

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ МЕТАЛЛА ТОНКОСТЕННЫХ СОСУДОВ В ПЛОСКОМ НАПРЯ- ЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ. Ч. II.

УДК 620.179.
14

PART II. RESIDUAL MAGNETIC FIELD STRENGTH OF THIN-WALL VESSELS
IN PLANE STRESS-STRAIN STATE

**Загидулин Р. В., Загидулин Т. Р.,
Аминов А. Ф.**
**ФГБОУ ВПО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация**
**ООО «Научно-технический
центр «Спектр»,
г. Уфа, Российская Федерация**
**ООО «Газпром Трансгаз Уфа»,
г. Уфа, Российская Федерация**

**R. V. Zagidulin, T. R. Zagidulin,
A. F. Aminov**
**FSBEI HPE «Ufa State Petroleum
Technological University»,
Ufa, the Russian Federation**
**«Scientific and Technical
Center «Spector» LLC
Ufa, the Russian Federation**
**«Gazprom Transgaz Ufa» LLC Ufa,
the Russian Federation**

Приведены результаты расчета напряженности поля остаточной намагниченности металла тонкостенных сосудов, изготовленных из конструкционных сталей, находящихся в плоском напряженно-деформированном состоянии (НДС).

Полученные формулы устанавливают аналитические зависимости напряженности поля остаточной намагниченности от величины эффективного механического напряжения металла тонкостенных сосудов в плоском НДС.

Зависимости напряженности поля остаточной намагниченности от механических напряжений, действующих в плоскости металла, получены с учетом их согласованного изменения, что является характерным для металлоконструкций типа стальных оболочек. Показано, что для тонкостенных сосудов (сферических, цилиндрических), вследствие согласованного характера изменения механических напряжений в плоскости металла, напряженность поля остаточной намагниченности над поверхностью металла определяется величиной окружающих механических напряжений.

Установлено, что характер зависимости напряженности поля остаточной намагниченности над поверхностью тонкостенных сосудов от механических напряжений металла в плоском НДС качественно не отличается зависимостей, полученных для одноосного НДС металла, независимо от соотношения магнитного и механического состояния металла (деформированное или деформируемое стальное изделие).

Описан порядок оценки эквивалентного и окружного механического напряжения металла тонкостенных сосудов в плоском НДС по измеренной величине напряженности поля остаточной намагниченности металла, в которой используется эмпирическая зависимость, полученная путем одноосного растяжения стального образца.

Показано, что величина суммарного эффективного механического напряжения металла тонкостенных сосудов в плоском НДС может быть определена по величине напряженности поля остаточной намагниченности металла. При этом величина внешнего (действующего) эффективного механического напряжения металла тонкостенных сосудов может быть определена по относительной величине напряженности остаточной намагниченности металла.

Theoretical calculations of thin-wall vessels metal residual magnetic field strength in plate (two-dimensional) stress-strain state are resulted. Expressions obtained determine analytical dependences of residual magnetic field strength on effective value of mechanical strain of thin-wall vessels metal in plate stress-strain state.

Residual magnetic field strength on mechanical strain in the plane of metal dependences obtained in consideration of their full mutual coordinated variation, being typical for metal structures similar to steel shells. Because of mechanical strain components in the plane of metal are fully coordinated the residual magnetic field strength on the metal surface is determined by the value of circumferential mechanical strain is shown for the case of thin-wall vessels.

Residual magnetic field strength on mechanical strain dependence on the surface of thin-wall vessel in two-dimensional stress-strain state is found not differs significantly from one obtained by linear (one-dimensional) stress-strain state of metal irrespective of relation between preliminary magnetic and solid state of metal.

Technique of thin-wall vessel in two-dimensional stress-strain state equivalent and circumferential mechanical strain evaluation described on residual magnetic field strength of metal measured is based on experimental dependence obtained by linear extension of steel specimen.

Total value of effective mechanical strain of thin-wall vessel metal in plane stress-strain state might be determined on residual magnetic field strength of metal measured is shown. While this, the variations of external effective mechanical strain of thin-wall vessel metal might also be evaluated on residual magnetic field strength of metal relative to its value in still state.

Введение

Плоское НДС металла наиболее характерно для металлоконструкций типа стальных оболочек (резервуары разной формы, цистерны, стальные трубопроводы и т.д.), которые относятся к классу тонкостенных сосудов [1, 2]. В настоящее время магнитный контроль плоского НДС металла стальных трубопроводов и сосудов высокого давления осуществляется по магнитному параметру – коэрцитивной силы металла, измеряемой с помощью магнитных структуроскопов, согласно методикам [3-7].

Результаты работы [4] показывают, что анизотропия коэрцитивной силы металла стального трубопровода в плоском НДС пропорциональна величине эквивалентного механического напряжения, которая используется в теории прочности для сравнения с величиной допускаемого механического напряжения металла стального изделия, металлоконструкции [1, 2].

Для магнитного контроля плоского НДС металла с помощью структуроскопов необходимо осуществлять измерение коэрцитивной силы металла в направлениях действия главных

механических напряжений, по которым расчетным путем определяются величины главных и эквивалентных механических напряжений металла. Длительность процедуры измерения и численного расчета эквивалентных механических напряжений металла в плоском НДС негативно сказывается на производительности магнитного контроля НДС металлоконструкций при их эксплуатации и ремонте.

В то же время, результаты исследований, приведенных в первой части настоящей статьи, показывают, что величина напряженности поля остаточной намагниченности металла, измеренная над поверхностью стального изделия в плоском НДС, непосредственно зависит от величины эффективного механического напряжения металла. При этом если плоское НДС металла стального изделия является несимметричным, когда действующие в плоскости металла механические напряжения $\sigma_x \neq \sigma_y$, величину эффективного механического напряжения можно допустить равной величине эквивалентного механического напряжения металла.

