МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ МЕТАЛЛА НАД КОНЦЕНТРАТОРОМ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЬНОЙ ТРУБЕ

MODEL OF FORMATION OF THE RESIDUAL MAGNETIC FIELD OVER MECHANICAL STRESS CONCENTRATOR IN STEEL PIPE

В. Р. Мардамшин
Vadim R. Mardamshin

ПАО «Газпром»,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

Gazprom PJSC,
Saint-Petersburg,
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

Р. В. Загидулин
Rinat V. Zagidulin

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

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Т. А. Бакиев
Tagir A. Bakiev

ООО «Газпром трансгаз Уфа»,
Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Gazprom transgaz Ufa LLC,
Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Приводятся результаты исследования напряженного состояния металла в области расположения трещин в стальных трубах, которые являются концентраторами механических напряжений.

Показано, что зоны пластичности металла, которые формируются около вершины трещин, и в которых механические напряжения превышают предел текучести металла, могут достигать граничной поверхности стальной трубы, создавая области с повышенным напряженным состоянием металла.

Эти области на поверхности стальной трубы могут быть обнаружены с помощью магнитных структуроскопов, в частности с помощью индикаторов механического напряжения металла ИН-01м и ИН-02 сканирующего типа.

Создана теоретическая модель формирования поля остаточной намагниченности металла в пространстве над граничной поверхностью стальной трубы, которая содержит концентратор механических напряжений — внутреннюю краевую трещину.

В этой модели объединяются простейшая модель краевой трещины, разработанная в теории линейной механики разрушения, и теоретическая модель магнитного контроля напряженного состояния металла, основанного на применении структурно-чувствительных магнитных параметров: остаточной намагниченности и напряженности соответствующего поля остаточной намагниченности металла, формируемого в пространстве над граничной поверхностью стального изделия.

Из разработанной теоретической модели формирования поля остаточной намагниченности металла следует, что характер распределения эффективного механического напряжения над концентратором механических напряжений подобен характеру распределения напряженности поля остаточной намагниченности над граничной поверхностью металла.

Ключевые слова

стальная труба; краевая трещина;
коэффициент интенсивности
напряжений;
зона пластичности металла;
эффективное механическое
напряжение; магнитный контроль
напряженного состояния металла;
индикатор механического
напряжения

Результаты экспериментальных исследований напряженности поля остаточной намагниченности металла над сварным соединением стальной трубы, содержащим внутренние дефекты сплошности, хорошо согласуются с теоретической моделью формирования поля остаточной намагниченности металла.

The results of the study of the metal stress state in the area of cracks location in steel pipes, which are stress concentrators, are presented.

It is shown that the plasticity zones of the metal, which are formed near the top of the cracks, and in which mechanical stresses exceed the yield strength of the metal, can reach the boundary surface of the steel pipe, creating areas with an increased stress state of the metal.

These areas on the surface of the steel pipe can be detected using magnetic structure meter, in particular with the help of indicators of mechanical stress of metal IN-01m and IN-02 scanning type.

There has been created a theoretical model of formation of the residual magnetic field in the area above the boundary surface of the steel pipe, which contains a stress concentrator — an internal edge crack.

This model combines the simplest model of an edge crack developed in the theory of linear fracture mechanics and a theoretical model of magnetic control of the stress state of a metal based on the use of structurally sensitive magnetic parameters: the residual magnetization and the strength of the corresponding field of the residual magnetization of the metal formed in the space above the boundary surface steel product.

From the developed theoretical model of formation of the residual magnetic field of the metal it follows that the distribution of the effective mechanical stress over the concentrator of mechanical stresses is similar to the distribution of the field strength of the residual magnetization over the boundary surface of the metal.

The results of experimental studies of the field strength of the residual magnetization of the metal over the welded joint of the steel pipe containing internal continuity defects are in good agreement with the theoretical model for the formation of the field of the residual magnetization of the metal.

Стресс-коррозионные трещины металла и дефекты сплошности сварных соединений эксплуатирующихся стальных трубопроводов являются концентраторами механических напряжений и обладают способностью быстро развиваться в металле (часто непредсказуемо), приводя к неожиданному разрушению металла стальной трубы. Для их обнаружения применяются методы дефектоскопии [1, 2].

