

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПО ЗНАЧЕНИЯМ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ

Д.П. Мохнаткин*, Г.М. Завьялова

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, Санкт-Петербург, ул.Ждановская, 13, Россия

*e-mail: t9119420944@yandex.ru

Аннотация. Изучено изменение значений круговой диаграммы зависимости коэрцитивной силы от угла намагничивания при переходе схемы нагружения двутавровой балки из стали 10 (P1.1.Z.AN) от симметричного изгиба к изгибу со стеснённым кручением при упругих деформациях в зоне сжатия. Обоснована необходимость построения круговой диаграммы коэрцитивной силы от угла намагничивания в зоне контроля для получения информации о направлении главных напряжений при определении напряженно-деформированного состояния металлоконструкции.

Ключевые слова: направление главных напряжений, упругое деформирование, угол намагничивания, коэрцитивная сила

1. Введение

В настоящее время магнитный метод неразрушающего контроля является одним из перспективных методов для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) металлоконструкций. По данной тематике опубликовано немало работ [1-29]. Результаты исследований по изучению влияния разной степени упругих и пластических деформаций на магнитные характеристики металлов описаны в работах [2,8,10,15,19,24,25,29], в частности, подобное влияние для образцов с наведенной магнитной анизотропией описано в работе [17]. Закономерностям изменения от внешних силовых воздействий такого наиболее перспективного и часто применяемого параметра магнитного контроля, как коэрцитивная сила, адресованы работы [3,9,11,12,18]. Целый ряд работ посвящен учету особенностей и погрешностей, связанных с применением прикладных преобразователей [1,4,5,6,7], именно они чаще всего применяются при магнитном контроле массивных объектов. В работе [16] получены зависимости магнитных характеристик стали при упругом одноосном растяжении на образцах из высокопрочной трубной стали с предварительной пластической деформацией. Если в большинстве работ по этой тематике уделено внимание поведению магнитных характеристик металла при нормальных напряжениях, то в работе [14] показана такая зависимость и от касательных напряжений в том числе. Успешно используются полученные зависимости в практически реализованных методах для определения НДС и остаточного ресурса металлоконструкций, такие примеры описаны в работах [21,22]. Все научные результаты в этой области основываются на теории, объясняющей механизмы влияния внешних напряжений на магнитные характеристики ферромагнетиков (в частности, коэрцитивную силу), и описаны в работах [9,20,23].

Во всех способах реализации данного метода фигурируют значения коэрцитивных сил, измеренных вдоль и поперек линии «действия» напряжений, но мало внимания уделено тому, как определить направление главных напряжений. Особенна актуальна данная проблема на практике, где сложнонапряженное состояние является нормой эксплуатации металлоконструкций. Так, металлоконструкции пусковых столов стартовых комплексов ракет космического назначения испытывают нагрузки с большим процентом случайности параметров вектора воздействия и по направлению, и по значению, что исключает симметричное и сбалансированное силовое воздействие на них. Сложнонапряженное состояние, возникающее при одновременном действии гидростатического напора, растяжения и кручения, также характерно при эксплуатации трубных систем.

Настоящая работа посвящена изучению изменяющихся значений коэрцитивной силы, измеренной в одной точке, но в разных направлениях, от условий нагрузки с целью обоснования необходимости учета угла намагничивания при определении направления и значения главных напряжений.

2. Методика проведения исследований

При решении указанной задачи были проведены экспериментальные исследования. Объектом исследования служила двутавровая балка из стали 10 десятого профиля длиной 1100 мм. Для формирования желаемых схем нагружения применялась установка для механических испытаний Р-30, позволяющая обеспечить изгиб балки с требуемым усилием в упругой зоне деформации, и набор опор для реализации схем действия, как только нормальных напряжений в зоне контроля (Рис. 1а), так и в сочетании с касательными (Рис. 1б).

