

УДК 620.179.14

## ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБНОЙ СТАЛИ

Э. С. Горкунов, С. М. Задворкин, А. Н. Мушников,  
С. В. Смирнов, Е. И. Якушенко\*

Институт машиноведения УрО РАН, 620049 Екатеринбург

\* Военно-морской политехнический институт, 196604 Санкт-Петербург

E-mails: ges@imach.uran.ru, zadvorkin@imach.uran.ru, mushnikov@imach.uran.ru,  
svs@imach.uran.ru, yakushenko@vmii.edu.ru

Исследовано влияние упругой деформации при растяжении (сжатии), кручении, нагружении внутренним давлением и их комбинировании на магнитные характеристики трубной стали марки 09Г2С. Установлено, что в случаях сжатия, кручения и воздействия внутреннего давления коэрцитивная сила, остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость однозначно зависят от напряжений. Показано, что под действием растягивающих напряжений напряженность прикладываемого магнитного поля, в котором магнитострикция становится отрицательной, уменьшается. Обнаружено, что при комбинировании растяжения (сжатия) с кручением действие касательных напряжений ослабляет влияние нормальных напряжений на магнитные характеристики, в случае комбинирования всех трех видов нагружения увеличение внутреннего давления приводит к росту коэрцитивной силы, уменьшению остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости. По результатам измерений построена зависимость интенсивности напряжений от коэрцитивной силы при различных значениях параметра Лодэ, определяющего вид напряженного состояния объекта.

**Ключевые слова:** растяжение, сжатие, кручение, внутреннее давление, коэрцитивная сила, остаточная индукция, максимальная магнитная проницаемость.

**Введение.** Разработка магнитных методов оценки напряжений в элементах стальных конструкций является одной из актуальных задач неразрушающего контроля. Изучению влияния упругих и пластических деформаций на магнитные свойства сталей посвящено большое количество работ, но лишь в некоторых из них приводятся результаты измерений магнитных характеристик материала непосредственно в процессе деформирования. В этих работах рассматриваются в основном такие способы нагружения, как одноосное растяжение или сжатие, реже — кручение. Коэрцитивная сила часто рассматривается в качестве параметра, позволяющего оценивать приложенные механические напряжения [1–4]. Достаточно хорошо изучен механизм влияния напряжений на гистерезисные свойства [2]. В [4] предложены аналитические зависимости, описывающие изменение коэрцитивной силы, измеряемой вдоль и поперек направления приложения растягивающей нагрузки, и выполнена проверка полученных соотношений при испытаниях образцов из малоуглеродистых сталей.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00732) и в рамках Интеграционного проекта УрО РАН № 12-С-1-1030.

© Горкунов Э. С., Задворкин С. М., Мушников А. Н., Смирнов С. В., Якушенко Е. И., 2014

В реальных условиях встречаются комбинации одноосного растяжения или сжатия с другими видами напряженного состояния. Например, в трубопроводах помимо напряжений, вызванных воздействием внутреннего давления, имеют место напряжения, возникающие вследствие внешнего воздействия (температурных деформаций, деформаций грунта и т. д.). Механические напряжения в элементах конструкций кораблей обусловлены не только весом самого судна и груза, но и такими внешними воздействиями, как волны, перепады температуры. Таким образом, изучение воздействий комбинированных нагрузок на магнитные характеристики ферромагнитных материалов является актуальной задачей.

В работе [5], одной из первых экспериментальных работ, посвященных исследованию магнитных характеристик в условиях двухосного растяжения (сжатия), для образца из стали с объемной долей углерода 0,13 % рассмотрены зависимости максимальной магнитной индукции, остаточной индукции и коэрцитивной силы от механических напряжений. Следует отметить, что в [5] при двухосном нагружении нагрузка, прикладываемая к образцу, была одной и той же в обоих направлениях. В работе [6], являющейся продолжением [5], разработан микромагнитный подход к моделированию влияния двухосного напряженного состояния на магнитоупругие процессы в поликристаллических сталях. Другие примеры моделирования процессов намагничивания и перемагничивания в условиях сложного нагружения приведены в [7, 8]. Для проверки разработанной теории используются данные экспериментов, выполненных при таких видах нагружения, как растяжение вдоль направления намагничивания и перпендикулярно ему, кручение.

В [9] исследованы закономерности изменения коэрцитивной силы при двухосном симметричном растяжении материала на крестообразных образцах из ферромагнитных сталей марок Ст.3 и 09Г2С. Показано, что при пластической деформации в условиях симметричного двухосного растяжения коэрцитивная сила этих материалов увеличивается и пропорциональна приложенным напряжениям.

В настоящей работе при изучении влияния сложного напряженного состояния на магнитные характеристики использовалась схема нагружения, моделирующая работу реальных конструкций, в частности трубопроводов. На примере полых цилиндрических образцов исследуется влияние упругого деформирования при одноосном растяжении (сжатии) и кручении, а также при наличии давления в полости образца на магнитные характеристики (коэрцитивную силу, остаточную индукцию, максимальную магнитную проницаемость) трубной стали марки 09Г2С.

