

В. В. МИРОШНИКОВ, д-р техн. наук, ВНУ им. В. Даля, Луганск;
О. П. ЗАВАЛЬНЮК, ст. преподаватель, ХГМА, Херсон

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ВЕЛИЧИНЕ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ МЕТАЛЛА

В статье исследуется возможность контроля упругих напряжений по величине остаточной намагниченности металла. Установлена функциональная связь величины остаточной намагниченности металла от действующих механических напряжений в ферромагнитных конструкциях.

Ключевые слова: упругие напряжения, неразрушающий контроль, остаточная намагниченность, слабое магнитное поле, напряженность магнитного поля, ферромагнитные конструкции.

Введение. При эксплуатации сложных ферромагнитных конструкций возникает необходимость контролировать их напряженно-деформированное состояние, т.е. определять возникающие деформации и упругие напряжения от действующих внешних сил в элементах конструкций.

Анализ последних исследований и публикаций. Для оценки упругих напряжений широко применяются магнитные методы неразрушающего контроля (НК), которые базируются на взаимосвязи магнитных и механических характеристик ферромагнитных материалов. Так воздействие на ферромагнетики больших растягивающих или сжимающих упругих напряжений σ_0 может существенно изменить значения таких магнитных величин, как начальная χ_a и обратимая χ_r магнитные восприимчивости, коэрцитивная сила H_c , магнитоупругий прирост намагниченности $\Delta M_\sigma(H_i, \sigma_0)$ (H_i – внутреннее магнитное поле), остаточная намагниченность M_r .

Магнитная восприимчивость [1] достигает особенно больших значений в ферромагнетиках (от нескольких десятков до многих тысяч единиц). Такая магнитная характеристика имеет хорошую чувствительность к внешним напряжениям, однако требует определения исключительно в лабораторных условиях [2].

В работе [3] подробно проанализированы возможности НК напряжений при больших значениях поля ($H_i \geq 400$ А/см), где имеют место только обратимые процессы вращения намагниченности. Недостатком этого метода НК является то, что он эффективен либо на образцах стальной в лабораторных условиях, либо на изделиях простой формы, имеющих к тому же небольшие размеры (в которых только и можно создать большое магнитное поле). Еще одна трудность обусловлена необходимостью наложения упругих напряжений на намагниченный образец.

В другой работе [4] объясняется наблюдаемая на опыте зависимость коэрцитивной силы от упругих напряжений $H_c(\sigma_0)$, которая при растяжении явля-

© В. В. Мирошников, О. П. Завальнюк, 2013

ется неоднозначной: эта функция с ростом σ_0 проходит через минимум при $\sigma_0 \approx \overline{\sigma_i}$ (где $\overline{\sigma_i}$ – средняя величина внутренних напряжений). В итоге показывается, что в наиболее типичных случаях H_c определяется главным образом необратимыми смещениями 180° ДГ (начало пластической деформации) и малоприспособна для оценки внутренних и внешних напряжений. Публикации [5, 6] подтверждают, что порог растягивающих напряжений равен 0,5 от предела текучести металла, выше которого измерять растягивающие напряжения методом коэрцитивной силы не целесообразно.

Большой интерес представляет работа [7], где наряду с другими результатами были получены зависимости остаточной намагниченности от температуры отпуска T стали 30ХГСА при воздействии на образцы этой стали больших (и постоянных) растягивающих и сжимающих напряжений ($\sigma_0 = \pm 400$ МПа). Важность этого результата заключается, во-первых, в его новизне, и, во-вторых, в чрезвычайно большом диапазоне изменения M_r при переходе от растяжения к сжатию, поэтому зависимость $M_r(\sigma_0)$ эффективно использовать в целях НК напряжений в ферромагнитных конструкциях.

Таким образом, анализ литературных источников позволяет утверждать, что большинство методов контроля упругих напряжений относятся к отдельным случаям (изделие из определенной марки стали с конкретным структурным и магнитным состоянием), вместе с тем, применяя эти методы сложно определять знак действующих упругих напряжений. Поэтому предложенные методы НК напряжений не смогли получить широкого распространения на практике.

