



## МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ СЛОЖНОМ СОПРОТИВЛЕНИИ МЕТАЛЛА И СНИЖЕНИИ ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

Т.Р.Загидулин<sup>1</sup>, Р.В.Загидулин<sup>1</sup>, В.Р.Мардамшин<sup>2</sup>, Т.А.Бакиев<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>ООО «НТЦ Спектр», Уфа, Россия; <sup>2</sup>ООО «Газпром Трансгаз Уфа», Уфа, Россия;

<sup>3</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

### Magnetic Control of Tension at the Difficult Resistance of Metal and Decrease in Size of Residual Mechanical Tension of Drill Pipes

T.R.Zagidulin<sup>1</sup>, R.V.Zagidulin<sup>1</sup>, V.R.Mardamshin<sup>2</sup>, T.A.Bakiyev<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>LLC «STC Spektr», Ufa, Russia; <sup>2</sup>LLC «Gazprom Transgaz Ufa», Ufa, Russia; <sup>3</sup>Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

#### Abstract

Results of tension researches of the field residual metal magnetization from the mechanical tension arising at simultaneous action in the cross section of metal of the bending and twisting moments, characteristic of the operated steel drill pipe and also other elements of metalwork are given at the difficult resistance of metal. It is shown that the tension size of the residual magnetization field of metal measured over a surface of a steel, pipe depends on the size of the normal and tangent mechanical tension arising at the difficult resistance of metal. The received formulas have generalizing character. It is shown that estimates of stress of metal it is possible to enter the threshold value of tension size of the residual magnetization field connected with the size of the allowed mechanical tension of metal. Results of magnetic control of tension of drill pipes are given by the indicator of mechanical tension of IN02 metal of the scanning type that areas with stress of metal are located mainly about the threaded connections made by means of welding. It is shown that results of magnetic control allow not only to reject drill pipes with dangerous stress of metal, but also to use them for a possibility of further maintenance free restoration of a resource due to decrease in residual mechanical tension in local areas of metal. Results of decrease in residual mechanical tension are given in areas with stress of metal of drill pipes the device of electromagnetic metal working.

#### Keywords:

Stress state;  
Drill pipe;  
Effective stress;  
Residual stresses;  
Combined strength;  
Mechanical stress indicator.

© 2018 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

### Введение

В процессе промышленной эксплуатации элементы многих металлоконструкций могут находиться в сложном напряженном состоянии, испытывая при этом различные деформации (сжатие, растяжение, кручение, изгиб). Стальные буровые трубы работают в условиях действия экстремальных нагрузок, при котором возникает сложное сопротивление металла, характеризующееся одновременным действием в поперечном сечении металла нескольких силовых факторов (изгибающий момент, продольная и поперечная сила, крутящий момент) [1, 2].

Контроль напряженного состояния металла стальных буровых труб является одной из важных задач технической диагностики, так как

внезапное разрушение буровых колонн из-за накопленной поврежденности металла в стальных трубах приводит к весьма существенным материальным потерям [3-6].

В стальных изделиях, изготовленных из обычной конструкционной стали, критическое состояние металла приводит к зарождению и постепенному росту микротрещин, которые, начиная с определенных минимальных линейных размеров, надежно выявляются техническими средствами дефектоскопии.

Однако для стальных буровых труб предел текучести металла весьма близок к пределу прочности (площадка текучести на диаграмме растяжения стальных образцов весьма мала или практически отсутствует) [7].

Поэтому изначально хрупкий металл стальной буровой трубы при достижении предельной величины крутящего момента в процессе буре-

\*E-mail: [vmardamshin@gmail.com](mailto:vmardamshin@gmail.com)

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP20180200350>

ния скважины, под действием касательных механических напряжений разрушается почти мгновенно, без постепенного растрескивания металла. Поэтому в данном случае технические средства дефектоскопии принципиально не могут обеспечивать раннее выявление дефектов сплошности металла в стальных буровых трубах.

Проблема ранней диагностики поврежденности металла буровых труб, для обеспечения их безаварийной эксплуатации, может быть решена физическими методами неразрушающего контроля напряженного состояния металла. Данная проблема включает в себя также задачу контроля остаточных механических напряжений металла после ремонта и восстановления ресурса буровых труб [8].

В настоящее время при технической диагностике эксплуатирующегося промышленного оборудования применяются магнитные методы и технические средства неразрушающего контроля напряженного состояния металла, которые основаны на измерении напряженности поля остаточной намагниченности металла, коррелирующей с величиной механических напряжений [9, 10].

Наиболее исследованы зависимости напряженности поля остаточной намагниченности в одноосном и плоском напряженном состоянии металла, а также при кручении стального бруса, однако практически нет сведений о характере изменения структурно-чувствительных магнитных параметров в состоянии сложного сопротивления металла [11, 12].

В данной статье исследуется зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла от механических напряжений, возникающих при одновременном действии в поперечном сечении металла изгибающего и крутящего моментов, характерного для эксплуатирующейся стальной буровой трубы.

### Расчет напряженности поля остаточной намагниченности при сложном сопротивлении металла

Для определения зависимости напряженности поля остаточной намагниченности от величины механических напряжений, возникающих при одновременном действии в поперечном сечении металла изгибающего и крутящего моментов, воспользуемся результатами работы [11].