**1. Используемые материалы и методика исследования.** Для проведения исследований из трубной стали марки 09Г2С промышленной выплавки были изготовлены полые цилиндрические образцы. Внешний радиус рабочей части образца равен  $R_{out} = 5,5$  мм, ее внутренний радиус  $R_{in} = 4,5$  мм, длина рабочей части равна 60 мм. Испытания проводились на установке, с помощью которой можно одновременно осуществлять одноосное растяжение (сжатие) и кручение, создавать гидростатическое давление во внутренней полости образца, а также проводить измерения магнитных характеристик. При испытаниях на кручение полые образцы имели меньшую неоднородность сдвиговых деформаций в сечении по сравнению со сплошными цилиндрами.

Сначала на испытательной машине Instron были определены механические характеристики стали марки 09Г2С. Получены следующие значения: условный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 425$  МПа, временное сопротивление  $\sigma_b = 480$  МПа. При исследовании влияния упругих деформаций на магнитные характеристики нагрузки ограничивались таким образом, чтобы ни одно из главных напряжений не превышало предел текучести  $\sigma_{0,2}$ . Поэтому при комбинированном нагружении нормальные и касательные напряжения не превышали по модулю 250 МПа. Давление во внутренней полости образца достигало 30 МПа, что в несколько раз больше максимально допустимого давления в эксплуатируемых магистральных трубопроводах [10].

При упругом деформировании магнитные измерения проводились в замкнутой магнитной цепи. Остаточная индукция  $B_r$  определялась на предельной петле магнитного гистерезиса с напряженностью магнитного поля до 600 А/см. Максимальная магнитная проницаемость  $\mu_{\max}$  получена с использованием кривой намагничивания. Коэрцитивная сила  $H_c$  определялась по предельной петле магнитного гистерезиса и по частным циклам при намагничивании до значений магнитной индукции, равных 0,4 и 0,05 Тл. Измерения продольной магнитострикции в зависимости от напряженности магнитного поля в условиях растяжения проводились с помощью тензорезисторов в диапазоне  $0 < H < 300$  А/см.

Расчеты напряжений выполнялись в предположении об изотропности исследуемого материала. Нормальные напряжения  $\sigma$ , вызванные растяжением (сжатием) вдоль оси образца, вычислялись по формуле

$$\sigma = \frac{F}{\pi(R_{out}^2 - R_{in}^2)}, \quad (1)$$

где  $F$  — нагрузка, приложенная к образцу. Изменение сечения образца при упругом деформировании не учитывалось.

Напряжения  $\tau_r$ , вызванные кручением, на расстоянии  $r$  от оси цилиндра определялись по формуле

$$\tau_r = \frac{Tr}{(\pi/2)(R_{out}^4 - R_{in}^4)},$$

где  $T$  — текущее значение крутящего момента;  $r \in [R_{in}, R_{out}]$ .

Так как магнитные характеристики измеряются во всем объеме материала, будем использовать осредненные по объему значения касательных напряжений:

$$\tau = \frac{1}{R_{out} - R_{in}} \int_{r=R_{in}}^{R_{out}} \frac{Tr}{(\pi/2)(R_{out}^4 - R_{in}^4)} dr.$$

В результате интегрирования получаем

$$\tau = \frac{R_{out} + R_{in}}{\pi(R_{out}^4 - R_{in}^4)} T. \quad (2)$$

Механические напряжения, возникающие под действием гидростатического давления, определяются из решения классической задачи Ламе о толстостенной трубе. Вследствие симметрии приложенных нагрузок напряжения и деформации будут также симметричны относительно оси симметрии цилиндра. Под действием внутреннего давления возникают растягивающие окружные напряжения  $\sigma_\theta$  и сжимающие радиальные напряжения  $\sigma_r$ , величины которых как функции радиуса  $r$  определяются формулами

$$\sigma_r = \frac{R_{in}^2}{R_{out}^2 - R_{in}^2} \left(1 - \frac{R_{out}^2}{r^2}\right) p, \quad \sigma_\theta = \frac{R_{in}^2}{R_{out}^2 - R_{in}^2} \left(1 + \frac{R_{out}^2}{r^2}\right) p. \quad (3)$$

Здесь  $p$  — гидростатическое давление.

Так как концы образца жестко заземлены, то в результате действия кручения или гидростатического давления в нем будут возникать продольные усилия. Однако устройство испытательной установки позволяет компенсировать эти усилия.

