ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

RESEARCH OF MAGNETIC CONTROL FOR METAL STRESSED STATE AND WELDED SEAMS OF STEEL PIPELINE

В. Р. Мардамшин
Vadim R. Mardamshin

ООО «Газпром трансгаз Уфа»,
г. Уфа, Российская Федерация

Gazprom transgaz Ufa LLC,
Ufa, Russian Federation

Т. Р. Загидулин
Timur R. Zagidulin

ООО «Научно-технический
центр «Спектр»,
г. Уфа, Российская Федерация

Scientific and Technical Center
«Spector» LLC,
Ufa, Russian Federation

Т. А. Бакиев
Tagir A. Bakiev

ООО «Газпром трансгаз Уфа»,
г. Уфа, Российская Федерация

Gazprom transgaz Ufa LLC,
Ufa, Russian Federation

Р. В. Загидулин
Rinat V. Zagidulin

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Приведены результаты комплексного неразрушающего контроля стального трубопровода средствами ультразвуковой дефектоскопии и магнитного контроля напряженного состояния, которые получены при гидравлических испытаниях стенда, изготовленного из труб магистрального газопровода, имеющего длительный срок эксплуатации.

Показано, что магнитный контроль позволяет с достаточной надежностью выявлять области с повышенным напряженным состоянием металла в кольцевых и продольных сварных швах и в металле стального трубопровода.

Выявленные участки кольцевого и продольного сварного швов с зонами повышенного напряженно-деформированного состояния металла полностью соотносятся с результатами ультразвуковой дефектоскопии и исследований макрошлифов участков сварного шва с дефектами сплошности металла.

При магнитном контроле напряженного состояния металла установлено, что увеличение внутреннего давления трубопровода приводит к уменьшению величины эффективных механических напряжений в кольцевом сварном шве.

Приведены также результаты гидравлического испытания стенда на статическую прочность, при котором произошло разрушение металла стальной трубы на участке с ранее установленным при магнитном контроле повышенным напряженным состоянием металла, и содержащем дефект сплошности, выявленный ультразвуковой дефектоскопией.

The results of an integrated non-destructive testing of a steel pipeline by means of ultrasonic inspection and magnetic inspection are given. These results are obtained in the course of the hydraulic pressure test of a stand made of pipes cut from main gas pipeline having long service life.

Ключевые слова

контроль
напряженно-
деформированного
состояния,
контроль
качества сварных
соединений,
магнитный
контроль,
циклические
испытания,
гидравлические
испытания
двухтрубной
плети, дефекты

It is shown that the magnetic inspection makes it possible to identify sections with increased stress state in girth and longitudinal welds and in the steel pipeline metal.

The identified sections of the girth and longitudinal welds with the zones of increased strain-stress state of metal are entirely correlated with the results of ultrasonic inspection and investigation of macrosections of welded seams with defects of metal's integrity.

Within the magnetic stress control of metal it is found that internal pressure increase of the pipeline leads to a decrease of effective mechanical stresses value in the longitudinal weld.

The results of the hydraulic test of the stand on the static load strength are also given. The metal of the steel pipe is destroyed in the section previously detected by magnetic inspection as a section with increased stress state of the metal and containing an integrity defect detected by ultrasonic inspection.

Key words

testing of strain-stress state, welded seams testing, magnetic inspection method, cyclic testing, hydraulic test of the double-pipe stalk, defects

Введение

Одним из важных направлений в практической деятельности газотранспортных предприятий является оценка технического состояния эксплуатируемых магистральных газопроводов (МГ), обладающих значительной протяженностью и продолжительными сроками эксплуатации. Стальные трубы подземных магистральных и технологических трубопроводов, имеющие длительные сроки эксплуатации, содержат как явные, так и скрытые дефекты металла. При эксплуатации МГ металл стальных труб находится в сложном напряженном состоянии, сформировавшемся за счет силового действия множества факторов (давление рабочей среды, внешние проектные и неучтенные нагрузки и т. д.) [1].

Для получения достоверной информации о техническом состоянии стальных труб МГ целесообразно выявление не только макроскопических дефектов сплошности, но осуществление контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) металла. В связи с этим оценка возможностей технических средств неразрушающего контроля (НК) по оценке НДС металла стальных труб МГ является весьма актуальной.