В этой работе проведено исследование неко-

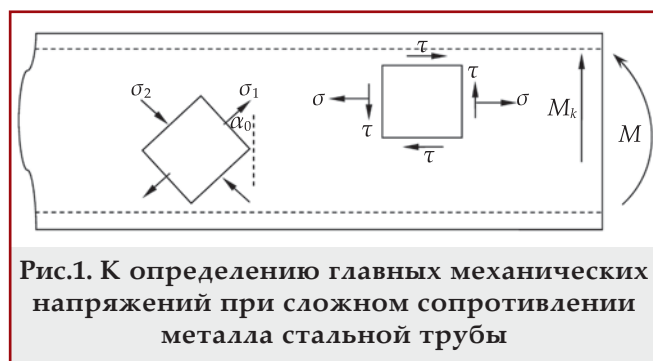


Рис.1. К определению главных механических напряжений при сложном сопротивлении металла стальной трубы

торых структурно-чувствительных магнитных параметров в плоском напряженном состоянии металла и установлено, что зависимость напряженности поля остаточной намагниченности деформированного стального изделия (остаточная намагниченность металла создается при установившейся внешней нагрузке) от величины эффективного (действительного) механического напряжения металла в плоском напряженном состоянии описывается выражением [11]:

$$H_r(\sigma_1, \sigma_2) = H_{r0} + \lambda_s H_{r0} \sigma_{\text{эф}} / \mu_0 M_s^2 N, \quad (1)$$

где  $H_{r0}$  - напряженность поля остаточной намагниченности без механических напряжений,  $\lambda_s$  - магнитострикция насыщения,  $M_s$  - намагниченность насыщения,  $\mu_0$  - магнитная постоянная,  $N$  - размагничивающий фактор остаточного участка металла.

Эффективное механическое напряжение в плоском напряженном состоянии металла определяется по формуле [1]:

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

где  $\sigma_1, \sigma_2$  - главные механические напряжения,  $\sigma_{01}, \sigma_{02}$  - соответствующие остаточные механические напряжения в плоскости металла;  $\eta$  - коэффициент Пуассона (для конструкционных сталей  $\eta = 0.29$ ).

Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла деформируемого стального изделия (остаточная намагниченность металла создается лишь однократно, до приложения механической нагрузки) от эффективного механического напряжения металла в плоском напряженном состоянии описывается выражением [11]:

$$H_r(\sigma, \tau) = H_{r0} / \left(1 + \lambda_s H_{r0} \sigma_{\text{эф}} / \mu_0 T F_z H_{c0} M_s^2\right) \quad (3)$$

где  $H_{c0}$  - коэрцитивная сила металла при отсутствии механического напряжения,  $T F_z$  - функция от координат и линейных размеров остаточной намагниченной области металла.

На рисунке 1 показана поверхность стальной трубы, в сечении которой одновременно действуют изгибающий момент  $M$  и крутящий момент  $M_k$ . На поверхности металла стальной трубы возникают нормальные механические напряжения  $\sigma$  от изгиба, направленные вдоль оси стальной трубы, и максимальные касательные напряжения  $\tau$  от кручения металла, направленные по периметру стальной трубы.

Наибольшие нормальные механические напряжения на поверхности металла, действующие в плоскости изгиба стальной трубы, определяются по формуле [1, 2]:

$$\sigma = M/W \quad (4)$$

где  $M$  - изгибающий момент,  $W = 0.098D^3(1 - k^4)$  - осевой момент сопротивления поперечного сечения стальной трубы, коэффициент  $k = d/D$  ( $d$ ,

$D$  – внутренний и наружный диаметры стальной трубы).

Наибольшие касательные механические напряжения металла, действующие по периметру стальной трубы, определяются по формуле:

$$\tau_{\max} = M_k / W_p = M_k / 2W \quad (5)$$

где  $M_k$  – крутящий момент,  $W_p = 2W$  – полярный момент сопротивления поперечного сечения стальной трубы.

Таким образом, в любой точке поверхности стальной трубы создается плоское напряженное состояние металла, которое может быть описано главными механическими напряжениями металла  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$ , действующими на главные площадки и которые наклонены под углом  $\alpha_0 = \frac{1}{2} \arctg(2\tau/\sigma)$  к площадкам чистого сдвига (рис.1).

Главные механические напряжения в сложном сопротивлении металла имеют разные знаки и определяются по следующим формулам [1]:

$$\begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_{\max} &= \sigma/2 + \sqrt{(\sigma/2)^2 + \tau^2}, \\ \sigma_2 = \sigma_{\min} &= \sigma/2 - \sqrt{(\sigma/2)^2 + \tau^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

С учетом формул (6), выражение для расчета величины эффективного механического напряжения металла (2) примет вид:

$$\sigma_{\text{эф}} = \sqrt{\sigma^2 + 2(1+\eta)\tau^2}. \quad (7)$$

Под механическими напряжениями  $\sigma$  и  $\tau$  в формуле (7) в общем случае следует подразумевать суммарные механические напряжения (результат суммы действующих (временных) и остаточных механических напряжений в металле).