При комбинировании растяжения (сжатия), кручения и внутреннего гидростатического давления тензор напряжений в цилиндрической системе координат имеет вид

$$A = \begin{pmatrix} \sigma_r & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta & \tau \\ 0 & \tau & \sigma_z \end{pmatrix}.$$

Для нахождения главных напряжений  $\sigma_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) решается система уравнений

$$|A - E\sigma| = 0,$$

где  $E$  — единичная матрица. Решением этой системы являются три главных напряжения  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ :

$$\sigma_k(r) = \sigma_r, \quad \sigma_k(r) = (\sigma_\theta + \sigma_z \pm \sqrt{(\sigma_\theta + \sigma_z)^2 + 4(\tau^2 - \sigma_\theta\sigma_z)})/2, \quad k = 1, 2, 3.$$

Осредненные по объему главные напряжения равны

$$\sigma_k = \frac{1}{R_{out} - R_{in}} \int_{r=R_{in}}^{R_{out}} \sigma_r dr, \quad (4)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{R_{out} - R_{in}} \int_{r=R_{in}}^{R_{out}} \frac{\sigma_\theta + \sigma_z \pm \sqrt{(\sigma_\theta + \sigma_z)^2 + 4(\tau^2 - \sigma_\theta\sigma_z)}}{2} dr.$$

Подставляя найденные главные напряжения в систему уравнений

$$(A - E\sigma_k)\mathbf{n} = 0, \quad n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 = 0, \quad (5)$$

получаем направляющие косинусы главных напряжений. Одно из главных напряжений  $\sigma_k(r) = \sigma_r$  направлено по радиусу, а два других лежат в плоскости, перпендикулярной вектору  $\mathbf{r}$ .

**2. Влияние напряжений на результирующую намагниченность ферромагнетиков.** В ненагруженном размагниченном состоянии векторы магнитных моментов доменов ориентированы хаотично и их сумма (результирующая намагниченность  $M$ ) равна нулю. В случае отсутствия нагрузки под действием прикладываемого магнитного поля с напряженностью  $H$  векторы магнитных моментов доменов ориентируются вдоль направления этого векторного поля, при этом результирующая намагниченность принимает некоторое ненулевое значение  $M$ .

Согласно [11] в материалах с положительной магнитоупругостью  $\lambda$  при воздействии растягивающих напряжений ( $\lambda\sigma > 0$ ) формируется магнитная текстура с ориентацией магнитных моментов доменов преимущественно вдоль направления приложения нагрузки. Поэтому для достижения некоторой требуемой величины намагничивания в растянутом образце достаточно создать магнитное поле меньшей напряженности по сравнению с ненагруженным образцом. Таким образом, при намагничивании в поле с напряженностью  $H$  (недостаточном для насыщения) после приложения растягивающей нагрузки результирующая намагниченность будет на величину  $\Delta M_{\sigma+}^{\parallel}$  больше, чем в случае намагничивания в том же поле ненагруженного образца.

При действии соосных с магнитным полем сжимающих напряжений ( $\lambda\sigma < 0$ ) формируется магнитная текстура типа плоскости, в которой намагничивание происходит более интенсивно, при этом большая часть векторов магнитных моментов доменов  $\delta M$  ориентируются в плоскости, перпендикулярной направлению приложения нагрузки. Поэтому при намагничивании полем с напряженностью  $H$  после приложения нагрузки результирующая намагниченность будет на величину  $\Delta M_{\sigma-}^{\parallel}$  меньше, чем при намагничивании в том же поле ненагруженного образца.

Следует отметить, что для одинаковых по модулю растягивающих и сжимающих напряжений  $\sigma$  изменения результирующей намагниченности могут различаться. Ниже показано, что для исследуемой марки стали  $|\Delta M_{\sigma-}^{\parallel}| > |\Delta M_{\sigma+}^{\parallel}|$ , т. е. в случае сжатия магнитоупругая чувствительность (отношение изменения магнитной проницаемости к деформации) больше, чем в случае растяжения.

Если направление действия растягивающей нагрузки перпендикулярно направлению намагничивания, то за счет распределения направлений векторов доменов  $\delta M$  преимущественно вдоль направления растяжения результирующая намагниченность уменьшится на величину  $\Delta M_{\sigma_+}^{\perp}$ .

Под действием внутреннего гидростатического давления возникают растягивающие окружные напряжения  $\sigma_{\theta}$  и сжимающие радиальные напряжения  $\sigma_r$ , причем согласно (3)  $\sigma_{\theta} \gg \sigma_r$ . Окружные и радиальные напряжения действуют в направлении, перпендикулярном направлению намагничивания. Под действием сжимающих напряжений  $\sigma_r$  векторы магнитных моментов доменов располагаются преимущественно в плоскости, касательной к цилиндру, а под действием растягивающих напряжений  $\sigma_{\theta}$  — вдоль линии действия этих напряжений. Так как наибольшими (по модулю) являются растягивающие окружные напряжения, то под действием внутреннего давления возникает описанная выше ситуация. Результирующая намагниченность уменьшается на величину  $\Delta M_{\sigma_+}^{\perp}$  ( $\sigma_+ = \sigma_{\theta} + \sigma_r$ ). С учетом (3) получаем  $\sigma_+ = (2R_{in}^2 / (R_{out}^2 - R_{in}^2))p > 0$ .

