



УДК 621.644.07

ОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОКОЛОШОВНЫХ ЗОН

OPERATIONAL HAZARDS OF MAIN PIPELINES WITH INTENSIVE STRESS-STRAIN STATE IN WELD-AFFECTED ZONES

Буклешев Д.О.

аспирант,
Самарский государственный
технический университет
bukleshev_dima@mail.ru

Bukleshev D.O.

Graduate student,
Samara State Technical University
bukleshev_dima@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен процесс концентрации напряжений в околошовной зоне как фактор возникновения дефектов. Автор пришел к выводу, что одним из сильнейших факторов, влияющих на работоспособность сварных соединений, является остаточное напряженное поле в зоне шва. Вследствие резкого температурного перепада, структурных изменений и упруго-пластического деформирования в зонах сварных соединений возникают значительные остаточные напряжения, величина которых может достигать и даже существенно превышать предел текучести основного металла.

Annotation. Stress concentration process in a weld-affected zone as a factor causing defects is considered. The author has concluded that one of the strongest factors influencing welded joint operability is the residual stress in the weld area. Due to sharp heat drop, structural changes and elastic-plastic strain in weld joint zones, there is considerable residual stress the size of which can reach and even substantially exceed base metal yield limit.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, околошовная зона, зона термического влияния, деформация, напряженно-деформированное состояние.

Keywords: main pipeline, weld-affected zone, heat affected zone, strain, stress-strain state.

Введение

Слабым звеном сварных конструкций часто является не только сам сварной шов, формирующийся из расплавленного жидкого металла, но и зона термического влияния (ЗТВ), в которой сталь испытывает фазовые и структурные превращения, связанные с нагревом и охлаждением [16].

На сегодняшний день коррозионное повреждение является самым основным из факторов, приводящих к выходу из строя МГ. Как показывают исследования, коррозионные повреждения тесно связаны с напряженно-деформационным состоянием (НДС) околошовной зоны (ОШЗ) [11]. Имеет место важность применения точного, удобного и не дорогого способа оценки напряжений в ОШЗ, т.к. недооценка напряжений в зонах шва может привести к снижению прочности и целостности конструкции трубопровода, а переоценка их значений приведет к чрезмерному усложнению процесса его изготовления.

Процессы коррозии, приводящие к снижению уровня эксплуатационной надежности и постепенному разрушению газо- и нефтепроводов, а также стенок вертикальных стальных резервуаров, являются актуальной проблемой при эксплуатации объектов транспорта углеводородов. Наименее затратным и экономически выгодным является своевременное определение дефектов и повреждений стенки трубопроводов методами неразрушающего контроля.

Может заключить, что одним из сильнейших факторов, влияющих на работоспособность сварных соединений, является остаточное напряженное поле в зоне шва. Вследствие резкого температурного перепада, структурных изменений и упруго-пластического деформирования в зонах сварных соединений возникают значительные остаточные напряжения, величина которых может достигать и даже существенно превышать предел текучести основного металла.

Цель статьи

Рассмотреть процесс концентрации напряжений в околошовной зоне как фактор возникновения дефектов.

Изложение основного материала

Характерным для остаточных напряжений вообще является то, что они существуют и уравниваются внутри изделия без приложения к нему внешних усилий.



Интерес к исследованию остаточных напряжений в сварных конструкциях обуславливается тем, что они существенно влияют на прочность и долговечность сварного соединения. Как известно, для пластичных материалов остаточные напряжения практически не влияют на величину остаточных напряжений, однако в условиях хрупкого разрушения их влияние может быть значительным [10].

Роль остаточных напряжений в сопротивлении усталости сварных соединений резко увеличивается с ростом концентрации напряжений. В этих случаях остаточные напряжения могут изменять 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 [9].

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

Проявление остаточных напряжений в швах будет сильнее при сварке толстых сечений и слабее при сварке тонких сечений. Это объясняется величиной и объемностью остаточных напряжений [17]. По объемности остаточные напряжения по существующей классификации делят на три рода. Напряжениями первого рода называют напряжения, уравнивающиеся в макрообъеме, т.е. соизмеримом с размерами всего изделия; напряжениями второго рода – уравнивающиеся в микрообъеме, соизмеримом с объемом одного или нескольких зерен металла, и, наконец, напряжениями третьего рода – всевозможные искажения кристаллической решетки металла [10].

Как правило, остаточные напряжения в зоне сварного шва являются двух- или трехосными с резкими градиентом и сложным характером распределения по отдельным направлениям. Механические свойства металла в зоне шва также неоднородны, поэтому и влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости будет различной для различных участков зоны шва. Эти обстоятельства весьма затрудняют применение расчетных методов для количественного определения влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости сварных соединений [9].

