



УДК 622.691.4.053 (571.56-17)

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ СТЫКОВ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Н. И. ГОЛИКОВ, канд. техн. наук, **В. В. ДМИТРИЕВ**, инж.
(Ин-т физ.-техн. проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, РФ)

Экспериментально исследованы поля остаточных сварочных напряжений кольцевых стыков магистрального газопровода диаметром 530 мм и толщиной стенки 7 мм после длительной эксплуатации в условиях Севера. Показано, что в кольцевых сварных соединениях магистрального газопровода после 40 лет эксплуатации сохраняется высокий уровень растягивающих остаточных сварочных напряжений. В местах образования гофра остаточные сварочные напряжения могут достигать до 87 % предела текучести основного металла. Их необходимо учитывать при расчетах остаточного ресурса сварных магистральных трубопроводов.

Ключевые слова: сварные магистральные газопроводы, кольцевые стыки, зона термического влияния, остаточные растягивающие сварочные напряжения, гофр, ресурс

Срок эксплуатации некоторых участков действующих магистральных газопроводов Кысыл–Сыр–Мастах–Бэргэ–Якутск, которые вводились в эксплуатацию в 1967–1988 гг., достигает 40 лет. Сбор и обработка статистических данных по отказам магистрального газопровода ведутся с момента ввода в эксплуатацию. Анализ наиболее характерных причин отказов газопровода выявил, что более 50 % отказов приходится на сварные кольцевые швы с образованием сквозной трещины-свища. Изучение причин образования свищей показало, что основными очагами разрушений служат дефекты сварки корневого шва (непровары, поры, шлаки), являющиеся концентраторами напряжений [1].

Известно, что в процессе сварки монтажных стыков трубопроводов формируется напряженно-деформированное состояние, обусловленное полем остаточных сварочных напряжений (ОСН). Одной из особенностей сварки кольцевых швов цилиндрических оболочек является появление «проседания» шва, т. е. радиальных перемещений, приводящих к сужению диаметра трубы на участке сварного соединения. Вследствие этого происходит понижение кольцевых ОСН (σ_θ), а при некотором сочетании режимов сварки, свойств металла и параметров жесткости оболочки σ_θ в шве могут быть даже близкими к нулю. Осевые напряжения σ_z с внутренней стороны оболочки из-за изгиба оказываются растягивающими, а на поверхности металла с наружной стороны — сжимающими [2, 3]. Уровень растягивающих ОСН

с внутренней стороны стенки оболочки может достигать предела текучести основного металла [4]. В работе [5] измерены кольцевые остаточные деформации сварного стыка трубы из аустенитной стали 10X18H10T с помощью тензорезисторов (база 10 мм). По полученным данным в зоне 25...30 мм от центра шва на внутренней и наружной поверхностях трубы обнаружены растягивающие остаточные сварочные деформации. Таким образом, растягивающие ОСН кольцевых стыков труб являются одним из факторов, значительно влияющим на возникновение сквозных хрупких трещин в швах.

Известно, что при значительных упругопластических деформациях происходит практически полная релаксация ОСН. В связи с этим в области квазистатического разрушения ОСН не влияют на циклическую прочность сварного соединения. При нагрузках соответствующих областей малоциклового усталости релаксация ОСН обычно происходит достаточно интенсивно в течение нескольких первых циклов [6]. В то же время практически отсутствуют сведения относительно исследований релаксации ОСН при длительной эксплуатации конструкций. В ходе эксплуатации вследствие резкого температурного перепада, структурных изменений и упругопластического деформирования изменяются поля распределения ОСН сварных соединений стыков труб. В связи с этим были проведены исследования ОСН кольцевых стыков магистрального газопровода диаметром 530 мм, толщиной стенки 7 мм, эксплуатировавшегося около 40 лет.

Измерения ОСН в приповерхностных слоях трубы с внутренней и наружной сторон проводили с помощью переносного рентгеновского определителя напряжений.