При кручении касательные напряжения  $\tau$ , рассчитанные по формуле (2), в каждой точке эквивалентны паре нормальных взаимно перпендикулярных растягивающих и сжимающих напряжений, равных по модулю  $\tau$  и действующих в касательной к цилиндру плоскости под углом  $45^\circ$  к оси образца. Поэтому под действием касательных напряжений векторы магнитных моментов доменов  $\delta M$  располагаются преимущественно под углом  $45^\circ$  к оси образца (вдоль направления растягивающих напряжений), а после намагничивания в магнитном поле с напряженностью  $H$  вектор результирующей намагниченности располагается под некоторым углом  $\alpha$  к направлению приложенного магнитного поля [7]. Угол  $\alpha$  находится в интервале от 0 до  $45^\circ$  в зависимости от величины касательных напряжений и прикладываемого магнитного поля. По-видимому, в этом случае проекция вектора результирующей намагниченности на ось  $z$   $M_z$  будет меньше величины результирующей намагниченности в ненагруженном состоянии на некоторую величину  $\Delta M_{\tau}$ , причем чем больше касательные напряжения и, следовательно, угол  $\alpha$ , тем меньше величина  $M_z$ .

В случае комбинирования всех трех видов нагружения величины главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  рассчитываются по формулам (4), а их направления определяются системой уравнений (5). В зависимости от величин приложенных напряжений и телесного угла  $\beta$  отклонения вектора результирующей намагниченности от оси  $z$  величина изменения проекции вектора результирующей намагниченности  $\Delta M$  может быть как отрицательной (если преобладают сжимающие напряжения, либо угол  $\beta$  достаточно большой, либо магнитострикция отрицательна), так и положительной (если преобладают осевые растягивающие напряжения при  $\lambda > 0$ ).

**3. Результаты исследования и их обсуждение.** На рис. 1 представлены экспериментально полученные зависимости магнитных характеристик от параметров нагружения для простых видов нагружения (одноосное сжатие и растяжение, кручение, гидростатическое давление).

С увеличением (по модулю) сжимающих напряжений наблюдаются монотонный рост коэрцитивной силы, уменьшение остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости (см. рис. 1, а). При увеличении сжимающих напряжений до значения  $\sigma = 250$  МПа эти характеристики изменяются на  $50 \div 60$  %, что согласуется с приведенными выше теоретическими представлениями: у материала с положительной магнитострикцией результирующая намагниченность в случае сжатия образца в некотором магнитном поле меньше, чем в ненагруженном образце в том же поле.

С увеличением растягивающих напряжений до значения  $\sigma = 150$  МПа коэрцитивная сила уменьшается, а остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость возрастают. На рис. 1, а видно, что в случае растяжения ( $\sigma > 0$ ) зависимости магнитных