В методах механики разрушения для расчетной оценки опасности дефекта сплошности металла стального трубопровода, выявленного техническими средствами дефектоскопии, требуется определение формы, линейных размеров и ориентации дефекта сплошности в металле [3–5].

Однако имеются сложности, которые в настоящее время не позволяют в полной мере использовать результаты дефектоскопии для расчетной оценки опасности дефектов сплошности (устойчивости состояния или предрасположенности к развитию), которые частично заключаются в следующем:

— формы дефектов сплошности металла естественного происхождения могут в разной

Key words

steel pipe; edge crack;
stress intensity factor; metal ductility
zone; effective mechanical stress;
magnetic control of stress state
of metal; stress indicator

степени отличаться от принятой в расчетных моделях дефектов эллипсоидальной формы, что приводит к неконтролируемым ошибкам в расчетах на прочность;

— практически для всех существующих технических средств дефектоскопии характерна ограниченная точность оценки линейных размеров и формы дефектов сплошности, неудовлетворительная оценка ориентации граней дефекта относительно поверхностей стальной трубы, в силу наличия ограничений методического и технического характера;

— в теоретических расчетах на прочность металла с дефектами сплошности в механике разрушения в основном учитываются расчетные действующие нагрузки, но не учитывается распределение остаточных механических напряжений в стальных трубах и сварных соединениях, которые могут иметь значительные величины.

В настоящее время в практике неразрушающего контроля стальных изделий и материалов опасность дефекта сплошности, выявленного при дефектоскопии стального трубопровода, определяется на основе сравнения

его линейных размеров с заданными пороговыми значениями, которые регламентируются соответствующими нормативно-техническими документами.

При таком методическом подходе дефекты сплошности металла одинаковых размеров, но ориентированных различно к направлению действующих нагрузок, будут классифицированы как одинаково опасные для прочности металла, что не в полной мере соответствует действительности.

Однако если учесть, что около опасных дефектов сплошности формируется область с повышенным напряженным состоянием металла, то, контролируя фактическое напряженное состояние металла и сопоставляя его с примерными линейными размерами дефектов сплошности, полученными по результатам дефектоскопии стальных труб, можно достаточно уверенно оценивать опасность выявленных дефектов сплошности металла.

Рассмотрим простейшую модель формирования поля остаточной намагниченности металла над поверхностью стальной трубы с концентратором механических напряжений металла в виде бесконечно протяженного продольного краевого дефекта сплошности типа трещины (рисунок 1).

Рисунок 1. Стальная труба с краевым дефектом сплошности типа трещины

Несмотря на имеющиеся ограничения, эта модель трещины в металле, предлагаемая в рамках линейной механики разрушения, может быть пригодна для качественного исследования множества дефектов сплошности естественного происхождения в эксплуатирующихся стальных трубопроводах: стресс-коррозионных трещин, ориентированных преимущественно вдоль поверхности стальной трубы, дефектов металла, расположенных в корне сварных соединений стальных труб и т.д.

Для стального трубопровода со средой в полости (газ, нефть и нефтепродукты), которая создает внутреннее давление $P > 0$, характерно плоское напряженное состояние металла, создаваемое растягивающими окружными σ_x и растягивающими меридиональными (продольными) σ_y механическими напряжениями:

$$\sigma_x(P) = \frac{PD}{2t}, \quad \sigma_y(P) = \frac{PD}{4t}, \quad (1)$$

где D — наружный диаметр; t — толщина стенки стального трубопровода.

Плоское напряженное состояние металла стального трубопровода описывается эквивалентным ему одноосным напряженным состоянием металла, когда в нем действует эффективное (действительное) механическое напряжение растяжения металла. В общем случае эффективное механическое напряжение металла определяется по формуле [4]:

$$\sigma_{\text{эф}} = \sqrt{(\sigma_1 + \sigma_{01})^2 + (\sigma_2 + \sigma_{02})^2 - 2\eta(\sigma_1 + \sigma_{01})(\sigma_2 + \sigma_{02})}, \quad (2)$$

где σ_1, σ_2 — наибольшие и наименьшие механические напряжения, действующие в главных площадках (главные напряжения); σ_{01}, σ_{02} — наибольшие и наименьшие остаточные механические напряжения, действующие в главных площадках; η — коэффициент Пуассона (для конструкционных сталей $\eta = 0,29$).