© Н. И. Голиков, В. В. Дмитриев, 2012

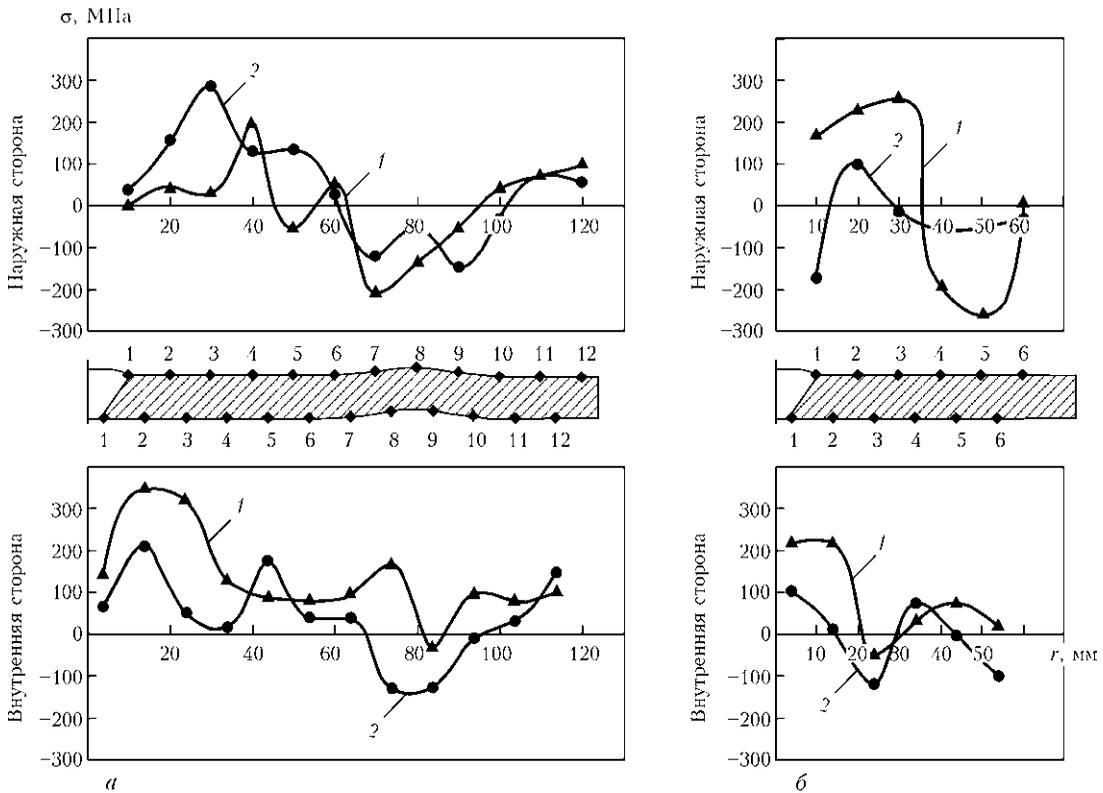


Рис. 1. Распределение остаточных сварочных напряжений кольцевого стыка первой катушки газопровода диаметром 530 мм со стороны гофра (а) и недеформированного участка (б): 1 — осевые; 2 — кольцевые напряжения

Первая катушка фрагмента трубы с кольцевым стыком была вырезана из участка магистрального газопровода Бэргэ–Якутск из-за образования в ней гофра в процессе эксплуатации. Механические характеристики основного металла трубы следующие: $\sigma_v = 501$ МПа; $\sigma_T = 383$ МПа; $\delta = 24,9\%$. По результатам механических испытаний и спектрального анализа металл трубы соответствует низколегированной стали марки 09Г2С.

Режимы сварки магистрального газопровода даны в монографии академика В. П. Ларионова [7]. Сварку выполняли в три слоя с применением сварочной проволоки Св-10Г2 (диаметр 2 мм) под флюсом АН-348А, прокаленным при температуре 250...300 °С в течение 1,5 ч, при следующих режимах: $I_{св} = 440...500$ А, $U_{св} = 38...42$ В, $v_{св} = 32...35$ м/ч. Это обеспечивало уровень погонной энергии в пределах 1600...1900 кДж/м, являющийся оптимальным для получения сварного соединения с требуемой хладостойкостью. Усиление шва составляло 2...3 мм с плавным переходом к основному металлу, ширина шва — 18...20 мм.