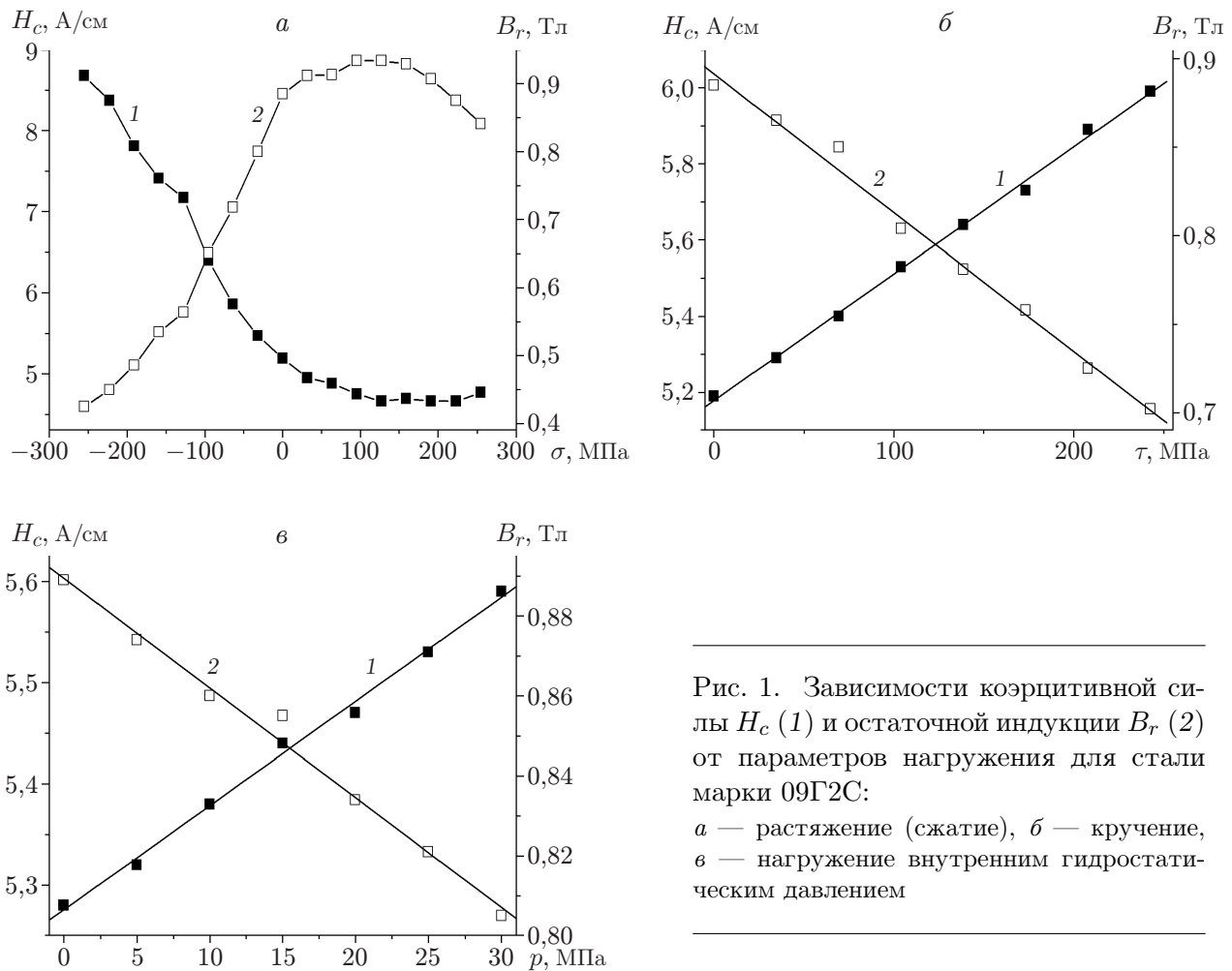


Рис. 1. Зависимости коэрцитивной силы  $H_c$  (1) и остаточной индукции  $B_r$  (2) от параметров нагружения для стали марки 09Г2С:  
 а — растяжение (сжатие), б — кручение,  
 в — нагружение внутренним гидростатическим давлением

характеристик от параметров нагружения являются немонотонными: при растягивающих напряжениях  $\sigma > 150$  МПа коэрцитивная сила возрастает, а остаточная индукция уменьшается. Это обусловлено тем, что в случае действия растягивающих напряжений зависимость продольной магнитострикции от напряженности магнитного поля переходит в отрицательную область при меньших значениях напряженности. На рис. 2 показана зависимость продольной магнитострикции от напряженности магнитного поля при действии растягивающих напряжений. С увеличением напряженности поля продольная магнитострикция сначала принимает положительные значения, а затем становится отрицательной. Из рис. 2 следует, что при растягивающих напряжениях в образце  $\sigma = 150$  МПа напряженность магнитного поля  $H$ , при которой значение  $\lambda$  становится отрицательным, уменьшается в 7 раз по сравнению с ненагруженным образцом, а при напряжениях  $\sigma = 300$  МПа значение  $H$  уменьшается в 12 раз. Вследствие изменения знака магнитострикции влияние параметров нагружения на все магнитные характеристики меняется на противоположное. Кроме того, при увеличении нормальных напряжений до значения  $\sigma = 150$  МПа коэрцитивная сила уменьшается лишь на 11 %, остаточная индукция возрастает на 6 %, максимальная магнитная проницаемость увеличивается на 20 %. Таким образом, подтверждается приведенное выше утверждение  $|\Delta M_{\sigma-}^{\parallel}| > |\Delta M_{\sigma+}^{\parallel}|$ , т. е. в случае сжатия магнитоупругая чувствительность стали марки 09Г2С больше, чем в случае растяжения.

Увеличение касательных напряжений (см. рис. 1, б) приводит к линейному росту (при линейной аппроксимации коэффициент детерминации превышает 0,99) коэрцитивной си-

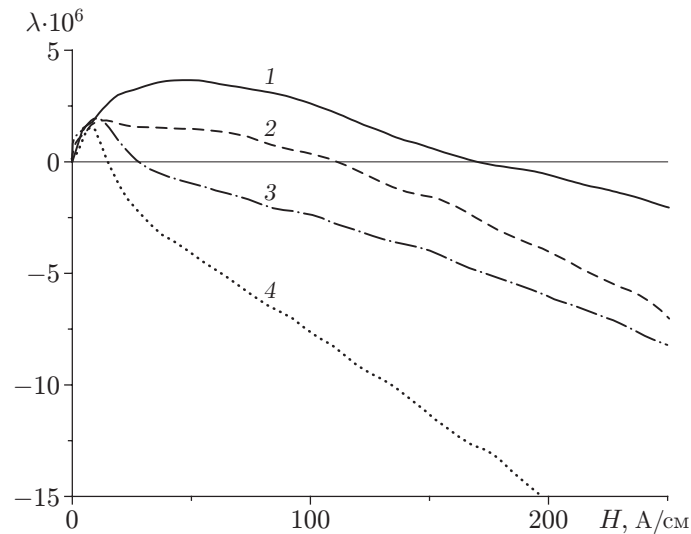


Рис. 2. Зависимость продольной магнитострикции от напряженности магнитного поля для стали марки 09Г2С:

1 — при отсутствии нагрузки, 2–4 — при растяжении (2 —  $\sigma = 50$  МПа, 3 —  $\sigma = 150$  МПа, 4 —  $\sigma = 300$  МПа)

лы и уменьшению остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости. Такое поведение характеристик при положительной магнитострикции исследуемого материала соответствует приведенным в п. 2 теоретическим представлениям: при увеличении касательных напряжений проекция вектора намагниченности на ось образца уменьшается, процессы намагничивания затруднены. При увеличении касательных напряжений до значения  $\sigma = 250$  МПа изменение магнитных характеристик составляет приблизительно 15 %. Данный факт позволяет использовать любую из рассмотренных характеристик для контроля упругих напряжений при кручении.