Влияние остаточных напряжений на прочность соединений при статических нагрузках рассматривается обычно в связи со свойствами металла конструкции и тем предельным состоянием, по которым оценивается ее работоспособность [2]. При анализе влияния остаточных напряжений [3] на статическую прочность следует складывать не напряжения, а деформации. Если деформации, вызванные сваркой, невелики по сравнению с исходной пластичностью, то их действие практически не проявляется. При больших концентрациях сварочных пластических деформаций или при низкой пластичности материала они могут в значительной степени снизить запас пластичности и повлиять на прочность соединения.

В работе [14] отмечено, что отрицательное влияние ОСН на работоспособность сварных соединений зависит от характеристики цикла и усиливается при малом уровне рабочих напряжений. В отдельных случаях ОСН снижают усталостную прочность сварного изделия на 35–50 %, причем между пределом выносливости и величиной ОСН иногда обнаруживается линейная зависимость.

Хрупкое разрушение происходит под действием комплекса факторов [8]. В числе факторов, способствующих хрупкому разрушению основного металла, можно выделить: низкую температуру, объемное напряженное состояние, масштабный эффект, увеличение скорости деформации, концентрацию напряжений и др., а также ряд факторов, свойственных сварному соединению: трещин подобные дефекты, деформационное старение, остаточные напряжения растяжения и др.

В работе [5] были проведены специальные эксперименты для определения влияния остаточных напряжений и деформационного старения на хрупкую прочность сварных соединений из малоуглеродистой стали. Эксперименты с образцами без деформационного старения выявили, что остаточные напряжения не влияют на прочность в диапазоне вязких разрушений и уменьшают сопротивляемость стали возникновению хрупких трещин только при температурах, соответствующих переходу от квазихрупкого разрушения и ниже. При исследовании образцов с деформационным старением получено, что деформационное старение перемещает нижний порог номинальной прочности в сторону положительных температур, вследствие чего влияние остаточных напряжений проявляется при более высоких температурах.

Остаточные напряжения алгебраически суммируются с напряжениями, обусловленными внешней нагрузкой [4]. Соответственно, хрупкое разрушение при наличии ОСН может наступить при сравнительно малой нагрузке [2].

В сварных соединениях кольцевых стыков труб основное влияние на образование остаточных сварочных напряжений оказывают окружное сокращение металла в зоне пластических деформаций и изгиб оболочки. В многослойных швах к этим двум факторам добавляются неравномерность усадки поперек шва и порядок выполнения отдельных слоев [1].



В кольцевых стыках труб, выполняемых за один или много проходов, остаточные сварочные напряжения считаются практически асимметричными [3]. Поэтому предполагается, что для отдельно прохода сварочный шов накладывается одновременно по всей окружности трубы [6].

Зоны концентраций напряжений (ЗКН) в сварных узлах активизируют коррозионный процесс. Проблема защиты от коррозионного разрушения трубопроводов, работающих при интенсивных механических воздействиях, является важной задачей. Суммарные напряжения в условиях воздействия коррозионно-активных сред повышают скорость общей коррозии и вызывают наиболее опасные виды разрушения – коррозионное растрескивание под напряжением (КРП) и коррозионную усталость.

Коррозионные дефектные области имеют сложную геометрию и вблизи очага коррозии, по толщине трубопровода возникают зоны с неоднородностью механических характеристик. Установлено, в частности, что зарождение стресс-коррозионных трещин и их развитие происходят весьма скоротечно и лавинообразно, а характер и скорость распространения являются труднопрогнозируемыми. Поэтому в силу опасности дефектов типа КРН их обнаружение на самой ранней стадии имеет первостепенную важность для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации трубопроводов.

Часто дефекты типа КРН локализуются в ЗТВ сварного шва. Анализ аварийных разрушений трубопроводов указывает на то, что более 60 % разрушений происходит из-за КРН при воздействии грунтовых вод, при этом разрушения происходят преимущественно в ОШЗ, на расстоянии 15–200 мм от оси продольного сварного шва [15]. Это связано с тем, что ОШЗ характеризуется высокими напряжениями.

К пониманию природы образования ОШН есть много подходов. Одним из факторов возникновения концентрации напряжений в ОШЗ считают структурную неоднородность.

С ОШН связана основная часть аварий трубопроводов, они являются основными источниками повреждений в виде коррозионных трещин. В зонах концентраций напряжения развивается неоднородность стационарных потенциалов, которые отвечают за интенсивность развития процессов коррозионно-механического повреждения. Соответственно от величины напряжений в ОШЗ будет зависеть работоспособность участка трубопровода [7].