В первой части статьи также было установлено, что зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла деформированного стального изделия, изготовленного из конструкционной стали, от величины эффективного механического напряжения металла в плоском НДС описывается аналитическим выражением:

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

где $\sigma_{\text{эф}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\eta\sigma_x\sigma_y}$ – «эффективное» механическое напряжение металла, H_{r0} – напряженность поля остаточной намагниченности металла при отсутствии механических напряжений ($\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = 0$), λ_s – магнитострикция насыщения, J_s – намагниченность насыщения металла, μ_0 – магнитная постоянная, N – размагничивающий фактор остаточно намагниченного участка металла, η – коэффициент Пуассона.

Установлено, что зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла деформируемого стального изделия от эффективного механического напряжения металла в плоском НДС описывается аналитическим выражением:

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = \frac{H_{r0}}{1 + \frac{\lambda_s H_{r0}}{\mu_0 TF_z H_{c0} J_s^2} \sigma_{\text{эф}}}, \quad (2)$$

где H_{c0} – коэрцитивная сила металла при отсутствии механического напряжения, TF_z – топографическая функция от координат и линейных размеров

остаточно намагниченной области металла.

В тонкостенных сосудах механические напряжения, действующие в плоскости металла, изменяются согласованно, то есть для них, во всем интервале изменения механических напряжений металла, выполняется соотношение:

$$\sigma_{\text{эф}}(m) = \sigma_x \sqrt{1 + m^2 - 2\eta m},$$

где параметр $m = \sigma_y/\sigma_x = \text{const}$.

Соотношения между величинами механических напряжений, действующих в плоскости металла тонкостенных сосудов, следует учитывать при определении зависимости напряженности поля остаточной намагниченности от величины механических напряжений металла в плоском НДС.

Исследование напряженности поля остаточной намагниченности металла стального сферического сосуда в плоском НДС

Для стального сферического сосуда со средой, которая создает внутреннее давление $P > 0$, характерны растягивающие окружные и меридиональные механические напряжения металла, которые равны друг другу (всестороннее растяжение или сжатие – симметричное плоское НДС металла):

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{Pd}{4t}, \quad (3)$$

где d – внешний диаметр, t – толщина стенки стального сферического сосуда.

В общем случае остаточная намагниченность металла сферического сосуда (поле остаточной намагниченности металла с напряженностью H_{r0}) создается, когда в плоскости металла действуют остаточные механические напряжения $\sigma_{x0} \neq \sigma_{y0}$.

С учетом формулы (3) для деформированного стального сферического сосуда получаем выражение для расчета эффективного механического напряжения металла:

$$\sigma_{\text{эф}} = \sigma_x \sqrt{2(1 \mp \eta)}. \quad (4)$$

Из формул (1), (4) получаем зависимость напряженности поля остаточной намагниченности деформированного стального сферического сосуда от эффективного механического напряжения металла:

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = H_{r0} \left[1 + \frac{\sqrt{2(1 \mp \eta)} \lambda_s}{\mu_0 J_s^2 N} \sigma_x \right], \quad (5)$$

Для деформируемого стального сферического сосуда из формул (2), (4) получаем зависимость напряженности поля остаточной намагниченности от эффективного механического напряжения

металла в следующем виде:

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = \frac{H_{r0}}{1 + \frac{\sqrt{2(1 \mp \eta)} \lambda_s H_{r0}}{\mu_0 T F_z H_{c0} J_s^2} \sigma_x}, \quad (6)$$

В формулах (5)-(6) знак «-» перед коэффициентом Пуассона соответствует механическим напряжениям в плоскости металла $\sigma_x = \sigma_y$, знак «+» соответствует механическим напряжениям деформированного стального сферического сосуда металла $\sigma_x = -\sigma_y$.

Из формул следует, что напряженность поля остаточной намагниченности металла стального сферического сосуда в плоском НДС определяется величиной окружающих механических напряжений.

Плоское НДС металла деформированного сферического сосуда

Когда в металле деформированного стального сферического сосуда существуют остаточные механические напряжения $\sigma_{x0} \neq \sigma_{y0}$, формирование поля остаточной намагниченности металла происходит под влиянием остаточного эффективного механического напряжения металла, определяемого на основе формулы (4):

$$\sigma_{эф0} = \sigma_{x0} \sqrt{2(1 \mp \eta)}.$$

При этом из формулы (5) для деформированного стального сферического сосуда следует:

$$H_r(\sigma_{x0}, \sigma_{y0}) = H_{r0} \left(1 + \frac{\sqrt{2(1-\eta)} \lambda_s}{\mu_0 J_s^2 N} \sigma_{x0} \right),$$

при $\sigma_{x0} = \sigma_{y0}$, (7a)

$$H_r(\sigma_{x0}, \sigma_{y0}) = H_{r0} \left(1 + \frac{\sqrt{2(1+\eta)} \lambda_s}{\mu_0 J_s^2 N} \sigma_{x0} \right),$$

при $\sigma_{x0} = -\sigma_{y0}$. (7б)

На рисунке 1 показаны графики зависимости напряженности поля остаточной намагниченности металла H_{r0} стального сферического сосуда, формируемого под действием остаточных механических напряжений $\sigma_{x0} = \sigma_{y0}$, полученные по формулам (7) (кривая 1 соответствует случаю $\sigma_{x0} = \sigma_{y0}$, кривая 2 соответствует $\sigma_{x0} = -\sigma_{y0}$). С увеличением остаточных механических напряжений металла наблюдается линейный рост напряженности поля остаточной намагниченности, которая может существенно превышать значение этого параметра при отсутствии остаточных механических напряжений металла ($\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = 0$).

Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла деформированного сферического сосуда в плоском НДС от механического напряжения, учетом формул (5), (7), будут

иметь следующий вид:

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = H_{r0} (1 + k_{11} \sigma_{x0}) (1 + k_{11} \sigma_x),$$

при $\sigma_x = \sigma_y$, (8a)

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = H_{r0} (1 + k_{12} \sigma_{x0}) (1 + k_{12} \sigma_x),$$

при $\sigma_x = -\sigma_y$, (8б)

где постоянная $k_{11} = \frac{\sqrt{2(1-\eta)} \lambda_s}{\mu_0 J_s^2 N}$, $k_{12} = \frac{\sqrt{2(1+\eta)} \lambda_s}{\mu_0 J_s^2 N}$.

На рисунке 2 показаны графики изменения напряженности поля остаточной намагниченности металла стального сферического сосуда с увеличением механических напряжений металла σ_x, σ_y в симметричном плоском НДС, полученные по формулам (8) при остаточных механических напряжениях $\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = 0$.

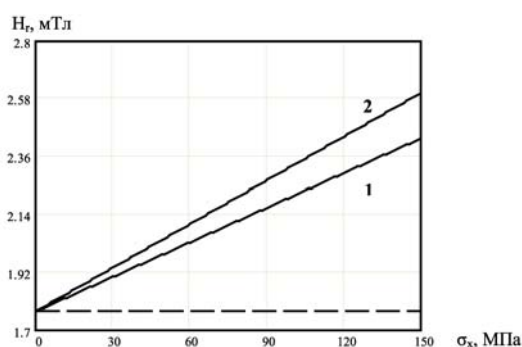


Рисунок 1. Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла H_{r0} стального сферического сосуда в плоском НДС от величины механического напряжения металла σ_x, σ_y .
----- H_{r0} при $\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = 0$; 1 - $\sigma_x = \sigma_y$; 2 - $\sigma_x = -\sigma_y$

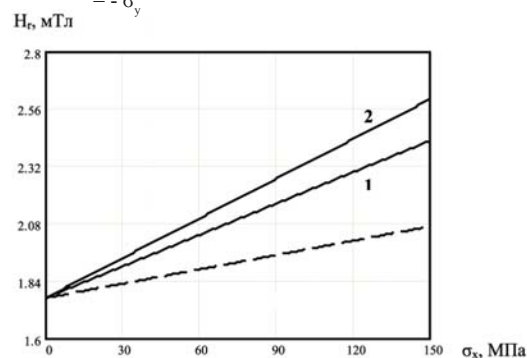


Рисунок 2. Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла деформированного сферического сосуда в плоском НДС от величины механического напряжения σ_x, σ_y .
----- H_{r0} при $\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = 0$; 1 - $\sigma_x = \sigma_y$; 2 - $\sigma_x = -\sigma_y$

Напряженность поля остаточной намагниченности металла, деформированного сферического сосуда в плоском НДС, линейно возрастает с увеличением механических напряжений $\sigma_x = \sigma_y$.

(кривая на рисунке 2) и превышают значения напряженности поля остаточной намагниченности металла в одноосном НДС (в рассмотренном диапазоне изменения механического напряжения металла σ_x достигает 17%).

Увеличение механических напряжений металла $\sigma_x = -\sigma_y$ также приводит к росту напряженности поля остаточной намагниченности металла деформированного сферического сосуда (кривая 2 на рисунке 2), ее значения превышают значения напряженности поля остаточной намагниченности металла в одноосном НДС (в рассмотренном диапазоне изменения механического напряжения металла σ_x составляет около 25%).

Плоское НДС металла деформируемого сферического сосуда

В том случае, когда остаточная намагниченность металла деформируемого сферического сосуда (поле остаточной намагниченности металла с напряженностью H_{r0}) создается при наличии в металле остаточных механических напряжений $\sigma_{x0} \neq \sigma_{y0}$, зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла от механических напряжений в плоском НДС, с учетом формул (6)-(7), описывается выражениями:

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = \frac{H_r(\sigma_{x0}, \sigma_{y0})}{1 + \frac{\sqrt{2(1-\eta)} \lambda_s H_{r0}}{\mu_0 TF_z H_{c0} J_s^2} \sigma_x} = \frac{H_{r0}(1+k_{11}\sigma_{x0})}{1+k_{21}\sigma_x},$$

при $\sigma_x = \sigma_y$, (9а)

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = \frac{H_r(\sigma_{x0}, \sigma_{y0})}{1 + \frac{\sqrt{2(1+\eta)} \lambda_s H_{r0}}{\mu_0 TF_z H_{c0} J_s^2} \sigma_x} = \frac{H_{r0}(1+k_{12}\sigma_{x0})}{1+k_{22}\sigma_x},$$

при $\sigma_x = -\sigma_y$, (9б)

где постоянная $k_{21} = \frac{\sqrt{2(1-\eta)} \lambda_s H_{r0}}{\mu_0 TF_z H_{c0} J_s^2}$, $k_{22} = \frac{\sqrt{2(1+\eta)} \lambda_s H_{r0}}{\mu_0 TF_z H_{c0} J_s^2}$.

На рисунке 3 показаны графики изменения напряженности поля остаточной намагниченности металла деформируемого сферического сосуда с увеличением механических напряжений металла σ_x , σ_y в симметричном плоском НДС, полученные по формулам (9).

Напряженность поля остаточной намагниченности металла деформируемого сферического сосуда в плоском НДС металла монотонно убывает с увеличением механических напряжений $\sigma_x = \sigma_y$ (кривая 1 на рисунке 3), и меньше значений напряженности поля остаточной намагниченности металла в одноосном НДС (в рассмотренном диапазоне изменения механического напряжения σ_x достигает -14 %).