Подставляя формулу (7) в формулы (1)-(3), получим аналитические зависимости напряженности поля остаточной намагниченности металла от механического напряжения при сложном сопротивлении металла стальной трубы, при этом:

- для деформированного металла стальной трубы она имеет вид:

$$H_r(\sigma, \tau) = H_{r0} \left[ 1 + k_1 \sqrt{\sigma^2 + 2(1+\eta)\tau^2} \right], \quad (8a)$$

- для деформируемого металла стальной трубы она имеет вид:

$$H_r(\sigma, \tau) = H_{r0} / \left( 1 + k_2 \sqrt{\sigma^2 + 2(1+\eta)\tau^2} \right), \quad (8б)$$

где  $k_1 = \lambda_s / \mu_0 M_s^2 N$ ,  $k_2 = \lambda_s H_{r0} / \mu_0 TF_z H_{c0} M_s^2$  – постоянные коэффициенты.

Из формул (8) следует, что величина напряженности поля остаточной намагниченности металла, измеренная над поверхностью стальной трубы, зависит от величины (суммарных) нормальных и касательных механических напряжений, возникающих при сложном сопротивлении металла, при этом на эту зависимость оказывают влияние основные магнитные параметры металла.

Формулы (8) имеют обобщающий характер, так как из них следуют соответствующие формулы расчета для частных случаев: для одноосного напряженного состояния металла (при  $\tau = 0$ ) [11] и при кручении металла (при  $\sigma = 0$ ) [12].

Из формул (1)-(7) можно получить аналитические зависимости для напряженности поля остаточной намагниченности металла от изгибающего и крутящего моментов, действующих в сечении стальной трубы, при этом:

- для деформированного металла стальной трубы она имеет вид:

$$\begin{aligned} H_r(M_{np}) &= H_{r0} \left( 1 + k_1 \sqrt{M^2 + \frac{1+\eta}{2} M_k^2} / W \right) = \\ &= H_{r0} (1 + k_1 M_{np} / W), \end{aligned} \quad (9a)$$

- для деформируемого металла стальной трубы она имеет вид:

$$\begin{aligned} H_r(M_{np}) &= H_{r0} / \left( 1 + k_2 \sqrt{M^2 + \frac{1+\eta}{2} M_k^2} / W \right) = \\ &= H_{r0} / (1 + k_2 M_{np} / W), \end{aligned} \quad (9б)$$

где  $M_{np} = \sqrt{M^2 + \frac{1+\eta}{2} M_k^2}$  – приведенный (эквивалентный) момент.

Из формул (9) следует, что величина напряженности поля остаточной намагниченности металла зависит от величины изгибающего и крутящего моментов, действующих в сечении стальной трубы, при этом на эту зависимость оказывают влияние не только магнитные параметры металла, но и линейные размеры и форма сечения стальной трубы.

Расчет стальной трубы на прочность при изгибе с кручением металла производится с применением теорий прочности [1, 2], при этом условие прочности металла имеет вид:

- для эффективного напряжения

$$\sigma_{\text{эф}} = \sqrt{\sigma^2 + 2(1+\eta)\tau^2} \leq [\sigma], \quad (10a)$$

- для приведенного момента

$$M_{np} / W = \sqrt{M^2 + \frac{1+\eta}{2} M_k^2} / W \leq [ ], \quad (10б)$$

где  $[\sigma]$  – допускаемое механическое напряжение металла.

Для напряженности поля остаточной намагниченности металла, которая однозначно зависит от эффективного механического напряжения и приведенного момента в поперечном сечении металла стальной трубы (8)-(9), можно ввести пороговое значение, связанное с величиной допускаемого механического напряжения.

С учетом этого условие прочности металла примет вид:

- для деформированного металла стальной трубы:

$$H_r(\sigma, \tau) \leq [H_{r1}] = H_{r0} (1 + k_1 [\sigma]), \quad (11a)$$

- для деформируемого металла стальной трубы:

$$H_r(\sigma, \tau) \leq [H_{r2}] = H_{r0} / (1 + k_2 [\sigma]), \quad (11б)$$

где  $[H_{r1}]$ ,  $[H_{r2}]$  – пороговые значения напряженности поля остаточной намагниченности, связанные с величиной допускаемого механического

напряжения металла.

Из формул (11) следует, что пороговые значения напряженности поля остаточной намагниченности для *деформированного* [ $H_{r1}$ ] и *деформируемого* металла [ $H_{r2}$ ] стальной трубы значительно отличаются друг от друга.

Например, для конструкционной стали марки 09Г2С пороговые значения напряженности поля остаточной намагниченности (11), соответствующие величине допускаемого механического напряжения металла [ $\sigma$ ] = 170 МПа [2, 7], равны соответственно [ $H_{r1}$ ] = 1.84 мТл и [ $H_{r2}$ ] = 0.48 мТл, то есть отличаются почти в три раза.

На рис.2 показаны графики зависимости напряженности поля остаточной намагниченности от величины нормального и касательного механического напряжения металла стальной трубы, полученные на основе формул (8).

При численных расчетах значения магнитопругих коэффициентов в формулах (8) были приняты равными  $k_1 = 0.0018 \text{ МПа}^{-1}$ ,  $k_2 = 0.019 \text{ МПа}^{-1}$  (эмпирические данные для конструкционной стали марки 09Г2С, для других конструкционных сталей они имеют примерно такой же порядок), при этом величины остаточных механических напряжений металла были допущены равными нулю ( $\sigma_0 = 0$ ,  $\tau_0 = 0$ ).

С увеличением нормального и касательного механического напряжения металла *деформированной* стальной трубы наблюдается монотонное возрастание напряженности поля остаточной намагниченности металла.