Из формул (1)–(2) получаем выражение для расчета эффективного механического напряжения стального трубопровода в плоском напряженном состоянии металла (при отсутствии остаточных механических напряжений):

$$\sigma_{\text{эф}} = \sigma_x(P) \sqrt{\frac{5-4\eta}{4}} \approx 0,98\sigma_x(P). \quad (3)$$

Видно, что величина эффективного механического напряжения металла стального трубопровода весьма мало отличается от вели-

чины растягивающих окружных механических напряжений металла. Поэтому в модели краевого дефекта сплошности металла (рисунок 1) можно допустить, что осевое растяжение граней трещины осуществляется окружающими механическими напряжениями металла $\sigma = \sigma_x(P)$.

Механические напряжения в металле около вершины краевого дефекта сплошности типа трещины определяются по формуле [3]:

— в окружном направлении (по оси x):

$$\sigma_x(r, \theta) = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \quad (4a)$$

— по нормали к поверхности стальной трубы (по оси z):

$$\sigma_z(r, \theta) = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \quad (4б)$$

где K — коэффициент интенсивности механических напряжений для нормального отрыва металла; $(r; \theta)$ — полярные координаты точки измерения механического напряжения в металле (полос полярной системы координат совмещен с вершиной трещины, рисунок 2).

Коэффициент интенсивности напряжений для краевого дефекта сплошности в металле стальной трубы (рисунок 1), смещение граней которого осуществляется по схеме нормального отрыва, определяется по формуле [3]:

$$K = \sigma \sqrt{h} \left(2 - 0,41\lambda + 18,7\lambda^2 - 38,48\lambda^3 + 53,85\lambda^4 \right),$$

где параметр $\lambda = h/t$, h — длина грани дефекта сплошности типа трещины (глубина трещины); t — толщина стальной трубы.

Следует заметить, что данная формула применима лишь при значениях относительного параметра $\lambda < 0,7$ (для трещин в металле с глубиной не более 70 % от толщины стенки стальной трубы).

С учетом формул (1), (3), формула для расчета коэффициента интенсивности напряжений для краевого дефекта сплошности в металле стальной трубы примет вид:

$$K = 0,49 \frac{PD}{t} \sqrt{h} \left(2 - 0,41\lambda + 18,7\lambda^2 - 38,48\lambda^3 + 53,85\lambda^4 \right). \quad (5)$$

Из основ механики разрушения известно, что при вершине дефекта сплошности формируется пластическая зона металла, где механические напряжения превышают предел текучести, и металл испытывает пластическую деформацию. В зависимости от физического состояния металла, величина механических

напряжений в пластической зоне при вершине дефекта сплошности будет находиться в интервале значений, ограниченных пределом текучести σ_T и пределом прочности металла σ_B .

Размеры зоны пластичности при вершине дефекта можно оценить по расчетной формуле для плоского напряженного состояния металла [3]:

$$R_p = \frac{K^2}{4\pi\sigma_T^2} \left(1 + \frac{3}{2} \sin^2 \theta + \cos \theta \right), \quad (6)$$

где θ — полярный угол точки в металле относительно вершины дефекта.

Численные расчеты по формуле (6) показывают, что размеры зоны пластичности металла при вершинах трещин сопоставимы с линейными размерами дефектов сплошности и толщиной стенки стальной трубы.

На рисунке 2 показана граница зоны пластичности при вершине краевой трещины металла в стальной трубе, полученная на основе формулы (6). Расчеты были проведены для дефекта сплошности металла с глубиной $h = 4$ мм, расположенного в стальной трубе из конструкционной стали марки 09Г2С, имеющей стенку толщиной $t = 8$ мм, при внутреннем давлении $P = 5$ МПа.