Для возникновения и развития коррозионного растрескивания под напряжением необходимо одновременное наличие трех факторов, принятых основными, а именно: коррозия трубы, т.е. наличие специфической коррозионно-активной среды, в которой происходит транспорт молекул воды, кислорода, углекислого газа к поверхности металла; защита трубы от коррозии (активная и пассивная), при нарушении которой происходит отслоение покрытия от поверхности трубы и образование локальных очагов коррозии; механические напряжения – наличие кольцевых и циклических напряжений в трубопроводах при транспортировке продукта [13]. После разрушения изоляции начинается процесс коррозии под напряжением по механизму анодного растворения, поверхность трубы покрывается мелкими трещинами, вытянутых в направлении, перпендикулярном действию максимальных растягивающих напряжений.

Уровень эксплуатационных напряжений в ОШЗ газового трубопровода определяется внутренним давлением газа, деформациями, связанными с проседанием грунта под трубой и изгибающими моментами от собственного веса трубы и грунта засыпки. Так же имеют значения местные геометрические особенности (например, зоны сварных соединений), обуславливающие концентрацию номинальных напряжений. Как правило, эти зоны в районе продольных (заводских) и кольцевых (монтажных) сварных соединений являются наиболее уязвимыми для возникновения и развития соответственно продольных и окружных коррозионных трещин [12].

Из практики известно, что коррозионные трещины возникают и развиваются в зоне как продольного, так и окружного шва, хотя условия возникновения относительно нормальных напряжений, ответственных за образование и развитие таких дефектов, разные [18]. В обычных условиях при хорошем прилегании трубы к грунту и незначительных изгибных деформациях по номинальным нормальным напряжениям продольные сварные соединения более уязвимы (при прочих равных условиях), чем кольцевые.

При нагружении трубопровода только внутренним давлением указанный фактор будет иметь место, если значения коэффициента концентрации в зоне монтажного кольцевого сварного шва на наружной поверхности трубы будут в 2 раза выше, чем в зоне продольного сварного шва, выполненного в заводских условиях. Последнее подтверждается известными зависимостями, связывающими источники концентрации напряжений в сварных стыковых соединениях.

Выводы

Можем заключить что, коррозионные трещины и трещины разрушения сварных соединений берут начало в ЗКН трубопровода. Развитие трещины происходит скоротечно, характер и скорость их распространения сложно прогнозируются. Поэтому в силу опасности дефектов типа КРН важно проводить диагностику ОШЗ газопроводов на наличие ЗКН, так как их обнаружение играет важную роль для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации трубопроводов.



Литература:

1. Вагапов И.К. Исследование влияния ультразвуковой ударной обработки на значение и распределение напряжений в сварной заготовке // *Авиационная техника*. – 2005. – № 2. – С. 56–59.
2. Винокуров В.А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений. – М. : Машиностроение, 1973. – 213 с.
3. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. – М. : Машиностроение, 1984. – 284 с.
4. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М. : *Металлургия*, 1989. – 254 с.
5. Гиренко В.С., Котенко Э.В. Влияние остаточных напряжений и деформационного старения на сопротивляемость стали образованию хрупких трещин // *Автоматическая сварка*. – 1968. – № 2. – С. 34–37.
6. Доронин С.В., Москвичев В.В. Нормирование долговечности и дефектности сварных конструкций // *проблемы машиностроения и надежности*. – 1998. – №1. – С. 44–49.
7. Касьянов А.Н. Оценка работоспособности околошовных зон кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов : дис. ... канд. техн. наук. – М., 2012. – 212 с.
8. Копельман Л.А. Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. – Л. : Машиностроение, 1978. – 232 с.
9. Кудрявцев И.В., Наумченков Н.Е. Усталость сварных конструкций. – М. : Машиностроение, 1976. – 270 с.
10. Кудрявцев П.И. Остаточные сварочные напряжения и прочность соединений. – М. : Машиностроение, 1964. – 93 с.
11. Буклешев Д.О. Влияние наличия и величины напряжений в околошовной зоне сварных стыков на прочностные характеристики и срок эксплуатации трубопроводов // *Журнал: Территория Нефтегаз. Коррозия*. – М. : 2016. – № 2 (34) – С. 30–35.
12. Махненко В.И., Шекера В.М. Анализ условий возникновения и развития коррозионных трещин в зоне кольцевых сварных соединений магистральных газопроводов // *Журнал Автоматическая сварка*. – 2009. – № 5. – С. 5–11.
13. Ныркова Л.И. Оценка вероятности возникновения коррозионного растрескивания под напряжением участка магистрального газопровода на основе анализа данных проектно-исполнительной и эксплуатационной документации // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2011. – № 3. – С. 18–22.
14. Окерблом Н.О. Сварочные деформации и напряжения. Теория и применения. – М. : Машгиз, 1948. – 248 с.
15. Рафалович И.М., Марков С.И. Особенности напряженно-деформированного состояния металла прямошовных сварных труб // *Наука и техника в газовой промышленности*. – 2010. – № 3. – С. 102–107.
16. Счастливцев В.М., Табачникова Т.И., Яковлева И.Л. Перекристаллизация сталей при сварочном нагреве // *Сварка и диагностика*. – 2011. – № 3. – С. 8–13.
17. Буклешев Д.О. Образование дефектов в околошовных зонах сварных стыков магистральных газопроводов под воздействием рабочих нагрузок // *Журнал: Трубопроводный Транспорт. Теория и практика*. – М. : ВНИИСТ, 2016. – № 1 (53) – С. 31–35.
18. Буклешев Д.О. Определение характера дефектов путем исследования внутренней структуры сварных соединений газопровода различными методами // *Журнал Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2016. – № 10. – С. 7–12.

