



# ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА СТАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Г. Я. БЕЗЛЮДЬКО, С. А. ВОЛОХОВ, Р. Н. СОЛОМАХА

*Методы анализа и моделирования магнитного гистерезиса сформировались еще в первой половине прошлого века преимущественно трудами немецких исследователей. В 60-е годы советские корабельщики развили этот аппарат для учета намагниченности статически и циклически нагружаемых металлоконструкций в естественном и искусственном магнитных полях. Это дало все необходимое — от физики явления и до терминологии — для практического анализа магнитных свойств механически нагружаемого в приложенном магнитном поле ферромагнетика — т. е. для столь актуального сейчас неразрушающего контроля усталостного состояния и ресурса металлоконструкций. Приведены примеры исследования магнитных характеристик в зависимости от приложенных полей и механических нагружений магнитных характеристик металла.*

*Methods of analysis and simulation of the magnetic hysteresis were formed already in the first half of the previous century mostly by the works of German researchers. In the 60s the Soviet shipbuilders developed this apparatus to allow for magnetization of the statically and cyclically loaded metal structures in the natural and artificial magnetic fields. This provided all the necessary elements — from the phenomenon physics up to terminology — for practical analysis of magnetic properties of a ferromagnetic mechanically loaded in the applied magnetic field, i.e. for non-destructive testing of the fatigue state and remaining life of metal structures, which is so urgent now.*

Одним из развивающихся методов неразрушающего контроля механического состояния стальной конструкции является мониторинг ее магнитного состояния.

Магнитное состояние ферромагнетика обычно выражают с помощью кривых намагничивания и петель магнитного гистерезиса [1–3]. Однако сложившийся сейчас уровень прикладной теории петли магнитного гистерезиса не учитывает влияние на намагниченность действующих на изделие механических напряжений, хотя этот фактор является столь же существенным, как и действующее на изделие магнитное поле [4]. Для такой оценки ближе всего подходит известный в теории ферромагнетизма статистический метод анализа гистерезисных явлений. Он основан на использовании феноменологической модели Прейзаха. Последняя представляет ферромагнетик состоящим из участков, распределенных по внутренним полям и коэрцитивным силам, и учитывает магнитную структуру вероятностно-статистическим способом. К настоящему времени разработано несколько моделей Прейзаха и вариантов их представления на так называемых планах (двухмерных распределениях на плоскости) Прейзаха [5–7]. В подавляющем большинстве этих моделей намагничиваемый ферромагнетик рассматривается как преобразователь, вход которого представляет изменяющуюся напряженность внешнего поля, а выход — магнитную индукцию ферромагнетика. Такой вариант моделирования на основе концепции «черного ящика» удобен для прикладных исследова-

ований, т. е. для неразрушающего контроля, когда надо действовать по принципу «если — значит», не особенно вдаваясь в суть процессов, происходящих в контролируемом металле на микро- и макроуровне. Модель Прейзаха — это уравнение такого преобразователя, вход–выход которого связан через двойное интегрирование функции Прейзаха. Есть ряд моделей Прейзаха: классическая — по симметричным петлям; измененная — учитывает частные петли; нелинейная — с зависимостью весовой функции от напряженности поля и другие.

Классическая модель Прейзаха построена из бесконечного набора операторов гистерезиса  $\gamma_{\alpha\beta}$ , которые представлены элементарными прямоугольными петлями с «вверх» и «вниз» переключениями значений  $\alpha$  и  $\beta$  соответственно. Выходные значения этих петель могут принимать только значения  $\gamma_{\alpha\beta}u(t) = +1$  и  $\gamma_{\alpha\beta}u(t) = -1$  для входного значения  $u(t)$ . Произвольный вес функции  $v(\alpha, \beta)$ , которая называется функцией Прейзаха или весовой функцией, связан с каждым оператором. Выход преобразователя  $f(t)$  может тогда быть написан как

$$f(t) = \iint v(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} u(t) d\alpha d\beta.$$

На основе этого уравнения предложено несколько планов (планиметрических моделей), у которых плоскость занята распределением весовой функции с соответствующим оператором гистерезиса, а координатные оси плана — значения напряженностей поля  $\alpha$  и  $\beta$ :  $\alpha$  — напряженность



поля при движении по восходящей ветви петли гистерезиса;  $\beta$  — напряженность поля при движении по нисходящей ветви.