Расчетный размер зоны пластичности металла при вершине данного дефекта сплошности меняется от $R_p = 2,8$ мм до $R_p = 3,7$ мм.

Рисунок 2. Зона пластичности при вершине краевой трещины нормального отрыва в плоском напряженном состоянии металла

Пластическая зона металла при вершине дефекта сплошности практически достигает граничной поверхности стальной трубы, так как выполняется условие

$$R_p + h = 7,7 \text{ мм} \approx t = 8 \text{ мм}.$$

Из формулы (6) можно получить также формулу расчета размеров зоны разрушения металла при вершине краевой трещины, в которой механические напряжения металла достигают предела прочности, если в формуле (6) предел текучести σ_T заменить пределом прочности металла σ_B , то есть:

$$R_p = \frac{K^2}{4\pi\sigma_T^2} \left(1 + \frac{3}{2} \sin^2 \theta + \cos \theta \right). \quad (7)$$

Результаты расчетов по формулам (6)–(7) показывают, что размеры границы зоны пластичности R_p примерно в два раза превышает размеры границы зоны разрушения R_B металла, при этом:

- для трещины глубиной 10 % (параметр $\lambda = 0,1$) от толщины стенки стальной трубы величина $R_p = 0,1$ мм, величина $R_B = 0,05$ мм;
- для трещины глубиной 30 % (параметр $\lambda = 0,3$) от толщины стенки стальной трубы величина $R_p = 0,6$ мм, величина $R_B = 0,15$ мм;
- для трещины глубиной 50 % (параметр $\lambda = 0,5$) от толщины стенки стальной трубы величина $R_p = 3$ мм, величина $R_B = 1,5$ мм.

На рисунке 3 показана зависимость размера зоны пластичности металла R_p при вершине краевой трещины от его глубины h в стальной трубе.

Видно, что увеличение глубины краевой трещины до 30–40 % от толщины стенки стальной трубы приводит к сравнительно незначительному увеличению размеров зоны пластичности металла при вершине трещины.

Дальнейший рост глубины краевой трещины более 50 % от толщины стенки стальной трубы приводит к существенному увели-

чению размеров зоны пластичности металла при вершине трещины, близкому к экспоненциальной зависимости, то есть создаются условия для ускоренного роста размеров трещины в металле.

Следует заметить, что эти расчетные результаты не противоречат опытным данным, в которых указывается на лавинообразное разрушение металла стального трубопровода из-за ускоренного развития стресс-коррозионных трещин.

На рисунке 4 показаны распределения эффективного механического напряжения металла на поверхности стальной трубы (конструкционная сталь 09Г2С) с внутренним давлением $P > 0$ над концентраторами механического напряжения — краевыми трещинами разной глубины.

1 — полярный угол $\theta = 0^\circ$;
2 — полярный угол $\theta = 90^\circ$; $P = 5$ МПа, $t = 10$ мм

Рисунок 3. Зависимость размера зоны пластичности металла при вершине краевой трещины в стальной трубе от глубины дефекта

а) 1 — глубина трещины $h = 1$ мм; 2 — глубина трещины $h = 3$ мм; 3 — глубина трещины $h = 5$ мм;
 $P = 5$ МПа, $t = 10$ мм

Рисунок 4. Распределение эффективного механического напряжения (а) и напряженности поля остаточной намагниченности металла (б) над стальной трубой с краевой трещиной

Механические напряжения над концентратором напряжений в металле стальной трубы рассчитывались по формулам (1)–(2), (4), при этом расчетная формула для эффективного механического напряжения металла на поверхности стальной трубы имеет вид:

$$\sigma_{эф}(r, \theta) = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\eta(\sigma_x\sigma_y + \sigma_x\sigma_z + \sigma_y\sigma_z)}, \quad (8)$$

где $\sigma_x = \sigma_x(r, \theta) + \sigma_x(P)$ — суммарное окружное механическое напряжение; $\sigma_z = \sigma_z(r, \theta) + \eta[\sigma_x(P) + \sigma_y(P)]$ — суммарное нормальное механическое напряжение; $\sigma_y = \eta[\sigma_x + \sigma_y] + \sigma_y(P)$ — суммарное продольное механическое напряжение в металле над краевой трещиной.