В настоящее время существуют различные методы и технические средства НК напряженного состояния металла стальных изделий и металлоконструкций, основанные на разных физических принципах и имеющие свои преимущества и недостатки. Опыт показывает, что наибольшей эффективностью в полевых условиях работы имеют магнитные и электромагнитные методы и технические средства контроля НДС металла стальных изделий и металлоконструкций, которые основаны на корреляции структурно-чувствительных магнитных параметров металла от величины механического напряжения [2–6].

Для оценки потенциальных возможностей магнитного метода контроля НДС металла

стальных труб ООО «Газпром трансгаз Уфа» совместно с ООО «НТЦ «Спектр» были проведены комплексные гидравлические испытания двухтрубной плети, изготовленной из труб, бывших в эксплуатации в составе МГ «Шкапово — Ишимбай», с наружным диаметром 530 мм.

Целями проведения испытаний являлись:

1. Оценка влияния на усталостную прочность металла (срок службы) стального газопровода натурного циклического нагружения и дефектов сплошности металла производственного и эксплуатационного происхождения;
2. Магнитный контроль напряженного состояния металла кольцевых и продольных сварных соединений стального газопровода;
3. Магнитный контроль напряженного состояния металла тела трубы стального газопровода;
4. Исследование возможности определения участков эксплуатируемого стального газопровода с наибольшей вероятностью разрушения металла по результатам магнитного контроля НДС металла.

Результаты магнитного контроля напряженного состояния металла стального трубопровода

Гидравлические испытания стенда включали два этапа:

— на первом этапе проводились испытания на усталостную долговечность металла, предусматривающие 150 циклов нагружения испытательного стенда внутренним давлением в диапазоне от $P = 2,56$ МПа до $P = 5,4$ МПа;

— на втором этапе проводились испытания на статическую прочность металла со ступенчатым поднятием внутреннего давления в испытательном стенде до наступления разрушения металла.

В рамках гидравлических испытаний, с целью оценки технического состояния металла стальных труб и наличия дефектов сплошности металла, проводился комплекс работ по их дефектоскопии визуальным-измерительным (ВИК) и ультразвуковым (УЗК) методами неразрушающего контроля.

Магнитный контроль НДС металла стальных труб испытательного стенда осуществлялся индикаторами механического напряжения металла ИН-01м и ИН-02 сканирующего типа, принцип работы которых основан на корреляции напряженности поля остаточной намагниченности металла с величиной механического напряжения [4–6].

Напряженность поля остаточной намагниченности над поверхностью стального изделия в сложном (плоском, объемном) напряженном состоянии, измеренная индикаторами механического напряжения металла, однозначно зависит от величины эффективного (действительного) механического напряжения металла, которая остается справедливой во всей области деформации металла конструкционных сталей (упругая, упругопластическая, пластическая) (рисунок 1).

Степень опасности НДС металлоконструкции по показаниям индикаторов механического напряжения металла устанавливается на основе сравнения измеренной величины эффективного механического напряжения металла с допусковым напряжением.

Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла деформированного стального изделия от величины эффективного механического напряжения в плоском НДС металла описывается аналитическим выражением:

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = H_{r0} + \frac{\lambda_s H_{r0}}{\mu_0 M_s^2 N} \sigma_{эф}, \quad (1)$$

где $\sigma_{эф} = \sqrt{(\sigma_x + \sigma_{x0})^2 + (\sigma_y + \sigma_{y0})^2 - 2\eta(\sigma_x + \sigma_{x0})(\sigma_y + \sigma_{y0})}$ — суммарное эффективное механическое напряжение металла в плоском НДС;

σ_x, σ_y — главные механические напряжения;

σ_{x0}, σ_{y0} — остаточные механические напряжения в плоскости металла;

H_{r0} — напряженность поля остаточной намагниченности металла при отсутствии механических напряжений;

λ_s — магнитострикция насыщения металла;

M_s — намагниченность насыщения металла;

μ_0 — магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Ф/м);

N — размагничивающий фактор остаточного намагниченного участка металла;

η — коэффициент Пуассона.

Если стальное изделие не нагружено, то напряженность поля остаточной намагниченности металла будет определяться лишь величиной остаточного эффективного механического напряжения металла в плоском НДС:

Рисунок 1. Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла стальной трубы от эффективного механического напряжения. Материал — сталь 10Г2СД

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = H_{r0} + \frac{\lambda_s H_{r0}}{\mu_0 J_s^2 N} \sigma_{\text{эф}0}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{эф}0} = \sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{y0}^2 - 2\eta\sigma_{x0}\sigma_{y0}}$ — остаточное эффективное механическое напряжение металла в плоском НДС.