На наш взгляд, наиболее приемлемый вариант модели Прейзаха предложен В. Т. Гузеевым и С. Т. Гузеевым [8], который нами взят в качестве исходной модели для рассмотрения процессов изменения магнитного состояния конструкции при воздействии механических напряжений. Ее особенность заключается в том, что в качестве параметров  $\alpha$  и  $\beta$  обоснованно приняты внутренние поля смещения и коэрцитивные силы доменов, по которым и строятся планы, названные фазовыми диаграммами.

**Понятие о фазовых диаграммах.** Статистический метод анализа гистерезисных явлений предполагает, что ферромагнетик состоит из множества доменов, разделенных на две группы: безгистерезисные домены и домены Прейзаха. Последние имеют прямоугольную петлю гистерезиса с коэрцитивной силой  $h_{кр}$ . Каждый домен находится в своем поле смещения  $h_{см}$  и ориентирован случайным образом. Результирующая намагниченность системы равна нулю. При приложении внешнего магнитного поля границы между доменами начинают смещаться таким образом, что домены, намагниченность которых совпадает с полем, будут расти, появится результирующая намагниченность. Внешнее магнитное поле удерживает границы в новом положении.

В безгистерезисном домене процесс смещения границ следует за изменением внешнего магнитного поля до насыщения, затем происходит его поворот от направления легкого намагничивания к направлению вектора поля (процесс вращения). При уменьшении магнитного поля процесс пойдет в обратном порядке: сначала вращение, затем смещение границ до первоначального равновесного состояния.

В домене Прейзаха при внешнем магнитном поле  $H = h_{кр} \pm h_{см}$  (условие перемагничивания) происходит быстрое продвижение границы к новому равновесному состоянию. Такое быстрое продвижение границы создает в ферромагнетике электромагнитные силы и вихревые токи, растрачивающие энергию на механические колебания среды (эффект Баркгаузена) и нагрев металла. Поэтому при уменьшении внешнего магнитного поля границы не возвратятся в исходное положение, и останется некоторый избыток намагниченности в направлении действовавшего внешнего магнитного поля, называемый остаточной намагниченностью  $J_{ост}$  или остаточной индукцией  $B_{ост}$ .

Фазовая диаграмма магнитных состояний ферромагнитной конструкции представляет план (условное поле) в координатах  $h_{см}$  и  $h_{кр}$ , на котором размещены все ее домены и отображается их сос-

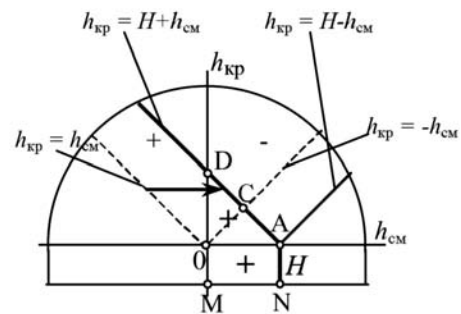


Рис. 1. План фазовой диаграммы

тояние в выбранном направлении. Поскольку внутренние поля смещения преодолеваются постоянным  $h_{\pm}$  намагничивающим полем, а коэрцитивные силы — знакопеременным  $h_{\pm}$ , спадающим от некоторого значения до нуля, планы часто строят в координатах этих полей: значения  $h_{\pm}$  — по горизонтальной оси; значения  $h_{\pm}$  — по вертикальной оси вверх. На рис. 1 представлен план фазовой диаграммы в исходном размагниченом состоянии и при действии намагничивающего поля  $H$ . План ограничен кривой линией (на рис. 1 полуокружностью), за которой увеличение  $h_{\pm}$  и  $h_{\pm}$  не приводит к изменению индукции (намагниченности), т. е. ферромагнетик находится в состоянии насыщения.

В верхней части плоскости от горизонтальной оси располагаются домены Прейзаха с индукциями  $\pm B_S$  или намагниченностями  $\pm J_S$ , каждый из которых имеет свое критическое поле  $h_{кр}$  и расположен в своем положительном или отрицательном внутреннем поле смещения  $\pm h_{см}$ . Для учета безгистерезисных доменов, которые не имеют критических полей, на фазовой диаграмме откладывается площадка вниз от оси абсцисс. Там критические поля равны нулю и каждый домен расположен в своем положительном или отрицательном для выбранного направления внутреннем поле смещения  $\pm h_{см}$ .