Так как с увеличением внутреннего давления векторы магнитных моментов доменов располагаются преимущественно в плоскости, перпендикулярной оси образца, то коэрцитивная сила, измеряемая вдоль этой оси, увеличивается, а остаточная индукция уменьшается. При увеличении внутреннего давления до значения  $p = 30$  МПа изменения характеристик составляют приблизительно 5 %. Влияние окружных напряжений на коэрцитивную силу существенно меньше влияния напряжений при одноосном сжатии.

Во всех рассмотренных случаях зависимости коэрцитивной силы, измеренной в средних и слабых полях, от параметров нагружения аналогичны соответствующим зависимостям, полученным по предельной петле гистерезиса. В работе [12] при исследовании конструкционных хромоникелевых сталей установлено, что зависимости коэрцитивной силы, измеренной по предельной петле и по частным циклам в слабых магнитных полях, от параметров нагружения имеют различный характер. Это объясняется тем, что взаимодействие доменных границ с дефектами при перемагничивании в сильных и слабых полях качественно различается: в сильных полях происходит отрыв доменных границ от мест локального закрепления и их необратимое смещение, а при перемагничивании в слабых полях преобладают процессы упругих смещений доменных границ, закрепленных на различного рода дефектах. В случае стали марки 09Г2С подобный эффект не наблюдается. Возможно, это вызвано тем, что для стали марки 09Г2С область Рэлея существенно меньше, чем для хромоникелевых сталей, рассмотренных в [12]. Поэтому ниже проводится исследование только коэрцитивной силы, измеренной по предельной петле магнитного гистерезиса.

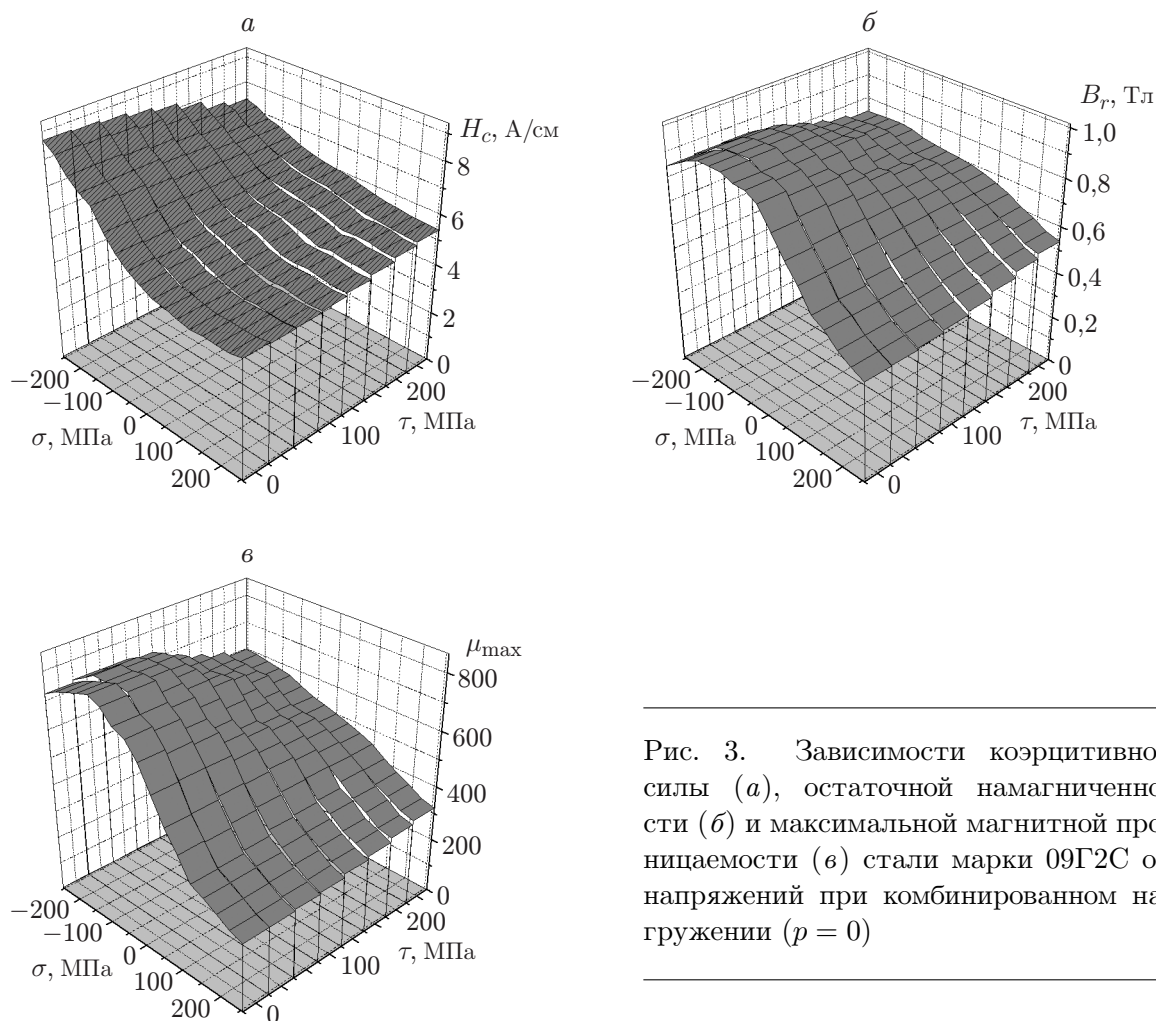


Рис. 3. Зависимости коэрцитивной силы (а), остаточной намагниченности (б) и максимальной магнитной проницаемости (в) стали марки 09Г2С от напряжений при комбинированном нагружении ( $p = 0$ )