Из формулы (8) следует, что на неограниченном удалении от вершины трещины эффективное механическое напряжение металла определяется лишь окружными и меридиональными (продольными) механическими напряжениями (1) в металле нагруженной стальной трубы:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sigma_{эф}(r, \theta) = \sqrt{\sigma_x(P)^2 + \sigma_y(P)^2 - 2\eta\sigma_x(P)\sigma_y(P)},$$

что подтверждает правильность расчетной формулы (8).

При получении распределения эффективного механического напряжения (8) вдоль поверхности стальной трубы в окружном направлении (рисунок 4, а), было учтено, что величина x -координаты точки измерения связана с полярным углом выражением $x = (t - h)\operatorname{tg}(\theta)$; значение y -координаты точки измерения остается неизменным (например $y = 0$); значение z -координаты точки измерения равно глубине залегания трещины $z = t - h$ (рисунок 1).

Форма распределения эффективного механического напряжения на поверхности стальной трубы является колоколообразной, максимум которого соответствует месторасположению трещины в металле (рисунок 4, а).

Величина максимума эффективного механического напряжения зависит от глубины трещины, которая превышает номинальное механическое напряжение в металле стальной трубы (3):

— на 30 % над трещиной с глубиной 10 % от толщины стенки стальной трубы;

— почти на 90 % над трещиной с глубиной 30 % от толщины стенки стальной трубы;

— более чем в три раза над трещиной с глубиной 50 % от толщины стальной стенки трубы.

Величина эффективного механического напряжения над трещиной с глубиной 50 % от толщины стенки стальной трубы превышает предел текучести для конструкционной стали 09Г2С, из которого изготовлена стальная труба (на рисунке 4, а предельные механические параметры металла σ_T , σ_B показаны штриховой линией [6]).

Магнитные системы структуроскопов, в частности индикаторов механического напряжения металла ИН-01м и ИН-02 [7, 8], способны намагничивать металл стальной трубы на глубину до 5–10 мм. Поэтому ими можно реально контролировать механические напряжения, формируемые в зонах пластичности металла при вершинах поверхностных и внутренних дефектов сплошности, расположенных в металле и сварных соединениях стальной трубы.

В работе [9] показано, что характер распределения пространственных составляющих магнитного поля над поверхностью остаточного намагниченного стального изделия полностью определяется распределением эффективных механических напряжений металла в сложном напряженном состоянии.

Зависимость нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности над поверхностью металла от эффективного механического напряжения описывается формулой [9]:

$$H_r(r) = H_{r0} + \frac{\lambda_S H_{r0}}{\mu_0 M_S^2 N} \sigma_{эф}(x, y), \quad (9)$$

где $H_{r0}(\vec{r}) = M_{r0}(x, y) \cdot TF_z(\vec{r})$ — нормальная составляющая напряженности поля остаточной намагниченности при отсутствии механических напряжений; $M_{r0}(x, y)$ — соответствующая остаточная намагниченность металла; $TF_z(\vec{r})$ — топографическая функция от координат точки измерения над поверхностью металла ($r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$).

Формулы (8)–(9) определяют теоретическую модель формирования поля остаточной намагниченности металла над концентратором механических напряжений в виде краевой трещины в стальной трубе.

На рисунке 4, б показаны распределения напряженности поля остаточной намагниченности металла над стальной трубой

с краевыми трещинами, которые получены по расчетной формуле (9) (при величине зазора преобразователя магнитного поля $z = 1$ мм), с учетом распределения эффективного механического напряжения металла $\sigma_{\phi}(x, y)$ на поверхности стальной трубы, показанного на рисунке 4, а.

Видно, что распределение напряженности поля остаточной намагниченности металла над поверхностью стальной трубы полностью согласуется с распределением эффективного механического напряжения металла (рисунок 4, а). Максимум напряженности поля остаточной намагниченности металла соответствует месторасположению дефекта сплошности в металле и зависит от глубины краевой трещины (рисунок 4, б).