Постановка задачи. Исследовать возможность контроля упругих напряжений по величине остаточной намагниченности металла. Установить функциональную связь величины остаточной намагниченности металла от действующих механических напряжений в ферромагнитных конструкциях.

Результаты исследований. Особый интерес представляет определение зависимости остаточной намагниченности от механических напряжений в конструкционных сталях (машиностроительных, корпусных, строительных), которые применяются [8] для изготовления деталей машин, механизмов, корпусов судов и строительных конструкций. Для этого вида стали (Ст3, 09Г2С, 10ХСНД и т. п.) характерно сравнительно невысокое содержание углерода, не превышающее обычно 0,3-0,4 % и низкое содержание легирующих элементов (низколегированная).

Согласно [9] остаточная намагниченность M_r – это намагниченность предварительно намагниченного магнитного материала при уменьшенной до нуля напряженности магнитного поля. M_r зависит от многих факторов: магнитных свойств материала, его магнитной предыстории, а также температуры.

Здесь также следует обратить внимание на подобие упругого и магнитного гистерезисов. Как и в магнитном гистерезисе, в упругом присутствует обязательная смена знака (сжатие / растяжение), существуют зоны упругой и пла-

стической деформации (по аналогии с магнитным гистерезисом: зоны возврата и насыщения) (рис. 1).

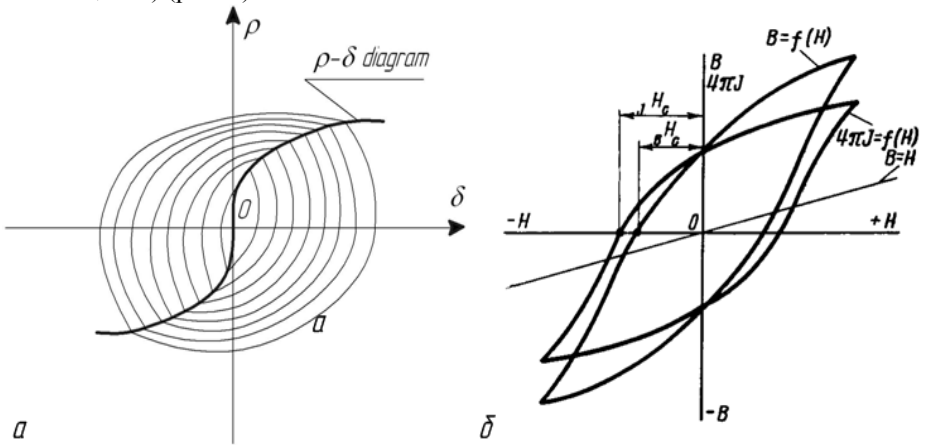


Рис. 1 – Гистерезисы: *a* – упругий и *b* – магнитный

Анализ конструкционных сталей в слабых магнитных полях, находящихся под воздействием одноосных упругих напряжений, показывает [7, 10-13], что магнитные свойства стали, такие как χ_σ – магнитоупругая восприимчивость, b_σ – постоянная Рэлея при действии упругих напряжений, ΔM_{ir}^{\max} – максимальное значение остаточной намагниченности остаются неизменными, при величине внешней нагрузки, находящейся в области пластической деформации. Учитывая эти свойства конструкционных сталей, можно построить алгоритм определения мгновенных значений намагниченности $M(t)$ от действующих упругих напряжений $\sigma(t) = \sigma_1 \sin \omega t$:

$$M(t) = M(H) + \Delta M_\sigma; \quad (1)$$

где $M(H) = \chi_a H + bH^2; \quad (2)$

$$\Delta M_\sigma = \Delta M_r + \Delta M_{ir}; \quad (3)$$

$$\Delta M_r = \chi_\sigma \sigma_1 \sin \omega t + b_\sigma \sigma_1^2 \sin^2 \omega t. \quad (4)$$

