабочего давления за необходимый период.

Для этого из совместного решения уравнений (4) и (5) при коэффициенте запаса по пределу трещиностойкости m_1 , равном единице ($m_1=1$), определяется относительное значение критической глубины трещины $\eta_{\text{кр}}$.

Остаточный ресурс магистрального газопровода определяется по времени роста трещины от допускаемой глубины до критической при усредненном максимальном давлении перекачки продукта по формуле (6):

$$T_{\text{э}} = \frac{N_{\text{тр}}}{N_p}, \quad (6)$$

где N_p – расчетное число циклов перепада рабочего давления за 1 год;

$N_{\text{тр}}$ – долговечность труб при циклическом нагружении (цикл).

Заметное влияние на механические свойства МШ оказывает также деформационный цикл [10], сопровождающий процесс его кристаллизации. Все это приводит к тому, что МШ и ОМ различаются между собой как в структурном отношении, так и по механическим, химическим и физическим свойствам. Но сами по себе эти различия не становятся причинами преждевременного усталостного повреждения МШ, если в нем нет трещин, непроваров, пор, шлаковых включений и других дефектов сварки. Было установлено, что основная причина образования трещин – это напряжения в теле металла и ОШЗ трубопровода, поэтому основным параметром учета напряжений в расчете является разрушающее окружное напряжение, которое характеризует интенсивность упругопластических деформаций трубопровода.

Количество циклов рассчитывают по формуле (7):

XXIII специализированная выставка



ОАО «Тюменская ярмарка»

Адрес: Россия, 625013, г. Тюмень, ул. Севастопольская, 12, Выставочный зал
 телефакс: (3452) 48-55-56, 48-66-99, 48-53-33; e-mail: tyumfair@gmail.com. www.expo72.ru



2016

НЕФТЬ И ГАЗ

Топливо энергетический комплекс

20-23
сентября



$$N_{\text{тр}} = \frac{h_0}{h_{\text{кр}}} N_0, \quad (7)$$

где h_0 – начальная глубина трещины, определяемая из данных диагностики. При отсутствии выраженных трещиноподобных дефектов начальная глубина трещины h_0 принимается равной допускаемой глубине трещины.

Предельное число циклов нагружения трубопровода определяют по формуле (8):

$$N_0 = \frac{h_{\text{кр}}}{c [K_{\text{Ie}}^{(0)}]^m}, \quad (8)$$

где $K_{\text{Ie}}^{(0)}$ – коэффициент интенсивности напряжений для максимального усредненного рабочего давления и начальной глубины трещины упругопластических деформаций:

$$K_{\text{Ie}}^{(0)} = \left[\frac{K_{\text{I}}^{(0)}}{\sigma_{0,2}} \right]^{\frac{2}{m+1}}, \quad (9)$$

c, m – параметры.

Предельное разрешенное давление определяется по характеристикам трещиностойкости, определенным при испытаниях на малоцикловую трещиностойкость, по формуле (10):

$$\bar{p}_c = \frac{2t}{D_{\text{вн}}} \sigma_{\text{вс}}, \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{вс}}$ – разрушающее окружное напряжение для трубы с трещиной:

$$\sigma_{\text{вс}} = \alpha_{\text{мп}} \cdot \sigma_{\text{об}} (1 - \eta), \quad (11)$$

где η – относительная глубина трещины, вычисляемая по начальной глубине трещины, принимаемой равной допускаемой глубине;

$\alpha_{\text{мп}}$ – степень снижения разрушающих напряжений;

$\sigma_{\text{об}}$ – разрушающее кольцевое напряжение для бездефектной трубы. Неблагоприятными считаются растягивающие остаточные напряжения. Они снижают вибрационную прочность сварных конструкций. Если они действуют в зонах, где есть концентрация напряжений и неоднородность механических свойств, то там в первую очередь возникают разрушения от усталости, когда как

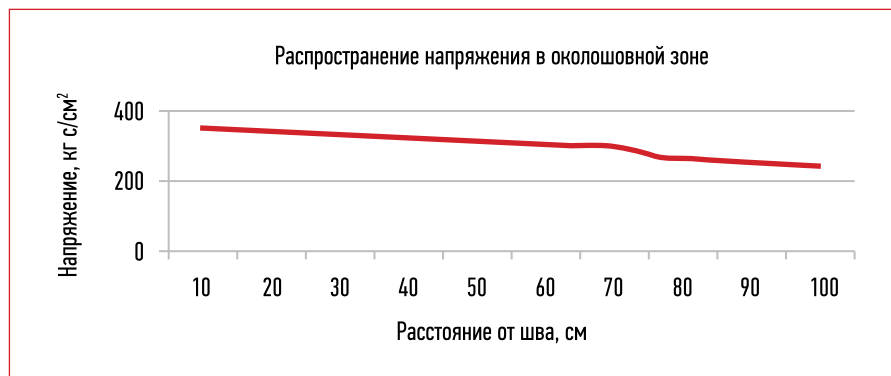


Рис. 2. Напряжения в зависимости от удаленности от сварного шва

сжимающие остаточные напряжения, наоборот, повышают усталостную прочность, поэтому их считают благоприятными.