Величина этого максимума превышает величину напряженности поля остаточной намагниченности металла над бездефектным участком стальной трубы:

— на 13 % над трещиной с глубиной 10 % от толщины стенки стальной трубы;

а)

— почти на 40 % над трещиной с глубиной 30 % от толщины стенки стальной трубы;

— почти в два раза над трещиной с глубиной 50 % от толщины стальной стенки трубы.

Исследования показали, что области распределения эффективного механического напряжения и соответствующей напряженности поля остаточной намагниченности металла над поверхностью стальной трубы с краевой трещиной соизмеримы друг с другом.

Например, полуширина распределения напряженности поля остаточной намагниченности металла над краевой трещиной (ширина графика распределения, установленная на уровне половины максимума), составляет около 32 мм и остается практически одинаковой для трещин разной глубины.

Следует заметить, что этот параметр многократно превышает полуширину сигнала над дефектами сплошности металла, измеряемыми магнитными и электромагнитными дефектоскопами.

б)

Рисунок 5. Распределение напряженности поля остаточной намагниченности металла вдоль кольцевого сварного соединения стальной трубы (а) и его рентгенограмма (б)

На рисунке 5, а показано распределение напряженности поля остаточной намагниченности металла, экспериментально измеренное индикатором механического напряжения металла ИН-01м над дефектным кольцевым сварным соединением стальной трубы с наружным диаметром $D = 150$ мм и толщиной $t = 6$ мм.

В результате предварительно проведенного рентгеновского контроля в кольцевом сварном соединении стальной трубы были обнаружены внутренние дефекты, расположенные в корне сварного соединения в точках с координатами $x = 90 - 150$ мм (рисунок 5, б).

В распределении напряженности поля остаточной намагниченности металла над сварным соединением стальной трубы имеется максимум, совпадающий с месторасположением дефекта сплошности, являющийся концентратором механических напряжений металла.

Так как данная стальная труба находилась в ненагруженном состоянии и ранее не была в эксплуатации, то можно предположить, что зона пластичности металла при вершине дефектов сплошности сварного соединения сформировались в сложном напряженном состоянии металла, создавшемся в результате термической усадки металла.

Полуширина экспериментально полученного распределения напряженности поля остаточной намагниченности металла над кольцевым сварным соединением стальной трубы (рисунок 5, а) равна около 33 мм и хорошо согласуется с расчетными данными, полученными на основе вышерассмотренной теоретической модели.

На рисунке 5, а также приведены графики распределения напряженности поля остаточной намагниченности металла, измеренные вдоль околошовной области стальной трубы с отступом по обе стороны от сварного соединения на 30 мм.

Видно, что характер распределения напряженности поля остаточной намагниченности

над кольцевым сварным соединением и в околошовной области металла стальной трубы совершенно одинаков, что свидетельствует о влиянии концентратора механических напряжений и на околошовную область стальной трубы.

Вывод

Разница амплитуд напряженности поля остаточной намагниченности металла, измеренных над сварным соединением и в околошовной области металла стальной трубы, меняется в интервале $\pm 20\%$, что согласуется с соответствующими расчетными данными, полученными на основе теоретической модели (8)–(9).

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Миторхин М.Ю., Велиулин И.И., Касьянов А.Н. Анализ средств и технологий технического диагностирования и отбраковки труб при проведении капитального ремонта линейной части магистральных газопроводов ОАО «Газпром» // Территория «Нефтегаз». 2010. № 12. С. 57–60.
2. СТО Газпром 2-2.3-095-2007. Методические указания по диагностическому обследованию линейной части магистральных газопроводов. М.: ОАО «Газпром», 2008. 43 с.
3. Николаева Е.А. Основы механики разрушения. Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2010. 103 с.
4. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1989. 624 с.
5. Партон В.З. Механика разрушения: От теории к практике. М.: Наука, 1990. 240 с.
6. Арзамасова Б.Н. Конструкционные материалы: справочник. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
7. Мардамшин В.Р., Бакиев Т.А., Загидулин Т.Р., Загидулин Р.В. Исследование возможности магнитного контроля напряженного состояния металла и сварных соединений стальных трубопроводов // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 16. № 2. С. 139–146. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-2-139-146.
8. Загидулин Т.Р., Загидулин Р.В. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния металлоконструкций индикатором механического напряжения металла ИН-02 сканирующего типа // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 4. С. 143–149. DOI: 10.17122/ngdelo-2017-4-143-149.
9. Загидулин Р.В., Загидулин Т.Р., Аминев А.Ф., Осипов К.О. К вопросу непрерывного магнитного контроля напряженно-деформированного состояния металла по напряженности поля остаточной намагниченности // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 1. С. 169–174.