Увеличение же нормального и касательного механического напряжения металла *деформируемой* стальной трубы приводит к монотонному снижению напряженности поля остаточной намагниченности металла.

Из рис.2 видно, что зависимости, полученные при одновременном действии в поперечном сечении металла стальной трубы изгибающего и крутящего моментов, отличаются от зави-

симостей, полученных при одноосном растяжении ( $\tau = 0$ ) и при кручении металла ( $\sigma = 0$ ) (они показаны штриховыми линиями): в случае *деформированной* стальной трубы они идут выше, в случае *деформируемой* стальной трубы – ниже кривых, полученных для одноосного напряженного состояния металла.

Аналогичны зависимости напряженности поля остаточной намагниченности металла от величины изгибающего и крутящего моментов в сечении металла стальной трубы, полученных на основе формул (9).

Численные расчеты показали, что увеличение изгибающего и крутящего моментов в сечении металла *деформированной* стальной трубы приводит к монотонному росту напряженности поля остаточной намагниченности металла. Установлено, что более интенсивный рост напряженности поля остаточной намагниченности металла наблюдается для стальной трубы меньшего диаметра.

Увеличение же изгибающего и крутящего моментов в сечении металла *деформируемой* стальной трубы приводит к монотонному снижению напряженности поля остаточной намагниченности металла. Более интенсивное убывание напряженности поля остаточной намагниченности металла наблюдается для стальной трубы с меньшим диаметром.

Следует заметить, что оценка напряженного состояния металла стальной буровой трубы по величине изгибающего и крутящего моментов, одновременно действующих в сечении металла, требует учета линейных размеров стальной трубы, которые могут меняться в определенных пределах. Поэтому это обстоятельство на практике технической диагностики стальных буровых труб будет несколько осложнять процесс оценки напряженного состояния металла по величинам действующих изгибающих и крутящих моментов.

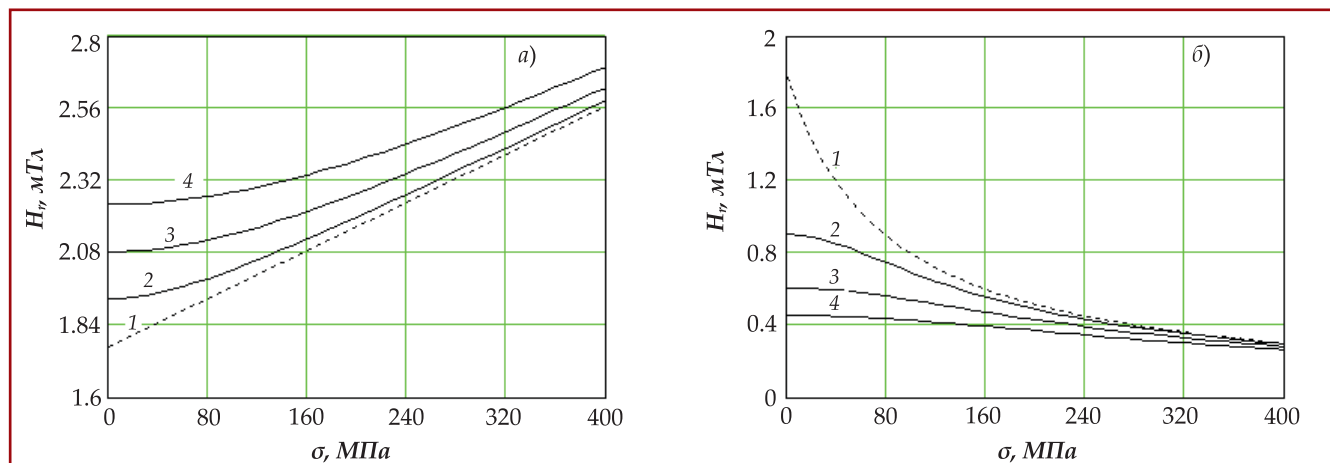


Рис.2. Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности от величины нормального механического напряжения металла  
а) деформированная; б) деформируемая стальная труба  
1 - касательное напряжение  $\tau = 0$  МПа, 2 - 50 МПа, 3 - 100 МПа, 4 - 150 МПа

## Результаты магнитного контроля напряженного состояния металла стальных бурильных труб

Ниже приведены результаты магнитного контроля напряженного состояния металла стальных бурильных труб «type 5-1/2×21.9», изготовленных из стали марки S135, и применяемых для горизонтального направленного бурения скважин.

Магнитный контроль стальных бурильных труб, прошедших предварительную ультразвуковую дефектоскопию, был произведен из-за возникновения многократных случаев внезапного разрушения металла в процессе промышленной эксплуатации.

Для ранней диагностики поврежденности металла стальных бурильных труб был осуществлен магнитный контроль напряженного состояния индикатором механического напряжения металла ИН-02 сканирующего типа (рис.3) [13].

Магнитный контроль напряженного состояния металла стальной бурильной трубы производился посредством сканирования поверхности металла по равномерно отстоящим друг от друга образующим, результаты которого представлялись в программном приложении в виде линейного графика (рис.4).

Следует заметить, что обследованные стальные бурильные трубы находились в ненагруженном состоянии, поэтому результаты магнитного контроля напряженного состояния металла отражают фактическое распределение остаточных механических напряжений в бурильных трубах.