Изменение коэрцитивной силы, остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости при комбинированном нагружении показано на рис. 3. Действие касательных напряжений ослабляет влияние нормальных напряжений на все рассмотренные магнитные характеристики. Это вызвано тем, что при растяжении векторы магнитных моментов доменов располагаются преимущественно вдоль оси образца, а при сжатии — в плоскости, перпендикулярной оси, однако под действием касательных напряжений вектор намагниченности располагается под некоторым углом  $\alpha$  к направлению приложенного магнитного поля. Значение угла  $\alpha$  находится в интервале от 0 до  $45^\circ$  в зависимости от величины касательных напряжений. В результате в случае комбинирования растяжения и кручения намагниченность будет направлена под некоторым углом  $\beta$ , значение которого находится в интервале от 0 до  $\alpha$ , а в случае комбинирования сжатия и кручения — под углом, бóльшим  $\alpha$ . Чем больше телесный угол  $\beta$ , тем меньше проекция вектора результирующей намагниченности на ось  $z$ . При комбинированном действии нормальных и касательных напряжений изменение максимальной магнитной проницаемости (см. рис. 3,в) качественно подобно изменению остаточной индукции (см. рис. 3,б), но максимальная магнитная проницаемость измеряется с большей относительной погрешностью. Поэтому для оценки напряжений более предпочтительно использовать коэрцитивную силу и остаточную намагниченность.



При комбинировании всех трех видов нагружения увеличение внутреннего давления приводит к росту коэрцитивной силы и уменьшению остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости. При этом характер зависимостей магнитных характеристик от напряжений  $\sigma$ ,  $\tau$  не меняется. Данный факт можно объяснить следующим образом: так как напряжения, вызванные наличием внутреннего давления, располагаются в плоскости, перпендикулярной направлению намагничивания, то возникают условия для расположения векторов спонтанной намагниченности преимущественно в этой плоскости, т. е. для возникновения магнитной текстуры типа плоскости, в которой намагничивание происходит более интенсивно. Таким образом, при комбинированном нагружении с увеличением внутреннего давления направление вектора результирующей намагниченности не меняется, но величина результирующей намагниченности уменьшается.

Поскольку напряженное состояние объекта характеризуется тензором, а измеряемые магнитные величины являются скалярными, были предприняты попытки установить связь магнитных характеристик с некоторыми скалярными параметрами, характеризующими напряженное состояние. Интенсивность напряжений рассчитывается по формуле

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1},$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — осредненные по объему главные напряжения, рассчитанные по формуле (4). В механике деформируемого твердого тела в качестве характеристики вида напряженного состояния обычно используется параметр Лодэ:

$$k_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}.$$

На рис. 4 представлена зависимость интенсивности напряжений от коэрцитивной силы при различных видах нагружения. Из рис. 4 следует, что множество точек, полученных при комбинированном нагружении, находится в области, ограниченной снизу линиями  $\sigma_i(H_c)$  при  $k_\sigma = -1$  (растяжение) и  $k_\sigma = 1$  (сжатие). Линия, соответствующая чистому сдвигу, при котором  $k_\sigma = 0$ , разделяет область на две части. Если  $H_c < H_c|_{k_\sigma=0}$ ,

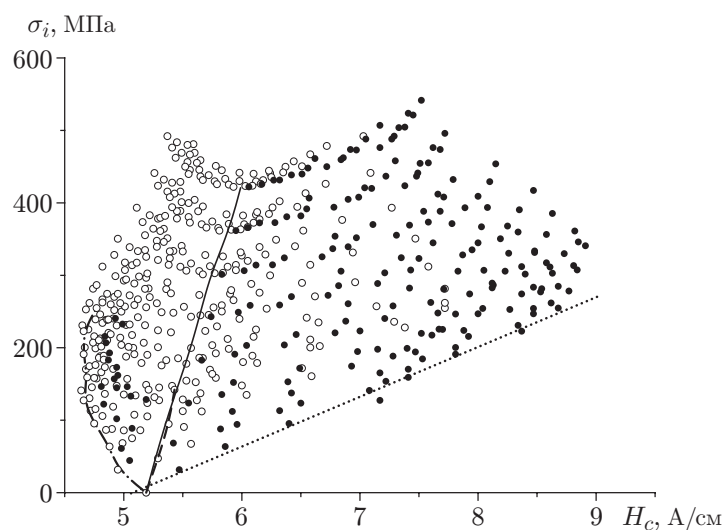


Рис. 4. Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) зависимости интенсивности напряжений от коэрцитивной силы при различных значениях параметра Лодэ: пунктирная линия —  $k_\sigma = 1$  (сжатие), сплошная —  $k_\sigma = 0$  (кручение), штриховая —  $k_\sigma = -0,82$  (нагружение внутренним давлением), штрихпунктирная линия —  $k_\sigma = -1$  (растяжение); темные точки —  $k_\sigma > 0$ , светлые —  $k_\sigma < 0$