Как правило, план заполняется значениями индукций. Для практических целей эти значения усредняются по результатам измерений конкретного ферромагнитного материала. За исходное состояние принимается динамически размагниченое, при котором индукции имеют положительный знак участков слева от оси ординат и отрицательный — справа, как показано на рис. 1. Эти характерные знаки индукций для исходного размагниченого состояния на фазовую диаграмму обычно не наносятся, чтобы не перегружать ее, отмечая знаком лишь нехарактерную для данной области индукцию.

Линии, определяемые условиями перемагничивания, называются *фронтами перемагничивания*. В случае отсутствия внешнего поля при равных масштабах по осям фронты перемагничива-



ния определяются уравнениями  $h_{кр} = \pm h_{см}$ . Они представляют собой прямые линии, исходящие из начала координат под углом  $45^\circ$  к горизонтальной оси в области доменов Прейзаха и под углом  $90^\circ$  к горизонтальной оси в области безгистерезисных доменов.

Сумма площадей с положительным и отрицательным знаком, которая определяет суммарную индукцию или намагниченность, в размагниченом состоянии будет равна нулю.

При появлении внешнего, например, положительного поля  $H$  (см. рис. 1) фронты сместятся и займут положение, определяемое уравнением  $h_{кр} = H \pm h_{см}$  в области доменов Прейзаха и уравнением  $H = h_{см}$  в области безгистерезисных доменов. При указанном смещении фронтов изменится на положительный знак индукция участков в зоне  $DANMD$ , у которых внешнее поле  $H$  с добавкой поля смещения станет больше критического. Суммарная величина участков со знаком (+) и (-) не будет равна нулю, появилась положительная индукция  $+B$ . Если теперь снять внешнее поле  $H$ , фронты возвратятся на место, но положительная индукция участков в зоне  $0CD0$  останется. Это и будет остаточная индукция после воздействия поля  $H$ .

Учитывая, что пластические напряжения, в отличие от упругих, оказывают влияние не только на магнитное состояние ферромагнетика, а и на его магнитные свойства [4], следует считать, что фазовая диаграмма устойчива только в пределах действия упругих напряжений. В результате действия пластических деформаций распределение плотности заполнения плана будет изменяться.

**Действие механических нагрузок.** Действие упругих механических напряжений на намагниченность ферромагнетика учитывается коэффициентом уменьшения критических полей  $k_\sigma$  [4]. Он изменяется от 1 при отсутствии напряжений до 0 при предельных воздействиях. С учетом этого в области доменов Прейзаха фронты перемагничивания при действии упругих волн механических напряжений  $\sigma$  будут определяться уравнением  $h_{кр} k_\alpha = H \pm h_{см}$ . Они представляют собой прямые

линии, исходящие из точки на горизонтальной оси, отстоящей от начала координат на величину  $H$ , и расположенные под углом  $\alpha$  к горизонтальной оси, большим  $45^\circ$  и меньшим  $90^\circ$ . Этот угол  $\alpha$  определяется уравнением  $\alpha = \arctg 1/k_\sigma$ . При увеличении интенсивности упругих волн механических напряжений угол поворота фронта  $\alpha$  будет возрастать. На рис. 2 изображено изменение наклона фронтов перемагничивания на плане фазовой диаграммы: на рис. 2, а — при индуцированной намагниченности полем  $H$ ; на рис. 2, б — при остаточной намагниченности после снятия намагничивающего поля  $H$ .

Индуцированная намагниченность, наведенная внешним магнитным полем напряженностью  $H$ , при отсутствии механических нагрузок определяется на рис. 2, а площадью  $DANMD$ . При появлении механической нагрузки угол наклона фронта  $AD$  становится больше  $45^\circ$  и индуцированная намагниченность определяется площадью  $D_1ANMD_1$ , которая больше предыдущей. При повышении механической нагрузки угол наклона фронта возрастает и при нагрузках, близких к предельным, индуцированная намагниченность определяется уже площадью  $KD_2ANMK$ , которая еще больше. Таким образом, индуцированная намагниченность ферромагнитной конструкции под действием механических нагрузок возрастает от первоначального значения до некоторой предельной величины, определяемой, с одной стороны — уровнем намагничивающего поля, а с другой — распределением плотности заполнения плана. При равномерном распределении плотности заполнения плана можно ожидать линейное изменение индуцированной намагниченности от уровня механического напряжения. Это подтверждается опытными зависимостями, приведенными на рис. 3 по данным [9].