Увеличение механических напряжений металла

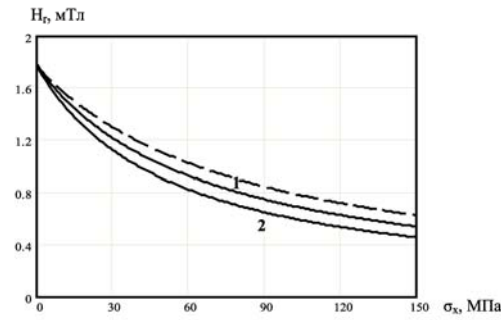


Рисунок 3. Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла деформируемого сферического сосуда в плоском НДС от механического напряжения
----- H_{r0} при $\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = 0$; 1 - $\sigma_x = \sigma_y$; 2 - $\sigma_x = -\sigma_y$

$\sigma_x = -\sigma_y$ также приводит к убыванию напряженности поля остаточной намагниченности металла деформируемого сферического сосуда (кривая 2 на рисунке 3), ее значения меньше значений напряженности поля остаточной намагниченности металла в одноосном НДС (в рассмотренном диапазоне изменения механического напряжения σ_x составляет около -27%).

Исследование напряженности поля остаточной намагниченности металла стального цилиндрического сосуда в плоском НДС

Для стального цилиндрического сосуда со средой, которая создает внутреннее давление $P > 0$, характерно то, что растягивающие окружные механические напряжения металла превышают меридиональные механические напряжения в два раза (несимметричное плоское НДС металла, $\sigma_x \neq \sigma_y$):

$$\sigma_x = \frac{P d}{2 t}, \quad (10а)$$

$$\sigma_y = \frac{P d}{4 t}, \quad (10б)$$

где d – внешний диаметр, t – толщина стенки цилиндрического сосуда.

С учетом формул (10) получаем выражение для расчета эффективного механического напряжения металла деформированного стального цилиндрического сосуда:

$$\sigma_{эф} = \sigma_x \sqrt{\frac{5 \mp 4 \eta}{4}}. \quad (11)$$

Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла деформированного цилиндрического сосуда от эффективного механического напряжения металла, с учетом формул (1), (11), будут иметь следующий вид:

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = H_{r0} \left[1 + \frac{\sqrt{5 \mp 4 \eta} \lambda_s}{2 \mu_0 J_s^2 N} \sigma_x \right], \quad (12)$$

Для деформируемого стального цилиндрического сосуда из формул (2), (11) получаем зависимость напряженности поля остаточной намагнитченности от эффективного механического напряжения металла в следующем виде:

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = \frac{H_{r0}}{1 + \frac{\sqrt{5-4\eta} \lambda_s H_{r0}}{2 \mu_0 T F_z H_{c0} J_s^2} \sigma_x} \quad (13)$$

В формулах (12)-(13) знак «-» перед коэффициентом Пуассона соответствует механическим напряжениям металла $\sigma_y = \sigma_x/2$, знак «+» соответствует механическим напряжениям металла $\sigma_y = -\sigma_x/2$.

Из формул (12)-(13) следует, что напряженность поля остаточной намагнитченности металла стального цилиндрического сосуда в плоском НДС определяется величиной окружных механических напряжений.

Плоское НДС металла деформированного цилиндрического сосуда

Когда в металле деформированного стального цилиндрического сосуда существуют остаточные механические напряжения $\sigma_{x0} \neq \sigma_{y0}$, формирование поля остаточной намагнитченности металла происходит под влиянием остаточного эффективного механического напряжения металла, определяемого по формуле (11):

$$\sigma_{эф0} = \sigma_{x0} \sqrt{\frac{5-4\eta}{4}}$$

При этом из формулы (12) для деформированного стального цилиндрического сосуда следует: при $\sigma_y = \sigma_x/2$, (14a)

$$H_r(\sigma_{x0}, \sigma_{y0}) = H_{r0} \left(1 + \frac{\sqrt{5-4\eta} \lambda_s}{2 \mu_0 J_s^2 N} \sigma_{x0} \right),$$

при $\sigma_y = -\sigma_x/2$. (14б)

$$H_r(\sigma_{x0}, \sigma_{y0}) = H_{r0} \left(1 + \frac{\sqrt{5+4\eta} \lambda_s}{2 \mu_0 J_s^2 N} \sigma_{x0} \right),$$

На рисунке 4 показаны графики зависимости напряженности поля остаточной намагнитченности металла деформируемого цилиндрического сосуда от механического напряжения металла, формируемого под действием остаточных механических напряжений σ_{x0}, σ_{y0} , полученные по формулам (14) (кривая 1 соответствует механическому напряжению $\sigma_{y0} = \sigma_{x0}/2$, кривая 2 соответствует $\sigma_{y0} = -\sigma_{x0}/2$).

С увеличением остаточных механических

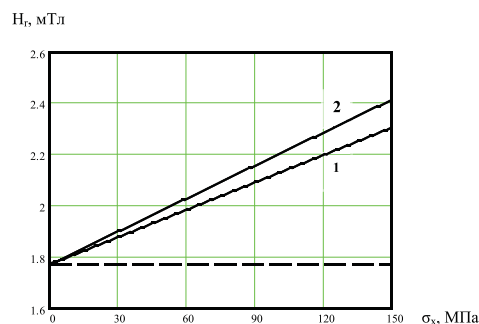


Рисунок 4. Зависимость напряженности поля остаточной намагнитченности металла H_{r0} стального цилиндрического сосуда в плоском НДС от величины механического напряжения металла
----- H_{r0} при $\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = 0$; 1 - $\sigma_y = \sigma_x/2$; 2 - $\sigma_y = -\sigma_x/2$

напряжений металла наблюдается линейный рост напряженности поля остаточной намагнитченности, которая может существенно превышать значение этого параметра при отсутствии остаточных механических напряжений металла ($\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = 0$).