то  $k_\sigma < 0$ . Исключения составляют случаи, когда внутреннее давление оказывает большее влияние, чем растягивающая и крутящая нагрузки. Аналогично можно утверждать, что при  $H_c > H_c|_{k_\sigma=0}$  имеет место напряженное состояние с положительным параметром Лодэ. Исключениями также являются случаи, когда внутреннее давление создает напряжения, превышающие сумму нормальных и касательных напряжений от двух других нагрузок. Несмотря на то что в случае нагружения внутренним давлением без других нагрузок  $k_\sigma = -0,82$ , зависимость интенсивности напряжений от коэрцитивной силы соответствует случаю чистого сдвига, а не случаю одноосного нагружения, как можно было бы предположить.

**Заключение.** Немонотонность зависимостей магнитных характеристик стали марки 09Г2С от растягивающих напряжений обусловлена изменением магнитной текстуры за счет изменения положительного знака магнитострикции на отрицательный в магнитном поле, напряженность которого приближенно равна коэрцитивной силе. В остальных случаях простого нагружения (сжатие, кручение, внутреннее давление) наблюдается монотонное изменение коэрцитивной силы, остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости, что позволяет использовать любую из рассмотренных характеристик для оценки напряженного состояния.

При комбинировании растяжения (сжатия) с кручением действие касательных напряжений ослабляет влияние нормальных напряжений на все рассмотренные магнитные характеристики, так как при растяжении векторы магнитных моментов доменов располагаются преимущественно вдоль оси образца, а при сжатии — в плоскости, перпендикулярной оси, однако под действием касательных напряжений вектор намагниченности будет расположен под некоторым углом к направлению приложенного магнитного поля.

В случае комбинирования всех трех видов нагружения с увеличением внутреннего давления коэрцитивная сила увеличивается, остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость уменьшаются. При этом характер зависимостей магнитных характеристик от напряжений  $\sigma$ ,  $\tau$  не меняется.

Построена зависимость интенсивности напряжений от коэрцитивной силы при различных значениях параметра Лодэ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кулеев В. Г., Горкунов Э. С. Механизмы влияния внутренних и внешних напряжений на коэрцитивную силу ферромагнитных сталей // Дефектоскопия. 1997. № 11. С. 3–18.
2. Bulte D. P., Langman R. A. Origins of the magnetomechanical effect // J. Magnetism Magnetic Materials. 2002. V. 251, N 2. P. 229–243.
3. Захаров В. А., Боровикова М. А., Комаров В. А., Мужичкий В. Ф. Влияние внешних напряжений на коэрцитивную силу ферромагнитных сталей // Дефектоскопия. 1992. № 1. С. 41–46.
4. Новиков В. Ф., Яценко Т. А., Бахарев М. С. Зависимость коэрцитивной силы малоуглеродистых сталей от одноосных напряжений. Ч. 1 // Дефектоскопия. 2001. № 11. С. 51–57.
5. Langman R. A. Magnetic properties of mils steel under conditions of biaxial stress // IEEE Trans. Magnetics. 1990. V. 26, N 4. P. 1246–1251.
6. Sablik M. J., Riley L. A., Burkhardt G. L., et al. Micromagnetic model for biaxial stress effects on magnetic properties // J. Magnetism Magnetic Materials. 1994. V. 132, N 1–3. P. 131–148.
7. Sablik M. J., Jiles D. C. Modeling the effects of torsional stress on hysteretic magnetization // IEEE Trans. Magnetics. 1999. V. 35, N 1. P. 498–504.

8. **Sablik M. J., Rubin S. W., Riley L. A., et al.** A model for hysteretic magnetic properties under the application of noncoaxial stress and field // J. Appl. Phys. 1993. V. 74, N 1. P. 480–488.
9. **Захаров В. А., Ульянов А. И., Горкунов Э. С.** Коэрцитивная сила ферромагнитных сталей при двухосном симметричном растяжении материала // Дефектоскопия. 2011. № 6. С. 3–15.
10. **СНиП 2.05.06-85.** Магистральные трубопроводы. Переизд. Утв. 30.03.85 г. М., 1997.
11. **Дунаев Ф. Е.** Процессы перемагничивания ферромагнетиков. Свердловск: Урал. гос. ун-т, 1979.
12. **Горкунов Э. С., Якушенко Е. И., Задворкин С. М. и др.** Влияние упругой деформации сжатием, растяжением, кручением на распределение критических магнитных полей в стали 15ХН4Д // Дефектоскопия. 2010. № 2. С. 3–13.

*Поступила в редакцию 15/V 2013 г.*

---