Остаточная намагниченность при отсутствии механических нагрузок определяется на рис. 2, б площадью  $0CD0$ . При появлении механической нагрузки угол наклона фронта  $0C$  становится больше  $45^\circ$  и остаточная намагниченность определяется площадью  $0C_1D0$ , которая меньше предыдущей. При повышении механической нагрузки угол наклона фронта возрастает и при нагрузках, близких к предельным, остаточная намагниченность определяется уже совсем небольшой площадью  $0C_2D0$ . Таким образом, остаточная намагниченность ферромагнитной конструкции под действием механических нагрузок уменьшается, практически разрушаясь при нагрузках, близких к пределу прочности материала конструкции. Подтверждением этого могут служить приведенные на рис. 4 экспериментальные зависимости по данным, приведенным в работе [10].

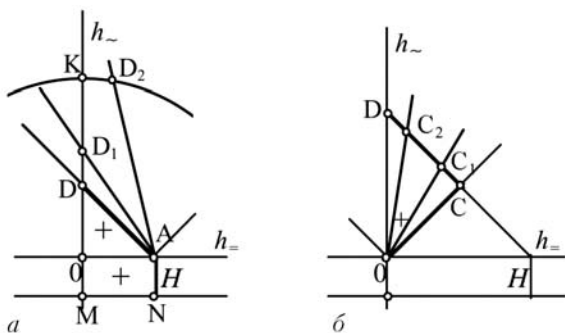


Рис. 2. Действие механических нагрузок: а — при индуцированной намагниченности; б — при остаточной намагниченности



**Исследования на планах фазовой диаграммы стали Ст.3.** На рис. 5 и 6 приведены планы фазовой диаграммы стали Ст.3. Фазовая диаграмма снята на вырезанном из трубы кольце: средний диаметр кольца — 74 мм, высота — 22 мм, толщина — 3 мм. Планы построены в координатах  $h_{\pm}$ ,  $h_{\pm}$  и заполнены значениями индукции в мТл. Плотность заполнения плана в пределах ячейки считается равномерной. На рисунках приведены только правые части планов, так как левые являются зеркальным отражением правых. На рис. 5 штриховыми линиями показаны фронты перемагничивания при действии механических напряжений, соответствующих коэффициентам  $k_{\sigma} = 1; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5$ . При определении индукции от индуцированной намагниченности используются фронты перемагничивания, выходящие из точки на оси ординат с соответствующей напряженностью поля (на рис. 5 в качестве примера это точка с напряженностью поля  $h_{\pm} = 400$  А/м). При определении остаточной индукции используются фронты, выходящие из начала координат.

Для диапазона упругих напряжений можно считать, что коэффициент  $k_{\sigma} = 1 - \sigma_{\pm} / \sigma_{\text{пр}}$ . Тогда из планов, представленных на рис. 5 и 6, можно получить зависимости магнитной индукции в образце от относительной механической нагрузки  $\sigma_{\pm} / \sigma_{\text{пр}}$  в диапазоне упругих напряжений, т. е. в диапазоне значений  $0 < \sigma_{\pm} / \sigma_{\text{пр}} < 0,5$  или  $1 < k_{\sigma} < 0,5$ .

На рис. 7 представлены основные кривые намагничивания (ОКН) стали Ст.3 при отсутствии механических напряжений ( $k_{\sigma} = 1$ ) и при упругих напряжениях, близких к пределу текучести ( $k_{\sigma} = 0,5$ ). Они могут быть переведены в зависимости намагниченности или магнитного момента по формулам:  $J = B / \mu_0 - H$ ;  $M = JV$ , где  $V$  — объем образца.

Из рис. 7 следует, что упругие механические напряжения приводят к увеличению магнитной индукции, особенно в средних полях (напряженностью 200...1000 А/м), где это увеличение достигает 3-х раз при напряженности поля 300 А/м. С ростом напряженности поля приращение индукции от механических напряжений уменьшается, и индукция насыщения уже не зависит от них.

На рис. 8 представлены зависимости относительного приращения магнитной индукции от механических напряжений  $\Delta B_{\sigma} / B_H = f(\sigma_{\pm} / \sigma_{\text{пр}})$ . Здесь  $\Delta B_{\sigma} = \Delta B_{H\sigma} - B_H$  — приращение магнитной индукции;  $B_{H\sigma}$  — индукция при напряженности поля  $H$  и относительном механическом напряжении  $\sigma_{\pm} / \sigma_{\text{пр}}$ ;  $B_H$  — индукция при напряженности поля  $H$  и отсутствии механических напряжений.