REFERENCES

1. Mitorkhin M.Yu., Veliyulin I.I., Kas'yanov A.N. Analiz sredstv i tekhnologii tekhnicheskogo diagnostirovaniya i otrakovki trub pri provedenii kapital'nogo remonta lineinoi chasti magistral'nykh gazoprovodov ОАО «Gazprom» [Analysis of Means and Technologies of Technical Diagnostics and Culling of Pipes During Overhaul of the Linear Part of the Main Gas Pipelines of JSC «Gazprom»]. *Territoriya Neftegaz — Oil and Gas Territory*, 2010, No. 12, pp. 57–60. [in Russian].
2. STO Gazprom 2-2.3-095-2007. *Metodicheskie ukazaniya po diagnosticheskomu obsledovaniyu lineinoi chasti magistral'nykh gazoprovodov* [STO Gazprom 2-2.3-095-2007. Guidelines for Diagnostic Examination of the Linear Part of Main Gas Pipelines]. Moscow, JSC «Gazprom» Publ., 2008. 43 p. [in Russian].
3. Nikolaeva E.A. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* [Fundamentals of Fracture Mechanics]. Perm, Izd-vo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2010. 103 p. [in Russian].
4. Darkov A.V., Shpiro G.S. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 624 p. [in Russian].
5. Parton V.Z. *Mekhanika razrusheniya: Ot teorii k praktike* [Fracture Mechanics: from Theory to Practice]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 240 p. [in Russian].
6. Arzamasova B.N. *Konstruktivnye materialy: spravochnik* [Construction Materials: Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 688 p. [in Russian].
7. Mardamshin V.R., Bakiev T.A., Zagidulin T.R., Zagidulin R.V. Issledovanie vozmozhnosti magnitnogo kontrolya napryazhennogo sostoyaniya metalla i svarnykh soedinenii stal'nykh truboprovodov [Research of Magnetic Control for Metal Stressed State and Welded Seams of Steel Pipeline]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2018, Vol. 16, No. 2, pp. 139–146. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-2-139-146[in Russian].

8. Zagidulin T.R., Zagidulin R.V. Magnitnyi kontrol' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metallokonstruktsii indikatorom mekhanicheskogo napryazheniya metalla IN-02 skaniruyushchego tipa [Metal Structures Stressed and Strained State Magnetic Inspection by IN-02 the Scanning Metal Strain Indicator]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2017, Vol. 15, No. 4, pp. 143–149. DOI: 10.17122/ngdelo-2017-4-143-149. [in Russian].

9. Zagidulin R.V., Zagidulin T.R., Aminev A.F., Osipov K.O. K voprosu nepreryvnogo magnitnogo kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metalla po napryazhennosti polya ostatochnoi namagnichennosti [A Continuous Metal Stress-Strain State Magnetic Inspection on Residual Magnetic Field Strength]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2017, Vol. 15, No. 1, pp. 169–174. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Мардамышин Вадим Рафаилович, главный специалист отдела 338/9/4 ПАО «Газпром», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Vadim R. Mardamshin, Chief Specialist of Department 338/9/4, Gazprom PJSC, Saint Petersburg, Russian Federation

e-mail: vrmardamshin@gmail.com

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 Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: doctech.zagr@post.com

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

e-mail: ztr@post.ru

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 Fluid and Gas Dynamics of Pipeline Systems and Hydraulic Machines Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: tagirbak@mail.ru