Результаты магнитного контроля показали, что области с повышенным напряженно-деформированным состоянием (НДС) металла стальных бурильных труб располагаются преимущественно около резьбовых соединений (муфты и ниппеля), которые изготовлены посредством сварки металла.

Для оценки степени опасности напряженного состояния металла стальных бурильных труб, для них предварительно было рассчитано пороговое значение напряженности поля остаточной намагниченности металла ( $H_{1a}$ ), связанное с величиной допускаемого механического напряжения металла для стали марки S135 [ $\sigma$ ] = 380 МПа, которое было равно [ $H_{r1}$ ] = 9.06 мТл (значение напряженности поля остаточной намагниченности для ненапряженного металла  $H_{r0}$  = 8.3 мТл).

На рис.4 показано распределение напряженного состояния металла на поверхности стальной бурильной трубы, содержащей область с повышенным НДС металла, расположенной около муфты (на рис.4 указано стрелкой).

В области с повышенным НДС металла стальной бурильной трубы величина напряженности поля остаточной намагниченности превышает пороговое значение [ $H_{r1}$ ] - для металла данной стальной бурильной трубы (рис.4) не выполняется условие прочности (11а).

В результате магнитного контроля напря-

женного состояния металла более 100 стальных бурильных труб для горизонтального направленного бурения было установлено следующее:

- несмотря на интенсивную эксплуатацию стальных бурильных труб, области с повышенным НДС металла располагаются преимущественно в локальных областях (около муфты, ниппеля и реже - на теле стальной трубы);

- в ненапряженных областях металла стальных бурильных труб, как правило, величина остаточных механических напряжений не превышает величину допускаемого механического напряжения металла.

Таким образом, результаты магнитного контроля напряженного состояния металла стальных бурильных труб показали, что на остаточный ресурс бурильных труб оказывают влияние сравнительно небольшие локальные области с повышенным НДС металла, в то время как остальные области металла стальной бурильной трубы находятся в допустимом напряженном состоянии.

Полученные результаты магнитного контроля позволили не только отбраковать стальные



Рис.3. Магнитный контроль напряженного состояния бурильных труб индикатором механического напряжения металла ИН-02 сканирующего типа

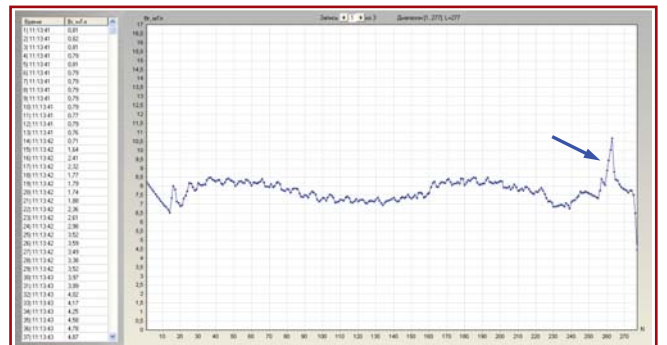
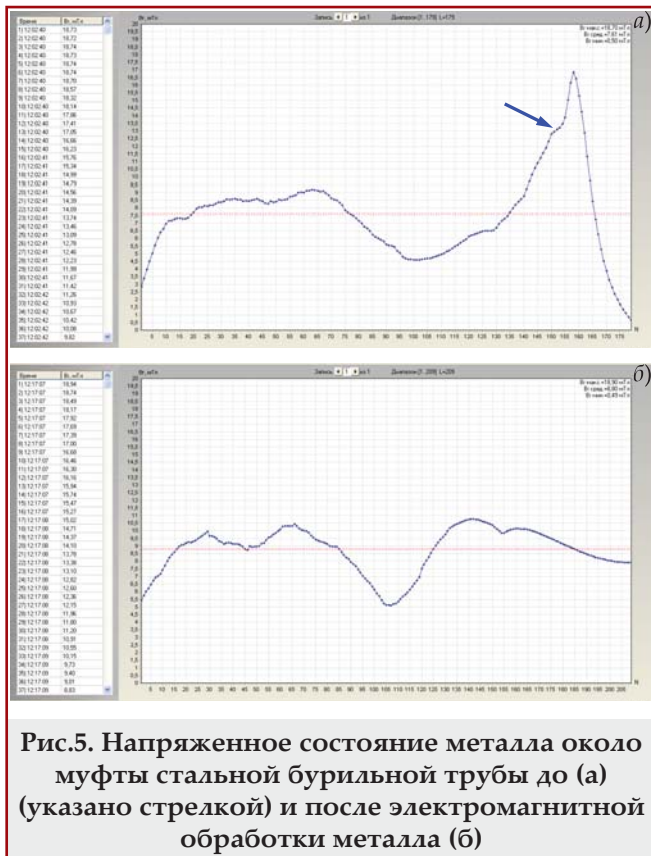


Рис.4. Распределение напряженного состояния металла на поверхности стальной бурильной трубы



**Рис.5. Напряженное состояние металла около муфты стальной буровой трубы до (а) (указано стрелкой) и после электромагнитной обработки металла (б)**

буровые трубы с опасным напряженным состоянием металла, но и использовать их в дальнейшем для реализации возможности эффективного безремонтного восстановления ресурса стальных буровых труб за счет снижения остаточных механических напряжений в выявленных областях с повышенным НДС металла.

Для восстановления ресурса металла стальных изделий и элементов металлоконструкций, в частности – стальных буровых труб, в настоящее время применяются различные технологии упрочнения поверхности и снижения остаточных механических напряжений металла [8, 14-16].