При циклическом нагружении, уже после 4-5 циклов, наблюдается достижение величиной ΔM_{ir} максимального значения, т.е. $\Delta M_{ir} = \Delta M_{ir}^{\max}$. Значение ΔM_{ir}^{\max} определяется экспериментально, и, по полученным данным, строится

семейство магнитоупругих петель гистерезиса для различных значений σ_1 . Величину начальной магнитной восприимчивости χ_a вычисляем по предельной петле гистерезиса

$$\chi_a = \frac{2}{\pi} \frac{M_S}{H_c} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} \frac{M_r}{M_S} \right),$$

где M_S – намагниченность насыщения, M_r – остаточная намагниченность, H_c – коэрцитивная сила ферромагнитного материала.

Сделаем допущение, что полученные магнитоупругие петли гистерезиса симметричны $M_{r\sigma}^+ = -M_{r\sigma}^-$ (погрешность до 20-25%), найдем выражение для величин χ_σ и b_σ :

$$\chi_\sigma^\pm = \frac{1}{\sigma_1} (M_S^+ - 2M_{r\sigma}^\pm); \quad b_\sigma^\pm = \pm \frac{2M_{r\sigma}^\pm}{\sigma_1^2}; \quad b_\sigma^+ = b_\sigma^- = b_\sigma.$$

Здесь знак «+» относится к правой части частной магнитоупругой петли гистерезиса, а знак «-» – к левой.

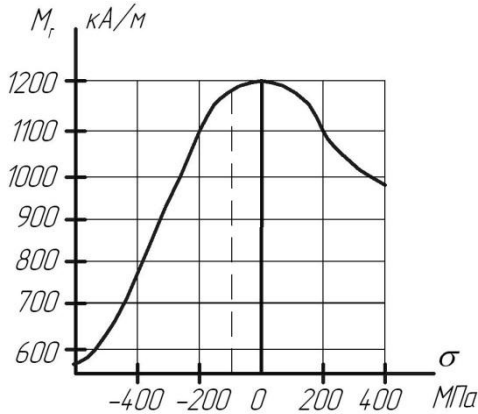


Рис. 2 – Обобщенная зависимость величины остаточной намагниченности конструкционных сталей от величины упругих напряжений

Данный алгоритм расчета остаточной намагниченности от действующих напряжений подтверждается экспериментальными исследованиями [12]. Анализ экспериментальных данных позволяет определить область применимости данной модели. При сжатии она достигает $0,6 \sigma_r$, а при растяжении ограничивается величиной внутренних напряжений. Увеличение напряжения растяже-

ния приводит к нелинейной зависимости остаточной намагниченности из-за искажения магнитоупругой петли гистерезиса. Всё выше сказанное относится к контролю крупногабаритных объектов, на которые можно распространить свойства материала ферромагнетика. При контроле отдельных изделий по остаточной намагниченности необходимо учитывать коэффициент размагничивания данного изделия.

Выводы.

1. Остаточная намагниченность является одним из критериев оценки механических напряжений – это естественная характеристика любой конструкционной стали.

2. Проведенный анализ подтверждает достоверность результатов исследования, связывающих остаточную намагниченность и величину упругих напряжений, когда испытываемый образец находился в поле Земли. Полученная зависимость однозначно определяет знак напряжения и намагниченность, что не наблюдается при других методах магнитного контроля.

3. Следующим этапом исследований будет разработка требований и расчет параметров датчиков для измерения остаточной намагниченности материала ферромагнитных конструкций.