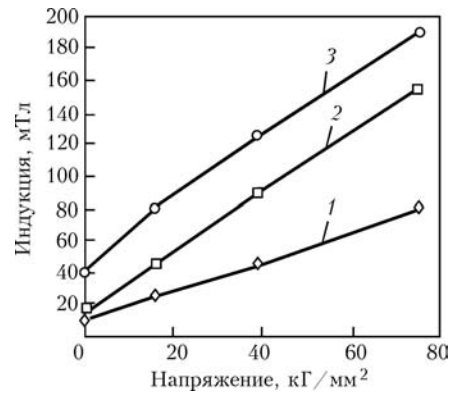


Рис. 3. Изменение намагниченности сплава Fe(85 %) + Ni(15 %) от растягивающего усилия при напряженности поля, А/м: 1 — 500; 2 — 750; 3 — 1000 (по данным [9])

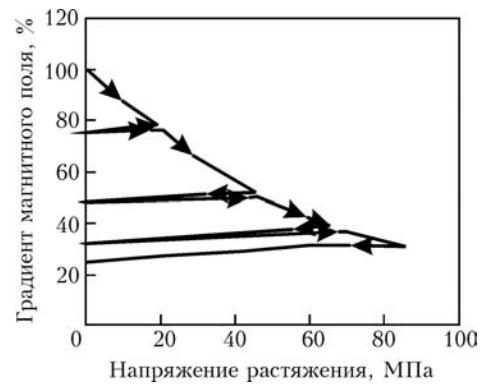


Рис. 4. Поведение остаточной намагниченности пятна при растяжении (по данным [10])

Из рис. 8 следует, что при напряженности поля 100...400 А/м приращение магнитной индукции от механических напряжений носит нелинейный