В процессе эксплуатации газопровода на расстоянии 80 мм от сварного соединения образовался гофр длиной 520 мм и высотой 7 мм. Измерения ОСН проводили на участке гофра, а также на недеформированном участке с противоположной стороны трубы. По результатам измерений с наружной стороны трубы было установлено (рис. 1, а), что на расстоянии 30 мм от центра

шва наблюдаются значительные растягивающие напряжения, достигающие в кольцевом направлении 300 МПа, а в осевом (на расстоянии 40 мм) — до 200 МПа. Вблизи гофра характер изменения напряжений следующий: имеются значительные сжимающие напряжения в кольцевом и осевом направлениях, достигающие 150...200 МПа. На внутренней поверхности стенки трубы в околосшовной зоне наблюдается высокий уровень растягивающих ОСН в осевом направлении, достигающих 350 МПа. В точках вблизи гофра имеют место сжимающие напряжения в кольцевом направлении (до 150 МПа) и незначительные напряжения — в осевом.

Таким образом, вследствие появления гофра на участке термического влияния сварного шва во внутренних и наружных приповерхностных слоях наблюдаются значительные растягивающие напряжения.

На участке с противоположной стороны на наружной поверхности трубы наблюдается (рис. 1, б) высокий уровень растягивающих и сжимающих напряжений в осевом направлении, максимально достигающих 250 МПа. На внутренней поверхности трубы уровень ОСН на расстоянии 15 мм составляет 230 МПа.

Вторая катушка была вырезана из участка магистрального газопровода, где произошла авария. Она представляет собой раскрытие металла вдоль трубопровода с наружной стороны с многочисленными ветвлениями трещины на месте монтаж-



Рис. 2. Общий вид разрушения магистрального газопровода Бэргэ–Якутск

ного кольцевого шва (рис. 2). После аварии были собраны фрагменты разрушения общей протяженностью 2160 мм. Кольцевой шов разорван поперек на четыре отдельных участка: 1010, 235, 315, 127 мм соответственно. Общая длина шва по периметру составляет 1687 мм. Разрушение носило взрывной характер без возгорания. Распространение трещин происходило по механизму отрыва на местах остановки трещины, переходящим в механизм сдвига с пластическими составляющими.

Исследование поверхности излома разрушения труб показало, что очаг разрушения расположен с внутренней стороны трубы, перпендикулярно кольцевому шву в зоне термического влияния на месте соединения основного металла и сварного шва и имеет достаточную протяженность и долговременность роста трещины. Поверхность излома разрушения свидетельствует о длительном развитии трещины.

Трещина имела остановку при переходе к основному металлу, о чем свидетельствует переходная зона. Затем трещина начала продвижение в глубь основного материала, где наблюдались радиальные рубцы, исходящие от этой зоны и перешедшие впоследствии в магистральную трещину, которая имела шевронный узор. Трещина более длительно и равномерно развивалась в направлении, перпендикулярном основному металлу, под действием максимальных растягивающих напряжений, которые характеризуются усталостными бороздками. Она остановилась непосредственно в сварном шве, что свидетельствует о достаточной сопротивляемости металла сварного шва распространению трещины по сравнению с основным металлом.

Вследствие того, что очаг разрушения расположен с внутренней стороны трубы перпендикулярно кольцевому шву, в зоне термического влияния были исследованы ОСН внутренних приповерхностных слоев трубы. Разрушению подвергалась верхняя часть газопровода, поэтому из оставшегося в траншее участка с кольцевым швом была вырезана проба размером 600×700 мм. По результатам измерений уровень кольцевых ОСН

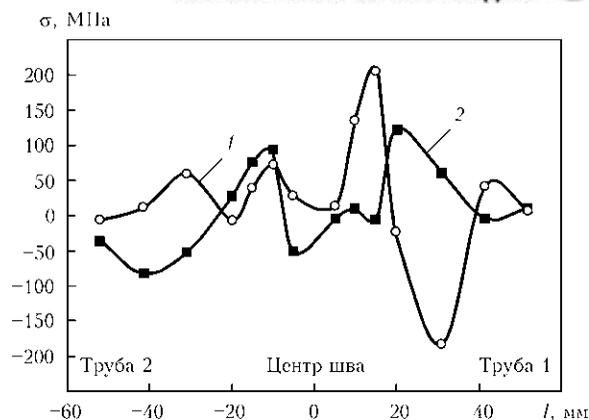


Рис. 3. Распределение ОСН в кольцевом стыке второй катушки газопровода диаметром 530 мм: 1 — кольцевые; 2 — осевые напряжения