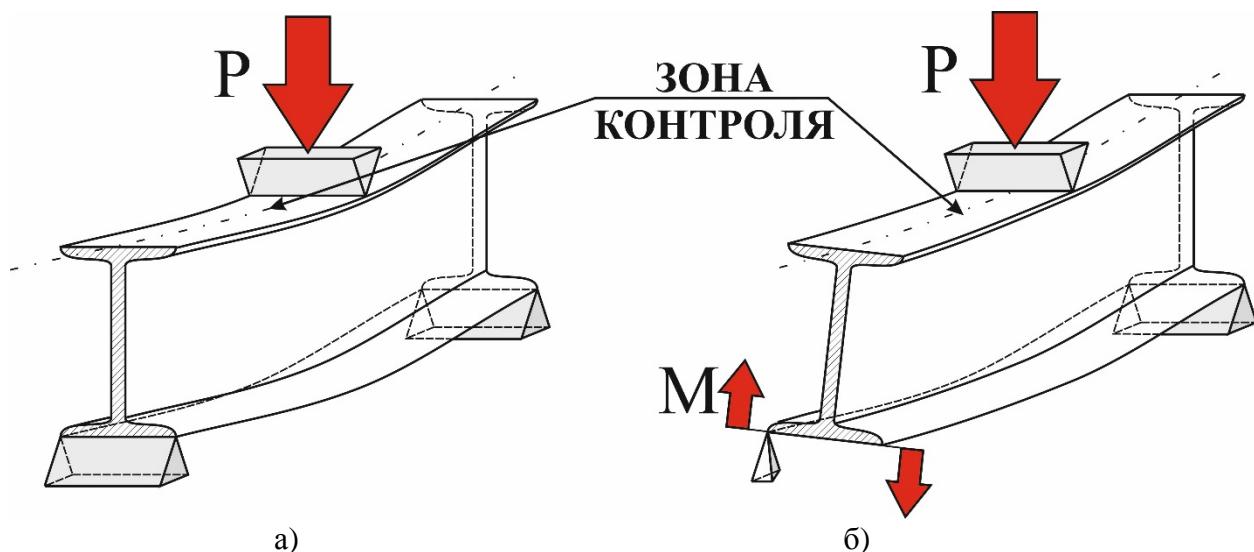


Рис. 1. Схемы нагружения двутавровой балки: а – симметричная; б – асимметричная с кручением

Для реализации указанных схем нагрузка прилагалась в верхней части по центру балки. При этом, обеспечивая наличие только нормальных напряжений в сечении, изгибающему усилию подвергалась балка, установленная краями на широкие роликовые опоры (Рис. 1а). При реализации второй схемы нагружения одна из роликовых опор была заменена на точечную, установленную с краю балки. Под действием нагрузки по центру балки в районе точечной опоры создавался крутящий момент, который и обеспечивал наличие касательных напряжений в сечении в

дополнение к нормальным от изгибающего усилия в вертикальной плоскости. Так же в условиях стесненного кручения, добавились нормальные напряжения от растяжения в горизонтальной плоскости по верхнему краю балки в районе ролика нагружения со стороны противоположной точечной опоре. Таким образом, при реализации второй схемы нагружения создавалось сложнонапряженное состояние двутавровой балки (Рис. 1б).

Для магнитных измерений использовали два прибора – КИМ-2М и КРМ-Ц. Выбор указанных приборов обуславливался тем, что приставные электромагнитные устройства (ПЭМУ) удобно использовать при локальном намагничивании участков контролируемых конструкций, дополнительно они дают возможность изменять направление намагничивания относительно направления действующих нагрузок. Площадь поперечного сечения полюсов приставных электромагнитов составляла $S_{\text{пол}} = 5 \times 15 \text{ мм}$ для КИМ-2М и $S_{\text{пол}} = 15 \times 30 \text{ мм}$ для КРМ-Ц. Расстояние между полюсами $L_{\text{пол}} = 15 \text{ мм}$ и $L_{\text{пол}} = 35 \text{ мм}$ соответственно. Размеры ПЭМУ указанных приборов позволяли разворачивать их вокруг своей оси на поверхности балки в зоне контроля (Рис. 2).

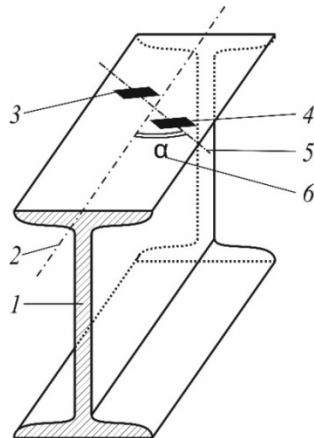


Рис. 2. Схема контроля двутавровой балки: 1 – сечение; 2, 5 – оси балки и ПЭМУ соответственно; 3, 4 – места приложения полюсов ПЭМУ; 6 – угол намагничивания

Исследования проводились в три этапа. На первом этапе снимались показания указанными приборами на балке без нагрузки в четырех направлениях, при этом угол намагничивания α составлял 0, 45, 90 и 135°. На втором этапе измерения в тех же направлениях проводили на балке под нагрузкой в соответствии со схемой, показанной на Рис. 1а. Прилагаемое усилие обеспечило максимальное нормальное напряжение сжатия в зоне контроля в 166 МПа – это 80% от предела текучести используемой стали. На третьем этапе показания приборов снимались в указанных направлениях в той же точке и с таким же усилием в 2,5 тонны только при реализации второй схемы нагружения (Рис. 1б). На всех трех этапах исследования зона контроля не менялась.

3. Результаты исследований и их обсуждение

На Рисунках 3 и 4 в виде круговых диаграмм $H_C = f(\alpha)$ приведены результаты измерений коэрцитивной силы на двутавровой балке из стали 10, полученные с помощью серийных приборов КИМ-2М (Рис. 3) и КРМ-Ц (Рис. 4).