По результатам НК в кольцевом сварном соединении испытательного стенда было выявлено 7 дефектов сплошности, характеризующихся по результатам УЗК как 2 недопусти-

мых и 5 допустимых. В продольных сварных соединениях испытательного стенда выявлено 6 дефектов сплошности, из которых по результатам УЗК 3 дефекта сплошности металла являются недопустимыми и 3 дефекта сплошности — допустимыми.

По результатам магнитного контроля НДС металла в кольцевом шве стальных труб испытательного стенда индикатором механического напряжения металла ИН-01м было выявлено 7 участков с повышенным напряженным состоянием металла (рисунок 2).

Рисунок 2. Распределение НДС металла в кольцевом сварном шве стальных труб при разном внутреннем давлении внутри испытательного стенда

Как видно из рисунка 2, при нагружении испытательного стенда внутренним давлением от $P = 0$ МПа до $P = 2,56$ МПа месторасположение локальных областей с повышенным НДС металла в кольцевом сварном шве остается без изменения, при этом величина эффективного механического напряжения металла уменьшается на 7–20 %. Это свидетельствует о том, что при нагружении испытательного стенда внутренним давлением $P > 0$ в области кольцевого электросварного шва происходит суммирование остаточных (растягивающих и сжимающих) и действующих

(только растягивающих кольцевых и продольных) механических напряжений, что приводит к некоторому снижению величины суммарных эффективных механических напряжений металла по периметру кольцевого электросварного шва стальных труб.

Выявленные участки кольцевого сварного шва с зонами повышенного НДС металла соотносятся с результатами УЗК кольцевого сварного шва, а также с результатами исследований макрошлифов участков сварного шва с дефектами сплошности металла (рисунок 3).

а)

б)

а) графический образ дефекта; б) макрошлиф дефектного участка

Рисунок 3. Сопоставление участков с повышенным НДС металла сварного шва стальной трубы с результатами дефектоскопии и макрошлифами

По результатам магнитного контроля в продольных электросварных швах стальных труб ненагруженного испытательного стенда индикатором механического напряжения металла ИН-02 сканирующего типа было выявлено 8 ярко выраженных локальных максимумов, которые соответствуют областям с повышенным напряженным состоянием металла.

В 6 из 8 выявленных участков продольного сварного шва испытательного стенда с повышенным НДС металла наблюдается соответствие местам расположения дефектов сплошности металла, обнаруженных по результатам УЗК. В одном из двух оставшихся участков с повышенным НДС металла, по результатам изучения макрошлифов металла, был выявлен дефект сплошности металла, не обнаруженный при ультразвуковой дефектоскопии стальных труб.

Магнитный контроль НДС металла стальных труб выполнялся также после проведения определенного количества циклических испытаний на усталость металла (при количестве циклов $N = 0, 50, 100, 150$ соответственно) в ненагруженном состоянии стенда (при внутреннем давлении $P = 0$ МПа).

После циклических испытаний стенда на усталость металла с количеством циклов $N = 150$ был проведен магнитный контроль НДС металла при нагружении испытательного стенда давлением $P = 2,56$ МПа и $P = 5,4$ МПа.

В ненагруженном состоянии испытательного стенда области с повышенным НДС металла были расположены в нижней части

стальных труб (угловые положения от 5 ч до 8 ч), что обусловлено возникновением изгибной деформации стенда под действием силы тяжести технической воды в полости стальных труб.

Результаты контроля НДС металла показывают, что суммирование механических напряжений, возникающих за счет изгибной деформации стенда и остаточных механических напряжений в стальных трубах, приводит к снижению суммарных эффективных механических напряжений металла в верхней части испытательного стенда и к их увеличению в нижней части испытательного стенда (разница между ними составляет 36–50 %).

Увеличение количества циклов нагружения металла N не приводит к существенному изменению распределения НДС металла стальных труб — области с напряженным состоянием металла в основном расположены в нижней части испытательного стенда, но приводит к некоторому росту величины остаточных эффективных механических напряжений металла.

В таблице 1 приведены значения напряженности поля остаточной намагниченности металла H_r , измеренные в областях с повышенным НДС металла испытательного стенда, при увеличении количества циклов нагружения металла N . Внутреннее давление в испытательном стенде было равно $P = 0$ МПа, поэтому данные таблицы 1 отражают изменение величины остаточного эффективного механического напряжения металла стальных труб.