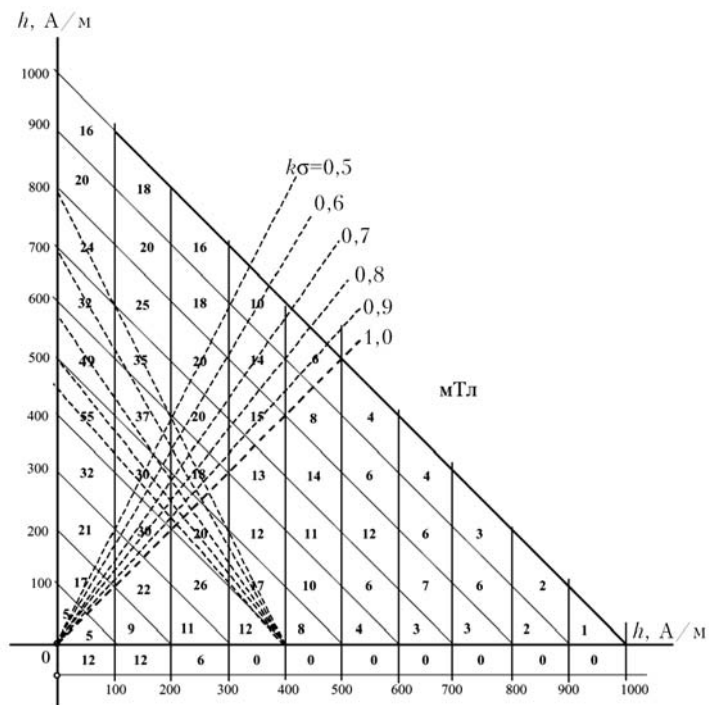


Рис. 5. План стали Ст.3 в средних полях

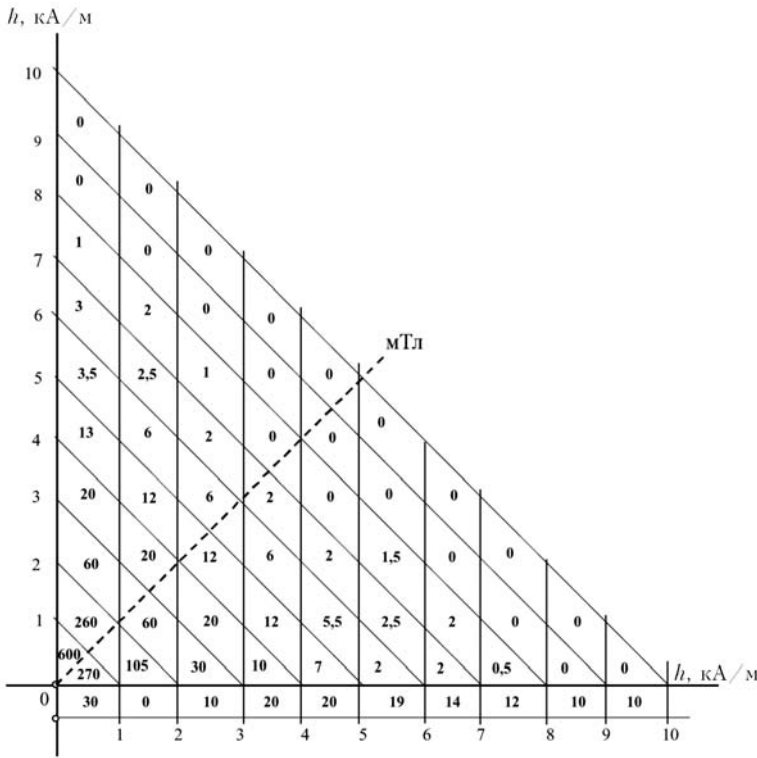


Рис. 6. План стали Ст.3 в сильных полях

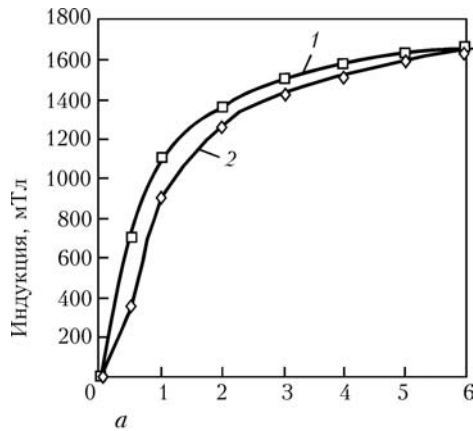


Рис. 7. Основные кривые намагничивания стали Ст.3 в сильных (а) и средних (б) полях: 1 — при  $k_{\sigma} = 1$ ; 2 — при  $k_{\sigma} = 0,5$

характер и возрастает с ростом напряжений, при напряженности поля 500...600 А/м оно практически линейно и находится на уровне 15 % при росте механического напряжения на каждые 10 %  $\sigma_{пр}$ .

На рис. 9 приведены зависимости от механических напряжений остаточной индукции в образце, полученной до его нагружения при выключении магнитного поля с различной напряженностью.

Из рис. 9 следует, что с нагружением образца остаточная индукция снижается, причем тем больше, чем больше нагрузка. При напряжениях, близких к пределу текучести, она снижается в 1,5...2 раза.

Подытожив сказанное выше, нельзя не заметить ряд практически важных моментов. Первое — это связь магнитных характеристик контролируемого металла с направлением и интенсивностью как приложенного магнитного поля, так и механических нагружений.

Поэтому несомненна предпочтительность ведения контроля именно в управ-

ляемых приложенных полях для сокращения неопределенности исходных данных. Отметим, что только в таком варианте выполнения неразрушающего контроля возможно изготовление стандартных образцов напряженно-деформированного состояния, как это сделано нами в коэрцитиметрии. Второе — это повышенная чувствительность индуцированной намагниченности к механическим нагрузкам. Это реальная физическая предпосылка для неразрушающего контроля нагрузок в элементах металлоконструкций, причем как в упругой, так и в упругопластической областях. И на уровне альтернативы тензометрии, но с таким важным преимуществом, как учет полной

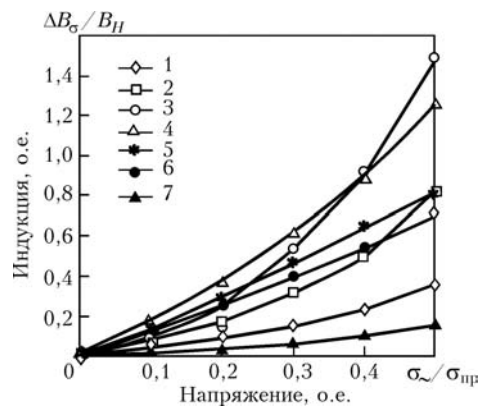


Рис. 8. Относительное изменение индукции в образце стали Ст.3 при упругих механических напряжениях и напряженности поля, А/м: 1 — 100; 2 — 200; 3 — 300; 4 — 400; 5 — 500; 6 — 600; 7 — 1000