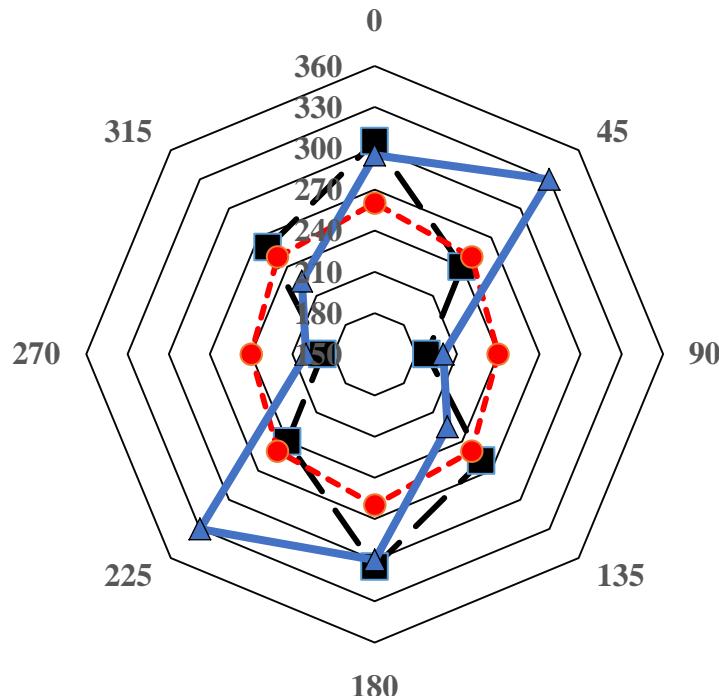


Рис. 3. Круговая диаграмма значений коэрцитивной силы [А/м], измеренной прибором КИМ-2М, от угла намагничивания $H_{C1}=f(\alpha)$:

● – состояние без нагрузки; ■ – с симметричной нагрузкой; ▲ – в сложнонапряженном состоянии

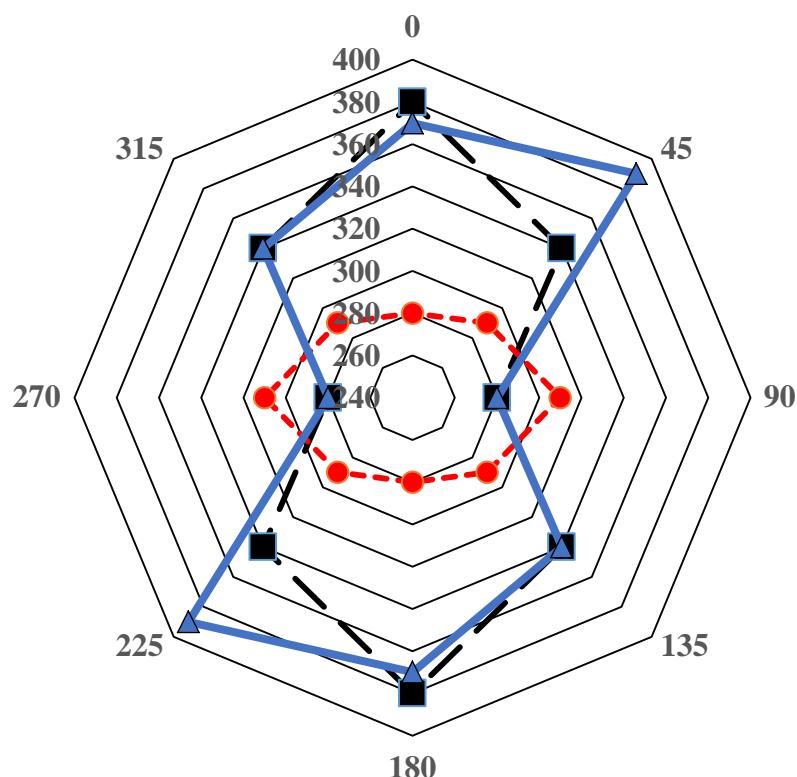


Рис. 4. Круговая диаграмма значений коэрцитивной силы [А/м], измеренной прибором КРМ-Ц, от угла намагничивания $H_{C2}=f(\alpha)$:

● – состояние без нагрузки; ■ – с симметричной нагрузкой; ▲ – в сложнонапряженном состоянии

Предыстория механических нагрузений балки неизвестна, однако уровень коэрцитивной силы свидетельствует о том, что незначительная пластическая деформация имеет место. Этот вывод можно сделать по степени отдаленности формы круговой диаграммы $H_C = f(\alpha)$, построенной по результатам измерения ненагруженной балки, от окружности. Из диаграммы, построенной по результатам измерения прибором КИМ-2М (Рис. 3), видно, что $H_{C1}(0^\circ) = 1,083H_{C1}(90^\circ)$.

Так как численный коэффициент превышает значения относительной погрешности прибора, которая составляет около 8% в измеряемом диапазоне, то по нему можно судить о наличии пластической деформации сжатия в направлении $\alpha=0^\circ$, однако ее уровень не помешает дальнейшим исследованиям. При рассмотрении круговой диаграммы, построенной по данным с КРМ-Ц (Рис. 4), на балке без нагрузки видно, что $H_{C2}(0^\circ) = 0,9H_{C2}(90^\circ)$ (отношение этих значений тоже больше относительной погрешности прибора, которая составляет около 4% для рассматриваемого диапазона), то есть форма диаграммы вытянута больше в поперечном направлении. Происходит это по причине того, что расстояние между внешними границами полюсов ПЭМУ КРМ-Ц совпадает с шириной балки, а значит, на показания прибора оказывает влияние так называемый *краевой эффект*, когда физический размер ферромагнетика ограничивает пространство для магнитного потока от приставного электромагнита.