References:

1. Vagapov I.K. A research of influence of ultrasonic shock processing on value and distribution of tension in welded preparation // *the Aircraft equipment*. – 2005. – No. 2. – P. 56–59.
2. Vinokurov V.A. A holiday of welded designs for decrease in tension. – M. : Mechanical engineering, 1973. – 213 p.
3. Vinokurov V.A., Grigoryants A.G. Theory of welding deformations and tension. – M. : Mechanical engineering, 1984. – 284 p.
4. Vishnyakov Ya.D., Piskarev V.D. Management of residual tension in metals and alloys. – M. : Metallurgy, 1989. – 254 p.
5. Girenko V.S., Kotenko E.V. Influence of residual tension and deformation aging on resilience became formation of fragile cracks // *Automatic welding*. – 1968. – No. 2. – P. 34–37.
6. Doronin S.V., Moskvichev V.V. Rationing of durability and deficiency of welded designs/problems of mechanical engineering and reliability. – 1998. – No. 1. – P. 44–49.
7. Kasyanov A.N. Assessment of operability of okoloshovny zones of ring welded connections of the main pipelines : yew. ... Cand. Tech. Sci. – M., 2012. – 212 p.
8. Kopelman L.A. Resilience of welded knots to fragile destruction. – L. : Mechanical engineering, 1978. – 232 p.
9. Kudryavtsev I.V., Naumchenkov N.E. Fatigue of welded designs. – M. : Mechanical engineering, 1976. – 270 p.
10. Kudryavtsev P.I. Residual welding tension and durability of connections. – M. : Mechanical engineering, 1964. – 93 p.
11. Bukleshev D.O. Influence of existence and size of tension in an okoloshovny zone of welded joints on strength characteristics and term of operation of pipelines // *Magazine: Territory Neftgaz. Corrosion*. – M. : 2016. – No. 2 (34) – P. 30–35.
12. Makhnenko V.I., Shekera V.M. The analysis of conditions of emergence and development of corrosion cracks in a zone of ring welded connections of the main gas pipelines // *the Magazine Automatic welding*. – 2009. – No. 5. – P. 5–11.



13. Nyrkova L.I. Assessment of probability of emergence of corrosion cracking energized the site of the main gas pipeline on the basis of the analysis of data design исполнительной and operational documentation // Technical diagnostics and nondestructive control. – 2011. – No. 3. – P. 18–22.
14. Okerbl N.O. Welding deformations and tension. Theory and applications. – М. : Mashgiz, 1948. – 248 p.
15. Rafalovich I.M., Markov S.I. Features of the intense deformed condition of metal of straight-line-seam welded pipes // Science and technology in the gas industry. – 2010. – No. 3. – P. 102–107.
16. Schastlivtsev V.M., Tabachnikova T.I., Yakovleva I.L. Recrystallization staly at welding heating // Welding and diagnostics. – 2011. – No. 3. – P. 8–13.
17. Bukleshev D.O. Formation of defects in okoloshovny zones of welded joints of the main gas pipelines under the influence of working loadings // the Magazine: Pipeline Transport. Theory and practice. – М. : VNIIST, 2016. – No. 1 (53) – P. 31–35.
18. Bukleshev D.O. Determination of nature of defects by a research of internal structure of welded connections of the gas pipeline by various methods // the Magazine the International magazine applied and fundamental researches. – 2016. – No. 10. – P. 7–12.