

УДК 620.179.1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРУГОЙ ЗОНЕ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИХ МАГНИТНОМ КОНТРОЛЕ

Алексеев К.В., Мохнаткин Д.П., Лебедев Е.Л.

ФГКВООУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»,  
Санкт-Петербург, e-mail: vka@mil.ru

В работе представлена методика определения направления действующих напряжений при использовании магнитного метода неразрушающего контроля металлоконструкций. Методика учитывает влияние угла намагничивания относительно линии нагружения на значение коэрцитивной силы и позволяет определить направление напряжений в упругой зоне деформирования стальных конструкций. Описан проведенный эксперимент с изгибом двутавровой балки профилем № 10. Поперечный изгиб балки позволил получить зоны растяжения и сжатия в металле с одинаковыми показателями напряжений. Выбор нагрузки производился из расчета обеспечения только упругих деформаций, чтобы напряжения не превышали предел текучести. Показаны и описаны зависимости изменения коэрцитивной силы объекта контроля от угла между линией напряжений и осью приставного магнитного устройства прибора для двух различных зон деформации.

**Ключевые слова:** магнитный контроль, механические напряжения, коэрцитивная сила, направление напряжений

## DETERMINE THE DIRECTION OF THE STRESS IN THE ELASTIC ZONE OF DEFORMATION OF STEEL STRUCTURES USING A MAGNETIC CONTROL

Alekseev K.V., Mokhnatkin D.P., Lebedev E.L.

Mozhaisky Military Space Academy, Sankt-Petersburg, e-mail: vka@mil.ru

The paper presents the method of determining the direction of the effective stresses using the magnetic method of nondestructive control of metal structures. The method takes into account the influence of the angle of magnetization relative to the line of loading on the value of the coercive force and to determine the direction of the stresses in the elastic zone of deformation of steel structures. Described the experiment with the bending of the I-beam profile № 10. Transverse bending of the beam allowed us to obtain zones of tension and compression in the metal with the same indicators of stress. Load selection was made based ensure only elastic deformation, so that the voltage does not exceed the yield strength. Shown and described according to the changes of the coercive force of the testing object from the angle between the line voltages and the axis side of the magnetic device for two different deformation zones.

**Keywords:** magnetic control, stress, coercive force, the direction of the stress

В отношении большинства объектов повышенной опасности (подъемные краны, лифты, сосуды, котлы и т.п.) остро стоит проблема определения их остаточного ресурса, несущей способности, значений действующих напряжений в несущих элементах металлоконструкций при продлении их срока эксплуатации, производстве их ремонта. Во многом эти задачи по объективной оценке состояния металлоконструкций решаются уже сейчас с помощью коэрцитиметрического метода контроля [1, 2, 5, 9].

Особо важным при контроле металлоконструкций является определение направления действующих напряжений. Для металлоконструкций, схема исполнения которых не дает возможности однозначно определения направления действующей нагрузки (растянуто контролируемая балка или сжата), невозможно по одному значению коэрцитивной силы решить данную задачу [3, 4]. Это значит, что невозможно оце-

нить техническое состояние исследуемой металлоконструкции. Например, для усиления вертикальных колонн несущего металлического каркаса здания (сооружения) необходимо знать, под какой из колонн грунт опустился, а какая колонна испытывает повышенные нагрузки на сжатие, хотя значения коэрцитивных сил для таких колонн могут быть одинаковыми. Ниже описанный эксперимент показывает, что с помощью коэрцитиметра возможно определение зон растяжения и сжатия в металле, что не реализовано в существующих методиках.

**Цель исследования** заключается в определении зависимости изменения магнитных свойств (коэрцитивной силы) контролируемой стали при создании механических напряжений в зоне упругих деформаций от направления намагничивания относительно линии нагружения и в использовании данных зависимостей для разработки методики определения направления напряжений в металле.

### Материалы и методы исследования

Для исследования возможности определения направления механических напряжений с необходимой точностью и локальностью измерений магнитным методом (по коэрцитивной силе  $H_c$ ) использован коэрцитиметр импульсный микропроцессорный КИМ-2М с преобразователь МП-1 с плоскими полюсными наконечниками. Размеры полюсов магнитопровода –  $5 \times 10$  мм, расстояние между ними – 15 мм. Показания прибора не зависят от непостоянства зазора между изделием и приставным магнитным преобразователем в пределах от 0 до 0,7 мм. Погрешность измерения  $H_c$  составляет  $\pm 0,05$  А/см в диапазоне измерений 1–50 А/см. Для измерения  $H_c$  в абсолютных единицах выполняли градуирование прибора на образцах толщиной 3–5 мм с известными значениями коэрцитивной силы.