При рассмотрении круговых диаграмм, полученных при симметричном нагружении балки, видно, что $H_C(0^\circ)$ значительно увеличивает, а $H_C(90^\circ)$ заметно уменьшает свое значение. Диаграммы принимают вид своеобразной «восьмерки», которая направлением своих максимальных значений указывает на линию главных напряжений сжатия. В зоне растяжения изменение этих параметров обратное [26].

Для расчета главных (эквивалентных) напряжений, напряженно-деформированного состояния двутавровой балки использовался программный комплекс ANSYS Mechanical 15.0 (Рис. 5).

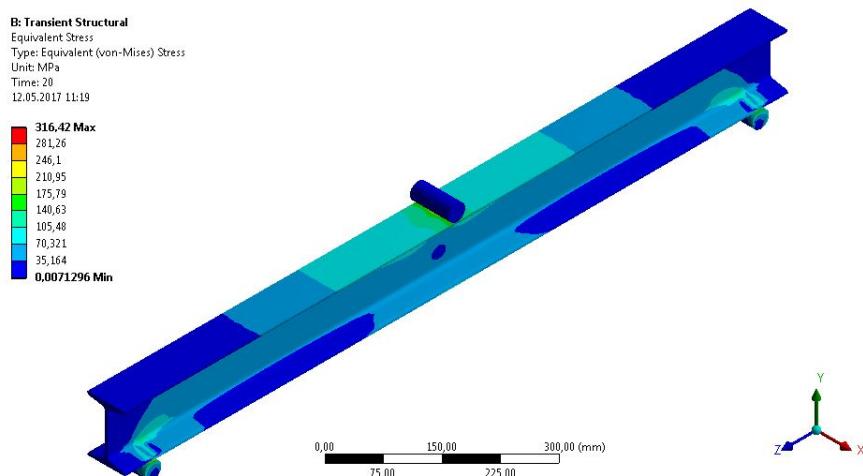


Рис. 5. Определение главных напряжений при симметричной нагрузке двутавровой балки

Необходимо отметить, что показания разных приборов имеют некоторые различия при одинаковых условиях получения значений коэрцитивной силы. Это связано с различными характеристиками ПЭМУ, в частности, площади поперечного сечения магнитопровода. У прибора КРМ-Ц она в 6 раз больше, чем у КИМ-2М, и именно эта характеристика определяет глубину промагничивания металла по выводам работы [1]. Характерно, что в нашем случае $H_{C1} = (0,7 - 0,78)H_{C2}$ абсолютно по всем измеряемым направлениям. Это дает возможность применять поправочный

коэффициент при использовании всего одной зависимости $H_C = f(\sigma)$, полученной любым из этих приборов.

В случае применения такого диагностического признака, как анизотропия коэрцитивной силы (ΔH_C), а по сути, разницы между $H_C(90^\circ)$ и $H_C(0^\circ)$, отметим, что значения ΔH_C для двух разных приборов одинаковы при одинаковой нагрузке и составят $(105 \pm 5) \text{ A/m}$. Этот факт дает преимущество в выборе диагностического признака нормальных напряжений именно ΔH_C , как величине, не зависящей от типа прибора и его датчика. Зависимость $\Delta H_C = f(\sigma)$ для этой балки показана в работе [27].

В сложнонапряженном состоянии балки (в нашем случае изгиб со стесненным кручением) круговая диаграмма меняет значение своего максимума, его новое направление $\alpha=45^\circ$ регистрируют оба прибора. Приращение значений в этом направлении существенное $H_{C1}(45^\circ) = -1,12H_{C1}(0^\circ)$ для КИМ-2М и $H_{C2}(45^\circ) = 1,06H_{C2}(0^\circ)$ для КРМ-Ц. Существенной может оказаться и ошибка, если при наличии касательных напряжений измерения производить вдоль оси симметрии балки. Анизотропия коэрцитивной силы, судя по показаниям КИМ-2М, вдоль направления $\alpha=45^\circ$ также на 10% больше, чем анизотропия в направлении, соосном балке ($\alpha=0^\circ$), что соответствует расчетной схеме при сложнонапряженном состоянии (Рис. 6). При рассмотрении расчетной схемы проясняется причина снижения значений показателей $H_{C1}(0^\circ)$ и $H_{C2}(0^\circ)$, один из полюсов ПЭМУ (ближний к линии нагружения) попадает в зону меньших напряжений, обозначенной цифрой 1 на Рис. 6. Однако КРМ-Ц не показал прироста $\Delta H_{C2}(45^\circ)$ по сравнению $\Delta H_{C2}(0^\circ)$, это связано с тем, что при измерении $H_{C2}(135^\circ)$ полюс ближний к линии нагружения попадает в зону повышенных напряжений, обозначенной цифрой 2 на Рис. 6. В этой зоне складываются напряжения сжатия от изгибов в двух плоскостях. Дополнительным фактором искажений показаний КРМ-Ц является масштабный фактор. Влияние толщины металла объекта контроля на показания коэрцитиметра описаны в работе [28].