В большинстве существующих методов снижения остаточных механических напряжений оборудования не учитывается фактическое напряженное состояние металла, месторасположение областей с опасными механическими напряжениями.

В связи с этим на практике обработке металла подвергается вся стальная труба, имеющая значительную протяженность и массу, несмотря на то, что остаточный ресурс стальной буровой трубы снижает весьма незначительная область металла (рис.4, 5).

Другим негативным фактором в большинстве существующих технологий снижения остаточных механических напряжений металла является отсутствие контроля фактического уровня остаточных напряжений металла до и после всех проведенных операций, что существенно снижает надежность результатов и эффективность этих технологий.

Для эффективного снижения остаточных

механических напряжений в областях с повышенным НДС металла стальных буровых труб было применено устройство электромагнитной обработки металла, в котором снижение величины остаточных механических напряжений осуществляется за счет воздействия на локальную область металла комбинированного электромагнитного поля определенной пространственной конфигурации [17]. Величина остаточных механических напряжений стальных буровых труб, до и после электромагнитной обработки металла, контролируется с помощью индикаторов механического напряжения металла ИН-01м и ИН-02 сканирующего типа [13].

На рис.5 показаны распределения напряженного состояния металла на поверхности стальных буровых труб по результатам магнитного контроля напряженного состояния металла, представленные в программном приложении в виде линейных графиков.

Около ниппеда стальной буровой трубы, показанной на рис.5а (область отмечена маркером), была выявлена область с повышенным напряженным состоянием металла с локальным максимумом, равным  $H_{rm} = 16.9$  мТл, что существенно (более чем на 80 %) превышает пороговое значение напряженности поля остаточной намагниченности металла:  $H_{rm} > [H_{r1}] = 9.06$  мТл.

В области середины тела другой стальной буровой трубы была выявлена область с повышенным напряженным состоянием металла с локальным максимумом, равным  $H_{rm} = 12.1$  мТл, что также существенно (на 34%) превышает пороговое значение напряженности поля остаточной намагниченности металла  $[H_{r1}]$ .

Результаты магнитного контроля напряженного состояния металла позволили заключить, что указанные области стальных буровых труб с повышенным НДС металла находятся в опасном состоянии.

С целью снижения остаточных механических напряжений в выявленных областях с повышенным НДС металла стальных буровых труб была осуществлена электромагнитная обработка металла и последующий магнитный контроль напряженного состояния металла буровых труб.

На рис.5б показано распределение напряженного состояния металла на поверхности стальной буровой трубы, полученное после электромагнитной обработки их локальных областей с повышенным НДС металла.

Результаты электромагнитной обработки металла стальных буровых труб показали, что:

- после электромагнитной обработки распределение остаточного механического напряжения металла стальных буровых труб имеет более равномерный характер, при этом имеющиеся локальные максимумы в областях с повышенным напряженным состоянием металла исчезают;
- при перераспределении остаточных механических напряжений металла стальных буровых

ных труб наблюдается незначительное повышение их среднего уровня вдоль поверхности стальной трубы (на 11 %...16 %).

Результаты проведенного магнитного контроля напряженного состояния металла индикато-

рами механического напряжения свидетельствуют о надежном снижении величины и выравнивании остаточных механических напряжений при электромагнитной обработке металла стальных бурильных труб.

## Выводы

1. Получены аналитические выражения для зависимости напряженности поля остаточной намагниченности от величины механических напряжений при сложном сопротивлении металла (одновременном действии в поперечном сечении металла изгибающего и крутящего моментов).

2. Показано, что при магнитном контроле напряженного состояния металла для напряженности поля остаточной намагниченности можно ввести пороговое значение, связанное с величиной допускаемого механического напряжения металла.

3. Результаты магнитного контроля напряженного состояния металла показали, что при электромагнитной обработке областей стальных бурильных труб с напряженным состоянием металла происходит снижение величины и более равномерное распределение остаточных механических напряжений.

4. Установлено, что из-за перераспределения остаточных механических напряжений металла стальной бурильной трубы наблюдается незначительное повышение его среднего уровня.

## Литература

1. А.В.Дарков, Г.С. Шпиро. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1989.
2. Р.Х.Гафаров, Р.Г.Шарафиев, Р.Г.Ризванов. Краткий справочник инженера-механика. Основные формулы и справочные данные по расчетам на прочность. Уфа: УГНТУ, 1995.
3. А.П.Корчагин, В.В.Климов, Н.В.Баринаова, А.О.Мурашов. Повреждения бурильных труб в процессе эксплуатации //Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – №6. – С. 20-23.
4. И.Р.Кузеев, Е.А.Наумкин, Р.Р.Кудашев и др. Изменения механических характеристик материала гибких насосно-компрессорных труб в условиях циклического нагружения //SOCAR Proceedings. – 2015. – №2. – С.47-53.
5. Р.Н.Бахтизин, Ф.М.Мустафин, Л.И.Быков и др. Сооружение и эксплуатация трубопроводов. Инновации и приоритеты //SOCAR Proceedings. – 2016. – №3. – С.52-58.
6. Р.Н.Бахтизин, З.Х.Павлова. Оценка напряженно-деформированного состояния труб магистрального нефтепровода в условиях изменения режима перекачки включением (отключением) магистральных насосов //SOCAR Proceedings. – 2015. – №1. – С.35-39.
7. Конструкционные материалы: Справочник /под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990.
8. А.Р.Яхин, Р.А.Исмаков, Р.Р.Гарифуллин, Ф.Н.Янгиров. Упрочнение поверхностей для повышения ресурса работы бурильных труб //Электронный журнал «Нефтегазовое дело». –2014. – №4. – С.381-399.