Зависимость напряженности поля остаточной намагнитченности металла деформированного цилиндрического сосуда в плоском НДС от механического напряжения с учетом формул (12), (14) будут иметь следующий вид:

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = H_{r0} (1 + k_{11} \sigma_{x0}) (1 + k_{11} \sigma_x),$$

при $\sigma_y = \sigma_x/2$, (15a)

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = H_{r0} (1 + k_{12} \sigma_{x0}) (1 + k_{12} \sigma_x),$$

при $\sigma_y = -\sigma_x/2$, (15б)

где постоянная $k_{11} = \frac{\sqrt{5-4\eta} \lambda_s}{2 \mu_0 J_s^2 N}$, $k_{12} = \frac{\sqrt{5+4\eta} \lambda_s}{2 \mu_0 J_s^2 N}$.

На рисунке 5 показаны графики изменения напряженности поля остаточной намагнитченности металла цилиндрического сосуда с увеличением механических напряжений металла σ_x, σ_y в несимметричном плоском НДС, полученные по формулам (15) при остаточных механических напряжениях $\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = 0$.

Напряженность поля остаточной намагнитченности металла деформированного цилиндрического сосуда в плоском НДС линейно возрастает с увеличением механических напряжений $\sigma_x, \sigma_y = \sigma_x/2$ (кривая 1 на рисунке 5) и превышает значения напряженности поля остаточной намагнитченности в одноосном НДС металла (в рассмотренном диапазоне изменения механического напряжения σ_x составляет около 11 %).

Увеличение механических напряжений металла $\sigma_x, \sigma_y = -\sigma_x/2$ также приводит к росту напряженности поля остаточной намагнитченности металла деформированного цилиндрического сосуда (кривая

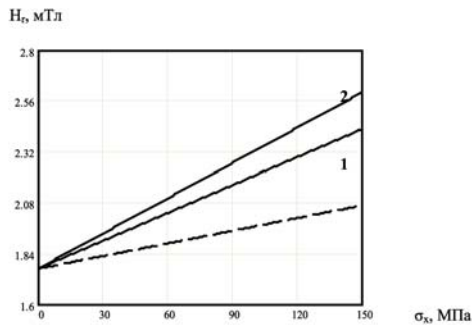


Рисунок 5. Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла деформированного цилиндрического сосуда в плоском НДС от величины механического напряжения
----- H_{r0} при $\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = 0$; 1 - $\sigma_y = \sigma_x/2$; 2 - $\sigma_y = -\sigma_x/2$

2 на рисунке 5), ее значения превышают значения напряженности поля остаточной намагниченности в одноосном НДС металла (в рассмотренном диапазоне изменения механического напряжения σ_x достигает 17%).

Плоское НДС металла деформируемого цилиндрического сосуда

В том случае, когда остаточная намагниченность металла деформируемого цилиндрического сосуда (поле остаточной намагниченности металла с напряженностью H_{r0}) создается при наличии остаточных механических напряжений $\sigma_{x0} \neq \sigma_{y0}$, напряженность поля остаточной намагниченности металла, с учетом формул (13)-(14), описывается следующими выражениями:

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = \frac{H_r(\sigma_{x0}, \sigma_{y0})}{1 + \frac{\sqrt{5 - 4\eta} \lambda_s H_{r0}}{2\mu_0 TF_z H_{c0} J_s^2} \sigma_x} = \frac{H_{r0}(1 + k_{11}\sigma_{x0})}{1 + k_{21}\sigma_x},$$

при $\sigma_y = \sigma_x/2$, (16a)

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = \frac{H_r(\sigma_{x0}, \sigma_{y0})}{1 + \frac{\sqrt{5 + 4\eta} \lambda_s H_{r0}}{2\mu_0 TF_z H_{c0} J_s^2} \sigma_x} = \frac{H_{r0}(1 + k_{11}\sigma_{x0})}{1 + k_{22}\sigma_x},$$

при $\sigma_y = -\sigma_x/2$ (16б)

$$\text{где постоянная } k_{21} = \frac{\sqrt{5 - 4\eta} \lambda_s H_{r0}}{2\mu_0 TF_z H_{c0} J_s^2}, k_{22} = \frac{\sqrt{5 + 4\eta} \lambda_s H_{r0}}{2\mu_0 TF_z H_{c0} J_s^2}.$$

На рисунке 6 показаны графики изменения напряженности поля остаточной намагниченности металла деформируемого цилиндрического сосуда с увеличением механических напряжений металла σ_x, σ_y в несимметричном плоском НДС, полученные по формулам (16).

Напряженность поля остаточной намагниченности металла деформируемого цилиндрического сосуда в плоском НДС монотонно убывает с увеличением механических напряжений $\sigma_x,$

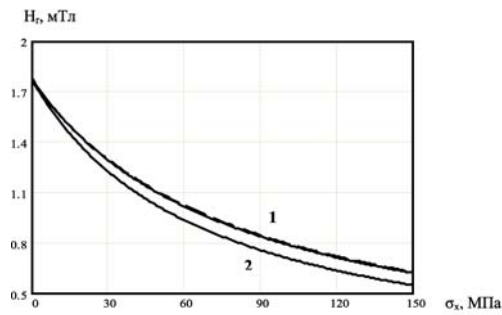


Рисунок 6. Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности деформируемого цилиндрического сосуда в плоском НДС от механического напряжения
----- H_{r0} при $\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = 0$; 1 - $\sigma_y = \sigma_x/2$; 2 - $\sigma_y = -\sigma_x/2$

$\sigma_y = \sigma_x/2$ (кривая 1, на рисунке 6), и несколько меньше значений напряженности поля остаточной намагниченности металла в одноосном НДС (в рассмотренном диапазоне изменения механического напряжения σ_x не превышает -1%).

Увеличение механических напряжений металла $\sigma_x, \sigma_y = -\sigma_x/2$ также приводит к монотонному убыванию напряженности поля остаточной намагниченности металла деформируемого цилиндрического сосуда (кривая 2 на рисунке 6), ее значения меньше значений напряженности поля остаточной намагниченности в одноосном НДС металла (в рассмотренном диапазоне изменения механического напряжения σ_x составляет -12%).