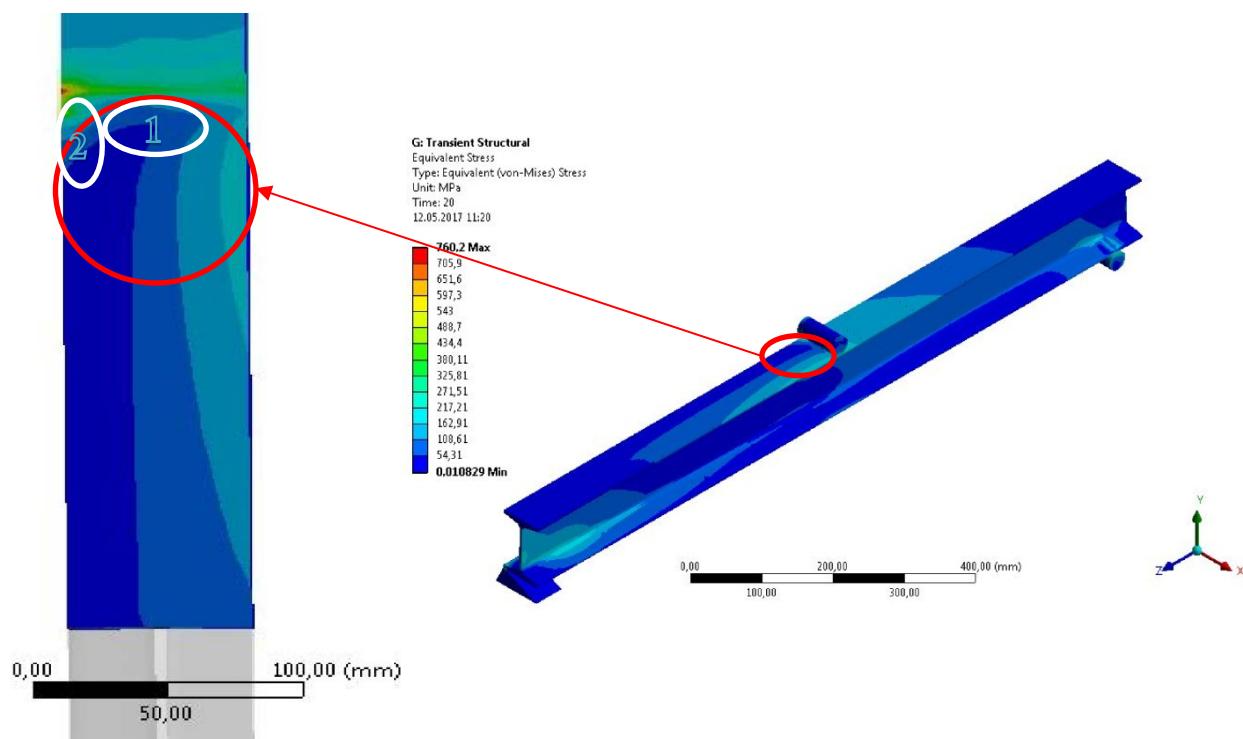


Рис. 6. Определение главных напряжений при реализации изгиба со стеснённым кручением двутавровой балки

Схема нагружения двутавровой балки, показанная на Рис. 6, характерна тем, что при стеснённом кручении в зоне контроля нормальные напряжения сжатия от изгиба в вертикальной плоскости частично компенсируются нормальными напряжениями растяжения на одной из кромок балки при изгибе в горизонтальной плоскости (зона 1 на Рис. 6). Таким образом, линии главных напряжений описывают дуги с большим отклонением от оси симметрии балки со стороны линии соприкосновения с роликом нагружения, что и фиксируют используемые в эксперименте коэрцитиметры. Подобные, сложные конструкции полей напряжения не поддаются точному анализу при эксплуатации, даже с исчерпывающими исходными данными. Однако при оценивании НДС элементов металлоконструкции необходимо учитывать направление действия главных напряжений, таким образом определять их максимальное значение в зоне контроля.

4. Выводы

Проведенный эксперимент показал, что с помощью коэрцитиметрического метода магнитного контроля возможно определение направления главных напряжений в точке контроля элемента металлоконструкции. Сделать это можно по экстремальным значениям коэрцитивной силы на круговой диаграмме в зоне контроля. Кроме того, показано, что при одинаковом усилии в частном случае сложнонапряженного состояния на балке регистрируется уменьшение значений коэрцитивной силы в соосном с ней направлении по сравнению со схемой симметричной нагрузки. Поэтому учет показаний прибора только в направлениях $\alpha=0^\circ$ и $\alpha=90^\circ$ может привести к существенной ошибке в определении напряженно-деформированного состояния объекта контроля. Однако при построении круговой диаграммы необходимо учитывать и масштабный фактор, и параметры используемого прибора.