## References

1. A.V.Darkov, G.S.Shpiro. Strength of materials. M: Higher school, 1989.
2. R.Kh.Gafarov, R.G.Sharafiev, R.G.Rizvanov. Concise reference book for mechanical engineer. Basic formulas and reference data for strength calculations. Ufa: UGNTU, 1995.
3. A.P.Korchagin, V.V.Klimov, N.V.Barinova, A.O.Murashov. Damage of drill pipes while in service //Equipment and technologies for oil and gas complex. – 2016. – No. 6. – P. 20-23.
4. I.R.Kuzeyev, E.A.Naumkin, R.R.Kudashov, et al. Change of mechanical behavior of elastic tubing material in periodic loading conditions //SOCAR Proceedings. – 2015. – No.2. – P.47-53.
5. R.N.Bakhtizin, F.M.Mustafin, L.I.Bykov, et al. Construction and operation of pipelines. Innovations and priorities //SOCAR Proceedings. – 2016. – No. 3. – P.52-58.
6. R.N.Bakhtizin, Z.H.Pavlova. Assessment of the mode of deformation of pipes of the main oil line in the conditions of change of the mode of pumping by turning on (off) the main pumps //SOCAR Proceedings. – 2015. – No.1. – P.35-39.
7. B.N.Arzamasov, V.A.Brostrem, N.A.Bushe, et al. Structural materials: Reference book. M.: Mashinostroenie Publ., 1990.
8. A.R.Yakhin, R.A.Ismakov, R.R.Garifullin, F.N.Yangirov. Surface hardening for drill pipe life improvement // The electronic scientific journal «Oil and Gas Business». –2014. – No. 4. – P.381-399.

9. В.Р.Мардамшин, Т.А.Бакиев, Р.В.Загидулин, Т.Р.Загидулин. Исследование возможности магнитного контроля напряженного состояния металла и сварных соединений стальных трубопроводов //Тезисы докладов VII отраслевого совещания «Состояние и основные направления развития неразрушающего контроля сварных соединений объектов ПАО «Газпром». Нижний Новгород: ООО «Камелот Паблшинг», 2017. – С.42.

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

11. Р.В.Загидулин, Т.Р.Загидулин, А.Ф.Аminev. Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности от величины механических напряжений в плоскости металла //Нефтегазовое дело. – 2016. – Т.14. – №1. – С.225-233.

12. Р.В.Загидулин, Т.Р.Загидулин, А.Ф.Аminev. Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла от механического напряжения при кручении стального бруса //Вестник Башкирского Университета. – 2017. – Т. 22. – №3. – С.635-639.

13. Т.Р.Загидулин, Р.В.Загидулин. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния металлоконструкций индикатором механического напряжения металла ИН-02 сканирующего типа //Нефтегазовое дело. – 2017. – Т.15. – №4. – С.143-149.

14. Л.М.Лобанов, Н.А.Пашин, В.П.Логонов и др. Влияние электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений стали Ст 3 // Автоматическая сварка. – 2007. – №7. – С.10-12.

15. Б.В.Малыгин. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. М.: Машиностроение, 1989.

16. С.Н.Постников, А.А.Черников. Влияние импульсных полей на усталость быстрорежущей стали //Электронная обработка металлов. – 1981. – № 4. – С. 65 - 68.

17. Р.В.Загидулин, Т.Р.Загидулин. Магнитный контроль и снижение остаточных механических напряжений металла бурильных труб //Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Современные методы и средства диагностики электроэнергетического и электротехнического оборудования, средств и систем автоматики». Республика Башкортостан, г. Салават, 18 ноября 2016 г.

9. V.R.Mardamšin, T.A.Bakiev, R.V.Zagidulin, T.R.Zagidulin. Issledovanie vozmožnosti magnitnogo kontrolâ naprâžennogo sostoâniâ metalla i svarnyh soedinenij stal'nyh truboprovodov //Tezisy dokladov VII otraslevogo sovešaniâ «Sostoânie i osnovnyye napravleniâ razvitiâ nerazrušaûšego kontrolâ svarnyh soedinenij ob"ektov PAO «Gazprom». Nižnij Novgorod: OOO «Kamelot Pablišing», 2017. – С.42.

10. R.V.Zagidulin, T.R.Zagidulin, V.M.Prohorov. Nondestructive testing and evaluation of rigs and units for repairing wells parts residual life //Testing. Diagnostics. – 2012. – No. 5. – P.12-19.

11. R.V.Zagidulin, T.R.Zagidulin, A.F.Aminev. Residual magnetic field strength dependence on mechanical strain value in the plane of metal //Oil and Gas Business. – 2016. – Vol.14. – No.1. – P.225-243

12. R.V.Zagidulin, T.R.Zagidulin, A.F.Aminev. The dependence of strength of the residual magnetic field on the mechanical strain of metal in the steel bar torsion // Bulletin of Bashkir University. – 2017. – Vol. 22. – No. 3. – P.635-639.