Таблица 1. Изменение величины напряженности поля остаточной намагниченности металла от количества циклов нагружения испытательного стенда

Число циклов, №	Напряженность поля H_r , мТл	Угловое положение, ч
0	5,66–6,15	5–7
50	5,97–6,48	5–7
105	5,79–6,45	5–7
150	5,84–6,54	5–7

При увеличении количества циклов нагружения металла от $N = 0$ до $N = 150$ напряженность поля остаточной намагниченности металла H_r в областях с повышенным НДС металла испытательного стенда возросла лишь на 3–6 %.

С увеличением внутреннего давления в испытательном стенде от $P = 0$ МПа до $P = 5,4$ МПа происходит примерно линейный

рост величины напряженности поля остаточной намагниченности металла H_r (коррелирующей с эффективным механическим напряжением с плоским НДС металла) в наиболее напряженных участках испытательного стенда, при этом:

— в нижней части испытательного стенда с угловым положением от 5 ч до 7 ч — на 12–14 %;

— в области продольного сварного шва, расположенного во второй стальной трубе с угловым положением на 11 ч — на 21–48 %.

Увеличение механического напряжения металла в локальной области продольного электросварного шва стальной трубы с повышенным НДС металла происходит более интенсивно, чем в напряженных областях металла, расположенных на бесшовном участке поверхности стальных труб испытательного стенда.

Рисунок 5. Распределение НДС металла в испытательном стенде при внутреннем давлении $P = 5,4$ МПа: число циклов нагружения $N = 150$, угловое положение — 11 ч

Рисунок 6. Общий вид разрушенного участка испытательного стенда

При внутреннем давлении испытательного стенда $P = 5,4$ МПа на продольном электросварном шве стальной трубы на расстоянии 2,7 м от кольцевого стыка была выявлена область с повышенным НДС металла, имеющая ярко выраженный максимум (рисунк 5).

Указанный участок с повышенным НДС металла соответствовал ранее выявленному, по результатам УЗК, дефекту сплошности металла, находящемуся на расстоянии около 2700 мм от кольцевого электросварного шва испытательного стенда. Впоследствии при проведении гидравлического испытания стенда на статическую прочность в указанном месте произошло разрушение металла стальной трубы (рисунок 6).

Таким образом, результаты магнитного контроля НДС металла стальных труб согласуются с результатами дефектоскопии металла и гидравлических испытаний стенда и указывают на то, что при проведении магнитного контроля напряженного состояния металла и электросварных швов стального трубопровода, находящегося в режиме длительной эксплуатации, можно указать место наиболее вероятного разрушения металла.

Выводы

1. Магнитный метод контроля позволяет с достаточной надежностью выявлять области с повышенным напряженным состоянием в кольцевых и продольных электросварных швах стального трубопровода.

Ультразвуковая дефектоскопия и исследование макрошлифов металла подтверждают наличие в напряженных областях электросварных швов внутренних дефектов сплошности.

2. Увеличение количества циклов нагружения металла стального трубопровода не приводит к существенному изменению распределения остаточного эффективного механического напряжения при отсутствии внутреннего давления в стальных трубах.

3. При увеличении внутреннего давления стального трубопровода величина эффективных механических напряжений металла в областях с повышенным напряженным состоянием кольцевого электросварного шва уменьшается на 7–20 %.

4. Магнитный контроль напряженного состояния металла и электросварных швов стального трубопровода, находящегося в режиме эксплуатации, позволяет устанавливать области, где имеется наибольшая вероятность разрушения металла.

6. Методика исследования напряженно-деформированного состояния металла стальных изделий и элементов металлоконструкций / Р.В. Загидулин и др. М.: ФБУ РФЦСЭ при Минюсте России, 2016. С. 34.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Самигуллин А.В., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р. Расчетно-экспериментальное определение предельного состояния материала оболочковой конструкции, подверженной малоциклового нагружению // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2014. № 5. С. 404–419. URL: http://ogbus.ru/issues/5_2014/ogbus_5_2014_p404-419_SamigullinAV_ru.pdf.

2. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6. Магнитные методы контроля / В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий и др. М.: Машиностроение, 2004. 832 с.

3. Попов Б.Е., Левин Е.А., Котельников В.С. и др. Магнитный контроль напряженно-деформированного ресурса сосудов, работающих под давлением // Безопасность труда в промышленности. 2001. № 3. С. 25–30.