Использование приборов с разными характеристиками ПЭМУ показали, что большую корреляцию с расчетными данными дает прибор с меньшим расстоянием между полюсами магнитопровода своего датчика.

Показано, что при выборе диагностического параметра НДС металлоконструкции магнитным методом контроля рядом преимуществ обладает анизотропия коэрцитивной силы.

Благодарности. *Никакого внешнего финансирования для этого исследования получено не было.*

Литература

- [1] Бида ГВ. О глубине намагничивания массивных изделий приставным электромагнитом и глубине контроля эксплуатационных свойств. *Дефектоскопия*. 1999;9: 70-81.
- [2] Горкунов ЭС, Царькова ТП, Смирнов СВ, Вичужанин ДИ, Емельянов ИГ, Кузнецов ВЮ. Влияние отклонений от соосности между направлениями намагничивания и наложения механической нагрузки на результаты магнитного контроля упругих деформаций в сталях. *Дефектоскопия*. 2004;5: 40-52.
- [3] Захаров ВА, Ульянов АИ, Горкунов ЭС. Коэрцитивная сила ферромагнитных сталей при двухосном симметричном растяжении материала. *Дефектоскопия*. 2011;6: 3-15.
- [4] Гусев АП. Гистерезис магнитного поля поверхностных дефектов различных сталей при намагничивании приставным электромагнитом. *Дефектоскопия*. 2015;10: 24-32.
- [5] Валиев ММ. Расчет магнитного сопротивления неплоскопараллельного воздушного зазора магнитной системы. *Дефектоскопия*. 2004;5: 24-31.
- [6] Бида ГВ. Влияние зазора между полюсами приставного электромагнита и

контролируемой деталью на показания коэрцитиметра и способы его уменьшения. *Обзор. Дефектоскопия.* 2010;11: 62-81.

[7] Ничипурук АП, Бида ГВ, Царькова ТП, Гобов ЮЛ, Сташков АН, Повоцкая АМ. О снижении влияния зазора на результат коэрцитиметрии при учете свойств приставного преобразователя. *Дефектоскопия.* 2010;8: 45-53.

[8] Горкунов ЭС, Федотов ВП, Бухвалов АБ, Веселов ИН. Моделирование диаграммы деформирования на основе измерения ее магнитных характеристик. *Дефектоскопия.* 1997;4: 87-95.

[9] Кулев ВГ, Горкунов ЭС. Механизмы влияния внутренних и внешних напряжений на коэрцитивную силу ферромагнитных сталей. *Физика и химия обработки материалов.* 1997;5: 3-18.

[10] Бида ГВ, Кулев ВГ. Влияние упругой деформации на магнитные свойства сталей с различной структурой. *Дефектоскопия.* 1998;11: 12-26.

[11] Захаров ВА, Боровикова МА, Комаров ВА, Мужицкий ВФ. Влияние внешних напряжений на коэрцитивную силу углеродистых сталей. *Дефектоскопия.* 1992;1: 41-46.

[12] Новиков ВФ, Яценко ТА, Бахарев МС. Зависимость коэрцитивной силы малоуглеродистых сталей от одноосных напряжений (часть 1). *Дефектоскопия.* 2001;11: 51-57.

[13] Горкунов ЭС, Захаров ВА, Мужицкий ВФ, Ульянов АИ, Чулкина АА. Влияние упругой и пластической деформаций на коэрцитивную силу пористых ферромагнитных материалов. *Дефектоскопия.* 2005;10: 5-12.

[14] Горкунов ЭС, Повоцкая АМ, Соловьев КЕ, Задворкин СМ. Влияние магнитоупругого эффекта на гистерезисные свойства среднеуглеродистой стали при одноосном нагружении. *Дефектоскопия.* 2010;9: 17-25.

[15] Бида ГВ. Магнитный метод оценки одноосновных упругих напряжений растяжения и сжатия. *Дефектоскопия.* 2011;8: 64-75.

[16] Горкунов ЭС, Субачев ЮВ, Повоцкая АМ, Задворкин СМ. Влияние предварительной пластической деформации на поведение магнитных характеристик высокопрочной трубной стали контролируемой прокатки при упругом одноосном растяжении (сжатии). *Дефектоскопия.* 2015;9: 49-60.

[17] Ничипурук АП, Сташков АН, Огнева МС, Королев АВ, Осипов А.А. Наведенная магнитная анизотропия в пластически деформированных растяжением пластинах из низкоуглеродистой стали. *Дефектоскопия.* 2015;10: 19-23.

[18] Мусихин СА, Новиков ВФ, Барсенко ВН. Об использовании коэрцитивной силы в качестве индикаторного параметра при неразрушающем контроле механических напряжений. *Дефектоскопия.* 1987;9: 57-59.

[19] Михеев МН, Кулев ВГ, Нестеренко ВВ, Ригмант МБ, Михайловская ГИ, Немков ВЛ, Лобанова ЛВ. Новый способ неразрушающего контроля механических свойств изделий из среднеуглеродистых сталей. *Дефектоскопия.* 1987;7: 3-7.