Оценка плоского НДС металла стального тонкостенного сосуда

В теории прочности материалов для оценки величины механического напряжения металла в сложном НДС, определяется эквивалентное механическое напряжение металла, значение которого сравнивается с допускаемым механическим напряжением металла стального изделия, металлоконструкции в одноосном НДС [1, 2]. Рассмотрим применимость этого подхода при магнитном контроле стальных тонкостенных сосудов в плоском НДС по напряженности поля остаточной намагниченности металла.

Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла деформированного тонкостенного сосуда от механического напряжения металла в одноосном НДС описывается аналитическим выражением [8-9]:

$$H_r(\sigma) = H_{r0} (1 + k_I \sigma), \quad (17)$$

где постоянная $k_I = \frac{\lambda_s}{\mu_0 J_s^2 N}$.

Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла деформированного тонкостенного сосуда от механического напряжения

металла в плоском НДС описывается формулами (5), (7), (12):

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = H_{r0} \left(1 + k_1 \sigma_{эф0} \right) \left(1 + k_1 \sigma_{эф} \right), \quad (18)$$

где
$$\sigma_{эф0} = \sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{y0}^2 - 2\eta\sigma_{x0}\sigma_{y0}},$$

$$\sigma_{эф} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\eta\sigma_x\sigma_y}$$

- эффективные остаточные и внешние механические напряжения металла.

Для оценки эффективного механического напряжения металла в плоском НДС металла по эмпирической зависимости $H_r(\sigma)$, полученной для одноосного НДС металла деформированного тонкостенного сосуда, должно выполняться равенство, составленное из формул (17) - (18):

$$H_r(\sigma) = H_r(\sigma_x, \sigma_y),$$

откуда следует:
$$\sigma = \sigma_{эф0} + \sigma_{эф} + k_1 \sigma_{эф0} \sigma_{эф}.$$

Величина слагаемого $k_1 \sigma_{эф0} \sigma_{эф} \ll \sigma_{эф0} + \sigma_{эф}$, так как согласно проведенным оценкам, она не превышает 10% от величины суммы первых двух слагаемых, если значения остаточных и действующих эффективных механических напряжений металла удовлетворяют условию

$$\sigma_{эф0}, \sigma_{эф} \leq \sigma_T$$

(здесь σ_T - предел текучести металла).

Поэтому можно допустить, что:

$$\sigma \approx \sigma_{эф0} + \sigma_{эф} = \begin{cases} \sqrt{2(1-\eta)} (\sigma_{x0} + \sigma_x), & \text{для сферического сосуда;} \\ \sqrt{\frac{5-\eta}{4}} (\sigma_{x0} + \sigma_x), & \text{для цилиндрического сосуда} \end{cases} \quad (19)$$

Из формулы (19) следует, что значение механического напряжения металла, определенное по эмпирической зависимости $H_r(\sigma)$ для одноосного НДС металла деформированного стального тонкостенного сосуда, соответствует величине суммарного эффективного механического напряжения металла в плоском НДС.

Если в формулах (17), (18) перейти к относительным значениям напряженности поля остаточной намагниченности, то можно исключить влияние остаточных механических напряжений металла:

$$\frac{H_r(\sigma)}{H_{r0}} = \frac{H_r(\sigma_x, \sigma_y)}{H_r(\sigma_{эф0})},$$

откуда следует равенство:

$$\sigma = \sigma_{эф} = \begin{cases} \sqrt{2(1-\eta)} \sigma_x, & \text{для сферического сосуда;} \\ \sqrt{\frac{5-\eta}{4}} \sigma_x, & \text{для цилиндрического сосуда} \end{cases} \quad (20)$$

Значение механического напряжения металла, полученное по эмпирической зависимости $H_r(\sigma)/H_{r0}$ по измеренному относительному значению напряженности поля остаточной намагниченности металла в одноосном НДС, соответствует величине внешнего эффективного механического напряжения металла деформированного стального тонкостенного сосуда в плоском НДС.

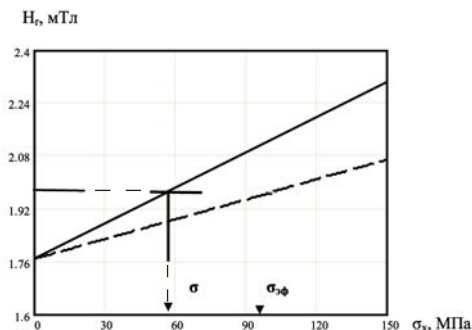


Рисунок 7. К определению эффективного механического напряжения деформированного тонкостенного сосуда в плоском НДС
----- - $H_r(\sigma_x)$ для одноосного НДС металла

На рисунке 7 показан порядок определения величины эффективного механического напряжения металла деформированного стального тонкостенного сосуда в несимметричном плоском НДС (механическое напряжение металла $\sigma_y = \sigma_x/2$) по эмпирической кривой $H_r(\sigma_x)$, полученной для одноосного НДС металла.

Для определения величины эффективного механического напряжения металла через точку, соответствующую измеренной величине напряженности поля остаточной намагниченности металла $H_r(\sigma_x)$ металла в плоском НДС (сплошная кривая на рисунке 7) проводится прямая, параллельная оси абсцисс σ_x до пересечения с эмпирической кривой $H_r(\sigma_x)$ в одноосном НДС металла (штриховая кривая на рисунке 7).

Значение абсциссы точки пересечения с эмпирической кривой $H_r(\sigma_x)$, полученной для одноосного НДС металла, соответствует величине эффективного механического напряжения металла деформированного тонкостенного стального сосуда $\sigma_{эф}$ в плоском НДС.