Исследования проведены на двутавровой балке профилем № 10, выполненной из стали 10, длиной 1100 мм. Поперечный изгиб балки осуществлялся на установке Р-30. При этом напряжения не превы-

шали предел пропорциональности, деформации являлись упругими. Схема деформирования показана на рис. 1, а. Применение накладного преобразователя позволило измерять  $H_c$  при различных углах намагничивания ( $\alpha$ ). Углом намагничивания –  $\alpha$  является угол между осью действующих напряжений и направлением намагничивания рис. 1, б. Измерения выполнялись как в зоне сжатия, так и в зоне растяжения (рис. 1, а).

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследований при поперечном изгибе балки для зон растяжения и сжатия металла представлены на рис. 2 и 3 соответственно. По радиальной шкале круговой диаграммы обозначена ось значений коэрцитивной силы ( $H_c$ ). Кривые  $H_c(\alpha)$  построены по средним из трех измерений значениям коэрцитивной силы для каждого направления намагничивания.

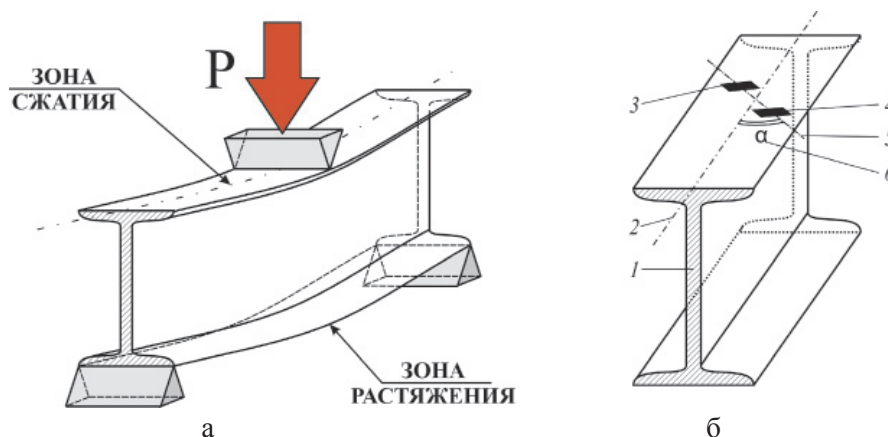


Рис. 1. Схема поперечного изгиба (а) и намагничивания участка двутавровой балки (б): 1 – сечение профиля; 2 – ось действующих напряжений; 3, 4 – позиции наконечников преобразователя; 5 – направление намагничивания; 6 – угол намагничивания  $\alpha$

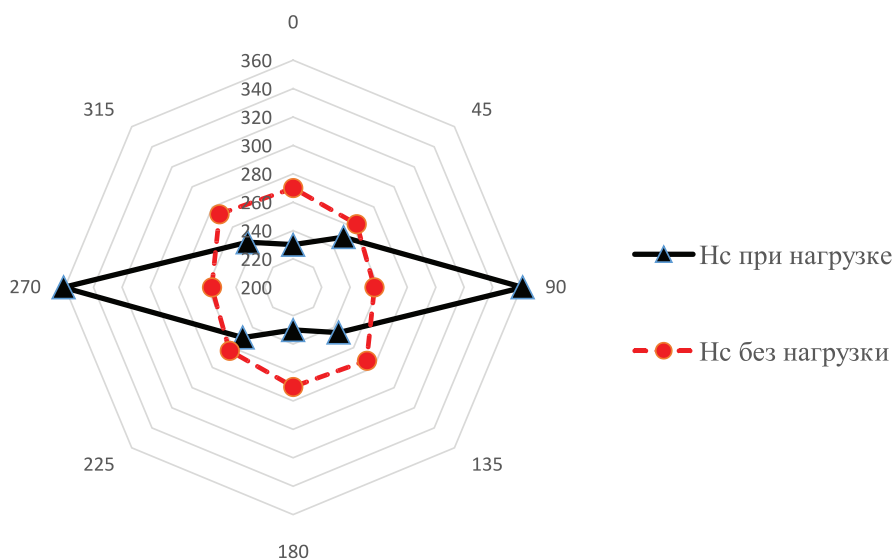


Рис. 2. Зависимость  $H_c = f(\alpha)$  для области растяжения двутавровой балки (профиль №10, сталь 10) при нагрузке на изгиб в упругой зоне деформаций

В условиях отсутствия деформации значения коэрцитивной силы одинаковы для всех направлений намагничивания и составляют 260–270 А/м.