[20] Кондорский ЕИ. К вопросу о природе коэрцитивной силы и необратимых изменениях при намагничивании. *Журнал экспериментальной и теоретической физики.* 1937;9/10: 1117-1131.

[21] Безлюдько ГЯ, Мужицкий ВФ, Попов БЕ. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подъемных сооружений и сосудов, работающих под давлением. *Дефектоскопия.* 2001;1: 38-46.

[22] Горкунов ЭС, Задворкин СМ, Весслов ИН, Митропольская СЮ, Ничужанин ДИ. Влияние одноосного растяжения на магнитные характеристики трубной стали 12ГБ, подвергнутой воздействию сероводорода. *Дефектоскопия.* 2008;8: 67-76.

- [23] Ничипурук АП, Розенфальд ЕВ, Огнева МС, Сташков АН, Королев АВ. Экспериментальный метод оценки критических полей смещающихся доменных границ в пластически деформированных растяжением проволоках из низкоуглеродистой стали. *Дефектоскопия*. 2014;10: 18-26.
- [24] Федотов ВП, Бида ГВ, Ничипурук АП. Построение упругопластических диаграмм нагружения конструкционных сталей по магнитным свойствам. *Дефектоскопия*. 2011;9: 17-24.
- [25] Костин ВН, Царьков ТП, Ничипурук АП, Лоскутов ВЕ, Лопатин ВВ, Костин КВ. Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов. *Дефектоскопия*. 2009;11: 54-66.
- [26] Алексеев КВ, Мохнаткин ДП, Лебедев ЕЛ. Определение направления напряжений в упругой зоне деформации стальных конструкций при их магнитном контроле. *Фундаментальные исследования*. 2015;12: 9-12.
- [27] Лебедев ЕЛ, Алексеев КВ, Мохнаткин ДП. Коэрцитивная сила как определяющий показатель напряженности металла при его упругих деформациях. *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. 2015;648: 157-160.
- [28] Лебедев ЕЛ, Мохнаткин ДП, Смуров СА. Анализ влияния масштабного фактора на оценивание напряженного состояния металлоконструкций магнитным методом контроля. *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. 2016;652: 187-193.
- [29] Горкунов ЭС, Субочев ЮВ, Повоцкая АМ, Задворкин СМ. Влияние упругой деформации на гистерезисные свойства двухслойного ферромагнетика, составленного из компонентов, обладающих магнитострикцией разных знаков. *Дефектоскопия*. 2014;8: 42-56.

DETERMINATION OF THE DIRECTION OF THE PRINCIPAL STRESSES IN THE ELEMENTS OF STEEL STRUCTURES BY THE VALUES OF THE COERCIVE FORCE

D.P. Mokhnatkin*, G.M. Zav'yalova

A.F. Mozhaisky Military Space Engineering Academy, Saint Petersburg, Russia

*e-mail: t9119420944@yandex.ru

Abstract. The change of values of circular diagram of the coercive force on the magnetization angle at the transition of loading scheme of I-beam made of steel 10 (P1.1.Z.AN) from symmetric bending to bending with constrained torsion at elastic deformations in the compression zone was studied. The necessity of constructing a circular diagram of the coercive force from the magnetization angle in the control zone to obtain information about the direction of the principal stresses when determining the stress-strain state of steel structure is substantiated.

Keywords: principal stress, elastic deformation, magnetization angle, coercive force, steel structure

Acknowledgements. No external funding was received for this study.

References

- [1] Bida GV. About the depth of magnetization of massive products with an auxiliary electromagnet and the depth of monitoring of operational properties. *Defektoskopiya*. 1999; 9: 70-81. (In Russian)
- [2] Gorkunov ES, Tsar'kova TP, Smirnov SV, Vichuzhanin DI, Emel'yanov IG, Kuznetsov VY. Effect of deviation from coaxiality between the directions of magnetization and mechanical strain on the results of magnetic testing of elastic strain in steels. *Russian Journal of Non-destructive Testing*. 2004;40(5): 317-325.
- [3] Zakharov VA, Ul'yanov AI, Gorkunov ES. Coercive force of ferromagnetic steels under the biaxial symmetrical tension of a material *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2011;47(6): 359-368.
- [4] Gusev AP. Hysteresis of the magnetic field of surface flaws in different steels during magnetization with an attachable electromagnet. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015;51(10): 616-623.
- [5] Valiev MM. Calculation of the magnetic resistance of a non-plane-parallel air gap of a magnetic system. *Defektoskopiya*. 2004;5: 24-31. (In Russian)
- [6] Bida GV. The effect of a gap between the poles of an attachable electromagnet and a tested component on coercimeter readings and methods for decreasing it (review). *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2010;46(11): 836-853.
- [7] Nichipuruk AP, Bida GV, Tsar'kova TP, Gobov YL, Stashkov AN, Povolotskaya AM. Decrease in the effect of a gap on coercimetry results when taking the properties of an attachable transducer into account. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2010;46(8): 580-586.