Для деформированных тонкостенных стальных сосудов в плоском НДС металла по величине эффективного механического напряжения, установленного на основе расчетных формул (17)-(18), можно оценить величину суммарного окружного механического напряжения металла, при этом:

- для стального сферического сосуда она определяется по формулам:

$$\begin{cases} \sigma_{x0} + \sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{2(1-\eta)}}, \text{ при } \sigma_x = \sigma_y; \\ \sigma_{x0} + \sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{2(1+\eta)}}, \text{ при } \sigma_x = -\sigma_y \end{cases}, \quad (21a)$$

- для стального цилиндрического сосуда она определяется по формулам:

$$\begin{cases} \sigma_{x0} + \sigma_x = \frac{2\sigma}{\sqrt{5-4\eta}}, \text{ при } \sigma_y = \sigma_x/2; \\ \sigma_{x0} + \sigma_x = \frac{2\sigma}{\sqrt{5+4\eta}}, \text{ при } \sigma_y = -\sigma_x/2 \end{cases}. \quad (21b)$$

Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла деформируемого стального тонкостенного сосуда от механического напряжения металла в одноосном НДС описывается аналитическим выражением [8-9]:

$$H_r(\sigma) = \frac{H_{r0}}{1+k_2\sigma}, \quad (22)$$

где постоянная $k_2 = \frac{\lambda_s H_{r0}}{\mu_0 TF_z H_{c0} J_s^2}$.

Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла деформируемого тонкостенного сосуда от механического напряжения металла в плоском НДС описывается формулами (6)-(7), (13):

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = \frac{H_{r0}(\sigma_{эф0})}{1+k_2\sigma_{эф}} = \frac{H_{r0}(1+k_1\sigma_{эф0})}{1+k_2\sigma_{эф}}. \quad (23)$$

Для оценки эффективного механического напряжения металла в плоском НДС по эмпирической зависимости $H_r(\sigma)$, полученной для одноосного НДС металла деформируемого тонкостенного сосуда, должно выполняться равенство, составленное из формул (22)-(23):

$$H_r(\sigma) = H_r(\sigma_x, \sigma_y),$$

откуда следует:

$$\sigma = \frac{\sigma_{эф} - k_1 \sigma_{эф0} / k_2}{1+k_1 \sigma_{эф0}}. \quad (24)$$

Уравнение (24) не имеет однозначного решения, так как в нем не определена величина остаточного эффективного механического напряжения металла $\sigma_{эф0}$. Если величина остаточного эффективного механического напряжения металла $\sigma_{эф0} = 0$, из уравнения (24) получаем формулу (20), откуда следует, что значение механического напряжения металла, определенное по эмпирической зависимости $H_r(\sigma)$ металла в одноосном НДС, соответствует величине внешнего эффективного механического напряжения металла деформируемого тонкостенного сосуда в плоском НДС.

Если в формулах (22)-(23) перейти к относительным значениям напряженности поля остаточной намагниченности металла, то можно исключить влияние неопределенного эффективного остаточного механического напряжения металла $\sigma_{эф0}$:

$$\frac{H_r(\sigma)}{H_{r0}} = \frac{H_r(\sigma_x, \sigma_y)}{H_r(\sigma_{эф0})},$$

откуда следует равенство (20).

Механическое напряжение металла, полученное по эмпирической зависимости $H_r(\sigma)/H_{r0}$ по относительному значению напряженности поля остаточной намагниченности металла в одноосном НДС, соответствует величине внешнего эффективного механического напряжения металла деформируемого тонкостенного стального сосуда в плоском НДС.

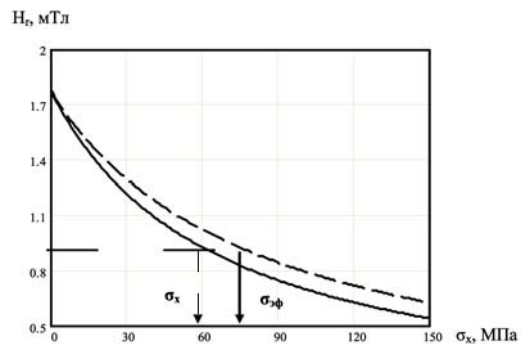


Рисунок 8. К определению эффективного механического напряжения деформированного тонкостенного сосуда в плоском НДС
Кривая - $H_r(\sigma_x)$ для одноосного НДС металла

На рисунке 8 показан порядок определения величины эффективного механического напряжения металла деформируемого стального тонкостенного сосуда в симметричном плоском НДС металла (механическое напряжение металла $\sigma_y = \sigma_x$) по эмпирической кривой $H_r(\sigma_x)$ в одноосном НДС металла.

Значение абсциссы точки пересечения с эмпирической кривой $H_r(\sigma_x)$ в одноосном НДС металла соответствует величине эффективного

механического напряжения металла деформируемого тонкостенного стального сосуда в плоском НДС.

Для деформируемых $\sigma_{эф}$ тонкостенных сосудов в плоском НДС металла по величине эффективного механического напряжения, исходя из формулы (18), можно оценить величину внешнего окружного механического напряжения металла, при этом:

- для стального сферического сосуда она определяется по формулам:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{2(1-\eta)}}, \text{ при } \sigma_x = \sigma_y; \\ \sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{2(1+\eta)}}, \text{ при } \sigma_x = -\sigma_y \end{cases}, \quad (25a)$$

- для стального цилиндрического сосуда она определяется по формулам:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{2\sigma}{\sqrt{5-4\eta}}, \text{ при } \sigma_y = \sigma_x/2; \\ \sigma_x = \frac{2\sigma}{\sqrt{5+4\eta}}, \text{ при } \sigma_y = -\sigma_x/2 \end{cases}. \quad (25b)$$

Выводы

1. Получены аналитические выражения для зависимости напряженности поля остаточной намагниченности металла $H_r(\sigma)$ тонкостенных стальных сосудов от механического напряжения металла в плоском НДС. Показана возможность оценки эффективного механического напряжения металла тонкостенных сосудов в плоском НДС по эмпирической зависимости $H_r(\sigma)$, полученной для одноосного НДС металла.

2. Установлено, что напряженность поля остаточной намагниченности металла деформированного тонкостенного стального сосуда пропорциональна величине суммарного эффективного механического напряжения металла в плоском НДС.

3. Установлено, что относительная величина напряженности остаточной намагниченности металла деформированного и деформируемого тонкостенного сосуда пропорциональна величине внешнего эффективного механического напряжения металла.

4. Получены аналитические выражения для оценки величины окружного механического напряжения металла стальных тонкостенных сосудов по измеренной величине эффективного механического напряжения металла в плоском НДС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Дарков А. В., Шпиро Г. С. Сопrotivление материалов. М.: Высшая школа, 1989. 624 с.

2 Гафаров Р. Х., Шарафиев Р. Г., Ризванов Р. Г. Краткий справочник инженера-механика. Основные формулы и справочные данные по расчетам на прочность. Уфа: УГНТУ, 1995. 112 с.

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

4 Теплинский Ю. А., Агинея Р. В., Кузьбожев А. С. Оценка напряженного состояния стальных трубопроводов по анизотропии магнитных свойств металла // Контроль. Диагностика. 2004. № 8. С. 22-24.

5 Коэрцитиметрический контроль трубопроводов в условиях двухосного напряженного состояния / Р. В. Агинея, А. С., Кузьбожев Ю. А., Теплинский, И. Н. Андронов // Контроль. Диагностика. 2005. № 6. С. 14-16.

6 Бердник М. М., Александров Ю. В., Агинея Р. В. Исследование влияния плоского напряженного состояния на измене-

ние магнитных характеристик трубных сталей // Контроль. Диагностика. 2011. № 1. С. 22-26.

7 МУ РД ИКЦ «Кран» 099-99. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением, при проведении экспертизы промышленной безопасности. Москва, 2002. 37 с.

8 Загидулин Р. В., Загидулин Т. Р. Исследование зависимости поля остаточной намагниченности от напряженно-деформированного состояния металла стального изделия. Ч. 1. // Контроль. Диагностика. 2011. № 7 (157). С. 12-16.

9 Загидулин Р. В., Загидулин Т. Р. Исследование зависимости поля остаточной намагниченности от напряженно-деформированного состояния металла стального изделия. Ч. 2. // Контроль. Диагностика. 2011. № 8 (158). С. 14-20.

REFERENCES

1 Darkov A. V., Shpiro G. S. Soprotyivlenie materialov. M.: Vishaya shkola, 1989. 624 s. [in Russian].

2 Gafarov R. Ch., Sharafiev R. G., Risvanov R. G. Kratkiy spravochnik ingenera-mechanika. Osnovnie formul i spravochnie dannie po raschetam na prochnost. Ufa: UGNTU, 1995. 112 s. [in Russian].

3 Magnitny control napriagennodeformirivannogo sostojanya i ostatochnogo resursa sudov, rabotajuchich pod davleniem / Popov B. E., Levin E. A., Kotelnikov B. C., Besludko G. J. i dr. // Besopasnost truda v promyshlennosti. 2001. № 3. S. 25-30. [in Russian].

4 Teplinsky J. A., Aginey R. B., Kuzbogev A. C. Ozenka napriagennogo sostojanya stalnich truboprovodov po anisotropii magnitnich svoystv metalla // Kontrol. Diagnostika. 2004. № 8. S. 22-24. [in Russian].

5 Koerzitimetrichesky kontrol truboprovodov v uslovyach dvuchosnogo napriagennogo sostojania / R. B. Aginey, A. C. Kuzbogev, J. A. Teplinsky, I. N. Andronov // Kontrol. Diagnostika. 2005. № 6. S. 14-16. [in Russian].

6 Berdnik M. M., Aleksandrov J. V., Aginey R. B. Issledovanie vlyania ploskogo napriagennogo sostojania na ismenenie magnitnich charakteristik trubnyh staley // Kontrol. Diagnostika. 2011. № 1. S. 22-26. [in Russian].

7 MU RD IKZ «Kran» 099-99. Magnitny control napriagennodeformirivannogo sostojanya i ostatochnogo resursa sudov, rabotajuchich pod davleniem, pri provedenii ekspertizy promyshlennoy bezopasnosti. Moskva, 2002. 37 s. [in Russian].

8 Zagidulin R. V., Zagidulin T. R. Issledovanie zavisimosti polia ostatochnoy namagnichennosti ot napriagennodeformirivannogo sostojanya i ostatochnogo resursa sudov, rabotajuchich pod davleniem, pri provedenii ekspertizy promyshlennoy bezopasnosti. Moskva, 2002. 37 s. [in Russian].

deformirivannogo sostoyania metalla stalnogo isdelia. Ch. 1. // Kontrol. Diagnostika. 2011. № 7 (157). S. 12-16. [in Russian].

9 Zagidulin R.V., Zagidulin T. R. Issledovanie zavisimosti polia ostatochnoy namagnichennosti ot napriagenno-deformirivannogo sostojania metalla stalnogo isdelia. Ch. 2.// Kontrol. Diagnostika. 2011. № 8 (158). S.14-20. [in Russian].

Загидулин Р. В., д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

R. V. Zagidulin Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair «Technological Machines and Equipment» FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

E-mail: doctech.zagr@post.com

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

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

E-mail: ztr@post.com

Аминев А. Ф., инженер ООО «Газпром Трансгаз Уфа», г. Уфа, Российская Федерация

A. F. Aminev, Engineer of the «Gazprom Transgaz Ufa» LLC Ufa, the Russian Federation

E-mail: farit-56@yandex.ru