В области упругих деформаций в зоне растягивающих напряжений коэрцитивная сила, измеренная поперёк линии действия напряжений ( $\alpha = 90^\circ; 270^\circ$ ), увеличилась свои показания относительно её значений без нагрузки. Приращение составило порядка 40% (рис. 2). Коэрцитивная сила, измеренная вдоль действующих напряжений ( $\alpha = 0^\circ; 180^\circ$ ), уменьшилась в данном случае на 15%.

В области сжимающих напряжений наблюдается обратная зависимость (рис. 3). Так, коэрцитивная сила, измеренная в направлении  $\alpha = 0^\circ$  ( $\alpha = 180^\circ$ ), изменяется в сторону увеличения (на 25%), а в направлении  $\alpha = 90^\circ$  ( $\alpha = 270^\circ$ ) коэрцитивная сила уменьшилась (на 15%).

магнитный момент соседнего уменьшается, что приводит к меньшим затратам энергии на переориентацию магнитного момента системы, а следовательно, и уменьшению значения коэрцитивной силы. При уменьшении ПКР в процессе перемагничивания необходимо преодолеть и силу обменного взаимодействия между атомами [8], что потребует больше энергии на данный процесс и неизменно приведёт к увеличению значений коэрцитивной силы.

Поэтому, согласно результатам, показанным на рис. 2, в области растяжения при  $\alpha = 0^\circ$  ( $\alpha = 180^\circ$ ) расстояние между атомами увеличивается. Это является причиной отрицательного приращения  $H_c$  (уменьшение значения  $H_c$  по сравнению с её значением без нагрузки). При  $\alpha = 90^\circ$  ( $\alpha = 270^\circ$ ) приращение  $H_c$  положительное по причине уменьшения ПКР.

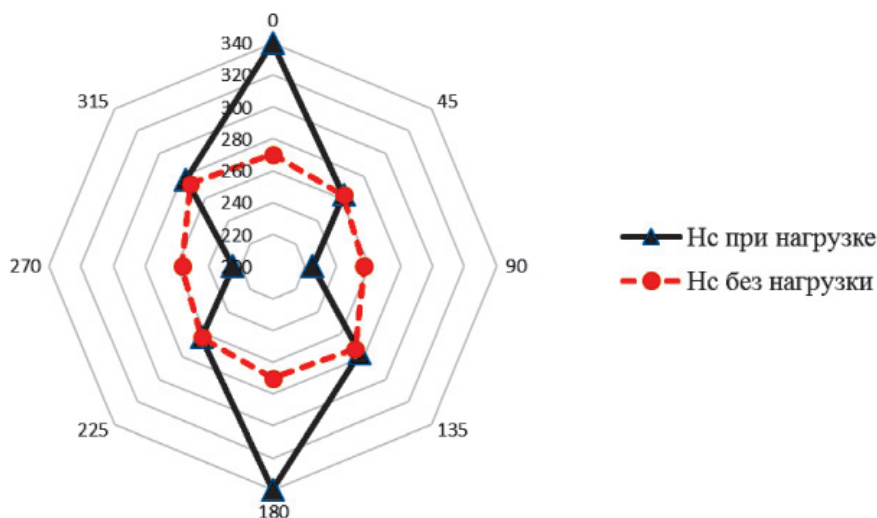


Рис. 3. Зависимость  $H_c = f(\alpha)$  для области сжатия двутавровой балки (профиль №10, сталь 10) при нагрузке на изгиб в упругой зоне деформаций

Полученные результаты объясняют-ся зависимостью коэрцитивной силы от значения параметра кристаллической решётки (ПКР). Безусловно, на значение коэрцитивной силы, как на комплексную характеристику структуры металла, влияют множество факторов, таких как уровень внутренних микронапряжений, толщина границ зерен, размер зёрен, наличие неферромагнитных включений, наличие различных фаз металла и др. Но в рассматриваемом случае при упругих деформациях наиболее значимым фактором является изменение расстояния между узлами (атомами) кристаллической решетки. Так, при увеличении ПКР влияние магнитного момента одного атома на

В области сжатия (рис. 3) при  $\alpha = 0^\circ$  ( $\alpha = 180^\circ$ ) наоборот, ПКР уменьшился, а при  $\alpha = 90^\circ$  ( $\alpha = 270^\circ$ ) увеличился, соответственно,  $H_c(0^\circ; 180^\circ)$  увеличилась, а  $H_c(90^\circ; 270^\circ)$  уменьшилась.