13. T.R.Zagidulin, R.V.Zagidulin. Metal structures stressed and strained state magnetic inspection by in-02 the scanning metal strain indicator //Oil and Gas Business. – 2017. – Vol.15. – No. 4. – P.143-149.

14. L.M.Lobanov, N.A.Pashin, V.P.Loginov, et al. Effect of electrodynamic treatment on stressed state of welded joints in steel St3 //Automatic Welding. – 2007. – No.7. – P.10-12.

15. B.V.Malygin. Magnetic hardening of tools and machineparts. M.: Mashinostroenie Publ., 1989.

16. S.N.Postnikov, A.A.Černikov. Vliânie impul'snyh polej na ustalost' bystrežejušej stali //Èlektronnaâ obrabotka metallov. – 1981. – № 4. – S. 65 - 68.

17. R.V.Zagidulin, T.R.Zagidulin. Magnitnyj kontrol' i sniženie ostatočnyh mehaničeskikh naprâženij metalla buril'nyh trub //Materialy Vserossijskoj naučno-tehničeskoi konferencii «Sovremennye metody i sredstva diagnostiki èlektroènergetičeskogo i èlektrotehničeskogo oborudovaniâ, sredstv i sistem avtomatiki». Respublika Baškortostan, g. Salavat, 18 noâbrâ 2016 g.



## Магнитный контроль напряженного состояния при сложном сопротивлении металла и снижении величины остаточных механических напряжений бурильных труб

Т.Р.Загидулин<sup>1</sup>, Р.В.Загидулин<sup>1</sup>, В.Р.Мардамшин<sup>2</sup>, Т.А.Бакиев<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>ООО «НТЦ «Спектр», Уфа, Россия; <sup>2</sup>ООО «Газпром Трансгаз Уфа», Уфа, Россия;

<sup>3</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

### Реферат

Приведены результаты исследований напряженности поля остаточной намагниченности от механических напряжений, возникающих при одновременном действии в поперечном сечении металла изгибающего и крутящего моментов. Показано, что величина напряженности поля остаточной намагниченности, измеренная над поверхностью металла, зависит от величины нормальных и касательных механических напряжений, возникающих при сложном сопротивлении металла. Полученные формулы имеют обобщающий характер, из них следуют формулы расчета для одноосного напряженного состояния при кручении металла. Показано, что для оценки напряженного состояния металла можно ввести пороговое значение напряженности поля остаточной намагниченности, связанное с величиной допускаемого механического напряжения металла. Приведены результаты магнитного контроля напряженного состояния бурильных труб индикатором механического напряжения металла, которые показывают, что области с напряженным состоянием металла располагаются преимущественно около резьбовых соединений. Также приведены результаты снижения остаточных напряжений в областях с напряженным состоянием металла бурильных труб устройством электромагнитной обработки металла.

**Ключевые слова:** напряженное состояние, эффективное напряжение, сложное сопротивление, бурильная труба, остаточные напряжения, индикатор механического напряжения.

## Metalın mürəkkəb müqaviməti və qazma borularının qalıq mexaniki gərginliyin azaldılması zamanı gərginlik vəziyyətinin maqnit kontrolu

T.R.Zagidulin<sup>1</sup>, R.V.Zagidulin<sup>1</sup>, V.R.Mardamşin<sup>2</sup>, T.A.Bakiyev<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>«ETM «Spektr» MMC, Ufa, Rusiya; <sup>2</sup>«Qazprom Transqaz Ufa» MMC, Ufa, Rusiya;

<sup>3</sup>Ufa Dövlət Neft Texniki Universiteti, Ufa, Rusiya

### Xülasə

Məqalədə metalın en kəsiyində əyici və burucu momentlərin birgə təsiri zamanı baş verən mexaniki gərginliklərdən yaranan qalıq maqnitləşmə sahəsinin gərginliyi tədqiqatlarının nəticələri verilmişdir. Göstərilmişdir ki, metal üzərində ölçülmüş qalıq maqnitləşmə sahəsinin gərginlik qiyməti metalın mürəkkəb müqaviməti zamanı yaranan normal və xətti mexaniki gərginliklərin qiymətlərindən asılı olur. Alınmış düsturlar ümumiləşdirici xarakterə malikdirlər və onlardan metalın burulması zamanı yaranan biroxlı gərginlik vəziyyətinin hesablaması üçün düsturlar alınır. Göstərilmişdir ki, metalın gərginlik vəziyyətinin qiymətləndirilməsi üçün metalın yol verilən mexaniki gərginlik qiyməti ilə bağlı olan qalıq maqnitləşmə sahəsinin gərginliyinin hədd qiymətini istifadə etmək olar. Metalın mexaniki gərginlik indikatoru ilə qazıma borularının gərginlik vəziyyətinin maqnit kontrolunun nəticələri verilmişdir. Həmin nəticələr göstərir ki, metalın gərginlik vəziyyətində olan sahələri əsasən yiv birləşmələri ətrafında yerləşir. Həmçinin qazma boruları metalının gərginlik vəziyyətində olan sahələrində metalın elektromaqnit emalı qurğusu ilə qalıq gərginliklərinin azaldılmasının nəticələri verilmişdir.

**Açar sözlər:** gərginlik vəziyyəti, effektiv gərginlik, mürəkkəb müqavimət, qazma borusu, qalıq gərginlik, mexaniki gərginlik indikatoru.