Список литературы: 1. *Вонсовский С.В.* Ферромагнетизм / С.В. Вонсовский, Я.С. Шур – М-Л: Госэнергоиздат, 1948. – 817 с. 2. *Кулеев В.Г.* К проблеме контроля магнитного состояния ферромагнитных сталей при воздействии на них магнитных полей и упругих напряжений в зареевской области / В.Г. Кулеев, М.Н. Михеев, М.Б. Ризмант, В. В. Нестеренко, Л.В. Лобанова, Ю.И. Назаров, С.Т. Гузев // Дефектоскопия. – Екатеринбург, 1985. – № 10. – С. 33-42. 3. *Иванаяги Д.* Неразрушающий магнитный метод определения остаточных напряжений / Д. Иванаяги. – Хихакай КЭНСА. – 1974. – Т. 23. – № 3. – С. 147-154. 4. *Кулеев В. Г.* Механизмы влияния внутренних и внешних напряжений на коэрцитивную силу ферромагнитных сталей / В.Г. Кулеев, Э.С. Горкунов // Дефектоскопия. – Екатеринбург, 1997. – № 11. – С. 3-18 5. *Агинеи Р.В.* Оценка напряженного состояния стальных трубопроводов по анизотропии магнитных свойств металла / Р.В. Агинеи, Ю.А. Теплинский, А.С. Кузьбожев // Контроль. Диагностика. – Москва, 2004. – № 9. – С. 48-50. 6. *Новиков В.Ф.* Зависимость коэрцитивной силы малоуглеродистых сталей от одноосных напряжений / В.Ф. Новиков, Т.А. Яценко, М.С. Бахарев // Дефектоскопия. – Екатеринбург, 2001. – № 11. – С. 51-57. 7. *Бидя Г.В.* Влияние упругой деформации на магнитные свойства сталей с различной структурой / Г. В. Бидя, В.Г. Кулеев // Дефектоскопия. – Екатеринбург, 1998. – № 11. – С. 12-26. 8. *Машиностроение. Энциклопедия* / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Сталь. Чугуны. Т. II-2 / Г.Г. Мухин, А.И. Беляков, Н.Н. Александров и др.; Под общ. ред. О.А. Банных и Н.Н. Александрова, 2001 – 784 с. 9. *Физическая энциклопедия* / Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д.М. Алексеев, А.М. Балдин, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др. – М.: Большая Российская энциклопедия. Т. 3. Магнитоплазменный – Пойнтинга теорема. 1992. – 672 с. 10. *Craik D.J., Wood M.J.* Magnetization changes induced by stress in a constant applied field. – J. Appl. Phys. – 1970. – N 3. – PP. 1009-1016. 11. *Горкунов Э.С.* Влияние отклонений от соосности между направлениями намагничивания и наложения механической нагрузки на результаты магнитного контроля упругих деформаций в сталях / Э.С. Горкунов, Т.П. Царькова, С.В. Смирнов, Д.И. Вичужанин, И.Г. Емельянов, В.Ю. Кузнецов // Дефектоскопия. – Екатеринбург, 2004. – №5. – С. 40-52. 12. *Кулеев В.Г.* Влияние растягивающих пластических деформаций на остаточную намагниченность и начальную проницаемость малоуглеродистых сталей / В.Г. Кулеев, Т.П. Царькова, А.П. Ничипурук // Дефектоскопия. – Екатеринбург, 2006. – №4. – С. 61-74. 13. *Гордиенко В.Е.* Пассивный ферро-

зондовый контроль структуры металла и внутренних напряжений в элементах сварных МК / В.Е. Гордиенко; СПбГАСУ. – СПб., 2010. – 83 с.

Надійшла до редакції 19.04.2013

УДК 620.179.14

Исследование возможности контроля упругих напряжений по величине остаточной намагниченности металла / В. В. Мирошников, О. П. Завальнюк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 34 (1007). – С. 12–17. – Бібліогр.: 13 назв.

У статті досліджується можливість контролю пружних напружень за величиною залишкової намагніченості металу. Встановлено функціональний зв'язок величини залишкової намагніченості металу від діючих механічних напружень у феромагнітних конструкціях.

Ключові слова: пружні напруження, неруйнівний контроль, залишкова намагніченість, слабе магнітне поле, напруженість магнітного поля, феромагнітні конструкції.

In this article the possibility of control of elastic stresses on the residual magnetization of the metal is investigated. Functional relationship of the residual magnetization of the metal on the mechanical stresses was set in ferromagnetic structures.

Keywords: elastic stress, nondestructive testing, residual magnetization, a weak magnetic field, the magnetic field strength, ferromagnetic structures.