Таким образом, проведя измерения коэрцитивной силы в произвольной точке исследуемой конструкции при разных углах намагничивания можно определить направления экстремальных изменений коэрцитивной силы. Зная значения коэрцитивной силы в экстремальных направлениях, можно определить направление напряжения. Напряжение сжатия будет действовать вдоль экстремального направления коэрцитивной силы с большим значением. Напряжение растяжения, наоборот, будет действовать

вдоль экстремального направления коэрцитивной силы с меньшим значением.

### Выводы

Экспериментально показана зависимость значений коэрцитивной силы от угла намагничивания в условиях упругих деформаций. Показано наличие направлений экстремальных изменений значений коэрцитивной силы. Это соосное ( $\alpha = 0^\circ; 180^\circ$ ), и поперечное ( $\alpha = 90^\circ; 270^\circ$ ) направления намагничивания относительно линии нагружения образца [2, 6]. Установлено, что по характеру изменения коэрцитивной силы в данных направлениях можно с достаточной точностью определить направление напряжений в металлоконструкциях. Полученные результаты наглядно демонстрируют зависимость магнитных свойств сталей от параметра их кристаллической решётки.

### Список литературы

1. Алексеев К.В., Добролюбов А.Н., Лебедев А.С., Мохнаткин Д.П. О возможности применения магнитного метода неразрушающего контроля для оценки напряженности и остаточного ресурса металлических силовых конструкций объектов наземной космической инфраструктуры // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. – 2015. – март (№ 646). – С. 124–127.
2. Бакунов А.С., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е. Магнитный контроль: учеб. пособие. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 192 с.
3. ГОСТ 19693-74 Материалы магнитные. Термины и определения. – Введ. 1975-07-01.- М.: Государственный комитет СССР по стандартам. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 32 с.
4. ГОСТ 20906-75 Средства измерений магнитных величин. Термины и определения. – Введ. 1975-06-10. – М.: Государственный комитет стандартов совета министров СССР: Изд-во стандартов, 1975. – 10 с.

5. Клюев В.В., Мужичкий В.Ф., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е. Магнитные методы контроля. – М.: Машиностроение, 2006. – 848 с.

6. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. Неразрушающий контроль и диагностика. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.

7. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности: учеб. пособие. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 187 с.

8. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М.: Наука, 1993. – 252 с.

9. Полупан А.В. Диагностирование технических объектов. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 294 с.

### References

1. Alekseev K.V., Dobrolyubov A.N., Lebedev A.S., Mohnatkin D.P. O vozmozhnosti primeneniya magnitnogo metoda nerazrushajushhego kontrolja dlja ocenki naprjazhennosti i ostatochnogo resursa metallicheskih silovyh konstrukcij obektov nazemnoj kosmicheskoj infrastruktury // Trudy VKA imeni A.F. Mozhajskogo. 2015. mart (no. 646). pp. 124–127.

2. Bakunov A.S., Gorkunov Je.S., Shherbinin V.E. Magnitnyj kontrol: ucheb. posobie. M.: Izdatelskij dom «Spektr», 2011. 192 p.

3. GOST 19693-74 Materialy magnitnye. Terminy i opredelenija. Vved. 1975-07-01. M.: Gosudarstvennyj komitet SSSR po standartam : Izd-vo standartov, 1986. 32 p.

4. GOST 20906-75 Sredstva izmerenij magnitnyh velichin. Terminy i opredelenija. Vved. 1975-06-10. M.: Gosudarstvennyj komitet standartov sojeta ministrov SSSR: Izd-vo standartov, 1975. 10 p.

5. Kljuev V.V., Muzhickij V.F., Gorkunov Je.S., Shherbinin V.E. Magnitnye metody kontrolja. M.: Mashinostroenie, 2006. 848 p.

6. Kljuev V.V., Sosnin F.R., Kovalev A.V. Nerazrushajushij kontrol i diagnostika. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 2003. 656 p.

7. Mahutov N.A., Gadenin M.M. Tehnicheskaja diagnostika ostatochnogo resursa i bezopasnosti: ucheb. posobie. M.: Izdatelskij dom «Spektr», 2011. 187 p.

8. Miheev M.N., Gorkunov Je.S. Magnitnye metody strukturnogo analiza i nerazrushajushhego kontrolja. M.: Nauka, 1993. 252 p.

9. Polupan A.V. Diagnostirovanie tehniceskikh ob'ektov. M.: Mashinosroenie-1, 2006. 294 p.