Наличие высокого уровня рабочих напряжений в зонах сварного соединения сопровождается развитием неоднородности этих участков, т.е. увеличением разности в значениях стационарных потенциалов, отвечающих за интенсивность развития процессов коррозионно-механического повреждения или коррозионного растрескивания под напряжением. Таким образом, от наличия и величины напряжений в ОШЗ сварных стыков трубопроводов будет значительно зависеть работоспособность участка трубопровода.

При анализе распространения напряжений в околошовной зоне трубопровода выяснилось, что чем ближе измеряемые остаточные напряжения к сварному шву, тем значительно выше их значение (рис. 2). При этом чем больше значения возникающих напряжений, согласно формуле (1), тем больше будет вероятность порыва трубы на данном участке. Наличие напряжений способствует образованию благоприятных условий для развития коррозионного растрескивания под напряжением в околошовной зоне или даже хрупкому разрушению в процессе эксплуатации.

В сущности, проблемы определения отдельных напряженно-деформированных состояний под действием внутреннего давления находятся в стадии рассмотрения.

Проблема определения состояния напряжение-деформация, как правило, является не простой задачей, которую пытаются решать через модели оболочки трубы.

Техническая диагностика большинства стальных изделий и металлоконструкций предусматривает контроль НДС металла, результаты которого используются для оценки остаточного ресурса работоспособности объекта. Часто контроль НДС металла проводится в составе диагностических мероприятий, предусмотренных при проведении плановых ремонтных работ, которые предъявляют к методам и техническим средствам контроля НДС металла следующие требования:

- надежность результатов контроля НДС металла в полевых и цеховых условиях;
- эффективность контроля НДС металла, не требующая увеличения сроков и дополнительных затрат ремонтных работ;
- простота метода и технических средств контроля НДС металла, не требующих высокой квалификации персонала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При определении остаточного ресурса основные формулы учитывают напряжения практически в прямой зависимости, что позволяет нам сделать вывод о том, что их значения будут предопределять остаточный срок службы и являться одним из основных показателей возможности дальнейшей эксплуатации трубопровода.

С ростом остаточных напряжений в ОШЗ остаточный ресурс, а соответственно, и долговечность всего трубопровода значительно сокращается. Наличие больших остаточных напряжений в ОШЗ приводит к снижению сопротивления усталости сварных соединений, потере пластичности материала трубы, что способствует появлению дополнительных технологических и

конструкционных концентраторов напряжений (дефектам). Остаточные напряжения в зависимости от своих значений влияют на величину пределов выносливости в несколько раз, как в сторону повышения (при благоприятных сжимающих напряжениях), так и в сторону понижения (при неблагоприятных остаточных напряжениях). Долговечность сварных

соединений может измениться при этом в десятки раз.

Более точное определение напряжений в ОШЗ трубопровода позволит намного ближе оценивать реальный остаточный ресурс, что будет способствовать определению сроков необходимого ремонта, тем самым сократит количество аварий на магистральных нефтегазопроводах.

Литература:

1. Burkov P.V., Kalmykova K.G., Burkova S.P., Do T.T. Research of stress-deformed state of main gas-pipeline section in loose soil settlement. IOP Conference Series, E. and Env. Sc. 21 (2014) 5–7.
2. Burkov P.V., Burkova S.P., Timofeev V.Y. Analysis of stress concentrators arising during MKY.2SH-26/53 support unit testing. Applied Mechanics and Materials, 682 (2014) 216–223.
3. ОСТ 153-39.4-010-2002 Методика определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов и трубопроводов головных сооружений.
4. ГОСТ 25.506-85* Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.
5. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение.
6. Сидоров М.М. Влияние ультразвуковой ударной обработки на механические свойства и перераспределение остаточных напряжений сварных соединений трубопроводов, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера: дисс. ... канд. техн. наук. Якутск, 2014.
7. Методика определения характеристик трещиностойкости труб нефтегазопроводов. Уфа: ВНИСПТнефть, 1988.
8. Зайнуллин Р.С., Гумеров А.Г. Повышение ресурса нефтепроводов. М: Недра, 2000. 494 с.
9. Гумеров А.Г., Зайнуллин Р.С. Безопасность нефтепроводов. М: Недра, 2000. 310 с.
10. Богоявленский В. Перспективы и проблемы освоения месторождений нефти и газа шельфа Арктики // Бурение и нефть. 2012. Ноябрь. Режим доступа: <http://burneft.ru/archive/issues/2012-11/1>. Дата обращения: 19.02.2016.

НЕФТЬ. ГАЗ. ХИМ



20-я юбилейная
специализированная
выставка
с международным участием

23 - 25 августа

НЕФТЕГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ
(СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ РАЗДЕЛ)



ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР
СОФИТ-ЭКСПО
ТЕЛ: (8452) 206-470, 206-926
<http://expo.soft.ru>
<http://vk.com/softit.expo>