на расстоянии 15 мм от центра шва достигает 210 МПа, что составляет 65 % предела текучести. После химического анализа стали трубы выяснилось, что использовали стали двух разных марок 09Г2С (труба 2) и 17Г1С (труба 1). Как видно из рис. 3, распределение ОСН относительно центра шва несимметрично. Несимметричность распределения ОСН объясняется различным химическим составом труб.

Таким образом, проведенные исследования позволяют установить, что в кольцевых сварных соединениях магистрального газопровода диаметром 530 мм после его 40-летней эксплуатации сохраняется высокий уровень растягивающих ОСН. В местах образования гофра ОСН могут достигать 87 % предела текучести основного металла. Максимальный уровень кольцевых напряжений в пробе, вырезанной из участка магистрального газопровода, где произошла авария, достигает 65 % предела текучести. Следовательно, при расчетах остаточного ресурса кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов необходимо учитывать ОСН, а степень их влияния на усталостную прочность зависит от материала трубы.

Работа выполнена в рамках проекта фундаментальных исследований, проводимых СО РАН совместно с УрО РАН в 2012–2014 гг., проект № 27.

1. *Эксплуатация магистральных газопроводов в условиях Севера / А. В. Лыглаев, А. И. Левин, И. А. Корнев и др. // Газ. пром-сть. — 2001. — № 8. — С. 37–39.*
2. *Винокуров В. А., Григорьянц А. Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. — М.: Машиностроение, 1984. — 284 с.*
3. *Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.*
4. *Аммосов А. П., Голиков Н. И. Диагностика сварных соединений действующих магистральных трубопроводов надземной прокладки, эксплуатируемых в условиях Севера // Контроль. Диагностика. — 1999. — № 9. — С. 13–17.*
5. *Остаточные сварочные напряжения в зоне кольцевых сварных стыков трубопроводов из аустенитной стали /*



- В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, В. М. Шекера и др. // Автомат. сварка. — 1998. — № 11. — С. 32–39.
6. *Игнатъева В. С., Кулахметьев Р. Р., Ларионов В. В.* Влияние остаточных напряжений на развитие усталостной трещины в области сварного стыкового шва // Там же. — 1985. — № 1. — С. 1–4.
7. *Ларионов В. П.* Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении. — Новосибирск: Наука, 1986. — 256 с.

Fields of residual welding stresses in circumferential butt joints of the main pipelines of 520 mm diameter with 7 mm wall thickness after long-term service under the North conditions were experimentally studied. It is shown that a high level of tensile residual welding stresses is preserved in circumferential welded joints of the main gas pipelines after 40 years of service. In sites of corrugation formation the residual welding stresses may reach 87 % of base metal yield point. Residual stresses should be taken into account at calculations of residual life of circumferential welded joints on the main pipelines.

Поступила в редакцию 27.10.2012

РАЗРАБОТАНО В ИЭС

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ОПЛАВЛЕНИЕМ ТРУБОПРОВОДОВ

В ИЭС разработаны технологии и оборудование для стыковой сварки непрерывным оплавлением трубопроводов диаметром от 57 до 1420 мм. С применением этих технологий сварено более 70 тыс. км газо- и нефтепроводов, в том числе в условиях Крайнего Севера России, пустынь Ирака и Туркмении. Технологии контактной стыковой сварки имеют следующие преимущества:

- высокое и стабильное качество сварных соединений, соответствующее требованиям международных стандартов;
- высокая производительность — 6... 12 стыков в час;
- сварка выполняется без вспомогательных материалов;
- для торцов труб не требуется специальная разделка под сварку;
- процесс сварки полностью автоматизирован, что обеспечивает стабильное воспроизведение заданных режимов;
- компьютеризированная система контроля режима сварки обеспечивает высокую достоверность оценки качества соединений.