4. Прохоров В.М., Онучин Б.А., Загидулин Р.В. Методы магнитного контроля и оценки остаточного ресурса элементов металлоконструкций подъемных сооружений // Экспозиция Нефть Газ. 2010. № 4/Н (10). С. 44–48.

5. Загидулин Р.В., Загидулин Т.Р., Прохоров В.М. Магнитный контроль и оценка остаточного ресурса элементов металлоконструкции буровых установок и агрегатов для ремонта скважин // Контроль. Диагностика. 2012. № 5 (167). С. 12–19.

REFERENCES

1. Samigullin A.V., Naumkin E.A., Kuzeev I.R. Raschetno-eksperimental'noe opredelenie predel'nogo sostoyaniya materiala obolochkovoi konstruktssii, podverzhennoi malotsiklovomu nagruzheniyu [A Calculation-Experimental Determination of the Extreme State of the Material of the Shell Structure Subjected to Low-Cycle Loading]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2014, No. 5, pp. 404-419. URL: http://ogbus.ru/issues/5_2014/ogbus_5_2014_p404-419_SamigullinAV_ru.pdf. [in Russian].

2. Klyuev V.V. *Nerazrushayushchii kontrol': spravochnik: v 7 t.* [Non-Destructive Control: Guide-Book: in 7 Vol.]. Klyuev V.V., Muzhitskii V.F. e.a. T. 6. *Magnitnye metody kontrolya* [Vol. 6. Magnetic Methods of Control]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 832 p.

3. Popov B.E., Levin E.A., Kotelnikov V.S. e.a. *Magnitnyi kontrol' napryazhenno-deformirovannogo resursa sosudov, rabotayushchikh pod davleniem* [A Magnetic Inspection of Strain Stressed State of the Pressure Vessels]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti — Work Safety in Industry*, 2001, No. 3, pp. 25–30. [in Russian].

4. Prokhorov V.M., Onuchin B.A., Zagidulin R.V. Metody magnitnogo kontrolya i otsenki ostatochnogo resursa elementov metallokonstruktsii pod"emnykh sooruzhenii [Methods of Magnetic Inspection and Estimation of Residual Life of Elements of Metal Structures of the Lifting Facilities]. *Ekspozitsiya Neft' Gaz — Neft and Gas Exposition*, 2010, No. 4/H (10), pp. 44–48. [in Russian].

5. Zagidulin R.V., Zagidulin T.R., Prokhorov V.M. Magnitnyi kontrol' i otsenka ostatochnogo resursa elementov metallokonstruktsii burovnykh ustanovok i agregatov dlya remonta skvazhin [Magnetic Monitoring and Estimation of

Residual Life of Elements of Metal Structures of Drilling Rigs and Units for Repairing Facilities]. *Kontrol'. Diagnostika — Control. Diagnostics*, 2012, No. 5 (167), pp. 12–19. [in Russian].

6. Zagidulin R.V. e.a. *Metodika issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metalla stal'nykh izdelii i elementov metallokonstruktsii* [Research Methods of Strain Stressed State of the Metal Products and Elements of Metal Structures]. Moscow, FBU RFTsSE Publ., 2016. 34 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Мардамышин Вадим Рафаилович, начальник службы неразрушающего контроля Инженерно-технического центра ООО «Газпром трансгаз Уфа», г. Уфа, Российская Федерация

Vadim R. Mardamshin, Head of NDT Engineering and Technical Center, Gazprom transgaz Ufa LLC, Ufa, Russian Federation

Бакиев Тагир Ахметович, д-р техн. наук, начальник Инженерно-технического центра ООО «Газпром трансгаз Уфа», заведующий кафедрой «Гидрогазодинамика трубопроводных систем и гидромашины», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Tagir A. Bakiev, Doctor of Engineering Sciences, Head of Engineering and Technical Center Gazprom transgaz Ufa LLC, Head of Hydro- and Gas Dynamics of Pipeline Systems and Hydraulic Machines Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

Загидулин Тимур Ринатович, канд. техн. наук, технический директор ООО «НТЦ «Спектр», г. Уфа, Российская Федерация

Timur R. Zagidulin, Candidate of Engineering Sciences, Technical Director, Scientific and Technical Center «Spector» LLC, Ufa, Russian Federation

Загидулин Ринат Васикович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Rinat V. Zagidulin, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation