

МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕНКИ ГАЗОВОГО СЕПАРАТОРА ПРИ ЕГО ГИДРОИСПЫТАНИЯХ

© 2019 г. С.М. Кулак^{1,*}, В.Ф. Новиков¹, В.В. Проботюк¹, С.М. Ваценков², Е.С. Фурсов²

¹Тюменский индустриальный университет, Россия 625000 Тюмень, ул. Володарского, 38

²Тюменский экспериментальный завод ООО «Газпром проектирование», Россия 625047 Тюмень,

ул. Старый Тобольский тракт 5 км, 6

E-mail: *ksm-rabochi@rambler.ru

Поступила в редакцию 09.01.2018; после доработки 10.09.2018;
принята к публикации 02.11.2018

Проведены исследования напряженного состояния газового сепаратора при его гидроиспытаниях методом магнитоупругого размагничивания. Получены корреляционные зависимости между уровнем магнитоупругого размагничивания сложнонагруженной стенки газового сепаратора и величиной испытываемых ею кольцевых, меридиональных и эквивалентных напряжений. Уровень магнитоупругого размагничивания остаточно-намагниченной стенки объекта исследования, нагружаемого внутренним давлением, оценивался по изменению напряженности ее магнитного поля рассеяния, измеренной вдоль нормали (H_n) и касательной (H_t) к поверхности. Установлено, что рост механических напряжений в стенке сепаратора до половины значения предела текучести стали, из которой он изготовлен, вызывает заметное необратимое уменьшение нормальной (H_n) и тангенциальной (H_t) составляющих напряженности ее магнитного поля рассеяния остаточно-намагниченного участка. Показано, что метод магнитоупругого размагничивания обладает наибольшей чувствительностью к механическим напряжениям, простотой реализации и экспрессностью по сравнению с коэрцитиметрическим и тензометрическим методами.

Ключевые слова: стальной сосуд, газовый сепаратор, напряженное состояние стали, намагничивание, магнитоупругое размагничивание, магнитное поле рассеяния остаточно-намагниченной стали.

DOI:10.1134/S0130308219030072

ВВЕДЕНИЕ

Стальные сосуды, испытывающие внутреннее давление широко применяются в различных отраслях промышленности. Это газовые баллоны, паровые котлы, газо- и нефтехранилища, резервуары, ресиверы, цистерны, газовые сепараторы, трубопроводы, дренажные емкости и т.д., многие из которых относят к опасным промышленным объектам. В процессе производства и последующей эксплуатации сосудов проводится контроль, диагностика их качества и работоспособности [1, 2]. Диагностика выполняется с применением физических методов неразрушающего контроля, направленных на выявление различного рода поверхностных, внутренних, сквозных дефектов, таких как несплошность металла, непровары, трещины, волосовины, закаты флокены и т.д. Такого рода дефекты выявляют в ходе предэксплуатационных гидроиспытаний с применением рентгеновских, ультразвуковых, капиллярных, магнитных, акустико-эмиссионных, порошковых и других методов неразрушающего контроля [3]. Однако на практике неразрушающему контролю механических напряжений стенок сосудов, создаваемых действием внутреннего давления и усиливающихся в процессе коррозии под влиянием воздействия содержащегося в них продукта и окружающей среды, предусмотренной ГОСТом [4, 5], не уделяется должного внимания.

Диагностирование напряженного состояния сосудов высокого давления и оценка степени его опасности на основе данных контроля механических напряжений — один из наиболее эффективных методов повышения надежности эксплуатации таких конструкций.

Реальные условия эксплуатации сосудов чрезвычайно разнообразны и учесть их при расчетах в полной мере невозможно. Так, согласно ГОСТу Р 52857.1—2007, для углеродистых и низколегированных сталей коэффициенты запаса прочности по пределу текучести в рабочих условиях и условиях испытания имеет разброс значений от 1,5 до 1,1 и по временному сопротивлению до 2,4.

Для контроля механических напряжений стальных конструкций применяются различные приборные методы: тензометрический, рентгеновский, оптический, ультразвуковой, магнитный (коэрцитиметрический, электромагнитный, метод скачков Баркгаузена, метод магнитоупругой памяти, метод магнитной памяти) и некоторые методики расчета [6—8]. Однако, как показано в работах [9, 10—12], метод магнитоупругой памяти (магнитоупругого размагничивания), примененный для контроля напряжений стального баллона при создании в нем внутреннего давления не более 3 МПа [13] обладает большей чувствительностью к многоосным деформациям стали, чем, например, коэрцитивная сила H_c . Однозначная трактовка механических напряжений стальной конструкции по H_c воз-

можно в основном для случая ее одноосного нагружения [14, 15], но в результате создания равных ортогональных напряжений в стали вдоль двух осей ее коэрцитивная сила мало изменяется, так как не создается анизотропия напряжений и связанная с ней магнитная текстура [14, 16].

Метод магнитоупругого размагничивания при компрессионных испытаниях заключается в том, что стенку контролируемого сосуда локально намагничивают, ее поверхность сканируют датчиком магнитного поля, измеряют начальное значение напряженности магнитного поля рассеяния (НМПР) остаточно намагниченной стенки. Затем, увеличивая давление внутренней среды сосуда до нормативных значений, регистрируют убыль НМПР остаточно намагниченной стальной оболочки. По уровню магнитоупругого размагничивания (изменению НМПР остаточной намагниченности) оцениваются механические напряжения в каждой точке контролируемой поверхности.

Поскольку магнитоупругая чувствительность остаточно намагниченной стали к упругим напряжениям (или деформациям), определяемая отношением изменения НМПР к напряжениям σ , их вызвавшим, обратно пропорциональна ее коэрцитивной силе H_c [11], то практический интерес представляет исследование коэрцитивной силы стенки сосуда.

Цель работы — изучение возможности применения метода (эффекта) магнитоупругого размагничивания стали для контроля напряженно-деформированного состояния стенки сосуда с внутренним давлением.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выбор промышленного образца для исследований, в котором создается внутреннее давление;
- разработка способа и средства намагничивания протяженного образца при его магнитном неразрушающем контроле;
- установление закономерностей изменения НМПР остаточно-намагниченной стенки протяженного сосуда с ростом эквивалентных механических напряжений, создаваемых внутренним давлением;
- исследование распределения коэрцитивной силы вдоль стенки стального сосуда в не нагруженном внутренним давлением состоянии.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Натурные испытания магнитоупругого метода контроля механических напряжений стенок сосудов, находящихся под внутренним давлением, были проведены на входном газовом фильтре-сепараторе.

Фильтр-сепаратор газа ТНГГ-1-Т118.00.00.000 (рис. 1) изготовлен из листовой стали 09Г2С и имеет цилиндрическую форму. Толщина боковой стенки сепаратора составляет 80 мм, его длина — 8 м, внешний диаметр — 1,6 м, рабочее внутреннее давление такого типа сепараторов 16 МПа, испытательное (пробное) давление — не более 20 МПа.

Сепаратор после сборки и термической обработки в течение ~2,5 ч при температуре 650 °С исследуют на предмет выявления дефектов металлургического и сварочного происхождения с применением неразрушающих методов ультразвукового, визуального, капиллярного, рентгеновского контроля. Далее выполняется процедура его гидравлических испытаний согласно ГОСТу Р 52630—2012, которая заключается в том, что сепаратор заполняется водой при минимальном давлении (~1 МПа) и выдерживается в этом состоянии не менее 24 ч. Затем по истечении срока выдержки происходит поэтапная закачка воды до испытательного давления не более 20 МПа и визуальный контроль сварных швов. При этом регламентом предэксплуатационных испытаний не предусмотрен контроль механических напряжений стенок сепаратора.

В ходе гидравлических испытаний такого сепаратора проводились исследования магнитоупругого размагничивания его стенки. Для этого на боковой поверхности вдоль образующей были намагничены (3-5 раз) устройством колесного типа [13] две пары меридиональных линий (N—S) длиной 3 м (см. рис. 1), на каждой из которых в десяти равноудаленных на расстоянии 0,3 м друг от друга точках проводились измерения максимумов нормальной H_n и тангенциальной H_t составляющих НМПР остаточно-намагниченной стенки после каждого увеличения внутреннего давления в сепараторе. Перемещение намагничивающего устройства вдоль меридиональных линий стенки газового сепаратора, на которой были расположены 10 контролируемых точек, происходило таким образом, чтобы эта линия всегда приходилась на середину межполюсного расстояния этого устройства.

Устройство для намагничивания Н-образного типа состоит из двух полюсных наконечников в виде колес в форме усеченного конуса ($h = 60$, $d_1 = 70$, $d_2 = 65$ мм), изготовленных из стали 20, между которыми находится дисковый магнит (SmCo_5) диаметром 50 и толщиной 30 мм. Такая форма колес позволяет обеспечить их контакт с минимальным зазором с поверхностью стенки

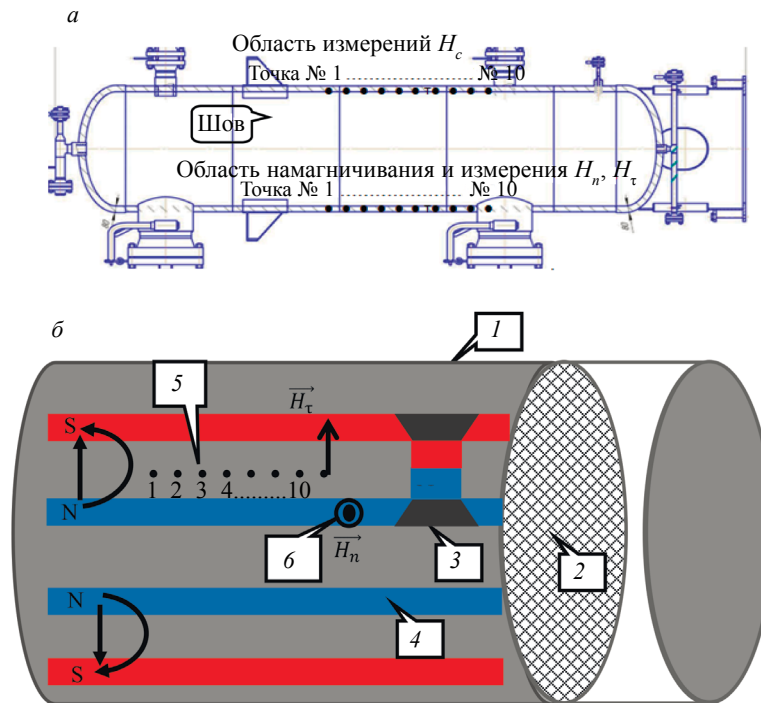


Рис. 1. Схемы газового сепаратора ТНГТ-1-T118.00.00.000 (а) и его локального намагничивания (б) перед гидроиспытаниями: 1 — корпус сепаратора; 2 — решетчатая перегородка; 3 — Н-образное намагничивающее устройство (колесное); 4 — участок остаточно-намагниченной стенки после сканирования ее поверхности Н-образным устройством; 5, 6 — точки измерения (№ 1—10) максимума тангенциальной H_t и нормальной H_n составляющих напряженности магнитного поля рассеяния остаточно-намагниченной стенки соответственно.

сепаратора и ее равномерное намагничивание. Ширина каждой намагниченной полосы N или S сравнима с толщиной стенки исследуемого сосуда и на порядок больше размера измеряющего феррозондового датчика магнитометра. Магнитная индукция в межполюсном пространстве такого устройства равна ~ 380 мТл. Для уменьшения влияния внешнего поля и внутренней намагниченности стали на магнитные поля рассеяния стенки создавались две пары участков (N—S), намагниченных встречно друг к другу и поперек меридиональной линии. Такой способ создания остаточной намагниченности протяженных металлоконструкций предложен и исследован в [17, 18]. В этом случае размагничивающий фактор формы остается постоянным, что позволяет отслеживать изменения структуры и внутренние остаточные напряжения в стали по уровню ее магнитоупругого размагничивания и исключить влияние внешних магнитных полей на результаты измерений.

Сосуд сепаратора размещался горизонтально и заполнялся водой при давлении в 1 МПа. Оценивалось исходное магнитное состояние его стенки, для чего проводилось измерение нормальной H_n и тангенциальной H_t составляющих магнитного поля в выбранных 10 точках, которые показаны на рис. 1 и расположены вдоль каждой из двух меридиональных линий цилиндрического сосуда. Регистрацию поля осуществляли при помощи феррозондового магнитометра ИКНМ-2ФП. Затем следовало намагничивание стенки в виде двух пар полос N—S, перемещаемым по ее поверхности Н-образным устройством, аналогичные измерения максимумов нормальной H_{n1} и тангенциальной H_{t1} составляющих напряженности магнитного поля рассеяния остаточно-намагниченной стенки в десяти точках каждой намагниченной полосы N—S, поэтапное увеличение давления P от 1 до 18 МПа с интервалом 3 МПа и следующее за этим измерение составляющих H_{ni} и H_{ti} .

Для измерения H_{ni} в десяти точках каждой намагниченной полосы ось феррозондового датчика располагали перпендикулярно поверхности стенки по центру линий N и S (см. рис. 1) перемещения полюсных наконечников намагничивающего устройства. Составляющую H_{ti} измеряли, расположив феррозонд вдоль касательной к поверхности стенки, рабочей осью перпендикулярной средней линии межполюсного пространства и направленной от N к S. Полученные результаты измерения H_{ni} на полосах N и S обеих меридиональных линий, а также H_{ti} усреднялись для исключения влияния внешних магнитных полей и поля остаточной намагниченности стали на результаты измерений H и повышения их точности.

Измерение коэрцитивной силы стенки газового сепаратора проводили на меридиональной линии протяженностью ~ 3 м, выделенной с диаметрально противоположной стороны относительно одной из полос остаточной намагниченности (N—S), в десяти точках, равноудаленных на расстоянии 0,3 м друг от друга, с помощью коэрцитиметра-структоскопа КРМ-Ц-К2М. Для исключения возможного влияния намагниченности стенки сепаратора и поля остаточной намагниченности полос (N—S) на результаты измерения, коэрцитивную силу $H_c^{\perp 1}$ в каждой контролируемой точке определяли, расположив ось полюсных наконечников измерительного блока КРМ-Ц-К2М вдоль направления действия кольцевых напряжений (перпендикулярно оси сепаратора), разворачивали блок на 180° и повторно измеряли $H_c^{\perp 2}$. Аналогичным образом поступали при измерении продольной составляющей $H_c^{\parallel 1}$ и $H_c^{\parallel 2}$ на линии действия меридиональных напряжений. Результаты этих измерений усреднялись между собой до значений $H_c^{\perp}$ и $H_c^{\parallel}$ соответственно. После каждого этапа контролируемого изменения внутреннего давления сепаратора измерялись напряженность магнитного поля рассеяния его остаточной намагниченной стенки, ее коэрцитивная сила и деформация (тензометрическим способом).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Величины меридиональных (осевых) (σ_m) и кольцевых (σ_k) механических напряжений, создаваемых в стенке сепаратора действием внутреннего давления в ходе проводимых исследований, определены по результатам тензометрических измерений ее деформации вдоль соответствующих направлений [19, 20]. Для этого на уровне контролируемой точки № 6 за сутки до гидроиспытаний были наклеены по одному тензорезистору вдоль и перпендикулярно оси сепаратора, с применением клея «Циакрин ЭО», обладающим низким коэффициентом термического расширения.

Особенностью расчета напряжений в тонкостенных аппаратах, у которых толщина стенки h много меньше диаметра D ($h/D \leq 0,05$), является то, что можно пренебречь радиальными напряжениями σ_r , величина которых невелика и по абсолютному значению не превышает давление среды в аппарате. В этом случае напряженное состояние тонкостенных аппаратов можно считать плоским. В соответствии с безмоментной теорией расчета тонкостенных оболочек, в них действуют кольцевые σ_k (в первом главном сечении) и меридиональные напряжения σ_m (во втором главном сечении), совместное действие которых оценивается по величине эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ [19, 20]. Для исследуемого сепаратора с внутренним давлением $P = 18$ МПа расчет указанных напряжений дает следующие результаты: $\sigma_k \approx 160$ МПа, $\sigma_m \approx 80$ МПа, $\sigma_{\text{экв}} \approx 155$ МПа. Уровень эквивалентных напряжений в стенке газового сепаратора, вызываемых внутренним давлением ($P = 18$ МПа), по результатам тензометрических измерений ее кольцевой и меридиональной деформации в точке № 6 и применения энергетической теории прочности составил порядка 85 МПа (рис. 5).

Распределение продольной $H_c^{\parallel}$, поперечной $H_c^{\perp}$ коэрцитивной силы и их среднего значения $\langle H_c \rangle$ по длине меридиональной линии стенки не нагруженного (без давления) сепаратора приведено на рис. 2.

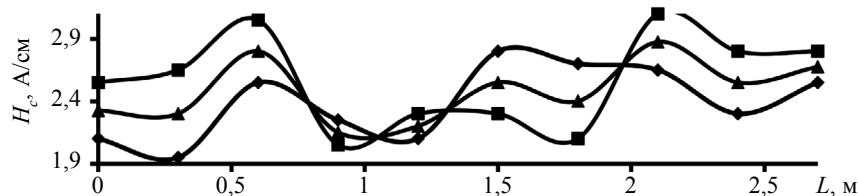


Рис. 2. Распределение продольной $H_c^{\parallel}$ (■) и поперечной $H_c^{\perp}$ (◆) коэрцитивных сил, их среднего значения $\langle H_c \rangle$ (▲) вдоль выделенной для исследований меридиональной линии корпуса сепаратора без внутреннего давления.

Обращает на себя внимание, что величины $H_c^{\parallel}$ и $H_c^{\perp}$ в интервале $L = 0,7—1,4$ м практически одинаковы, близки к значению 220 А/м. На отрезке меридиональной линии 1,4—1,9 м наблюдается анизотропия $H_c^{\parallel} < H_c^{\perp}$. По краям выделенной линии в интервалах $L = 0—0,65$ и $1,9—2,7$ м существует анизотропия $H_c^{\parallel}$ другого знака: $H_c^{\parallel} > H_c^{\perp}$. В частности, $H_c^{\parallel}$ продольная примерно на 50 А/м больше, чем поперечная $H_c^{\perp}$. Ввиду симметрии распределения H_c эти отличия вызваны неодинаково быстрым охлаждением сварных швов и решетчатых перегородок по сравнению со средней частью сепаратора в ходе его термической обработки. В результате создается кольцевая магнитная

текстура напряжений, обусловленная кольцевыми растягивающими напряжениями. Среднее значение $\langle H_c \rangle$ по краям выделенной линии выше, чем в середине примерно на 25-50 А/м, что может говорить о меньшей магнитоупругой чувствительности остаточно-намагниченной стали здесь, чем в середине.

Распределение усредненных по обеим полосам N—S результатов измерения H_t и H_n составляющих НМПП вдоль остаточно-намагниченной стенки сепаратора при разных уровнях кольцевых и меридиональных напряжений показано на рис. 3 и 4 соответственно.

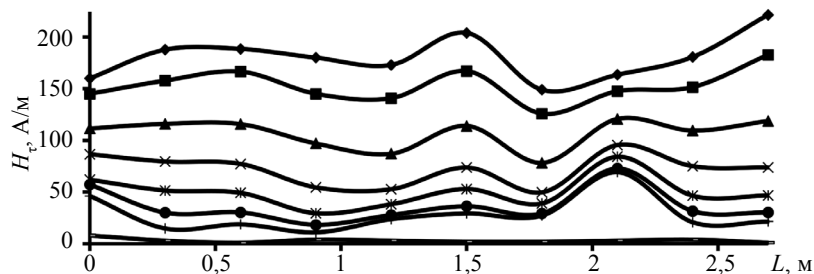


Рис. 3. Распределение тангенциальной H_t составляющей напряженности магнитного поля рассеяния вдоль образующей L остаточно-намагниченной стенки газового сепаратора при внутреннем давлении P (МПа): — 1 (исходное состояние); ♦ ~ 1 (после намагничивания); ■ ~ 3; ▲ ~ 6; × ~ 9; ж ~ 12; ● ~ 15; + ~ 18.

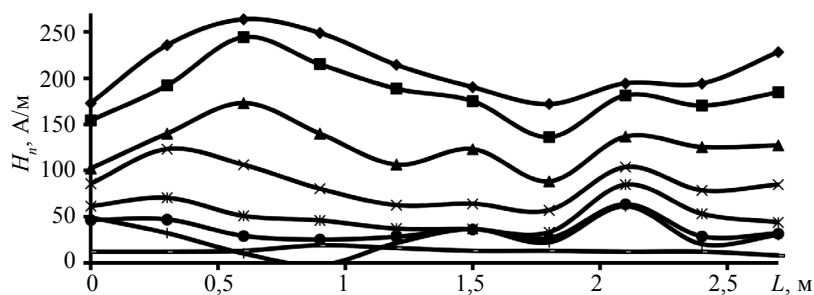


Рис. 4. Распределение нормальной H_n составляющей напряженности магнитного поля рассеяния вдоль образующей L остаточно-намагниченной стенки газового сепаратора при внутреннем давлении P (МПа): — 1 (исходное состояние); ♦ ~ 1 (после намагничивания); ■ ~ 3; ▲ ~ 6; × ~ 9; ж ~ 12; ● ~ 15; + ~ 18.

Намагничивание меридиональных линий Н-образным устройством при давлении в сепараторе $P = 1$ МПа (см. рис. 3 (♦) и 4 (♦)) приводило к неравномерному распределению напряженности магнитного поля рассеяния вдоль его остаточно-намагниченной стенки. Увеличение внутреннего давления сепаратора вызвало монотонное размагничивание стенки. При этом изменение $\Delta H_{ti} = H_{ti} - H_{t1}$ тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния, вызванного действием кольцевых напряжений, оказалось больше, чем $\Delta H_{ni} = H_{ni} - H_{n1}$.

Для количественного описания наблюдаемых явлений магнитоупругого размагничивания стенки сепаратора и их анализа использовали изменение относительных величин $\delta H_{ti} = \Delta H_{ti} / H_{t1}$ и $\delta H_{ni} = \Delta H_{ni} / H_{n1}$.

На рис. 5 показаны зависимости δH_t и δH_n от эквивалентных механических напряжений ($\sigma_{э\text{кв}}$), создаваемых в точке № 6 стенки газового сепаратора внутренним давлением и рассчитанных по результатам тензометрических измерений ее деформации вдоль кольцевого и меридионального направлений.

Чувствительность магнитоупругого метода к механическим напряжениям стенки сепаратора наименьшая в диапазоне от 25 до 85 МПа и составила $K \sim 10^{-2} - 10^{-3}$ МПа $^{-1}$ (см. рис. 5), в то время как диапазон чувствительности тензометрического метода к упругим напряжениям в стенке стального баллона в [13] и газового сепаратора в настоящем исследовании оценивается $\sim 10^{-5} - 10^{-6}$ МПа $^{-1}$.

Зависимости δH_n , $\delta H_t = f(\sigma_{э\text{кв}})$ (см. рис. 5) были использованы, как калибровочные для преобразования максимального уровня магнитоупругого размагничивания стенки сепаратора во всех остальных девяти контролируемых точках в соответствующие эквивалентные механические

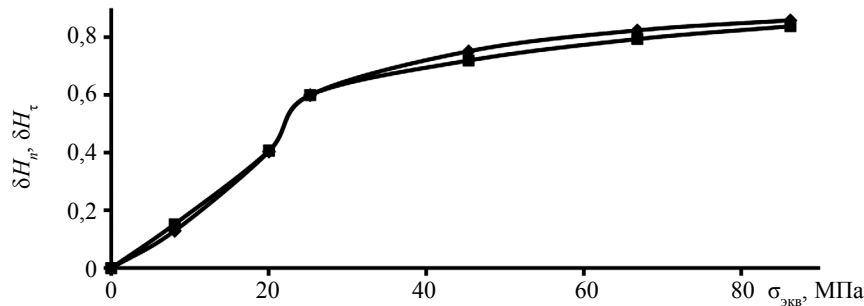


Рис. 5. Зависимость относительного изменения тангенциальной δH_τ (♦) и нормальной δH_n (■) составляющих напряженности магнитного поля рассеяния остаточно-намагниченной стенки газового сепаратора в контролируемой точке № 6 от создаваемых внутренним давлением эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ механических напряжений.

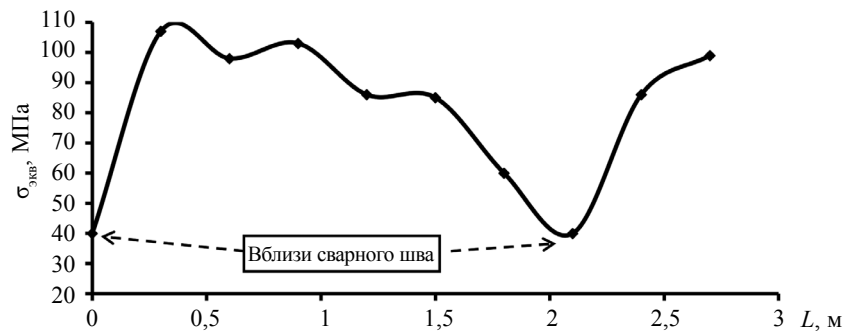


Рис. 6. Распределение максимальных эквивалентных механических напряжений ($\sigma_{\text{экв}}$), создаваемых внутренним давлением в 18 МПа вдоль боковой стенки сепаратора, по результатам тензометрической калибровки уровня ее магнитоупругого размагничивания в точке № 6.

напряжения ($\sigma_{\text{экв}}$), распределение которых вдоль исследуемого участка протяженностью L стенки сепаратора показано на рис. 6.

Видно, что при нагружении стенки сепаратора внутренним давлением в каждой ее точке реализуются различные по величине механические напряжения. Такое неравномерное распределение механических напряжений в стенке объясняется ее неодинаковой деформацией, отличием механических свойств стали, наличием скрытых дефектов сплошности, особенностями конструкции, структурой стали и влиянием термической обработки.

Наименьший уровень напряжений (порядка 40 МПа) в стенке газового сепаратора определен в точках под номерами 1 и 8, которые были расположены согласно его схеме (см. рис. 1а) в местах упрочненных стыковочными сварными швами и вваренными внутри решетками-перегородками. Максимальный уровень (~ 100 МПа) напряжений наблюдается в точке № 2. Среднее значение эквивалентных напряжений для 8 точек, расположенных вдали от стыковых швов, составило ~ 90 МПа, что примерно на 30-40 % ниже, аналогичного значения определенного расчетным методом по безмоментной теории тонких оболочек [19, 20].

Максимальный уровень эквивалентных напряжений, испытываемых стенкой газового сепаратора в ходе его гидроиспытаний при установлении в нем пробного внутреннего давления $P = 18$ МПа, гораздо ниже предела текучести стали 09Г2С ($\sigma_{0,2} \sim 400$ МПа) и примерно в два раза меньше допускаемых напряжений $[\sigma]$, рассчитанных по предельным нагрузкам. Допускаемое напряжение $[\sigma]$ для рабочих условий работы такого сосуда из стали 09Г2С, рассчитанных по пределу текучести согласно ГОСТу Р 52857.1—2007, составляют 183 МПа. Условием прочности цилиндрической оболочки в ГОСТ Р 52857.11—2007 указано ее максимальное напряжение $\sigma_{\text{max}} \leq 1,5 \cdot [\sigma]$, которое для исследуемого сепаратора выполняется ($100 < 275$ МПа). Такое заметное отличие между допускаемыми условием прочности и максимальными рабочими напряжениями обеспечивается высоким уровнем коэффициента запаса прочности такой конструкции, закладываемого при ее расчетах. Согласно техническому паспорту исследуемого газового сепаратора, при его расчетах заложен двукратный запас прочности по пределу текучести с учетом припусков на коррозию и технологию изготовления.

Таким образом, можно заключить, что допуски на коррозию и технологию изготовления сосудов с внутренним давлением, регламентируемые соответствующими нормативами, в большинстве

случаев установлены исходя из технологических возможностей предприятий и не имеют количественного обоснования с позиций несущей способности, прочности и пластичности конструкции. Следовательно, контроль напряжений и оценка фактической прочностной надежности сосудов с внутренним давлением является весьма актуальной задачей, решение которой может способствовать разработке нового, менее консервативного подхода в определении предельных допусков при их проектировании, конструировании и изготовлении.

Точное определение напряжений в стенках сосудов с внутренним давлением и других стальных конструкциях такого рода приборными неразрушающими методами контроля позволит снизить многократный запас их прочности, закладываемый при конструировании и расчетах. Тем самым будет снижен объем затраченного при их производстве материала, а, следовательно, и уменьшена себестоимость их изготовления.

Наличие зависимостей магнитоупругого размагничивания $\delta H = f(\sigma)$ позволяет контролировать механические напряжения в стенках сосудов под давлением. Предлагаемый способ диагностики напряженно-деформированного состояния сложнонагруженного сосуда в отличие от тензометрического метода отличается своей простотой, быстротой реализации и оперативностью проведения диагностики, низкой стоимостью.

ВЫВОДЫ

Установлено, что рост механических напряжений в стенке газового сепаратора, создаваемых внутренним давлением, не превышающих половины предела текучести ($\sigma_{0,2}$) стали, вызывает ее существенное (~ 90 %) монотонное магнитоупругое размагничивание.

Определено неодинаковое изменение напряженности магнитного поля рассеяния в разных точках остаточно-намагниченной стенки газового сепаратора при равномерном увеличении внутреннего давления до 18 МПа, вызванное особенностями его конструкции и термической обработки.

Благодаря тензометрической калибровки уровня магнитоупругого размагничивания стенки газового сепаратора при его гидроиспытаниях проведена оценка и установлен диапазон (40—100 МПа) максимальных эквивалентных механических напряжений, создаваемых в разных ее точках внутренним давлением в 18 МПа, что соответствует 2—7-кратному запасу прочности. На основании проведенных исследований можно полагать, что для конструкций, относящихся к стальным сосудам, допуски на коррозию и технологию изготовления при расчетах на прочность по предельным состояниям в нормативных документах даны с излишним запасом, что приводит к повышению их металлоемкости, уровня сложности и себестоимости.

Предложено использовать метод магнитоупругого размагничивания сталей для экспресс-контроля напряженно-деформированного состояния металлоконструкций, испытывающих в процессе испытаний и эксплуатации многоосные деформации (сосуды высокого давления, трубопроводы при их опрессовке и т.д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ПБ 03-576-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.
2. Федеральный закон № 116 от 20.06.1997 г. «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».
3. РД 03-421-01. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов. [Текст]. Введ. 2001.09.06. М.: Госгортехнадзор России, 2001. 86 с.
4. СТО Газпром 2-2.3-491-2010. Техническое диагностирование сосудов, работающих под давлением на объектах ОАО «ГАЗПРОМ».
5. Даникина Т.С., Турбаева Р.Д., Актаукенова Г.С. Влияние изменения перепада давлений на напряженное состояние неоднородного полого цилиндра // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. № 6. С. 46—49.
6. Дубов А.А., Демин Е.А., Миляев А.И., Стеклов О.А. Опыт контроля напряженно-деформированного состояния газопроводов с использованием метода магнитной памяти металла в сравнении с традиционными методами и средствами контроля напряжений // Контроль. Диагностика. 2002. № 4. С. 53—56.
7. Неразрушающий контроль / Справочник. В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6. В 3 кн. Кн. 1: В.В. Клюев, В.Ф. Мужицкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контро-

- ля. Кн. 2: В.Н. Филинов, А.А. Кеткович, М.В. Филинов. Оптический контроль. Кн. 3: В.И. Матвеев. Радиоволновой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 832 с.
8. Неразрушающий контроль / Справочник. В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.
9. *Мужицкий В.Ф., Попов Б.Е., Безлюдько Г.Я.* Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подъемных сооружений и сосудов, работающих под давлением // Дефектоскопия. 2001. № 1. С. 38—46.
10. *Горкунов Э.С.* Различные состояния остаточной намагниченности и их устойчивости к внешним воздействиям. К вопросу о «Методе магнитной памяти» // Дефектоскопия. 2014. № 11. С. 3—21.
11. *Новиков В.Ф., Важенин Ю.И., Бахарев М.С., Кулак С.М., Муратов К.Р.* Диагностика мест повышенной разрушаемости трубопровода. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. 200 с.
12. *Костин В.Н., Царькова Т.П., Ничипурук А.П., Лоскутов В.Е., Лопатин В.В., Костин К.В.* Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. 2009. № 11. С. 54—67.
13. *Kulak S.M., Novikov V.F., Baranov A.V.* Control of Mechanical Stresses of High Pressure Container Walls by Magnetoelastic Method. Transport and Storage of Hydrocarbons IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 154. P. 012004. doi:10.1088/1757-899X/154/1/012004.
14. *Захаров В.А., Ульянов А.И., Горкунов Э.С.* Закономерности изменения коэрцитивной силы при двухосном асимметричном деформировании стали Ст3 // Дефектоскопия. 2010. № 3. С. 55—69.
15. *Матюк В.Ф., Кулагин В.Н.* Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии // Неразрушающий контроль и диагностика. 2010. № 3. С. 1—14.
16. *Новиков В.Ф., Захаров В.А., Ульянов А.И., Сорокина С.В., Кудряшов М.Е.* Влияние двухосной упругой деформации на коэрцитивную силу и локальную остаточную намагниченность конструкционных сталей // Дефектоскопия. 2010. № 7. С. 59—68.
17. *Новиков В.Ф., Прилуцкий В.В.* Свойства остаточной намагниченности в виде полосы и возможности ее использования для неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 2014. № 7. С. 24—30.
18. Способ контроля механических свойств стальных металлоконструкций и упругих напряжений в них и устройство для его осуществления / Пат. 2424509 РФ № 2009148804/28; заявл. 28.12.2009; опубл. 20.07.2011.
19. Расчет на прочность тонкостенных оболочек вращения и толстостенных цилиндров / Метод. пособие. Сост. В.Ф. Першин, Ю.Т. Селиванов. 3-е изд. Тамбов: Изд-во Тамбовского. гос. техн. ун-та, 2004. 20 с.
20. *Рудаченко А.В., Саруев А.Л.* Исследование напряженно-деформированного состояния трубопроводов / Уч. пособие. Национальный исследовательский Томский политехн. ун-т (ТПУ). Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 136 с.