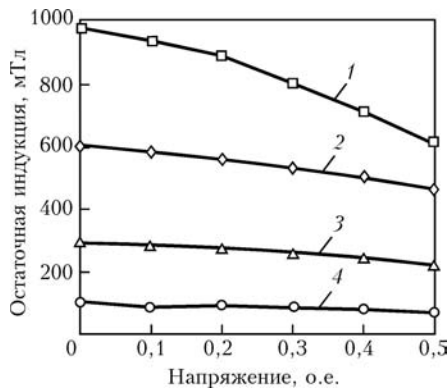


Рис. 9. Изменение от нагрузки  $s \cdot s_{пр}$  остаточной индукции в образце из стали Ст.3, полученной до нагружения от магнитного поля напряженностью, кА/м: 1 — 10; 2 — 1000; 3 — 600; 4 — 400

нагрузки, а не только действующей с момента установки тензодатчика.

Из основополагающих работ наших предшественников правомерен и такой временно актуальный вывод, что физического явления, именуемого «магнитная память» металла, конечно же, не существует. Все, что под этим названием предлагается сейчас в неразрушающем контроле — это не более, чем частный случай работ многолетней давности. И в силу оторванности от контекста этому частному случаю ошибочно приписывают совершенно нереальные возможности и в дефектоскопии, и в оценке напряженно-деформированного состояния.

### Выводы

Индукцированная намагниченность ферромагнитной конструкции под действием механических нагрузок возрастает от первоначального значения до некоторой предельной величины, определяемой направлением и уровнями намагничивающего поля и нагрузки.

ООО «Специальные Научные Разработки»,  
НТЦ магнетизма технических объектов НАН Украины,  
Харьков

Остаточная намагниченность ферромагнитной конструкции под действием механических нагрузок уменьшается, практически разрушаясь при нагрузках, близких к пределу прочности материала конструкции.

Изменения намагниченности столь значительны, что по ним можно уверенно судить об изменении механических напряжений.

Наглядность графического изображения процесса изменения магнитного состояния при механических воздействиях стимулирует совершенствование известных и создание новых методов неразрушающего контроля механического состояния стальной конструкции путем мониторинга магнитных характеристик металла.

1. Zirka S. E., Moros Yu. I. Hysteresis modeling based on transplantation // IEEE Trans. Magn. — 1995. — 31, № 6. — P. 3509–3511.
2. Зирка С. Е., Мороз Ю. И. Моделирование магнитного гистерезиса на основе обобщенных правил Маделунга // Техн. электродинамика. — 1999. — № 1. — С. 22–27; № 2 1999, С. 7–13.
3. Jiles D. C. Thoenke J. B. Theory of ferromagnetic hysteresis: determination of model parameters from experimental hysteresis loops // IEEE Transactions on Magnetics. — 1989. — 25, № 5. — P. 3928–3930.
4. Рейнбот Г. Магнитные материалы и их применение. — Л.: Энергия, 1974.
5. Preisach modelling of magnetisation changes in steel / S. F. H. Parker, C. A. Faunce, P. J. Grundy et al. // J. of Magnetism and Magnetic Materials. — 1995. — 145. — P. 51–56.
6. Красносельский М., Покровский А. Системы с гистерезисом. — М.: Наука, 1983. — 277 с.
7. Torre E. D. A Preisach Model for Accommodation / IEEE Trans. Magn. — 1994. — 30, № 5. — P. 2701–2707.
8. Гузев В. Т., Гузев С. Т. Основы судовой магнитоэлектродинамики. — М.: В/О «Мортехинформреклама», 1985. — 48 с.
9. Белов К. П. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных материалах. — М.-Л.: ГИТТЛ, 1951.
10. Большаков В. Н., Горбаш В. Г., Кулик А. Ф. Прибор для контроля механических напряжений по измерению локальной остаточной намагниченности // Дефектоскопия: Ч. I. — 1999. — № 1. — С. 22–27. Ч. II. — 1999. — № 2. — С. 7–13.

Поступила в редакцию  
11.07.2006