- [8] Gorkunov ÉS, Fedotov VP, Bukhvalov AB, Veselov IN. Simulating a strain diagram from magnetic-characteristics measurements. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 1997;33(4): 272-278.
- [9] Kuleev VG, Gorkunov ÉS. Influence of inside and outside stresses upon coercive force of ferromagnetic steels. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 1997;5: 3-18. (In Russian)
- [10] Bida GV, Kuleev VG. Effect of elastic deformation on the magnetic properties of steels having different structures. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 1998;34(11): 783-794.
- [11] Zakharov VA, Borovkova MA, Komarov VA, Muzhitskij VF. Influence of external tensiles upon coercivity of carbon steels. *Defektoskopiya*. 1992;1: 41-46. (In Russian)
- [12] Novikov VF, Yatsenko TA, Basharev MS. Coercive force of low-carbon steels as a function of uniaxial stress. Part I. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2001;37(11): 799-804.
- [13] Gorkunov ES, Zakharov VA, Muzhitskii VF, Ul'yanov AI, Chulkina AA. Effect of elastic and plastic deformations on the coercive force of porous ferromagnetic materials. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2005;41(10): 627-631.
- [14] Gorkunov ES, Solov'ev KE, Povolotskaya AM, Zadvorkin SM. Effect of the magnetoelectric effect on the hysteresis properties of medium-carbon steel under uniaxial loading. *Defektoskopiya*. 2010;9: 17-25. (In Russian)
- [15] Bida GV. Magnetic method for estimating uniaxial compressive and tensile elastic stresses. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2011;47(8): 551-560.
- [16] Gorkunov ES, Subachev YV, Povolotskaya AM, Zadvorkin SM. The influence of a preliminary plastic deformation on the behavior of the magnetic characteristics of high-strength controllably rolled pipe steel under an elastic uniaxial tension (compression). *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015;51(9): 563-572.
- [17] Nichipuruk AP, Stashkov AN, Ogneva MS, Korolev AV, Osipov AA. Induced magnetic anisotropy in low-carbon steel plates subjected to plastic deformation by stretching *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015;51(10): 610-615.
- [18] Musikhin SA, Novikov VF, Barsenko VN. On the use of coercive force as an indicator parameter for non-destructive testing of mechanical stresses. *Defektoskopiya*. 1987;9: 57-59. (In Russian)
- [19] Mikheev MN, Kuleev VG, Nesterenko VV, Rigmant MB, Mikhailovskaya GI, Nemov VL, Lobsnova LV. A new method of non-destructive testing of mechanical properties of products made of medium-carbon steels. *Defektoskopiya*. 1987;7: 3-7. (In Russian)
- [20] Kondorskiy EI. On the nature of the coercive force and irreversible changes in magnetization. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1937;9/10: 1117-1131. (In Russian)
- [21] Muzhitskii VF, Popov BE, Bezlyud'ko GY. Magnetic measurements of stressed-strained states and remaining service lives of steel structures in hoisting machines and pressurized vessels. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2001;37(1): 29-36.
- [22] Gorkunov ES, Zadvorkin SM, Veselov IN, Mitropol'skaya SY, Vichuzhanin DI. Influence of uniaxial tension on magnetic characteristics of the 12γcyrillic capital letter be pipe steel exposed to hydrogen sulfide. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2008; 44(8): 566-573.
- [23] Nichipuruk AP, Rozenfel'd EV, Ogneva MS, Stashkov AN, Korolev AV. An experimental method for evaluating the critical fields of moving domain boundaries in plastically tension-deformed low-carbon wires. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014;50(10): 566-573.
- [24] Fedotov VP, Bida GV, Nichipuruk AP. Construction of elastic-plastic diagrams of structural steel loading by magnetic properties. *Defektoskopiya*. 2011;9: 17-24. (In Russian)

- [25] Kostin VN, Tsar'kova TP, Loskutov VE, Kostin KV, Nichipuruk AP, Lopatin VV. Irreversible changes in the magnetization as indicators of stressed-strained state of ferromagnetic objects. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2009;45(11): 786-796.
- [26] Alekseev KV, Mokhnatkin DP, Lebedev EL. Determination of the direction of stresses in the elastic zone of deformation of steel structures during their magnetic control. *Basic research*. 2015;12: 9-12. (In Russian)
- [27] Alekseev KV, Mokhnatkin DP, Lebedev EL. Coercive force as a determining indicator of the strength of a metal under its elastic deformations. *Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky*. 2015;648, 157-160. (In Russian)
- [28] Lebedev EL, Mokhnatkin DP, Smurov SA. Analysis of the influence of the scale factor on the assessment of the stress state of metal structures by the magnetic control method. *Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky*. 2016;652: 187-193. (In Russian)
- [29] Gorkunov ES, Subachev YV, Povolotskaya AM, Zadvorkin SM. The influence of elastic deformations on the hysteresis properties of a two-layer ferromagnet composed of components with magnetostrictions of opposite signs. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014;50(8): 469-480.